

航天飞行器先进复合材料辐射损伤行为研究进展

郑伟^{1,2} 张宝莹³ 王金龙⁴ 翁汉钦³ 姚同杰⁴ 汤晓斌⁵

¹ (北京宇航系统工程研究所 北京 100076)

² (电磁兼容与防护全国重点实验室 北京 100076)

³ (中山大学中法核工程与技术学院 珠海 519082)

⁴ (哈尔滨工业大学化工与化学学院 哈尔滨 150001)

⁵ (南京航空航天大学核科学与工程系 南京 211106)

摘要 航天飞行器结构所用的先进复合材料主要包括陶瓷基、金属基和高分子复合材料, 其中, 陶瓷基和金属基复合材料具有优异的辐射稳定性, 且辐射损伤主要以缺陷、位错等形式的位移损伤为主。而高分子复合材料因主链化学键的键能低, 且富含有机基团, 对辐射最为敏感。在空间环境中电离辐射的作用下, 高分子复合材料主要发生电离损伤, 材料内部会产生不可逆的微观化学结构变化, 界面相互作用亦会遭到破坏, 导致材料整体宏观性能劣化, 严重影响航天飞行器使用可靠性。纤维增强型高分子复合材料作为航天飞行器中应用最广泛的高分子复合材料, 其纤维-基体界面是载荷传递的核心区域, 辐射损伤导致界面相互作用的改变对复合材料宏观性能的影响往往比基体或纤维损伤的单独贡献更为显著, 且损伤机制更为复杂。本文在综述高分子基体与增强纤维各自辐射损伤机制的基础上, 进一步论述了界面微观结构演化与复合材料宏观性能退化之间的内在关联, 并归纳了原子氧和周期性循环温度场与辐射场耦合对材料损伤的影响。本综述旨在为航天飞行器用复合材料的辐射损伤行为和损伤模型的构建提供认识基础。

关键词 航天飞行器, 高分子基体, 增强纤维, 界面, 辐射损伤

中图分类号 TL13

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0076

CSTR:32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2026-0076

引用该文:

郑伟, 张宝莹, 王金龙, 等. 航天飞行器先进复合材料辐射损伤行为研究进展[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, XXXX, XX(X): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0076.

ZHENG Wei, ZHANG Baoying, WANG Jinlong, *et al.* Radiation damage behavior of advanced composites for spacecraft: a review[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, XXXX, XX(X): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0076.



第一作者: 郑伟, 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为飞行器总体设计

通信作者: 翁汉钦, 副教授, E-mail: wenghq@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 初稿 2026-07-22; 修回 2026-09-22

First author: ZHENG Wei (male) doctor of philosophy, senior engineer, focuses on flight vehicle overall design

Corresponding author: WENG Hanqin, associate professor, E-mail: wenghq@mail.sysu.edu.cn

Received 22 July 2026; accepted 22 September 2026

Radiation damage behavior of advanced composites for spacecraft: a review

ZHENG Wei^{1,2} ZHANG Baoying³ WANG Jinlong⁴ WENG Hanqin^{3*} YAO Tongjie⁴ TANG Xiaobin⁵

¹(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

²(National Key Lab of Electromagnetic Compatibility and Protection, Beijing 100076, China)

³(Sino-French Institute of Nuclear Engineering and Technology, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China)

⁴(School of Chemistry and Chemical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

⁵(Department of Nuclear Science & Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

ABSTRACT Advanced composite materials for spacecraft structures encompass metallic-, ceramic-, and polymer-based composites. Ceramic and metal composites exhibit high radiation stability, of which the radiation damages are dominated by displacement damage such as defects and dislocations. Polymer composites, however, are radiation-sensitive because of their low bond energy and abundance of organic groups. Ionizing radiation induces ionization damage in polymer composites, irreversibly disrupting their chemical structures and interfacial interactions, leading to performance degradation and severely reducing the service reliability of spacecraft. Fiber-reinforced polymer composites, the most widely used polymer composites in spacecraft, have a fiber – matrix interface that serves as the critical region for load transfer. Radiation-induced damage at the interface often exerts a more significant influence on the degradation of mechanical properties of polymer composites than the individual contributions of matrix or fiber damage alone. The mechanism of radiation-induced damage at the interface is also more complex. This paper has discussed the intrinsic relationship between interfacial microstructural evolution and the degradation of mechanical properties based on reviewing the radiation-induced damage mechanisms of polymer matrix and reinforcement fibers commonly used in spacecraft. The influences of atomic oxygen and cyclic temperature fields coupled with radiation field on the degradation of polymer composites have been also summarized. This review aims to provide a fundamental understanding of the radiation-induced damage and mathematic modeling of polymer composite materials for spacecraft.

KEYWORDS Spacecraft, Polymer matrix, Reinforcement fiber, Interface, Radiation-induced damage

CLC TL13

航天飞行器在轨服役期间长期暴露于空间电离辐射环境，结构材料的性能稳定性直接决定其服役可靠性^[1-3]。结构用先进复合材料按基体类型可分为陶瓷基、金属基和高分子复合材料，分别承担被动热防护、大承载结构以及被动热防护与次级结构等功能。陶瓷基和金属基复合材料具有很高的辐射稳定性，且辐射损伤主要以缺陷、位错等形式的位移损伤为主。高分子复合材料因主链分子键的键能低，且富含有机基团，对辐射最为敏感，有机共价键电离损伤生成的活性自由基会导致材料内部发生不可逆的微观化学结构变化。在各类高分子复合材料中，纤维增强型高分子复合材料应用最为广泛^[4-6]。材料中的多相复合结构使其在真实服役环境下的劣化行为较均质材料更为复杂。具体而言，高能电离辐射通过多种损伤机制，诱发基体、纤维和界面发生不同程度的化

学结构变化，导致力学性能和功能特性逐步劣化，劣化程度累积严重时甚至会引发元器件失效甚至危及飞行安全^[7-9]。因此，系统地研究航天飞行器用纤维增强型高分子复合材料在辐射环境下的损伤机制和宏观性能演化规律，对提升航天飞行器可靠性与延长使用寿命具有重要意义。

总剂量累积效应和剂量率效应是空间环境电离辐射损伤机制中最为关键的两个因素^[10]。总剂量累积效应是指材料在辐照过程中，辐射能量持续沉积并引起内部微观结构产生不可逆变化，进而使高分子复合材料的宏观性能随吸收剂量改变而发生变化。在辐照过程中，导致高分子复合材料力学性能降低的辐射裂解和力学性能增强的辐射交联同时发生。低吸收剂量时，自由基浓度随吸收剂量增加而上升，自由基复合反应形成的交联点数量也随剂量而增加，材料力学性能通常也

