

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

**E11-高分子材料老化与服役寿命
研究**

**E11-Aging and Lifetime Prediction
of Polymer Materials**

Organized by

Chinese Materials Research Society

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

E11-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

最终交流类型：仅发表论文

E11-PO01

不同壳体材质头盔耐候性评估

李景菲*、沈振、葛凌慧、冯晓雷

浙江省产品质量安全科学研究院

为评估不同壳体材质电动自行车头盔的耐候性能，利用 3 种人工加速老化试验[紫外、65℃热氧、双 85（温度 85℃、相对湿度 85%）湿热]及大气暴露和室内保存等方式对定制的 4 种不同材质头盔样品进行处理，并对不同老化阶段头盔的安全防护性能进行测试，采用扫描电子显微镜、热重分析、动态力学分析等手段对样品的微观形貌、热性能进行分析。结果表明，经各加速老化处理后头盔的吸收碰撞能量加速度峰值均小于 150g ($g=9.80665\text{ m/s}^2$)，仍能在实际使用中发挥安全防护作用，这主要得益于头盔缓冲层的存在。依据老化后样品形貌变化、破裂情况及刚度性能，评估壳体材质显示，聚碳酸酯/丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料合金料样品性能最优；评估老化方式显示紫外老化影响最小，65℃热氧老化次之，双 85 湿热老化后头盔变形严重且破裂情况增多，不符合实际的使用场景。经双 85 湿热老化后，样品微观形貌显示其断面微孔结构增加，而热稳定性变化不大。头盔壳体材质直接影响碰撞试验后样品是否破裂，头盔吸收碰撞能量加速度峰值受其缓冲层影响较大，刚度性能可以作为头盔壳体材质性能有效评估指标。

最终交流类型：口头报告

HTPB 推进剂老化特性及参数关联性研究

陈颖俊、刘向阳*、李沐晨、张广龙、陈春堃

北京理工大学

对四组元配方的 HTPB 推进剂开展了高温加速老化试验，获取老化性能表征参数，比较其与三组元配方在老化特性上的异同，最后探索了表征参数之间的关联性。试验结果表明：（1）该配方推进剂的老化分为两个阶段。老化前期，其宏观力学性能参数呈现上升趋势，物理性能参数呈现下降趋势；老化中后期，其宏观力学性能参数呈现下降趋势，物理性能参数呈现上升趋势。（2）该配方推进剂的老化特性与三组元配方有较大的一致性，意味着 RDX 对推进剂的老化无明显影响。（3）该推进剂的老化表征参量中，某一宏观力学性能参数和物理性能参数呈现出较为显著的相关性。

最终交流类型：口头报告

聚乙烯醇水凝胶老化机理研究

陈春堃、刘向阳*、王江涛、郭浩然、陈颖俊、王宁飞

北京理工大学

PVA 水凝胶具备优异的力学性能，有望作为结构件在机械、建筑、组织工程等应用领域获得应用。然而，PVA 水凝胶的力学性能在温度等环境因素作用下会发生变化，对其长期使用造成影响。为提升和评估 PVA 水凝胶的使用寿命，有必要开展其老化机理研究。本研究开展了基于物理交联 PVA 水凝胶在 60℃老化温度下 120 天的高温加速老化试验以及宏观力学、微观形貌、微观分析等性能测试，获得了 PVA 水凝胶在老化过程中的性能变化规律。结果表明，PVA 水凝胶的老化过程可分为自由水减少、结合水减少和结合水耗尽三个阶段，对应的力学特征主要是体积显著收缩、最大延伸率下降和发生了“韧-脆”转变。PVA 水凝胶的微观老化机制主要由分子链间间距、PVA 分子间氢键和水的增塑作用三种机制来主导控制的。决定 PVA 水凝胶结构件使用寿命的主导因素是结合水流失，表征 PVA 水凝胶力学性能变化的老化表征参量为最大延伸率。本研究的结果可为 PVA 水凝胶结构件的使用寿命提升和评估提供参考。

最终交流类型：邀请报告

聚氨酯材料的吸湿现象、机制及辐照效应研究

陈可平*、王义霞、宋珈瑶

中国工程物理研究院化工材料研究所

聚氨酯材料因其独特的微相分离结构使其具有优异的力学、物理以及化学性能，并且易于加工，在航空航天、核技术领域获得广泛的应用。由于核工业应用领域往往涉及沿海高湿、 γ 射线等复杂甚至极端的应用环境，而聚氨酯材料的强极性分子结构导致其具有显著的吸湿现象，在高湿、 γ 射线这些复杂环境下聚氨酯材料分子链及网络结构等微观结构会发生变化，进而引起宏观力学性能的变化，严重时会影响材料使用寿命和系统的安全可靠性。因此，研究聚氨酯材料在高湿、辐射等环境下的老化行为，揭示其微观结构和宏观性能的老化规律具有很重要的意义。

本文探讨了聚氨酯材料吸湿动力学的影响因素，以及吸湿过程中微相分离结构的演化规律，并从微相分离结构的角度解释了吸湿导致聚氨酯材料力学性能下降的微观机制。进一步，采用宽频介电谱和小角散射技术分析了聚氨酯材料在 γ 射线作用下分子链松弛行为和微相分离结构的演化规律，阐明了力学性能劣化的内在原因：不仅仅与软段相的辐射损伤有关，更重要的是由于硬段相微区发生了明显的瓦解所致。 γ 射线导致聚醚型聚氨酯材料软段相的协同运动能力加强，即软段相以辐射裂解为主，但聚酯型聚氨酯材料软段相的协同运动受限程度增加，发生了以辐射交联为主的辐射损伤行为。同时，两种类型的聚氨酯材料的硬段相微区都发生了明显的辐射裂解行为，并首次利用原位拉伸/小角散射技术观察到了受力过程中硬段相微区的演化规律，进而解释了宏观力学性能下降的原因。这为高湿、电离辐射环境下高性能聚氨酯材料的设计和开发提供了理论指导，为聚氨酯材料在实际工程中的应用提供了理论支撑。

最终交流类型：口头报告

壳聚糖基大分子多功能防老剂的制备及其在丁苯橡胶中的应用研究

谢晓江^{1,2}、何经纬^{1,2}、刘芳^{1,2}

1. 华南理工大学材料科学与工程学院

2. 华南理工大学广东省高性能与功能高分子材料重点实验室

为了克服传统小分子橡胶防老剂易迁移、易挥发、不耐溶剂抽提、功能单一及高度依赖不可再生石化资源的缺点，本研究以天然高分子壳聚糖（COS）为基体，通过 COS 结构中 C6 位的活性-OH 基和 C2 位的活性 NH_2 基的高反应性，先在保护- NH_2 基的条件下，利用 10-十一碳烯酰氯（UC）对 COS 结构中 C6 位的活性-OH 基进行化学修饰，将含端 $\text{C}=\text{C}$ 双键的长烷基链引入其结构中，制备得到含端 $\text{C}=\text{C}$ 双键的长烷基链壳聚糖衍生物 COS-UC，再利用巯基丙酸（MPA）与小分子防老剂 N-（4-苯胺苯基）马来酰亚胺（MC）的“巯基-烯”点击反应，制备的含羧基、硫醚结构和芳香仲胺结构的防老化功能性小分子化合物 MC-MPA 与 COS 进行酰胺化反应，将防老化功能性小分子化合物 MC-MPA 引入壳聚糖结构中，最后制得一种集端 $\text{C}=\text{C}$ 双键的长烷基链、硫醚结构和芳香仲胺结构于一体的壳聚糖基大分子多功能防老剂 COS-UC-MC-MPA，并系统研究了 COS-UC-MC-MPA 对 SBR/ SiO_2 复合材料硫化性能、填料分散、力学性能和抗热氧老化性能的影响。FTIR、XPS 和元素分析的结果表明，COS-UC-MC-MPA 的结构与预期设计的结构相符，UC 在 COS 中的取代度为 0.52，MC-MPA 在 COS-UC 中的取代度为 0.91。硫化性能结果表明，COS-UC-MC-MPA 对 SBR/ SiO_2 复合材料的硫化有明显的促进作用，添加 COS-UC-MC-MPA 的 SBR/ SiO_2 混炼胶正硫化时间（ T_{c90} ）为 12.21 min，虽略慢于添加工业防老剂 4020 的 SBR/ SiO_2 混炼胶的 11.57 min，但明显快于添加相应小分子防老剂 MC-MPA 的 SBR/ SiO_2 混炼胶的 14.65 min。SEM 的结果表明，COS-UC-MC-MPA 能促进 SiO_2 在 SBR 基体中的均匀分散，与添加工业防老剂 4020 和相应小分子防老剂 MC-MPA 的 SBR/ SiO_2 复合材料相比， SiO_2 聚集体的数量明显进一步减少；力学性能结果表明，COS-UC-MC-MPA 对 SBR/ SiO_2 复合材料具有一定的增强作用，与添加工业防老剂 4020 和相应小分子防老剂 MC-MPA 的 SBR/ SiO_2 复合材料相比，添加 COS-UC-MC-MPA 的 SBR/ SiO_2 复合材料拉伸强度分别由 20.80 ± 0.34 MPa 和 20.31 ± 0.33 MPa 提高到 21.65 ± 0.28 MPa；加速热氧老化结果表

明, COS-UC-MC-MPA 对 SBR/SiO₂ 复合材料的抗热氧老化性能优异, 经 100 °C 热氧老化 5 天后, 添加 COS-UC-MC-MPA 的 SBR/SiO₂ 复合材料拉伸强度保持率达 68.5%、老化系数为 0.49, 而添加工业防老剂 4020 和相应小分子防老剂 MC-MPA 的 SBR/SiO₂ 复合材料的拉伸强度保持率分别只有 53.2%和 62.2%、老化系数分别也只有 0.32 和 0.40。热氧动力学结果表明, COS-UC-MC-MPA 能显著提高 SBR/SiO₂ 复合材料的热氧稳定性, 添加 COS-UC-MC-MPA 的 SBR/SiO₂ 复合材料热氧降解表观活化能为 416.4 kJ/mol, 明显高于添加工业防老剂 4020 和相应小分子防老剂 MC-MPA 的 SBR/SiO₂ 复合材料的 387.3 kJ/mol 和 402.4 kJ/mol。采用 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (DPPH) 对防老剂 COS-UC-MC-MPA 的自由基清除能力进行了评估, 结果表明, COS-UC-MC-MPA 与 DPPH 的 DMSO 溶液接触 1min 后, COS-UC-MC-MPA 对 DPPH 自由基的清除率高达 76.5%, 显示出优异的自由基清除能力。耐抽提性能结果表明, COS-UC-MC-MPA 显示出优异的耐甲醇抽提性能, 在抽提 5 天后, 添加 COS-UC-MC-MPA 的 SBR/SiO₂ 复合材料中 COS-UC-MC-MPA 的质量损失率仅为 23.1%, 显著低于 SBR/SiO₂ 复合材料中添加的工业防老剂 4020 的质量损失率 76.8%和添加的相应小分子防老剂 MC-MPA 的质量损失率 64.2%。

