



中国材料大会 2025

暨新材料科研仪器与设备展

7月5-8日, 2025
福建 厦门

P-高分子材料老化与服役寿命研究
p-Aging and Lifetime Prediction of
Polymer Materials

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



P. 高分子材料老化与服役寿命研究
分会主席：李光宪、陈洪兵、杨睿、揭敢新

主题报告

P-01

题目待定，黄辉，中国工程物理研究院

邀请报告及口头报告

P-01

智能响应介电绝缘材料

李琦

清华大学

P-02

天然多酚基抗老剂的制备与应用

杨磊，张蓉，李乙文*

四川大学高分子科学与工程学院，四川省成都市 610065

* ywli@scu.edu.cn

天然多酚是一种植物次生代谢产物，具有光吸收和抗氧化等功能，是新一代生物基抗老剂的理想候选材料[1, 2]。然而，直接使用天然多酚小分子存在诸多局限，包括光谱吸收范围较窄，难以高效屏蔽全紫外及特定可见光等问题，极大地限制了其在抗老化领域的普适应用[3]。为了解决这一难题，本团队从多酚材料化学的角度出发，借助酶促氧化聚合[4]和金属配位化学[5]等聚合方法和化学工具进行天然多酚基抗老剂的设计与制备。所制备的抗老剂具有可调的光谱吸收和良好的抗氧化等功能，在提高聚合物光氧稳定性、延长食品保质期、减轻人视网膜上皮细胞光氧损伤和提高艺术品颜料光氧稳定性等应用场景中取得了优异的抗老化防护效果。这项工作逐步通过（1）天然多酚单体的筛选；（2）天然多酚基抗老剂的设计；（3）抗老化效果评估和应用形式拓展这三个阶段，极大程度地丰富和完善了天然多酚基抗老剂材料库，为制备天然多酚基抗老剂提供了可靠的理论指导。

参考文献：

[1] T. Wang, J. Zhao, Z. Yang, L. Xiong, L. Li, Z. Gu, Y. Li, *Green Chem.* 2022, 24, 3605–3622.

[2] M. Michalak, *Int. J. Mol. Sci.* 2022, 23, 585.

[3] V. Marturano, A. Marotta, S. A. Salazar, V. Ambrogi, P. Cerruti, *Prog. Mater. Sci.* 2023, 139, 101186.

[4] R. Zhang, B. Liang, W. Bai, J. Hu, T. Wang, Y. Yang, H. Bai, L. Yang, Y. Li, *Mater. Horiz.* 2025, 12, 2977-2988.

[5] H. Li, J. Zhang, H. Xue, L. Li, X. Liu, L. Yang, Z. Gu, Y. Cheng, Y. Li, Q. Huang, *Mater. Horiz.* 2023, 10, 1789–1794.

P-03

国产材料老化试验设备的研究进展

王尚一¹

1. 标格达

P-04**镁合金防护涂层临海库房环境加速寿命评估研究**

张超*、张欢、李翌亮、梁晓凡、张新兰、丁孝均、许文
航天材料及工艺研究所

镁合金防护涂层通过屏蔽介质渗入、屏蔽腐蚀电路、与基材界面粘合来保护基体镁合金。但防护涂层在长期服役过程中会受到环境中热氧、水分、盐雾及其他侵蚀性介质的影响，会逐渐发生老化现象导致防护失效，引发镁合金基材发生腐蚀现象。因此，防护涂层的环境适应性评价及加速寿命评估成为了影响镁合金使用的关键问题。基于此，设计了模拟我国临海库房使用环境的镁合金防护涂层加速试验方法，通过共聚焦显微分析、附着力测试、红外光谱和电化学测试等技术研究了镁合金防护体系在模拟临海库房使用环境中的腐蚀与老化行为。研究表明，镁合金防护涂层在临海库房贮存后呈现附着力与低频阻抗模值下降的趋势，且加速贮存 10 年周期内，附着力与贮存时长呈线性下降关系。依据临海库房自然贮存数据与加速贮存数据对比验证，修正了加速因子，得到了基于自然贮存数据修正的加速寿命试验方法，能够精准预测镁合金防护涂层在临海库房环境下防护性能随贮存时间的退化关系。

P-05**高分子材料老化活性中间体化学发光分析方法研究**

吕超
北京化工大学/郑州大学

P-06**环氧灌封应力调控与服役评价技术研究**

李悦芳*、李想、茹佳胜、贾进、刘鑫、钟华、钟伟、陈磊
中国工程物理研究院电子工程研究所

环氧树脂具有优异的电气绝缘性能、力学强度、粘接性能以及良好的原位固化工艺性等性能优势，被广泛应用在电子电器装置的绝缘与冲击防护灌封领域。当前制约环氧灌封技术的主要瓶颈问题在于环氧树脂在制造固化成型、交变温度与湿热环境、长期贮存等使役条件下产生了显著灌封应力，并引发开裂、分层缺陷。因此，准确量化环氧灌封应力、分析和调控其演化过程，对于电子电气装置在高电压与强动载应用中的可靠性与性能提升具有重要意义。本文围绕环氧灌封应力形成演变机制及其调控，从应力评价方法、固化残余应力调节、服役条件应力演变等方面开展研究。构建了基于薄壁结构应变分析的灌封应力监测方法，发展了经验证的双弹性力学参数粘弹性应力模型，阐释了环氧树脂灌封应力-结构约束强耦合现象与高弹态体积松弛行为的关联性。基于应力监测手段开展环氧灌封的固化残余应力调控研究，通过降低凝胶化温度、减缓升温速率等手段将凝胶化初期应力与固化残余应力减少约 50%。为厘清环境温度变化与长期贮存下灌封应力演化规律，研究证实了跨玻璃化转变区快速温变会带来可观应力增大效应，而亚 T_g 长期贮存下应力松弛效应占据主导效应。以上研究结果提示结构约束作用下环氧灌封加速试验方法应以亚 T_g 高低温往复加载形式开展。