呈上升趋势；当吸收剂量超过一定范围时，自由基进攻主链、引发分子链断裂的反应不可忽略，此时材料的力学性能呈现逐步劣化趋势。常用作航天飞行器结构黏合剂、辐射防护涂层及整流罩面板基体材料的环氧树脂（EP）是典型实例，其微观结构演变与力学性能退化均表现出显著的总剂量累积效应^[11]。碳纤维的辐射损伤亦遵循相似的剂量累积规律，低吸收剂量下石墨层间发生交联反应可提升纤维力学强度，而高吸收剂量时分子链断裂占主导，纤维对外应力分散能力下降导致其力学性能迅速退化^[12-13]。剂量率效应是指高分子复合材料在吸收剂量相同时，因辐照总时间不同，而使材料辐射损伤的动态演化过程产生差异，导致性能劣化程度呈现出明显区别。不同剂量率下，高分子复合材料中单位时间内产生活性物种浓度不同，反应物浓度和反应时间的同时改变会影响辐射交联与辐射裂解反应的竞争过程。例如，空气中辐照聚氯乙烯/聚乙烯复合材料，在高剂量率（100 Gy/h）下，单位时间内产生的活性物种浓度较高，辐射交联反应相对占优，且氧气扩散受限，氧化裂解反应受到抑制，致使在相同吸收剂量下，其断裂伸长率损失程度低于低剂量率（7 Gy/h）^[14]。

航天飞行器实际运行环境还包含原子氧和周期性循环温度场。这些空间因素与辐射场耦合后，可能使高分子复合材料的损伤行为偏离单一辐射场下的演化规律，加剧材料宏观性能劣化的复杂性与不确定性。原子氧和辐射场耦合后，辐解产生的自由基可与原子氧反应，引发高分子的氧化反应，通过氧化-电离协同路径加速材料劣化，改变复合材料的损伤路径，使材料劣化行为更为复杂^[17]。而温度场和辐射场耦合则通过促进分子链运动，改变辐射交联和辐射裂解的竞争性，从而改变材料损伤行为。例如，在温度-氧气-辐

射场耦合作用下，EP的断裂伸长率劣化程度可达单独温度-氧气作用下的6倍，证明多场耦合效应可显著加剧材料损伤^[18-19]。

在纤维增强型高分子复合材料中，载荷需通过基体与增强纤维之间的界面层才能有效传递，因此界面层在辐射场中的微观结构演化是决定复合材料宏观力学性能的关键因素。当吸收剂量较低时，辐照可诱导界面处发生交联反应或生成含氧极性官能团，化学或物理交联作用使界面结合强度和层间剪切性能得到提升；而当吸收剂量较高时，辐射裂解反应占主导，导致界面脱黏与微裂纹萌生。上述两种微观结构的变化，共同主导了复合材料宏观性能的劣化程度与演化方向（图1）。目前已有研究借助扫描电子显微镜（SEM）、计算机断层扫描、纳米压痕等手段观察界面处的微裂纹、脱黏和局部力学性能退化^[20-22]。然而，现有结果多集中于特定条件下的现象描述或单一尺度的表征^[22-23]，缺乏将界面微观变化（如化学键断裂、交联网络重排、官能团氧化、微裂纹）与宏观性能退化（如层间剪切强度、弯曲模量）进行系统性关联的梳理总结。因此，亟需从多尺度视角阐明材料辐射效应与宏观性能之间的构效关系。

低地球轨道（LEO）是应用型探测卫星、试验飞船及空间站等航天飞行器的主要运行区域。该轨道内的电离辐射主要来源于银河宇宙射线、太阳粒子事件和地球辐射带，粒子成分以质子和电子为主（图2）。根据国际空间站与航天飞机搭载的中子探测器数据，在太阳活动高年，中子对LEO电离辐射亦有贡献，占比约为15%^[24-25]。质子和电子与高分子复合材料相互作用时产生能量沉积，使复合材料内发生电离，进而引起一系列辐射化学效应。 γ 射线对复合材料的作用也以电离损伤为主，常用于研究高分子复合材料的辐射电离损伤。

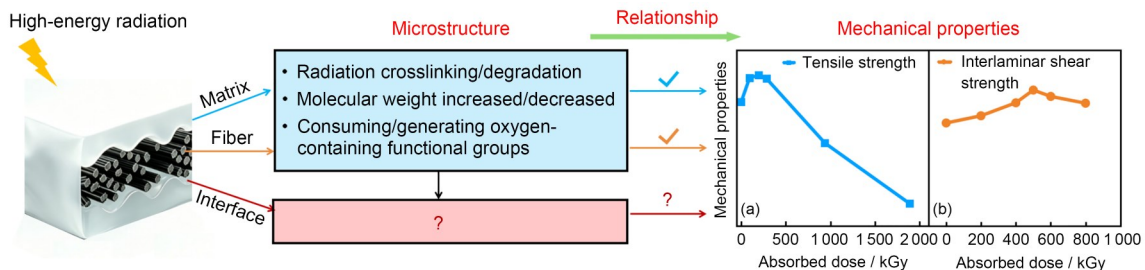


图1 高能电离辐射作用下高分子复合材料微观和宏观变化示意图：(a)拉伸强度^[15]；(b)层间剪切强度^[16]
Fig.1 Schematic illustration of multi-scale changes in polymer composites under irradiation: (a) tensile strength^[15]; (b) interlaminar shear strength^[16]

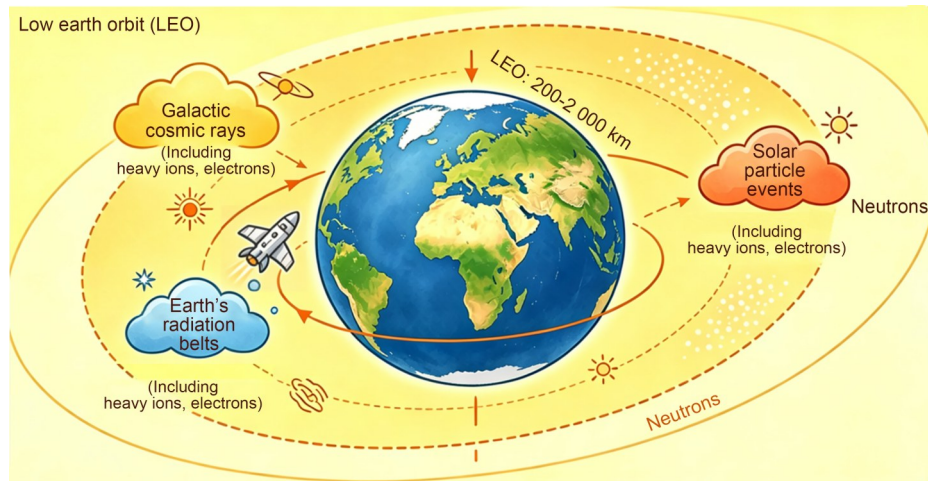


图2 低地球轨道电离辐射示意图
Fig.2 Schematic of ionizing radiation in LEO

本文从组成高分子复合材料的树脂基体、增强纤维，和纤维-基体间的界面入手，根据LEO中电离辐射类型及其在地面的可模拟情况，综述了高分子复合材料在不同粒子（电子、质子和中子）辐射和 γ 射线作用下的损伤行为，并从三个方面论述了高分子复合材料辐射损伤行为：（1）辐射对高分子复合材料微观结构的影响；（2）辐射对高分子复合材料宏观性能的影响；（3）空间因素与辐射场耦合对高分子复合材料损伤的影响。系统归纳了高分子复合材料在辐射场中化学结构和宏观性能的演化规律，着重论述了两相界面核心区域损伤机制与整体性能劣化的构效关系，并总结了复杂环境因素耦合对复合材料辐射损伤的影响，为宏观性能劣化预测模型的建立提供思路支持。