最终交流类型: 口头报告

三元乙丙橡胶复合材料 γ 辐射-热耦合老化的实验和理论研究

刘强*、豆睿杨、张祎茜、黄玮、孟宪福、陈洪兵

中国工程物理研究院核物理与化学研究所

三元乙丙橡胶复合材料 (EPDM) 在航天、核电以及国防特种装备中广泛使用, 其通常面临辐射-热耦合服役环境。工程实践表明辐射-热耦合导致的 EPDM 损伤退化行为对装备的服役寿命、可靠性和相容性至关重要, 但相关的系统研究十分匮乏, 且缺乏原位无损的快速表征监测技术。EPDM 的损伤机制和行为规律认识不深且难以调控。本研究开展了 EPDM 在 30 °C ~ 90 °C 温度范围和 0 ~ 200 kGy 的 γ 辐射吸收剂量耦合的 N₂/O₂ 混合气氛条件下的老化损伤行为和分子机理研究, 建立了新的灵敏监测方法。辐射-热耦合导致的退火效应和化学重结晶重塑了 EPDM 的半晶结构, 引起了竞争性的填料迁移、重构和损失。研究发现交联反应相比断链占据主导地位, 但材料的表面氧化和损伤不显著。原位非侵入气体红外灵敏地识别和定量分析了多种特征气体产物, 它们的生成动力学具有明显的温度和剂量依赖性。其中, 辐射对羰基硫和二硫化碳的产生具有决定性作用, 但温度对两种气体的转化热力学和动力学行为具有显著的调控作用。气体的定性和定量分析与气相色谱以及气相色谱-质谱分析结果自洽。损伤导致的半晶结构、交联网络和填料网络的变化对力学性能具有显著影响, 但对材料的阻隔性和疏水性影响甚微。50 °C 时 EPDM 的机械性能出现了反温度效应, 反常的性能复原与半晶结构、交联网络和填料网络损伤变化相互制衡有关。进一步通过反应分子动力学 (ReaxFF) 模拟在原子尺度揭示了 EPDM 的复杂降解机理。

最终交流类型: 仅发表论文

E11-PO02

不同因素耦合对密封橡胶老化特性的影响

薛梅芳¹、吕天一*¹、陶友季¹、赵雪茹¹、彭敦诚²

1. 中国电器科学研究院股份有限公司

2. 威凯检测技术有限公司

密封橡胶在实际服役场景中受外界多种因素耦合作用而发生劣化失效, 其中应力载荷、温度、介质等对其老化特性有重要影响。为了研究某密封橡胶材料在工况环境下的老化规律和特性, 本研究开展了静载荷/温度/介质等多因素耦合的加速老化试验。本文设计了三种老化条件 (90 °C 热空气, 90 °C 热空气压缩, 90 °C 热油压缩) 模拟实际服役环境开展实验室加速研究。通过质量, 硬度, 压缩永久形变率等橡胶老化前后宏观性能变化, 结合其化学结构和微观形貌变化进行了老化特性研究。结果显示热油压缩老化条件下橡胶质量随时间变大, 硬度变小, 压缩永久形变变大, 热稳定性变差, 化学结构变化较小; 热空气压缩条件下, 压缩永久形变变大, 其他物化性能变化较小; 而热空气条件下, 硬度变, 其他变化较小。扫描电镜

结果显示,两种压缩条件下橡胶表面都出现颗粒状物质和条状纹理。密封橡胶在不同服役环境下发生的主要老化反应并不一致,在热空气下橡胶性能退化与热氧老化等化学老化作用有关,而在油介质和压缩状态下橡胶性能劣化与物理老化作用更相关。

最终交流类型:口头报告

热带海洋环境下海上风电叶片前缘雨蚀寿命预测模型研究

吕天一*、薛梅芳、时宇、陶友季

中国电器科学研究院股份有限公司

在我国东南沿海服役的海上风机叶片受强降雨、强辐照等环境因素的长期影响,导致叶片前缘涂层寿命短于设计预期。为了研究热带海洋环境风电叶片前缘涂层雨蚀速率,本文提出了一种基于 S-N 疲劳理论的叶片前缘涂层雨蚀累积损伤预测方法。首先统计分析风电场小时降雨数据,得到不同降雨强度的小时数分布及年均累积时间数据;其次,建立不同降雨强度下雨滴粒径与降雨强度之间的关联关系、降雨雨滴降落速度和雨滴粒径的关系;再利用前缘涂层开展耐雨蚀试验,获取涂层抗冲击性能参数;然后构建物体在雨场中的冲击频率模型与雨滴动能冲击模型,并基于 S-N 疲劳理论,通过幂函数拟合的方式得到损伤累积模型,建立单位面积累积冲击次数与冲击速度、雨滴粒径之间的关联关系;最后,基于 palmgren-miner rule 线性疲劳累积损伤准则,结合叶片服役环境数据与以上模型,预测实际环境中降雨强度、冲击速度皆非定值下的叶片前缘涂层疲劳损伤寿命。针对阳江青州 10MW 风机叶片前缘寿命开展寿命预测,结果表明在青州年 2200mm 降雨,年均特大暴雨 8.8 小时、大暴雨 35 小时,暴雨 130 小时的环境下,叶片前缘聚氨酯涂层寿命在 1.5 年左右,与实际叶片前缘损伤情况相符。

最终交流类型:口头报告

透明聚酰亚胺的辐照损伤机理研究

琚丹丹¹、沈文浩¹、符湘¹、孙承月¹、王豪¹、吴宜勇*¹、王猛²、杨洪²

1. 哈尔滨工业大学

2. 东南大学

透明聚酰亚胺薄膜(CPI)具有优异的透明性、良好的机械性能和化学稳定性等特点,有望作为宇航用新型柔性太阳能电池阵的盖片材料,因此研究空间环境对 CPI 膜的影响十分必要。本研究利用地面模拟设备,针对 TFMB-6FDA 透明聚酰亚胺薄膜开展了 150 keV 电子、1 MeV 电子与 150 keV 质子辐照试验,总结了 CPI 膜的光学、力学、热学性能变化规律,采用 DMA、正电子湮灭、核磁、GPC 等表征方法对 CPI 膜的辐照损伤机理进行了探讨。

试验结果表明,CPI 膜的透过率随辐照注量的增加而降低。在 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 注量条件下,150 keV 电子辐照使 CPI 膜在 400 nm 处的透过率从 89.82% 降至 4.53%,150 keV 质子辐照使 CPI 膜在 410 nm 处的透过率降至 0.1489%。通过自由基表征证明,电子辐照后产生氟自由基,降低其光学性能;质子辐照后产生氟自由基及热解碳自由基,共同降低了 CPI 的光学性能。另外,CPI 膜的力学性能也发生了明显变化。电子辐照下抗拉强度随辐照注量的增加而升高,在能量为 1 MeV、注量为 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 电子辐照后,抗拉强度由 55.8 MPa 上升至 69.32 MPa;而在 150 keV 质子辐照下,CPI 膜的抗拉强度与断裂伸长率均随注量的增加而下降,在注量为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 时,抗拉强度由 55.8 MPa 下降至 42.71 MPa,断裂伸长率由初始的 6.15% 降至 2.97%。DMA 结果表明在不同能量电子辐照后,CPI 薄膜玻璃化温度呈现出先降后升的趋势,由 158.6℃ 降至注量 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 的 143.7℃,之后随注量升高至 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 时的 176.2℃,表明辐照后材料内部呈现先降解后交联的过程。通过正电子湮灭对自由体积及缺陷的测试,进一步验证了玻璃化温度的变化趋势。红外测试结果表明在电子辐照后,透明聚酰亚胺薄膜分子结构变化不大,但其材料表面发生了断键,XPS 结果表明 C=O 键的断裂产生了 C-O 键并且在低能电子辐照时,C-F 键大量断裂,其 F 元素含量降低至 0.94%。分子量测试结果表明随着吸收剂量的增加,电子辐照后聚酰亚胺的分子量整体呈下降趋势,并且分布逐渐宽化,进一步证明了材料辐照后以降解为主。

最终交流类型：仅发表论文

E11-PO04

微观结构对环氧树脂基机织复合材料吸湿后弯曲性能研究

王猛*、任远
中国矿业大学

为了研究环氧树脂基机织复合材料微观结构对材料吸湿后弯曲力学性能的影响,采用实验方法对比平纹和斜纹机织复合材料在经历相同吸湿老化环境后的剩余力学性能。从弯曲实验结果中可以发现,吸湿对平纹和斜纹机织复合材料弯曲模量的影响相近。吸湿导致平纹机织复合材料的弯曲强度出现大幅下降,但是对斜纹机织复合材料的弯曲强度影响较小。通过超景深扫描试样失效断口,可以发现平纹机织复合材料内部纤维束具有更大的卷曲率,并且试样在吸湿后以及弯曲荷载作用下,纤维束和基体之间产生受压分层,成为失效起始位置。因此,纤维束的大卷曲率以及由于吸湿引起的基体和界面性能降低导致平纹机织复合材料吸湿后弯曲强度的大幅降低,并使得其弯曲强度离散性增加。

最终交流类型：墙报

E11-P01

芳胺功能化 4-甲基-1-戊烯共聚物抗老化性能研究

浦美玲、王亚斐、潘莉*
天津大学

聚 4-甲基-1-戊烯 (Poly 4-methyl-1-pentene, PMP) 是一种新型热塑性材料, 具有优异的耐化学药品性、良好的耐热性等优势^[1], 被广泛地应用于高频通讯、医 用器械、食品包装等领域^[2]。然而, PMP 主链上保留较多叔氢, 在热加工和受到辐照时易产生不稳定自由基, 诱发光及热氧老化, 影响材料的使用寿命^[3]。因此, 对 PMP 进行功能化改性, 提升 PMP 的使用性能具有重要研究价值。