P-07**海洋大气环境下硅橡胶老化加速试验设计与退化规律研究**

张卫方
北京航空航天大学可靠性与系统工程学院

P-08**聚丙烯材料光老化变色问题及防治技术研究**

杨波

金发科技股份有限公司技术研究院

P-09

光稳定剂助力高分子材料绿色发展

刘旭

宿迁联盛科技股份有限公司

P-10

轻量化 γ -射线屏蔽复合材料结构与稳定性研究

田波、周娜、李志刚、李金凤、张楠、赵弘韬*

黑龙江省原子能研究院

本研究针对高能 γ -射线防护需求，通过湿法反应熔融共混技术制备了聚丙烯基 PbO 复合材料，系统评估了其对 γ -射线的屏蔽性能及辐射环境下的稳定性。实验表明，PbO 的引入显著优化了 PP 的熔体结构，诱导形成异相网络结构（液-固转变验证通过四种模型），其中 60 wt%PbO 的复合材料展现出均匀分散的网状形貌（SEM 分析），并显著提升结晶性能（DSC/XRD 显示晶粒生长加速）。流变分析表明，PbO 添加量增加可提高储能模量（热稳定性增强），且 60 wt% PbO 的氧化诱导时间（OIT）达 36.77 min，热分解残碳量逐步提升。屏蔽性能测试显示，60 wt% PbO 的线性衰减系数（ μ ）和相对屏蔽效率（RPE）均达峰值，而吸收层厚度（HVL/TVL）最小，理论计算的有效原子序数（ Z_{eff} ）和电子密度（NE）进一步验证了其高效屏蔽机制。在辐射稳定性研究中，梯度剂量辐照实验表明，异相网络结构（B-PbO）相较于非支化结构（C-PbO）具有更优的抗辐照能力：120 kGy 剂量下，B-PbO 屏蔽参数较 C-PbO 提升近 3 倍，流变和热稳定性参数衰减更缓，表面氧化程度（红外光谱/接触角分析）和力学性能劣化幅度更低。该研究揭示了异相网络结构对复合材料辐射稳定性的关键作用，为高剂量辐射环境下轻量化屏蔽材料的设计提供了理论依据。

P-11

典型压敏胶粘剂的 γ 辐照老化性能研究郭亚昆¹、黄德顺²、刘小兵³、李玉泉³、帅茂兵^{*2}

1. 表面物理与化学重点实验室
2. 中国工程物理研究院材料研究所
3. 中国工程物理研究院化工材料研究所

压敏胶粘剂在汽车、电子、核技术等领域广泛应用。其中，丙烯酸酯和有机硅压敏胶粘剂是常用品种。然而，在辐照工况下，二者性能有效性及辐照损伤机制缺乏系统研究。本项目采用⁶⁰Co 辐照源对两种胶粘剂及胶带进行 γ 辐照，系统研究了不同剂量、剂量率下胶带力学性能与压敏胶化学组成变化规律，评估了其在氩气和空气中的辐照释气类型，揭示了辐照损伤机制。研究表明：丙烯酸酯压敏胶随着辐照剂量的增加，剥离强度呈先增加后减小的趋势；当辐照剂量超过 200kGy 时，剥离强度显著降低；红外和核磁谱图分析表明其分子链上的羰基发生了辐照分解，进而导致力学强度显著下降。对于有机硅压敏胶，随着辐照剂量的增加，其剥离强度也呈现先增加后减小的趋势，但耐 γ 辐照性能显著优于丙烯酸酯压敏胶；红外和核磁谱图分析表明硅生胶在 γ 射线作用下会发生辐照交联，进而使得其在高辐照剂量下仍保持较高的力学性能。对两种压敏胶液进行辐照，质谱分析表明在空气中辐照时会释放出氢气、甲烷、二氧化碳等气体；在氩气中辐照时会释放出氢气、甲烷、一氧化碳等气体。上述研究为核工程领域用压敏胶的使用寿命预测提供了技术支撑。

P-12

GAP 基推进剂热力耦合贮存老化性能研究

崔庆鑫¹、刘向阳^{*1}、张广龙¹、陈颖俊¹、赵品²、张旭¹

1. 北京理工大学宇航学院
2. 西安航天化学动力有限公司

以 GAP 基推进剂为研究对象, 通过 0.075MPa 预应力高温加速老化试验, 结合多尺度老化性能测试方法, 从力学性能、微观形貌、微观结构三方面研究了热力耦合作用对推进剂贮存老化性能的影响。结果表明: 热力耦合作用下, 宏观力学层面, 推进剂最大延伸率在老化初期快速下降后在老化中后期缓慢下降, 弹性模量则是先快速增长后缓慢增长, 二者以老化 30d 为界, 呈现双阶段的老化特征; 微观形貌层面, GAP 推进剂老化过程中, 固体颗粒与基体界面粘接作用减弱, 颗粒松动并脱落, “脱湿”现象加剧; 微观老化机理包括推进剂微观界面性能降低、增塑剂含量下降以及交联网络降解断裂, 共同作用导致力学性能的双阶段老化特征。

P-13

力响应高分子

陈于蓝*

吉林大学

高分子力化学主要研究高分子在机械力作用下化学键形成与断裂、分子间相互作用的变化, 是连接化学(微观分子水平)与力学(宏观材料性能)研究的桥梁。在微观分子层面上大多数力响应的高分子体系都基于共价键的轴向拉伸来实现激活, 并伴随着高分子主链的断裂。突破共价高分子力化学的研究范畴, 发展新兴的力学响应体系, 将机械力的破坏作用转变为增效作用, 不仅将丰富力响应高分子的种类和功能, 也将推动高强韧高分子新材料的发展。我们近期研究发现, 二硒/硫基团和葱-炔 Diels-Alder 环加成基团这两类重要的含动态共价键的官能团还具有灵敏的力响应特性。力能诱导高分子链中心二硒/硫键的高选择性断裂和交换, 是调控硫族高分子动态响应性能的新手段, 利用力诱导的硒/硫自由基引发单体聚合与自由基转移反应, 得到了具有自增强特性的原位应力指示弹性体。此外, 葱-炔 Diels-Alder 环加成力敏团 FA 可以通过“弹性活化”机制实现力诱导荧光小分子的释放。与传统的基于拉伸断键的可视化力敏基团相比, FA 的活化过程保证了高分子主体结构完整性, 使材料实现多次连续活化, 为新型光学应力探针的开发开辟了新思路。

P-14

航天高分子材料长期应力作用下的服役性能研究

张欢*、许文、张新兰、张超、李墨亮、邹士文

航天材料及工艺研究所

高分子材料在航天装备上作为承力承压材料广泛应用。如用于密封或阻尼减振的橡塑材料、用于承载的泡沫材料、用于结构承力的树脂基复合材料等。高分子材料在长期应力作用下会发生蠕变、应力松弛等现象, 耦合服役环境的温度、湿度、紫外等环境因素, 应力能够加速其物理老化和化学老化过程。因此航天装备尤为关注长期受力状态下高分子材料的服役性能。对不同功能的承载高分子材料评估其服役性能及寿命时, 应结合其实际应用部位的具体要求, 按照实际应用状态设计加速老化试验, 关注其失效机理并重点考虑影响其失效的关键环境因素和关键材料性能, 以关键材料性能下降作为评估其服役性能和寿命的依据。如用于密封的橡胶或塑料材料在长期贮存过程中会出现应力松弛现象导致密封应力下降从而影响其密封可靠性, 应重点关注其应力松弛行为及压缩回弹性能; 用于阻尼减振的橡胶材料在使用过程中减振器发生蠕变导致其整体刚度变化从而影响其减振功能, 应重点关注压缩回弹性能和刚度; 用于承载的泡沫材料如聚氨酯泡沫/PMI 泡沫在大载荷作用下发生蠕变, 导致产品不符合设计要求, 应重点关注泡沫材料的蠕变量; 用于结构承力的树脂基复合材料在各种应力作用下会萌生裂纹, 出现裂纹扩展及开裂并最终导致失效, 应重点关注其关键力学性能退化。航天高分子材料在长期应力作用下服役时还需关注应力与其他环境因素的耦合效应, 建立符合实际应用状态的多因素耦合加速试验方法和性能评估方法, 对其服役性能进行可靠