1 辐射对高分子复合材料微观结构的影响

高能电离辐射在材料中发生沉积能量时，会引发电离、激发等初级物理过程，进而诱发一系列复杂的次级辐射化学反应，改变材料微观结构，最终影响材料的整体宏观性能。纤维增强型高分子复合材料主要由高分子基体和增强纤维组成。其中，高分子基体作为连续相，起到应力传递、固定和保护纤维的作用；纤维作为增强相，是决定材料整体宏观性能的核心组分。而高分子基体和纤维间界面则是载荷传递的关键，直接影响复合材料的整体性能和失效模式。这三部分在辐射场中的产生结构变化共同决定了材料的宏观性能。

1.1 高分子复合材料中常用基体的结构变化

1.1.1 聚乙烯

聚乙烯（PE）是氢原子密度最高的聚合物之一，被广泛用作载人航天飞行器的中子屏蔽材料^[26-28]。PE化学结构简单，分子链仅由C-C键和C-H键构成，并且是典型的结晶型聚合物，因此，在研究空间环境中的电离辐射对PE结构影响时，不仅需要关注非晶区化学结构及空间构型的演变，还需要考虑结晶区结晶性能的变化。

早期研究表明，在包含快中子、慢中子和 γ 射线的混合辐射场中，PE以辐射交联为主，且交联程度随吸收剂量的增加而增强^[28]。Ohnishi等^[29]利用电子顺磁共振波谱（EPR）观察到，真空条件下电子束辐照PE可产生三种自由基，即烷基自由基（ $-\text{CH}_2-\bullet\text{CH}-\text{CH}_2-$ ）、烯丙基自由基（ $-\bullet\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}-$ ）和多烯基自由基（ $-\bullet\text{CH}-(\text{CH}=\text{CH})_n-$ ），并证实了这三种自由基和高分子链、以及它们之间的反应是引起辐射交联反应的主要原因（见图3（a））。

质子是空间环境中的主要带电粒子，也是快中子与材料相互作用时产生的主要次级粒子。质子对PE的影响呈现区域差异性，在非晶区，质子辐照同样表现为以辐射交联为主；而在结晶区，由于分子链运动受限，辐射能量沉积主要诱发辐射裂解反应，进而导致PE结晶度显著下降^[30-31]。

1.1.2 聚醚醚酮

聚醚醚酮（PEEK）是一类典型的含芳环型线性高分子，已用作国际空间站机械臂和卫星雷达天线保护材料^[32-33]。PEEK主链由苯撑、醚键和羰

基构成，主链中丰富的共轭结构赋予了PEEK优异的辐射稳定性。由于苯撑与羰基间的C-C键不易断裂，PEEK在高能电离辐射作用下产生的自由基主要来源于芳香醚键的断裂^[34]。

波兰核化学与技术研究所的Kornacka等^[35]通过真空低温（77 K） γ 辐照实验结合低温EPR技术，检测到PEEK $\bullet$ 的生成，随后缓慢升温至120 K再迅速冷却至77 K，PEEK $\bullet$ 会分解为苯基自由基和苯氧自由基（图3（b）），当退火温度提高至180 K时，不稳定的苯基自由基与封管内痕量氧气反应，迅速转化为苯基过氧自由基。尽管PEEK辐照后也会生成高活性的自由基，但其刚性分子链的运动能力很弱，有效抑制了后续反应的进行，导致由自由基引发的交联与裂解反应需要在极高吸收剂量下才能显著影响材料的宏观性能。英国思克莱德大学的Li等^[36]在室温真空环境下，利用能量为6 MeV的电子束对PEEK进行辐照，结果表明，当吸收剂量高达4 000 kGy时，PEEK的结晶温度仅提升4.5 °C。低频介电谱通过测量材料在低频交流电场下的介电损耗等参数，可有效表征分子链段的弛豫行为。Li等^[36]进一步发现低频介电谱中与玻璃化转变温度（ T_g ）相关的介电弛豫峰的强度有所下降，说明辐照后PEEK分子链运动能力减弱，这反映了在极高吸收剂量下，PEEK以辐射交联为主导。PEEK的交联程度与辐射类型密切相关，因此空间环境中不同辐射类型对PEEK性能的潜在影响是其辐射效应研究的重点之一。日本高崎辐射化学研究所的Sasuga等^[37]研究发现，使用传能线密度高的质子和氦原子核辐照PEEK后，其 T_g 显著高于电子束辐照PEEK时的 T_g ，表明高LET值的辐射更易诱导PEEK发生交联反应。

1.1.3 环氧树脂

EP是一类综合性能优异的热固性聚合物，兼具良好的黏接性、耐化学腐蚀性和力学性能，且与多种增强纤维的界面相容性良好，已成为航天飞行器结构件中应用最广的高分子材料。以EP为基体的复合材料已用于固体火箭发动机壳体等主承结构件和弹射筒支承环、电池支架等辅助结构件^[38]。EP分子主链与PEEK相似，主要由C、O元素构成，并且根据所用固化剂类型的不同，EP中还会包含N、S等杂原子。与热塑型聚合物PEEK不同，EP是典型的热固型树脂，其固化后会形成三维交联网络结构。以上两个结构特征使EP在辐射场中表现出独特的响应行为。

EP交联网络主要由单体和固化剂组成，两者的结构共同决定了EP的辐射稳定性^[39]。中国工程物理研究院化工材料研究所陈可平等^[11]详细论述了高能电离辐射作用下各类EP的辐射分解机理，认为在高能电离辐射作用下，不同单体和固化剂组成的EP，其交联网络中固化剂的脂肪链段与单体环氧基团开环生成的异丙醇链最易发生断裂，即该区域C-C键、C-O键和C-N键优先发生断裂（图3（c））。这一结论也已得到实验和理论计算的多维度证明^[40-41]。然而，化学键的断裂并不意味着聚合物链仅发生辐射裂解反应，断键所生成自由基间的复合也会诱导发生辐射交联反应。华东理工大学的Diao等^[42]利用EPR技术研究发现，EP在10 kGy/h的 γ 射线照射下，自由基浓度的变化随吸收剂量呈现三阶段特征。在辐照初期（吸收剂量低于240 kGy），EP中弱键断裂占主导，生成的自由基不断累积，自由基浓度随吸收剂增加而上升，并且损耗角正切（ $\tan \delta$ ）在该吸收剂量区间内也表现出向低温方向略微偏移的特征；随着吸收剂量的继续增加（240~480 kGy），自由基间复合几率提高，自由基消耗加快，因此，自由基浓度反而随吸收剂量的增加呈下降趋势， $\tan \delta$ 向高温方向移动，也证实了该吸收剂量区间内EP以辐射交联反应为主；当吸收剂量进一步增加时，自由基浓度随吸收剂量增加再次呈上升趋势， $\tan \delta$ 转变为向低温方向移动，辐射裂解成为主导过程。此外，辐照产生的自由基也会与未完全固化的环氧基团反应，从而引发交联反应^[15]。除了累计吸收剂量的影响，吸收剂量率也会通过单位时间内产生的活性物种浓度影响交联或降解反应的主导性。中国科学院上海应用物理研究所季琰琰等^[43]利用超高剂量率（18 kGy/h和2 250 kGy/h）的电子束辐照EP，发现两个剂量率下EP的 T_g 均随吸收剂量的增加而降低，说明超高剂量率下EP以辐射裂解为主。