为了改善 PMP 的抗光和热氧老化性能, 以二甲基化吡啶胺盐/[Ph₃C][B(C₆F₅)₄]体系分别催化 4M1P 与 4-(7-辛烯基)二苯基苯胺和 8-吡啶-1-辛烯进行共聚。共聚物结构分析表明, 芳胺单体能够成功插入到 PMP 的分子链中, 插入率保持在较低水平 (< 5 mol%)。拉伸测试结果表明, 引入芳胺单体后, 共聚物的韧性得到明显改善, 最高可达 241.6 ± 0.5%, 较 PMP 均聚物提升 120 倍。此外, 所有的共聚物具有高透光率(> 88%, 在 800 nm 处)。加速老化测试结果表明, 随着共聚物中芳胺单体插入比例的上升, CO₂ 的释放量及释放速率降低。当共聚物中插入 2.6mol%吡啶基 α -辛烯时, CO₂ 在第 75 min 的释放量最低为 0.32 a.u., 较 PMP 均聚物降低了 28%; 在 50-75 min 内, 释放速率最低为 2.39×10^{-3} , 较 PMP 均聚物降低了 51.6%。当共聚物中插入 2.8mol%三苯胺基 α -辛烯时, CO₂ 在第 75 min 的释放量最低为 0.43 a.u., 较 PMP 均聚物降低了 20%; 在 50-75 min 内, 释放速率最低为 4.25×10^{-3} , 较 PMP 均聚物降低了 10.5%。具有相近插入率的情况下, 含有吡啶基团的共聚物体现更优的抗老化性能。结果表明引入三苯胺/吡啶基团能够有效改善 PMP 的抗老化性能。

本工作通过 4M1P 与不同的功能单体共聚, 制备了优异抗老化性能的新型 PMP 共聚物, 为改进 PMP 性能和合成新型功能性 PMP 材料供了一种通用而简单的方法。

最终交流类型：仅发表论文

E11-PO03

聚苯乙烯材料在高加速自然老化试验的老化行为和加速性研究

时宇*、吕天一、祁黎、陶友季、黎丽丽、揭敢新

太阳跟踪聚光加速老化试验与自然老化之间具有良好的相关性, 还可以实现 6-10 倍的加速倍率, 广泛的应用于高分子材料耐候性评价及服役寿命预测中。本论文利用超加速太阳跟踪聚光老化试验装置对聚乙烯材料(PS)开展自然加速老化试验, 和 PS 的一般自然暴露试验进行对比, 通过比较 PS 光学性能的变化速率, 计算高加速自然老化试验的加速倍率。结果显示太阳跟踪聚光加速老化装置极大提高了样品表面紫外线的辐照量, 造成 PS 的色差迅速增大, 和一般自然暴露试验相比, 加速因子为 7.9。

最终交流类型: 口头报告

二氧化硅固载氨丙基三乙氧基硅烷与铂催化剂协效提高加成型液体硅橡胶耐漏电起痕性能

韦业¹、廖奕铭¹、赖学军¹、曾幸荣*¹、陈宛涓²

1. 华南理工大学材料科学与工程学院
2. 佛山大学材料科学与氢能学院

硅橡胶具有电气绝缘、耐高低温、耐候、疏水以及质轻等优点, 在高压绝缘领域具有广泛的应用。然而, 户外长期暴露于潮气、紫外线辐射以及酸雨等严酷环境中会导致硅橡胶表面粗糙度增加和疏水性能下降, 空气中的盐雾和灰尘等污染物不可避免地累积在硅橡胶表面。在外界强电场作用下形成泄漏电流使得水分蒸发, 产生干带电弧不断轰击硅橡胶表面, 导致硅橡胶的分子链降解并炭化, 直至硅橡胶发生漏电起痕破坏, 产生安全隐患。随着国家电网的建设, 电压等级不断提高, 制备具有良好耐水性能的耐漏电起痕硅橡胶对高压输变电领域有重要意义。目前主要以向硅橡胶中添加大量无机填料来改善其漏电起痕性能, 但大量填充无机填料不可避免地会对硅橡胶的力学性能以及加工性能造成损害。本文通过氨丙基三乙氧基硅烷(APTES)的乙氧基与纳米二氧化硅(SiO_2)表面羟基之间的水解缩合反应制备了 SiO_2 固载 APTES (APTES-SiO_2), 研究 APTES-SiO_2 对加成型液体硅橡胶(ALSR)硫化性能、力学性能、热稳定性能、耐漏电起痕性能及其耐水性能的影响。结果表明, APTES-SiO_2 能够与铂(Pt)催化剂协效提高硅橡胶的耐漏电起痕性能, 且具有良好的耐水性。当 APTES-SiO_2 和 Pt 添加量分别为 0.15 phr 与 0.15 ppm 时, APTES-SiO_2 /ALSR 的耐漏电起痕性能能够达到 1A4.5 级, 并且在水中浸泡了 30 天后, 耐漏电起痕性能基本没有下降。TG 和 TG-FTIR 的结果表明 APTES-SiO_2 与 Pt 协效促进了硅橡胶在高温下的自由基交联反应, 有利于形成致密的陶瓷阻隔层, 从而显著提高了其耐漏电起痕性能。

最终交流类型: 墙报

E11-P02

平流层飞艇囊体材料综合老化性能评价

孙岩*、盛德鲲、杨宇明

中国科学院长春应用化学研究所

摘要:

平流层飞艇囊体材料是临近空间飞艇主体结构的柔性多层高分子复合材料, 具有超轻量化、超高强度、高耐候、高气体阻隔性等特点。模拟平流层环境及驻空状态, 对 FV-165 型平流层飞艇囊体材料进行紫外、臭氧、蠕变和紫外-臭氧-蠕变综合老化试验, 并测试分析材料老化前后的力学性能变化。结果显示, 当实验时间为 200 h 时, 单因素和多因素耦合老化后的材料外观均未发生明显变化, 但材料的力学行为发生一定变化。单因素老化时, 对材料拉伸强度影响较大的是紫外老化, 在该条件老化后, 材料的拉伸强度降低了 6.79%; 多因素耦合老化时, 对材料拉伸强度影响较大的老化方式是紫外-臭氧-蠕变多因素耦合老化, 在该条件老化后, 材料的拉伸强度降低了 24.79%。此外发现在单因素老化时, 臭氧老化对材料拉伸强度影响较小, 材料的拉伸强度仅降低了 3.88%。当老化试验时间进一步延长至 400 h 时, 单因素和多因素耦合老化后的材料外观仍无明显变化, 对材料拉伸强度影响较大的单因素和多因素老化条件仍为紫外老化和紫外-臭氧-蠕变多因素耦合老化, 在这两种老化条件下, 材料的拉伸强度分别降低了 11.09%和 32.40%; 臭

氧老化对材料的拉伸强度仍影响最小，材料的拉伸强度仅降低了 3.44%。综上所述，与单因素老化相比，老化时间对紫外-臭氧-蠕变多因素耦合老化材料的力学性能影响更明显。

作者简介

孙岩 女，中国科学院长春应用化学研究所，工程师，高分子复合材料。

电话：18243786766

Email: sunyan@ciac.ac.cn

盛德鲲 男，中国科学院长春应用化学研究所，研究员，高分子复合材料。

电话：13844063003

Email: dksheng@ciac.ac.cn

杨宇明 男，中国科学院长春应用化学研究所，研究员，高分子复合材料。

电话：13756265570

Email: ymyang@ciac.ac.cn

最终交流类型：邀请报告

多因素加载下含能材料体系的在线拉曼光谱技术研究

何璇*

中国工程物理研究院化工材料研究所

拉曼光谱是一种能反映原子或分子振动结构或电子振动状态的散射光谱。它具有无损、远程、快速等特点，可以灵活的与真空、辐照、热学及力学多种环境及技术耦合，创制多因素加载下的在线监测环境。课题组以拉曼光谱技术为核心，发展了真空腔原位高温拉曼，微力学拉曼，悬浮增强拉曼，柔斑在线光纤拉曼等检测技术，重点研究了热老化后的 PBX 含能材料“白霜”问题、高分子粘结剂的老化变色问题、聚合物粘结炸药界面在力学加载下的微力学行为等。获得了热、辐照等多因素加载下，含能材料体系老化状态的相关机制，为相关材料相容性评估提供支持。

最终交流类型：口头报告

基于力-电功能一体化的线性高灵敏稳定服役的离子电子压力传感器

朱柏林、杨俊龙*

高分子科学与工程学院，四川大学，成都

高灵敏线性响应是高性能柔性电子皮肤的关键参数，特别是在智能机器人和人机交互等应用中发挥精准检测的作用。为了实现传感器的线性高灵敏响应，现有策略通常为多层多材结构设计方式，但这种方式往往导致线性响应范围受到限制、传感稳定性无法进一步提升。其根本原因在于异质材料模量失配以及层间界面问题。为应对这些挑战，本研究提出了一种同质材料体系下的力-电一体化策略。该策略的核心在于全聚氨酯材料体系下构建的一体化力学-电学功能层界面，同时提升了传感稳定性，扩大了线性高灵敏响应范围。该传感器具备较高的灵敏度 (16.24 kPa^{-1}) 并实现了宽压力范围 (0-300 kPa) 内的线性响应 ($R^2 = 0.999$)。此外，通过电极和介电层之间的粘合层所构建的封装一体化器件结构，在复杂工况下（如剪切、复合压强等）展现出优异的传感稳定性。该传感器在精准称重、智能抓取系统的触觉反馈方面具备潜在应用价值。该研究为制备兼具宽域线性高灵敏响应以及长期服役稳定性的柔性压力传感器提供了一种策略，为高性能传感领域做出了贡献。