评估。

P-15

硅橡胶复合材料多级结构及外界刺激作用下微-宏观本构模型研究

朱春华

中物院化工材料研究所

P-16

基于加速老化寿命预测模型不确定性的思考

Atlas

ATLAS 亚太拉斯材料测试技术

P-17

高分子超薄膜加速老化的反常慢化

汤启云*

东南大学

随着高分子薄膜厚度降低,表面高活动高分子层占比逐渐增大,高分子超薄膜物理老化速率出现加速。我们构建高分子薄膜老化松弛模型[1],预测了高分子薄膜在厚度低于 10 纳米时出现反常的加速老化慢化现象[2]。该现象是链状分子链滑移导致的自由体积逆向扩散决定。这一理论预测结果后续被相关实验证实[3]。

参考文献:

[1] Q. Tang, W. Hu, Phys. Chem. Chem. Phys. 15, 20679 (2013)

[2] Q. Tang, W. Hu, S. Napolitano, Phys. Rev. Lett. 112, 148306 (2014)

[3] T. Sharma, M. Konishi, K. Sekiya, I. Takahashi, Macromolecules, 54, 2637 (2021)

P-18

基于动态荧光的老化自报告、自修复及可回收硅橡胶设计与性能研究

黄镇东

中国工程物理研究院核物理与化学研究所

P-19

载人飞艇囊体材料老化性能评价

盛德鲲

中国科学院长春应用化学研究所

P-20

考虑弯扭耦合和材料缺陷的风电叶片纤维复合材料耐久性研究

谈颀

中山大学

P-21

防弹复合材料及装备老化性能研究进展

王绪财

中国兵器工业集团

P-22

气田采出水柔性复合管性能衰减规律研究

孙兴泽*

中国特种设备检测研究院

近年来，柔性复合管由于其优异的耐腐蚀性、柔韧性及安装便捷，在国内油气田被大规模推广应用。随着应用范围的进一步扩大，出现了部分失效事故。针对气田采出水柔性复合管服役环境，根据气站提供的水样选取两个条件最苛刻的介质情况配置了含油量高和矿化度高的两种模拟介质，对柔性复合管进行模拟工况下的加速老化实验。将柔性复合管老化样管剖开，对其宏观样貌进行观察，发现内衬层出现黄色和乳白色颜色变化。将变色部位的外保护层、增强层和内衬层进行力学性能、维卡软化温度、氧化诱导期分析，建立各部位性能变化的联系，通过外保护层的性能变化判断管道的性能衰减情况。

P-23

60Co 伽马辐射对 CsPbBr₃ 纳米晶结构与光学性能影响的研究

张建伟、李志刚*

黑龙江省原子能研究院

全无机钙钛矿 CsPbBr₃ 纳米晶因其优异的光电性能和溶液可加工性，在发光二极管、激光器、光伏和辐射探测等领域展现出巨大潜力。然而，其在辐照环境下的稳定性与性能演变规律尚需深入研究。理解辐照诱导的结构变化及其与光学性质的关系对于评估其辐照耐受性及开发抗辐照器件至关重要。本研究通过系统实验，在 0-3200kGyair 的辐照剂量范围内，明确了 60Co 伽马辐射对热注入法制备的 CsPbBr₃ 纳米晶的结构与光学性质的影响规律。实验结果表明，在 0-200kGyair 的辐照范围内，纳米晶体的发光强度并未出现明显变化，结构也并未发现明显变化，显示出该材料在较低辐照剂量下具有良好的稳定性。而当辐照剂量处于 200-3200kGyair 范围时，纳米晶体逐渐呈现双峰发射，发光强度降低，同时结构从 113 向 125 结构发生转变。该研究为评估 CsPbBr₃ 纳米晶在辐射环境下的稳定性提供了重要依据，对指导其在空间电子学、核辐射探测等辐照敏感应用中的材料设计与性能优化具有重要参考价值。

P-24

含芳环高分子材料的耐辐射性能研究

刘波*

中国工程物理研究院核物理与化学研究所

高分子材料在航空航天和核材料运输等核环境中有着广泛的应用，然而，其在服役过程中，面临性能退化甚至失效的风险。材料的辐射损伤机制与其化学和物理结构密切相关。

基于动态键的自修复可拆解型类玻璃高分子 (vitriimer)，作为一种新型高分子材料，其辐照老化行为和气氛稳定性，以及辐照下的反应机理仍然是不明确的。设计了动态交联键为二硫键的三种芳环含量的 vitriimer，研究了三种 vitriimer 的拉伸性能、热性能、热稳定性以及自由基浓度随吸收剂量的老化行为。结果表明，三种 vitriimer 在较高剂量率高剂量辐照下的稳定性较好，低芳环含量的 vitriimer 存在一定程度的气氛复合辐照效应和低剂量率老化增强现象。

聚氨酯具有复杂的多层次结构，通过模型化设计聚氨酯，调控软段结构和硬段结构的芳香性、对称性和结晶性，研究了辐照作用下软硬段化学结构对体系的分子网络结构、介观微相结构，以及宏观力学性能的影响规律。结果表明，模型聚氨酯均以辐射降解为主，苯环上二异氰酸酯所在对位或间位引起的对称性差异对其对应的模型 PU 的耐辐照性能影响不大，提高硬段芳香性可以提高耐辐照性能，软段聚二元醇的对称性增加有利于提高材料耐辐照性能。

本工作对理解和调控高分子材料的老化过程、性能评估和寿命预测，以及设计耐辐照材料和器件具有重要的理论意义和实际价值。

P-25

先进封装中热界面材料的老化与可靠性评价研究

张莹洁

工业和信息化部电子第五研究所

P-26

含能材料老化规律与机理研究

王艳艳

59 所

P-27

抗疲劳聚氨酯弹性垫板性能研究

董全霄*

河北铁科翼辰新材料科技有限公司

聚氨酯弹性垫板是高速铁路轨道扣件系统中唯一具有弹性、能够起到阻尼作用的材料，其能够缓冲列车高速运行对道床和轨枕带来的冲击，并提升列车运行的平稳程度。但扣件系统中的聚氨酯弹性垫板在线路上长期服役后，其静刚度以及力学性能会发生一定的改变，为探究聚氨酯弹性垫板的老化和降解机理，制备了抗疲劳浇注型聚氨酯弹性体，并通过疲劳试验和相关测试分析技术，研究了聚氨酯弹性垫板在经过 300、500、800 和 1000 万次荷载循环后，其宏观力学性能、微观结构、分子结构和动态力学性能的变化趋势。疲劳试验过程中，随荷载循环次数的增加，聚氨酯弹性垫板的永久变形和静刚度逐渐增大，但 1000 万次荷载循环后，永久变形以及静刚度的变化程度均较小，变化率分别为 3.17% 和 5.47%；此外，经过 1000 万次荷载循环后聚氨酯弹性体内部的泡孔结构保持完好，即分子结构未发生明显变化，但材料的储能模量和损耗模量稍有降低，热降解速率与疲劳前略有不同，归因于荷载循环过程中聚氨酯弹性垫板内部微结构和分子链交联程度发生的微小改变。即制备得到的聚氨酯弹性垫板具有优良的抗疲劳性能，同时能够为后续高速铁路轨道扣件用聚氨酯弹性垫板的性能改良、服役稳定性提高以及寿命预测研究提供基础。