EP中丰富的化学键种类往往会导致其在辐射场中的断键类型趋于多样化，从而使其结构变化更为复杂。总的来说，EP在高能电离辐射作用下，分子内的弱键断裂会生成活性自由基，随后活性自由基不仅可以通过抽氢反应和歧化反应分别形成稳定端基和双键结构，还可以复合形成交联网络结构^[44]。

1.1.4 硅橡胶

硅橡胶（SR）因其优异的电绝缘性和热稳定

性, 被广泛应用于航天飞行器表面热控涂层、卫星太阳能电池黏结剂及舱室密封件等关键材料中。与EP类似, SR同样具有三维交联网络结构, 但其主链骨架由Si原子和O原子交替构成, C原子仅存在于侧链中。由于C和Si属同一主族, 化学性质相似, 因此SR在辐射作用下的化学结构变化与EP具有一定相似性(图3(d))。

德国慕尼黑工业大学的Menhofer等^[47]利用EPR技术证实, 聚二甲基硅氧烷(PDMS)在 γ 射线辐照下, $\equiv\text{Si}-\text{O}-$ 键和 $\equiv\text{Si}-\text{CH}_3$ 键会发生断裂, 生成 $\equiv\text{Si}^\bullet$ 、 $\equiv\text{Si}-\bullet\text{CH}_2$ 和 $\bullet\text{CH}_3$ 三种自由基。在辐解稳态产物结构分析方面, 澳大利亚昆士兰大学Hill等^[45]利用固体核磁共振(NMR)技术并结合交叉极化魔角旋转技术, 系统解析了PDMS在真空条件下经 γ 射线辐照后所产生的交联和裂解产物结构, 并定量计算出各辐解产物的辐射化学产额(G 值, 每吸收100 eV能量所产生的化学变化数), 结果表明, 辐射交联产物的 G 值(2.04 ± 0.11)显著高于辐射裂解产物的 G 值(1.3 ± 0.3), 说明吸收剂量在150 kGy范围内PDMS以辐射交联为主。然

而, 交联网络的形成会限制分子链的运动, 进而抑制分子链内或分子链间自由基的复合反应, 使辐射裂解反应逐渐占据主导地位。中国工程物理研究院核物理与化学研究所陈洪兵等^[48]发现当吸收剂量增加至350 kGy以上时, SR会转变为辐射裂解型聚合物。在此基础上, 陈洪兵等^[49]还综述了辐射类型和辐照环境等因素对SR化学结构变化的影响, 明确了辐射类型并不改变SR辐照过程中的结构演变行为, 即质子、中子或 γ 射线作用下, SR均首先以辐射交联为主, 随着辐射效应的累积, 再转变为以辐射裂解为主。刘强等^[50]则从多尺度理论计算的角度, 详细论述了SR和高能电离辐射相互作用过程中化学结构的演化规律。

SR受辐照后还会产生一系列小分子气体产物, 热裂解气相色谱-质谱联用技术是解析其结构的有效方法。中国工程物理研究院核物理与化学研究所黄玮等^[46]利用该技术分析了甲基乙烯基SR泡沫在辐照过程中释放的气体产物, 明确了该气体产物主要是氢气、甲烷和二甲硅酮。

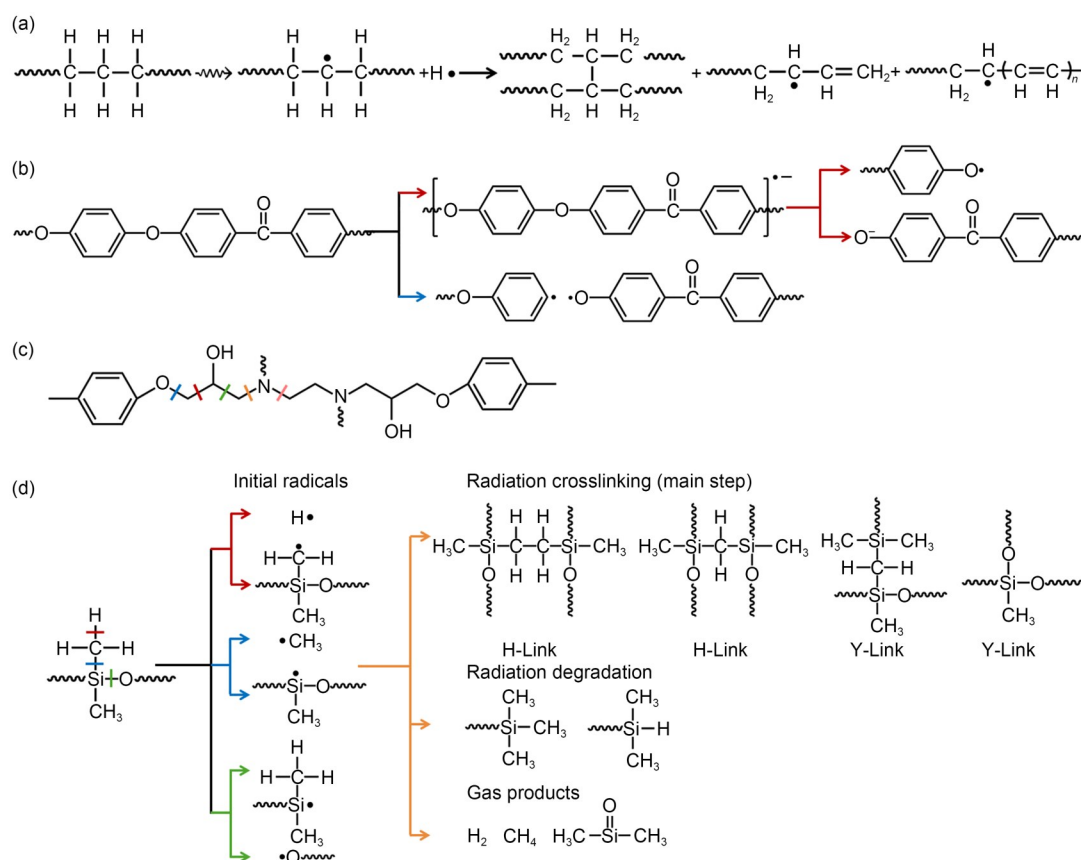


图3 各类高分子基体的辐射化学效应: (a) PE^[29]; (b) PEEK^[35]; (c) EP^[11]; (d) SR^[45-47]
Fig.3 Radiation chemical effects in various polymer matrixes: (a) PE^[29], (b) PEEK^[35], (c) EP^[11], (d) SR^[45-47]