最终交流类型：邀请报告

航天用氟醚橡胶寿命评估研究

张欢、许文*、邹士文、梁晓凡、刘小艳、吴福迪、赵云峰

航天材料及工艺研究所

氟醚橡胶是一类分子结构中含有醚键的含氟橡胶，是当前发展的耐介质耐温性能等综合性能最优的合成橡胶，已发展的种类有偏氟醚橡胶、全氟醚橡胶和全氟聚醚橡胶，在航天领域有广泛的应用。由于突出的化学稳定性和耐高低温性能，全氟醚橡胶制品用于太空飞行和火箭发射等宇航领域，能耐喷气式发动机燃油、肼类、四氧化二氮和发烟硝酸在内的推进剂，用于各种流体的输送、密封、减振工况等。在液氧液氮温度下仍有良好的密封性能，并能耐氧冲击，不会发生着火、爆炸现象。全氟醚橡胶在高温下的压缩永久变形呈现出先快速增大，后缓慢变化的规律。110℃热空气老化 60 天后其压缩永久变形为 50.2%。全氟醚橡胶在四氧化二氮介质中 70℃浸泡 120 天后，其压缩永久变形为 45%，说明其有良好的耐氧化介质回弹性能。偏氟醚橡胶在 120 天的热空气老化周期内，其拉伸强度和拉伸伸长率在加速老化初期稍有下降，而后保持稳定。全氟聚醚橡胶在 110℃热空气老化后邵尔 A 硬度变化幅度很小，拉伸强度和拉伸伸长率在老化前期有所降低，老化后期基本保持稳定略呈下降趋势。全氟聚醚橡胶经历 150℃最长 120 天老化后，压缩永久变形小于 62%，说明其具有良好的耐老化性能。对不同使用部位的氟醚橡胶评估其服役寿命时，应结合应用部位的实际要求，按照实际应用状态设计老化试验，同时考虑橡胶材料及密封件产品的关键性能，以其关键性能下降作为寿命评估的依据，给出可靠的服役寿命结论。

最终交流类型：墙报

E11-P03

填料界面缺陷对 PBT 材料的电老化行为影响与机理研究

彭冲、杨俊龙*、李光宪

四川大学高分子科学与工程学院

高分子材料因其优异的电绝缘性能，广泛应用于集成电路、电气开关、新能源汽车等领域的电气绝缘系统中。随着电子电气产品向着高集成、轻量化、小型化发展以及工作电压的不断升高，高分子材料在绝缘系统中的长期稳定服役面临巨大挑战。在电场服役过程中，绝缘高分子材料将同时受到电场、湿度、温度、氧气的协同作用，其老化失效风险日益增加。现有的材料电老化研究主要为强电领域的电树、水树、局部放电等内容。在工程中通常在聚合物中添加填料制备复合材料以增加机械性能。然而其面临着电气性能和机械性能难以协同提升的矛盾，因为填料会引入界面、空隙等缺陷，该区域在电场下易产生电场畸变，加速材料电老化失效。我们以聚对苯二甲酸丁二醇酯（PBT）、玻璃纤维（GF）和二乙基次磷酸铝-三聚氰胺聚磷酸盐（ADP-MPP）阻燃体系为对象，研究了填料-基体界面缺陷对短时击穿、长时电老化的影响机制。通过正电子湮灭寿命谱（PALS）、差示扫描量热法（DSC）、极化-去极化电流（PDC）方法等手段，发现界面缺陷含量随填料用量增加而增多；结晶度会受到填料异相成核和界面/空隙共同作用；同时界面缺陷影响浅陷阱浓度和深陷阱能级，意味着界面作为载流子捕获点，会产生局部电场畸变，从而削弱 PBT 击穿强度。最终发现 PBT 复合材料的击穿强度是结晶度、界面缺陷、填料自身性质三者共同作用的结果。本研究从填料的角度分析讨论了界面缺陷对 PBT 电老化性能的影响机制，为进一步理解材料电场击穿失效行为提供了理论依据。

最终交流类型：口头报告

我们应当如何设计耐用 PLA 基产品的加速了老化实验：来自不同工业标准的启发

王柯、吕亚栋*

四川大学高分子科学与工程学院

由于目前大多数加速老化实验同户外真实服役条件存在一定的差距，因此评估聚乳酸（PLA）基产品的耐久性和预测其寿命仍然是一个挑战。本研究中，我们分析并比较了可生物降解的乳酸（PLA）泡沫产品在室外条件（亚热带湿润性气候）下长达 300 天的老化行为，以及在三种不同类型的加速老化条件下（包括强紫外线（HUV）、湿热（DH）和氙灯（Xe）老化）的情况。结果表明，PLA 在所有条件下均经历了链断

裂、氧化和表面/本体腐蚀破碎的现象；但值得一提的是，不同条件下的降解机制却各有不同。长时间暴露于潮湿环境（DH）会促进 PLA 长链的水解，分子量出现显著降低。而强紫外线（HUV）条件下的老化现象会随着老化时间的增加逐渐扩散到 PLA 泡沫的内部晶体部分，导致泡沫结构崩溃。此外我们发现，对于半结晶态 PLA 产品（PLA 结晶度约为 25%），在氙灯的加速老化条件下，紫外线和湿热的共同作用会加速了 PLA 的降解老化，因此该条件对室外条件的预测会更为准确。所以为了有效且精确地评估在不同气候条件下使用的 PLA 产品的耐久性，特定的加速老化实验选择是至关重要的。我们希望本研究能够引发关于如何一致且可靠地设计 PLA 产品的可靠性评估方法的讨论。

最终交流类型：口头报告

硅泡沫橡胶力学性能退化特性与寿命预测

邵照群*

中国工程物理研究院化工材料研究所

硅泡沫橡胶是由橡胶基体经过发泡手段获得的超弹性高分子材料，具有良好的减震、隔热、隔音、密封性能，常用于重要零部件间定位、减震、防转、弥补加工公差等工况，硅泡沫材料在使用过程中，长期经受温度、湿度、载荷作用，其力学性能会逐渐劣化，影响装备的安全使用。为研究硅泡沫材料在老化过程中的性能变化规律，本文通过理论推导和加速老化实验验证，建立了压缩永久变形率、应力松弛与应力-应变曲线变化规律这三者之间的联系，掌握了硅泡沫使用过程中的性能变化趋势，预测了硅泡沫材料的失效寿命，主要研究工作及结论如下：

（1）硅泡沫材料压缩永久变形率与时间成指数关系，其变化速率与温度的关系可以用阿伦尼乌斯方程来描述，以压缩永久变形率达到 45% 为失效阈值，硅泡沫材料的失效寿命为 8.7 年。

（2）硅泡沫材料应力保持系数与时间的对数成线性关系，其变化速率与温度的关系可以用阿伦尼乌斯方程来描述，以应力保持系数达到 40% 为失效阈值，硅泡沫材料的失效寿命为 13.8 年。

（3）研究了不同压缩比对硅泡沫材料老化程度的影响。压缩比越大，硅泡沫材料变形越大，在压缩后高度相同时，其应力松弛越快。压缩比对应力-应变曲线影响比较明显，压缩比越大，硅泡沫材料应力-应变曲线“越软”。

最终交流类型：口头报告

聚苯醚发泡材料热、辐射和应力老化行为和机理研究

豆睿扬、刘强*、张祎茜、黄玮、孟宪福、陈洪兵

中国工程物理研究院核物理与化学研究所

利用多因素可调控老化实验平台系统研究了聚苯醚发泡材料的热、辐射和应力单因素老化行为和机理。研究表明：热氧老化后材料明显变硬，材料吸水率增加，密度和导热性几乎没有变化；上百 kGy 吸收剂量的 γ 辐射会导致材料明显变硬，而低于 1 kGy 吸收剂量对材料力学性能几乎没有影响，且不存在明显的剂量率效应；发泡聚苯醚应力松弛极快，6% 压缩率下 20 天左右发生永久变形，材料密度与导热性能略微增加。此外，泡孔结构的存在导致聚苯醚热稳定性和导热性降低，分子链运动性和吸水率显著增加，辐射和热老化现象更加显著。通过气体红外分析发现发泡与未发泡聚苯醚老化后气体产物种类和含量有明显差异，发泡聚苯醚热、辐射老化后仅有 CO₂、CO 等小分子气体产物生成，而未发泡聚苯醚老化后不仅有 CO-2、CO 生成，还有 CH₄、C₂H₆ 等烷烃产物生成；而且氧气会加速聚苯醚发泡材料氧化，产生更多的碳氧化物。研究结果有助于充分认识特种高分子发泡材料中特殊的物理/化学老化分子机制及性能加速老化失效规律，丰富和发展高分子材料老化与稳定的基础理论，为改进与优化发泡材料长期稳定性提供研究思路。

最终交流类型：墙报

E11-P04

The Effect of Crystallinity on Water Treeing Properties of Isotactic Polypropylene and Random Copolymer Polypropylene

Chi Yao¹, Shangshi Huang*, Yuxiao Zhou², Changlong Yang³, Xinhua Dong¹, Cheng Tong¹, Xiyu Zhang¹, Xiongjie Yang¹, Jinliang He¹

1. Tsinghua University
2. Electric Power Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd
3. State Grid Shenyang Electric Power Supply Company, Shenyang

The aging properties of polypropylene insulating materials in water treeing have become increasingly important due to their widespread use in power cables. In this study, accelerated aging experiments focusing on water treeing were conducted using the water needle electrode method. Isotactic polypropylene (iPP) and random copolymer polypropylene (PPR) were among the insulating materials investigated. The impact mechanism of crystalline differences on water tree growth properties was analyzed through a combination of techniques including polarizing optical microscopy (POM), scanning electron microscopy (SEM), and differential scanning calorimetry (DSC). The results revealed distinct differences between iPP and PPR: iPP exhibited a dendritic water tree morphology with finer branches and larger water tree areas, while PPR displayed a denser morphology with thicker branches, and less pronounced length variation in the later stages of aging. The presence of partial β -crystals in PPR resulted in an overall smaller-sized lamellar stacked spherulitic structure, contributing to its denser water tree morphology. Furthermore, the lamellar spherulitic structure hindered the penetration of water tree channels, thereby enhancing PPR's resistance to water treeing. This comparative analysis sheds light on the influence of crystalline structure on the water treeing behavior of polypropylene insulating materials, providing valuable insights for their application in power cable insulation systems.