P-28

高功率微尺度场景下 PBT 绝缘材料的电老化服役行为及机制杨俊龙^{1*}，张灿灿¹，李光宪¹¹ 四川大学高分子科学与工程学院，先进高分子材料全国重点实验室（四川大学）

随着电动汽车产业和电子信息技术的快速发展，功能性高分子材料因其优异的力学、电学等综合性能，在各类绝缘组件中的应用日益广泛。随着电子器件走向小型化、高功率、高集成方向，绝缘材料的服役环境发生了巨大变化，局部电场强度显著增大，可达到甚至超过高压输配电领域（>10 kV）的水平。同时，电场往往与高温、热氧等老化因子共同作用，使得电击穿成为主导的老化失效模式，严重制约了关键电子组件的服役稳定性与安全性。

本报告将首先介绍高分子绝缘材料在新一代电子与电气设备中的典型应用场景，分析其在复杂服役条件下面临的电老化问题及其研究的迫切性和意义。随后，探讨高分子绝缘材料在电场及其耦合环境下的老化机制研究思路与关键科学问题，特别是聚焦于多场耦合条件下的电老化行为与规律。接着，将介绍本团队在相关研究中的主要进展，包括通过调控 PBT 材料的本征结构与微缺陷，构建微观分子结构、聚集态形貌与电击穿等宏观性能之间的构效关系，并尝试揭示电场-热氧耦合老化的作用机制。研究有望为高性能、安全可靠的绝缘材料设计提供理论支撑和技术路径，同时为器件寿命评估与失效预警提供新的科学依据。

P-29

热氧老化诱导 PBT 结构演变与击穿性能劣化规律的研究

张灿灿、杨俊龙*、李光宪

四川大学

高分子材料具有耐热、绝缘等优异的综合性能，广泛应用于电动汽车、电子电器、信息等领域中的关键绝缘组件，其在使用过程中不可避免的会面临热氧老化问题，导致结构缺陷的形成和演变，致使制品击穿失效。但现有高分子材料热氧老化的研究主要集中在力学性能、粘接性能及热氧老化机制上，对于热氧老化过程中影响绝缘性能的关键结构、主要缺陷类型缺乏研究。本研究旨在发现热氧老化中的关键结构及缺陷，并建立击穿场强与结构缺陷的关系，最终建立寿命预测模型。我们以电动汽车绝缘组件中应用日益增多的聚对苯二甲酸丁二醇酯（PBT）为研究对象，通过模塑成型制备出结构均一的 PBT 样品，在 180°C 的环境下间隔取样，获得不同老化时间下的模型样品，探究其结构演变对电性能的影响规律。研究发现，分子量和击穿场强变化趋势一致，前期呈下降趋势，后期处于波动状态。且分子量的降低和结晶度的演变诱导微孔缺陷的形成，进而降低击穿场强。本文揭示了分子量是热氧老化中的关键结构因素，微孔是主要缺陷。本课题对高分子材料老化中结构与性能的关系进行了理论补充。

P-30**多功能定制化夔形玻璃盖片空间辐射效应研究**张炜楠^{1,2}、赵会阳^{*1,2}、吴宜勇¹

1. 哈尔滨工业大学

2. 哈尔滨工业大学重庆研究院

灵活性、透光性和辐射防护对于空间光伏（PV）器件封装至关重要。在过去的十年中，已经提出了几种有前景的透明封装材料。然而，同时实现太阳能电池的高效发电和高稳定性仍然是一个巨大的挑战，这主要是由极端的空间环境造成的。本文基于地球同步轨道（GEO）设计了可定制的多功能伪晶玻璃（PMG）复合材料，然后通过层压方法将其封装在大面积柔性多结太阳能电池上。受益于夔形玻璃的高透射率和大角度散射特性，光伏器件在封装后可以保持高功率转换效率（~30.69%），同时在阳光全向入射时，其发电量比透明聚酰亚胺高 12.71%。此外，对夔形玻璃盖片和封装光伏器件进行了各种空间评估实验（紫外线辐照、带电粒子辐照和热循环），显示出优异的耐用性和可靠性。这展示了夔形玻璃盖片在空间柔性太阳能电池阵列中的潜在应用，与传统的刚性电池板相比，它可以显著提高比功率（550 W/kg），并减少 40% 的发射重量。更重要的是，这项研究展示了基于地球同步轨道任务的夔形玻璃盖片设计方法，并将其组装成用于先进空间设施的大面积柔性太阳能电池阵列。这项创新实现了封装太阳能电池的高效发电和长寿命可靠服务，该方法也可以扩展到其他柔性光伏设备和轨道任务。

P-31**贮存环境湿度对 HTPB 推进剂力学性能的影响**

陈颖俊、刘向阳*、崔庆鑫

北京理工大学

以 HTPB 四组元推进剂为研究对象，通过吸湿试验及两种干燥试验，结合自然贮存发动机的整机加速试验现象，研究了环境水分对 HTPB 推进剂药柱力学性能的影响。结果表明：吸湿后，HTPB 四组元推进剂出现最大抗拉强度、最大延伸率及初始模量下降，经干燥试验后都得到一定程度的恢复，其中高温烘干法的干燥效率更高；在试验过程中，最大延伸率的变化速率最大，在干燥后出现超量恢复的现象，为水分敏感参量；水分对湿度的影响机制为基体增塑软化和界面性能劣化，自然贮存发动机药柱的力学性能受水分影响较大，高温烘干处理可以在一定程度上提升药柱的力学性能，所需干燥时间与药柱尺寸之间存在关联。

