

中国材料大会 2024
暨第二届世界材料大会
CMC 2024 & WMC 2024

July 8-11, 2024
Guangzhou, China

D10-高分子材料
D10-Polymer Materials

Organized by

Chinese Materials Research Society

Website: <https://cmc2024.scimeeting.cn>

D10.高分子材料**分会主席：蹇锡高、王玉忠、张立群、李光宪、徐坚****D10-K01(Keynote)****新型杂环高性能工程塑料及其加工应用研发进展**

蹇锡高*

大连理工大学

D10-K02(Keynote)**高分子微纳米功能复合材料的先进制备加工**

王 琪*

高分子材料工程国家重点实验室（四川大学），四川大学高分子研究所

新能源、生物医用、电子通讯等高新技术领域发展迫切需要具有光、电、磁、生物医用等多功能的新材料和轻量、柔性、结构复杂的高分子功能器件，是高分子材料科学前沿，体现国家核心竞争力，需要解决两大关键问题：一是高性能微纳米功能复合材料规模化制备，二是功能器件的先进制造，制备传统加工方法难制备的轻质高性能多功能的结构复杂或微型的功能器件。

本文报告了我们团队建立和发展的高分子微纳米功能复合材料规模化制备及功能器件的先进制造加工技术：发明了固相剪切碾磨加工技术，可规模化制备具有目标功能的高分子功能复合材料，通过粉体球形化等技术实现了功能复合粉体、丝条和墨水的 3D 打印加工，制备了数种传统加工难以制备的形状复杂的高分子功能器件，如压电俘能器、柔性传感器、骨组织工程支架、电磁屏蔽器件、导热扇热风扇等，拓展了 3D 打印应用新领域；率先开展高分子微纳米功能复合材料微型加工，建立了先进的高分子材料微型加工平台，自主设计研制了微型加工专用模具，实现了功能复合材料的微型注塑加工，制备了毫米波射频同轴连接器微型绝缘子、微型齿轮、微型血管夹等传统加工难以制备的微型功能高分子器件；发明了超临界二氧化碳共溶剂发泡和珠粒微波选择性烧结技术等，制备了系列常规发泡技术不能制备的轻质、高强高韧、耐高温、多功能的高分子泡沫材料和制品，用于吸波隐身、阻燃等国防军工和国民经济重要领域。

D10-K03(Keynote)**全息塑料的先进制造与应用**

彭海炎，解孝林*

华中科技大学化学与化工学院

能量转换与存储材料化学教育部重点实验室

材料成形与模具技术全国重点实验室

国家防伪工程技术研究中心

全息塑料是一类基于激光全息技术制造的先进光学功能材料，通过在透明塑料薄膜中产生精细微纳结构存储光波的振幅、相位等全部信息，是高端防伪、柔性 3D 战术地图、先进增强现实(AR)/虚拟现实(VR)等前沿技术的材料基础，已成为塑料工业的新兴发展产业。高性能化、多功能化、工艺绿色化、装备智能化是其发展方向和当前面临的挑战。团队从化学原理出发，实施跨学科合作，基于材料体系、加工工艺、制造装备的持续创新，实现高光学品质全息塑料的高效制造与技术应用。主要包括：(1) 创制高光学品质的耐热耐磨全息塑料新体系，建成百万平米/年定位全息水转印花纸生产线，应用于国家外交签证防伪和高附加值玻璃瓶包装。(2) 发展 UV 深纹路模压工艺，建成 UV 模压全息模内转印生产线，开启全息塑料在家电、汽车等行业高附加值应用，赋予塑料制品高品质装饰效果和防伪功能。(3) 创制“光引发阻聚剂”，实现光聚合全息塑料非模压高效清洁制造，全息加工时间短至 10 s，结合高折射率液晶、无机纳米粒子等多相组分协同的材料体系创新，实现了宽视角高亮度近眼 VR/AR 显示。(4) 通过正交反应设计制造了真彩色、高环境可靠性的光聚合全息塑料，综合性能优于国际竞品，支撑了面向智能显示产品的研发与技术进

步。(5) 设计制造了我国首台且具有完全自主知识产权的全息打印装备—HG-I 型全息打印机, 为个性化、定制化、立体化、防复制的一证一码防伪标识及面向先进 AR/VR 技术的全息光学元件的高效打印奠定基础。

参考文献:

- [1] 解孝林; 彭海炎; 倪名立, 全息高分子材料. 科学出版社: 北京, 2020.
- [2] Wang, D.; Liu, S.; Wei, W.; Guo, H. X.; Zhang, Y.; Peng, H. Y.; Zhou, X. P.; Xie, X. L. *Macromolecules* 2024, 57, 2557.
- [3] 倪名立; 杨松; 周兴平; 彭海炎; 孙其民; 解孝林. *高分子学报* 2023, 54, 418.
- [4] 郭红喜; 姚铭; 赵晔; 彭海炎; 周兴平; 解孝林. *高分子学报* 2022, 53, 722.
- [5] Zhao Y., Zhao X. Y., Li M.-D., Li Z. A., Peng H. Y., Xie X. L. *Angew. Chem., Int. Ed.* 2020, 59, 10066.
- [6] Peng H. Y., Bi S. G., Ni M. L., Xie X. L., Liao Y. G., Zhou X. P., Xue Z. G., Zhu J. T., Wei Y., Bowman C. N., Mai Y.-W. *J. Am. Chem. Soc.* 2014, 136, 8855.

致谢: 国家自然科学基金项目(52233005、52122316、52073108)和国家重点研发计划(2023YFB3812404)资助。

D10-K04(Keynote)

柔性聚合物太阳电池印刷加工

陈义旺*

南昌大学高分子及能源化学研究院

有机太阳电池活性层异质结界面稳定性和相纯度以及缓冲层界面能级匹配和柔性透明电极等问题是发展柔性有机太阳电池的关键问题。基于高分子纳米复合材料界面科学问题, 围绕器件结构优化与印刷制备应用, 实现印刷制造柔性太阳电池。解决从旋涂到大面积印刷的转化, 解决柔性透明电极湿法印刷加工, 解决柔性有机太阳电池印刷活性层形貌及界面调控问题, 解决柔性太阳电池稳定性及耐弯折问题。

提出利用层层印刷制备准平面异质结概念, 通过界面粗化实现垂直相分离, 阐述了分子静电势可以作为有效构建垂直相分离新策略。通过“三元问题二元化”解决了复杂三元组分形貌难以控制问题, 回答添加剂在层层印刷过程中形貌演变角色作用, 分析了准平面异质结光场利用率问题和力学中性面问题, 实现高品质因子的半透明太阳电池和柔性太阳电池。针对有机太阳电池活性层在实验室旋涂工艺和大面积制备印刷工艺中形貌演变的差异, 提出了柔性有机太阳电池活性层形貌演化的转换因子和大面积制备工艺, 提出了解决旋涂工艺到印刷工艺中能量损失补偿问题。针对绿色溶剂溶解性较差, 提出高剪切冲量实现活性层分子链剪切取向, 同时利用印刷模头梳型化处理, 添加高沸点溶剂策略, 调控毛细流和马拉高尼流, 有效抑制大面积印刷过程中咖啡环效应。

关键词: 聚合物太阳电池; 形貌演变; 界面工程; 透明电极; 印刷加工

D10-K05(Keynote)

极限厚度塑料薄膜定构加工

李润莱, 王梓睿, 傅强*

四川大学高分子科学与工程学院, 高分子材料工程国家重点实验室

定构加工代表着现代高分子加工的发展方向, 定构加工不仅要精密控制制品的外部尺寸和形状, 更要控制制品的内部结构, 其核心是要通过加工的方法, 把所需要的结构转移到制品中, 获得优异的性能或功能。塑料薄膜在工业上具有广泛而重要的应用, 它的发展趋势是向着更薄更强方向发展。然而目前工业上广泛使用的薄膜, 厚度在一个微米以上, 进一步减小薄膜厚度, 面临着热力学稳定, 需要很强的分子内作用力, 而动力学打薄, 需要较高的流动性之间的矛盾。本报告以超高分子量聚乙烯的超薄膜的制备为例, 阐述定构加工的重要应用, 首先选用分子量大小和加入小分子溶剂, 来定制聚乙烯分子链的缠结密度, 找到了实现最大拉伸比的加工窗口, 进一步向食品加工学习, 采用多步小幅间歇式拉伸的方法, 将松弛引入拉伸过

程来修复减薄产生的缺陷，定制高度取向的纤维网络结构稳定超薄膜，成功制备了厚度低至 15 纳米的超薄膜。这个厚度差不多是塑料薄膜能够稳定的极限厚度。制备的多孔超薄膜 具有优异的力学强度，亲水性，自粘附性，可望在生物医用，微电子，核聚变点火夹持膜等方面得到应用。

D10-K06(Keynote)

特种结构膜材料制备与应用研究进展

张秋禹*

西北工业大学

当代科学技术的进步推动了我国航空航天领域的快速发展。复合材料作为航空航天设备的主要构筑单元，成为当下基础材料研究领域的重要对象。当前，复杂应用环境对航空航天设备材料提出了更高、更全面的性能需求，即兼具高强高模和多功能性（高温隔热、防火、红外隐身等）。传统的航空航天材料可实现单一功能的集成，但复合方法带来的界面问题制约了多功能材料的实际应用，无法实现材料结构功能一体化，以满足航空航天设备在复杂工况下服役需求。因此，开发轻质、高强高模、多功能性的结构功能一体化纳米复合材料成为当前研究的重中之重。

本课题组针对航空航天材料多功能性的需求，基于仿生材料组装策略，研制出了一系列高强度的结构功能一体化多功能纳米复合材料。具体包括以下：（1）通过合理调控再质子化程度成功构筑了具有强界面氢键作用、致密且高度取向有序层状结构的 ANF/MXene 薄膜。该 ANF/MXene 薄膜具有极低的红外发射率（0.16），因此表现出卓越的红外隐身性能，即热伪装范围宽至 50-200°C、平均辐射温度降低可达 139°C（针对 200°C 的目标物体）和长效的红外隐身稳定性（15 天内热伪装性能无明显变化）。此外，该薄膜展现出卓越的力学性能：拉伸强度高达 190.8 MPa，韧性为 12.1 MJ·m⁻³；同时，其在 X 波段的电磁屏蔽效能为 40.4 dB。（2）利用质子供体介导组装策略设计并成功构筑了非对称 ANF/MXene 气凝胶膜，实现了较低的红外发射率（~0.3）和高温隔热的协同作用，因此非对称 ANF/MXene 气凝胶膜可以将 100°C 的目标表面辐射温度降低 40% 以上。与此同时，非对称 ANF/MXene 气凝胶膜展现出高达 1.33 ± 0.04 MPa 的拉伸强度和 44.39 ± 3.39 MPa 的杨氏模量，优于大多数气凝胶材料。此外，该气凝胶膜具有良好的焦耳热性能，即在 4 V 的驱动电压下，气凝胶膜可在 10 s 内稳态饱和温度达到 34.0°C，并保持长时间的稳定性，从而拓宽了其在红外隐身领域的应用。（3）受三明治结构的启发，设计了具有交替多层结构的 MMT/ANFs@MXene 纳米复合材料。优异的交替多层结构赋予纳米复合材料优异的机械性能（154.66 MPa，14.22%）和优异的 EMI 屏蔽效能值（58.4 dB）。同时，MMT/ANFs@MXene 纳米复合材料表现出优异的焦耳加热性能，具有快速的热响应、低驱动电压和长时间的温度稳定性，在仅 3V 的外加电压下可在 10 秒内达到 110°C。此外，纳米复合材料的防火保护性能提高了其安全性和可靠性，特别是燃烧 30 秒后，EMI 屏蔽效果保持在~34dB。

D10-01(Invited)

碳化聚合物点杂化光功能材料

杨柏*

吉林大学化学学院 超分子结构与材料国家重点实验室

聚合物光功能材料主要包括光学、发光、光电转换等方面^[1]。纳米复合与杂化是聚合物材料功能化和高性能化的有效方法^[2,3]，与无机纳米晶及石墨烯量子点杂化可以将聚合物材料的折射率提高到 1.9 甚至 2.0 以上^[4]。碳化聚合物点（CPDs）是一类具有聚合物特性新型碳点^[5,6]，具有低毒、易于制备等优点；CPDs 可通过多官能度单体、高分子、生物质及不饱和单体等为前驱体，经交联聚合、脱水碳化等过程来制备^[7,8]。基础研究主要是多区域发光 CPDs 的设计合成，相关发光机制探索等；应用研究主要包括发光、光电、生物标记与成像、药物、诊疗、检测、催化、能源、功能助剂等方面，而作为基元材料，CPDs 具有很好的材料相容性和加工性，在光功能材料方面具有广泛应用前景^[9,10]。

关键词：碳点、碳化聚合物点、复合与杂化、光功能材料

参考文献:

- [1]杨柏、吕长利、沈家骢, 高性能聚合物光学材料, 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [2] J. Y. Wang, & B. Yang et al., J. Am. Chem. Soc., 2002, 124, 13358
- [3] H. Zhang, & B. Yang et al., Chem. Soc. Rev., 2012, 41, 6066
- [4] C. L. Lü, & B. Yang et al., Adv. Mater., 2006, 18, 1188
- [5] S. J. Zhu, & B. Yang et al., Angew. Chem. Int. Ed. 2013, 52, 3953
- [6] C. L. Xia, & B. Yang et al., Adv. Sci. 2019, 6, 1901316
- [7] J. J. Liu, & B. Yang et al., Adv. Mater. 2020, 32, 1906641
- [8] J. J. Liu, & B. Yang et al., ACS Cent. Sci. 2020, 6, 2179
- [9] Q. S. Zeng, & B. Yang et al., Light: Science & Applications 2021, 10, 142
- [10] Z. C. Zhu, & B. Yang et al., Adv. Funct. Mater. 2024, 34, 2312774

D10-02(Invited)

绿色印刷自组装聚合物光子晶体及应用

宋延林*

中国科学院化学研究所

光子晶体由于其折光指数周期性变化而具有光子禁带, 从而具有独特调控光的能力, 将聚合物材料引入到光子晶体结构中制备多功能性的光子晶体逐渐成为科学研究的热点。我们基于聚合物乳胶纳米颗粒的大规模制备与自组装精细控制, 发展了纳米颗粒自组装光子晶体涂层材料, 利用光子晶体结构色取代传统颜料、染料, 以非金属材料实现金属色制备。同时, 将绿色纳米印刷技术应用于功能性聚合物光子晶体的图案化制备, 并发展了一系列高性能的光学传感和检测器件。特别地, 通过精准控制微小液滴的成型打印过程, 基于全内反射光学微结构呈色的机理, 仅利用一种透明的高分子聚合物墨水, 便实现了全色系彩色像素点的精准制备, 为光子晶体的发展与应用提供了新的思路。

关键词: 聚合物光子晶体, 自组装, 绿色印刷, 纳米材料, 光学检测

D10-03(Oral)

驱动与传感一体化多功能材料的设计与应用研究

白永康*

空军军医大学, 口腔颌面系统重建与再生全国重点实验室

作为仿生软体机器人中最重要的功能器件, 柔性驱动器和传感器因其在智能医疗装置、人机交互、柔性电子以及航天航空等领域的巨大的应用前景而备受关注。但是目前有关柔性电子器件材料的研究主要集中于实现材料单独的驱动或传感功能, 同时也存在响应方式单一和能源续航等问题, 难以满足实际应用对材料多功能化的需求。然而基于柔性驱动器与传感器完全不同的工作机制, 如何开发新型材料以协同实现其驱动与传感功能仍面临挑战。

本研究提出一种由离子液体改性氧化锌掺杂的多功能离子凝胶复合材料。当离子液体含量较高时, 由所制离子凝胶构建的应变传感器具有优异的应力传感性能, 可以用于设计各种电子器件。当离子液体含量较低时, 离子凝胶表现出了优异的形状记忆性能, 可用于构建温度报警器装置。该离子凝胶可作为电极材料用于构建摩擦纳米发电机 (TENG), 实现在能量收集、压力传感和人体运动检测中的应用。但上述离子凝胶的多功能性是基于离子液体含量的调控, 未在同一材料上实现。因此, 研究通过静电纺丝法制备了一种兼具多响应形状记忆驱动和自供电压力传感功能的纳米纤维复合材料。该材料具备优异的光响应形状记忆性能, 其形状固定率和形状回复率均可达 96% 以上, 同时也可将其与 PVDF 纳米纤维膜组装构造高输出性能的纤维基 TENG。而以其构筑的压力传感器, 具有较宽的检测范围 (0 - 65k Pa), 在低于 6.8 kPa 时的灵敏度可达 3.03 V kPa^{-1} , 能够实现在人体运动监测以及风速检测中的应用。

而为了进一步实现材料驱动与传感功能的一体化应用, 本研究通过模板法制备了一种多功能多孔复合材料。作为驱动器应用, 该多孔材料具有优异的热、光及水响应形状记忆性能。作为传感器应用, 通过构

筑多孔材料基 TENG, 使其既可以用作检测人体运动的压力传感器, 又可用作湿度传感器。此外, TENG 的输出性能可以利用多孔复合材料的形状记忆性能进行调整, 而 TENG 的自供电传感功能可以对驱动器的形状驱动过程进行自我监测。

主要参考文献:

- [1] Zhijian Zhou, Yongkang Bai*, Longzhang Niu, Chunzi Lv, Yuqi Li*, Lina Niu*. Chemical Engineering Journal, 2024,488,150982.
- [2] Yongkang Bai*, Zhijian Zhou, Qixuan Zhu, Shaorong Lu, Yuqi Li*. Leonid Ionov. Carbohydrate Polymers, 2023,313,120868.
- [3] Chunzi Lv, Zhijian Zhou, Yuqi Li*, Shaorong Lu, Yongkang Bai*. Chemical Engineering Journal, 2023, 477,147059.

D10-04(Oral)

基于二硫-双马来酰亚胺的超高耐热型交联高分子及其复合材料

陈茂*

中国工程物理研究院化工材料研究所

基于共价可适应网络 (CANs) 的动态交联高分子及其复合材料, 因具有可再加工、可拆解、可修复和可循环利用等优点, 已经得到了广泛的研究和关注。目前, 虽然非常多不同种类的动态交联高分子得到了开发, 然而能够在高温 (200~250°C) 及超高温 (>250°C) 下使用的仍然非常罕见。在此, 我们设计合成了高纯度的二硫-双马来酰亚胺 (BMS) 单体, 并分别设计制备了 BMS 自聚物以及 BMS-DB (烯丙基双酚 A) 共聚物。结果表明, BMS 自聚物具有优异的耐热性, 能够在 400°C 下仍然维持高模量的状态 ($E' > 1.0 \text{ GPa}$), 且可在巯基溶液中实现拆解。此外, 即使与柔性单体 DB 共聚后, BMS-DB 共聚物仍然表现出优异的耐热性, 其玻璃化转变温度 (T_g) 仍然保持在 ~275°C, 其在 325°C ($T_g + 50^\circ\text{C}$) 下的模量仍然达到 ~410 MPa, 且可被巯基溶液快速拆解。同时, 当 BMS-DB 树脂与碳纤维进行复合后, 碳纤维增强的 BMS-DB 共聚物能够展现出 ~305°C 的超高玻璃化转变温度, 且拆解树脂基体实现碳纤维循环利用之后, 复合材料的力学性能和玻璃化转变温度均能够完全恢复。上述基于二硫-双马来酰亚胺的超高耐热交联高分子及其复合材料有望拓展动态交联高分子在航天航空中极端高温环境下的应用。

D10-05(Oral)

热塑性聚氨酯/单宁酸复合材料的制备与应用研究

胡仕凯*、翟梦瑶、赵秀英

北京化工大学

热塑性聚氨酯 (TPU) 具有卓越的韧性、防水性和透明度等性能, 被广泛用于包装材料和其他应用。传统 TPU 原料通常来自不可再生的石油化工产品。另外 TPU 一般不具有荧光效应, 紫外屏蔽能力有限, 限制了 TPU 在包装等领域的拓展应用。本研究使用生物基聚三亚甲基醚乙二醇 (PO3G), 五亚甲基二氰酸酯 (PDI) 和 1,4-丁二醇 (BDO) 合成了 100% 生物基热塑性聚氨酯 (bio-TPU)。然后, 与生物基填料单宁酸 (TA) 共混制备全生物基 bio-TPU/TA 复合材料。对 bio-TPU 及 bio-TPU/TA 复合材料的结构和性能进行了系统评价。结果表明, 生物热塑性聚氨酯/TA 复合薄膜具有优异、可控的荧光和紫外线屏蔽性能。通过改变 TA 的份数和偶联剂, bio-TPU/TA 复合材料薄膜的荧光颜色可以调整为蓝色、绿色和黄色。此外, 随着 TA 份数的增加, bio-TPU/TA 复合材料在 400 nm 以下的紫外线透过率从 79.25% 降至 5.43%, 表明 bio-TPU/TA 复合材料具有优异的紫外线阻隔性能。因此, bio-TPU/TA 复合材料薄膜可用作创新型防伪材料和紫外线屏蔽保护膜。这项研究有望促进聚氨酯行业的可持续发展, 拓宽聚氨酯的高端应用领域。

D10-06(Invited)

液晶基智能材料的设计、制备及性能研究

杨槐

北京大学材料科学与工程学院

液晶是一种具有分子长程有序的软材料，其具有丰富的外场响应特性，能够在电、光、热、磁和压力等多种外场刺激下发生材料性质的可逆变化。近年来，液晶基智能材料的设计与开发成为了智能材料领域的国际研究前沿，在软体驱动器、智能调光膜等领域具有广阔的应用前景。

本研究团队近年来在液晶高分子软体驱动器和液晶基智能调光膜等领域取得了一系列研究进展。

现有液晶高分子软体驱动器的驱动依赖液晶分子有序度降低，开发在驱动过程中分子有序度不变的液晶高分子软体驱动器有望使其在形变过程中保持液晶的特性。研究团队通过设计和合成具有可交联官能团的光响应分子马达，并将其与可聚合液晶单体共聚，制备了可由分子马达驱动的液晶高分子软体驱动器。该驱动器的光响应形变是通过分子马达对高分子网络的扯动作用，而不会造成液晶有序度的降低。利用该新型光响应液晶高分子材料，构建了具有物体抓取、移动和释放等功能的光响应软体抓手和具有超高形变速率的光响应人工肌肉材料。

针对现有液晶调光膜无法同时实现低驱动电压和高力学强度的问题，研究团队利用非液晶性和液晶性光聚合单体在液晶中反应速度的差异，通过二次光固化方法，构筑了兼具高分子分散液晶（PDLC）和高分子分散液晶（PSLC）结构的高分子分散与高分子稳定液晶共存（PD&SLC）体系。该新型材料兼具 PDLC 优异的大面积加工性能和 PSLC 优异的电-光特性。在此基础上，通过液晶材料的分子结构设计、组成和相态调控、PD&SLC 的微结构精确构筑，制备了系列智能调光膜等。这些薄膜在建筑节能、汽车智能门窗、低温存储和冷链运输、显示等领域具有广阔的应用前景。

关键字：光响应；分子马达；软体驱动器；液晶/高分子复合材料；智能调光膜

参考文献：

- [1] Jinying Bao, Huai Yang*, et al. Shape-programmable liquid-crystalline polyurethane-based multimode actuators triggered by light-driven molecular motors. *Adv. Mater.* 2023, 35: 2302168.
- [2] Ruochen Lan, Huai Yang* et al., Light-driven liquid crystalline networks and soft actuators with degree-of-freedom-controlled molecular motors, *Adv. Funct. Mater.*, 2020, 30(19), 2000252
- [3] Shumeng Guo, Huai Yang* et al., Preparation of a thermally light-transmittance-controllable film from a coexistent system of polymer-dispersed and polymer-stabilized liquid crystals, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2017, 9(3), 2942-2947

D10-07(Invited)

聚酰亚胺膜的结构设计及其气体筛分特性

张清华*

东华大学

聚酰亚胺材料凭借其耐高温、化学稳定性和机械性能好、气体分离选择性优异等优势吸引了学术界及工业界的广泛关注。目前已经商业化的聚酰亚胺气体分离膜在热稳定性上已基本能够满足应用要求，但是它们的气体渗透通量普遍较低，分离效率较差，难以适应工业上对高性能气体分离膜材料的迫切需求。近年来我们从分子结构设计角度出发，通过协同引入大体积侧基、咪唑化处理、构筑超薄膜、制备中空纤维复合膜等策略，制备了一系列分离性能优异的聚酰亚胺气体分离膜。结合分子模拟、结构表征、性能测试等手段揭示了不同分离膜的构效关系，为高通量、高选择性新型聚酰亚胺气体分离膜的开发提供了研究基础。合成了含有 TB 结构的二胺和含有大体积侧基的二胺，通过共聚制备了含有不同官能团的聚酰亚胺气体分离平板膜，展现出良好的热稳定性，力学性能和气体分离性能。当 CF_3 基取代时，聚酰亚胺分子链的堆积较为松散，膜自由体积变大，气体分子的扩散系数变大， CO_2 理想气体渗透通量和 CO_2/CH_4 选择性分别达到 187.1 Barrer 和 30.7，在气体分离领域具有了一定的应用潜力。通过干湿法纺丝制备了中空纤维膜，所得到的中空纤维复合膜断裂强度达到了 32.5 MPa， JCO_2 达到 86 GPU， CO_2/CH_4 达到了 35.8，超过一般商业化的中空纤维气体分离膜。

D10-08(Oral)

近极限厚度（20 纳米以下）聚乙烯极薄膜拉伸加工原理

李润莱*、傅强

四川大学 高分子科学与工程学院

物质在趋近准二维尺寸时，呈现出异于其宏观形态的新性质，该现象的研究将深化对材料学及低维物理学的理解。但准二维化研究极少关注以聚乙烯为代表的工程高分子，同时后者加工至准二维化尺寸也极为困难。目前，聚乙烯膜材厚度难以突破 5 微米的瓶颈，距离二维化尺寸（200 纳米）相差甚远。进一步减薄十分困难，因为在超薄尺度上材料加工性和稳定性之间的存在矛盾。针对该问题，报告人基于创新的加工理论和工艺，制备厚度仅为 12 纳米的自立式聚乙烯膜，接近聚乙烯加工能力的理论极限。

这一突破是通过两个方面实现的：一是初步确定了聚乙烯极薄膜的可加工窗口——通过精细调节聚合物链的缠结密度；二是创新地在拉伸过程中首次引入了一个松弛阶段，在动力学上稳定拉伸过程中的超薄膜。我们将这一方法称为小振幅多间隔拉伸（SAMIS），其中包括周期性拉伸阶段和松弛间隔。SAMIS 有效兼顾了加工性与稳定性，实现了用传统加工方法无法实现的极薄膜的大面积生产。

由此产生的 12 纳米聚乙烯膜表现出了卓越的机械性能，包括 113.9 GPa/(g/cm³) 的超强机械强度和接近 10 亿的长宽比。这些膜还表现出了独特的物理特性，如异常的界面特性和自适应性，使它们能够无缝地粘附到复杂的表面，包括人体皮肤。这些特性对于传统膜失败的应用至关重要，例如创建可以与身体轮廓相适应的透气超薄表皮传感器和支持核聚变点火结构，在这些应用中，材料的韧性和最小厚度至关重要。本研究对于理解高分子超薄限域现象，提供了一种平台材料、一整套系列表征分析方法，以及超薄隔膜构效关系的新视角解读。

D10-09(Oral)

“液滴成膜”——基于液滴超铺展的高分子薄膜制备新技术

张鹏超*

武汉理工大学

高性能高分子薄膜在国家战略新兴产业中发挥着至关重要的作用，是电池隔膜、污水处理、海水淡化等膜组件高效运行的关键。目前，高分子薄膜的规模化制备以溶液法为主，其中高分子溶液在基材表面的可控铺展是精确调控膜厚度、形貌、结构等性质的关键控制步骤，也是表界面化学领域亟待解决的基本科学问题之一。传统制膜方法，包括刮涂/流延、旋涂等，均是通过施加外力来促进液滴铺展，存在能耗高、液膜不可控等问题，在高性能薄膜理化性质精准调控方面（如超薄、多层等）存在一定局限性。因此，亟需开发高分子物薄膜制备新技术以满足国家战略新兴产业对高端膜材料的重大需求。

围绕上述重大需求，我们提出了基于限域界面液滴超铺展的高分子薄膜制备新策略。主要内容：（1）“滴液”新原理：利用液相压力和凝胶材料准液态特性的协同作用，通过构筑液/凝胶限域界面实现了液滴超铺展；（2）“滴液成膜”新技术：利用超铺展形成的均匀稳定限域液层，开发了高分子薄膜可控制备新技术；并利用液滴超铺展产生的快速剪切流体，发展了二维纳米材料快速层状有序组装新技术；实现了一系列高性能高分子薄膜的可控制备。

D10-10(Oral)

聚酰亚胺薄膜材料结构与热尺寸稳定性关系的探讨

王金可*

中国石油石油化工研究院

聚酰亚胺（PI）是目前世界上性能最好的超级工程高分子材料之一，其具有高绝缘性、优良的机械性能、能同时耐高低温、耐辐照、高阻燃以及高稳定性等特点。PI 薄膜由于其能最好的与现代电子工业加工工艺相匹配，是应用于制造生产柔性印刷电路板（FPC）和覆铜板（FCCL）的主要材料，并被认为是现代

微电子行业的基石。而尺寸稳定性成为电子级 PI 应用的关键指标，因此探讨 PI 薄膜结构与尺寸稳定性之间的内在关系，合成高尺寸稳定性、热性能以及力学性能优异的 PI 薄膜是必要的。本工作涉及单体、浆料、成膜的全过程，从优化工艺到产品评价表征，同时结合分子模拟等分析手段，旨在得到符合指标的 PI 薄膜产品，为开辟新工艺以及工业化生产提供理论支持和数据参考。

D10-11(Invited)**三螺杆挤出技术研究进展**

何和智*

华南理工大学

随着对共混物性能要求的提高，单、双螺杆挤出加工已不能很好满足工业要求。常规同向三螺杆挤出机通过增加啮合区面积以强化混合性能，依旧为剪切塑化为主的机理，性能得到一定提升。因此，有必要通过改变挤出机塑化机理来提高混合性能。小振幅同向三螺杆挤出机在中间主螺杆上叠加一个振动力场，主螺杆轴向振动时啮合间隙周期性变化，实现振动剪切塑化混炼。小振幅的振动对共混物性能的提升有限，有必要提高挤出机的振动强度来强化混炼，并且做到在线调控加工工艺。大振幅平衡式三螺杆挤出机，利用螺杆系的对称结构和两端喂料来消除螺杆端部轴承受力，使中间螺杆能大幅轴向振动，并实现剪切-拉伸耦合的复杂流场，但是其拉伸流场占比较小。双向三螺杆挤出机中同向啮合区内产生剪切流场，异向啮合区内产生拉伸流场，不但提高了拉伸流场的占比，还实现剪切-拉伸交变流场的协同作用。因此，双向三螺杆挤出机将为塑料改性加工提供新方法、新设备。

D10-12(Invited)**橡胶交联结构与非线性流变行为**

宋义虎*

浙江大学

采用助剂调控过氧化物硫化的橡胶胶交联网络，研究溶胶含量与交联密度对 Payne 效应的影响以及粒子相与交联网络对应变软化行为的贡献。采用硫键裂解实验和热孔隙法考察硫化剂比例对硫键类型的调控效果及硫键类型对网络不均匀性和材料 Mullins 效应的影响，将双-[g-(三乙氧基硅)丙基]四硫化物(Si69)引入异戊橡胶(IR)纳米复合材料交联网络，考察网络结构、粒子-基体界面相互作用、粒子相含量对应变软化行为的贡献。发现 Payne 效应由有效弹性网链黏弹性变形所引起的，与橡胶基体的 Rouse 动力学有关。复合材料的应变软化行为主要由黏弹性基体决定，而填料粒子会放大微观应变并提供额外的摩擦损耗。

D10-13(Oral)**暴露不同数量(101)晶面的 TiO₂ 对 PET 性能影响的研究**

郑蕊，罗发亮*

宁夏大学

经纳米填料改性的聚合物材料同时具有有机材料和无机材料的优点，因其结合了有机相的柔韧性和无机相的强度，为探索传统材料以外的新功能提供了绝佳的机会^[1]。纳米二氧化钛(TiO₂)因具有粒径小、良好的光催化性能、化学惰性、无毒、成本低等性质，常常用于传统聚合物材料的功能化改性^[2]。值得一提的是，复合材料的性能受基体和填料之间的界面性质的影响^[3]。近年来，对纳米粒子表面结构(特别是特定面)进行处理以改善复合材料性能的研究方法受到了研究者的广泛关注。然而，纳米粒子暴露不同数量的晶面对纳米复合材料性能的影响尚未引起注意。因此，探究暴露不同数量(101)晶面 TiO₂ 对 PET 性能影响具有重要意义与实用价值。

本研究基于将两种暴露不同数量(101)晶面的 TiO₂ 和 PET 进行熔融共混，重点讨论了暴露不同数量(101)晶面的 TiO₂ 对 PET 结晶和冲击性能影响。随着 TiO₂ 暴露(101)晶面的增加，PET 的结晶温度升

高更多, 成核密度更大, 结晶速率更快, 晶粒更加细化, 韧性提高更多, 在 PET 中添加 0.3 wt% 的 TiO_2 , 暴露 (101) 晶面更多的 TiO_2 (记作 P- TiO_2) 使 PET 结晶温度提高 6°C , 球晶尺寸减小且密度增大, 成核效率最高可达到 36.57%, 等温结晶半结晶时间缩短至 0.28, 冲击强度达到 5.9 kJ/m^2 ; 而暴露少量 (101) 晶面 TiO_2 (记作 NP- TiO_2) 仅使 PET 结晶温度提高了 3°C , 球晶尺寸减小且密度增大, 成核效率最高仅达到 22.25%, 等温结晶半结晶时间缩短至 0.48, 冲击强度达到 4.7 kJ/m^2 。这主要是由于暴露 (101) 晶面较多的 TiO_2 的极性与 PET 接近, 表面能高更需要表面能低的 PET 降低其表面能。

参考文献:

- [1] M.Z. Rong, M.Q. Zhang, W.H. Ruan, Surface modification of nanoscale fillers for improving properties of polymer nanocomposites: A review, *Materials Science and Technology* 22(7) (2006) 787-796.
- [2] L. Sun, J. Guan, Q. Xu, X. Yang, J. Wang, X. Hu, Synthesis and Applications of Molecularly Imprinted Polymers Modified TiO_2 Nanomaterials: A Review, *Polymers*, 2018.
- [3] C. Cazan, A. Enesca, L. Andronic, Synergic Effect of TiO_2 Filler on the Mechanical Properties of Polymer Nanocomposites, *Polymers*, 2021.