最终交流类型：口头报告

湿热条件下碳纤维/环氧树脂复合材料的寿命预测模型

唐国烁、杨睿*

清华大学

本文针对碳纤维增强的环氧树脂复合材料（简称：CFRP），提出了一种新的多因素耦合条件下的寿命预测模型。通过公式推导，得到了环境条件方程、老化状态方程、性能随时间变化关系。依托多因素耦合老化评价系统（简称：CAES）进行原位老化实验和老化状态测定，结合湿热条件加速老化实验结果进行拟合，最终求解得到寿命预测模型参数。结果表明，该模型能够对于湿热耦合条件下的材料性能变化进行较为精准的预测。

最终交流类型：墙报

E11-P05

核电站防火封堵硅酮材料老化评估和寿命预测

孙康耀、帅明坤、姜通昊、刘雨林、龚巍*

复旦大学

凭借优异的耐热性、耐候性和电性能，以及施工简便和固化时间短等特点，硅酮常用作核电站防火封堵材料以起到密封、防火和辐射屏蔽等作用。然而在堆芯周围强辐射和高温高压的服役环境下，硅酮材料自身也会发生性能劣化，故对其开展老化评估和寿命预测以防止因意外失效导致的放射性释放具有重要意

义。本文基于“等剂量-等损伤”和“时温等效”原则，对于我国三代核电的国产防火封堵硅酮材料开展了耐辐射和耐热性能试验。结果表明，对于此类颗粒增强型聚合物基复合材料，基于机械性能、氧化诱导时间和氧化诱导温度的传统寿命预测方法并不适用，而基于热重曲线的快速热分析法可有效避免该问题。由此通过运用经典的寿命预测方法，获得了材料的热老化表观活化能并预测了服役寿命。本文研究成果不仅有助于为我国三代核电使用的防火封堵材料提供产品合格鉴定的技术支撑，而且能帮助深化对颗粒增强型聚合物基复合材料的老化机制和寿命预测方法的理解。

最终交流类型：口头报告

基于 ^{19}F 低场核磁共振的氟聚物结晶度无损测试技术

赵雪燕*、邬张玉、朱春华

中国工程物理研究院化工材料研究所

氟聚物，即氟化烯烃聚合物，通常具有优异的耐化学品、耐溶剂、耐辐射和耐热性。由于对恶劣环境具有惰性，氟聚物被广泛用于密封圈、燃料软管以及聚合物粘结炸药（PBX）。作为一种半结晶高聚物，在库存老化过程中的力、热等刺激下，氟聚物的结晶度会发生改变，从而影响其结构与性能。目前表征结晶度的常用手段包括粉末 X-射线衍射（PXRD）和差示扫描量热（DSC）。本研究提出了采用 ^{19}F 低场核磁共振来表征 F2314 这类半结晶氟聚物的结晶度，建立了测试方法，研究老化处理前后氟聚物结晶度的变化规律，并与 PXRD、DSC 的结果进行了比对分析。研究表明， ^{19}F 低场核磁共振能够实现对氟聚物结晶度的定量表征，并具有以下优势：（1）信号选择性，即可排除复合体系中不含氟的分子组分的结晶信号干扰；（2）样品量相对更多，其结晶度测试结果更具代表性；（3）从链段角度表征结晶度，提升对结晶的多尺度认识；（4）能够实现原位表征，获得升降温过程中的结晶动力学。

最终交流类型：墙报

E11-P06

硅橡胶复合体系中结合胶定量表征新技术-低场核磁共振

邬张玉、黄龙金、朱春华、赵雪燕*

中国工程物理研究院化工材料研究所

二氧化硅纳米填料常用于改进硅橡胶的力学性能。在硅橡胶与二氧化硅填料的界面处，化学键合和物理相互作用导致硅橡胶链段形成结合胶层。结合胶含量与二氧化硅填料的增强作用密切相关，是评估填料改性能力的重要参数。传统溶胀法测定结合胶含量存在耗时长、重复性差、溶剂具有危害等缺点。本研究提出采用低场核磁共振技术（LF-NMR）测定结合胶含量。通过测试硅橡胶中不同运动能力含氢链段的相对比例，计算出刚性结合胶链段的含量，是一种快速、无损的表征手段。并且我们将 LF-NMR 测定的结合胶含量与传统溶胀法结果进行了比对，验证了 LF-NMR 技术在结合胶分析中的可靠性和有效性。

最终交流类型：墙报

E11-P07

POE 封装膜的交联体系研究

杨子夜、牛艳华*

四川大学高分子科学与工程学院李光宪教授课题组

本研究旨在探讨聚烯烃弹性体（POE）封装胶膜的最佳交联体系配方（正交法），并评估不同交联度对其力学性能和老化性能的影响。通过设计不同的交联配方，制备了一系列 POE 封装胶膜样品。采用抽提法（二甲苯）测定其交联度，并通过拉伸测试评估力学性能。同时，进行了加速老化测试（包括高强度紫外光老化和热氧老化），以模拟实际太阳能电池板使用环境中的老化行为。研究结果表明，交联度对 POE 封装胶膜的力学性能和耐老化性能具有显著影响。优化的交联配方不仅提高了 POE 封装胶膜的拉伸强度和断

裂伸长率，一定程度上还增强了其耐紫外光和湿热环境的老化性能。本研究分析了交联度、力学性能和老化性能之间的关系，为开发高性能的 POE 封装胶膜提供了重要的理论依据和实践指导。

最终交流类型：口头报告

高能固体推进剂寿命评估新参量研究

刘晓晗*、郝娟

内蒙合成化工研究所

为研究基于新特征参量的高能固体推进剂寿命评估方法，开展 NEPE 推进剂高温加速老化试验，监测老化过程中安定剂含量、交联密度等参量的变化规律，构建以安定剂含量和交联密度变化为依据的推进剂贮存寿命评估模型。结果表明，NEPE 推进剂交联密度值随贮存时间延长呈现明显下降趋势，且交联密度与推进剂抗拉强度具有线性相关性；此外，安定剂 MNA 完全消耗完，推进剂最大抗拉强度快速下降。从唯象法角度分析，交联密度和安定剂含量与推进剂力学性能具有相关性，因此二者均可作为寿命评估的参量。以安定剂 MNA 消耗完为依据，利用 Berthlot 方程计算得到 NEPE 推进剂在常温（25℃）条件下的安全贮存寿命大于 27 年；根据寿命评估模型计算推进剂在 25℃ 下贮存 27 年后，交联密度下降率为 13.4%。该研究说明交联密度值可作为寿命评估新参量，且安定剂 MNA 消耗完为准确预示推进剂贮存寿命提供了新的计算依据。

最终交流类型：墙报

E11-P08

基于辐射敏感动态共价键的耐 γ 辐射水凝胶的制备研究

陈香伶、刘强、黄玮、陈洪兵*

中国工程物理研究院核物理与化学研究所

辐射交联型高分子材料在受到 γ 射线作用时会产生大分子自由基，自由基可能重组形成交联网络，导致材料内部的交联点增多，使材料出现交联硬化、力学性能劣化等老化现象。本工作拟探索基于辐射敏感动态共价键制备耐 γ 辐射的 PVA 水凝胶以调控辐射交联型高分子材料的本征损伤行为。酰胺键和硼酸酯键是典型的动态共价键，其中苯基共轭酰胺键受到 γ 射线辐照易断裂，苯硼酸酯结构对 γ 辐照产生的活性氧自由基（ROS）敏感，易氧化生成苯酚和硼酸。通过红外和核磁等表征方法确认了制备出的 PVA 水凝胶中的硼酸酯键和酰胺键。将制备出的 PVA 水凝胶进行 γ 辐照实验，发现含上述动态键的复合水凝胶受到 γ 射线辐照后，苯基共轭酰胺结构的 N-N 键发生断裂产生自由基，通过顺磁共振波谱表征发现自由基信号随吸收剂量提高而增强。当水凝胶受到 20 kGy 的 γ 射线辐照后，凝胶的断裂伸长率仍然能够保持初始值的 92%，具有明显的耐辐射性能。研究结果表明在材料中引入 γ 辐射敏感的动态共价键对辐射交联型高分子材料的性能保持具有积极作用，为耐辐射高分子材料的构筑方法提供了新思路 and 理论认识。

最终交流类型：口头报告

某电厂长期服役硅橡胶软管老化状态评估

徐柱*、谢辙

中核武汉核电运行技术股份有限公司

某核电厂双层复合硅橡胶软管在 30-47℃ 的除盐水环境中服役 8 年，需要评定其能否继续服役至 11 年。本文对服役软管、新软管和库存软管的厚度、傅里叶红外光谱、邵氏硬度、拉伸性能测试，结果表明服役软管的性能呈下降趋势，但仍有一定服役裕量。对服役硅橡胶管在 175℃ 进行 120 小时加速老化，模拟其在 47℃ 继续服役 3 年的状态，老化的内层软管和外层软管的拉断伸长率均大于 200%，表明加速老化后

的服役硅胶管的拉伸性能仍符合使用要求，具备继续服役 3 年的性能裕量。

最终交流类型：仅发表论文

E11-PO05

基于累积失效概率的某聚氨酯胶粘剂胶接产品寿命评估

梁晓凡*、王璇、许文、邹士文、张欢、吴福迪、赵云峰

航天材料及工艺研究所

聚氨酯胶粘剂是一类分子链中含有氨基甲酸酯（—NHCOO—）或异氰酸酯（—NCO）基团的胶粘剂，具备优异的抗剪性能、抗冲击性能及耐低温性能，对不同基材的适应性广，适用于低温及有一定振动环境的产品胶接，广泛应用于航空航天等军工领域。对某聚酯型聚氨酯胶粘剂胶接产品开展了 70℃、80℃、90℃ 下相对湿度均为 75% 的三个湿热条件加速老化试验，并定期取样进行气密性检测，如产品有漏气现象即表示聚氨酯胶粘剂胶层脱粘，判定为产品失效，记录产品失效情况并据此计算每个老化条件下产品随时间的累积失效概率。经 χ^2 检验，在 $\alpha=0.05$ 的显著性水平下，产品在 3 个湿热老化条件下的累积失效概率均服从对数正态分布： $F(t) \sim \log N(\mu, \sigma^2)$ ，具体分别为 70℃&75%RH: $F(t) \sim \log N(3.882, 1.796)$ 、80℃&75%RH: $F(t) \sim \log N(3.162, 1.960)$ 、90℃&75%RH: $F(t) \sim \log N(2.588, 0.872)$ 。根据产品特点，确定累积失效概率 50% 为寿命终点，可计算得到 3 个条件下的寿命分别为 48.53 天、23.62 天、13.31 天。利用湿热条件下的 Weibull 经验模型对上述数据进行线性回归，可得 25℃ 下寿命与绝对水分子浓度的乘积为 $\tau \cdot [H_2O] = 30.76d \cdot g \cdot L^{-1}$ ，由此可计算 25℃ 下相对湿度 25%、50%、75% 时此聚氨酯胶粘剂胶接产品的寿命分别为 14.58 年、7.29 年、4.86 年。上述结果表明此聚氨酯胶粘剂胶接产品对湿度较为敏感，贮存过程中应尽可能降低环境湿度。