P-32**气体红外技术在高分子材料老化检测中的应用研究**

刘强、豆睿扬、黄镇东、张祎茜、黄玮、陈洪兵*

中国工程物理研究院核物理与化学研究所

高分子材料在辐射、温度、活性气氛及生化介质等作用下，容易化学老化且普遍存在释气现象。一方面，在不同服役环境中释气现象会引起基材损伤、老化传染扩散、光学性能劣化、真空度降低等次生相容性问题；但另一方面，释气又能作为材料及部组件健康状态监测诊断和服役历程及可靠性评估的有效评价指标。本研究搭建了气体红外分析平台，建立了样品制备和测试分析方法，形成了高分子材料多因素耦合老化实验分析与监测评估能力。针对三元乙丙橡胶、丁腈橡胶、聚苯醚泡沫、氟橡胶、全氟磺酸膜、硅橡胶等典型应用材料开展了辐射、热、气氛、辐射-应力及辐射-热耦合及贯序研究，基于气体红外分析研究了上述材料的典型气体的释气动力学规律，揭示了材料单因素、双因素贯序与耦合老化效应及分子机理；获得了三元乙丙橡胶、氟橡胶等在辐射-热耦合作用下含卤与含硫腐蚀性气氛产生转化机制，发现了氧气、泡孔对辐射-应力耦合条件下聚苯醚释放 CO_2 及烷烃行为的影响并探索了分子机理，利用气体检测分析研究了碳掺杂氮化硼和氮氧自由基荧光前体提高硅橡胶耐辐射老化策略的可行性和分子机理。定量分析了气体吸附和辐解对已产生气氛的转化影响，基于检测浓度标准差认为 N_2O 很合适作为 NEPE 推进剂老化的特征监测气氛，探索建立了三元乙丙橡胶、丁腈橡胶释气与其他表征技术以及材料结构-性能的关联关系。研究表明气体红外的检测限对于典型气体至少在 ppm 级（低至 10^{-8} mol/L），可检测到高分子材料辐射吸收剂量低至 5 Gy 以及几十摄氏度热老化时间数个小时的释气行为，能灵敏追踪监测高分子材料老化降解过程。

P-33

反应堆高分子屏蔽材料的老化研究

侯硕

中广核研究院

P-34

基于 3D 图网络的聚酯粉末涂料性能预测与基因工程优化

段嘉旭

工业产品环境适应性全国重点实验室

P-35

新型聚烯烃材料的抗老化性能探索

潘莉

天津大学

P-36

橡胶结构加速试验应用研究

何韧

中物院总体工程研究所

P-37

碳纤维增强复合材料的老化规律与服役寿命研究

吕忠泰¹、李玥环²、王剑飞²、赵猛²、黄云¹、江龙*¹

1. 先进高分子材料全国重点实验室(四川大学), 四川大学高分子研究所, 成都 610065

2. 内蒙动力机械研究所, 呼和浩特 010010

碳纤维增强聚合物树脂复合材料具有优异的比强度、比模量，常作为结构材料，在航空航天、交通运输等领域广泛应用。揭示碳纤维/聚合物树脂复合材料在多环境因素协同作用下的老化机制，建立材料服役

寿命预测模型，对提升材料可靠性、优化材料工程设计具有重要意义。针对该关键需求，本文以碳纤维增强酚醛树脂复合材料、碳纤维增强环氧树脂复合材料为研究对象，通过系统开展湿热、应力-湿热耦合等多因素作用下碳纤维增强复合材料的加速老化试验，研究揭示了碳纤维复合材料宏观性能和细观结构的退化规律；建立了基于 X 射线显微扫描（micro-CT）技术评估复合材料结构缺陷的方案，研究了老化过程中复合材料的缺陷演化规律，逐步揭示出复合材料化学结构、缺陷结构及性能随老化时间的退化规律，构建出材料服役寿命模型。基于此，设计并构建了具有不同结构及界面结合强度的碳纤维-树脂基体界面，研究了界面结构对碳纤维增强复合材料力学性能与耐老化性能的影响规律，发展了基于界面增强提升复合材料耐老化性能的技术。本研究为提升碳纤维增强聚合物树脂复合材料的服役安全性、预测其服役寿命提供了理论基础与科学依据。

P-38

Research on the Influence of Humidity on the DSC Test Results of Typical Gas Polyethylene Pipes and Countermeasures

林楠

中国特种设备检测研究院

墙报

P-P01

基于增强拉曼的微痕量材料老化产物组分分析

何璇*

中国工程物理研究院化工材料研究所

武器材料在长期贮存环境中，受温度、湿度、辐照、机械应力等多物理场长期耦合作用，发生不可逆性能退化，直接影响武器装备的可靠性和服役安全。美国核武器库存管理计划通过数十年系统性研究发现，对老化反应及产物的精准检测及解析，可定量关联材料性能老化程度，为建立武器服役寿命预测模型提供科学依据。

基于增强拉曼光谱无损、高灵敏、特征峰解析的特点，对模拟材料老化产物开展混合组分分析及鉴定，建立了新方法并获得认识。

P-P02

多尺度机器学习预测聚乙烯光氧老化寿命

孟祥泽、杨睿*

清华大学

聚乙烯作为年产量逾亿吨的通用塑料，其回收率却不足 10%，由此引发的环境污染问题日益严峻。在农膜、包装等户外应用场景中，光氧老化是导致材料失效的主导因素。传统研究主要聚焦于过氧化物生成与羰基链断裂过程，然而对痕量催化残余物的定量影响机制尚未明晰。本研究创新性地提出多尺度模拟与机器学习相耦合的研究方法：通过量子化学计算揭示催化残余物主导的紫外-可见光吸收特性及自由基生成机理；利用分子动力学模拟精准追踪自由基迁移与链断裂动态过程；结合反应网络简化策略与支持向量回归模型，成功构建了材料老化动力学预测体系。计算结果表明，催化残余物浓度与聚乙烯使用寿命呈现显著反比关系，建立的预测模型无需依赖经验参数即可实现材料寿命的准确评估。本文构建的多尺度模拟框架，为高性能聚合物分子设计及后处理工艺开发开辟了新的技术路径。研究结果不仅能够为延长塑料制品服役周期提供新思路，还可提升资源利用效率，对发展环境友好型高分子材料具有重要指导意义。

参考文献:

[1] Meng, X., Jin, G., & Yang, R. (2023). *Polymer Degradation and Stability*, 217, 110536.

[2] Christmann, J., Taviot-Guêho, C., Mazeau, E., Gardette, J.-L., Pichon, G., Bouchut, B., & Therias, S. (2024). *Polymer*, 313, 127692.