D10-14(Oral)

多孔性金属超分子聚合物的构效关系研究

张明鑫*

海南大学

由于传统超分子单元具有过快的配体交换速率, 导致超分子聚合物通常表现出快速松弛的性质, 这大幅度限制了超分子聚合物的运用。我们团队近期研究表明, 金属-有机配位纳米笼结构却具有反常的、室温超慢速的配体交换特性^[1]。基于纳米笼制备的星形金属超分子聚合物 (Metallo-supramolecular Polymers, MSPs) 具有特殊内层受限, 外层自由的多层级结构^[2]。这种特殊结构大幅度限制了纳米笼的配体交换动力学速率, 使其表现出对数时间线性交换的特征。此外, 我们研究表明铜纳米笼具有迥异的热活化配体交换行为——低温 (室温以下) 几乎完全抑制, 高温快速交换 ($>120^\circ\text{C}$)。这种现象与传统的金属-有机配位单元的配体交换行为具有明显的差异, 更类似于共价动态键。为此, 基于这种热活化的动态交换行为, 我们开发出了一种简易的杂臂星形聚合物的可逆杂化和分选策略^[3], 在高温条件形成杂臂结构, 在低温环境维持结构稳定^[4]。基于上述 MSPs 的动态交换行为研究, 申请人提出构建纳米笼基金属超分子聚合物, 开发具有慢速松弛特征的 MSPs, 赋予超分子聚合物新的力学特性 (尺寸稳定性等)^[5], 该类型材料表现出类似与 vitrimer 的室温热固性、高温再加工性。这些研究成果有助于指导开发出一批新型慢松弛型 MSPs, 拓展超分子聚合物的功能与应用场景, 加速超分子聚合物领域发展。

参考文献:

- [1] Zhang, M.; He, S.; Zou, Q.; Li, Z. A.; Lai, Y.; Chen, K.; Ma, L.; Yin, J. F.; Li, M.; He, C.; Ke, Y.; Yin, P., Unique Dynamics of Hierarchical Constrained Macromolecular Ligands on Coordination Nanocage Surface Promotes Facile and Precise Assembly of Polymers. *J. Phys. Chem. Lett.* 2021, 12 (22), 5395-5403.
- [2] Zhang, M.; Lai, Y.; Li, M.; Hong, T.; Wang, W.; Yu, H.; Li, L.; Zhou, Q.; Ke, Y.; Zhan, X.; Zhu, T.; Huang, C.; Yin, P., The Microscopic Structure-Property Relationship of Metal-Organic Polyhedron Nanocomposites. *Angew. Chem., Int. Ed.* 2019, 58 (48), 17412-17417.
- [3] Lai, Y.; He, X.; Xue, B.; Li, M.; Wang, H.; Huang, W.; Yin, J. F.; Zhang, M.*; Yin, P. *, Modulating Ligand-Exchange Dynamics on Metal-Organic Polyhedra for Reversible Sorting and Hybridization of Miktoarm Star Polymers. *Angew. Chem., Int. Ed.* 2023, 62 (49), e202311954.
- [4] Wu, X.; Li, C.; Zhang, Z.; Cao, Y.; Wang, J.; Tian, X.; Liu, Z.; Shen, Y.; Zhang, M.*; Huang, W.*, Nitrogen-doped Microporous Graphite-enhanced Copper Plasmonic Effect for Solar Evaporation. *Carbon Energy* 2024, e466.
- [5] Zhang, M.; Yu, H.; Zou, Q.; Li, Z.-A.; Lai, Y.; Cai, L.; Yin, P., Unique Ligand Exchange Dynamics of Metal-Organic Polyhedra for Vitrimer-like Gas Separation Membranes. *CCS Chem.* 2022, 4 (11), 3563-3572.

D10-15(Oral)

水凝胶辅助微流控纺丝技术制备硅橡胶纤维及其应用研究

赵国旭^{*1}, 王东¹, 徐峰²

1. 海南大学

2. 西安交通大学

随着生物材料和生物电子的发展,可拉伸聚合物纤维受到研究者的广泛关注。然而,其大规模生产和应用仅局限于可纺弹性体聚合物。对于一大类性质优异但缺乏可纺性的弹性体聚合物,例如以聚二甲基硅氧烷和 Ecoflex 为代表的硅橡胶,难以进行纤维量产,这极大地影响了该类聚合物纤维的选择偏好和应用潜力。因此,研发适用于这类聚合物的纺丝技术具有重要意义。本工作采用同轴微流控纺丝体系,将硅橡胶预聚物包裹于海藻酸水凝胶纤维内部,在其交联后溶解水凝胶外壳,成功制备得到了连续且高品质的硅橡胶纤维,并深入揭示了纺丝过程的影响因素和成型机制。该技术普适于各类硅橡胶,纤维直径调控范围广(0.05~4 mm),且能够通过缠绕塑形法或液体绳卷效应制备得到可拉伸性极强的硅橡胶螺旋纤维。进一步,探索了硅橡胶纤维用于构筑可穿戴纤维电子器件的实现策略和应用潜力。该技术及所制得的硅橡胶纤维将极大地促进新型可拉伸纤维的研发和应用。

D10-16(Oral)

高强高韧 PBAT-PLA 共聚物的结构调控与性能研究

湛瑞, 杨科珂*

四川大学化学学院

环保型高分子材料国家地方联合工程实验室

教育部环境与火安全高分子材料协同创新中心

环境友好高分子材料教育部工程研究中心

在当今可生物降解材料应用市场中,聚乳酸(PLA)和聚(己二酸对苯二甲酸丁二酯)(PBAT)是两类应用最为广泛的材料。然而,PLA 虽然强度高但韧性较差;而 PBAT 则具有优异的韧性但强度不够理想。因此,结合两者优势以开发高强高韧的新材料成为重要发展趋势。共混是最简单高效的改性方法之一,但是由于 PLA 和 PBAT 之间的相容性差,导致了共混物力学性能较差,无法满足应用需求。为解决这一问题,本工作选择了一种高反应活性的多官能度环氧扩链剂(EE),以商业化 PLA 和 PBAT 为原料,通过具有高剪切混合效率的反应容器制备出一系列具有不同组成的 PLA-PBAT 共聚物。在线流变分析显示,加入 EE 后反应体系黏度增加,且 GPC 测试结果表明产物分子量增加,表明 PLA 和 PBAT 之间发生了扩链反应。从材料微观形貌来看,EE 的加入有效改善了 PLA 和 PBAT 之间的界面相互作用,极大地降低了相分离尺寸。力学性能测试结果显示,通过合理调控共聚组成和 EE 含量,可实现材料强度和韧性的有效平衡。当 EE 含量为 2.5 wt%时,材料的抗拉强度和断裂韧性分别达到 47.6 MPa 和 229 MJ/m³,与 PLA/PBAT 共混物相比,分别增加了 47%和 34 倍。从其拉伸断面观察来看,材料实现了从脆性断裂到韧性断裂的转变。

关键词: PLA, PBAT, 环氧扩链剂, 增强增韧

参考文献:

[1] Yan Zhao, Bohua Zhao, Bolei Wei, Yanxia Wei, Jinrong Yao*, Huiliang Zhang, Xin Chen, Zhengzhong Shao, Enhanced compatibility between poly(lactic acid) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) by incorporation of N-halamine epoxy precursor, Int. J. Biol. Macromol.2020,165,460-471.

[2] Xin Wang, Shaoxian Peng, Hao Chen, Xiaolei Yu, Xipo Zhao*, Mechanical properties, rheological behaviors, and phase morphologies of high-toughness PLA/PBAT blends by in-situ reactive compatibilization, Compos Part B-eng. 2019, 173, 107028

D10-17(Invited)

弹性体多层次网络的构建及其作用机制研究

吴锦荣*

四川大学

弹性体因其独特的高弹性等物理机械性能，在交通运输、先进电子、油气开采和国防军工等领域中发挥着无可替代的作用。这些物理机械性能不仅与弹性体分子结构紧密相关，更取决于其多层次网络结构。为了理解不同层次网络的作用，学术界针对链缠结和交联网络分别建立了管道模型和分子统计理论，以解释它们各自对材料物理机械性能的贡献。然而，在目前的认知中，弹性体的链缠结与多重交联网络有何协同作用，如何调控这种协同作用实现弹性体的高性能化等问题仍不清楚。这种认知的缺失严重限制了弹性体高性能化策略的发展，导致其无法满足部分先进领域的应用要求。针对这一现状，成功揭示了天然橡胶中链缠结、端基络合网络和共价交联网络协同促进应变诱导结晶、能量耗散和裂纹钝化的作用机制；据此提出构筑和调控链缠结与多重交联网络协同作用的新策略，实现天然橡胶、抗冲弹性体以及粘弹性颗粒的高性能化。基于创新的网络结构设计，制备的高性能材料已在折叠手机、文物保护和石油开采领域规模应用。

D10-18(Invited)**超分子弹性体：分子设计与宏观机械性能的创新调控**

王旭*

山东大学

超分子弹性体通过在分子层面精细调控与宏观物理性质的卓越表现相结合，为高分子材料科学领域开辟了新的研究方向。这类材料展示出诸如自修复、可重塑性和响应性等独特性质，为设计新型高性能材料提供了广阔的可能性，尤其是在可持续性和环境友好性方面。我们研究团队专注于通过分子设计来调控超分子相互作用，从而优化超分子弹性体的机械性能。具体来说，我们提出了错配超分子增韧理论，成功地开发了具有超强韧性、可修复及可循环利用性的超分子聚合物。通过我们的优化制备技术，所得的热塑性超分子弹性体的韧性达到了 1.2 GJ/m^3 ，这一数值在同类材料中处于领先地位。该材料已成功应用于高端运动装备的制造。此外，我们还开发了混合软段技术，有效调控了超韧热塑性弹性体的硬度。这种材料不仅具有可调控的硬度和高韧性，还展现出良好的抗冲击性能和可循环利用能力。其潜在的应用前景广泛，包括航空航天和医疗器械等领域。这些创新的研究成果标志着我们在超分子弹性体设计与应用方面取得的重要进展。

D10-19(Oral)**具有高效压电能量转换效率的离子导电高分子弹性体**

雷周玥*

东华大学

传统压电材料可将机械能转化为电能，对自供电系统中的能量收集和人机交互至关重要。但是无机/有机小分子材料的晶体结构中电荷运动能力有限，产生的压电电流较小，而基于离子压电效应的离子导电高分子材料由于较高的离子电导率和均相结构，往往能够产生较高的离子压电电流，也具有更高的可拉伸性。然而，均相结构通常会耗散应力而不是集中应力，使得其难以诱导局部电荷进行分离。这导致目前离子压电材料在压力下产生相对较低的电压响应，限制了电压增量而降低了变形期间的能量转换效率。针对上述问题，实验设计了一种基于微相分离和中间层界面结构的离子导电高分子弹性体。通过离子液体（IL）和离子塑料晶体（IPC）的合理组合，形成一种具有中间相的微相分离结构。这种方法通过硬相间的应力集中促进电荷分离，同时利用连接异质相的中间相促进离子电荷的高流动性。这种离子导电高分子弹性体实现了约 6.0 mV kPa^{-1} 的高压电系数，比目前的离子压电凝胶提高了近 60 倍，比目前的离子压电水凝胶提高了三倍多， $1.3 \text{ } \mu\text{W cm}^{-3}$ 的最大输出功率密度达到了新高度。同时，离子导电高分子弹性体还具有高拉伸性、强韧性和快速自我修复能力，突显了其在实际应用中的潜力，为其用于人机交互的离子电子系统提供

新的解决方案。

D10-20(Oral)

离子导电弹性体的应变硬化特性调控及其在智能传感中的应用

吕晓林*

福州大学

离子导电弹性体由于其固有的可拉伸性和优异的电学性能而成为离子皮肤和可穿戴设备的理想材料。尽管在这一领域不断努力,但由于分子间相互作用有限,仍然无法制备应变硬化、坚韧而柔顺的离子弹性体,限制了其在实际应用中的可靠性和耐久性。受真皮中交织的胶原纤维网络和非共价相互作用的启发,我们通过在高度纠缠的网络中引入金属-氧相互作用,制备了一种具有明显应变硬化行为、高韧性和弹性的可拉伸离子弹性体。由于非共价相互作用的动态可逆性,该离子导电弹性体还具有自愈能力、高粘附性和环境耐受性。所制备的离子皮肤对温度和应变具有敏感而稳定的响应。

D10-21(Oral)

基于聚合诱导相分离的聚氨酯/硅橡胶弹性体的制备及性能研究

于冰*, 田明

北京化工大学

为了解决传统的聚氨酯/硅橡胶橡塑共混热塑性弹性体相态不够精细的问题,基于聚合诱导相分离的方法,我们将硅橡胶溶于合成聚氨酯材料所需的单体中,利用聚氨酯预聚过程中,体系的分子量逐渐增大,使其与硅橡胶的相容性逐渐变差,从而发生相分离,形成海岛相结构,并通过交联剂交联硅橡胶相,获得以聚氨酯为连续相,交联的硅橡胶为分散相的复合材料,通过改变体系中聚氨酯的预聚时间和硅橡胶所占比例,还可以控制所得材料中硅橡胶相的相态精细程度,其相尺寸可低至 $0.37\ \mu\text{m}$ 。所得材料的拉伸强度可达 $15.2\ \text{MPa}$,断裂伸长率可达 474% ,拉伸永久形变可低至 11.2% ,同时材料还保留原有的热塑性聚氨酯的可重复加工性能。这一研究为制备高强度、高弹性、体感相容性好的聚氨酯/硅橡胶热塑性弹性体提供了一种创新可行的解决方法。

D10-22(Oral)

多重/双向形状记忆聚酰胺弹性体及其 4D 打印

李震^{1,2}, 张袁铖^{*1,2}, 付鹏^{1,2}, 庞新厂^{1,2}, 刘民英^{1,2}

1. 郑州大学材料科学与工程学院

2. 河南省先进尼龙材料及应用重点实验室

针对当前 4D 打印中形状记忆聚合物(SMPs)材料存在的功能单一以及打印制品力学性能不足等诸多挑战,本研究成功合成了一种具备多重动态键的自修复、形状记忆、可重构热塑性聚酰胺弹性体(sPUUA),并将其应用于 4D 打印鞋垫,以实现足弓矫正。该弹性体的制备采用了端异氰酸酯基的聚氨酯预聚物(OPU)和端氨基的聚酰胺 1212(PA1212)为原料,通过双螺杆挤出机反应挤出制备而成,具有简化合成工艺、缩短反应周期等显著优势。sPUUA 的动态共价交联网络(CANs)在不平衡条件下(如热、催化剂等)可发生拓扑重排,表现出独特的粘弹性和固态塑性。基于 sPUUA 的多重动态键,实现了 4D 打印制品的自修复、形状记忆和可重构等特性,赋予 4D 打印足弓矫正鞋垫优异的特性。实验结果表明,在 $150\ ^\circ\text{C}$ 、 $30\ \text{min}$ 条件下,sPUUA 的自修复效率达到了 69% ;同时可实现单向多重和可逆双向形状记忆,其初始形状在 $150\ ^\circ\text{C}$ 下可永久变形。此外,sPUUA 中引入多重动态键减少了打印制品的翘曲并有效改善了其力学性能和打印精度,同时具备自修复、形状记忆、可重构和可回收等多功能特性,在多功能转换器、生物医学、软体机器人和航空航天等领域具有潜在应用前景。

D10-23(Invited)

基于阴离子杂化共聚反应的高性能海洋防污材料

张广照^{1*}, 杨宏军², 马春风¹, 谢庆宜¹, 潘健森¹

1. 华南理工大学

2. 常州大学

杂化共聚是指具有不同可聚合基团的两种或两种以上单体的共聚反应。2012 年, 本实验室以有机碱为催化剂, 首次实现了乙烯基单体和环酯单体的杂化共聚。该反应活性中心为阴离子, 融合了乙烯基连锁聚合和开环聚合反应的机理, 故称阴离子杂化共聚反应。2023 年, 我们又实现了丙烯酸酯类单体与单质硫的阴离子杂化共聚, 其为乙烯基逐步加成聚合与开环聚合的杂化反应。基于阴离子杂化共聚反应, 我们合成了主链降解侧链水解的高性能海洋防污树脂, 实现了动态和静态条件下的防污, 相关涂料已在船舶等海洋装备上规模化应用。

关键词 杂化共聚 海洋防污 生物降解**参考文献**

- [1] Yang, H. J.; Huang, J. F.; Song, Y. Y.; Yao, H. X.; Huang, W.; Xue, X.; Jiang, L.; Jiang, Q. M.; Jiang, B. B.; Zhang, G. Z., Anionic Hybrid Copolymerization of Sulfur with Acrylate: Strategy for Synthesis of High-Performance Sulfur-Based Polymers. *J Am Chem Soc* **2023**, *145*, 14539.
- [2] Yang, H. J.; Xu, J. B.; Pispas, S.; Zhang, G. Z., Hybrid Copolymerization of ϵ -Caprolactone and Methyl Methacrylate. *Macromolecules* **2012**, *45*, 3312.
- [3] Pan, J. S.; Ai, X. Q.; Ma, C. F.; Zhang, G. Z., Degradable Vinyl Polymers for Combating Marine Biofouling. *Acc. Chem. Res.* **2022**, *55*, 1586.

D10-24(Invited)

高分子多元共混体系的超级复合强韧化及在塑料回收上的应用

阎建辉, 王翠芳, 随献伟, 黎焕敏, 谢续明*

清华大学化工系

实现多元聚合物共混物的相容, 不仅可以拓展制备新型高性能聚合物材料的途径, 还可将其应用于塑料废弃物的回收再利用, 以解决日趋严重的白色污染等环境问题。本研究通过相容剂的分子结构设计及反应性调控, 探讨多相相溶剂的有效制备, 对多元共混体系的增容和相结构演化规律及其性能调控, 尤其关注多相增容剂作用下多元体系中各种组份间多层级界面形成对共混物力学性能的影响机制, 多层级界面的协同作用对多元体系强韧化的贡献, 实现多元聚合物共混物有效增容和形成多层级界面的超级复合, 制备获得了相容性好、强韧化的多元聚合物共混物。结果表明不同强度的界面的存在和界面数量的增长使多元共混聚合物的力学性能得以成倍或数量级的提高、体现了“超级复合”的意义和内涵, 为多元聚合物共混体系的增容、强韧化, 以及废弃塑料的高值化回收再利用打下了基础。

参考文献:

- [1] Huan-Ming Li, Xianwei Sui, Xu-Ming Xie; *Polymer*, 123, 240-246(2017)
- [2] Huan-Ming Li, Xu-Ming Xie; *Polymer*, 108, 1-10(2017)
- [3] Huan-Ming Li, Xianwei Sui, Xu-Ming Xie, *Chin. J. Polym. Sci.*, 36, 848-858(2018)
- [4] Xianwei Sui, Xu-Ming Xie; *Chin. Chem. Lett.*, 30, 149-152(2019)
- [5] Yuxi. Li, Jianhui. Yan, Yujun. Liu and Xu-Ming Xie, *ACS Nano*, 2022, 16, 1567
- [6] Yi Wei, Yuxi Li, Yujun Liu, Jianhui Yan and Xu-Ming Xie, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 15, 41031(2023)

D10-25(Oral)

基于反相乳液法构建均匀闭孔结构的聚氨酯抛光垫用于芯片表面抛光

江亮*, 雷景新, 陈兴宝, 赵世伟

四川大学

化学机械抛光 (CMP) 是高端芯片制造过程中的关键核心技术之一^[1]。其中, 多孔高分子抛光垫对晶圆表面平坦化的效果非常关键, 是 CMP 工艺中的技术和价值核心^[2]。抛光垫在 CMP 中主要起到了储存和输送抛光液、排出去除物、传递加工载荷、保证抛光过程稳定等作用^[3]。目前, 基于微球法制备的多孔聚氨酯抛光垫是高端芯片制造中应用最广泛的抛光垫材料制备技术^[4]。然而, 该方法使用的中空发泡微球, 其壳层的硬度高于抛光垫中聚氨酯基体的硬度, 行业专家预测, 随着芯片制程逐渐缩小, 微球壳层残留物在 CMP 中显著增加了划伤晶圆表面的风险。此外, 抛光垫制备技术被陶氏公司长期垄断, 存在卡脖子风险^[5], 因此, 我国亟需发展新型抛光垫制备技术。本研究以水替代传统的中空发泡微球, 采用反相乳液法制备出不含发泡微球且微孔尺寸可调控的均匀闭孔结构聚氨酯抛光垫。研究表明该方法可以制备出微孔平均尺寸约为 10 μm 和 45 μm 的均匀闭孔结构聚氨酯抛光垫材料, 并且其微观形貌与微球法所制备的聚氨酯抛光垫的微观形貌一致。基于反相乳液法构建均匀闭孔结构的聚氨酯抛光垫为制备出满足先进制程芯片制造要求的抛光垫提供一种新思路和新方法。

参考文献

- [1] Miller C. Global chip war for strategic semiconductors. *Nature Reviews Electrical Engineering*, 2024, 1(1): 2-3.
- [2] Lee H, Kim H, Jeong H. Approaches to Sustainability in Chemical Mechanical Polishing (CMP): A Review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2022, 9(1): 349-67.
- [3] Liu P, Nam Y, Lee S, et al. The mechanical effect of soft pad on copper chemical mechanical polishing [J]. *Mater Sci Semicond Process*, 2023, 155: 107256.
- [4] Cook L. CMP pads and their performance. *Advances in Chemical Mechanical Planarization (CMP) (Second Edition)*. Woodhead Publishing, 2022: 567-90.
- [5] Wang H, Zhou W, Shi W. Analysis of patented technology of chemical mechanical polishing pad in integrated circuit manufacturing. *Journal of Capital Normal University*, 2023, 44(5): 52-61.

D10-26(Oral)

基于动态荧光分子构筑荧光共价自适应网络及应用

姜宇*, 冉子钰, 马佳慧, 张道洪

中南民族大学

基于动态共价键构筑的共价自适应网络 (CAN) 具备拓扑结构重排的能力, 可赋予材料自修复、重复加工和刺激响应等性能, 如何实时监测 CAN 的网络状态及动态共价键行为对于了解材料的性能有重要的意义。本工作将 AIE 荧光分子通过动态共价键嵌入 Diels-Alder (DA) 型共价自适应网络中, 制备了一种荧光 CAN 材料, 网络内部可逆的 DA/retro-DA 反应可通过改变网络交联密度高效调控材料的荧光性能^[1]。一方面, 通过构建材料网络交联状态、荧光强度和机械性能间的响应关系, 可实现 CAN 网络状态及性能的可视化追踪^[2-3]; 另一方面, 基于 CAN 材料的刺激响应性, 可实现新型智能荧光材料的开发^[4]。

参考文献

- [1] Jiang, Y.*; Hadjichristidis, N.* *Angew. Chem. Int. Ed.* 2021, 60 (1), 331-337.
- [2] Jiang, Y. #,*; Ran, Z.#; Wu, Y.; Zhang, M.; Ma, Y.; Zhang, D.* *Chem. Commun.* 2023, 59, 12423.
- [3] Wang, A.; Wu, S.; Zhou, Y.; Jiang, Y.* *Eur. Polym. J.* 2024, 205, 112725.
- [4] Jiang, Y.*; Ma, J.; Ran, Z.; Zhong, H.; Zhang, D.*; Hadjichristidis, N. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2022, 61, e202208516.

D10-27(Oral)

ICF 靶用富氖大直径聚合物微球制备研究

刘梅芳*

中国工程物理研究院激光聚变研究中心

富氙大直径聚合物空心微球，因自带丰富热核燃料在激光驱动下可产生高通量中子，是激光惯性约束聚变、国防物理以及聚变能源等重要领域的关键需求。这些应用领域对微球中氙/碳原子比、氙代率以及微球直径、壁厚等皆有严格要求。针对上述需求背景，本研究团队通过分子结构设计制备了兼顾高氙代率、高氙/碳原子比、溶解性和成球性的氙代超分子聚合物；构建重力约束倒置式新型乳粒发生器制备了大直径复合乳粒；通过界面调控解决大直径乳粒发生破裂或聚并等失稳行为，从而在国际上首次获得了毫米级高氙/碳原子比（1.7）微球。

D10-28(Invited)**基于人工智能的高分子材料设计与制备**

林嘉平*

East China University of Science and Technology

高性能高分子材料在航空航天和先进装备等领域发挥着重要作用。迄今为止，材料研究经历了实验经验范式，基于模型的理论范式，计算模拟范式，以及基于人工智能的数据驱动范式^[1]。第四种范式是利用人工智能算法分析大量数据并找到潜在规律的研究方法，通过虚拟合成、性能预测和筛选来加速材料研究并降低研发成本。最近，我们利用机器学习辅助的设计方法，设计研制了一系列高性能高分子材料，包括具有优异综合性能的热固性树脂以及具有高光电转换效率的有机光伏给体-受体的结构组合。

先进树脂基复合材料具有轻质的优点，在航空航天和国防工业有着重要的应用。发展树脂基复合材料的关键之一是开发综合性能优异的复合材料用基体树脂。含硅芳炔树脂作为一种有机/无机杂化的新型耐高温树脂，以其优异的耐高温性能在国防工业领域有着广泛的应用前景。然而，受制于传统试错法，耐高温树脂的研发速度远跟不上需求的增长，这是因为：1）树脂耐温性能提高的同时，固化温度也往往会随之上升，这给加工带来了困难，如何在提高树脂耐高温性的同时，降低树脂固化温度是一个具有挑战性的课题；2）耐高温树脂的韧性普遍较差，交联度的提升有助于提高耐热性能，但同时也给树脂的增韧带来了反作用，如何在提高耐温性的同时，提升树脂韧性是另一个重要课题。为解决上述问题，提升耐高温树脂的研发效率，我们近期开展了大数据驱动的适用于高性能树脂的材料基因工程研究^[2,3]。本报告主要介绍运用材料基因工程，以性能代理量或机器学习为性能预测工具，开发兼具耐高温和易加工特性的含硅芳炔树脂以及高韧性耐高温的含硅芳炔树脂，并展望材料基因工程方法在高性能树脂设计方面的发展趋势。

此外，我们还对有机光伏（OPV）材料的给体和受体结构组合进行了机器学习辅助设计。为了获得具有更高光电转换效率（PCE）的 OPV 材料，通常采用试错的研究方法，这使新结构的设计周期相对较长^[4,5]。我们从文献中收集了给体和受体结构及其相应的光伏性能数据，建立了有机光伏专用数据库。发展了聚合物指纹的结构数字化表示方法以及端到端图神经网络的建模方法，进而建立了适用于 OPV 材料光伏性能的高精度预测模型。将现有给体和受体结构进行组合，产生了 61 万种的给受体结构组合。利用所建立的预测模型，快速准确地预测了海量候选组合的光伏性能，进而筛选出一系列有望超过 Y6 受体体系的优选给受体组合。实验验证表明，这种机器学习辅助的结构设计策略，准确度在 93%以上，可以大大加速高效率 OPV 材料的结构设计，实现器件性能突破。

参考文献：

- [1] Gao L., Wang L., Lin J., Du L. Engineering 2023, 27(8): 31.
- [2] Zhang S., Du S., Wang L., Lin J., Du L., Xu X., Gao L. Chem. Eng. J. 2022, 448, 137643.
- [3] Zhu J., Chu M., Chen Z., Wang L., Lin J., Du L. Chem. Mater. 2020, 32: 4527-4535.
- [4] Yuan J., Zhang Y., Zhou L., Zhang G., Yip H., Lau T., Lu X., Zhu C., Peng H., Johnson P., Leclerc M., Cao Y., Ulanski J., Li Y., Zou Y. Joule 2019, 3: 1140.
- [5] Zhang G., Lin F., Qi F., Heumuller T., Distler A., Egelhaaf H., Li N., Chow P., Brabec C., Jen A. Chem. Rev. 2022, 122: 14180.