最终交流类型：仅发表论文

E11-PO06

压缩填充对丁腈橡胶的增塑剂析出行为影响

李墨亮*、张欢、邹士文、张超、许文、梁晓凡、丁孝均、张新兰、吴福迪

航天材料及工艺研究所

丁腈橡胶 (NBR) 是由丁二烯和丙烯腈经过乳液聚合得到的共聚物，具有良好的耐溶剂性能和粘接性能，较其它橡胶还具有较宽的使用温度，因此在航空航天、汽车、油矿等行业中成为不可取代的材料。但在贮存和使用过程中，NBR 容易受环境因素的影响导致橡胶老化失效，受压缩填充状态影响的 NBR 密封圈在热氧作用下容易发生降解反应，同时橡胶内部增塑剂还会发生析出行为，共同作用影响橡胶性能。本文通过设计 10 组不同规格的橡胶压缩填充装置，开展了 NBR 在 60℃ 环境和压缩应力共同作用下的热氧老化试验，研究了压缩填充状态对丁腈橡胶的增塑剂析出行为影响。结果显示 NBR 橡胶老化特征受填充率影响较大，当填充率大于 100% 时，NBR 发生增塑剂邻苯二甲酸二丁酯 (DBP) 的析出行为，且随着老化时间的延长，NBR 的失重率逐渐增大，同时失重速率逐渐降低；而较大压缩率单独作用下 NBR 的 DBP 析出行为不明显，且失重率缓慢增加，快速趋于稳定。当较大的压缩率和填充率共同作用时，该橡胶压缩填充装置中的 NBR 表现出较高的失重率，DBP 析出明显，说明压缩应力环境中的 NBR 受压缩率和填充率协同作用，压缩率和填充率增大显著影响橡胶老化失效行为。

最终交流类型：仅发表论文

E11-PO07

导电胶粘剂在温湿环境下老化机理研究

张新兰*、许文、邹士文、张超、丁孝均、赵云峰

航天材料及工艺研究所

摘要：导电胶粘剂广泛用于航空航天领域，作为关键非金属材料之一，研究其温湿环境下的老化失效机理对于评估材料在某些极端环境下的服役可靠性具有重要意义。对导电胶粘剂热空气老化试验及湿热老化试验前后的粘接及导电性能进行了测试，并采用差示扫描量热仪、红外光谱分析仪、扫描电镜、动态热机械性能测试仪及电化学阻抗谱仪等表征手段对材料老化前后的微观性能结构进行了表征。结果表明，在温湿环境下，由于导电胶粘剂固化收缩及与被粘接材料热膨胀系数的差异，粘接界面处易产生微裂纹，并随老化时间扩展，且粘接界面处氧化层的形成进一步促进了裂纹的扩展。导电胶粘剂老化前后的拉剪强度及导电性能变化是材料后固化及界面微观裂纹产生与扩展共同作用的结果，当导电胶粘剂后固化收缩及微裂纹扩展至一定程度时，材料的粘接强度及导电性能将会降低进而失效。在相同的老化温度、老化时间下，湿度的存在加快了粘接界面氧化层的形成及裂纹的扩展。

最终交流类型：墙报

E11-P09

氯丁橡胶中惰性气体离子辐照化学损伤的原子尺度模拟

罗杰民¹、任猛¹、刘强²、徐对功¹、郭亚昆³、帅茂兵*¹

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

本工作采用非弹性热峰模型和反应性分子动力学研究了氯丁橡胶的惰性气体离子辐照损伤机理，关注了离子能量沉积后氯丁橡胶的物理化学过程和化学反应，并侧重于离子径迹结构、化学损伤机理以及损伤程度的定量分析。本工作以辐照降解产物的分子量差异表征径迹域结构，发现离子径迹中出现核壳结构。惰性气体离子辐照后，氯丁橡胶的密度、碳配位数、分子量、化学反应及产物种类数量等发生变化，并与离子类型（电子能损）和原子能量径迹分布有关。He 离子辐照损伤较小，Xe 离子辐照损伤严重，径迹壳发生轻微化学结构变化，径迹芯辐照降解严重。另外氯丁橡胶分子链中四种结构的链节也影响了降解产物的结构与数量。进一步对化学损伤程度进行量化分析，选取典型的分子、共价键和原子结构，其损伤截面与电子能损呈现很好的线性关系，并且同种化学结构对应的激发能为定值，该结论与实验研究结论一致。本文将为高分子材料的离子辐照降解机理研究提供有效的模拟方法，未来有望以损伤截面和激发能为桥梁，建立模拟与实验的精确对应关系。

Jiemin Luo, Meng Ren, Qiang Liu, Duigong Xu, Yakun Guo, Maobing Shuai. Atomic-scale simulations of chemical damage in neoprene under noble gas ion irradiation. **Submitted to ACS Applied Materials & Interfaces.**

最终交流类型：口头报告

基于端基捕获效应的聚脲弹性体阻燃研究

梁书恩*¹、邓红阳¹、张平²、陈可平¹、田春蓉¹、王建华¹

1. 中国工程物理研究院化工材料研究所
2. 西南科技大学材料科学与工程学院

聚脲(PU)弹性体材料近年来因其优异的力学、防腐、耐磨和冲击防护性能而受到广泛重视。然而，聚脲材料阻燃性差，燃烧时还会发生严重的熔滴和烟释放，将限制其作为防护材料在要害设施和大型舰艇等重要场景的应用。本研究根据 PU 在燃烧过程中发生解聚生成端氨基和异氰酸酯基碎片的热分解特性，利用芳香族二酸酐(ArDAs)或芳香族四羧酸类物质对这些碎片进行捕获，生成高耐热的芳香族聚酰亚胺结构，从而增强 PU 的成炭能力和阻燃性能。通过对 PU 的热重分析，热处理前后固相产物的红外和拉曼光谱分析，以及热分解气相产物的热重-红外联用(TG-IR)、热重-质谱联用(TG-MS)分析，证实了 ArDAs 及芳香族四羧酸在 PU 热分解过程中的端基捕获效应。通过锥形量热测试了聚脲的阻燃性能，ArDAs 或芳香族四羧酸

能够显著降低 PU 的放热率峰值 (PHRR)、总放热 (THR)、总放热量 (TSR) 和总 CO 释放 (TCO)，同时增加残炭量。当 3,3',4,4'-二苯酮四羧酸二酐 (BTDA) 含量为 20 wt% 时, PUA 的 PHRR、THR、TSR 和 TCO 分别降低了 70.6%、32.5%、44.7% 和 58.8%，残炭量增加了 405%。与此同时, BTDA 能够很好的保持 PU 的力学性能, 拉伸强度和断裂伸长率分别为纯 PU 的 88.5% 和 91.0%。尤为重要的是, ArDAs 与聚磷酸铵具有很好的协同阻燃作用, 两者复合可以使 PU 达到 UL-94 V-0 级阻燃且无熔滴。因此, ArDAs 和芳香族四羧酸类物质可以作为新型的适于 PU 弹性体的无卤/无磷阻燃剂。

最终交流类型：口头报告

PANI-纳米粒子改性水性环氧涂料的制备及其对金属设备表面防腐能力提升的探究

邓海洋^{1,2}、鲁芸芸¹、陈中华²、曹琪*¹、张鸿²、汤嘉¹

1. 中国核动力研究设计院

2. 华南理工大学

在核反应堆运行期间, 除了要考虑不同类型的 α β γ 射线向堆芯外周围环境造成放射性污染的防护问题, 还需要考虑各种核设施退役及三废处理期间, 核设施及配套系统内的金属设备基材表面的腐蚀防护问题, 以确保核设施的长期安全运行。随着现代工业生产和生活的不断进步, 金属设备材料的防腐蚀技术已成为重要课题, 而通过在金属表面涂刷防腐蚀涂料, 可有效延缓金属腐蚀。

聚苯胺 (PANI) 作为一种绿色环保的导电高分子材料, 凭借其独特的防腐机理, 在水性环氧涂料中添加极少量的 PANI 就能显著提升涂层的防腐效果, 并且防腐涂层的服役寿命很长, 因此, PANI 可广泛应用于金属防腐领域。但 PANI 在水性环氧防腐涂料中的应用也存在一些问题, 如附着力差、易结块、机械性能差、沉积不均匀等问题, 这不利于 PANI 在涂层膜体中稳定发挥防腐作用。为解决这些问题, 通常将 PANI 与纳米粒子复合制备 PANI-纳米粒子复合材料以提升涂层的防腐性能, 如纳米无机氧化物、碳纳米管、石墨烯等材料。

本研究就 PANI-纳米粒子复合材料的防腐机理进行阐释, 并就其在核工业防腐涂料领域的研究状况展开介绍。同时, 为了改善 PANI-纳米粒子的复合效果, 提出了简单可行的 PANI 复合改性纳米粒子的改善方案, 通过复合材料中两种成分协同发挥作用, 能够更有效地提升涂层的防腐性能。具体表现在, PANI 复合改性纳米粒子兼具纳米材料和 PANI 的优势, 改性纳米粒子可以作为填料, 发挥层状阻隔及疏水作用, 阻止腐蚀介质渗入涂料; 而 PANI 可以作为缓蚀剂, 发挥阳极钝化作用, 抑制金属腐蚀反应的发生。此外, 纳米材料的添加还能显著增加涂层的致密性、热稳定性、韧性等。PANI 与改性纳米材料复合效果改善, 能更好地发挥协同作用, 构成了新型导电聚合物-纳米粒子杂化材料, 为制备防腐能力强、综合性能好的新型防腐涂料提供了有力支撑。