P-P03

基于自由基检测的可降解环氧树脂老化机理研究

唐国烁、李文郁、杨海军、杨睿*、益小苏

清华大学

本文针对一种可降解环氧树脂[1], 基于电子顺磁共振谱(electron paramagnetic resonance, 简称: EPR), 捕获了该种树脂老化过程中不同自由基, 探索了其老化自由基机理。在 EPR 测试中, 我们发现可见光即可引发自由基, 且不同老化状态的树脂产生自由基浓度不同。同时, 我们还开发了一种新的自由基捕获的方法, 能够对于高分子老化中产生短寿命自由基进行捕获, 同时能够观测自由基的精准结构。结合 EPR 结果, 对于该种环氧树脂的老化机理进行了研究。

P-P04

芳烃功能化环烯烃共聚物的抗老化研究

姜子豪、潘莉*

天津大学

环烯烃共聚物(Cyclic Olefin Copolymers, COC) 凭借其优异的光学透明性、低介电损耗及生物惰性, 已成为高端医疗包装和精密光学器件的核心材料。然而, 长期热氧老化引发的分子链断裂和表面黄变会导致医疗器件药物吸附超标及光学元件透光率衰减, 造成大量经济损失。传统小分子抗氧化剂存在迁移析出、加工时与 COC 相容性不足等固有缺陷。通过聚合单体分子设计, 在 COC 主链中引入共价键合的抗氧化功能基团, 可改善物理混体体系的相分离及小分子迁移问题, 同时保持材料本征透光性与加工流动性, 为开发新一代长效稳定化服役 COC 提供了解决方案。

P-P05

芳胺功能化聚丙烯及其抗老化性能研究

浦美玲、潘莉*

天津大学

由于具有优异的力学性能、卓越的耐化学腐蚀性能和较低的成本, 全同聚丙烯(iPP)被广泛地应用于汽车制造、建筑、食品包装等领域。然而, 由于 iPP 分子链中存在易在高温或辐照条件下离去的叔氢原子, 在使用过程中容易产生不稳定自由基, 进而引发材料的老化。因此, 聚丙烯产品中需要添加多种抗氧化剂以抑制或减缓其老化过程。为了克服传统抗氧化剂与聚丙烯本体相容性差、分散性不理想、易团聚和迁移等缺陷, 我们将具有可吸收紫外光并显示荧光性能的三苯胺、咪唑和苯并咪唑基团通过直接共聚的方法可控引入 iPP 侧链上, 并对其抗老化性能进行了系统的研究。

对三苯胺/咪唑/苯并咪唑基团功能化聚丙烯进行了热氧老化处理和紫外辐照老化试验, 并对老化后样品的分子量及分子量分布、热性能及拉伸性能进行了系统表征, 以探究三种芳胺基团的引入对 iPP 抗老化性能的影响。样品表面的颜色及裂纹发展情况表明, 芳胺基团的引入能有效抑制老化过程中聚丙烯材料表面裂纹的产生。DSC 和 GPC 数据表明, 老化处理后, PP 样品的 Tm 和分子量明显降低, 同时分子量分布变宽, 而芳胺基团功能化聚丙烯的 Tm 基本不变且分子量均保持在 90% 以上。这表明三苯胺/咪唑/二苯并咪唑基团的引入能够有效抑制老化, 使聚丙烯的热性能和链结构在老化过程中得到良好的保持。

研究表明, 具有紫外吸收和显示荧光性能的三苯胺或咪唑或二苯并咪巴唑基团的引入可以有效提升 iPP 的抗老化性能。这种通过直接共聚引入有效抗老化基团的方法为 iPP 的抗老化改性提供了新的思路和方法。

P-P06

载人浮空器老化性能评价

孙岩*

中国科学院长春应用化学研究所

载人浮空器作为一种轻于空气的无动力飞行器, 可以依靠氦气在空中维持长时间悬停。具有滞空时间长、能耗低、便于组装拆卸和运用灵活便捷等优点, 主要运用于军事侦察、天气预测、通信交流和载人观光等领域。本文主要针对载人浮空器囊体材料耐老化性能的研究, 将国产高性能囊体材料 5972 与进口材料进行紫外老化、耐黄变、湿热老化、自然环境老化等性能评价与比较, 以期发明出一种可以完全替代进口囊体材料的高性能复合材料, 解决国外封锁的难题, 促进低空经济的发展。紫外老化结果显示, 紫外老化对材料力学强度影响较小, 当实验时间为 2000h 时, 国产 5972 材料的拉伸强度降低了 8.21%; 实验时间延长至 4000h 时, 拉伸强度仅降低了 6.60%, 表明国产 5972 材料具有优秀的耐太阳辐射性能。耐黄变结果显示, 在整个测试周期内, 材料的色差值始终维持在较低水平 (<1), 表明国产 5972 材料具有优秀的耐黄变性能。湿热老化结果显示, 测试结果与老化前测试值基本相同, 材料的力学性能良好, 未出现分层、剥离、蠕变等失效形式, 表面形貌保持稳定, 充分验证了国产 5972 材料在湿热环境下具有卓越的耐久性能, 其抗老化特性满足长期服役要求。自然环境老化两年结果显示, 与进口样相比, 国产样力学强度变化较小, 说明国产 5972 材料有更强的耐老化性能。除此之外, 老化两年后进口 5972 材料样品电镜分析可以明显发现在材料表面已经出现了明显的缺陷、脱层损伤等现象。综上所述, 通过对比两种材料的耐老化性能变化, 发现国产 5972 囊体材料在各方面的性能接近甚至优于进口 5972 材料, 并且各项性能指标均已达到浮空器的使用要求, 因而该材料可用于替代目前载人浮空器所使用的进口材料, 降低了载人浮空器的制造成本, 能够很好地促进低空经济的发展, 解决了国外因禁运系留球囊体材料带来的一系列问题。

P-P07

赝形玻璃 (PMG) 盖片抗超高速粉尘撞击性能及可靠性验证

赵亮亮、王豪、吴宜勇*

哈尔滨工业大学

柔性太阳能电池阵在深空探测中的应用对封装材料抗空间粉尘撞击性能提出严苛要求。本研究针对新型赝形玻璃盖片 (PMG) 材料, 通过静电粉尘加速器模拟 1-80 km/s 空间粉尘撞击环境, 系统评估直径 50nm~1 μ m 大小的球形铁粉撞击 PMG 后其损伤形貌与光学性能变化规律。实验表明: PMG 材料因聚合物基体/无机填料的协同作用, 展现出独特的塑性变形特征, 在高速撞击下通过能量耗散机制有效抑制裂纹扩展, 撞击坑直径普遍低于传统刚性盖片。由微观形貌观察结果得知, 粉尘撞击后的 PMG 膜损伤区域未产生脆性材料典型的碎片剥落现象, 经 5000 次撞击后光学透过率未发现明显改变, 显著优于常规盖片材料。

P-P08

透明聚酰亚胺薄膜电子辐照效应及损伤机理研究

沈文浩、吴宜勇*

哈尔滨工业大学

透明聚酰亚胺薄膜 (CPI) 因其高透明性、优异力学性能与化学稳定性, 是宇航柔性太阳能电池阵盖片材料的理想候选。本文针对 TFMB-6FDA 型 CPI 薄膜, 通过 150 keV 及 1 MeV 电子辐照地面模拟试验, 系统研究其光学、力学及热学性能的辐照效应规律, 并基于 FT-IR、SEM、NMR 以及 EPR 等表征手段揭示