D10-29(Invited)**高分子物理指导的聚烯烃研究：从催化体系、聚合反应，到加工工艺、性能调控**

陈忠仁*
南方科技大学

一百年多前由斯陶丁格开启的高分子学科,为高分子材料工业的快速发展和人类生活质量的巨大提升,提供了全面的高分子理论基础。高分子化学为聚合反应工程,高分子物理为聚合物加工工程,提供了第一性原理,并共同提供了高分子材料设计与性能调控的坚实基础。我们试图以高分子物理的基本理论,即链构象学、链动态学、共混体系热力学、聚集态结构理论为指导,通过实验研究“颠覆”专著和教科书上的一些公认结论,例如:(1)单分散的聚合物是否具有更好的加工特性与力学性能;(2)对称性的 AB 两嵌段共聚物是否具有更有效的增容效果。我们正进一步扩展高分子物理理论在催化体系与聚合反应的应用场景,比如:(3)聚合反应催化剂设计及其在有机载体中的应用,即通过分子链线团的尺寸变化,控制单链负载催化剂的聚合活性和共聚单体的选择性;(4)利用高分子链构像理论,结合环张力的估算方法,建立开环聚合链-环平衡的计算模型,扩展了聚合反应热力学理论;(5)利用链增长与链结晶动态耦合与解耦的原位解缠现象,发展了低缠结超高分子量聚合物的原位聚合技术;(6)发展了链穿梭技术制备环烯烃嵌段共聚物,利用环烯烃单体的插入率调控链段玻璃化温度,实现材料性能从塑料到弹性体的转变。近期在催化体系选择、嵌段设计、链穿梭聚合、聚集态调控、性能测试与断裂力学分析等关键科学问题,进行了深入研究。

环烯烃共聚物(COCs)作为一种新型的热塑性高分子材料,具有高透明度、高强度、耐热性等特点,被广泛应用于光学薄膜、光纤通讯和医疗器械等领域。共聚物中降冰片烯单体的高插入率虽保证了材料优异的热性能和光学性能,却也同时导致材料的脆性增加。当降冰片烯插入率较低时,COCs有望成为新型聚烯烃热塑性弹性体,这将其应用开辟新的途径。本工作筛选出一对共聚活性相近的催化剂,在聚合过程中对乙烯/降冰片烯表现出不同的共聚选择性,分别得到低玻璃化转变温度(T_g)的软段和高 T_g 的硬段。在链转移剂的存在下,我们通过链穿梭聚合制备嵌段长度和嵌段数呈统计分布、软硬链段交替连接的乙烯/降冰片烯二元多嵌段共聚物。通过改变链穿梭聚合过程中的降冰片烯浓度,我们可以精确地调节环烯烃嵌段共聚物(COBCs)的玻璃化转变温度,实现材料从塑料到弹性体的转变。当两个 T_g 均高于室温时,材料在室温下展现出又强又韧的热塑性塑料性质,断裂应力高达 45 MPa,断裂伸长率高达 256%。当其中一个 T_g 低于室温时,材料在室温下展现出优异的热塑性弹性体性质,在 200%的应变下弹性回复率高达 93%,并均表现出与商用 COCs 相当的透光率,以及超强的抗蠕变和抗开裂性能。为此,我们还深入研究了这些 COBCs 的嵌段链结构(包括平均嵌段数 n 和平均嵌段聚合度 N)与其优异性能的构效关系。

D10-30(Oral)

分子机器驱动的光响应液晶高分子

兰若尘*
江西师范大学

光响应分子机器是能够进行光能-机械能转换的单分子器件,如何将分子机器的纳米尺度分子异构转换为宏观材料的行为是智能分子材料研究的基础科学问题。液晶高分子材料兼具有液晶的各向异性和高分子的弹性,液晶分子协同效应能够将纳米尺度的扰乱作用放大为宏观材料的响应行为,因此,液晶高分子能够作为沟通纳米尺度分子异构与宏观材料智能响应行为的桥梁。本文利用提出了螺烯类分子马达和酞腈分子开关驱动的光响应液晶高分子材料的构建策略,揭示了分子机器的分子结构、交联方式等对光响应液晶高分子材料响应行为的影响规律,阐明了分子机器驱动的新型光响应液晶高分子的响应机理,构筑了具有光驱动形变、光响应变色和动态荧光特性的智能液晶高分子,并探索了其在软体机器人、光子晶体和信息加密等领域的潜在应用。

D10-31(Oral)

基于交联网络结构设计的形状记忆环氧树脂的制备与研究

罗兰*

形状记忆聚合物是一种在外界刺激作用下可实现临时形状与永久形状之间转换的智能材料,具有变刚度和形状记忆特性,可实现材料-结构-功能一体化及可控展开。形状记忆环氧树脂具有良好的机械性能、优异的热稳定性和形状记忆性能的特点,使其成为航天应用的理想材料。环氧树脂的耐高温、耐低温、耐空间环境等特性,作为一种高性能的热固性树脂,不仅满足航天领域对高性能材料的紧迫需求,也为智能材料的应用开辟新的道路。基于拓扑交联网络结构的设计,交联反应后形成了高度对称线型、超支化、环化的交联网络结构。研究了微观交联网络结构与宏观性能间的关系,揭示了三重形状记忆效应、阻热效应等机理,解决了环氧树脂强度与韧性难以兼容的问题,开发了一系列高强度、高韧性和高导热的形状记忆环氧树脂体系,灵敏响应、快速驱动的形状记忆环氧树脂为航天航空等领域可展开结构应用提供材料基础。

D10-32(Oral)

3D 打印自修复、自黏附弹性体及其适用于两栖环境的柔性可穿戴电子器件

赖佳亮, 王占华, 夏和生*

四川大学

为了满足具有挑战性的使用场景的需求,人们越来越需要不仅能在陆地环境中正常工作,而且能在复杂的水生环境中正常工作的柔性电子皮肤。在这项研究中,我们在聚二甲基硅氧烷骨架中加入了动态脲键和氢键,从而开发出一种弹性体,它在干燥和潮湿环境中都表现出优异的自主自愈和可逆粘合性能。通过无溶剂三维打印技术制造出了一种具有出色传感稳定性、两栖自修复能力和两栖自粘性能的多功能柔性传感器。该传感器具有较高的传感灵敏度 ($GF=45.1$) 和较低的应变响应阈值 (0.25%),可用于检测人体的细微动作和生理活动,如肌肉运动、关节运动、呼吸和心跳。通过将该装置与蓝牙传输系统耦合组装而成的无线可穿戴传感系统适用于监测人类在两栖环境中的剧烈运动,如打篮球、骑自行车、跑步(陆地环境)和游泳(水生环境)。该设计策略为增强软材料的自愈和自粘特性提供了启示,为制造可在两栖环境中正常工作的柔性电子皮肤提供了前景广阔的途径。

D10-33(Invited)

感光聚酰亚胺废弃树脂高附加值利用: 数字光投影 3D 打印聚酰亚胺材料的研究

万佳陈 2, 魏轲豪 1, 路庆华 *, 1

1. 上海交通大学
2. 同济大学

在感光聚酰亚胺(PSPI)光刻胶的国产化替代的过程中,由于 PSPI 树脂分子量、分子量分布或离子含量等参数不达标而产生大量(吨级)不合格的废弃树脂。聚酰亚胺树脂具有化学惰性难降解、阻燃且耐高温难焚烧,因此废旧树脂的固废处理成为了新的问题。感光聚酰亚胺光刻胶主要应用于芯片封装多层互联的绝缘层,具有 2D 平面结构图形化能力(微米级别),随着 PSPI 光刻胶应用范围的不断拓展,对 PSPI 的三维高精密切割能力提出了新的需求。半导体光刻工艺显然不能满足 3D 图形化的要求,而数字光投影技术(Digital Light Projection: DLP)的发展为 3D 精密(毫米甚至微米)制造提供了可能。但是,目前已有的 3D-DLP 树脂在耐热性、机械性能和绝缘电性能方面难以满足应用要求。鉴于以上需求,我们探索了 PSPI 废旧树脂应用于 3D-DLP 光固化树脂的可行性。通过光固化动力学过程和亚胺化过程互穿网络形成的研究,解决了 3D 打印聚酰亚胺的结构坍塌和尺寸收缩严重的问题,制备了尺寸稳定性好、耐热性好、形状保真度高的三维多尺度结构。通过反应活性溶剂光固化树脂玻璃化转变温度的调控,制备了具有形状记忆功能的 3D 打印聚酰亚胺结构。以上研究为将聚酰亚胺从二维光刻扩展到三维无掩膜制造提供了新的思路,为拓展聚酰亚胺精密加工和功能性提供了新的路径。

关键词: 光敏聚酰亚胺, 3D 打印, 低收缩率, 无掩膜光刻

D10-34(Invited)

纤维/橡胶复合材料界面粘合性能调控及失效机制

田明*，宁南英，王超君，黄伟，赵慧，于冰
北京化工大学，有机无机复合材料国家重点实验室

纤维增强橡胶复合材料(FRRC)作为承载/耐压制品，广泛用于汽车/飞机轮胎、抗高压特种胶管和高强力特种橡胶输送带等领域。依据界面应力传递理论模型，纤维/橡胶复合材料的界面微观结构（界面层厚度和模量梯度）是决定应力传递效率和界面脱粘失效的关键^[1]。但是传统的表征方法难以定量表征界面微观结构，也无法计算脱粘应力。本研究发展了冷冻机械粗抛结合离子束无应力精抛的制样方法，得到了高平整度无损的纤维/橡胶复合材料界面区域，并在此基础上利用峰值力原子力显微镜定量纳米力学技术(AFM-QNM)和纳米压痕模量成像技术，定量表征了纤维/橡胶复合材料的三相两界面结构，揭示了纤维表面处理结构对复合材料界面性能的影响。开发了系列新型浸渍体系，通过调控浸胶层的化学物理结构、交联密度和模量等，实现了强界面粘合和优异的疲劳性能^[2]。同时建立了苛刻条件下纤维/橡胶动态疲劳粘合性能的研究方法，结合界面粘合演化、失效位置及界面能量耗散等探明了界面粘合失效机制^[3]。

关键词：纤维/橡胶复合材料 界面微观结构 界面粘合 失效机制

参考文献：

- [1] COX H L. The elasticity and strength of paper and other fibrous materials[J]. British Journal of Applied Physics, 1952, 3(3): 72.
- [2] Wei Huang, Yingzhe Li, Hui Zhao, Wencai Wang, Bing Yu, Nanying Ning*, Ming Tian*, Liquan Zhang. Composites Part B: Engineering, 2023, 253, 110541.
- [3] Hui Zhao, Wei Huang, Shipeng Wen, Bing Yu, Wencai Wang, Nanying Ning, Ming Tian, Polymer, 2023, 28, 126253-126260.

D10-35(Oral)

基于 Janus 颗粒的复合材料界面调控策略

梁福鑫*

清华大学化学工程系高分子研究所

界面是决定复合材料各组份能否协同发挥作用的关键，Janus 颗粒作为界面活性材料用于调控复合材料界面展示出了独特的作用和优势，我们探究其对复合材料力学性能和耐热性的调控作用。有机-无机复合 Janus 颗粒为颗粒乳化剂进行乳液聚合，构筑 Janus 颗粒在孔壁单层取向排列的多孔弹性体 (JPEs)，Janus 颗粒能够显著提高复合材料的强度和弹性。在 JPEs 的研究中，硬质 Janus 颗粒作为孔壁的坚固铠甲，使多孔弹性体的模量提高至 23 倍，并显著改善其热维度稳定性，且回复率超过 98%。这种界面调控策略使得 JPEs 在振动阻尼和能量吸收领域具有很好的应用前景。

D10-36(Oral)

仿生界面导液材料

时连鑫*

中国科学院理化技术研究所

界面液层会阻碍固固有效接触。受限于传统材料的单一浸润性，无法有效移除界面液层，导致粘附失效、伤口扩大溃烂等问题。聚焦界面液层移除问题，我们首次提出了自泵 (self-pumping) 模型，发展了一系列自泵功能敷料及耐极低温湿态粘附材料，如非对称浸润性纤维(Adv. Mater. 2019, 31, 1804187)，仿生锥孔自泵织物(Adv. Mater., 2019, 31, 1904113)，取向孔道自泵水凝胶(Adv. Mater. 2024, 2401539)，分型孔道自泵油水凝胶(Adv. Mater. 2023, 35, 202301765)，多重分形孔道自泵油水凝胶；仿蛛丝耐极低温全能湿态粘附纤维等(Adv. Mater. 2021, 33, 2007301)。实现了高粘度渗出液的连续、快速单向导出以及有效加速高渗出切除

伤口、烫伤伤口、糖尿病伤口等的愈合以及耐极低温的油/水污染表面湿态粘附(Nano Today 2023, 48, 101748)。所发展的自泵功能材料有望为体表湿热管理、组织修复材料、医用引流器件的设计提供新模型、新思路。

D10-37(Oral)**高分子长余辉发光体系及性能调控**

杨朝龙*

重庆理工大学

长寿命室温磷光（RTP）材料在生物成像、光学记录、信息存储、防伪系统等诸多高新科技领域有着诱人的应用前景，但在室温下实现高效 RTP 是一个极大的挑战，尤其是无定型聚合物基长余辉发材料。通过合理的化学调控技术，设计、合成潜在的具有长余辉性能的有机分子，然后通过物理化学方法引入到聚合物中，通过旋涂等方式制备得到聚合物长余辉发光膜材料，通过稳态光谱仪等手段详细研究聚合物长余辉材料的余辉动态调控特性，余辉颜色激发依赖性以及高亮度大面积柔性聚合物长余辉发光材料的获取途径。借助无油墨丝网印刷、喷墨打印等技术，实现系列 PLPL 材料在信息存储、高端防伪、绿色照明、以及生物检测等领域的广泛应用。

D10-38(Oral)**强相分离分级结构嵌段共聚物自组装及其纳米功能化**

石玲英*

四川大学

强相分离嵌段共聚物自组装是小尺寸纳米图案化和制备孔径小于 10nm 均孔分离膜的重要策略。分级自组装可以实现多重功能的集成。我们结合强相分离能力含硅嵌段共聚物的相分离与液晶有序，构建了高相互作用参数的多级自组装嵌段共聚物，实现了 3nm-in-20nm 的多级自组装以及可交联自支撑膜的制备。首先以聚二甲基硅氧烷为含硅嵌段引发剂，通过活性可控自由基聚合方法制备出一系列含有不同液晶基元的液晶嵌段共聚物；通过热退火工艺实现了薄膜态丰富的自组装相态以及取向调控；进而通过反应离子刻蚀制备出高界面清晰度的氧化硅纳米图案，在亚 20nm 以及亚 10nm 图案化研究中取得了一系列的研究成果。其次设计制备了兼具有外场取向结构可调性能、高刻蚀对比性以及后交联策略赋予结构稳定性等优势含硅液晶嵌段共聚，在研究其自组装热力学与动力学条件的基础上，实现了孔径 5-10nm 小孔径自支撑均孔分离膜以及不对称分离膜的制备与应用探索。该研究为小尺寸纳米光刻和高密度小孔径均孔膜的研究与应用提供了科学依据。

D10-39(Invited)**生物基呋喃聚酯的合成与性能**

朱锦

中国科学院宁波材料研究所

生物基高分子材料避开石化资源的依赖性，具有低碳环保的优势，是一类具有可替代石化高分子材料的潜力，然而目前生物基高分子材料的使用量还不足高分子材料的 1%。因此，生物基高分子材料是高分子领域未来发展的重要方向之一。目前商业化得生物基高分子都是脂肪链结构，造成力学性能差、耐热性低等问题。生物基呋喃二甲酸是目前最有希望商业化的行刚性结构的单体，以它为二元酸和兴合成的聚酯具有优异的阻隔、耐热和力学性能。本报告将综述宁波材料所呋喃二甲酸聚酯方面的研究进展。包括高阻隔、高耐热、可降解呋喃聚酯及热塑弹性体。

D10-40(Invited)**丝素蛋白功能与智能材料构筑**

张耀鹏

丝素蛋白不仅生物相容性优异,而且生物可降解性,使其在生物医药、生物电子、智能传感等领域展现出巨大的应用潜力。本报告提出了基于丝素蛋白多级结构调控的纤维增强机制,制备了力学性能超过天然蚕丝的丝素蛋白仿生纤维;发展了丝素蛋白组织工程支架/细胞界面调控策略,获得了力学-电学-生理活性集成的生物支架;提出了基于单分子层丝素纳米带的蚕丝多级结构新模型,发明了纳米材料添食育蚕法。本报告从丝素蛋白纤维的仿生制备及力学增强、丝素蛋白组织工程支架构筑及功能化、丝素蛋白生物忆阻器、摩擦纳米发电机、压电材料、神经接口等生物电子材料的设计及构筑等方面总结了丝素蛋白纤维及功能、智能材料的研究进展。

D10-41(Oral)**基于聚乙烯亚胺的水性聚氨酯自修复光致发光涂层**

雷元*, 符笑伟, 江亮

四川大学高分子研究所

水性聚氨酯涂层材料具有优异的透明度、耐溶剂性和硬度,制备过程简单、环保^[1,2]。然而,水性聚氨酯涂料在长期使用过程中不可避免地会遭到损坏,大多需要通过加热来实现自修复,这将严重影响其在某些无法承受高温的场合下的使用寿命^[3]。但自修复温度较低的聚合物通常具有较低的玻璃化温度,力学性能较差^[4,5]。开发一种兼具优异力学性能、室温自修复性能且环境友好的水性聚氨酯涂层材料具有重要意义。本研究创新性地将聚乙烯亚胺(PEI)作为动态交联剂引入到水性聚氨酯分子结构中,制备自修复涂层材料(CWPU),同时引入碳量子点(CQs)提供光致发光功能。因PEI分子结构中含有大量伯胺和仲胺官能团,可与CWPU分子链间形成动态离子键交联,同时还可吸收空气中的水分子、产生增塑作用。当PEI添加量较少时,主要起交联作用,使分子链表现出较高的力学强度。随着PEI添加量增多,体系中动态离子键浓度增大。并且PEI分子结构中大量亲水基团吸收空气中的水蒸气,水分子的引入能够填充分子网络中的空隙从而产生溶胀效应,还能与分子链上的极性基团相互作用形成氢键,降低这些基团之间形成氢键的概率,从而减弱分子链间的相互作用。在这两个因素的协同作用下,PEI的增塑作用大于了交联作用,使聚合物分子链运动能力增强,断裂面处的分子更容易相互靠近、发生扩散,实现高效的室温自修复。修复后力学性能最佳的配方(WPU-3)拉伸强度为3.26 MPa、断裂伸长率为450.94%,加入通过一水柠檬酸和乙二胺制得的CQs后,得到了同时具有室温自修复性能和光致发光功能的涂层WPU-3/CQs。该涂层在紫外光下能发出明亮的蓝色荧光,在最佳激发波长照射下,荧光发射强度达到 1.44×10^5 a.u.,且经多次室温自修复,其荧光性能保持不变。该材料有望广泛用于有机玻璃防护涂层、照明和道路标识等领域。

参考文献

- [1] Z.Y. Zhang, X.F. Han, L. Jia, W.W. Yu, Q. Zheng, Highly water-resistant transparent waterborne polyurethane thermal-insulation coating material with multiple self-crosslinking network based on controllably activated end-capping reagent, *Progress in Organic Coatings* 187 (2024).
- [2] Z.C. Ling, Q.X. Zhou, Synthesis and properties of linseed oil-based waterborne non-isocyanate polyurethane coating, *Green Chemistry* 25(23) (2023) 10082-10090.
- [3] C.J. Yu, M.S. de Luna, A. Russo, I. Adamiano, F. Scherillo, Z.H. Wang, X. Zhang, H.S. Xia, M. Lavorgna, Role of Diisocyanate Structure on Self-Healing and Anticorrosion Properties of Waterborne Polyurethane Coatings, *Advanced Materials Interfaces* 8(10) (2021).
- [4] T.Y. Mao, H. Feng, J.R. Wu, M. Li, S. Luo, J.L. Chen, X.C. Wei, P. Liu, F.W. Xie, Waterborne organic silicone polyurethane with excellent self-healing performance for oil/water-separation and oil-recovery applications, *Sustainable Materials and Technologies* 36 (2023).
- [5] K. Han, J.L. Wang, C. Li, C. Zhou, J.F. Yuan, Z.C. Pan, M.W. Pan, Click reaction benzimidazole into waterborne polyurethane toward anti-flashing rust, self-healing, robust coatings, *Chemical Engineering Journal* 468 (2023).

D10-42(Oral)**基于动态配位交联的高分子材料增强增韧、自修复及功能性应用**

翁更生*

宁波大学

传统的硫化橡胶材料已得到了大量的应用，但其共价交联特性导致相关产品，如：轮胎等，无法得到有效的回收或重复利用，且带来大量的污染。近年来，可用于动态交联的金属-配体动态配位吸引了越来越多学者的研究兴趣。这是因为，动态配位交联策略无需复杂的高分子结构设计与合成，且交联点结构及动态性可调节性强。因此，金属-配体动态配位被用于高分子材料的增强增韧、自修复及其他功能性应用场景。本研究中，我们以羧基丁腈橡胶为弹性体基体，一方面，通过 Fe-COOH、Cu-COOH、Zn-COOH 等单金属配位交联模式，实现丁腈橡胶的增强增韧及温度适应性的自修复。该类材料在常温下表现出共价交联橡胶的力学性能。在高温下，配位交联点的高度动态性及配位结构的重排赋予该类弹性体较快速的自修复性能；另一方面，我们也研究了双金属配位交联模式。以 Al-COOH 与 Eu-IDA 为交联点，我们构筑了荧光色彩响应性高分子弹性体材料，该材料表现出高度可调的强而韧的力学性能。此外，我们还研究了强化配位的 Cu-COOH/Dy-COOH 双金属配位交联羧基丁腈橡胶。在双金属竞争性配位交联模式下，交联点的动态性得到强化，自修复性能提高，且能充分利用 Cu-COOH/Dy-COOH 两种配位交联对力学性能的贡献。进一步，上述材料还可用于自供能柔性传感器等相关应用领域。

D10-43(Oral)**超分子光热级联纳米反应器用于糖尿病牙周骨再生**

谢婧*, 李建树

四川大学

近年来，糖尿病引起的牙周骨吸收导致牙齿脱落的患者数量逐渐增加。复杂的牙周局部微环境对牙周治疗提出了重大挑战，目前还没有有效的治疗糖尿病患者牙周骨再生的方法。针对糖尿病患者牙周骨再生治疗面临的挑战和血氧波动缺乏实时反馈的问题，我们采用一步超分子自组装策略构建了一种新型的超分子光热级联纳米反应器 ACFDG，来加速糖尿病患者的牙周骨再生。ACFDG 巧妙地将光热和光声成像相结合，提高了光热转换效率（32.1%）。近红外热疗 ACFDG 不仅能催化级联反应，持续消耗葡萄糖，缓解糖尿病高血糖微环境，也可以通过催化级联反应，消耗 GOD 产生和 DM 诱导的次级副产物，从而缓解缺氧。此外，轻度热疗 ACFDG 辅助 ROS 清除阻断了糖尿病牙周炎症微环境中 NF- κ B 信号通路，激活了 BMP-2 和 Runx2 成骨信号通路，从而结束了糖尿病诱导的高血糖和骨丢失引起的恶性骨微循环。同时，PA 成像引导的无创监测可以对牙周血氧水平进行实时动态评估，并为口腔中 PA 成像的实时无创监测和治疗提供新的途径和机会。

D10-44(Oral)**具有超高拉伸性和低迟滞性的双物理交联丝素离子弹性体**

张豪，曹雷涛，任婧，凌盛杰*

上海科技大学

离子导体的创新极大地促进了超柔性器件、显示器发展。然而，它们往往在拉伸性和弹性之间难以平衡。本工作将尺寸和数量受限的蚕丝蛋白纳米晶体（ β -折叠纳米晶）与分子无规缠绕结构的蚕丝蛋白离子导体相结合，制备出一种具有“焊接-缠结”网络结构的蚕丝蛋白基离子弹性体材料。与没有纳米晶交联的相同蚕丝蛋白材料相比，焊接-缠结网络的杨氏模量增加了 34 倍，抗拉强度增加了 14 倍，韧性增加了 9 倍。焊接-缠结网络也获得了可恢复的迟滞能量耗散，其表现出的高拉伸性和低迟滞性超过了以前报道的离子导体和生物弹性体。这些优异的力学性能，加上蚕丝蛋白材料的固有优势，包括可加工性、可持续性、生物相容性和可降解性等，促进了蚕丝蛋白离子弹性体在人机界面和生物功能设备中的应用。

D10-45(Invited)

机械互锁聚合物

颜徐州*

上海交通大学

机械互锁聚合物(Mechanically Interlocked Polymers)是一类由机械键(Mechanical Bonds)连接的特殊种类拓扑聚合物。因机械键互锁组分可进行非解离的分子内运动,机械互锁聚合物在理论上可兼具共价聚合物的机械性能和超分子聚合物的动态性能等优点,代表了一类“刚柔并济”的聚合物材料。因此,开展机械互锁聚合物精细化设计、高效制备与性能研究不仅对发展拓扑聚合物新材料具有重要意义,而且蕴藏着发现高分子物理新现象的契机。其背后的关键科学问题是机械互锁聚合物微观机械键运动和宏观机械性能间的构效关系。针对上述问题的思考,我们提出了“机械键高密度化”的研究策略,在以下三个方面开展研究工作:(1)发展了“动态互锁”、“先互锁再聚合”、“先超分子聚合再互锁”三类互锁聚合新策略,解决了运动模式多样化的高密度机械键体系的合成难题(物质基础);(2)研究了分子尺度的微观机械运动带来的宏观机械性能突破,建立微观机械运动和宏观机械性能间的构效关系,揭示了高密度机械键集成放大、连续能量耗散等高分子物理新现象(理论深化);(3)探索了源于机械互锁聚合物独特能量耗散机制在机械力自适应材料、气凝胶材料、储能材料等领域中的新应用(性能突破)。

D10-46(Invited)

环糊精基高分子功能材料的制备与应用

张晟^{*1}, 王佳欣¹, 范书婷¹, 冯俊峰¹, 李帮经²

1. 四川大学

2. 中科院成都生物所

本文研究制备了一系列具有特殊功能性的环糊精基(CD)超分子多孔材料。研究内容可分为以下三部分:1)利用CD与客体的包合作用作为超分子吸热结构,构筑同时含有主动吸热和被动隔热结构的新型气凝胶。由于主客体包合物可吸收热量解包合,该气凝胶的保温性能明显优于热导率相同的其它气凝胶样品(图1)。固-固解包合消耗热能的方式避免了固-液相变材料易泄漏的问题,更便于储存和使用,具有更好的长期稳定性;另外,偶氮基团的存在使气凝胶在紫外光下表现出更优越的隔热性能;2)利用CD-MOF材料,制备了CD-MOF基CO₂气体分离膜。独特CD-MOF层的形成大大提高了体系对CO₂的分离能力(CO₂渗透率为70.97 barrers;对CO₂/N₂和CO₂/O₂的选择性分别为253.46和154.28),气体分离性能明显超过Robeson上限,且选择性优于其他MOF基的复合膜;3)构筑含有CD滑环结构的互穿双网络结构,合成了一种具有抗撕裂性能的超拉伸弹性体。这种弹性体撕裂能与多种金属和合金相当。

D10-47(Oral)

具有过热自防护功能可逆相转变木材基电解质的研究

曾庆韬, 赖学军*, 李红强, 陈中华, 曾幸荣, 张立群

华南理工大学

电化学储能器件(锂电池,超级电容器等)具有电化学效率高,循环性优良,使用寿命长的优点,能够实现对电能的收集与转换,从而为人们日常生活提供持续的电能^[1,2]。电解质作为电化学储能器件最为重要的组成部分之一,对其电化学性能起到至关重要的作用。通过在电解质中构建连续的离子通道,为离子的传输提供路径,有利于进一步提高电解质的离子电导率并改善其电化学性能^[3]。木材作为一种天然材料,具有来源广泛,可降解,成本低,加工性好,质量轻等优点,是综合性能良好的材料^[4]。木材具有各向异性的中空细胞状结构,这种特殊的结构为电解质的离子定向传输提供了良好的通道^[5],有利于提高电解质的电化学性能。近年来,基于木材制备的电解质材料在电化学储能领域引起了广泛的关注。然而,电化学储能器件的工作安全性仍有待进一步提高。在高功率和快速充放电过程中,能量的传递和离子的积累产生

大量热量,使其内部压强和温度升高,如果不及时采取措施,电解质内部温度会持续升高到难以控制的温度,从而造成热失控,甚至引发火灾和爆炸的事故^[6]。将相转变聚合物引入到电解质中,可使电解质在温度达到热失控起始阶段后发生溶胶-凝胶转变^[7,8],从而阻断离子的传输,有望实现过热自防护,在根源上避免热失控的发生。但是,目前的过热自防护电解质大多存在电化学性能不够理想,过热自防护不及时等缺陷。因此,如何平衡电解质的电化学性能和灵敏的自防护性能是当前亟需解决的难题。

本工作首先对天然木材进行脱木质素处理,随后以可逆相转变聚合物聚氧乙烯-聚氧丙烯-聚氧乙烯(PEO-PPO-PEO),氯化锂为原料,配制了具有热阻断自防护功能的电解质(SPE)溶液,最后采用真空辅助浸渍法将 SPE 溶液填充到脱木质素木材(DW)内部,得到 DW 基电解质(DW@SPE)。研究发现,DW@SPE 具有良好的离子导电性(1.09 S/m)和较高的比电容(112.1 F/g)。同时,由于 PEO-PPO-PEO 的可逆相转变特性和木材的特殊结构,DW@SPE 的温度响应呈现各向异性:在平行木材孔洞方向,当温度达到相转变温度后,电解质的离子电导率和比电容大幅度降低,在智能过热自防护中具有应用潜力;而在垂直孔洞方向,电解质的离子电导率随温度的升高而升高,可应用于温度感知和火灾预警。更为重要的是,DW@SPE 具有优异的阻燃性能,在离火后能快速自熄,极限氧指数可达 61.5%,进一步提高了 DW@SPE 在严苛环境下的安全性。我们的工作为设计环境友好的高安全性电解质提供了新思路。

参考文献:

- [1] Y. Wang, T. Xu, K. Liu, M. Zhang, X. Cai, C. Si, *Aggregate*, 2024, 5: c428.
- [2] Y. Zhang, J. Wang, Z. Xue, *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34: 2311925.
- [3] J. An, H. Zhang, L. Qi, G. Li, Y. Li, *Angew. Chem.*, 2022, 134: e202113313.
- [4] C. Chen, L. Hu, *Adv. Mater.*, 2021, 33: 2002890.
- [5] V. Tran, G. Mastantuoni, D. Belaineh, S. Aminzadeh, L. Berglund, M. Berggren, Q. Zhou, I. Engquist, *J. Mater. Chem. A*, 2022, 10: 15677.
- [6] L. Tan, C. L. Wei, Y. Zhang, Y. An, S. Xiong, J. Feng, *Chem. Eng. J.*, 2022, 431: 134277.
- [7] Y. Yang, Z. Bai, S. Liu, Y. Liu, Y. Zhu, J. Zheng, G. Chen, B. Huang, *Small*, 2022, 18: 2203035.
- [8] K. Wang, W. Wang, Y. Wang, M. Wang, Dual phase change separator combining cooling and thermal shutdown functions for Li-ion battery with enhanced safety. *Chem. Eng. J.*, 2024, 481: 148538.