图3归纳了上述几种航天飞行器复合材料中常见高分子基体的辐射化学效应，由于高分子基体化学结构不同，它们在高能电离辐射作用下的结构演化规律也表现出显著差异，并且该演化规律还会受到辐照环境、辐射类型等因素的影响。

1.2 高分子复合材料中常用增强纤维的结构变化

1.2.1 玻璃纤维

玻璃纤维（GF）主要化学成分为二氧化硅、氧化铝、氧化钙、氧化硼等氧化物。根据化学组成的不同，可分为E玻纤、S玻纤、硼硅玻纤等多种类型，其中S玻纤兼具比强度高、密度低、耐高温等优点，与EP复合后已用作小型固体运载火箭壳体材料^[51]。

GF内部以硅氧四面体网络结构为主，其主要化学键组成与SR相似，为Si-O键，但二者在高能电离辐射作用下的断键方式截然不同。乌兹别克斯坦科学院核物理研究所Abdukadyrova利用中子束对石英玻璃进行辐照，并通过光致发光光谱和红外光谱研究了石英玻璃内的结构变化。结果表明，中子作用后，玻璃中 $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$ 会发生异裂产生 $\equiv\text{Si}^+$ 和 $\equiv\text{Si}-\text{O}^-$ ， $\equiv\text{Si}^+$ 和 $\equiv\text{Si}-\text{O}^-$ 继续反应，最终生成 $\equiv\text{Si}-\text{OH}$ 和 $\equiv\text{Si}-\text{H}$ ，并且 $\equiv\text{Si}-\text{OH}$ 和 $\equiv\text{Si}-\text{H}$ 的含量随累积注量的增加而升高，说明随着累积注量的增大，辐射裂解产生的效应也在不断累积^[52]。此外，电离辐射的能量传递给原子，当原子动能累积到一定程度时，即可发生原子位移，形成弗伦克尔缺陷或肖特基缺陷。南京玻璃纤维研究设计院有限公司的祖群等^[53]研究了 γ 射线照射下碱土硅铝酸盐玻璃的结构变化，通过能量色散X射线光谱表征，发现由于辐照过程中氧原子的迁移，辐照后玻璃表面的O/Si比由辐照前的3.01下降至2.74。尽管玻璃受照射后会产生上述结构变化，但由 γ 射线辐照产生的位移原子数较少，因此即便在吸收剂量高达5 000 kGy，GF表面仍未观察到明显的微裂纹生成^[53-54]。相比之下，重粒子与固体相互作用不仅可以产生电离损伤，还能诱发大量原子位移。北京科技大学Shao等^[55]利用不同能量、不同注量率的质子束辐照高纯GF，发现随着注量率的增加，单位时间内的原子位移损伤加剧，GF表面出现沟壑。而质子束能量增加，有利于穿透GF，因此仅使GF表面略微粗糙化。

1.2.2 碳纤维

碳纤维（CF）相比于GF具有密度低、比强度

高、模量高和抗冲击性能优异等特点，与高分子基体复合后，所形成的复合材料广泛用作飞行器蒙皮、卫星仪器舱桁架等关键航天装备的主要结构材料^[56-57]。按照原料的不同，可以分为黏胶基、沥青基和聚丙烯腈（PAN）基CF，其中聚丙烯腈基碳纤维（PAN-CF）的综合力学性能优异且制造工艺简单，已成为最常用的CF材料。

Hill等^[58]利用EPR技术证实，室温下PAN-CF前驱体受到 γ 射线照射后会生成主链自由基 $(-\text{CH}(\text{CN})-\text{CH}^\bullet-\text{CH}(\text{CN})-)$ 、 $(-\text{CH}_2-\text{C}^\bullet(\text{CN})-\text{CH}_2-)$ 和亚胺自由基 $(-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CN}^\bullet)-\text{CH}_2-)$ 。结合Charlesby-Pinner关系，可计算出PAN-CF的辐射交联 G 值 (0.59 ± 0.07) 远大于辐射裂解 G 值 (≈ 0) ，说明辐照过程中以辐射交联反应为主。天津工业大学徐志伟等^[59]在 γ 射线对碳基材料辐射效应的综述中详细论述了CF的微观形貌、表面元素含量、结晶性以及密度随吸收剂量的变化关系。该团队还研究了电子束辐照对PAN-CF前驱体晶体结构和化学结构的影响。广角X射线散射（WAXS）结果显示，CF前驱体受照射前后径向上均存在（100）和（110）晶面的强衍射环，但（100）晶面的结晶度和晶粒尺寸随吸收剂量的增加而降低（图4（a）~（c）），表明电子束辐照主要破坏微晶完整性，而非引发显著的晶格畸变。这与PE晶区受损结果一致，晶区分子链运动受限，能量沉积易诱发局部区域辐射分解，导致晶区完整性受损。原位显微红外光谱结果显示，随着吸收剂量的增加，1 620 cm^{-1} 处C=C键吸收峰强度逐渐增加，表明氰基环化程度提高。当吸收剂量超过400 kGy时，在2 020 cm^{-1} 处出现烯酮亚胺（C=C=N）的特征峰，亚胺自由基 $(-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CN}^\bullet)-\text{CH}_2-)$ 可能与主链自由基复合生成了交联结构（图4d）^[60]。北京化工大学Liu等^[61]利用电子束辐照PAN，同样在2 020 cm^{-1} 处观察到烯酮亚胺（C=C=N）的振动峰，并在1 668 cm^{-1} 处检测到了HC=N-N=CH的吸收峰，说明氰基（C≡N）受照射后，分子链间亚胺自由基 $(-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CN}^\bullet)-\text{CH}_2-)$ 复合最终形成了交联结构。东华大学赵卫哲^[62]在空气中对CF前驱体进行 γ 射线辐照，辐照后CF在二甲亚砷和75%（质量分数）的硫酸溶液中的溶解度均随着吸收剂量的增加而降低，说明空气中辐照同样可以得到交联结构，红外光谱（FT-IR）表征结果证实了辐照过程中CF中