了损伤机理。结果表明,单一能量下辐照剂量增加会导致薄膜光学透过率下降,吸收边红移,360-400nm 范围内吸收增强,FT-IR 结果中 C-F 峰减弱, C=O 增强, EPR 检测到自由基信号($g \approx 2.003$), 原因为电子辐照导致 CTC 效应增强与共轭/缺陷态增强造成的材料带隙减小; 薄膜力学性能方面抗拉强度升高, 断裂伸长率降低, 弹性模量升高; 此外薄膜的玻璃化转变温度(T_g)持续升高, 残余质量升高, 说明该薄膜在电子辐照下生成自由基引发链间交联, 致使交联网络致密化, 一方面提高材料强度、模量, 一方面提升热稳定性与 T_g 。

P-P09

聚全氟乙丙烯蠕变机理及寿命预测研究

朱嘉伟、牛艳华*、卓文越

四川大学

本研究针对聚全氟乙丙烯 (FEP) 在航空航天领域作为密封材料时因长期服役中易发生蠕变失效的问题, 设计多因素耦合试验, 深入研究了 FEP 在多因素耦合条件下的化学和物理老化规律, 揭示了其蠕变、压痕等性能退化机制, 进一步改进现有寿命预测模型, 实现了对 FEP 材料服役寿命的可靠预测。通过设计多因素耦合试验, 研究了 FEP 在 25~190 °C 和 0.07~20 MPa 条件下的蠕变机理及压痕深度变化规律。结果表明, FEP 的蠕变行为表现出明显的温度与应力依赖性, 蠕变应变随着温度、应力的升高而增大, 高温 (>100 °C) 或高应力 (≥ 5 MPa) 会显著加速蠕变失效。通过 FTIR、DSC、XRD 等手段表征其蠕变过程中的化学、物理变化, FEP 的化学结构未发生改变, 主要以物理老化为主, 部分晶区在应力诱导下解聚并重排向 (200) 晶面转变; 浸泡介质后的样品表面有明显的腐蚀现象和微裂纹, 导致其抗蠕变性能下降。基于 Eyring 方程, 以典型实验条件下 FEP 的非线性蠕变数据为依据, 通过构建合适的平移因子, 建立了温度-应力双因素耦合的蠕变主曲线及寿命预测模型, 并通过 MATLAB 程序实现了便捷计算。预测结果与实际长期贮存数据吻合良好, 验证了模型的准确性。本研究为 FEP 材料在复杂工况下的长期服役性能评估提供了理论依据和方法支持。

P-P10

PET 光伏背板在干热气候下的降解途径: 来自户外和加速老化的启示

陈艺凡、吕亚栋*

四川大学高分子科学与工程学院

尽管在干热气候下广泛部署光伏发电, 但在这种极端条件下对背板降解机制的理解仍然有限。本研究系统研究了单层聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 背板在干热气候 (新疆吐鲁番) 下的长期降解, 并将这些结果与潮湿气候 (四川成都) 和标准加速老化条件 (氙弧和湿热) 下的降解模式进行了比较。在干热气候下, PET 背板主要经历光降解, 其特征是甲基单元优先氧化和显著的链断裂, 同时酯键耗尽。这导致了严重的机械劣化, 450 天后抗拉强度下降 60%, 黄度指数增加至 7.1 ± 0.2 。通过 FTIR 结合二维相关光谱 (2D-COS) 的对比分析, 发现不同老化条件下的降解途径不同: 氙弧老化主要诱导显著加速羧酸的形成; 湿热老化以水解机制为主; 成都户外老化表现为光解和水解的综合效应。我们的研究表明, 与其他条件相比, 干热环境以其独特的因素组合, 在 PET PV 背板中产生实质性不同的降解速率和失效机制。该研究为制定气候加速试验方案提供了理论基础, 有助于对于干旱地区光伏组件进行更准确的耐久性评估和使用寿命预测。

P-P11

环氧胶粘剂的加速老化与本构拟合

彭茂林、吕亚栋*

四川大学

胶粘剂具有优秀的粘接性能, 与传统的焊接, 铆接工艺相比, 其避免了应力集中的问题, 同时具有轻

量化的特点,被广泛应用于航空航天、电子封装、建筑、汽车制造等行业。但在不同环境因素的影响下(高温、紫外辐照、湿气,温度变化),其性能变化与老化机理是评估其在工程应用下可靠性的关键问题,本文通过设置多种加速老化试验条件(光氧、高温、湿热、温度循环、温度冲击),探究了一款常用于电子封装领域的环氧胶粘剂对不同老化条件的敏感性差异,研究了其在不同老化条件下的性能变化,老化机理,并选用多种本构模型对胶粘剂老化前后的力学性能拟合,为其在有限元仿真及老化性能预测方面的应用奠定基础。

P-P12

铜电极材料对光伏封装 EVA 胶膜紫外老化降解的协同加速机制研究

赵桐*

四川大学

光伏组件封装胶膜在湿热/紫外环境下易老化,诱发金属电极腐蚀。本研究构建 EVA 胶膜-铜电极热压模型体系,系统探究了紫外辐照下二者的协同降解效应。结果表明,紫外辐照促使铜离子迁移并以络合物形式稳定存在于 EVA 内部,导致胶膜呈现显著绿色变色,老化 2000 小时后铜元素浓度梯度达 3.5 wt%。除自身光氧降解外,铜离子引发的高级氧化反应显著加剧了 EVA 分子主链氧化,致其力学性能严重劣化,拉伸强度下降 94.02%。这项研究揭示了铜电极通过催化氧化-离子络合双重路径加速 EVA 老化的机制,为光伏封装材料的耐久性设计提供了理论依据。

P-P13

有机材料释气相容性研究

沈凯军*

四川大学高分子科学与工程学院

用离子色谱仪对二十一种有机材料的氯元素以及硫元素含量进行了测试,其次对环氧树脂 E51、TXH332 环氧胶粘剂、氟聚氨酯磁漆、聚氨酯、环氧胶粘剂 DG-3S 以及 F05 透明环氧胶六种材料进行了热氧老化释气行为研究,在热失重分析以及质量损失研究的基础上,选用 150°C 为老化温度,将材料密封于高硼硅玻璃管中,内部气氛选用干燥空气以及氮气氧气混合气体(比例为 79:21),进行为期 5 天的热氧加速老化,同时对上述六种材料与铜片组合进行了热氧老化释气相容性研究,研究铜片在各材料组合下的腐蚀情况。老化完成后采用气体红外对各材料释放的气体进行分析表征,研究释气产物有无腐蚀性气体如氯化氢、羰基硫、氨气等,并采用 EDS、XPS 对热氧老化前后的有机材料本体以及铜片进行表面元素分析。