D10-48(Oral)

氮掺杂石墨烯气凝胶微球作为甲醇氧化电催化剂载体的研究

郭权芬, 田志帅, 夏和生*

四川大学望江校区

氮掺杂石墨烯气凝胶微球(rGNAMs)是通过将氧化石墨烯分散液与吡咯和氧化剂进行电喷雾,然后进行冷冻干燥和热退火得到的。rGNAMs 具有高比表面积、相互连接的孔隙结构和均匀的氮原子掺杂。通过水热还原反应将铂纳米颗粒(Pt NPs)负载到 rGNAMs 上,得到用于甲醇电氧化的 Pt/rGNAM 复合催化剂。rGNAMs 的氮掺杂结构可以提高载体上铂的负载率,减小 Pt NPs 的尺寸,均匀 Pt NPs 的分散,增加 Pt(111)晶面的含量。因此,与不掺杂氮原子的情况相比,Pt/rGNAMs 对甲醇的氧化活性得到了提高。优化后的 Pt/rGNAM 复合材料用作阳极电催化剂,甲醇电氧化的质量活性高达 840.11 mA mg⁻¹,分别是 Pt/C、Pt/rGNAB(负载 Pt 的氮掺杂石墨烯气凝胶块)和 Pt/rGNAS(负载 Pt 的氮掺杂石墨烯气凝胶毫米球)的 4.9 倍、2.9 倍和 2.7 倍。此外,Pt/rGNAMs 还显示出卓越的长期电催化稳定性。这项研究开发了一种新型 Pt/rGNAMs 复合材料,有望应用于燃料电池。

D10-49(Oral)

链式半导体填料用于高分子复合材料的介电增强和损耗降低

吴旭东, 谭启*

广东以色列理工学院

介电高分子复合材料由于具有较强的介电性能，在电气设备和系统中得到了广泛的应用。介电损耗因子是表征能量损失的重要参数，是决定介电复合材料安全性和长期耐久性的关键因素。在这里，通过电旋，煅烧和退火等方法制备了氧化钛、铟和铌掺杂氧化钛的两种链式半导体纤维并被用于增强高分子的复杂介电性能，这涉及到显著的界面增强。由于填料的特殊形态及其界面极化，特别是在高温下，链式纤维显著提高了聚醚酰亚胺（PEI）基体的介电常数五倍以上。在整个研究温度范围内，复合材料的介电损耗和导电性大大降低，这是通过使用原子层沉积的氧化铝外壳钝化纤维表面来实现的。通过热处理，沉积的氧化铝壳由非晶相转变为结晶相，而且形成多孔壳层，更有效地抑制了复合材料的正切损耗和电导率。一种合理的损耗抑制机制被提出了，电导率的升高与沿纤维表面和体内的载流子运动有关，从而导致更高的损耗。氧化铝壳层阻挡了载流子在高分子和无机填料界面处的输运路径，导致界面极化贡献和能量损失降低。本研究提供了一种通过制造具有特殊表面的填料来抑制高分子复合材料介电损耗的方法。

D10-50(Invited)**基于动态键调控的高分子材料研究**

胡君*

北京化工大学

动态聚合物材料是一类含可逆动态键的高分子材料，其独特之处在于可以在给定条件下利用动态键诱导的组装/解组装和基元交换过程，实现体系网络结构的重组，使材料表现出优异的结构可调性、网络适应性和作用可逆性。通过协同调控网络内部动态共价键和非共价键作用，我们致力于开发高性能、多功能的动态聚合物材料。具体而言：（1）针对传统柔性高分子材料基础力学性能差的难题，通过在体系内构建高密度氢键和氢键驱动的微观结构，实现柔性软材料的增强增韧；（2）针对传统热固性树脂难降解回收及重复利用的问题，通过引入动态共价键调控网络结构，实现交联网络兼具高力、热性能及重组性能；（3）针对传统拉胀材料界面性差、环氧树脂强度韧性不兼得、农药载体沉积率低和难以降解的问题，利用动态共价键和非共价牺牲键诱导的网络重组及断裂耗能，实现高性能弹性体的拉胀特性、环氧树脂的增强增韧、农药载体的高沉积及智能控释。与传统材料相比，动态聚合物材料在性能、功能和适用范围等方面展现出显著的潜在优势，有望在高端制造、国防科技以及环境保护等尖端领域实现高价值应用。

D10-51(Invited)**特种聚合物在高压电机当中的应用研究**

朱善兵*

Syensqo

为了增加纯电动汽车的续航里程并减少电池充电时间，汽车原始设备制造商和一级供应商必须采用高压系统。Syensqo 已成功开发用于方形漆包线电缆绝缘应用的 KetaSpire® PEEK，该技术将实现更高电压的电机，产生更少的废料，使用更可持续的工艺，并且汽车 OEM 已将其系统电压从 400 伏提高到 800 伏或更高。

本文阐述了 KetaSpire® PEEK 在高压电机应用中的关键属性：1) 在高温条件下具有优异的电气和机械性能；2) 对冷却剂、溶剂等具有很强的耐化学性；3) 线圈绕组在插入、弯曲和缠绕过程中具有极高的耐磨性；4) 绝缘层与金属等有良好的附着力。

利用 Syensqo 的基于挤出的 KetaSpire® PEEK 可以根据 OEM 设计结构生产各种方形漆包线。该技术已被先进的电动汽车采用，以提高功率、效率和快速电池充电时间，以满足市场趋势和需求。

关键字：PDIV - 局部放电起始电压 (PDIV) 测试

BDV - 击穿电压 (BDV) 测试

ATF - 自动变速箱油 (ATF) 老化测试

D10-52(Oral)**宏/微观协效构筑三维多孔压电材料及器件**

李怡俊*

四川大学

压电材料具有显著的力电转换特性，近年来被广泛应用于收集高熵能源及电子设备供电。压电电压由施加应力、压电及介电常数等参数决定，是实现压电材料及器件性能提升的关键。本文建立了宏/微观协效增强压电材料及器件新理论，利用固相剪切碾磨加工、化学发泡辅助 3D 打印等技术，发展基于多层次、多尺度拓扑结构设计的压电增强新理论，实现泡孔结构精细化、差异化调控，降低材料模量，放大形变，协效增强三维力电转换效率，获得新型三维压电器件，并应用于检测人体动作的可穿戴传感器以及车辆胎压的实时监测，不仅为提高压电器件输出能力提供新思路，并为压电纳米发电机的大规模应用提供了范例。

D10-53(Oral)**高分子锻压成型新技术在压电高分子中的应用**

黄照夏*，瞿金平

华南理工大学

压电材料可以实现电能和机械能的互相转换，因而在电子信息、传感等领域得到广泛应用。相比于传统的压电陶瓷材料，压电高分子材料具有密度小、柔性好和易制造等优点，成为目前的研究热点。目前压电高分子主要存在电极化过程复杂耗时长、压电系数低、难降解无法直接应用于生物医药领域等问题。我们团队立足于高分子成型加工新原理、新方法和新技术研究，针对以上问题，提出了高分子锻压及其衍生技术用于实现自极化压电 PVDF、高压电系数 ($d_{33} > 190 \text{ pC/N}$) PVDF 和可降解压电高 PLA 的先进制造。

D10-54(Oral)**完全可回收的高性能聚酰氨基脲/碳纤维复合材料**

蹇志文*

四川大学高分子研究所

实现碳纤维增强复合材料的完全无损循环利用是对于追求可持续和循环经济具有重要意义。虽然含有动态键树脂在碳纤维复合材料中的应用近年来取得了很大的进展，然而由于动态树脂的动态性和力学性能的互斥性，使得开发具有高强度、高模量和高 T_g 的完全可回收的树脂基体仍是一个巨大的挑战。在这里我们报告了一种聚合物之间含有多重氢键的新型动态聚酰氨基脲 (PASC) 材料。研究了不同化学结构对分子间氢键结构的影响，优化的 PASC 材料，杨氏模量为 4.1GPa，断裂应力为 97.6MPa，玻璃化转变温度 (T_g) 为 174°C，具有良好的再加工性能，优异的溶剂回收能力，以及优异的耐水性。同时通过溶液浸渍和热压成功制备了 PASC 材料为基体树脂的碳纤维增强复合材料。优化后的复合材料层间剪切强度为 36.7MPa 和 70.6% 的愈合效率。该材料的动态和可逆特性使其可以几乎 100% 完全无损回收碳纤维和基体树脂，再生后的复合材料仍保留其初始层间剪切强度的 82.3%。

D10-55(Invited)**可逆黏附表面的仿生构筑**

薛龙建*

武汉大学

为了能在不同物体表面爬行，动物进化出了的应对策略。其中，很多动物利用可逆黏附力来爬行，而黏附力主要依赖于脚掌表面的微观结构。受此启发的微柱阵列表面因此也被称为结构黏附材料。结构化的表面可以有效降低材料的表观模量，有利于材料与不同性质的表面形成良好接触。在分离过程中，单个微

柱接触界面的应力分布对黏附强度具有决定性作用；而柱状阵列结构可以形成“接触细化”效应，提高黏附力。前人研究发现，T 型末端的微柱可以将应力集中从接触边缘转移到中心区域，抑制了接触界面边缘裂纹的萌生，实现了黏附力的提高；但该结构在黏附-脱附循环过程中易损坏而导致黏附性能下降。针对这个难题，结合不同生物的结构特征，我们制备了具有径向和轴向模量梯度微柱阵列、末端带有微纳米凹坑的柱状阵列和硬核软壳结构等一系列，实现了分离界面处应力分布的可控调节，抑制了边缘裂纹的萌生和扩展，实现了黏附性能和结构稳定性的同步提升。结合高分子材料的玻璃化转变和相转变，实现了在空气中和水下与粗糙表面的共形接触，获得了远高于壁虎脚的黏附强度以及黏附力的可逆调控。结合微柱的不对称性设计，将结构化黏合剂的应用扩展到液滴操作和软机器人等领域，为结构化黏附材料的应用铺平了道路。

D10-56(Invited)**仿生纳米聚合物多孔膜在高盐环境中离子定向传输**

周亚红*

中国科学院理化技术研究所

生物离子通道具有特异选择性/门控/离子整流等特性，从仿生角度复制具有这些功能的仿生智能纳米离子通道是研究这些纳流行为特性的重要模板，且该类型多孔膜在很多领域都有着重要的应用前景，诸如 DNA 测序，分子/离子传输，分离，电池隔膜，海水除盐（海水淡化）和盐差发电等方面都有着巨大的应用潜力。仿生智能纳米离子通道作为物质传输的载体，这个物质传递过程伴随着能量变化，研究这些限阈空间内的分子/离子传输行为具有很高的科学价值，即纳流行为研究。经典理论模型认为纳流离子行为主要受限于表面电荷密度和尺寸的限制，通常是在 100 nm 范围内，1 毫摩尔离子浓度以下的条件下才可以表现出经典的纳流行为。但是实际生产生活中，电解质溶液的浓度一般远远高于这些浓度，比如人体细胞液的离子浓度也在 0.01 摩尔之上，电池的电解液在 0.1 摩尔之上，大海盐的浓度在 0.5 摩尔之上。简单的仿生离子通道在这些环境中对离子传输调控能力很差，因此研究特殊条件下（高浓度/高温等）的纳流行为成为亟需。在前期一维简单孔的基础上，从“多维度和多级结构”两方面出发，深入研究仿生智能纳米多孔膜的在高离子浓度下的离子定向输运机制这一科学问题。通过功能高分子的设计，发展三维聚合物孔道，发现 3D 网络孔结构拓宽了纳流边界；构建多级复合结构，Janus 聚合物 3D 多孔膜实现了在高盐环境中的单方向离子输运行为。

参考文献：

- [1] Yahong Zhou, Lei Jiang*, Joule, 2020, 4, 11, 2244-2248.
- [2] Junran Hao, Bin Bao, Jiajia Zhou, Yanshuai Cui, Xiachao Chen, Jiale Zhou, Yahong Zhou*, Lei Jiang; Adv. Mater., 2022, 2203109.
- [3] Bin Bao, Junran Hao, Xiujie Bian, Xuanbo Zhu, Kai Xiao, Jingwen Liao, Jiajia Zhou, Yahong Zhou,* and Lei Jiang; Adv. Mater., 2017, 29, 1702926.
- [4] Xuanbo Zhu, Yahong Zhou,* Bin Bao, Xiujie Bian, Junran Hao, Xiangyu Jiang, Jinhui Pang, Haibo Zhang, Zhenhua Jiang, and Lei Jiang; ACS Nano, 2017, 11, 10816-10824.
- [5] Xuanbo Zhu, Junran Hao, Bin Bao, Yahong Zhou,* Haibo Zhang, Jinhui Pang, Zhenhua Jiang,* Lei Jiang; 2018, 4:eaau1665

D10-57(Oral)**双原位合成超低填充聚酯纳米复合材料及其介电储能研究**

张全平*

西南科技大学

与传统锂电池和超级电容器相比，电介质电容器能够在很短时间内（ns 至 μ s）实现电能快速存储和释放，表现出超高功率密度，广泛应用于先进电子及功率脉冲器件，如电磁弹射。聚合物虽然具有较高击穿

强度,但是相对较低介电常数引起储能密度低,需要增大聚合物电介质薄膜电容体积以满足应用要求,制约了当前器件小型化、轻量化及高度集成化发展。

将超低含量纳米粒子均匀分散于聚合物基体能同时提升介电常数和击穿强度,从而呈现出优异介电储能性能。然而,超低填充聚合物纳米复合材料目前主要加工方法是溶液共混,有机溶剂回收难度及环境友好要求等条件限制了规模化制备及应用。鉴于此,本文提出双原位合成策略:聚酯(PET)原位聚合与填料硼酸钙原位生长同步,从聚酯单体和硼酸钙前驱体直接合成至聚酯纳米复合材料。需要指出的是,无需任何有机溶剂实现超低含量(~ 0.1 wt%)硼酸钙均匀分散于 PET 基体、界面相容良好,且无副产物生成。分子荧光和拉曼等光谱结果表明,超低填充聚酯纳米复合材料界面区域形成了新化学键作为新偶极子贡献了额外极化。 0.1 wt%硼酸钙/PET 纳米复合材料介电常数为 6.1 ,约为纯 PET 2 倍。同时 DSC 和 XRD 数据表明,超低填充硼酸钙有效地能够降低了 PET 晶体尺寸和提高了结晶度,增强深陷阱(Deep trap)程度,同时提升了击穿强度和介电常数,从而超低填充聚酯纳米复合材料的最大储能密度高达 15.11 J/cm³ (690 MV/m),约为纯 PET 2.5 倍。在放电性能测试中, 0.1 wt%硼酸钙/PET 纳米复合材料的放电能量密度为 1.5 J/cm³ (300 MV/m),远优于目前商用双轴拉伸聚丙烯薄膜的放电性能,且呈现出良好的充放电稳定性。双原位合成策略不仅简单、安全、环保、低成本,较易实现超低填充硼酸钙均匀分散和规模化合成高性能聚酯纳米复合材料,还可能在原子分子及纳米尺度上组装硼酸钙结构,丰富聚合物成型加工理论,提供聚合物形态和性能调控新方法。

D10-58(Oral)

多孔高分子薄膜的宏量制备及其在 Transwell 细胞共培养系统中的应用

张宏*, 高艺
天津大学

多孔膜可模拟细胞基底膜微环境,在细胞共培养体系中应用广泛。传统的 Transwell 膜由于其较低的孔隙率(约 6%)和由于较大厚度(约 10 微米)导致光学不透明性。本研究展示了一种一步法、大规模制备自支撑多孔高分子薄膜的方法,其厚度仅为数百纳米。通过高分子共混物相分离,使用线棒涂布制备的薄膜相比 Transwell 膜薄 20 倍,具有 3 倍以上的孔隙率和高透明性。多孔高分子薄膜体现出优良的分子渗透性,能显著减少细胞间的距离,从而促进信号交换路径。本研究有望建立一个体外细胞共培养系统,增强光学透明性,并简化了多孔膜的大规模制造工艺。

D10-59(Oral)

高兼容性深共晶溶剂/聚氧化乙烯聚合物电解质实现 4.5 V 金属锂电池稳定运行

刘奇*
四川大学

离子电导率不足、Li⁺转移数(t_{Li^+})有限以及电化学窗口狭窄严重限制了聚氧化乙烯(PEO)基聚合物电解质(PE)的实际应用。在此,我们设计了一种新型的基于深共晶溶剂(DES)基的 PEO PE,用于稳定高压锂金属电池(LMBs)。DES 降低了 PEO 的结晶度,同时促进了 LiTFSI 的解离,释放出更多的游离 Li⁺,从而提升了 Li⁺在 PEO 基体中的传输。此外,DES 与 PEO 端基-OH 之间的相互作用促进了基于 PEO 的 PE 在高电压下的稳定性。同时,氟代碳酸乙烯酯(FEC)添加剂对离子电导率也有积极影响,它还能同时构建稳固的、富氟的固体电解质界面 SEI,确保锂沉积均匀。正如预期的那样,所开发的 PE 具有不燃性、相对较高的离子电导率(室温下为 0.18 mS cm⁻¹)和较宽的电化学窗口(VS. Li/Li⁺可达 4.8 V),以及稳定的电解质/电极界面特性。作为概念验证,PEO-DES-FEC(简称 PDF),Li||PDF||Li 对称电池在室温和 60°C 条件下,在 0.2 mA cm⁻² 和容量 0.2 mAh cm⁻² 下可分别稳定循环 200 小时和 300 小时以上。PDF PE 基的 LiFePO₄ LMB 在 0.1 C 和 60°C 下循环 100 次后,容量保持率高达 87.9%。基于 PDF PE 的电池在 4.3 V 和 60°C 下应用于高电压 Li||NCM811 LMB 时具有出色的循环性能。更重要的是,当截止电压进一步提高到 4.5 V 时,Li||PDF||NCM811 电池在 0.5 C 下的最大放电容量为 165.1 mA h g⁻¹,在 85 次循环后仍

具有良好的循环稳定性，容量为 $134.9 \text{ mA h g}^{-1}$ 。这是 PEO 基电解质在 4.5 V 高压条件下的成功示范之一，突破了传统 PEO 基电解质的电压限制。

D10-60(Invited)**PBAT 老化的快速评价与寿命预测**

杨睿

清华大学

PBAT 作为一种典型的可降解塑料，广泛应用于地膜，人们希望其使用寿命和作物生长周期匹配。但是，受不同气候地区的条件影响，PBAT 地膜的使用寿命不同。如何快速准确地预测其使用寿命是个挑战。

我们基于本课题组开发的高灵敏度多因素耦合老化评价系统，建立了 PBAT 的寿命预测模型。可以比较不同气候地区 PBAT 降解速率的差异，加速老化和自然老化结果的关联关系，并预测不同气候地区 PBAT 的力学性能随时间的变化趋势。

D10-61(Invited)**生物医用聚乳酸基微型骨螺钉的微型加工制备研究**

陈英红*, 谭佳宇, 谢页平, 丁薇薇, 陈美琼, 王琪

四川大学高分子研究所

在医疗科技飞速发展及社会人口老龄化日趋严重的背景下，人们对骨折固定器件的需求持续上升。骨螺钉作为骨折修复的关键医疗器件之一，在骨科手术中起到了至关重要的作用。聚乳酸（PLA）基于其出色的生物相容性和生物可降解等优点^[1]，在选择适合于骨固定器件制备的材料中日益显示其优势地位。聚乳酸（PLA）具有在体内逐步降解吸收的特点，有效降低患者需要二次手术移除的痛苦，并减缓由于材料长期植入所带来的潜在并发症风险。然而，PLA 作为骨固定材料使用也存在较大挑战，如 PLA 分子链半刚性的骨架结构使其分子链运动能力差，结晶能力弱；此外，PLA 固有的脆性也是其作为骨固定材料服役不可忽视的一个重要问题。目前，聚合物骨螺钉的制造方法主要包括溶剂铸造、机械车削、3D 打印等，但这些生产方法在品质控制、生产效率和成本方面存在挑战，从而可能增加患者的负担及使用上的不便。受建筑行业通过在混凝土中构建定向排列的钢筋结构提高其强度的启发，本工作着眼于解决 PLA 韧性和强度难以兼顾的难题，创新利用微型注塑天然的强剪切应力场、高的温度梯度场^[2-3]以及退火后处理温度场实现了 PLA 基材料微型骨螺钉中高度取向的分散相原位纤维化结构、shish-kebab 结晶结构等的调控。另一方面，通过在 PLA 基体中引入具有增韧作用的可降解聚合物以及良好分散的成骨活性填料，同时结合优化微型注塑加工工艺，调控复合材料分散相结构，制备了复型好、强度高和生物相容性好的微型骨螺钉，如聚乳酸（PLLA）/聚丁二酸-己二酸丁二醇酯（PBSA）共混物骨螺钉，左旋聚乳酸（PLLA）/右旋聚乳酸（PDLA）共混物骨螺钉、左旋聚乳酸（PLLA）/聚偏氟乙烯（PVDF）共混物骨螺钉、聚乳酸（PLLA）/聚己内酯（PCL）/羟基磷灰石（HA）复合材料骨螺钉等，深入分析了增强增韧机理。相关研究为新型 PLA 基生物医用微型器件的制备提供了新策略、新技术和新理论，应用前景广阔。

本文得到国家重点研发计划项目(2022YFC3901805)、国家自然科学基金(U21A2091 & 51773121)和四川省国际科技创新合作重点项目（2024YFHZ0232）的资助。

主要参考文献

- [1] Rasala, R. M.; Janorkarc, A. V.; Hirt, D.E. Poly(lactic acid) modifications. *Progress in Polymer Science*. 2010, 35, 338-356.
- [2] Whiteside B.R.; Martyn M.T.; Coates P.D.; Allan P.S.; Hornsby P.R.; Greenway G. Micromoulding: process characteristics and product properties. *Plastics, Rubber and Composites*. 2003, 32, 231-239.
- [3] Whiteside B.R.; Martyn M.T.; Coates P.D.; Greenway G.; Allen P.; Hornsby P. Micromoulding: process measurements, product morphology and properties. *Plastics, Rubber and Composites*. 2004, 33, 11-17.

D10-62(Oral)

PLA/PBAT 交替多层材料的界面扩散增容机制及其强韧化效应研究

艾进翔, 郑宇*, 郭少云

四川大学 高分子材料工程国家重点实验室

聚乳酸 (PLA) 和聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯 (PBAT) 是当前用量最多的两种可生物降解聚合物, 且力学性能完美互补, 但两者热力学相容性差, 导致 PLA/PBAT 共混材料强韧不平衡, 已成为阻碍其推广应用的一大瓶颈。引入扩链剂进行化学反应增容是解决上述问题的最常用策略, 但同步形成的部分交联产物会破坏体系的全生物降解性, 化学试剂的应用也会对生产工艺绿色化造成一定负面影响。那么能否在不添加增容剂前提下, 基于单纯的物理相互作用增容 PLA/PBAT 共混物呢? 为此, 本工作通过微纳层叠共挤出技术制备了 PLA/PBAT 交替多层材料, 发现多层熔体流经叠加单元时受到垂直方向压缩和平面方向拉伸的耦合作用, 其中压缩场促进界面分子缠结, 拉伸场引发界面扰动融合, 协同促进了交替多层材料的界面扩散增容效应。在不添加第三组分的前提下, 实现了可利用层数变化调控的力学性能, 其中 512 层样品的拉伸强度为 29.2MPa, 断裂伸长率高达 459.7%。更重要的是, 将微纳层叠共挤铸片工艺与成熟的流延成膜、吹塑成膜或双拉成膜工艺相结合, 可为更高性能全生物降解 PLA/PBAT 复合薄膜的设计构筑及工业化生产提供新策略, 进而促进包装薄膜产业绿色升级和双碳目标加速落地。

D10-63(Oral)

Preparation of Polyethylene Nanocomposites Based on Polyethylene Grafted Exfoliated α -Zirconium PhosphateMingzhen Zhao^{*1,2}, Wu Hongmao³, Wu Jenlong³, Kang Wenhao³, Sue Hung-Jue²

1. Shanghai Jiaotong University

2. Texas A&M University

3. Formosa Plastics Corporation

Polymer nanocomposites with well-exfoliated nanoplatelets exhibit significantly improved physical and mechanical characteristics. Yet, achieving such dispersion in polyolefin matrices remains challenging due to poor compatibility and entropic penalties between 2D inorganic fillers and nonpolar polyolefins. Grafting polyolefin chains onto exfoliated nanoplatelet surfaces presents a straightforward and efficient strategy for enhancing the polyolefin/nanoplatelet interface, because the grafted polyolefin chains on the nanoplatelets can form effective entanglement and co-crystallize with the polyolefin matrix. In this research, polyethylene (PE) grafted α -zirconium phosphate (ZrP) ZrP-g-PE was prepared and blended with PE matrix. The graft density of ZrP-g-PE was controlled to maintain ZrP exfoliation upon subsequent blending with PE matrix. It was found that grafted PE has a different morphology and that the long PE brushes with medium graft density on ZrP can achieve sufficient chain entanglement and cocrystallization with PE matrix to stabilize and maintain ZrP-g-PE dispersion after solution or melt mixing. Confining PE crystallization in ZrP-g-PE leads to perpendicular orientation relative to ZrP nanoplatelets. Both ZrP-g-PE and PE/ ZrP-g-PE nanocomposites exhibit significantly enhanced melt strength, mechanical properties, and dimensional stability compared to neat PE. The implications of this study for the development of high-performance polyolefin nanocomposites are discussed.

D10-64(Oral)

Hierarchical Dual-Mode Efficient Tunable Afterglow via J-Aggregates in Single-phosphor-doped Polymer

Longming Jin, Wei Hong*

Sun Yat-sen University

The development of polymer-based persistent luminescence materials with color-tunable organic afterglow and

multiple responses is highly desirable for the applications in anti-counterfeiting, flexible displays and data-storage. However, achieving efficient persistent luminescence from a single-phosphor system with multiple responses remains a challenging task. Herein, a hierarchical dual-mode emission system is developed by doping 9H-pyrido[3,4-b] into an amorphous polyacrylamide matrix, which exhibits color-tunable afterglow due to excitation-, temperature- and humidity-dependence. Notably, the coexistence of isolated state and J-aggregate state of the guest molecule not only provides excitation-dependent afterglow color, but also leads to hierarchical temperature-dependent afterglow color resulting from different ultralong thermally activated delayed fluorescence (TADF) and organic phosphorescence (UOP) behaviors of the isolated and aggregated states. The complex responsiveness based on the hierarchical dual-mode emission can serve for security features through inkjet printing and ink-writing. These findings may provide further insight into the regulated persistent luminescence by isolated and aggregated phosphors in doped polymer systems and expand the scope of stimuli-responsive organic afterglow materials for broader applications.

D10-65(Invited)**基于动态脲键的共价自适应网络**

王占华*

四川大学

通过引入路易斯酸催化剂、改变伯胺毗邻基团的电负性以及柔性大分子链运动过程中产生的熵变诱导,实现了基于伯胺的脲键在大分子网络中的动态性,发展了系列共价自适应聚脲材料。脲键之间形成的氢键对聚脲材料的机械性能及动态性能同时有贡献,可以实现材料的力学性能及动态自修复性能协同提升。以开发的动态聚脲为基体树脂,与碳纤维复合制备了动态交联碳纤维增强聚脲复合材料。脲键的动态特征赋予复合材料自修复和可回收性能,回收后的树脂和纤维可以被重新利用。由于氨基和异氰酸酯单体来源广泛并且易得,此方法可以很容易地制备不同类型的自愈合可回收聚脲及其复合材料,这些材料在涂料、3D打印、航空制件等领域具有应用潜力,为自修复聚脲材料实现商业化应用提供思路。

D10-66(Oral)**二维 Janus 多面体低聚倍半硅氧烷/多金属氧酸盐超分子纳米晶体阻燃环氧树脂研究**

叶新明*, 刘云兰, 杨凡, 王文生, 李洁, 李迎春

中北大学

多面体低聚硅倍半氧烷 (POSS) 作为有机无机杂化材料,在耐高温材料、阻燃材料 and 功能材料等方向具有重要应用价值。将含金属的 POSS 与多金属含氧酸盐进行复合制备具有更高效的阻燃抑烟效果的材料是研究者关注的热点之一。针对环氧树脂 (EP) 难以同时实现高效阻燃、抑烟和增韧的工业实际应用难题。本文采用实验室自制的含锂七异丁基 POSS (ibu-Li-POSS) 和低成本工业显色剂 H3PMo12O40 为原料,通过简单的一锅法合成了独特的 Janus 二维超分子纳米片。采用 SEM 和 TEM 观察到了低聚硅倍半氧烷/多金属氧酸盐 (POM (Mo)-POSS (ibu-Li)) 纳米片形貌。通过 FTIR 和 NMR 等表征了低聚硅倍半氧烷/多金属氧酸盐 (POM (Mo)-POSS (ibu-Li)) 纳米片的准确化学结构。

将合成的 POM (Mo)-POSS (ibu-Li) 纳米片添加到 EP 中,研究了复合材料的阻燃和抑烟性能。极限氧指数 (LOI) 和锥形量热测试结果显示:超低添加量 (2 wt%) 的 POM (Mo)-POSS (ibu-Li) 明显降低了 EP 复合材料热释放速率峰值、产烟速率峰值和 CO 产生速率峰值,分别降低了 43.9%、40.6% 和 65.8%, LOI 的数值从 EP 的 24.0% 直接提升到 30.2%, 并通过了 UL-94 的 V-0 级。TG-FTIR 分析显示,将 POM (Mo)-POSS (ibu-Li) 应用于 EP,有效抑制了复合材料在热分解过程中易燃和有毒气体的释放。力学性能方面,在 EP 中加入 2 wt% 的 POM (Mo)-POSS (ibu-Li) 纳米片极大地增强了纳米添加剂与 EP 基体的相容性,与 EP 相比,弯曲强度和冲击强度分别提高了 36.2% 和 78.2%,韧性和强度得到了协同提高。因此,POM (Mo)-POSS (ibu-Li) 超分子纳米片的成功制备以及应用必将引起研发高性价比 POSS 衍生物

作为纳米级阻燃抑烟剂的前沿热潮。

D10-67(Oral)**Dissociation and Reconstruction of Force Driven High Performance C-N Cross-linked Networks**

Yang Gao*

China Academy of Engineering Physics

Covalent cross-linked polymers have been widely used in various fields of daily life, due to their excellent mechanical strength and thermal stability. As is known to all, the majority of covalent cross-linked polymers materials are employed under ambient conditions, where the integrity of polymer network directly affects its performance and lifetime. However, because of long-term external force disturbances, and induce irreversible covalent bond breakage in polymers, thereby disrupt the cross-linking network and severely weaken the mechanical and functional properties of polymer materials. Dynamic covalent bonds, as a type of chemical bond, can be broken and restored under certain conditions, have attracted much attention in fields such as supra-molecule materials and responsive materials. Here, we demonstrate triazolidione (TAD)-indole adducts as cross-linking points in dynamically covalent cross-linked polymers, enabling the material to exhibit reversible stress-responsiveness in real-time at ambient temperature. The introduction of acrylic acid 2-phenoxyethyl ester as the side chain of the polymer network significantly improves the mechanical properties and ductility of poly-acrylic acid 2-phenoxyethyl ester. In addition, the covalent cross-linked polymer we synthesized can spontaneously recombine immediately after dissociation under ambient conditions, thereby achieving force reversible behavior to regulate polymer chain conformation and maintain network integrity.