为了更加全面地检测研究成果的现实意义, 对未来的课题工作进行规划。同时也对未来 PANI-纳米粒子材料在防腐涂料中应用的研究方向进行展望。基于核设施及配套系统内的金属设备基材表面防腐性能、延长其服役寿命的迫切和现实需要, PANI-纳米粒子复合材料作为一种高效防腐、可多功能化的材料, 在核领域防腐涂料中应用的研究必定更加广泛且深入。该类涂层的研发过程对制备耐辐射的高分子聚合物功能材料具有指导意义, 对实现和优化水性环氧涂层在核反应堆体系中的工程应用具有重大的实际意义。

最终交流类型：邀请报告

高分子材料全生命周期评价中老化降解产物分析测试技术与设备

王建凤、张裕祥、高峡*

北京市科学技术研究院分析测试研究所 (北京市理化分析测试中心)

环境中的微塑料主要来源于高分子材料的老化降解。日常生活或工业生产中使用的高分子材料及其制品, 经老化后, 形成微塑料和小分子降解产物进入环境中。轮胎磨损颗粒是交通运输最重要环境污染源之一[1], 被认为是环境微颗粒最主要来源[2], 在交通繁忙地区的土壤和道路粉尘中含量较多。

为了探索高分子材料及其制品在生态环境中崩解,形成微颗粒直至完全降解的老化降解机理,自制高分子材料力学加速老化及老化产物捕获装置[3]是研究塑料老化降解机制的得力工具,可模拟机械磨损、光照、湿、热、氧气等自然条件下高分子材料及粉体的加速老化过程,并收集老化后的样品以及老化产生的微塑料、气体、水溶性产物进行分析。

本文以轮胎橡胶样品为例,实验发现该装置能够有效模拟车辆在城市交通状况下轮胎的磨损程度。产生的微橡胶呈不规则颗粒状,尺寸分布呈正态分布,平均粒径为 $4.12\ \mu\text{m}$,经过老化降解后,轮胎橡胶中的 6PPD 老化剂消失,经验证后发现 6-PPD 在模拟自然光氙灯老化条件下转化成 6 种老化降解产物,包括 4-甲基-2-戊酮、N-苯甲酰-对苯二胺、对氨基二苯胺、6-PPDQ、4-异丙氨基二苯胺和 N,N'-二苯基对苯二胺,产生了新的高毒性化合物,应引起关注。

通过对轮胎样品在生态环境中崩解,形成微橡胶和老化降解机理研究,主要得出以下结论:(1)橡胶在老化过程产生微橡胶、气体、水溶性物质等产物可以捕获并进行深入解析;(2)自制高分子材料力学加速老化及老化产物捕获装置在分析橡胶老化过程中产生的微橡胶、气体、水溶性产物方面具有独特的优势;(3)除显微红外光谱、显微拉曼光谱外,粒度粒形仪也是对微橡胶分析的有利工具,可拓展微颗粒的分析范围。

参考文献:

[1] J. Worek, X. Badura, A. Białas, J. Chwiej, K. Kawoń, K. Styszko, Pollution from Transport: Detection of Tyre Particles in Environmental Samples, *Energies*, 2022, 15: 2816.

[2] I. Goßmann, M. Halbach, B.M. Scholz-Böttcher, Car and truck tire wear particles in complex environmental samples - A quantitative comparison with "traditional" microplastic polymer mass loads, *Science of The Total Environment*, 2021, 773:145667.

[3] 张裕祥, 高峡。一种力学加速高分子材料老化及捕获老化产物的装置。中国专利, ZL202010077024.2, 2020-07-25.

最终交流类型: 墙报

E11-P10

具有优异疏水性、环境稳定性和雷达吸收性能的改性抗静电碳纤维

李晓宇、于美杰*

山东大学

碳纤维由于其低密度、优异的导电性,被认为是一种非常有前景的抗静电填料,为了进一步满足耐环境性,导电稳定性和疏水性的要求,本文通过碳化与二次表面改性在碳纤维的表面和内部生长并沉积了聚多巴胺(PDA)和十六烷基三甲氧基硅烷(HDTMS)。通过 PDA 的氧化自聚合,增加了碳纤维表面的粗糙度,此外,基于 PDA 与碳纤维中亲水性-OH 基团的缩合作用,将长链 HDTMS 沉积在碳纤维表面。同时,在三种(紫外、盐雾、湿热)环境下的加速实验均表明,与未改性纤维相比,改性后的纤维电阻率稳定性分别提高了 27%, 36%, 60%。基于其多功能和固有的导电性,碳纤维还表现出良好的力学稳定性。同时,材料的最佳吸收性能在厚度为 2.1mm, 15.1GHz 处达到了 -46.2dB。

最终交流类型: 邀请报告

碳纤维复合材料老化机制的分子模拟初探

张帆、卢滇楠*

清华大学

本报告采用多尺度分子模拟与机器学习方法,对碳纤维/环氧树脂复合材料的热氧老化机制进行了深入研究。首先,发展了基于传统分子动力学、反应分子动力学、量子力学的多尺度模拟方法,并通过聚丙烯

烯和 HTPB/TDI 的老化案例, 证明了该方法的准确性和有效性。在验证方法可行性的基础上, 构建了稳定的碳纤维/环氧树脂复合材料模型。其次, 对碳纤维/环氧树脂复合材料与界面相关的老化行为进行了新阐释, 发现树脂基体所受机械应力与其热氧老化反应的可解耦性, 并分析了材料与界面相关的老化反应特性。研究表明, 当纤维/基体界面未被严重破坏时, 界面结合相互作用会限制靠近界面处树脂原子的热迁移能力, 从而限制树脂发生化学反应的概率, 使得界面相区域内树脂的老化程度低于主体相区域。最后, 重构了老化反应机理研究方法, 由对反应的识别转变为对化学键的识别, 得到具有高断裂概率的化学键, 并验证了基于模拟数据预测材料寿命的可行性。确立了与老化反应特性相关的失效指标, 并使用 RMD 和 ML 方法, 证明了“产物—化学键—力学性能”之间的相关性。

最终交流类型: 仅发表论文

E11-PO08

基于聚硅氧烷分子结构设计的高导热低热阻热界面材料

汪林强、冯家宝、李光宪、吕亚栋、孔米秋*

四川大学

在当今电子技术日益精细集成的趋势下, 器件之间传热问题尤为突出, 因此开发散热性能良好的热界面材料日益重要。本研究将柔性链通过光化学硫醇-烯反应接枝到聚甲基乙烯基硅氧烷 (PMVS) 的侧链, 通过调整侧链和交联链的比例得到一系列瓶刷状聚硅氧烷 (PMVS-SH) 材料。与聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 相比, PMVS-SH 的导热系数提高了 58.2% ($0.345 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)。进一步, 以氧化铝 (Al_2O_3) 为导热填料, 研究了不同填充量下 PMVS-SH/ Al_2O_3 复合材料的导热性能和界面热阻。研究发现, 当 Al_2O_3 含量为 93.75wt.% 时, PMVS-SH/ Al_2O_3 复合材料的导热系数达到了 $8.181 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 接触热阻为 $20.9 \text{ mm}^2 \text{ K}/\text{W}$ 。此外, 将 PMVS-SH/ Al_2O_3 复合材料用于计算机处理器 (CPU) 散热演示, 发现 PMVS-SH/ Al_2O_3 复合材料的散热性能优于同条件下的 PDMS/ Al_2O_3 复合材料。

最终交流类型: 仅发表论文

E11-PO09

硅橡胶密封圈退化特性与寿命预测

黄瀚元*

海军工程大学

硅橡胶密封圈在使用过程中, 长期经受温度、湿度、载荷作用, 其力学性能会逐渐劣化, 影响装备的安全使用。硅橡胶的主链是 Si-O 键, 其键能约为 $458 \text{ kJ}/\text{mol}$, 而 C-C 键和 C-O 键的键能分别为 $348 \text{ kJ}/\text{mol}$ 和 $361 \text{ kJ}/\text{mol}$, 这决定了硅橡胶相比于其他橡胶更具有热稳定性, 抗老化的能力也更强。通过开展加速退化试验分析得到了密封件的退化规律, 密封件的退化过程是一个先快后慢的过程, 并且易受外界环境因素的影响, 根据试验结果建立了密封圈的老化动力学方程并预测了该种橡胶密封件的使用寿命, 通过试验和计算可知该种橡胶密封圈在环境温度 25 度、失效阈值为 31.25% 的条件下的使用寿命约为 14 年。

最终交流类型: 邀请报告

光伏用高分子封装材料服役稳定性评价方法研究

吕亚栋*、牛艳华、李光宪

四川大学

高分子背板作为光伏组件的重要封装材料, 对整个组件起到机械支撑、环境隔绝以及电绝缘等多方位

保护作用。然而，高分子背板材料在上述复杂恶劣服役条件下，易发生老化降解（如黄变、开裂、分层等），造成其保护功能提前衰减甚至丧失，导致整个光伏组件提早失效。现有研究多集中在相对简单自然环境老化因素下高分子背板的老化失效规律，对其在复杂恶劣条件（自然环境、工况、内部微环境）多因素耦合作用下的老化失效分子机制缺少系统全面认识，并且缺少对其长期服役稳定性的高效可靠加速老化评价方法。本报告针对光伏用高分子背板的多因素耦合复杂严苛服役场景，重点开展了加速老化评价方法以及老化失效机制和规律研究，可为光伏用高分子背板材料的服役稳定性评估和预测提供理论依据。

最终交流类型：墙报

E11-P11

硬质聚氨酯泡沫多因素耦合作用下的失效行为及机理研究

戴瑞贤*

四川大学高分子科学与工程学院

本研究系统研究了不同密度硬质聚氨酯泡沫材料在多因素（温度-湿度-载荷）作用下的老化失效机理。研究发现，在不同温度和载荷下，聚氨酯分子的醚键（C-O-C）、异氰酸酯基（-NCO）、亚甲基（-CH₂）含量减少，羰基（C=O）含量的先升高后降低。这是由于老化初期醚键和亚甲基断裂氧化，同时残留异氰酸酯基进一步反应生成了新的羰基，导致羰基含量增加；随老化时间增加，羰基发生断裂，从而其含量降低。随老化温度和载荷增大，玻璃化转变温度明显增加。这是由于老化温度增加，残留异氰酸酯基反应更完全，聚氨酯的交联程度升高，玻璃化转变温度提高；而压缩载荷增大导致其发生更大的蠕变量，使其自由体积减小，从而玻璃化转变温度提高。当温度、湿度和载荷耦合作用时，与单一老化因素相比，随老化时间增加，其玻璃化转变温度增量更大，而压缩强度和压缩模量减小，温度和载荷增加导致聚氨酯泡沫的蠕变变化率更大，且泡沫密度越小，蠕变变化率更大。