离子色谱结果显示,大多数材料无氯元素以及硫元素或者含量低于 25ppm,共有六种材料(即释气行为研究所选六种材料)含有氯元素以及硫元素,其中氟聚氨酯磁漆氯元素含量最高,为 57629ppm, F05 透明环氧胶硫元素含量最高,为 42789ppm。气体红外结果表明, TXH332 环氧胶粘剂、氟聚氨酯磁漆、聚氨酯以及 F05 透明环氧胶四种材料在热氧老化过程中产生了羰基硫气体,环氧树脂 E51、TXH332 环氧胶粘剂、氟聚氨酯磁漆、聚氨酯以及环氧胶粘剂 DG-3S 五种材料产生了氨气,这两种气体均是腐蚀性气体,对电极材料会产生腐蚀,其中环氧胶粘剂 DG-3S 的氨气释放最为严重,由于氯化氢气体的红外特征峰与小分子烷烃重合,无法准确判断老化释气产物有无氯化氢气体。相容性试验结果表明,各组合中的铜片均产生了一定的颜色变化。此外,在氟聚氨酯磁漆与铜片的组合老化试验中,铜片表面产生了大量形状不规则的固体颗粒,EDS 结果表明该固体颗粒 Cl 元素富集,初步推测为有机材料 Cl 元素的释放对铜片产生的腐蚀,因此判断在其老化进程中有含 Cl 气体的释放,从而导致铜片的腐蚀,同时与氯元素含量检测结果相对应。环氧胶粘剂 DG-3S 以及 F05 透明环氧胶硫元素分布均较高,可以初步判断为氨气以及含 S 气体对铜片产生了腐蚀,与硫元素含量检测结果相对应。

P-P14

核电主变压器控制回路动力电缆熔断失效分析

龚焱*、刘雨林、帅明坤
复旦大学

随着核能在全球能源结构中的地位不断提高，核电站关键设备对安全性的要求日益严苛。作为核电站电力传输和信号控制的重要组成部分，电缆对反应堆的安全控制与应急响应能力有着直接影响。本文选取某核电厂主变压器控制回路中某发生熔断失效的动力电缆为研究对象。采用红外光谱分析、热重分析、硬度测试、拉伸性能测试、X 射线衍射、扫描电镜及能谱分析等多种表征手段，对失效电缆和完整电缆的理化性能和宏微观形貌进行对比，探讨电缆老化及熔断失效的原因与机理。结果表明，该失效电缆在安装过程中存在机械切割损伤和强制安装等问题，导致电缆护套层破损，铜芯导体局部截面积减小，且受到残余应力作用。从而在高温、高湿、盐雾环境、电流载荷与 PVC 析出物的多重作用下，引发电化学腐蚀及导体发热的恶性循环，最终导致铜芯烧熔断裂。论文对电缆失效的具体过程和机理进行了深入探讨，有助于为核电站电缆可靠性提供支撑，也为未来在役电缆状态监测与寿命评估提供重要参考。

P-P15

干湿气候整车户外自然暴晒仿真研究

赵雪茹、陈心欣、张晓东*、揭敢新、王俊

中国电器科学研究院股份有限公司 工业产品环境适应性全国重点实验室 广东省新能源产品及材料环境适应性技术重点实验室

随着汽车出口市场的快速发展，汽车面临的环境适应性问题日益突出。而传统户外暴晒试验周期长、成本高，现有实验室人工加速试验方法仍不完善，难以全面反映新市场老化问题。针对汽车环境适应性快速评估需求，本研究采用仿真技术，通过合理简化整车物理模型并优化多层非均质部件的理化参数，构建了与实际情况更为相近的整车热仿真模型，通过与户外实证测试结果及文件结果对比分析发现，在我国琼海湿热气候、吐鲁番干热气候条件、中东干热条件下，汽车不同部件温度及辐照仿真结果与实测值的最大差异在 5% 以内，验证了该模型在不同环境中的适用性。本文所提出的整车仿真高精度模型建立方法，可根据车型结构特点和材料实测性能进行调整，降低全球新市场试错成本，加速设计阶段选材工作的快速迭代验证以及新材料开发应用。

仅发表论文

P-PO01

多功能通孔结构柔性泡沫夹层结构传感器及服役稳定性研究

张俊哲²，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，空间先进结构与智能飞行器教育部重点实验室
2. 四川大学高分子科学与工程学院，先进高分子材料全国重点实验室

在航天领域中，柔性传感器可赋予空间机器人触觉感知和行为判断的能力。然而，空间环境中的复杂受力要求其具备高灵敏、高服役稳定和多功能传感。此外，多数传感器仅能单一检测应力或拉伸应变，难以同步实现感知与行为判断。因此，开发兼具高界面韧性和应力-拉伸应变多功能传感的柔性传感器，对其在空间机械手中的广泛应用至关重要。本研究以热塑性聚氨酯 (TPU) 为基体，多壁碳纳米管 (MWCNTs) 和离子液体 (IL) 为介电填料，制备了超薄型通孔结构“无界面”传感器。泡孔结构和 IL 的引入使传感器具备优异的应力传感性能 (0.1-800 kPa, S=2 nF/kPa)，同时层间机械适配使其具有宽拉伸应变传感范围 (0-100%) 和高灵敏度 (GF=4.67)。该传感器展现出超高界面韧性，在压缩、剪切和弯曲等多重应力下均表现出优异的服役稳定性。集成于机械手指的传感器阵列可同步精确监测机器人运动状态 (拉伸应变传感) 和抓取物体形状 (压力传感)，为空间机械手应用提供了可靠的多功能传感解决方案。

P-PO02**高可靠超宽温域适应性仿生壁虎黏附材料**成欢¹, 冯家宝¹, 吕亚栋², 李光宪², 蒲伟¹, 孔米秋^{1,2*}

1. 四川大学空天科学与工程学院, 空间先进结构与智能飞行器教育部重点实验室
2. 四川大学高分子科学与工程学院, 先进高分子材料全国重点实验室

受壁虎启发的仿生黏附材料传统上以聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 为基体, 该材料因其高黏附强度、无损脱附且无残留污染、对多种环境及目标表面具有良好的适应性、以及无需外部场源驱动等优点, 在真空和微重力条件下对非合作目标的捕获与转移等操作中展现出独特优势。然而, 在低于其结晶温度 ($-45\text{ }^{\circ}\text{C}$) 的超低温环境中, PDMS 会发生结晶, 导致黏附性能显著下降甚至完全丧失。本研究通过 PDMS 侧基种类调控, 制备了聚甲基苯基乙烯基硅氧烷 (PMPVS), 使其结晶温度达到 $-93.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。以 PMPVS 为基体的仿生壁虎黏附材料在 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的黏附强度分别可达到 25.9 kPa 和 36.7 kPa 。而基于 PDMS 的传统仿生壁虎黏附材料在 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的黏附强度仅为 0.7 kPa 。循环黏附测试进一步验证了材料的低温耐久性: 在 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下经历 100 次黏附循环后, 其黏附强度仍能达到 29.4 kPa 。将其集成于机械抓手, 能够在宽温域范围内对不规则形状、易碎及重负载物体的稳定抓取。相较于未负载黏附材料的机械抓手, 集成 PMPVS 基黏附材料的抓手所需抓取力降低了 90%。