D10-68(Oral)**单分散掺铁聚苯乙烯微球的可控制备**

刘豪, 陈强, 陈素芬, 李洁, 顾倩倩, 刘梅芳*

中国工程物理研究院激光聚变研究中心

聚合物微球被广泛用于制备惯性约束聚变 (ICF) 靶丸。通过掺杂各种材料, 可以制造出具有特殊功能和效果的 ICF 靶用聚合物空心微球。本研究采用物理掺杂和微流体技术相结合的方法, 成功制备了二茂铁掺杂的聚苯乙烯空心微球, 其直径约为 $1550 \pm 20 \mu\text{m}$, 壁厚约为 $19 \mu\text{m}$, 具有较高的球度、同心度和表面光滑度。使用多种测试技术对微球进行了分析, 包括 DSC、TGA/DTG、FTIR、Raman、SEM 和白光干涉仪等。结果表明, 二茂铁被成功掺杂到 PS 基体中, 得到了一种新型聚合物微球, 它结合了金属、非金属和有机聚合物的优点。当二茂铁在油相溶液中的含量为 0-3% 时, 得到的微球外观与基体中未掺杂二茂铁的 PS 微球相似, 球度达到 99.5%。对于油相溶液中含有 3% 二茂铁的复合乳粒, 经过固化和干燥处理后, 空心微球表面的 " R_a "、" R_q " 和 " R_t " 值分别为 $6.9 \pm 2.0 \text{nm}$ 、 $9.2 \pm 3.0 \text{nm}$ 和 $62 \pm 40 \text{nm}$, 具有较高的表面性能。该研究为制备 ICF 靶用聚合物空心微球提供了一些有价值的见解, 为提高惯性约束聚变实验中靶丸的制备效率铺平了道路。

D10-69(Oral)**输变电装备用弹性体复合材料的研究及应用进展**尹航^{1,2}, 何强^{1,2}, 聂京凯^{1,2}, 刘辉^{1,2}, 韩钰^{1,2}

1. 国网智能电网研究院有限公司先进输电技术全国重点实验室

2. 国网智能电网研究院有限公司电工新材料研究所

弹性体复合材料在电力系统中扮演着至关重要的角色, 其导电、密封、减振和绝缘等特性能够显著提高电力设备的安全性和可靠性。随着电力系统的不断升级, 设备内部电、热及其他工况条件日趋严峻, 弹性体复合材料性能提升对于确保电力系统可靠运行具有重要意义。因此功能橡胶材料具备优异的导电、绝

缘、密封和减振等性能的同时，还要有强环境适应性及较长工作寿命，如何确保性能的一致性和稳定性，同时兼顾成本控制，是目前电力行业功能橡胶的核心问题。

该文介绍了电力系统内部弹性体减振降噪材料与弹性体密封材料的研究进展。弹性体减振降噪材料方面详细介绍了一种多孔橡胶结构的宽温域、高阻尼耐油橡胶材料，采用该材料的隔振结构可使电抗器整体噪声下降约 6.2dB(A)与；一种高阻尼耐苳基甲苯橡胶材料，加工产品拉伸强度 10.4MPa，损耗因子最高值为 0.97，有效阻尼温域为-13°C-37°C，加工性能优良，满足电容器服役环境。弹性体密封材料方面介绍了目前电力系统针对大型充油设备、GIS 开关系统以及设备冷却系统的绝缘油密封材料、绝缘气体密封材料、冷却系统密封材料的研究进展以及弹性体密封材料在输变电领域的重点发展方向。

D10-70(Invited)

富氮同步交联策略开发环境友好型多功能超吸水材料

卢凌彬*

海南大学

高效水资源利用对农业生产有重要作用。作为一种易于获取的保水技术，传统的高吸水性材料展现出了卓越的水分吸收和保留能力，在植物遭受干旱胁迫时能够释放水分，可有效提升水资源利用效率。但高吸水性材料主要由石油产品衍生的丙烯酸、丙烯腈或丙烯酰胺单体合成的。这些产品不仅无法完全被生物降解，而且会逐渐分解成微塑料，对生态环境造成不容忽视的危害。因此可降解的环境友好型高吸水性材料成为土壤改良领域的研究热点。相比于难降解的合成聚合物，天然多糖具有可生物降解、无毒、环境友好、资源丰富等诸多优点，是石油衍生聚合物的更安全的替代品。天然多糖含有羟基、氨基、羧酸酯基等丰富的基团，可以通过化学改性在天然多糖分子链上引入亲水基团，大大提高多糖高分子的吸水性能，从而实现环境友好型高吸水性材料的开发。作为一种廉价普适的化肥，尿素常直接使用或被物理负载于载体进行缓释。然而，尿素具有极快的溶解速度，难以实现长效可控释放。

通过化学反应将尿素引入多糖高分子的结构中可望有效解决以上问题。为此，本研究创新性地提出了富氮同步交联策略，通过化学结构分子设计的方法，将含氮物质尿素作为交联剂引入多糖高分子网络中，同步实现多糖高分子的交联和富氮化，开发环境友好型多功能土壤改良剂。在富氮同步交联技术中，通过活化海藻酸钠分子链上的羧基，引发其与尿素之间的酰胺化反应，形成共价交联网络，制备了具有缓释尿素功能的海藻酸钠高吸水性水凝胶。值得注意的是，在本策略中，尿素既充当 SA 聚合物链之间的交联剂，又充当化学负载的肥料，从根本上解决物理方法负载尿素的前期释放速度过快问题。水凝胶水吸附倍率高达 730.549 g/g，且在土壤中可完全降解，具有良好的生物降解性。通过调整尿素和 SA 的配比可以有效调控 SAUR 水凝胶的降解周期，以适应不同植物的生长需求，最长降解周期可达 9 周。在降解过程中，SAUR 水凝胶可以长期向土壤中释放氮、磷和钾，从而促进植物生长，甚至可以抑制植物中有害硝酸盐的积累。通过本研究的同步氮化交联策略，成功获得了环境友好的富氮超吸水材料，实现材料保水、缓释多功能一体化，为保水剂的降解、肥料淋失以及连带的环境问题提供了新的解决方案，有望在土壤改良和农业种植领域得到广泛的应用。

D10-71(Oral)

高分子可控力化学

王振华*, 冯浩洋, 王晨, 赵若晴

西北工业大学

高分子力化学是高分子领域近年来的重要突破，其关键的科学问题是如何实现力化学反应高效化和大分子链结构的精准调控。高分子力化学主要通过高能量机械力诱导稀溶液中大分子链的断裂降解，因此不可避免地造成驱动能量高、反应效率低。与此同时，基于降解机制的高分子力化学通常聚焦于力敏基团的分子结构调控，却忽略了对大分子链结构的调控。

报告人将围绕高分子可控力化学进行汇报，具体包括：1) 应力极化效应调控的力化学自由基聚合[1]:

基于压电效应和接触电效应的力化学调控可控自由基聚合。2) 小分子调控的力化学自由基聚合: 设计了具有弱相互作用的小分子化合物, 构筑了低能量驱动、微量杂质且耐受空气氧的力化学自由基聚合, 实现了固态难溶单体的可控聚合。3) 基于自由基聚合精准调控实现室温磷光高分子材料可控构筑: 基于可控自由基聚合构筑了多相纳米结构, 实现对室温磷光、力学柔性、自修复在单一组分高分子材料的可控融合, 为新型力化学调控功能高分子奠定基础。

D10-72(Oral)

分步自成核程序制备可控可重复结晶状态及其在提高 TPI/CB 复合材料 PTC 再现性中的应用

刘根实, 时少哲, 李光宪, 廖霞*

四川大学高分子科学与工程学院

随着温度的升高, 具有正温度系数效应 (PTC) 的导电聚合物其电阻值随晶体的熔融而突然增大, 从而可实现电路的过热保护。但由于高温熔融后导电网络的随机重组, PTC 性能呈现出较差的再现性。为了仅通过调节半结晶聚合物的结晶状态来提高 PTC 的再现性, 本文利用自成核结晶 (SN) 过程构造了可循环重复的骨架晶体 (SC) 和驱动晶体 (DC) 共存体系, DC 的熔融为体系提供了 PTC 性能, 而 SC 的存在可以限制 DC 熔融过程中导电填料的迁移以降低新形成导电网络的随机性, 从而提高 PTC 性能的可重复性。本文首先对反式-1,4-聚异戊二烯 (TPI) 和 TPI/炭黑 (TPI/CB) 复合材料的 SN 过程进行了对比, 研究发现 CB 的加入使 TPI 的熔体记忆宽度从 42 °C 缩小到 9 °C, 总 SN 效率降低了 40%。引入分步自成核程序可调节 SC 和 DC 的相对含量比例, 与此同时 TPI/CB 复合材料中致 PTC 性能的晶型由 β 晶转变为具有更高熔融焓的 α 晶, 在有效提高 PTC 再现性的同时增大了 PTC 的强度。本文为研究结晶状态的可重复性提供了一种新的可控方法, 并为受结晶状态显著影响的聚合物性能的再现性研究提供了新思路。

D10-73(Oral)

用于油/水分离的磁响应超轻 NiCo@rGO 气凝胶微球

程煜, 王占华, 卢锡立, 夏和生*

四川大学高分子研究所

提高吸附剂的吸附能力并实现快速分离对水处理相当重要。采用静电喷雾、液滴球化、交联固定金属、冻干和热还原的新工艺合成了一种具有高比表面积和磁响应的新型含镍/钴还原氧化石墨烯气凝胶微球 (rGOAMs-M)。氧化石墨烯和海藻酸钠的水性分散混合物在高电压下电喷雾产生液滴, 这些液滴被收集在四水合镍/醋酸钴溶液中, 然后在海藻酸钠和金属离子之间交联。得到的 rGOAMs-M 具有卷心菜状的内部结构, 对有机溶剂/油的吸附容量为 107-270 g·g⁻¹, 并具有油/水乳液分离能力。在磁场作用下, rGOAMs-M 还能快速组装并从介质中分离出来。

D10-74(Oral)

基于力学激励探索非晶态聚苯乙烯微观结构非均匀性

张婧祺, 乔吉超*

西北工业大学

非晶聚合物微观结构非均匀性与其塑性变形和动态松弛机理之间的内在联系是提高非晶聚合物应用性能的重要研究方向。本文以典型高分子玻璃 (即聚苯乙烯) 为研究对象, 系统研究了聚苯乙烯的动态松弛行为、应力松弛和蠕变行为。实验结果表明, 无定形聚苯乙烯的应力松弛行为表现出典型的非指数特征。无论是单一瞬时的指数衰减形式, 还是有限瞬时的有限谱法, 都不能合理地描述聚苯乙烯的应力松弛行为, 这归因于无定形聚合物微观结构的异质性导致了瞬时谱的连续分布。此外, 本文还进一步研究了物理老化导致的应力松弛行为变化。结果表明, 物理老化导致元稳定体系进入更稳定的能态, 变形单元难以被激活, 从而导致应力松弛过程减慢。综上, 本文通过实验研究和理论分析, 从微观结构演变和宏观力学响应的角

度，建立了聚苯乙烯微观结构异质性与其原子迁移率和动态松弛行为之间的联系。

D10-75

天然孔洞对蓝海星皮肤抗拉性能的影响

陈曦, 季洪梅*, 李小武

东北大学

皮肤是人体最大的器官，其力学性能是确保在整个生命周期中维持完整性的必要条件，从而满足对生命的保护以及维持热交换等功能。皮肤由表皮、真皮和皮下组织三部分组成，其中真皮含有丰富的胶原纤维、弹性纤维和网状纤维，使皮肤具有较大的弹性和韧性，因此皮肤力学性能主要由真皮层提供。与其他生物皮肤不同，蓝海星的皮肤上长有许多天然的孔洞，但其对力学性能的影响鲜见报道。因此，本工作以蓝海星皮肤为研究对象，对水分及加载速率对其拉伸性能的影响进行了系统的研究，重点关注海星皮肤上的孔洞对裂纹扩展的影响，探究其在不同条件下的抗拉性能和纤维变形机制。

在相同加载速率下，湿样品比干样品具有更高的拉伸强度及应变，水合作用起关键影响，水分子能与胶原蛋白之间形成氢键，能够促进胶原纤维的滑动，使胶原纤维具有很高的变形量，对应也需要较高的载荷使其失效。本工作进一步对湿样品进行了 4 种速率（0.1、1、10、100 mm/min）下的拉伸实验。结果表明，纤维的变形机制展现出很大的差异，100 mm/min 下来不及发生形变，纤维仍以层状排布，且出现了分层，开始出现大尺寸的纤维簇；10 mm/min 下纤维明显发生了大角度的偏转，不规则地缠结在一起，呈卷曲状，部分纤维有向加载方向偏转的趋势；1 mm/min 时大部分纤维都向加载方向偏转，且都被拉直不再相互缠结，发生断裂后近似平行地堆叠在一起呈“刘海状”；0.1 mm/min 时纤维片层发生了近 90°的偏转，近似平行于加载方向，由于载荷的限制并未有从片层中撕裂的单根纤维。皮肤表面存在的孔洞则会影响裂纹的扩展：低速率下（0.1、1 mm/min）孔洞时则会钝化裂纹，或诱导裂纹发生偏转；高速率下（100 mm/min）裂纹直接穿过孔洞，从而降低了材料的强度。因此，在一定的加载速率内，孔洞的存在能够显著提高皮肤的抗拉性能。

D10-76

基于旋涂法的多层量子点-玻璃鳞片复合材料的制备及其应用研究

杨凤英, 熊英*

四川大学

量子点材料凭借其发射宽度窄、色彩纯净度高、发射可调等优势，在背光显示领域展现出巨大的应用潜力。然而，未受保护的量子点材料容易收受到水、氧、光和热等环境因素的侵蚀而导致猝灭，这成为了其应用的一大瓶颈。为了提升量子点材料的环境稳定性，目前主要采用合金掺杂、表面钝化、无机包覆和有机包覆等方法。在无机包覆这类方法中，有许多研究将量子点（QDs）嵌入无机玻璃中，将量子点的出色发光性能与玻璃的化学、机械和热稳定性相结合，克服了量子点的不稳定瓶颈。但这一方法面临着合成温度高、条件苛刻等问题，和其他封装模式如聚合物封装相比，柔韧性也大幅降低。为了克服这些不足，本研究采用了一种创新的封装策略，即用玻璃鳞片作为阻隔填料，通过旋涂法将量子点封装在掺杂玻璃鳞片的聚合物基体中。玻璃鳞片是一种具有大比表面积和高长径比的增强填料，同时具有良好的光学透明性能和阻隔性能。

在本研究中，通过在聚合物基体中添加玻璃鳞片，成功提高了材料的阻隔性能，并保持了良好的柔韧性。旋涂法使得制样工艺更加温和、简单，并可实现低温加工，不仅避免了高温加工对量子点的影响，而且通过离心力的作用，可以更好的实现玻璃鳞片的水平排布，从而进一步提升阻隔性能。实验结果表明，随着玻璃鳞片掺杂量的增加，材料的水氧阻隔效果得到了显著的提升，38wt%掺杂量的氧气透过系数降低了 97%，而水蒸气透过率降低了 64%。此外，薄膜样品在弯曲循环一万次后，仍能具有较好的阻隔性能，这充分证明了本研究所采用的封装策略的有效性和优越性。

D10-77

A Photothermal Therapy-Based Composite Hydrogel for Spatiotemporal Management of Inflammation Control and Bone Regeneration in Severe Periodontitis

Huiyu Zheng, Guiting Liu*

Sichuan university

Chronic periodontitis remains a global issue in oral health and it is still a significant challenge to achieve the spatiotemporal management of inflammation control and bone repair. Herein, we designed a 2D-nanomaterial composite hydrogel therapy platform, PDMM@LF-HAMA, which initially controls inflammation through antibacterial action and mitigates diffuse gingival bleeding, followed by promoting bone regeneration through photothermal therapy. The PDMM@LF composite nanosheets, as bioactive components, was constructed by loading the antibiotic levofloxacin (LF) onto PDA-modified Mxene (PDMM) 2D-composite nanosheets, and further embedding them into HAMA injectable hydrogel matrix to adapt to the complex environment inside the oral cavity. The structure and composition of composite hydrogels were systematically verified by characterizing micro-morphology, porosity, swelling ratio, hydrophilicity, etc. The adsorption-activated coagulation mechanism of the PDA and Mxene was confirmed by observing the morphology of blood cells and calculating the coagulation time, etc. The physical and biological synergistic antibacterial mechanism of LF and Mxene components in PDMM was validated by observing bacterial morphology and calculating bacterial survival rate, etc. Additionally, the composite hydrogel exhibited mild photothermal effects under near-infrared (NIR) light, which further promoting cell proliferation and osteogenic differentiation in vitro. Finally, in vivo experimental periodontitis model further demonstrated that the composite hydrogel achieved inflammation control within 2 weeks. Combined with NIR (808 nm, 0.4 W/cm²), PDMM@LF-HAMA had a thicker periodontal epithelial fibrous layer and better alveolar bone height and morphology than the group without NIR after 8 weeks, while it also enhanced the expression levels of OCN and Runx2. Overall, this work provides an exploratory approach for the comprehensive management of periodontitis through the whole stage.

D10-78

Electrothermal Curable Epoxy Interface Adhesive Composite with Low Voltage: An ideal Thermal Management and EMI Shielding Material

Ke Zheng, Xianlong Zhang*

Sichuan University

Traditional interface adhesive materials usually required the whole heating or slow curing at room temperature. To overcome this defect, this study proposed a brand-new strategy: electrothermal effect of a conductive network was comprehensively utilized so as to generate heat at the adhesive interface, which sufficiently promoted the epoxy to cure and cross-link to obtain a strong interface adhesion. Concretely, the Ni nanoparticles were uniformly embedded in the graphite foam wall to build a dense nickel layer by plasma-assisted activation. Then, the interpenetrating epoxy resin with latent curing agent was filled into these continuous pores to achieve epoxy/Ni/graphite foam composites (EP-Ni@GF). The composites can rapidly heat up to 160°C at a low voltage of 0.9V, and the interface adhesive strength was 5.93 Mpa, which reached to 92.7% of the traditional thermal curing. Unexpectedly, the heating area was concentrated on the interface without damaging other components. The thermal conductivity of EP-Ni@GF reached 122 W·m⁻¹·K⁻¹, and the Ni@GF exhibited extraordinary EMI SE of ≈ 111.23 dB and an effective absorption bandwidth of 7 GHz in 8-12 GHz. This work provided a new idea for the preparation of interface adhesive materials with high thermal conductivity and excellent EMI shielding.

D10-79

受生物形态发生启发的双层聚合物薄膜的 3D 可控变形

猴凯, 翁更生*

宁波大学

将二维薄膜变形为具有复杂曲率的三维形状对于开发下一代软体机器人、柔性设备和传感器具有重要意义。然而复杂的材料设计与制备过程限制了此类材料的实际应用。在此, 我们提出一种受生物形态发生启发的设计策略, 该设计基于 UV 映射的厚度梯度来实现由水凝胶层和疏水聚合物层组成的双层材料的形状转变。我们将疏水层作为被动层进行激光雕刻, 形成厚度梯度分布, 进而对基于主动层失水收缩驱动的形变过程实现编程, 变形为具有复杂曲率的三维形状, 如葫芦和跑车, 并且变形后的材料表面没有不可控的屈曲和褶皱。我们的这一创新设计不需要对材料进行繁琐的非均匀或不连续性设计, 为材料的复杂三维形状转变提供了一个简单快捷的策略, 并为软体机器人、传感器和仿生系统的规模化、实用化设计与制造提供了新的思路。

D10-80**用于人体健康监测、物体识别和非接触式手势识别的可 3D 打印的自供能柔性传感器**

唐敬植、猴凯、王冲、魏明晖、谭秋丽、翁更生*

宁波大学

提出了一种新的基于原电池设计的可 3D 打印的自供能柔性传感器设计策略。基于此制备的柔性传感器可以实现健康监测, 物体识别和非接触式手势识别。该软传感器由 3D 打印的聚丙烯酸(PAA)水凝胶电解质层、柔性负极层和柔性正极层组成。负极层是 3D 打印的 Cu^{2+} 交联聚(N, N-二甲基丙烯酰胺-co-3-丙氨酸-2-羟丙基甲基丙烯酸酯)水凝胶(PDA/ Cu^{2+} /Cu 水凝胶)。正极层是含有 MnO_2 的 PAA 水凝胶的底部薄层(PAA/ MnO_2)。采用石墨薄膜作为柔性电极, 以完成柔性传感器的组装。该柔性传感器具有较高的机械载荷和温度灵敏度。它在拉伸、弯曲、挤压和冲击载荷下产生不同的电流响应。该柔性传感器具有检测人体身体活动和生理活动(如: 呼吸)的能力。基于该柔性传感器的力与无接触温度传感性质, 该柔性传感器能够用来识别物体尺寸及手势。这种具有自供能功能和多刺激响应性的柔性传感器为用于医疗保健和人机交互领域的柔性传感设备提供了新的思路。

墙报**D10-P01****自催化且高度可逆的咪唑脒基动态共价聚氨酯脒**

张董飞, 罗锋, 李洁华, 李震, 谭鸿*

四川大学

目前报道的动态共价键(DCBs)存在一定的缺陷, 包括反应速度慢和解离温度高, 这阻碍了 DCBs 交联聚合物的可重复使用。本文通过咪唑与异氰酸酯的快速自催化反应, 制备了一种咪唑-尿素键(IUBs), 无需额外的催化剂。发现 IUBs 通过热解离机制具有高度的可逆性, 同时也显示出与胺的不可逆交换。然后, 首先采用组胺(1H-咪唑-4-乙胺)作为扩链剂构建 IUBs 合成新型咪唑基交联聚氨酯脒(IMCPU)。IMCPU 可以进行熔体加工的多次循环, 即使在室温下也可以进行胺化。鉴于商品组胺的广泛可用性, IMCPU 在动态材料领域显示出广泛应用的巨大潜力。

D10-P02**全纤维素基光子晶体柔性薄膜的制备与表征**

王婷, 杨晗*

中国科学院大学

纤维素纳米晶体是从天然纤维素中提取的一种杆状纳米粒子,且能自组装形成具有手性向列液晶结构的虹彩薄膜。然而,这些薄膜硬脆易破裂,缺乏柔韧性,这些缺点极大的限制了纤维素纳米晶体薄膜的应用。虽然通过添加一些聚合物可以改善纤维素纳米晶体薄膜的柔韧性,然而要么会干扰纤维素纳米晶体的自组装而失去结构色,要么会降低复合薄膜的生物相容性以及可降解性。我们利用改性的另一种纤维素纳米粒子,即纤维素纳米纤维,来优化纤维素纳米晶体薄膜的机械性能,制备出同时具有结构色和良好柔韧性的薄膜。通过调整纤维素纳米纤维的含量及表面性质,我们获得了红、绿、蓝色且可折叠的全纤维素基光子晶体薄膜,其具有和纤维素纳米晶体薄膜相当的杨氏模量,但拉伸应变增加了 5 倍,且拉伸强度也提高到 72 MPa。我们所制备的全纤维素基光子晶体柔性薄膜,有望用于对环境和人体友好的电子皮肤、柔性传感器件以及可降解的防伪材料等诸多领域。

D10-P03

基于纤维素的高性能离子热电凝胶

陈煦晖,周泽航,卢灿辉*

四川大学高分子研究所

热电(TE)材料是能够实现热能和电能直接相互转化的一类新型能源材料。相比于传统电子热电(e-TE)材料,离子热电(i-TE)材料具有塞贝克系数高 2-3 个数量级的显著优势。环境湿度和水吸收是影响 i-TE 凝胶材料性能的关键因素之一,但是目前缺乏含水量变化与其性能影响作用关系与机理的系统性研究。本工作采用离子液体溶解纤维素,再吸水凝胶化,制得以离子液体和水为混合分散介质的纤维素基离子凝胶(CIG)。系统地研究了水对 CIG 结构和离子传输的影响。水的引入不仅可诱导纤维素聚集形成网络骨架,而且可促进离子扩散,降低离子传输阻力,并拓宽离子传输通道,有利于 i-TE 性能的提高。本研究通过调控含水量制备得到了具有高离子电导率(51.2 mS/cm)、高离子塞贝克系数(20.7 mV/K)和优异热电优值的离子凝胶,并实现了其器件化,为生物质基热电器件的优化设计制备提供了理论支撑与技术储备。

D10-P04

液相沉积法制备以 Talc 为基体的 SiO₂@Talc 复合粉体及应用

苗豪杰,刘静*

桂林电子科技大学

聚丙烯(PP)具有质轻、价廉、化学性质稳定、无毒、易加工等特点,在车辆、航天、医疗、包装等领域广泛应用。但 PP 耐低温性、耐冲击性相对较差,限制其在许多领域的应用。无机填料改性塑料是获得功能性高分子材料的有效方法之一,能在降低成本的同时改善塑料的特性。滑石粉(Talc)是一种常用于塑料填充的无机填料,具有低成本、高刚性的优点,能较好的提升塑料的模量。Talc 作为填料直接填充 PP 时由于相容性差导致 Talc 在 PP 中分散不均匀,将 Talc 制备成改性 SiO₂@Talc 复合粉体可以很好解决分散不均匀问题。以偏硅酸钠为原料,采用液相沉积法制备了化学接枝改性的 SiO₂@Talc 复合粉体,并将其应用于聚丙烯改性。通过 X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、傅立叶红外光谱(FTIR)、BET 测试法等手段对制备得到的复合粉进行表征。通过 XRD 可以看出成功制备出了 SiO₂,通过 SEM 可以观察到所制备的 SiO₂ 化学接枝和吸附在 Talc 表面,通过 FTIR 中的位于 2830cm⁻¹-CH₂ 键伸缩振动峰和位于 1715cm⁻¹-C=O 键伸缩振动峰可以观察到硅烷偶联剂(KH570)和硬脂酸(SA)化学接枝到 SiO₂@Talc。将复合粉体与聚丙烯进行混合,制备了增韧聚丙烯复合材料,并对其力学性能进行了测试。结果显示,添在经过 SA 协同 KH570 改性之后的 SiO₂@Talc 复合粉体做为填料填充 PP 后,PP 的拉伸强度比纯 PP 提升了 23.16%,比未改性 Talc 增韧 PP 提升了 7.43%;拉伸弹性模量比纯 PP 提升了 65.25%,比未改性 Talc 增韧 PP 提升了 14.32%;弯曲模量比纯 PP 提升了 51.87%,比未改性 Talc 增韧 PP 提升了 4.93%。本研究为利用偏硅酸钠制备 Talc@SiO₂ 复合粉体,并将其应用于聚丙烯增韧改性提供了一种有效途径,为聚合物复合材料的研究和应用提供了新思路。

D10-P05

结合废弃 iPP 薄膜的分步结晶法制备高性能 PPR 复合材料

蒋青泉¹, 郭佳俊¹, 卢晓英², 聂敏*¹

1. 四川大学高分子材料工程国家重点实验室, 四川大学高分子研究所
2. 中国石油石油化工研究总院合成树脂实验室

在能源短缺和日益严重的环境危机的背景下, 废弃塑料薄膜的再循环利用变得日益重要。然而, 直接将废弃塑料用作再加工材料的做法存在一个普遍的问题, 即再循环后的材料的机械性能往往较低。本研究基于这一背景, 提出了一种创新的分步结晶方法, 旨在提高废弃等规聚丙烯 (iPP) 薄膜的再循环价值, 并将其应用于 PPR 复合材料的制备中。首先, 我们对 β -成核剂 (β -NA) 和 iPP 对聚丙烯随机共聚物 (PPR) 的结晶行为进行了深入研究。随后, 通过引入逐步结晶的方法, 成功促进了 PPR/iPP/ β -NA 复合材料中 β 晶的形成, 并对其晶体结构、多形态组成和相形态进行了系统分析。最后, 对 PPR/iPP/ β -NA 复合材料的冲击性能进行了表征, 并提出了一种可能的增韧机制。研究发现, 分步结晶促进了 PPR/iPP/ β -NA 复合材料在等温过程中的 β -结晶和橡胶相的生长, 导致相对 β -晶体含量和低温冲击韧性从纯 PPR 的 0% 和 2.02 kJ/m² 增加到 PPR/iPP/ β -NA 复合材料的 33.4% 和 3.06 kJ/m²。分步结晶方法显著提高了复合材料中 β -晶体的含量, 并显著提高了其低温冲击韧性, 从而使其成为一种可行的废弃 iPP 薄膜再循环利用的途径, 同时为提高聚丙烯材料的低温性能提供了新的思路和方法。

D10-P06

环糊精基弹性疏水气凝胶用于宽频吸声

王佳欣¹, 张晟*¹, 李帮经^{2,3}

1. 四川大学高分子材料工程国家重点实验室
2. 中国科学院成都生物研究所山地生态恢复与生物资源利用重点实验室
3. 中国科学院大学

工业化和城市化的快速发展极大地提高了人们的生活质量, 但随之而来的噪音污染越来越严重, 对人类的身心健康都产生了巨大影响, 特别是由车辆和飞机等运输设备产生的 1000 Hz 以下低频声波。吸声材料主要有两种: 一种是基于共振原理的谐振吸声材料, 另一种是基于高孔隙率的多孔吸声材料。谐振吸声材料可以在低频范围内实现完美的吸声, 而多孔材料通常在中高频范围内具有极佳的吸声效果。但制备具有宽频吸声性能的材料仍具有很大挑战。在此, 我们通过定向冷冻、冷冻干燥和化学气相沉积处理制备了纤维素纳米晶 (CNC) 增强的环糊精气凝胶 (CCA), 该气凝胶具有疏水性、良好的力学性能、稳定的宽频吸声性能。定向冷冻营造的有序片层结构、片层上的可调孔隙、CNC 添加引起的曲折度增加和环糊精的纳米级孔隙导致多重反射和折射, 有利于声能在宽频范围内的有效衰减。CCA 在中高频范围 (在 1000-6400 Hz 范围吸声系数超过 0.8) 和低频范围 (最佳吸声系数出现在 768 Hz, 0.95) 都表现出优异的吸声能力。CNC 的加入提高了材料弹性, 增强了材料的力学性能, 使气凝胶在压缩循环之后仍能保持稳定的吸声性能。而化学气相沉积法则利用硅烷的水解反应, 在气凝胶表面覆盖硅氧烷网络, 改善气凝胶的疏水性, 使 CCA 气凝胶在湿度处理后仍具有稳定的宽频吸声性能。

The rapid expansion of industrialization and urbanization has greatly improved our quality of life, but the resulting noise pollution is becoming more and more worrying, which has a negative impact on human physical and mental health, especially the low-frequency acoustic waves generated mainly by transportation equipment such as vehicles and aircraft, especially below 1000 Hz. While it is difficult to design a material with broadband sound absorption performance. Here, through directional freezing, freeze-drying and chemical vapor deposition, CNC enhanced cyclodextrin aerogel (CCA) was prepared. The resulting aerogel shows hydrophobic properties, good mechanical properties and stable broadband sound absorption properties. The well-aligned connected lamellas created by directional freezing, adjustable pores, increased tortuosity caused by the addition of CNC, nanoscale pores of cyclodextrin lead to multiple reflections and refractions, which are conducive to the effective attenuation

of sound energy on wide frequency range. So that CCA shows excellent sound absorption ability in broadband frequency. The addition of CNC improves elasticity of CCA, enabling it to maintain stable sound absorption after compression cycles. Siloxane networks are covered on the surface of the aerogel by chemical vapor deposition to improve hydrophobicity of CCA, resulting in stable broadband sound absorption performance after humidity treatment.