最终交流类型：口头报告

面向超洁净流控元件的氟塑料薄壁件破裂微观机理研究

苏芮*

浙江大学机械工程学院精密工程与微纳技术研究所

随着半导体器件的线宽不断缩小，对工艺介质的洁净度要求不断提升，超洁净流控部件的性能和稳定性也有待提高。作为超洁净隔膜阀中的易损件，氟塑料隔膜质量制约整阀的性能，一旦隔膜变形或破裂，内部超纯介质直接与外部相通，造成泄漏。本报告从机械制造和材料宏/微观等多角度探究氟塑料薄壁件疲劳裂纹的产生和扩展过程中材料微观变化，从材料成型工艺角度建立微观结构与宏观力学性能的联系，用以指导隔膜加工设计，对超洁净流控部件的国产化研发具有重大意义。

最终交流类型：口头报告

模拟国外典型气候环境（中东）的装备加速试验方法研究

张晓东*

中国电器科学研究院股份有限公司

从中东地区气候环境和产品服役微环境的统计分析出发，介绍了一种模拟中东地区太阳辐照-温度-湿度综合作用的环境加速试验方法，分析了模拟试验与实证实验的相关性，并简要介绍后续工作的设想，为我国出口工业产品选材选型设计提供试验技术支撑。

最终交流类型：邀请报告

介电泳自组装构筑自适应介电梯度材料：原理与应用贾志东^{*1}、周濛¹、申子魁²

1. 清华大学深圳国际研究生院

2. 华南理工大学

绝缘器件内电场分布不均是影响高压绝缘设备绝缘性能的重要问题。本文研究了介电泳自组装构筑自适应介电功能梯度材料，提出了一种“以电治电”的梯度绝缘件的制备方法。通过高通量马尔可夫链蒙特卡罗和有限元模拟，研究了电场辅助引导下，一维填料的取向角分布和自组装程度对复合材料介电常数和弹性模量的影响。通过人工经验和机器学习开发了通用回归模型，以建立复合材料结构-性能映射。同时，建立了液态预聚物复合绝缘部件介电常数在非均匀电场中的时空演变模型，并对针板电极的仿真结果进行了分析。研究发现，原位辅助电场能有效缓解局部电场，提升整体电场均匀性。相容系数越高，可获得的最优电场均匀性越高，但也会增加电介质损失率，并且均化效果的边际效应下降。

最终交流类型：仅发表论文

E11-PO10

光伏发电用封装材料在多因素耦合加速老化下的失效规律研究

陈艺凡、彭茂林、吕亚栋*

四川大学高分子科学与工程学院

高分子封装材料的加速老化失效是导致光伏组件退役高峰过早出现的关键因素之一。迄今在多因素导致的高分子材料老化失效研究中，由于对多因素耦合加速老化效应的极端重要性缺乏认识、加之相关实验技术难度大等因素，常采用多老化因素“串联”的方法（多因素逐一单独循环施加）评价高分子材料加速老化特性，不能反映实际服役时多种老化因素同时作用的耦合加速增量效应，易导致过高估计服役寿命，是造成服役安全风险的重要原因之一。因此，需要建立反映多因素耦合加速效应的“并联”方法（多因素同时施加）试验平台和评价新方法，据此科学研究和认识光伏高分子封装材料在服役条件下老化失效规律及分子机理。

最终交流类型：仅发表论文

E11-PO11

胶粘剂的加速老化与本构模型

彭茂林、陈艺凡、吕亚栋*

四川大学

胶黏剂是支撑电子工业的基本材料，在电子电器产业中应用非常广泛，从芯片制造到大型的终端电子电器产品，都需要使用胶黏剂。电子电器产业涉及的面非常广，因而电子电器胶黏剂几乎包含了所有的胶黏剂门类，包括有机硅胶、聚氨酯胶、环氧胶、丙烯酸酯胶、溶剂型胶、改性醇酸树脂涂料等。基于电子电器产品的生产制造特点，要求胶黏剂的使用简单、高效、稳定、安全环保，因于胶粘剂的加速老化及力学本构模型的研究对于其在真实场景中的使用具有指导意义。

最终交流类型：仅发表论文

E11-PO12

次磷酸铝阻燃聚脲弹性体耐老化性能研究

赵斌*、贺云飞

青岛大学-功能纺织品与先进材料研究院

为综合评估次磷酸铝阻燃聚脲弹性体（PUA）的服役稳定性，根据建筑防水材料老化试验方法

GB/T18244-2022, 分别采用热氧老化 (80 °C, 168 h)、紫外老化 (UVA-340 灯, 0.76 0.76 W m⁻² nm⁻¹ 辐照度; 干燥-凝露循环暴露 168 h)、氙弧灯老化 (宽带 300~400 nm, 60 W m⁻² 辐照度; 窄带 340 nm, 0.51 W m⁻² nm⁻¹ 辐照度; 102 min 干燥-18 min 喷淋循环 168 h) 对 PUA 纯样及次磷酸铝阻燃 PUA 样品 (PUA-AHP) 进行了老化处理, 对各样品不同老化处理前后热稳定性、阻燃性能及力学性能进行了对比分析。结果表明: PUA 纯样在经过三种老化处理后, 由于老化过程促进了聚脲基体中小分子的分解, 初始热分解温度 (T_{5%}) 均得到提高, 最大热失重速率降低明显。但在紫外老化和氙灯老化后, PUA 在高温下残炭量有所降低。由于 AHP 的引入提升了聚脲基体的热稳定性, PUA-AHP 在分别经过三种老化处理后 T_{5%} 及高温下残炭均小幅提升, 最大热失重速率变化不大, 老化后样品依然表现出较好的热稳定性。PUA 纯样在老化前后由于带火焰滴现象均仅能通过垂直燃烧 V-2 等级, 不同老化方式处理后极限氧指数 (LOI) 降低 0.2~1.1%。PUA-AHP 样品在老化前后均能通过垂直燃烧 V-0 等级, LOI 仅小幅降低 0.2~0.3%, 老化后依然表现出较好的阻燃性能。老化前后力学性能的保持率是评判聚脲弹性体服役性能的关键指标之一。对于 PUA 纯样, 三种老化处理对其拉伸强度破坏较大, 热氧老化后其拉伸强度保持率为 84.9%, 而紫外老化及氙灯老化处理后拉伸强度保持率仅为 68.8% 及 66.8%。但断裂伸长率及撕裂强度的保持率可达到 80% 及 90% 以上。在 PUA 中引入 AHP 进行阻燃后, PUA-AHP 样品力学性能受到一定程度的破坏, 但拉伸强度、断裂伸长率及撕裂强度保持率均在 85% 以上。热氧老化及紫外老化对 PUA-AHP 样品拉伸强度破坏较大, 保持率仅为 68.4% 及 62.4%, 但断裂伸长率及撕裂强度保持率可在 80% 以上。氙灯老化处理对 PUA-AHP 样品力学性能影响不大, 拉伸强度保持率超过 80%, 断裂伸长率甚至出现了 13% 的提升。综上分析, AHP 阻燃的 PUA 样品在三种不同老化处理后表现出较好的热稳定性及阻燃性能。但热氧老化对 PUA 纯样及阻燃样品的拉伸强度破坏较大, 对断裂伸长率及撕裂强度的影响较小。从绝对值角度评估, 本研究所采用的基体 PUA 树脂力学性能较为优异, PUA-AHP 样品在老化后的最低拉伸强度、断裂伸长率及撕裂强度仍可以达到 17 MPa、433% 及 83 kN m⁻¹ 能够满足相关领域使用要求。

最终交流类型: 仅发表论文

E11-PO13

γ 射线辐照对医用无纺布材料性能影响研究

张建伟、田波、赵弘韬*

黑龙江省原子能研究院

无纺布是新一代环保材料, 具有拒水、透气、柔韧、不助燃、无毒无刺激性等优点, 可用于生产一次性手术衣、医用防护服、口罩、床单、酒店一次性台布等常用品。这些产品的使用均需经过灭菌的环节, 当前采用的环氧乙烷灭菌法需 7-14 天的解析时间且存在环氧乙烷残留问题。辐照灭菌法操作简单、速度快、绿色无残留有望替代传统化学灭菌法。但高能射线可能会导致无纺布材料的性能发生变化, 因此在不同辐照剂量和气氛条件利用 FT-IR、DSC、OIT 对医用无纺布进行了辐照效应研究。研究表明: 当辐照剂量小于等于 50 kGy 时, 红外谱图未发生变化, 当辐照剂量达到 70 kGy 时, 在 1233 cm⁻¹ 处出现新的吸收峰, 该峰可能为酚类的 O-H 吸收峰、C-O 吸收峰或胺类的 C-N 吸收峰, 表明其表面发生了化学反应。流变分析表明, 在空气氛围下, 随着辐照剂量的增加医用无纺布的剪切稀化现象明显增加, 辐照 30 kGy 的剪切稀化现象最为明显, 这可能是由于发生了分子链的断裂、缠结、分子交联反应。同时, 当辐照剂量为 30 kGy 时, 与空气和氮气气氛相比真空气氛下表现出更优异的流变行为, 说明医用无纺布的降解和交联与氧气的参与程度有关。其氧化诱导时间的变化趋势为真空>氮气>空气, 表明真空条件可抑制无纺布分子链降解。力学性能也是医用无纺布性能的关键指标, 当辐照剂量为 30 kGy 时, 与未辐照样品相比, 辐照后样品横纵向的断裂强力均呈下降的趋势。但在空气、真空和氮气的包装下, 横纵向的断裂强力仍大于 45 N, 并且呈氮气>真空>空气的趋势。本研究的开展为医用无纺布辐照灭菌的剂量选择提供技术支持。