生成了含氧交联结构（如C-O-C）。为模拟空间环境中复杂的辐射类型对CF结构的影响，哈尔滨工业大学王影^[63]利用带电粒子空间辐照综合模拟器

研究了电子和质子束综合辐照对CF的影响，结果表明辐照前后衍射峰高度重合，CF未发生晶格畸变，与单一电子束辐照情况一致。

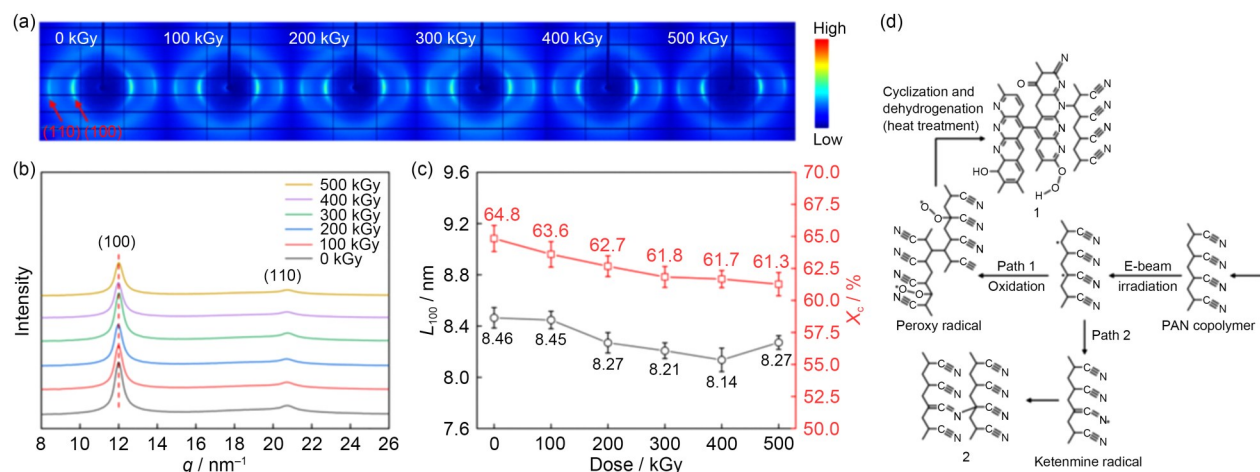


图4 (a) 电子束辐照PAN-CF前驱体的2D-WAXS图；(b) (100)晶面的结晶度随吸收剂量变化关系；(c) (100)晶面晶粒尺寸随吸收剂量的变化关系；(d) 电子束辐照下PAN-CF的分子结构演变示意图^[60](彩色见网络版)

Fig.4 (a) 2D-WAXS diagram of the PAN-CF precursor irradiated by electron beam; (b) crystallinity of the (100) plane as a function of absorbed dose; (c) crystallite size of the (100) plane as a function of absorbed dose; (d) the schematic diagram of the radiolysis mechanism of PAN-CF under electron beam irradiation^[60](color online)

1.2.3 有机纤维

有机纤维（OF）是指以有机高分子聚合物为原料，经纺丝成形及后处理工艺制得的一类纤维材料。常用作增强纤维的OF有芳纶（Aramid）纤维、聚对苯撑苯并二噁唑（PBO）纤维、超高分子量PE纤维、壳聚糖纤维等。与GF和CF等无机纤维相比，OF不仅比强度和抗冲击性能优于CF，还兼具GF优异的电绝缘性与低介电特性。OF与高分子基体复合后，所得复合材料适用范围广，可用于运载火箭整流罩夹层、卫星天线电缆等^[64-65]。

OF内部的化学键组成与高分子基体相似，因此在高能电离辐射作用下，两者的辐射化学行为基本一致，即均会发生辐射交联与辐射裂解反应。以Aramid纤维为例，在电子束辐照后，聚对苯二甲酰对苯二胺类Aramid纤维主链酰胺基团的N-H键和C-N键断裂，FT-IR光谱中可观察到N-H键变形振动峰和C-N键伸缩振动峰的振动强度随吸收剂量的增加而逐渐减弱^[66]。特性黏数的变化表明，辐照初期对位芳杂环共聚酰胺类Aramid纤维中以辐射交联反应为主，此时分子链运动受限，特性黏数随吸收剂量增加呈上升趋势。随着吸收剂量继续增加，辐射裂解反应逐渐占主导地位，纤维分子链断裂，特性黏数随之下降^[67]。对于PBO纤维，高能电离辐射作用下，噁唑环的化学

键易断裂。哈尔滨工业大学张春华等^[68]利用NMR技术研究了PBO寡聚物在 γ 射线辐照后的结构变化，发现辐照后PBO中噁唑环的N-C键发生了断裂。该校王芳等^[69]则发现，PBO纤维中噁唑环的C-O-C键也会发生断裂。

在纺丝过程中，OF的分子链会沿纤维轴向取向，形成晶区，因此高能电离辐射对晶区的影响也值得重点关注。现有研究普遍认为， γ 射线或电子束照射后，OF的晶粒完整性会受到影响，但晶面间距和晶型几乎不发生改变^[69-71]。华中科技大学Chen等^[66]研究发现，凯夫拉纤维在辐照前后衍射峰位置保持不变，仅纤维晶粒尺寸出现了轻微波动。这主要归因于电子束辐照在晶区和非晶区的双重效应，一方面，晶区发生降解会破坏晶体完整性，导致有效相干散射区域缩减，晶粒尺寸降低；另一方面，非晶区分子链降解，削弱了非晶弥散峰，促使衍射峰半高宽变窄，使得谢乐公式计算得到的晶粒表观尺寸增大。晶区与非晶区分子链降解的共同作用，最终导致晶粒尺寸呈现非单调波动。

上述研究结果表明，不同类型增强纤维在辐照环境下的化学结构演化行为存在显著差异，GF以辐射裂解和原子位移缺陷累积为主；CF表现出明显的区域依赖性，结晶区以辐射裂解为主，非晶区则以辐射交联为主导效应；OF化学组成多元

化, 因此, 其辐射化学行为是三类增强纤维中最复杂的。这些辐射效应的差异将直接影响复合材料的界面相容性及整体力学性能的辐射稳定性。

1.3 高分子复合材料中界面的结构变化

纤维增强型高分子复合材料中, 纤维-基体界面的相互作用对复合材料性能至关重要。在高能电离辐射作用下, 增强纤维和基体的化学结构和物理性质均会发生变化。大量高分子裂解产生的自由基进攻主链导致降解或自由基复合产生交联, 空气中的氧气参与反应会引入含氧极性基团, 从而影响界面相互作用。而化学结构的改变, 特别是裂解和交联反应, 会使聚合物基体体积膨胀或收缩^[7], 产生的内应力容易在界面处形成应力集中。当内应力超过界面结合强度时, 就会引发界面脱黏, 甚至出现微裂纹, 并沿纤维方向进一步扩展。即使内应力没有超过界面结合强度, 复合材料在受到外力作用时, 也会因内应力积累造成界面剪切强度下降。界面处的辐射损伤, 不仅涉及原子/分子尺度的化学结构变化, 还涉及由此产生的微观物理结构变化, 最终影响复合材料宏观性能。因此, 复合材料界面处的多尺度损伤机制远比单独的高分子基体和增强纤维更复杂^[54, 72-74]。

界面脱黏是辐射导致复合材料物理损伤最典型的形式之一, 通过扫描电子显微镜 (SEM) 可直接观察到纤维表面与基体的分离, 出现明显的空隙区域。北京科技大学郑莉芳等^[75]的研究表明, 玻璃布/EP层压板在 γ 辐照后, 界面出现了明显的分离, 且当吸收剂量从20 kGy增加至200 kGy时, EP碎片化的趋势也越明显。

与GF相比, CF中的C原子更易与辐解产生的活性自由基反应, 引入新的基团, 从而改变界面相互作用。韩国全北大学Yoo团队^[76-77]研究发现, CF/高密度聚乙烯 (HDPE) 复合材料经电子束 (5 MeV) 辐照400 kGy后, 不仅HDPE基体会发生交联, CF和HDPE分子链上还会生成羟基、羰基和羧基等含氧极性官能团, 通过氢键作用增强CF与HDPE基体之间界面相互作用。