D10-P07

轻质高强聚对苯二甲酸己二酸丁二醇酯/聚乙烯醇复合泡沫材料的制备及土壤消纳行为研究

叶鑫, 徐大伟, 王琪*

高分子材料工程国家重点实验室(四川大学), 四川大学高分子研究所

聚对苯二甲酸己二酸丁二醇酯(PBAT)是重要的可降解高分子材料,可被微生物分解为二氧化碳和水,但其强度低,成本高,高温熔体粘度低,难以制备高性能泡沫材料,限制了其广泛应用。聚乙烯醇(PVA)环境友好,综合性能优异,成本低廉,可水溶,可有效改善 PBAT 泡沫力学性能。本文采用 PVA 为增强组分,结合热塑加工和超临界二氧化碳发泡技术,制备了轻质高强的环境友好 PBAT/PVA 复合泡沫,并研究其土壤消纳行为及其影响因素。引入 PVA 可有效提高 PBAT 的熔体强度,改善复合材料发泡行为,提高泡沫材料的力学性能和抗收缩性能。当 PVA 含量为 40%时,复合泡沫的平均泡孔尺寸为 31.6 μm ,泡孔密度为 $1.74 \times 10^7 \text{ cells/cm}^3$,比压缩强度由纯 PBAT 泡沫的 $5.95 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m/kg}$ 提升至 $1.05 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m/kg}$,体积收缩率由 66.0 %降低至 0.8 %。多孔结构和 PVA 可有效改善复合泡沫的土壤消纳行为,自然环境下土埋 30 天后,PVA 含量为 40%的复合泡沫质量损失率为 28.2 %,较未发泡材料提升了 5.6 %,较纯 PBAT 泡沫提升了 23.9 %,对拓宽环境友好泡沫材料的应用领域具有重要意义。

D10-P08

废弃环氧树脂力化学活化及其功能利用研究

王福杰, 杨双桥, 王琪*

四川大学

环氧树脂机械性能、热稳定性、耐化学性优异,广泛应用于航空航天、交通运输、电气材料、风能等领域,但废弃环氧性树脂不溶不熔,难回收利用。本文基于固相剪切研磨加工技术制备了环氧树脂超细粉体,实现环氧树脂分子骨架和部分交联键中 C-O 和 C-C 键弱化学键的力化学断裂,形成 C=O 和 -OH 等活性官能团。活性环氧树脂再生粉体可参与环氧树脂的再固化反应,20%含量时,再生复合材料的拉伸强度和模量分别为 47.4 MPa 和 1339 MPa,是普通粉体制备复合材料的 1.1 倍。利用活性环氧树脂粉体的亲油疏水性,成功将其用于疏水涂层和油水分离,涂层水接触角达 144.1°,油水分离效率高达 98.96%,满足使用要求,为热固性树脂回收利用制备高性能再生制品提供了新途径。

D10-P09

基于超临界二氧化碳发泡及高温热解的 PVA 基碳泡沫的制备及性能研究

张莉玫, 李莉*

四川大学

碳泡沫结合碳材料和多孔材料的特性,具有高孔隙率、大比表面积和低密度结构以及优异的电、热等性能,在吸附、催化、电磁屏蔽、海水淡化等领域具广阔应用前景。碳泡沫前驱体的优选一直是研究热点,聚合物前驱体相较于传统的沥青、煤,具有明确的化学结构和易于调控的发泡过程,在碳泡沫的制备上具有显著优势。

聚乙烯醇(PVA)由碳、氢、氧三种元素组成,含碳量高达 54.5%,且综合性能优异,与多种有机无机物质具良好相容性,是值得关注的碳泡沫前驱体树脂。本文以 PVA 树脂为基体,通过水/超临界二氧化

碳(scCO₂)协同增塑和物理发泡,掺杂硼酸、氧化石墨烯以及单宁酸等,同时实现了PVA基复合泡沫泡孔结构的优化、泡孔壁的增强和热稳定性的提高,制备了具小孔径且孔径分布均匀的PVA基碳泡沫前驱体泡沫,平均泡孔直径约25 μ m,泡孔密度约3.39 $\times 10^7$ cells/cm³。系统研究了PVA基前驱体泡沫的预氧化和炭化过程及影响因素,优化工艺,获得较稳定的环状结构和较高的碳产率;探讨了硼原子掺杂以及炭化温度与碳泡沫石墨化程度的关系及对电性能的影响,得到具低密度、良好电磁屏蔽效率和低成本优势的PVA基碳泡沫,呈现以吸收损耗为主的屏蔽机理;其电磁屏蔽效能符合商业使用要求,开拓了PVA的高端应用新领域。(感谢国家自然科学基金联合基金重点项目(U21A2091)对本研究的资助。)

D10-P10

光固化 3D 打印高性能聚氨酯弹性体

杨星星¹, 王晓龙^{*1,2}

1. 石河子大学
2. 兰州化学物理研究所

3D 打印的聚氨酯弹性体功能部件已在许多领域具有重要应用,但在高强度、弹性和生物兼容性方面仍面临根本挑战。在这里,高性能聚氨酯弹性体是基于氢键(氨基甲酸酯和脲基甲酸酯基团)和共价键(丙烯酸酯基团)的双交联网络实现的。具体来说,利用聚(氨基甲酸酯-脲)丙烯酸酯树脂的光固化 3D 打印,引入氨基甲酸酯和脲基甲酸酯基团形成多个氢键来实现机械性能的提高。在这种情况下,氢键有助于外部机械刺激的能量耗散,而共价交联网络在拉伸(压缩)过程中赋予稳定性和柔韧性,因此,3D 打印的弹性体表现出令人满意的机械性能:拉伸强度为29.3 $\pm$ 1.1 MPa,断裂应变为754.6 $\pm$ 37%、韧性57.9 $\pm$ 4.2 MJ/m³、断裂能为22.9 $\pm$ 4.2 kJ/m²。这种策略可以轻松制造具有弹性的复杂晶格和超材料结构。此外,所提出的弹性体还表现出良好的生物兼容性和血液兼容性。事实证明,可以使用聚(氨基甲酸酯-脲)丙烯酸酯树脂轻松构建植入式血管支架,揭示了其在工程和生物医学应用方面的巨大潜力。

D10-P11

基于固相剪切碾磨技术的氮化硼纳米片剥离与接枝改性及其复合材料的储能与热管理应用研究

梁雯¹, 武祺¹, 韩锐², 李莉¹, 聂敏^{*1}

1. 四川大学高分子研究所
2. 西华大学材料科学与工程学院

六方氮化硼纳米片(hexagonal boron nitride nanosheets, BNNS)作为一种新兴二维填料,集合了众多优越的性能,与聚合物共混后可制成多功能介电复合材料,并应用于储能和热管理领域。然而,现有的纳米复合材料生产技术普遍存在效率低下、纳米片质量差等缺点,严重阻碍了高价值纳米复合材料的广泛应用。基于此,开发了一种基于固相剪切碾磨(solid-state shear milling, S³M)技术的新型聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)辅助剥离方法,用于生产高质量的BNNS。磨盘碾磨产生的均匀三维剪切力场不仅保证了BNNS的高纵横比(平均横向尺寸为~954 nm,平均厚度为~3.7 nm),而且诱导了PVA与BNNS之间的机械力化学反应,实现了PVA在BNNS表面的原位接枝改性。BNNS的高质量剥离和表面改性对BNNS/PVA纳米复合材料的力学、介电和热传导性能皆有显著的积极影响。当BNNS含量为10 wt%时,BNNS/PVA复合膜具有良好的力学强度(杨氏模量约为5305 MPa,抗拉强度约为83 MPa)、击穿强度(Eb值约为134.7 MV/m)和介电常数(1000 Hz时约为5)。此外,复合膜热导率的大幅提升(从0.61 W $\cdot$ m⁻¹·K⁻¹至10.1 W $\cdot$ m⁻¹·K⁻¹)保证了纳米复合材料在高温下介电性能的稳定性。该剥离方法具有绿色高效的特点,亦可扩展到其他二维层状纳米材料的剥离制造,为高温储能纳米复合材料的工业生产提供了一种新的实用策略。

D10-P12

用于长期动态脉搏检测的可滑动的软硬拉伸界面柔性传感器

尤佳, 杨俊龙*, 李光宪

四川大学

长期脉搏检测对心血管疾病的预防和早期诊断至关重要, 柔性电子设备由于其舒适性成为最优选择。其中由于人体运动导致柔性设备受到拉应力作用引起运动伪影(MA)是目前急需突破的挑战。在这里, 我们报告了一种具有可滑动的软硬拉伸界面的应变免疫式压力传感器 (S-smooth 传感器)。通过在封装层中引入局部低模量的区域, 形成软硬拉伸界面, 降低拉应力的影响, 减少 90% 的 MA。同时, 介电层和电极层界面间的低摩擦系数有效提高了整体器件的稳定性, 实现 100 万次工作周期的稳定服役。当用于脉搏检测时, S-smooth 传感器可以在多种运动情况下准确识别心率(HR), 甚至是脉冲波形中冲击波和潮汐波微小的时间差(t)等重要生理信息, 屏蔽大部分的 MA。这种高性能的器件结构被进一步用于构建便携式的可穿戴无线系统, 该系统小巧轻便, 对正常生活运动无影响, 可实现长期个性化健康监测。S-smooth 传感器首次采用了一种界面调控的手段, 为克服可穿戴设备在人体运动过程中的 MA 提供新的思路, 同时保障器件的高灵敏度和高稳定性, 在早期医疗诊断和长期个性化健康管理领域具有重要的应用前景。

D10-P13

双向拉伸制备 PBAT 基高性能抗菌复合薄膜的研究

孙炎君, 陈英红*, 贾雪华, 陈宁

四川大学高分子研究所

食品安全问题与人类生存发展息息相关, 消费者经济水平的提高和对食品安全的日益重视促进了新型包装材料的发展。研发抗菌的绿色包装有利于保障食品安全, 同时可以节约资源, 保护环境。采用先进的双向拉伸加工技术制备高性能可降解高分子材料薄膜, 在包装领域极具市场应用前景。本文利用聚六甲基胍盐酸盐 (PHMG) 的高效抗菌作用[1], 创新结合反应性共混和双向拉伸技术, 制备了高性能抗菌可降解的聚己二酸对苯二甲酸丁二醇酯(PBAT)/聚乳酸(PLA)共混物薄膜。加入的引发剂过氧化二异丙苯 (DCP) 通过在共混体系两相界面处原位反应生成酯基、醚键等新化学键, 形成了类似 PBAT-g-PLA 的接枝共聚物大分子链, 提高了两者的相容性[2]。甘油的加入提高了分子链段的运动能力, 同时增强了聚合物基体及抗菌剂之间的相容性和材料的可塑性。采用双向拉伸工艺可有效调控薄膜内部分子链取向排列, 提高薄膜力学性能、赋予薄膜厚度均匀、光泽性好等优点。研究表明, 双向拉伸参数的调控对薄膜机械性能有显著影响, 当拉伸倍率为 3.5 时, 薄膜拉伸强度 >45MPa, 断裂伸长率达到 360% 以上, 热封强度大于 15N。添加少量抗菌剂 (0.5%~1%) 时, 薄膜即具有优异抗菌活性, 对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌抗菌率达到了 100%, 此外, PHMG 与 PBAT/PLA 基体的高偶联效率, 保证了薄膜使用过程中无抗菌剂浸出。水果保鲜实验结果表明, 利用抗菌薄膜包装抑制了荔枝黑斑的产生, 表明所制备抗菌薄膜可有效延长荔枝的储存时间。本文研制的基于 PBAT/PLA 共混物双向拉伸薄膜具有优异的力学性能、可降解性以及抗菌性, 有望应用于绿色包装领域, 市场应用前景广阔。

主要参考文献:

- [1] W. Liu, W. Yu, et al. Zheng. Enhanced mechanical and long-lasting antibacterial properties of starch/PBAT blown films via designing of reactive micro-crosslinked starch, *Int. J. Biol. Macromol.* 266 (2024), 131366.
- [2] X. Liu, Z. Mo, et al. Effect of biaxial stretching on the microstructure evolution, optical, mechanical and oxygen barrier properties of biodegradable poly(lactic acid) (PLA)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) films, *Int. J. Biol. Macromol.* 253 (2023), 126976.
- [3] Y. Song, S. Sun, et al. Effect of polydimethylsiloxane on the structure and barrier properties of starch/PBAT composite films, *Carbohydr. Polym.* 336 (2024), 122119.

D10-P14

多巴胺辅助沉积制备聚乙烯醇自润滑抗菌微导管的研究

陈朝辉, 李莉*

四川大学

聚氯乙烯 (PVC)、聚氨酯 (TPU)、硅橡胶等广泛用于医用导管的制备,但其较大的摩擦系数和较差的抗菌性能,使其导管使用过程中相关感染发生的风险日益增加,甚至导致导管相关性血流感染并发症。在以往的研究中,导管的润滑性能和抑菌性能往往不能得到很好的结合,且大部分表面功能化改性方法较复杂,影响了现有商用医用聚合物导管的临床应用,迫切需要开发一种兼具良好抗菌和润滑性能的医用聚合物导管。

聚乙烯醇 (PVA) 具多羟基强氢键特性,以及良好的亲水性和生物相容性,能与人体组织液间形成水合层,起到自润滑效果,在医用导管领域具潜在应用。本文在课题组前期通过分子复合和增塑实现 PVA 热塑加工研究基础上,优化组分和加工技术,实现了 PVA 微导管的连续稳定熔融挤出制备,并采用多巴胺辅助沉积策略对导管表面进行后修饰,同时以低醇解度 PVA 作为润滑元素加入沉积层以补偿润滑性能的损失,有效改善了 PVA 微导管的润滑与抗菌效果。水环境下的摩擦测试表明,在 1N 载荷下,导管的摩擦系数低至 0.03,且载荷升至 5N,仍保持极低的摩擦系数 (0.04);体外抗菌测试显示,导管对大肠杆菌与金黄色葡萄球菌抗菌率均达到 90%,具良好抗菌效果。本研究为新型医用聚合物导管的开发以及 PVA 在介入式器材方面的应用提供很好的方案。(感谢国家自然科学基金联合基金重点项目 (U21A2091) 对本研究的资助)

D10-P15

香精/热膨胀复合多核微胶囊的制备工艺研究

谢文峰, 孙志成*, 李仲晓, 刘晨阳, 王婷, 任静静, 莫然, 马睿, 张涛麟, 管思颖
北京印刷学院

在印刷包装、功能高分子领域中,具有芳香、膨胀立体效果的多功能油墨具有极高的应用价值。现有研究中通常将热膨胀微胶囊与香精微胶囊物理共混合实现。制备一种同时具有膨胀、香精控释的多功能复合微胶囊仍然存在挑战性。本研究通过使用锐孔凝固浴法,以玫瑰精油 (Rose Essential Oil, REO) 和热膨胀微胶囊 (Thermal Expansion Microcapsules, TEM) 为芯材,海藻酸钠 (Sodium Alginate, SA) 为壁材,制备成功的 SA@REO-TEM 的多功能复合多核微胶囊。制备成功的 SA@REO-TEM 微胶囊同时具有优秀的封装效率、控释性能和热膨胀性能。接着,采用扫描电子显微镜 (SEM) 和粒径分布测试仪, X 射线光电子能谱测试 (XPS) 和傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 方法等对 SA@REO-TEM 微胶囊的表面形貌与化学结构进行了详细的表征,证实了 SA@REO-TEM 复合微胶囊的成功封装。该微胶囊的多孔结构使 REO 表现出优秀的控释性能。于此同时,在膨胀倍率测试中发现已封装的 SA@REO-TEM 复合微胶囊具有优异的膨胀性能。这种多功能复合微胶囊在印刷、包装、材料等领域具有广阔的应用前景。

D10-P16

负载花瓣状金属有机框架的二维黑磷纳米片制备及其在热塑性聚氨酯中的阻燃研究

王鑫, 陈英红*, 李俊
四川大学高分子研究所

黑磷 (BP) 作为一种新兴的二维纳米材料,具有蜂窝状的褶皱片层结构、大的比表面积、丰富的阻燃元素等特点,近年来愈来愈多地被应用于聚合物无卤阻燃,显示了积极的发展前景。类似于石墨烯, BP 能够被剥离成二维纳米片,与其同素异形体的红磷相比, BP 具有更高的阻燃效率。然而, BP 的空气稳定性极差,在有光、氧气和水的条件下,快速氧化降解为磷酸,失去其原有结构特性,严重制约 BP 在聚合物阻燃领域中的应用和发展。因此迫切需要提升黑磷的空气稳定性。

针对上述问题,本文提出了一种利用黑磷初步氧化机制,通过原位固定金属离子并刻蚀金属有机框架 (MOF) 的策略制备花瓣状异质结构 BP/MOF 纳米片,然后将所制备的负载花瓣状金属有机框架二维黑磷纳米片 (p-BZ) 用于热塑性聚氨酯 (TPU) 的阻燃,研究其阻燃抑烟性能。首先,利用 BP 的初步氧化机制在 BP 纳米片表面形成活泼的 P-O 结构,然后利用上述结构在富含 Co 离子的溶液中固定金属 Co 离子,

以形成稳定的 P-O-Co 键。在此基础上,进一步加入有机配体 2-甲基咪唑(2-MIM)以在 BP 纳米片表面原位生长一层致密的 MOF 颗粒,从而防止 BP 的进一步氧化和水解,提高 BP 的空气稳定性。然后,通过配体交换策略,将表面十二面体结构的 MOF 颗粒刻蚀为杂乱的花瓣状结构,其增大的平均孔径有利于提升纳米片与聚合物基体的相容性。最后,将所制备的纳米片(p-BZ)用于 TPU 阻燃,其锥形量热测试结果表明,与纯 TPU 相比,负载 2 wt% p-BZ 的 TPU 复合材料的总热释放量(THR)、最大热释放速率(PHRR)、总发烟量(TSP)分别下降了 70.4%、63.9%、46.2%,所形成的最终炭层致密、连续、稳定,表明 2 wt% p-BZ 可赋予 TPU 优异的阻燃性能,有效抑制了烟雾的释放,解决了纯 BP 引起发烟量增加的难题。本文工作为提高 BP 的空气稳定性及制备阻燃 TPU 材料提供了新思路,对拓展 BP 纳米片的应用具有重要意义。本文得到四川省国际科技创新合作项目(24GJHZ0037)、成都市国际科技合作项目(2021-GH03-00009-HZ)和四川省青年科技创新团队计划项目(22CXTD0019)的资助。

主要参考文献

- [1] Wu Tianyu, Ma Ziyang, He Yunya, Wu Xingjiang, Tang Bao, Yu Ziyi, Wu Guan, Chen Su, Bao Ningzhong. *Angewandte Chemie International Edition*, 2021, 60(18): 10366-10374.
- [2] Song Kunpeng, Hou Boyou, Rehman Zeeshan Ur, Pan Ye-Tang, He Jiyu, Wang De-Yi, Yang Rongjie. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 448: 137666.
- [3] Ca Wei, Xing Weiyi, Cui Tianyang, Wang Junling, Lin Bicheng, Li Zhaoxin, Qi Liangyuan, Hu Xin, Ming Yang, Xiao Peng, Bian Fuli, Fei Bin, Hu Yuan. *Composites Part A*, 2024, 178: 108006.

D10-P17

Research on the Fabrication Process of Fragrance/Thermal Expansion Composite Multinuclear Microcapsules

Wenfeng Xie, Zhicheng Sun*, Zhongxiao Li, chenyang Liu, Ting Wang, Taoling Zhang, Siying Guan, Rui Ma, Ran Mo, Jingjing Ren
Beijing Institute of Graphic Communication

In the fields of printing, packaging and functional polymers, multifunctional inks that possess aromatic properties and exhibit three-dimensional expansion effects are highly valuable. Current research typically involves physically blending thermal expansion microcapsules with fragrance microcapsules. However, creating a multifunctional composite microcapsule that can simultaneously expand and release fragrance remains challenging. This study successfully prepared multifunctional, multinuclear composite microcapsules using the sharp-hole solidification bath method with Rose Essential Oil (REO) and Thermal Expansion Microcapsules (TEM) as core materials, and Sodium Alginate (SA) as the shell material. The prepared SA@REO-TEM microcapsules exhibited excellent encapsulation efficiency, controlled release properties, and thermal expansion capabilities. Detailed characterization of the SA@REO-TEM microcapsules' surface morphology and chemical structure was conducted using Scanning Electron Microscopy (SEM), particle size distribution analysis, X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS), and Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), confirming successful encapsulation. The microcapsules' porous structure enabled outstanding controlled release performance of REO. Furthermore, expansion ratio tests revealed that the encapsulated SA@REO-TEM composite microcapsules demonstrated exceptional expansion capabilities. This type of multifunctional composite microcapsule holds broad application prospects in printing, packaging, and material industries.

D10-P18

废弃棉膜固相剪切碾磨回收制备木塑复合材料的研究

邸哲鹏¹, 杨双桥¹, 甄卫军², 白时兵^{*1}

1. 四川大学高分子研究所
2. 新疆大学化工学院

新疆废弃棉膜造成的白色污染问题由来已久，给土壤和生态环境带来了极大的破坏。废弃棉膜以聚乙烯为主，泥沙含量高，同时混杂有棉杆、棉花等，属于典型的混杂型难回收废弃塑料。传统以分选、清洗和造粒的方式处理，处置过程能耗大、污染重、成本高、处置率低；回收产品主要为塑料粒子，杂质含量高、材料力学性能差、销售价格低、应用面窄，推广难度大。本研究通过自行发展的固相剪切碾磨工业化装备，室温超细粉碎农膜，无须分离泥沙、棉杆和棉花，使废弃棉膜具有良好的加工性能，进一步与木粉、棉杆粉复合，制备了木塑复合材料，弯曲强度和弯曲模量分别可达 17.0MPa 和 3880Mpa，符合国家标准，并实现了中试生产。该技术无需分拣、清洗、干燥等工序，可大大简化工艺流程，提高回收效率，降低回收成本。该技术可形成示范作用，可打通新疆废弃棉膜回收利用“最后一公里”，形成完整的废弃棉膜回收利用产业链，实现资源充分利用，产业良好循环，有效治理废弃棉膜污染。

D10-P19

多孔聚酮纳米纤维膜的制备及表征

何海清，姜蕊，刘粒棵，曾柳钊，杨炯烨，罗璇，阳龔，谭徕彬*

四川轻化工大学

多孔纳米纤维膜具有高孔隙率、优异的吸附性、选择性过滤、低重量以及良好的孔隙-孔隙连通性等优点，具有广泛的应用前景。脂肪族聚酮（PK）是一种由一氧化碳、乙烯交替共聚得到的高性能热塑性聚合物，具有优异的机械强度，良好的耐化学腐蚀性和阻隔性能，在电子电气、纤维工业、生物材料等领域应用广泛。本文以 PK 为基体，分别选用良溶剂六氟异丙醇（HFIP）和劣溶剂二氯甲烷（DCM）为混合溶剂制备 PK 纺丝液前驱体，系统研究了环境温湿度、溶剂配比、纺丝电压等工艺参数对 PK 纳米纤维膜微观结构的影响。结果表明：当环境湿度为 50% 时，随劣溶剂比例增加，光滑纤维表面形成大小不一的孔洞。当环境湿度增加时，所有比例试样表面均形成纳米级孔洞，粗糙度增加。当 HFIP:DCM 质量比由 7: 3 改变至 3: 7 时，电纺纤维表面大孔径闭孔数量增加。当 HFIP:DCM 为 6: 4 时，环境湿度为 80% 的条件下，所制备的多孔聚酮纤维膜孔径较均一，平均孔径约为 279nm。上述多孔结构是由挥发性溶剂（HFIP）和水分子之间的快速相变引起的。不良溶剂（DCM）的加入使得纺丝溶液在环境中的挥发速率发生变化，导致纤维表面闭孔的孔径变化。本工作所精细调控的多孔聚酮纳米纤维膜有望在水处理、电磁屏蔽、隔膜等领域潜在应用。

*感谢材料腐蚀与防护四川省重点实验室开放基金（2020CL16）；五粮液产学研合作项目（CXY2021ZR001）；自贡市科技局重点研发项目（2020YGJC12）；大学生创新创业训练计划（S202310622036）项目的资助。

D10-P20

具有压电离子动力学的可自愈离子电子皮肤

王佳欢，李洁华，谭鸿，罗锋*

四川大学

受人体皮肤具有自愈合特性以及离子传感能力的启发，制造了一款具有压电离子动力学的可自愈离子电子皮肤。设计配方合成了一系列含有不同二硫比例的可自愈合的水性聚氨酯乳液，选择其中性能最优的一组，利用模具构造具有微结构传感层，组装成离子电子式压电容型压力传感器，与同一类型的传感器相比，所制造的传感器具有相对较好的生物相容性，室温可自愈合的特性，相对较高的灵敏度，可用作电子皮肤，监测人体的生理信号。

关键字：自愈合 离子电子 微结构 传感

D10-P21

固相拉伸加工回收废弃涤纶制备高强导热材料的研究

李亮, 白时兵, 杨双桥*
四川大学

涤纶是全球使用量最大的合成纤维, 但废弃涤纶纺织品 (WPET) 回收中脱色工艺复杂, 再生制品性能差, 附加值低。本文创新采用固相剪切碾磨加工技术 (S3M) 实现含染料 WPET 的开松解缠结, 制备了具有一定长径比的超细纤维粉体, 与聚乙烯 (HDPE) 共混复合制备再生 HDPE/WPET, 结合固相拉伸加工进一步制备了高强高导热 HDPE/WPET 复合材料。当固相拉伸倍率为 6 倍时, 复合材料拉伸强度高达 116.8Mpa, 是热压未拉伸样品的 600%, 面内热导系数高达 4.34W/mK, 是未拉伸样品的 775%, SAXS、2D-WAXD 测试表明, 高倍固相拉伸有利于 WPET 纤维取向和 HDPE 形成取向串晶结构, 复合材料结晶度和取向度分别高达 63.7%和 89%, 大幅减少面内声子散射。本文制备的高导热再生制品在热界面材料领域具有潜在应用前景, 是含染料涤纶织物免分离物理回收制备高性能功能制品的全新途径。

D10-P22

侧链接枝光稳定剂的聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯合成及快速光老化评价

张馨鹏, 边红莉, 徐军, 郭宝华*
清华大学

目前研究和开发生物可降解塑料替代传统的聚乙烯等难降解塑料是从源头上解决一次性塑料“白色污染”的一种重要手段[1]。其中聚己二酸-对苯二甲酸丁二醇酯 (PBAT) 由于其优异的柔性与成膜性广泛用于加工农用、购物袋、包装等薄膜产品[2]。然而, PBAT 缺乏光稳定性, 这限制了其在户外应用的长期性能。尽管传统方法通过加入小分子光稳定剂 (例如紫外线吸收剂、自由基清除剂和猝灭剂) 或无机紫外线屏蔽剂来增强其户外耐久性能, 但这些添加剂常因与 PBAT 基体相容性差、加工中高温挥发或在使用中迁移而效果受限。

为了克服这些挑战, 本研究通过在 PBAT 合成过程中引入具有特定结构的光稳定剂, 采用化学键合的方式将光稳定剂直接固定于 PBAT 分子链中。这种方法不仅保证了光稳定剂在 PBAT 中的均匀分布, 还有效防止了其在高温加工或使用中的迁移。通过这种分子链功能化策略, 改性 PBAT 的光老化性能显著提升: 经过 20 天的快速光老化测试, 改性 PBAT 的拉伸强度从 26.6 MPa 降至 7.4 MPa, 断裂伸长率从 1589%降至 765%, 而未改性 PBAT 在同等条件下因老化断裂而无法测试。这一成果不仅展示了通过精准分子设计改善 PBAT 光稳定性的潜力, 也为其在户外长期使用提供了科学依据。

D10-P23

通过空间和吸电子效应协同实现强而韧的阻燃环氧树脂

王怡, 陈力*, 王玉忠
四川大学望江校区

环氧树脂 (EP) 具有优异的绝缘性能、耐热性和机械强度, 是电气设备和电子器件常用的绝缘封装材料。随着微电子集成电路的小型化和多功能化发展, 潜在的火灾风险已经制约了 EP 的广泛应用; 而由于其交联程度高、交联点间链段刚性大, EP 通常表现出硬而脆的力学性质。本文设计合成了三种具备特殊空间效应或/和吸电子效应阻燃添加剂, 详细讨论了阻燃剂对 EP 的固化行为, 阻燃性能和力学性能的影响。三种阻燃剂都能在 5 wt%添加量下使阻燃 EP 成功通过 UL-94 垂直燃烧测试 V-0 级别; 且与纯 EP 相比, 其峰值热释放, 总热释放, 烟释放等火灾参数显著降低 (下降 56.8%, 46.8%, 22.9%)。尤其令人欣喜的是, 通过阻燃剂空间和吸电子效应, 使得阻燃 EP 材料实现了高韧 (冲击强度提升 189%) 和高强 (拉伸强度提升 98%, 弯曲强度提升 53%)。本文为设计高透明、强而韧的无卤阻燃聚合物材料提供了方向。

参考文献:

[1] Y.F. Xiao, X.F. Liu, F.M. He, et al. A rigid-flexible integrated polyester with bis-phosphaphenanthrene pendants towards simultaneously flame-retarded and toughened epoxy resins with multifunctionalities. Chem. Eng. J. 2024;

484: 149397.

[2] X.F. Liu, Y.F. Xiao, X. Luo, et al. Flame-Retardant multifunctional epoxy resin with high performances. Chem. Eng. J. 2022; 427:132031.

[3] X.F. Liu, B.W. Liu, X. Luo, et al. A novel phosphorus-containing semi-aromatic polyester toward flame retardancy and enhanced mechanical properties of epoxy resin. Chem. Eng. J. 2020; 380: 122471.

D10-P24

基于共价键和氢键双交联网络的聚氨酯 NP-GLIDE 超滑涂层用于提高除冰耐久性

郑海丽*

郑州大学

滑液浸渍型超滑涂层在除冰领域具有非常大的优势,但是随着除冰次数的增加,不可避免会伴随滑液的损耗,随之而来的就是冰粘附力的升高。因此,滑液损耗是影响超滑涂层持续除冰的决定性因素。利用一种含有液体侧链的接枝共聚物如聚二甲基硅氧烷(PDMS),发生自组装而在涂层表面形成液体聚合物刷,并在涂层基体形成纳米尺度补给池(nano-pools of a grafted liquid ingredient for dewetting enablement)而制备的涂层称为NP-GLIDE涂层。针对滑液损耗所造成的除冰耐久性差的问题,在NP-GLIDE涂层基体中构筑共价交联和氢键交联相结合的双交联网络(DX),并与仅由共价键交联形成的CX涂层作对比。多次结冰/除冰试验结果表明,DX涂层表现出了比CX涂层更低的冰粘附强度。DX涂层在经历31次连续除冰之后,冰粘附强度只有 1.8 ± 0.5 kPa,比玻璃片(325 ± 14 kPa)低了大约180倍,而相同条件下的CX涂层上的冰粘附强度已升至 32 ± 11 kPa。由此可见,DX涂层表现出了比CX更长久的除冰性能。分析其原因,DX涂层基体中的动态氢键与滑液之间可能存在响应关系,即除冰试验的进行导致涂层表面滑液损耗,涂层基体中的滑液因为分配平衡向表面扩散,造成氢键交联密度增大,氢键结合又引起基体内滑液向涂层表面析出。这一过程循环往复,从而使DX超滑涂层经历了更多次的除冰试验。该工作制备耐久型防覆冰涂层提供了新思路,对推进超滑涂层在防覆冰领域的实际应用进程具有重要意义。

D10-P25

一体化泡沫结构柔性压力传感器的制备及其性能

王猛¹, 李文东¹, 吕亚栋², 李光宪², 孔米秋^{*1,2}

1. 四川大学空天科学与工程学院

2. 四川大学高分子科学与工程学院

柔性压力传感器具有高灵敏、高柔性、轻量化等特点,可用于检测人体运动、机器人电子皮肤、软夹具,和健康监测等领域。目前,柔性压力传感器通常存在电极层和功能层存在多层多材的特点,导致电极层和功能层存在机械失配,层与层之间出现明显的界面缺陷,这严重影响了传感器的机械响应与工作稳定性。针对这一问题,本研究设计的柔性压力传感器电极层和功能层均采用热塑性聚氨酯,基于超分子焊接原理实现一体化无界面结构,通过添加多壁碳纳米管和离子液体分别调控电极层的导电性和功能层的介电性能。进一步采用超临界二氧化碳发泡工艺,通过电极层和功能层的模量调控实现对功能层发泡,形成一体化无界面柔性压力泡沫传感器。发现其界面韧性较好为 17KJ/m^2 ,在0-2000KPa的宽检测范围下具有较高的灵敏度,尤其是0-700KPa的灵敏度达到 1nF/KPa 。柔性压力传感器分别在100KPa压缩应力和50KPa剪切应力下具有12000次循环稳定。这说明基于一体化无界面结构的柔性压力泡沫传感器能够在复杂的力学环境下稳定工作。研究为复杂受力时高稳定一体化无界面柔性压力传感器的研究提供了新方法。

D10-P26

自然成型中空壳聚糖气凝胶的隔热及低频吸声应用研究

洪静, 杨佳竺, 赵丽娟*

四川师范大学

噪声污染会损坏人们的听力神经,造成神经衰弱、心脑血管疾病、耳聋等严重疾病,甚至还会导致人死亡。通过绿色化工技术,开发具有吸声降噪的材料迫在眉睫。壳聚糖因其化学结构中富含-NH₂和-OH等高反应活性的官能团,可进行螯合、氧化、醚化、酯化等物理或化学反应,在催化、隔热隔音、传感、吸附剂和药物输送系统等领域应用广泛。壳聚糖气凝胶具有超低密度、高孔隙率、大比表面积等优点,可作为良好的吸声材料。本研究在静置条件下,通过调节交联剂浓度、交联时间以及交联温度调控其动态静电/共价的双网络结构,成功制备了内部具有不同尺寸空腔结构的壳聚糖气凝胶。因其同时具有外部蜂窝状和内部空腔的结构,可赋予其良好的保温隔热以及吸声性能。例如,外部大量的通道和薄壁降低了壁面的固体热传导以及内部的空腔可以有效降低热对流,使得其导热系数可达到 $0.02815\pm9.33381\times10^{-4}$ W/mK。同时,空气分子与外部孔壁摩擦引起的热损失和材料内气流的粘性引起的粘性损失可以有效的耗散声能,内部空心结构有利于通过促进多界面极化来衰减微波能量,在低频(≈ 300 Hz)能达到92%以上的吸声系数。本研究通过动态交联调控,在静置条件下制备了具有良好保温隔热以及吸声性能的中空壳聚糖气凝胶,为自然中空成型气凝胶的制备及其应用领域提供了良好的思路。

D10-P27

多功能双网络壳聚糖复合气凝胶的可调控研究

杨佳竺,洪静*

四川师范大学

随着现代社会的快速发展,能源短缺以及环境污染问题的日益严重,生物质和天然有机物的高效利用引起了广泛的关注。生物质气凝胶(如多糖、蛋白质、多肽等)具有超低密度、高孔隙率、大比表面积、生物降解性和可再生性等优点,可广泛应用于传感器、智能可穿戴设备、能源材料等诸多前沿领域,能满足日益增长的可持续发展需求。然而,制备具有优异综合性能的纯生物质气凝胶仍然存在挑战。通常,生物质气凝胶的定向多功能性归因于可调控的内部分子结构,本文采用真空冷冻干燥和真空热处理技术制备了具有可调性的多功能双网状壳聚糖/衣康酸(CSI)气凝胶。通过调节酰胺化反应的温度和时间,壳聚糖(CS)与衣康酸(IA)之间的静电相互作用在冷冻气凝胶中有节制地转化为酰胺键,得到了具有不同静电/共价交联比的CSI气凝胶。通过热处理调整CSI气凝胶的共价交联度可以改变其微观结构和密度,从而提高其性能。例如,CSI1.5-160°C-5h的比模量(71.69 ± 2.55 MPa·cm³·g⁻¹)比CSI1.5(32.73 ± 0.718 MPa·cm³·g⁻¹)提高了119%,材料由超亲水性转变为疏水性($124^\circ\pm3.6^\circ$),且具有良好的稳定性和传热性能。此外,CS的部分-NH₃⁺保留在静电交联网络中,使气凝胶具有抗菌性能。本研究的发现为通过巧妙的结构设计和简单的调控方法制备具有良好综合性能的生物质气凝胶提供了参考策略。

D10-P28

在多孔骨架中操纵表面能:从2D到3D架构桥接电子电路的途径

冯升伟,谢昕剑,赵元轶,孙营雪,梁钰佳,秦立鹏,冯文蹇*

四川大学

功能电路在科研与日常生活中均发挥着举足轻重的作用,是现代科技的基石。针对当前高精度电路制备策略中存在的问题,如操作环境或设备要求严苛以及难以兼容三维电子器件制备等问题,在本研究中,我们提出了一种新型的电子电路搭建方式,旨在快速定制具有特定功能的电子芯片,以满足二维电子器件和三维电子器件的应用需求。该策略主要通过开发表面能修饰技术,精准诱导导电油墨的沉积,在多孔骨架内部可控的构筑具有高精度、高密度且适应性强的电路,实现了二维电路和三维电路配置之间的切换。这一创新过程极大地简化了从CAD设计文件直接制造电路产品的流程,显著减少了人工操作,采用了成本效益高的工具,并确保了可扩展的模块化生产。

D10-P29

高耐候非原位 pH 响应动态可逆亲疏水转换涂层的制备与性能

李杭林, 王芳, 宋飞*

四川大学

具有 pH 响应可调润湿性转换超疏水涂层在液滴操纵、油水分离、建筑等领域有着重要应用价值^[1, 2]。然而, 目前的 pH 响应可调亲水-疏水转换表面受其响应性官能团限制而不耐酸碱、且因其需持续的外部刺激而导致润湿性转换不稳定^[3], 同时现有疏水涂层的长效耐紫外、耐水性、耐候性、防霉菌性及耐温变循环性仍存在不足且难以兼顾, 使其在实际动态复杂环境的长期服役性能受到限制^[4, 5]。因此, 在本研究中, 基于硅氧烷疏水链段与 pH 响应氨基官能团的协同调控, 设计制备了一种具有动态可逆润湿性转换的非原位 pH 响应超疏水涂层, 该涂层具有耐酸性、同时可耐水超 100 h, 耐紫外超 1500 h, 耐温变循环超 15 次且兼具优异的防霉菌性能 (0 级)。所得涂层具有非原位 pH 响应可逆动态润湿性转换性能, 即所得表面浸没于酸液中且达到临界渗透压可触发润湿性转换, 涂层中氨基官能团质子化所形成的极性离子基团可调节疏水表面向亲水性转换, 亲水-疏水转换接触角变化大于 80°, 该多功能亲疏水可转换涂层在建筑、基础设施等的自清洁、防污、可复涂等领域有着广泛的应用前景。

D10-P30

柔性抗菌可降解生物弹性体纳米复合材料与传感器件

张培森, 傅梓鸿, 王明城, 万鹏博*

北京化工大学

可穿戴设备因其在人体运动监测、智慧疾病诊断和多功能电子皮肤等应用中的巨大应用潜力而受到广泛关注。然而, 已报道的柔性传感器存在检测范围窄、灵敏度低、可降解性差等问题, 造成电子垃圾堆积与环境污染。受高灵敏的人类皮肤微结构的启发, 以可降解弹性体为基体, 采用模板法构筑表面微结构, 与叉指电极组装, 制备了一种具有微棘突结构的高灵敏、抗菌、可降解传感器, 展现了优异的传感性能、出色的降解性和良好的抗菌性能。

D10-P31

纯水性超疏水聚氨酯涂层的制备与性能研究

张荣港¹, 宋飞*¹, 冯蕊²

1. 四川大学化学学院

2. 西北工业大学文化遗产研究院

水性聚氨酯 (WPU) 涂料具有低 VOC、良好的柔韧性、耐磨性等优点, 在绿色家具、建筑、织物等方面具有广泛应用前景, 但其仍存在耐水性差、功能单一等的缺点, 限制了 WPU 的实际使用。本研究构建了 100% 水性化的氟硅烷、氟碳表面活性剂与纳米 SiO₂ 三元体系, 可直接共混改性水性聚氨酯乳液, 赋予其超疏水性能, 改善其耐水性。通过控制复合体系中氟硅烷分子在纳米 SiO₂ 表面的接枝过程, 降低氟硅烷与水性体系的表面能差异, 所制备纳米杂化超疏水水性聚氨酯涂料具有优异的分散与储存稳定性。经喷涂处理后, 可在木材、织物、塑料、纸张等多种基材表面构筑形成超疏水涂层, 可抗多种液体粘附 (泥浆、可乐、咖啡、海水、酸/碱溶液等), 接触角均可达到 150° 以上, 滚动角均低于 10°。得益于超疏水性, 所构筑超疏水水性聚氨酯涂层表现出优异耐水性, 经 216 h 浸水测试后仍能保持超疏水性能。此外, 还可耐受砂纸循环摩擦、胶带循环剥离以及落砂摩擦测试, 可耐受紫外老化与高低温循环测试, 表现出优异的耐机械磨损与耐候性。综上所述, 本研究所制备的纳米杂化超疏水水性聚氨酯涂料不仅改善了水性聚氨酯涂料的耐水性, 同时兼具优异自清洁与抗污功能, 为绿色水性涂料的高性能与多功能化发展提供了新途径与新原理。

D10-P32

受生物形态发生启发的双层聚合物薄膜的 3D 可控变形

猴凯, 翁更生*

宁波大学

将二维薄膜变形为具有复杂曲率的三维形状对于开发下一代软体机器人、柔性设备和传感器具有重要意义。然而复杂的材料设计与制备过程限制了此类材料的实际应用。在此, 我们提出一种受生物形态发生启发的设计策略, 该设计基于 UV 映射的厚度梯度来实现由水凝胶层和疏水聚合物层组成的双层材料的形状转变。我们将疏水层作为被动层进行激光雕刻, 形成厚度梯度分布, 进而对基于主动层失水收缩驱动的形变过程实现编程, 变形为具有复杂曲率的三维形状, 如葫芦和跑车, 并且变形后的材料表面没有不可控的屈曲和褶皱。我们的这一创新设计不需要对材料进行繁琐的非均匀或不连续性设计, 为材料的复杂三维形状转变提供了一个简单快捷的策略, 并为软体机器人、传感器和仿生系统的规模化、实用化设计与制造提供了新的思路。

D10-P33**面向热舒适穿戴的高分子复合传感材料**

赵优, 底鹏举, 袁月, 万鹏博*

北京化工大学

多功能柔性可穿戴设备在电子皮肤、智能人机界面、智慧疾病诊断等领域的广泛应用而获得了极大的关注。受高灵敏感知的人体皮肤微结构启发, 通过模板法和界面超分子组装, 获得了表面涂覆有导电纳米材料的微圆顶阵列结构的聚氨酯弹性体基体材料, 成功构筑了柔性、热舒适穿戴的高分子复合传感材料与器件, 展现了高灵敏度、宽检测范围、良好循环稳定性的传感性能。此外, 该传感材料与器件具有热舒适穿戴和高效热管理功能, 在可穿戴的人工电子皮肤、智能人机交互感知和个人健康管理方面展现了巨大的应用前景。

D10-P34**基于动态二硫键的常温自愈水性聚氨酯用于多响应性柔性传感器**

郑珂, 张先龙, 郭少云*

四川大学

多功能选择性和力学性能的提升一直是柔性传感器领域关注的焦点, 特别是传感材料仿生结构的构建, 可以使所制造的传感器具有特定的响应性。但电子器件的重复使用会导致其物理和化学降解, 缩短使用寿命。自愈能力是自然系统在意外情况和多变环境中生存的重要特性, 通过恢复材料的机械和功能特性来延长使用寿命并使其可靠的方法是自修复材料发展的优势途径。本文受人类皮肤不对称结构特征的启发, 提出了一种具有仿生 Janus 结构的 TA@mxene (单宁酸修饰 MXENE)-水性聚氨酯 (WPU) 薄膜, 二维的 TA@MXene 纳米片通过重力驱动自组装梯度分散到 WPU 网络中。该薄膜具有良好的力学性能, 并具有自愈性能。此外, 由于二硫键的光热敏感性, Janus 结构可以使柔性传感器对定向弯曲、拉伸和光热等多种刺激源做出选择性响应。结合机器学习模块, 传感器对力的识别率高, 且可以实现救援行动中的方向识别和人体运动监测。该工作对柔性传感器的材料结构、力学性能提升和应用平台具有重要的研究价值和现实意义。

D10-P35**杀菌剂封装的核壳聚合物微球: 制备持久抗菌涂层的新方法**

王超, 张小河, 侯佳曼, 秦新舒, 陈玲霞, 李璇, 王闽龙, 安杰*

中国农业大学

抗菌涂层在对抗病原微生物方面起着至关重要的作用。然而,开发持久的抗菌涂层面临着巨大的挑战。在本研究中,我们开发了一种制备耐久抗菌涂层的可靠方法,使用交联的杀菌剂包裹的核壳聚合物微球。这些微球通过乳液聚合制备,实现了聚合物合成和杀菌剂装载的同时进行。微球设计为具有亲水壳和疏水核,主要将疏水性杀菌剂储存在核心内,从而减少了壳层的杀菌剂浓度。该设计遵循 Fickian 扩散定律,显著减缓了杀菌剂从壳层向外部环境迁移的速度,从而提高了涂层的抗菌持久性。此类杀菌剂包裹微球的合成工艺进行了优化,可以封装 log P 值在 1–3 范围内的杀菌剂,封装效率超过 85%。特别地,含有 N-丁基-1,2-苯并异噻唑啉-3-酮(BBIT)的微球被用于开发抗菌涂层。抗菌测试和释放分析显示,这种涂层在较长时间内保持高生物活性,有效抑制细菌和真菌的生长。涂层的释放行为符合 Peppas–Sahlin 模型,以扩散为主要机制。模型预测涂层在一年后的抗菌保留率超过 66%,证实了其持续的抗菌效果。此外,该涂层表现出良好的硬度和溶剂抗性,使其适用于各种基材,包括玻璃、金属、木材、陶瓷和塑料。

D10-P36

高折射率聚合物基光学膜材料的制备及其性能研究

李钰涵,熊英*

四川大学

高折射率聚合物光学材料因具有密度小、致密性与均一性良好、易加工成型等优异性能,被广泛应用于衍射光学元件及抗反射薄膜等光学领域,是发展轻量化光学器件的关键材料。然而目前报道的高折射率聚合物光学材料存在透光性差、光学参数稳定性差,制备繁琐成本高昂等问题。折射率受离子半径和离子排布密度影响,通过单轴拉伸可以使双折射聚合物沿一定方向取向实现分子的有序排布,提高聚合物结晶度从而实现特定方向的折射率提升。因此,本研究用单轴拉伸调控 PEN 膜的折射率,研究了不同拉伸温度、拉伸速率、拉伸倍率对 PEN 薄膜折射率的影响,结果表明,PEN 膜在单轴拉伸处理后 TE 方向折射率可以提高至 1.85, TM 方向折射率降低至 1.52,表面性能明显提升。这种单轴拉伸改善聚合物薄膜折射率的处理方法简单、成本低廉,折射率提升效果显著,为高折射率聚合物基光学膜材料提供了一种新的制备思路。

D10-P37

高模量低介电 PTFE 复合材料成型制备及性能研究

张昆,陈蓉*,郭少云

四川大学高分子研究所

聚四氟乙烯(PTFE)及其复合材料由于其优异的介电性能成为新一代信息技术领域的关键材料。但受限于 PTFE 独特的分子结构,其表面能极低,热稳定性、力学性能、加工性能等较差。在高频通讯中,往往带来信号传输不稳定、易应力开裂、散热困难等问题。将 PTFE 与无机填料进行高填充复配,可最大程度提升其使用性能和稳定性,制备性能优异的复合材料。但 PTFE 基体与无机填料界面相容性差及高负载时填料团聚等问题极易造成复合材料性能劣化,如何同时实现 PTFE 复合材料高填充和高性能是现阶段的挑战。因此,本研究自主研发了 PTFE 与填料复配新方法,实现了填料在 PTFE 基体中的高填充分散,所制备膜材料填料含量可达 60%(PTFE-60),热压后样品杨氏模量最高可达 1900MPa 以上,拉伸强度最高可达 20MPa 以上。并且填料含量最高的 PTFE-60 样品在保持高模量(1400MPa)的同时具有极低的介电常数(0.0009)和优异的尺寸稳定性($\alpha=21.67\text{ppm}$),具有优异的加工使用性能和良好的应用前景,为高填充 PTFE 复合材料的制备提供了新思路。

D10-P38

用于人体健康监测、物体识别和非接触式手势识别的可 3D 打印自供能柔性传感器

唐敬植,猴凯,王冲,魏明晖,谭秋丽,翁更生*

宁波大学

提出了一种新的基于原电池设计的可 3D 打印的自供能柔性传感器设计策略。基于此制备的柔性传感器可以实现健康监测, 物体识别和非接触式手势识别。该软传感器由 3D 打印的聚丙烯酸(PAA)水凝胶电解质层、柔性负极层和柔性正极层组成。负极层是 3D 打印的 Cu^{2+} 交联聚(N,N-二甲基丙烯酰胺-co-3-丙氨酸-2-羟丙基甲基丙烯酸酯)水凝胶(PDA/ Cu^{2+} /Cu 水凝胶)。正极层是含有 MnO_2 的 PAA 水凝胶的底部薄层(PAA/ MnO_2)。采用石墨薄膜作为柔性电极, 以完成柔性传感器的组装。该柔性传感器具有较高的机械载荷和温度灵敏度。它在拉伸、弯曲、挤压和冲击载荷下产生不同的电流响应。该柔性传感器具有检测人体身体活动和生理活动(如: 呼吸)的能力。基于该柔性传感器的力与无接触温度传感性质, 该柔性传感器能够用来识别物体尺寸及手势。这种具有自供能功能和多刺激响应性的柔性传感器为用于医疗保健和人机交互领域的柔性传感设备提供了新的思路。

D10-P39

具有高能量吸收效率的可生物降解聚合物基环保 ScCO_2 发泡一次性缓冲包装微孔材料

黄静怡^{1,2}, 金碧辉^{1,2}, 张绪涛^{1,2}, 王素真², 吴炳田², 龚鹏剑^{*1}, Chul B. Park^{1,3}, 李光宪¹

1. 四川大学

2. 江苏集萃先进高分子材料研究所

3. 多伦多大学

高效的能量吸收对于确保精密电子设备在运输过程中得到充分保护至关重要。但是, 大量使用的缓冲包装材料具有一次性特性, 会对环境造成严重的影响。为了解决这一问题, 迫切需要开发生产和全生命周期环保的材料, 以及提供高能量吸收的缓冲包装。本研究选择了两种生物可降解的组分: 一种具有柔性链结构 PBAT 以增强能量吸收能力, 另一种则具有刚性链结构 PLA 以提供有效支撑。通过绿色环保的超临界 CO_2 发泡技术, 制备了一种完全可生物降解的泡沫材料, 作为一种绿色缓冲包装材料, 其具备以下优点: ①具有高达 0.325 的能量吸收效率, 有效保护精密设备免受外力冲击; ②低导热系数(低至 40 mW/m.K) 有助于防止热冲击对器件的影响; ③高疏水性(水接触角大于 100°), 有效防止水分侵蚀; ④引入泡孔结构加速了降解过程, 进一步提升了材料的环境友好性。因此, 这种创新的可生物降解泡沫材料的发展对推动环保包装材料的进步具有重要意义, 该缓冲包装泡沫材料在精密电子设备和仪器元件的远距离运输中展现了巨大的应用潜力, 是发泡聚乙烯和发泡聚丙烯等传统非生物降解缓冲材料的理想替代品。

D10-P40

超临界二氧化碳辅助超低介电常数聚芳醚腈微孔泡沫材料的制备及性能研究

时少哲, 刘根实, 李光宪, 廖霞*

四川大学高分子科学与工程学院

高孔隙的引入($k_{\text{air}}=1.0$)可有效降低聚合物的介电常数和介电损耗, 从而满足高频高速通信网络对超低介电常数($k<2.0$)材料性能的需求。聚芳醚腈(PEN)由于较高加工温度(280°C)的限制, 传统发泡工艺(高温发泡剂的分解温度为 200°C 左右)难以实现高发泡倍率聚芳醚腈微孔泡沫材料的制备。超临界二氧化碳(scCO_2)发泡技术因其塑化作用可有效降低聚合物的玻璃化转变温度和黏度, 适用于高温熔融聚合物的发泡, 为 PEN 泡沫的制备提供一条新途径。但 PEN 中大量刚性分子结构的存在使其基体强度增大, 且高发泡温度导致 CO_2 溶解度降低、扩散速率加快。因此, 提高 PEN- scCO_2 体系的发泡能力是实现高发泡倍率的关键。醇基共发泡剂与 CO_2 形成氢键, 具有较高的结合能, 可有效提高 scCO_2 的极性, 增强塑化作用。本研究引入不同链长的醇基共发泡剂, 通过调节和优化发泡温度、共发泡剂种类和含量, 使 PEN 的发泡温度窗口拓宽 20°C , 最大发泡倍率可达 6.7 倍, 显著降低 PEN 泡沫的介电常数和介电损耗, 最低仅为 1.26 和 0.0025。同时, 孔隙的存在阻碍了聚合物分解时的热传递和降解副产物的挥发, 使 PEN 泡沫具有优异的热稳定性($T_{\text{d}5}>445.8^\circ\text{C}$), 增大 PEN 泡沫在超大型集成电路和高频高速通信网络终端电子设备等应用中的竞争力。

D10-P41**1D/2D 碳纳米复合发泡材料实现高灵敏度传感响应**

谢正惠, 孟斐然, 龚鹏剑*, 李光宪

四川大学高分子科学与工程学院

柔性应变传感器在医疗健康监测、机器人技术和智能穿戴设备等许多领域中有广泛的应用, 柔性高分子导电复合材料其内部导电结构会在外界作用下发生变化, 故适用于传感材料。超临界二氧化碳发泡技术作为一种新型环境友好的发泡方法, 在实现材料轻量化的同时引入内部均匀的泡孔结构, 对导电网络的形成以及分散都有一定促进作用。在保持传感器柔性和导电性能的同时, 实现多孔结构的控制和优化, 为传感器的灵敏性和可靠性提供了良好的基础。因此选用柔性的热塑型聚氨酯 (TPU) 和具有良好导电性不同维度的碳纳米填料, 在不同维度填料的选取和发泡条件的选择下, 利用溶液共混和发泡的加工方法制得了具有超高灵敏度的 TPU/CNF/GNP 传感材料。此外, 由于发泡过程的可调节条件复杂, 蒙特卡洛模拟可以应对这些不确定性和复杂性, 对孔壁拉伸过程中的结构与材料响应的关系进行了分析, 对实验具有一定指导意义。

D10-P42**双杂原子共掺杂有机多孔碳材料的制备及其电催化应用研究**

王涛*

四川大学高分子科学与工程学院

多孔碳材料凭借其结构多样和性能优异一直备受青睐, 作为新型多孔碳材料的石墨炔, 由 sp 和 sp^2 杂化碳原子共价连接而成, 其具有二维的全碳骨架, 较大的共轭体系, 同时还有优良的化学稳定性以及独特的电学和光学性能, 所以在电催化、光电、能源等众多领域展现出了巨大的应用前景。但是全碳材料由于表面浸润性差、容量不够高, 电化学性能表现的不够理想, 而氮、硫、氧等杂原子的引入可以有效地改变石墨炔的电子结构, 进而对其物理、化学性质进行调控, 以充分地提高其电化学性能。通过合理的分子设计, 分别采用含有不同种类杂原子的单体进行聚合物的合成, 以达到引入不同杂原子的目的, 我们按照这种方法选用高氮含量的单体 2,4,6-三乙炔基-1,3,5-三嗪以及含有氧原子的单体 1,4-四溴苯醌, 通过 Sonogashira 偶联聚合反应制备了氮和氧原子共掺杂的石墨炔多孔碳材料 NO-GY, 对其进行热处理后 (NO-GY-800) 具有高比表面积和均一的孔径分布, 制备成催化剂后表现出优异的电催化氧还原性能, 可与商用 Pt/C 相媲美, 有望在能源转换、环境保护、生物医学等诸多领域得到应用。

D10-P43**伤口敷料的制备与性能优化**

吴双*

四川大学高分子科学与工程学院

在处理皮肤屏障等软组织受损时, 伤口敷料起到重要作用。而人体伤口表面具有不平整性, 许多黏附材料的性能无法满足实际需求。伤口敷料材料与皮肤表面紧密接触, 倘若伤口敷料滑落, 更换新的敷料过程中也可能出现二次伤害, 减慢伤口的愈合速度。因此, 制备具有高粘附性的伤口敷料对医疗领域有重要意义。本文研究了一种借鉴章鱼吸盘仿生的原理制备材料的方法, 制备具有高黏附性能的伤口敷料, 从而满足伤口敷料在湿润环境下对人体不平整伤口的黏附性能要求。通过设计一种简单的模板浇注的方法, 模仿章鱼吸盘结构, 通过这种“杯状圆顶”结构提供圆顶和基底之间的毛细管力, 增强吸盘片对潮湿表面的粘附性, 从而优化吸盘的结构与设计, 达到高黏附性能的效果。实验过程先设计具有不同微纳米结构的软模版, 采用聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 材料制备具有不同孔径形貌的章鱼仿生材料, 所制得的章鱼仿生结构形状稳定, 具有一定的黏附性能。

D10-P44

酶催化交联的纳米纤维素/海藻酸水凝胶

姜洁*

四川大学高分子科学与工程学院

海藻酸盐是一类存在于褐藻中线性亲水阴离子酸性多糖，具有优异的生物相容性、低毒性、成本低等优点，能广泛应用在许多生物医学领域。海藻酸盐是水凝胶合成的天然生物材料之一，能被多价阳离子交联形成水凝胶，其中 Ca^{2+} 是最常见的离子交联剂，凝胶形成速度快、条件温和且无细胞毒性，但机械强度低、易于解聚、受控释放能力弱，需要进一步进行增强改性。且单一的海藻酸钠水凝胶由于组成结构单一、机械性能和细胞相容性差，在生物医学领域有一定程度的局限性。

本课题以不同含量的单宁酸改性的纳米纤维素作为增强交联剂，通过辣根过氧化物酶（HRP）酶催化交联结合钙离子交联合成双交联的纳米纤维素/海藻酸水凝胶，研究了复合水凝胶凝胶化过程和其酶催化染料降解能力。具体内容如下：

用酪胺（Tyr）对天然高分子 SA 进行改性使得其分子侧链接枝上酚羟基，制得 SA-Tyr。加入制得的 SA-Tyr 到经单宁酸改性的纳米纤维素（CNC-TA）悬浮液中充分溶解后，在 H_2O_2 存在的条件下，通过 HRP 的酶催化交联法制备原位包埋 HRP 的改性海藻酸钠水凝胶。通过改变 CNC-TA 浓度、SA-Tyr 浓度、HRP 浓度和 H_2O_2 浓度探究其对凝胶化时间和溶胀性能的影响。结果表明酶催化交联凝胶化时间随 SA-Tyr 浓度和辣根过氧化物酶浓度的增加而缩短，可以在很短时间内形成水凝胶。制备的水凝胶对多种材料展现出良好的粘附性能。取凝胶时间合适的浓度配比制备水凝胶，对该凝胶进行 Ca^{2+} 浸泡处理后达到二次交联，使得凝胶网络结构更完善。将制备得到的凝胶用于染料降解，以偶氮类染料直接黑 38 为模型考察凝胶对染料的脱色性能。结果表明水凝胶对染料的降解率随时间增加而增大；随染料浓度变化存在临界值，15 mg/L 后，浓度对降解率影响较小；随温度升高，染料降解率增加，在 50℃ 时，染料降解率达到最高，进一步升高温度降解率下降。

D10-P45

一种可穿戴多功能蛛丝仿生面料用于极端环境下的个人防护

常启儒，张先龙*，郭少云

四川大学高分子研究所

个人防护装备(PPE)在医疗、工业和军事领域发挥着至关重要的作用，提供针对各种环境危害的必要保护。^[1-3]然而，随着环境挑战的增加以及对多功能集成的需求，开发超越传统单一功能的 PPE 成为一项重大挑战。针对该问题，本研究提出了一种柔性且可穿戴的三明治结构薄膜，通过静电纺丝和真空过滤工艺将 Ti_2AlC_3 （MXene）中间层与 $\text{Gd}(\text{OH})_3/\text{TPU}$ 外层结合制成，同时提供中子和电磁干扰屏蔽、能量收集和热管理功能。该薄膜通过模仿蜘蛛丝的晶区和无定形区域，^[4-5]将 $\text{Gd}(\text{OH})_3$ 纳米棒集成到 TPU 纳米纤维中构建“纳米渔网”结构，从而增强了氢键并实现了 22.94 MPa 的高抗拉强度。而内外层间强氢键相互作用牢固地将 MXene 导电中间层与富含钆的磁性外层结合在一起，提供了优异的中子屏蔽（ $\mu = 22.95 \text{ cm}^{-1}$ ）和电磁干扰屏蔽（SE = 35.1 dB）。此外，该薄膜还可作为摩擦纳米发电机(TENG)，能够捕捉环境动能以为低压电子设备供电，从而减少在恶劣环境中对外部电源的依赖。值得注意的是，其卓越的焦耳加热能力通过调节外部电压，可快速达到多种温度（最高可达 78.5℃），以满足用户的不同需求。

参考文献：

- [1] N. Couzon, M. Ferreira, S. Duval, A. El-Achari, C. Campagne, T. Loiseau, C. Volkringer, ACS Appl. Mater. Interfaces 14 (2022) 21497.
- [2] Y. Wang, Q. Yuan, M. Li, Y. Tang, Adv. Funct. Mater. 33 (2023) 2213440.
- [3] Q.-R. Hu, X.-Y. Shen, X.-M. Qian, G.-Y. Huang, M.-Q. Yuan, Defence Technology 28 (2023) 195.
- [4] N. Du, X.Y. Liu, J. Narayanan, L. Li, M.L.M. Lim, D. Li, Biophys. J. 91 (2006) 4528.
- [5] W. He, D. Qian, Y. Wang, G. Zhang, Y. Cheng, X. Hu, K. Wen, M. Wang, Z. Liu, X. Zhou, M. Zhu, Adv. Mater.

34 (2022) 2201843.

D10-P46**PTFE 多功能气凝胶的成型制备与性能研究**

李聪聪, 沈佳斌*

四川大学

气凝胶是一种由多孔固体网络组成的具有微纳米结构的高表面积物质。由于其具有超低密度、高孔隙率、大比表面积、低导热系数等优点, 被广泛应用于隔热、隔音、吸附等领域。近年来, 随着气凝胶应用场景越来越严苛, 对制备气凝胶所需基材提出了更高要求。聚四氟乙烯 (PTFE) 因其独特的理化结构, 具有优异的耐高低温、疏水性、耐气候、化学稳定等性能特性。然而, PTFE 树脂难熔难溶, 使其在成型过程往往因 PTFE 颗粒间的界面相容性不够导致形成的气凝胶存在开裂的问题。本研究选用 PEO 作为增稠剂辅助气凝胶成型, 通过冷冻干燥获得多孔结构, 并在烧结过程中除去 PEO, 制备了高孔隙率和小孔径的 PTFE 气凝胶。该 PTFE 气凝胶的孔隙率在 90% 以上, 同时具有分级蜂窝状结构。测试结果显示, 该气凝胶具有较低的热导率 (约 45 mW/mk)、较高的吸声系数 (2000-6000Hz 时达 80% 以上) 以及较强的吸油能力 (90% 以上), 有望在海洋除油、水下吸音等特殊领域获得应用。

D10-P47**纳米 SiO₂ 诱导 SEBS/PA6 共混物相态结构演变**

戴乾文, 王磊, 魏朝阳*, 施德安

湖北大学

尽管新的聚合物和聚合技术不断涌现, 将不同聚合物进行共混改性以获得综合性能更好的聚合物复合材料仍然被广泛应用。然而大部分的聚合物共混物相容性较差, 相态结构不稳定, 材料性能很难满足实际要求。传统的做法是加入高分子类的增容剂, 例如嵌段共聚物或接枝共聚物, 但是这种增容剂在高速剪切时会被拉出界面从而失去增容作用。添加纳米颗粒可以改善共混物的界面结构, 提高材料性能, 但是纳米颗粒的加入并不总是能够达到预期的效果。我们采用甲基三甲氧基硅烷 (MTMS) 改性纳米 SiO₂, 通过控制硅烷偶联剂的添加量预测 SiO₂ 在 SEBS/PA6 共混物的分布情况, 探索粒子分布与共混物相态结构之间的关系。我们发现仅通过调整 SiO₂ 的表面性质可实现 SEBS/PA6 共混物相形貌的变化。同时对纳米粒子的添加量、粒径大小、共混顺序对 SEBS/PA6 共混物的相态结构的影响机制进行了探讨。

参考文献

- [1] Liang, T.; Huang, Q.; Wei, Z.; Lei, W.; You, J.; Liu, J.; Ren, X.; Zhang, Q.; Hu, G.; Shi, D., Relationship between the Co-Continuous Morphology of Immiscible Polymer Blends and the Structure of an In Situ Formed Graft Copolymer. *Macromol. Rapid Commun.* 2023, 2300141.
- [2] Wang, J.; Tang, Q.; Ren, X.; Yang, Y.; Zhang, Q.; Lei, W.; Li, Z.; Jiang, T.; Shi, D., Selectively localized nanosilica particles at the phase interface of PS/PA6/nanosilica composites with co-continuous structure via reactive extrusion. *Compos. Sci. Technol.* 2019, 172, 125-133.