热固型EP与CF的复合材料经 γ 辐照后, 通常在较低吸收剂量下与PE类似, CF上的C原子和树脂基体在电离辐射作用下发生反应, 生成C-O键和C=O键, 有助于增强CF与EP界面的结合能力,

从而改善CF与EP基体之间的界面黏附性。而在较高剂量下, 裂解反应占主导, 界面相互作用再次减弱, 界面处及基体内部会出现大量的微观缺陷, 韧性断裂亦会向脆性断裂转变。天津工业大学Liu等^[23]对三点弯曲试验后的CF/EP复合材料断面微观形貌的表征证实了这一结论。未辐照CF/EP复合材料断面处纤维表面几乎没有EP残留。当吸收剂量为2 000 kGy时, 界面相互作用增强导致大量EP残留物在CF表面。然而, 当吸收剂量进一步增加到7 000 kGy和20 000 kGy时, 界面作用减弱令CF表面变得清晰。此外, 在20 000 kGy吸收剂量下, 不仅CF表面, 树脂断口也非常光滑, 类似于脆性断裂行为, 说明辐射引起的纤维和基体特性变化导致了纤维-基体界面退化, 令复合材料严重受损。超声C扫描声学检测成像也证实了这一点, 当吸收剂量为2 000 kGy时, 缺陷范围较未辐照的复合材料减小, 而当吸收剂量升至7 000 kGy和20 000 kGy时, 缺陷范围明显增大。后续研究通过SEM和微计算机断层扫描技术证实, 除了界面脱黏导致的基体剥离, γ 辐照还会产生沿纤维方向发展的界面裂纹^[78]。吸收剂量为1 000 kGy时, 界面微裂纹引起的缺陷体积较未辐照的CF/EP增加近80%。扬州大学薛玉雄团队^[23]和曹荣幸团队^[79]的联合研究结果与Liu^[79]一致, 较低吸收剂量时 (<3 000 kGy), CF与EP相容性提升, 断面处CF排列有序, 纤维表面均匀地附着树脂, CF剥离后的树脂表面呈现出浅沟槽痕迹, 这表明界面具有较高的结合强度。而当吸收剂量大于5 000 kGy时, CF大量暴露在断面处, 表面出现明显的微裂纹和损伤, 同时EP基体内形成大量微观缺陷, 而CF和EP界面处则有明显的分离迹象, 附近的树脂破碎现象相当明显, 呈不规则块状结构。吸收剂量达10 000 kGy时, 复合材料结构破坏严重, CF与EP几乎没有完整的界面连接。

高分子复合材料中, 界面处辐射损伤尤为复杂。辐照会导致基体与纤维间的分子链发生交联或裂解, 既有可能提高界面相容性, 亦有可能诱发界面脱黏与微裂纹缺陷。另一方面, 在含氧气氛下, 界面处生成极性官能团, 同样有助于增强界面相容性。然而, 界面处的辐射响应机制复杂、结构表征方法有限, 使得精准定量描述界面退化程度仍存在较大挑战性。

2 辐射对高分子复合材料宏观性能的影响

高能电离辐射诱导高分子基体、增强纤维和界面原子/分子尺度的结构变化,进而驱动微观结构改变,微观结构演化则直接决定复合材料宏观性能的走向。辐照气氛、吸收剂量和吸收剂量率等因素也会显著影响辐射化学效应,并调控材料的宏观性能。

2.1 高分子复合材料中常用基体的宏观性能变化

辐射场中,高分子基体辐射交联与辐射裂解的主导性差异,会导致材料力学性能呈现截然不同的变化趋势。陈洪兵^[80]在已出版专著《有机材料的辐射效应》中系统总结了多种高分子基体的辐射效应。中国工程物理研究院流体物理研究所孙安苇等^[81]也对EP的力学、导热、电气等宏观性能与吸收剂量的变化关系进行了详细综述。以力学性能为例,在 γ 射线辐照初期,EP中辐射交联为主导反应,交联网络的形成可使弯曲强度有所提升;随着吸收剂量进一步增加,辐射裂解逐渐成为主导反应,此时EP的弯曲强度呈下降趋势^[42]。日本大阪大学Nishiura等^[82]也发现,随着吸收剂量的增加(1 000~5 000 kGy),树脂基体内裂解损伤持续累积,断链微区逐渐转化为裂纹缺陷,阻碍能量在材料中的传递,使得拉伸强度等力学性能劣化严重。此外,EP内部具有三维交联网络,辐射裂解反应会令EP内部交联网络的不均匀性增强,使EP的屈服应变随吸收剂量的增加逐渐减小^[83]。法国材料、工程与科学实验室的Vignoud团队^[84-85]利用1.5 MeV电子束辐照不同胺类固化剂的双酚A型EP也观察到了这一现象。

此外,辐照气氛也会对材料的交联和裂解反应产生影响。中国科学技术大学焦力敏等发现氧气分子会显著抑制辐射交联反应,使得材料在空气中辐照后的拉伸强度比在氮气中辐照后的拉伸强度低12 MPa左右^[15]。在含氧气氛中,吸收剂量率是影响材料力学性能的一个关键辐照参数。吸收剂量率低,氧气在材料内充分扩散,与材料内辐解产生的自由基反应生成过氧基团,加剧材料氧化降解。捷克核研究所Placek等^[14]研究了空气气氛下,不同吸收剂量率对聚氯乙烯/PE力学性能的影响,结果表明低吸收剂量率(7 Gy/h)时氧气扩散充分,聚氯乙烯/PE内部的辐射损伤和氧化损

伤效应叠加,使聚氯乙烯/PE断裂伸长率下降更为显著。在超高吸收剂量率(18 kGy/h和2 250 kGy/h)下,氧气扩散不充分,材料的辐射化学行为与真空或惰性气氛下相似,吸收剂量达1 000 kGy时,EP拉伸强度下降约20 MPa(图5(a))^[43],劣化程度与焦力敏等^[15]在氮气气氛中辐照的EP相符。

SR与交联型高分子EP表现出相似的力学性能变化趋势。随着吸收剂量的增加,SR的拉伸断裂强度和弹性模量逐渐增加,断裂伸长率逐渐减小;当吸收剂量高于350 kGy时,辐射裂解反应逐渐占主导,使得SR拉伸断裂强度呈下降趋势^[88]。但SR的某些力学性能也会随吸收剂量的增加呈单调变化趋势。中国科学技术大学吴志豪等^[86]的研究表明,随着吸收剂量的增加,SR的强度逐渐增大,100%定伸应力呈上升趋势(图5(b))。