D10-P48**碱式硫酸镁晶须负载氢氧化物材料的制备及应用**

刘晓媛, 李雪, 党力*

青海大学

本论文采用 Fe(OH)₃ 负载 MOSw, 利用 MOSw 与 Fe(OH)₃ 的协同作用以及 Fe(OH)₃ 对 PVC 分子链的催化成炭作用, 提高 MOSw 阻燃抑烟效率。首先采用聚多巴胺 (PDA) 包覆, 即盐酸多巴胺 (DA) 在 MOSw 表面发生自聚合反应, 构筑 MOSw@PDA 结构, 后利用 Fe³⁺ 与尿素的配位作用, 构筑了六种不同组成的目

标产物 MOSw@PDA@Fe(OH)₃。采用扫描电子显微镜(SEM)、元素分布 Mapping、X-射线粉末衍射(XRD)、高分辨透射电子显微镜(HRTEM)、选取电子衍射(SAED)等表征中间产物 MOSw@PDA 和最终产物 MOSw@PDA@Fe(OH)₃ 的结构组成。最后将 MOSw@PDA@Fe(OH)₃ 添加到 fPVC 基体中,采用极限氧指数(LOI)和锥形量热(CCT)表征复合材料的阻燃抑烟性能,采用拉伸性能测试表征复合材料的力学性能。相关实验结果表明:(1)PDA 均匀包覆在 MOSw 表面,Fe 元素以 Fe(OH)₃ 和 Fe(OH)₃·0.25H₂O 的形式呈鳞片状负载在 MOSw 表面;(2)当 MOSw@PDA 与 FeCl₃ 的质量比为 10:1 时,MOSw@PDA@Fe(OH)₃ 的阻燃效果表现更佳,fPVC/20MOSw@PDA@Fe(OH)₃-1 复合材料的 LOI、峰值热释放速率(pHRR)和总放热量(THR)分别为 30.56%、167.59 kW/m² 和 42.62 MJ/m²,相较于 fPVC/20MOSw 复合材料分别下降了 -3.56%、15.20%和 14.33%;(3)当 MOSw@PDA 与 FeCl₃ 的质量比为 10:2 时,MOSw@PDA@Fe(OH)₃ 的抑烟效果表现更佳,fPVC/20MOSw@PDA@Fe(OH)₃-5 复合材料的峰值产烟率(pSPR)和总产烟量(TSP)分别为 0.0428 m³/s 和 9.27 m³,相较于 fPVC/20MOSw 复合材料分别降低了 41.85%和 32.14%。所以说 Fe(OH)₃ 负载 MOSw 层次结构为提高高分子材料的阻燃性提供了一种高效且环保的方法。

D10-P49

低介电高导热 PTFE 复合薄膜的界面强化及性能提升

田春林, 陈蓉*, 郭少云
四川大学

凭借其突出的介电性能、优异的化学稳定性、宽长期使用温度及极低的吸水率等,聚四氟乙烯(PTFE)膜材料已成为了应用于高频通信领域中的关键材料。但 PTFE 的热导率仅为 0.2~0.3W/(m·K),这不利于目前高度集成化 PCB 板的热量扩散,易发生温度过高而造成内部大规模集成电路的不可逆损坏。利用高热导率的填料对 PTFE 进行填充改性是解决这一问题的有效方法,其中 BN 具有较高的热导率(面内热导率 >250W·m⁻¹·K⁻¹)、优异的电绝缘性及介电性能,是制备低介电高导热 PTFE 复合材料的绝佳选择。但对于 BN 等这类表面光滑且高化学惰性的填料来说,其与 PTFE 之间较差的界面相容性导致的界面热阻仍是影响其复合材料热导率的关键因素。因此,针对高表面化学惰性填料改性效率极低且难以与 PTFE 形成良好界面的难题,本论文以高导热低介电的 BN 为研究对象,通过对其进行复配改性,在保证 BN 在 PTFE 乳液中均匀分散的同时实现了复合膜界面相容性的提升。改性后的 BN/PTFE 复合薄膜的蠕变变形、拉伸强度和断裂伸长率分别达到未改性 BN/PTFE 的 70.1%、131%和 175%。同时,改性后 BN/PTFE (20wt%BN)的面内热导率达 3.35W·m⁻¹·K⁻¹,提升至纯 PTFE 薄膜的 1489%,在 10GHz 下的介电损耗为 0.00063,表现出优异的介电性能,这为制备低介电及高导热的 BN/PTFE 复合薄膜提供了新思路。

D10-P50

具有双交联结构的有机硅改性水性聚氨酯的设计合成与摩擦学性能研究

赵纪尧^{1,2}, 张嘎*^{1,2}, 李欢¹
1. 中国科学院兰州化学物理研究所
2. 中国科学院大学

随着工业和建筑等领域对高性能密封材料的需求日益增长,开发具有优异耐磨性和耐久性的橡胶密封件变得尤为重要。随着全球对环境保护和可持续发展的重视,橡胶密封件的涂层技术也在经历着一场绿色革命。因此,低毒,环保且可设计性强的水性聚氨酯成为了橡胶密封件保护涂层的首选。本研究以 IPDI, PTMG (2000), TMP 为单体, DMPA 为亲水性扩链剂, BDO 为封端剂,旨在通过聚二甲基硅氧烷(PDMS)改性水性聚氨酯(WPU),并以水性聚碳二亚胺(PCD)为外加交联剂,制备出一种新型的具有双重交联结构的橡胶密封件耐磨涂层,以提升密封件的使用寿命和使用舒适性。揭示了聚氨酯分子结构对表面能和摩擦学性能的影响机制,通过分子结构设计和组分优化制备高性能水性聚氨酯固体润滑涂层。实验结果表明,PDMS 的引入能够将材料的表面能由 40 mN/m 降至 30 mN/m,提升材料疏水性及摩擦学性能。当 PDMS 的质量分数达到 3 wt%时,与未改性的纯聚氨酯涂层相比,改性后的水性聚氨酯涂层黏着磨损现象得到有

效抑制,与玻璃对磨时摩擦系数明显降低,由 0.3 以上降至 0.13 左右,且涂层耐磨性明显提升。按乳液质量的 3 wt%加入交联剂后,聚碳二亚胺与聚氨酯分子链中羧基反应,材料表面能进一步降至 25 mN/m,降低摩擦系数至 0.1 的同时,涂层耐磨性进一步提升,且拉伸强度由 15 MPa 增加至 18 MPa,断裂伸长率由 600%提升至 1058%,表明双重交联结构的建立同时起到了增强和增韧效果。而材料表面能的降低亦有助于提升涂层抗污能力:PDMS 改性后的涂层耐酸、碱能力均有所增强。本研究成功开发了一种性能优异的 PDMS 改性 WPU 橡胶密封件保护涂层,有望在汽车雨刮和玻璃导槽涂层等领域得到广泛应用。未来的工作将集中在优化改性配方和涂层工艺,以获得高性能的橡胶密封件保护涂层。

D10-P51

埃洛石调控酚醛树脂摩擦学性能的研究

韩莹莹¹, 张嘎*^{1,2}, 李欢¹

1. 中国科学院兰州化学物理研究所

2. 中国科学院大学

随着高端装备技术的发展,越来越多的运动构件服役环境更加苛刻,如重载、高速和高温等,容易引发过度摩擦磨损,从而影响其使用寿命和可靠性。因此,制备高性能自润滑复合材料,满足苛刻工况的使用要求,具有重要的现实意义。酚醛树脂(PF)因具有较高的机械强度、耐热性等优点被广泛用于制备摩擦材料。埃洛石(HNTs)是一种储量大、成本低的天然硅酸盐矿物,作为润滑油添加剂表现出显著的减摩抗磨作用。在本研究中,我们通过机械共混、热压成型工艺制备了埃洛石/酚醛复合材料,采用销-盘摩擦试验机探究了不同 PV(速度×压力)的干摩擦工况下复合材料的摩擦学行为。研究结果表明,仅通过添加埃洛石即可实现聚合物基体极低的摩擦磨损。与纯 PF 相比,埃洛石的加入显著提高了所测试材料的 PV 值。随着 PV 的增加,酚醛复合材料的摩擦学性能越优异,如纯 PF 在 $2 \times 1.5 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$ 的工况下平均摩擦系数为 0.28,磨损率为 $7.2 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$,而仅添加 3 wt% HNTs 的复合材料在 PV 值为 $20 \times 1.5 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$ 的条件下平均摩擦系数降低至 0.06,磨损率为 $3.5 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 。摩擦学性能的提高与转移膜的形成有着紧密关系。通过 EDS、XPS、FIB-TEM 等分析了摩擦界面转移膜微/纳结构,我们发现 HNTs/PF 复合材料在不同 PV 下在钢表面生长出了不同纳米结构的转移膜。低 PV 下以 C 膜为主,推测在摩擦过程中酚醛基体与钢界面发生了摩擦化学反应,生成了有机-金属整合物,起固体润滑作用。而高 PV 下金属表面生长出了上层为 Si-Al-O 陶瓷层,下层为 Fe-O 层的双层转移膜。这可归因于高 PV 下加速了 PF 的分解,使 HNTs 释放到摩擦界面,在摩擦热和机械应力作用下分解成硅和铝的氧化物,在摩擦界面生成了陶瓷基转移膜。本研究仅通过添加埃洛石单一填料即可实现聚合物基体极低的摩擦磨损,并通过对转移膜的分析揭示了主要的摩擦机制,丰富了摩擦界面转移膜形成理论,为耐磨聚合物材料的开发提供了一定的技术支撑。

D10-P52

用于高效电解水制氢:兼具离子增强传导及稳定性的新型季铵化价键/非价键修饰共价有机框架的杂化阴离子交换膜

张丽敏*

中北大学

鉴于全球能源使用量不断增加,能源供应、气候等都受到了消极影响。为满足可持续发展的需求,氢能作为公认的低碳和零碳能源受到了更为广泛的关注。由于质子交换膜及贵金属催化剂成本较高,阴离子交换膜电解水制氢尤其重要。

理想的阴离子交换膜(AEMs)需具备高离子选择透过性、低电阻、良好的机械强度等特点。现面临的挑战主要来自以下两个方面:(1)通过提高离子电导率进一步提高电解水析氢效率,但此过程会引起膜材料机械性能及稳定性的下降。需要解决离子电导率和吸水溶胀现象间相互权衡的问题。(2)AEMs 系统处于局部强碱性环境。因此结构中含有氨基、季铵盐等功能基团易被 OH⁻等亲核物质攻击,导致膜分子链的断裂和

离子交换基团的脱离。因此,亟需克服碱性条件下功能基团和聚合物主链易受到亲核性 OH⁻等物质进攻的问题。

大量研究表明 AEMs 的设计受制于离子电导率及尺寸稳定性的权衡。构建“离子通道”纳米结构辅助运输,可兼具良好的离子选择率及较低的吸水溶胀率。共价有机框架(COFs)因其具有比表面积大、孔径和结构可调、功能定制方便等优点引起普遍关注。通过选用先进的多层高分子结构 COFs 有利于高度排列且定向的离子通道结构设计。季铵化聚苯醚(QAPPO)有机基质的强韧性可实现 COF 刚性结构运输轨道富集态,调控阴离子传输能力,这一特性的实现为具有高性能离子传导通道结构的混合基质膜的设计与开发提供了新的思路。

本文尝试机械辅助等手段将 COFs 剥离成单层纳米片(SL-COF),并将 SL-COF 与 PPO 进行溶剂功能化处理,添加大量 OH⁻的季铵(QA)阳离子“跳板”,获得含有可连续跳跃的传输位点的 SL-QACOF@QAPPO。基于此,在超声波与机械手段辅助下,设计兼具 QAPPO 有机基质的强韧性与高分散包裹 SL-QACOF 高度排列运输位点可调控性的 SL-QACOF@QAPPO,有望解决 AEMs 高电导与强稳定的权衡问题,实现具有更高制氢效率的阴离子交换膜。

本文主要通过碘甲烷,碘戊烷及碘辛烷不同长度碳链,以及三氟碘甲烷不同结构修饰的 COFs 掺杂进行对比,研究 SL-QACOF@QAPPO 复合膜离子运输通道的改变对 OH⁻电导率的影响,以及通过不同掺杂量 COFs,研究离子通道对 OH⁻聚集度及选择性的影响,评价 SL-QACOF@QAPPO 复合膜的稳定性:通过测量复合膜的吸水率、溶胀率以及热重判断其尺寸稳定性及热稳定性。

其次通过将功能离子液体真空浸渍在 COFs 孔道中,与季铵化试剂价键修饰 COFs 掺杂进行对比,对比固定运输位点及可移动运输位点对离子传输机制的影响,利用分子动力学模拟和蒙特卡罗模拟等方法,预测混合基质膜中 OH⁻离子的传输过程和转移路径,以及离子传输速率和选择性等性能参数。结合实验结果和模拟预测结果,建立适用于电解水装置的 OH⁻离子运输的动态机制,选择最佳的离子通道设计方法。

将 COFs 其中的联吡啶基团进行季铵化修饰并应用在 AEMs 中,使 COFs 骨架中带有 OH⁻导电官能团,COFs 中坚固的支架结构能够改善 AEM 的机械性能及稳定性,有序的二维通道及通道内致密的季铵化离子导电基团能够改善 AEMs 的电化学性能。当掺杂 0.25%碘甲烷修饰的 COFs 于膜基底时,电导率为 54.26 mS cm⁻¹,达到纯膜的 1.6 倍左右,掺杂 0.25%含氟单体修饰的 COFs 于膜基底时,电导率可达到 61.54mS cm⁻¹,达到纯膜的两倍。复合膜的强度和尺寸稳定性也有显著提高,其最大拉伸强度为 25.46 MPa,较纯 QAPPO 膜性能有所改善。

综上所述,虽将 COFs 应用在 AEMs 上仍存在一些问题,但其坚固的支架结构和有序的孔道能够改善 AEMs 离子通道运输性能,因此探索将 COFs 应用在 AEMs 方面的可能性是无限的。

仅发表论文

D10-PO01

聚氨酯管材残余应力的表征以及体外氧化过程影响的探究

王傲, 邵树仁, 李震, 罗锋, 李洁华, 谭鸿*

四川大学高分子科学与工程学院

聚氨酯由于其有良好的生物相容性,已成功运用于人工导管、心脏起搏器绝缘导线、全人工心脏以及小口径人工血管等领域。但是聚氨酯制成的管材在长期植入过程中会发生不同程度的降解,引起人们对聚氨酯管材性能稳定性的担忧。我们制备了以聚氨酯为绝缘层的心脏起搏器导线模型,并利用狭缝切割法表征了聚氨酯挤出管材中的残余应力大小,探究了不同退火温度对材料本体的影响,利用有限元分析模拟了“U”型弯折状态下的聚氨酯导线模型的外部弯折应力。通过构建不同应力状态与开裂程度的模型,探究了内部残余应力、外部压缩和拉伸应力对聚氨酯绝缘层氧化开裂程度的影响。我们发现退火会令聚氨酯的内应力得到释放,使部分短程有序的硬段向更大尺度的硬段相区聚集,增强硬段内部的氢键,提高微相分离程度,并使材料的模量得到提升;温度过高时,会引起部分硬段熔融,使微相分离程度下降。体外氧化实验结果表明导线弯折部分氧化降解程度比非弯折部分严重,即导线外部拉伸应力会促进材料开裂;内部残

余应力可以通过退火有效缓解，非退火样品明显比退火的样品氧化降解程度高。

D10-PO02

植酸-三聚氰胺离子交联阻燃固化剂的制备及其在木器涂料中的应用

韦安，邹勇进*

桂林电子科技大学

作为一种常见的绿色资源，木材在多领域的应用由于其易燃性受到了许多限制，因此需要对其进行阻燃改性以提高其阻燃性能。常用的方法是在木材上涂覆阻燃涂料，阻燃涂料能在燃烧过程中保护木材基体，提高其阻燃性能。基于此，本工作以富含磷的生物质植酸和富含氮的三聚氰胺为原料，通过它们之间的离子交联反应合成了生物基膨胀阻燃剂植酸-三聚氰胺聚电解质 PM。将 PM 作为木质素磺酸钠改性的脲醛树脂涂料的阻燃固化剂，制备了一系列生物基木材阻燃涂料。涂覆了阻燃涂料的木材阻燃性能大幅度提高。在 UL-94 等级测试中达到了 V-0 级，极限氧指数高达 32.1%，总放热量 THR 和总烟雾释放量 TSP 分别下降了 91.51%和 57.80%，火灾增长指数 FGI 下降高达 97.32%，表现出较低的火灾危险性。此外，使用 PM 固化的阻燃涂料的机械性能与使用商业固化剂氯化铵固化的涂料相近，表明其能满足木材涂料的需求。

D10-PO03

新型高分子材料的设计与制造：分子动力学模拟与实验

侯冠一*

北京工商大学

开发具有特定应用定制属性的新型高分子材料是推进包括生物医学、电子学和环境可持续性在内的各个尖端材料领域的基础。本研究提出了一种结合计算模拟与实验方法的综合方法来设计和制造创新的高分子材料。首先，采用分子动力学（MD）模拟来预测一系列新型高分子候选材料的微观相态结构、动/热力学性能和机械性能。这些模拟提供了对决定材料宏观性质的分子结构和相互作用潜力关系的深入了解。同时，实验阶段通过各种聚合技术合成这些选定的聚合物，包括自由基聚合和缩合聚合，根据每种聚合物的化学性质量身定制。模拟和实验的迭代循环不仅加速了材料开发过程，还增强了对高分子材料结构与性能关系的理解。本研究展示了结合计算和实验方法在设计和制造高分子材料方面的潜力，导致了具有特定应用所需属性的聚合物的发现。研究结果强调了综合方法在材料创新中的重要性，为高性能高分子材料的快速开发铺平了道路。

D10-PO04

侧链改性对含硅聚醚型聚氨酯的相结构和稳定性影响研究

易超*

四川大学高分子科学工程学院

力学性能较弱是含硅聚氨酯在长期植入医疗领域中设备失效的主要原因之一。通过不同侧链调节硬段的极性，提高硬段相与 PDMS 相的相容性。通过傅里叶转变红外光谱 (FTIR)、差示扫描量热 (DSC)、动态机械热分析 (DMA)、小角 X 射线散射 (SAXS)以及耗散粒子动力学 (DPD)等手段，从次级键到相区构成，全视角地对侧链改性的含硅聚氨酯的相结构进行表征。提供了一种通过引入侧链调节硬段极性来提高 PDMS 与硬段相容性的新方法。对于所有侧链修饰的含硅聚醚型聚氨酯，PDMS 聚集区倾向于更好地分散在聚醚软段中。同时，不同极性侧链导致了 PDMS 与硬段的相间相互作用不同，同时形态行为也表现出不同。其中，SDO 提高了 PTMG/PDMS 和硬段之间的相互作用，并且 MDI-SDO 单元促进形成了由硬链段、PDMS 和 SDO 组成的中间层。增强了 PDMS 与硬段之间的相容性，提高了力学性能。

D10-PO05

Establishment of cross-linked structures of cyanate ester resin based on LAMMPS

Zhixiang Xie, Wenduo Chen*, Hongchao Zhao
Sun-Yet Sen University

Zhixiang Xie¹, Hongchao Zhao², Wenduo Chen^{1*}

¹ School of Materials, Sun Yat-sen University

² School of Advanced Manufacturing, Sun Yat-sen University

The cyclization reaction of cyanate ester (CE) resins results in a highly crosslinked network structure incorporating triazine rings, which imparts CE exceptional mechanical properties, thermal stability, and dielectric performance, thus making CE an excellent matrix resin for advanced aerospace applications including composite materials, foam core structures, stealth materials, and adhesives[1, 2].

However, the high content of benzene rings and triazine rings in cyanate ester cured products also results in excessively high crosslink density and crystallinity, leading to significant brittleness and poor crack propagation resistance. The current research focus is on toughening cyanate ester resin while retaining its inherent performance advantages as much as possible.

To address this, we employed all-atom molecular dynamics simulations to elucidate the relationship between the micro-molecular structure of CE resins and their macroscopic mechanical properties, focusing on the optimal amounts of toughening agents such as polyetherimide, epoxy, and polysulfone in relation to CE resin structure-performance[3]. Using the open-source software LAMMPS[4], we simulated the polymerization process by controlling multi-site polymerization reactions, which maximally mimic the actual curing reaction process, achieving the construction of a random crosslinked network with triazine rings in cyanate ester resin. Our program allows for controllable adjustments of the number of resin monomers, curing temperature, curing pressure, and degree of curing, while enabling real-time monitoring of the system's energy and temperature during the reaction process, optimizing unreasonable molecular configurations. Post-annealing and relaxation of the CE cross-linked model enabled us to simulate and calculate the tensile strength of unmodified CE resin, with a deviation of less than 10% from experimental test data. Furthermore, failure analysis of the cyanate ester resin indicated that the failure mode was primarily due to the sliding and disentanglement of macromolecular chains. This model offers a novel approach to constructing cyanate ester resin structures and provides new insights for studying the failure mechanisms and toughening modifications of cyanate ester resin through molecular dynamics simulation.

REFERENCES:

- [1] Z. Liu, X. Fan, L. Cheng, J. Zhang, L. Tang, Y. Tang, J. Kong, J. Gu, Hybrid Polymer Membrane Functionalized PBO Fibers/Cyanate Esters Wave-Transparent Laminated Composites, *Advanced Fiber Materials* 4(3) (2022) 520-531. <https://doi.org/10.1007/s42765-021-00125-4>.
- [2] L. Tang, J. Zhang, Y. Tang, J. Kong, T. Liu, J. Gu, Polymer matrix wave-transparent composites: A review, *Journal of Materials Science & Technology* 75 (2021) 225-251. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.09.017>.
- [3] Z. Xie, H. Chen, M. Xie, D. Zhang, H. Zhao, W. Chen, Electrical percolation networks of MWCNT/Graphene/Polyaniline nanocomposites with enhanced electromagnetic interference shielding efficiency, *Applied Surface Science* 655 (2024) 159613. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.159613>.
- [4] A.P. Thompson, H.M. Aktulga, R. Berger, D.S. Bolintineanu, W.M. Brown, P.S. Crozier, P.J. in 't Veld, A. Kohlmeyer, S.G. Moore, T.D. Nguyen, R. Shan, M.J. Stevens, J. Tranchida, C. Trott, S.J. Plimpton, LAMMPS - a flexible simulation tool for particle-based materials modeling at the atomic, meso, and continuum scales, *Computer Physics Communications* 271 (2022) 108171. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2021.108171>.

基于机器学习的环氧树脂体系前端聚合反应配方设计

卓智朗, 李越, 陈文多*

中山大学

环氧树脂^[1]因其优异性能广泛应用, 但传统固化方法耗能高、成本大, 且环境影响显著。为此, 本研究选用前端聚合^[2]作为解决方案。前端聚合具有节能、省时、环保的优势, 但其反应过程和产物性能受配方显著影响, 成分比例不佳会导致聚合过程不可控等问题。为解决这些问题, 本研究结合机器学习和实验验证^[3], 分析环氧树脂的前端聚合体系。利用随机森林算法和主动学习方法构建模型, 实现产物性能预测与配方优化, 探索出一条机器学习辅助设计路线, 以实现产物性能的可控和提升。

首先, 以前端速度、前端温度和弹性模量为目标变量, 单一单体聚合物的单体、共聚聚合物的共聚单体、反应引发剂和复合填料的种类与含量为特征变量, 建立前端聚合制备环氧树脂数据库。通过统计分析, 针对前端速度较慢的问题, 提出使用自由基反应活性更高的单体共聚或加入适当稀释剂的方法, 有效提升体系反应活性、降低体系黏度, 使前端更易引发与传播。研究发现, 在众多环氧树脂单体与复合填料中, 双酚 A 二缩水甘油醚复合碳纤维具有极高的弹性模量, 是环氧树脂基体和复合填料的优质选择。随后, 应用随机森林算法基于数据库构建了弹性模量的预测模型, 其可决系数达到 0.90, 证实了随机森林算法在前端聚合制备不同种类高分子聚合物性能预测中的普适性和可行性。本研究为提升环氧树脂体系性能提供了有效手段。

关键词: 前端聚合; 环氧树脂; 机器学习; 随机森林; 弹性模量预测

参考文献:

[1] May C A. Epoxy Resins: Chemistry and Technology, F, 1973 [C]. 1973,1-399.

[2] Malik M S, Schlögl S, Wolfahrt M, et al. Review on UV-Induced Cationic Frontal Polymerization of Epoxy Monomers [J]. Polymers, 2020, 12(9): 2146-79.

[3] Liu L, Chen W, Li Y., A statistical study of proton conduction in Nafion®-based composite membranes: prediction, filler selection and fabrication methods[J]. Journal of membrane science, 2018, 549: 393-402.

D10-PO07**含硅聚氨酯微相分离结构对其耐磨性的影响**

龙超*

四川大学

将聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 和一种硅氧烷基扩链剂 (SDO) 纳入聚醚聚氨酯 (PEU) 中。采用 DSC、DMA、SAXS、ATR-FTIR 和 XPS 等多种表征技术研究了微相分离结构与机械性能、表面性能和耐磨性之间的相关性。PDMS 的添加显著降低了 PEU 的摩擦系数并增强了疏水性。SDO 的添加有助于改善 PDMS 和 PEU 硬链段之间的相容性, PDMS 链段的玻璃化转变温度转移到更高的温度并且松散氢键羰基的比例增加这一事实证明了这一点。由于不相溶链段之间的界面粘合力提高, PDMS 和 SDO 改性的 PEU 的耐磨性明显增强。

D10-PO08**一种多功能可穿戴蛛丝仿生面料用于极端环境下的个人防护**

常启儒, 朱鑫国, 汪家鼎, 张先龙*, 郭少云

四川大学高分子研究所

个人防护装备(PPE)在医疗、工业和军事领域发挥着至关重要的作用, 提供针对各种环境危害的必要保护。^[1-3]然而, 随着环境挑战的增加以及对多功能集成的需求, 开发超越传统单一功能的 PPE 成为一项重大挑战。针对该问题, 本研究提出了一种柔性且可穿戴的三明治结构薄膜, 通过静电纺丝和真空过滤工艺将 Ti_2AlC_3 (MXene) 中间层与 $\text{Gd}(\text{OH})_3/\text{TPU}$ 外层结合制成, 同时提供中子和电磁干扰屏蔽、能量收集和

热管理功能。该薄膜通过模仿蜘蛛丝的晶区和无定形区域，^[4-5]将 $\text{Gd}(\text{OH})_3$ 纳米棒集成到 TPU 纳米纤维中构建“纳米渔网”结构，从而增强了氢键并实现了 22.94 MPa 的高抗拉强度。而内外层间强氢键相互作用牢固地将 MXene 导电中间层与富含钆的磁性外层结合在一起，提供了优异的中子屏蔽($\mu = 22.95 \text{ cm}^{-1}$)和电磁干扰屏蔽($\text{SE} = 35.1 \text{ dB}$)。此外，该薄膜还可作为摩擦纳米发电机(TENG)，能够捕捉环境动能以为低压电子设备供电，从而减少在恶劣环境中对外部电源的依赖。值得注意的是，其卓越的焦耳加热能力通过调节外部电压，可快速达到多种温度 (最高可达 78.5°C)，以满足用户的不同需求。

参考文献:

- [1] N. Couzon, M. Ferreira, S. Duval, A. El-Achari, C. Campagne, T. Loiseau, C. Volkringer, ACS Appl. Mater. Interfaces 14 (2022) 21497.
- [2] Y. Wang, Q. Yuan, M. Li, Y. Tang, Adv. Funct. Mater. 33 (2023) 2213440.
- [3] Q.-R. Hu, X.-Y. Shen, X.-M. Qian, G.-Y. Huang, M.-Q. Yuan, Defence Technology 28 (2023) 195.
- [4] N. Du, X.Y. Liu, J. Narayanan, L. Li, M.L.M. Lim, D. Li, Biophys. J. 91 (2006) 4528.
- [5] W. He, D. Qian, Y. Wang, G. Zhang, Y. Cheng, X. Hu, K. Wen, M. Wang, Z. Liu, X. Zhou, M. Zhu, Adv. Mater. 34 (2022) 2201843.

D10-PO09

Novel “Rigid to Resiliency” Bio-based Polyesters with Excellent Thermo-mechanical Properties: Promoted by “PE-like” Linear Aliphatic Polyesters

Jiyang Zuo^{*1}, Tao Yang², Chen Lin¹, Hongxia Deng¹, Jiayi Liu¹, Shanshan Gu¹, Zhisen Shen¹, Jinggang Wang²

1. Department of Otorhinolaryngology Head and Neck Surgery, the Affiliated Lihuili Hospital of Ningbo

University,

2. Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences

Polyester films, the most widely used packaging material, have seen a tremendous increase in popularity over the past few decades due to their affordability, lightweight, biocompatibility, and ease of manufacturing. This work provides an in-depth introduction on the most promising strategies for developing high-barrier polymer packaging films, a molecular structure design that balances mechanical and barrier properties was proposed.

A series of high-performance copolyesters PPDThF were prepared by utilizing the unique crystallization ability of poly(propylene 2,5-thiophenedicarboxylate) (PPTThF), as well as dodecanedioic acid (DA). And the long carbon chain aliphatic polyester is a polyethylene-like material. The incorporation of DA into the main chain of polymers has been found to be random copolymerization leading to limited crystallizable sequence lengths, special crystal memory effects are more pronounced due to the presence of different sequence lengths during crystallization, and it also affects the copolyesters.

The effects of the long-chain dibasic acids on the thermal transition, aggregation structure, gas barrier properties, and optical properties of the copolyester PPDThF were investigated. The results demonstrate that PPDThF-10 combines the benefits of conventional thermoplastics, like high strength and high modulus, with the mechanical and physical characteristics of chemically crosslinked rubber, including high elasticity and toughness. The results obtained so far show that thiophene-based copolyesters can be used for food-packaging applications.

D10-PO10

基于冰溶交联策略制备具有高稳定性的聚电解质材料

倪云霞¹, 胡荣俊¹, 程梓瑶¹, 孟凡栋^{*2}, 孙复钱¹

1. 江西省科学院应用化学研究所

2. 浙江大学衢州研究院

冰模板法是构建亲水性聚电解质多大孔材料的常用方法。当前，冰模板法制备聚电解质多孔材料仍存在一定局限，如冰模板通过冰真空升华方式除去冰晶，导致材料制备成本较高且效率偏低。此外，亲水性聚电解质大孔材料在水性应用环境中容易发生过度溶胀甚至溶解，孔结构稳定性欠佳。针对上述问题，我们开发了一种冰溶交联（Ice-Dissolving-Crosslinking, IDCr）策略，用于高效、大面积制备在水环境中具有超稳定性的聚电解质大孔材料。以羧甲基纤维素钠（CMC）为例，首先将羧甲基纤维素钠溶液冷冻固化，于丙酮浴中溶冰致孔，然后将多孔材料浸没于均苯三甲酰氯（TMC，交联剂）的丙酮溶液中。冷冻样品中的冰晶在丙酮浴中溶解致孔，随后均苯三甲酰氯和羧甲基纤维素钠发生共价交联，稳定所形成的孔结构。与传统的冻干交联技术制备样品（CMC-TMC_{LC}）相比，冰溶交联策略制备样品（CMC-TMC_{IDCr}）具有较高的交联度，优异的压缩回弹性和水溶液稳定性。通过掺杂碳纳米管，我们制备了大面积（40 cm × 25 cm）的聚电解质多孔复合材料，在一个标准辐照强度下对海水的蒸发效率为 2.02 kg m⁻² h⁻¹，连续 10 h 测试中表现出稳定的光热产水性能。冰溶交联策略为高效、大面积制备具有优异稳定性的亲水性聚电解质材料提供了新的思路。