为了获得高分子材料辐射损伤行为的精准预测,研究者常采用本构模型对材料的力学性能进行数学描述^[50, 89-90]。美国布鲁克海文国家实验室的Maiti等^[87]以Tobolsky双网络模型为基础,推导出 γ 射线辐照下TR-55 SR的应力-应变本构关系。该模型以一阶Ogden不可压缩超弹性模型公式(式1)为基础,认为受照射后SR的总应变能等于原始交联网络应变能与辐射诱导生成交联网络应变能之和,从而建立起双网络应变能函数,并推导出永久形变(W ,式2)、工程应变(σ ,式3)和工程应力(P ,式4)随吸收剂量的变化关系。在该唯象本构模型中, W 由老化后应变和双网络模量比共同决定,其数值随吸收剂量的增加而增大;工程应力-应变关系通过剪切模量建立与吸收剂量的关系,在0 kGy~170 kGy范围内,该模型预测的应力-应变响应与实验结果吻合良好(图5c),根据相关关系式(式5)拟合得到的平均剪切模量也随吸收剂量增加而增加(图5d)。在此基础上,根据某一吸收剂量范围内平均剪切模量变化值与SR交联密度变化值之间的对应关系(式6),可建立宏观应力-应变响应模型与微观交联结构变化的理论演化关系。

$$W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 | \mu, \alpha) = \frac{2\mu}{\alpha^2} [\lambda_1^\alpha + \lambda_2^\alpha + \lambda_3^\alpha - 3] - p(\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 - 1) \quad (1)$$

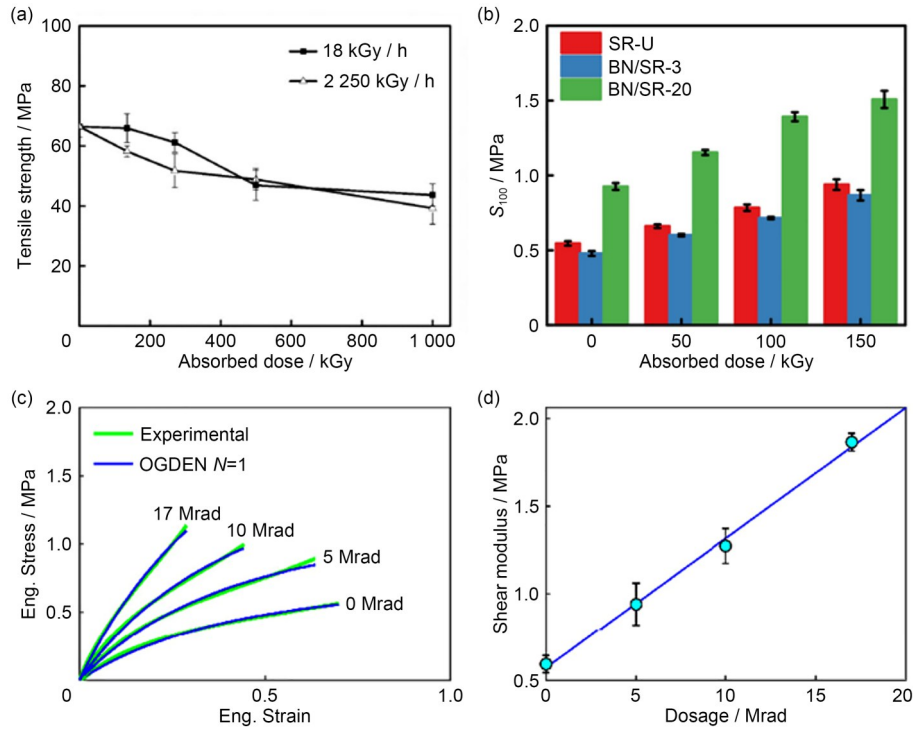


图5 (a) 电子束辐照下EP的拉伸性能随吸收剂量的变化关系^[43]; (b) SR (SR-U)在不同吸收剂量 γ 射线辐照后的100%定伸应力^[86]; (c) TR-55 SR在零应变不同吸收剂量下的应力-应变响应模型和实验结果对比; (d) TR-55 SR模型预测的剪切模量随吸收剂量的变化关系^[87](彩色见网络版)

Fig.5 (a) Tensile strength of EP as a function of absorbed dose under electron beam irradiation^[43]; (b) 100% modulus of SR (SR-U) at different absorbed doses under γ ray irradiation^[86]; (c) comparison of stress-strain response models and experimental results for TR-55 SR under zero strain at different absorbed doses; (d) the variation of shear modulus of TR-55 SR predicted by model with absorbed doses^[87] (color online)

$$W_{2net}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \mu_1, \alpha_1, \mu_2, \alpha_2 = \frac{2\mu_1}{\alpha_1^2} [\lambda_1^\alpha + \lambda_2^\alpha + \lambda_3^\alpha - 3] + \frac{2\mu_2}{\alpha_2^2} [(\lambda_1 \lambda_a - 1)^{\alpha_2} + (\lambda_2 \lambda_a / 2)^{\alpha_2} + (\lambda_3 \lambda_a / 2)^{\alpha_2} - 3] - p(\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 - 1) \quad (2)$$

$$\sigma_{2net} = 3\mu_1 \ln \lambda_1 + 3\mu_2 \ln (\lambda_1 / \lambda_a) \quad (3)$$

$$P_{2net} = 3\mu_1 \lambda_1^{-1} \ln \lambda_1 \quad (4)$$

$$\mu(D) = \mu_0 + kD \quad (5)$$

$$\Delta\mu = Ck_b T \Delta v \quad (6)$$

式中： $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 是三个拉伸方向的拉伸比； μ 为剪切模量； α 为Ogden模型的材料常数， p 为拉格朗日乘子； μ_0 为辐照前材料的剪切模量； D 为吸收剂量； C 为与材料相关的无量纲常数； k_b 为玻尔兹曼常数； Δv 为材料受照射后交联密度的变化值。

对于上述常见高分子基体，其力学性能演变由微观结构变化决定。若交联为优势反应，交联网络的生成有利于能量均匀分散，从而提升力学强度；若裂解占优，强度、屈服应变等性能下降。

此外，辐照过程中氧气的参与会加剧氧化降解，所导致的损伤效应在低吸收剂量率时尤为重要。

2.2 高分子复合材料中常用增强纤维的宏观性能变化

作为高分子复合材料中的主要承重部分，增强纤维在高能电离辐射作用下的损伤行为，一方面会使其本身的力学承载能力下降，另一方面会通过改变纤维与基体间的界面结合性能，进而影响复合材料的整体力学行为。不同种类的增强纤维对辐射的响应机制各异，在辐照后的宏观力学性能变化同样也表现出不同的趋势。

早期研究已表明，高能电离辐射会使GF发生辐射裂解和原子位移缺陷，这些辐射效应的持续累积会导致材料微观尺度损伤逐步拓展，进而影响GF的宏观性能。祖群等人研究了GF在5 000 kGy的 γ 射线照射后拉伸性能的变化，结果表明，辐照后GF的拉伸断裂强度几乎不变，但GF织物经过拉伸性能测试后出现明显的分层现象，说明纤维间的界面结合力显著下降^[53]。然而，现

有研究多集中于 GF 热氧老化后的力学性能变化, 对于其在辐射场中的宏观力学性能变化规律关注较少。

随着 CF 在航天飞行器中的应用从次承力结构材料拓展至主承力结构件材料, 其力学性能研究也不断深入^[91]。中国科学院兰州化学物理研究所田军等^[92]利用 γ 射线对 PAN-CF 进行辐照, 其拉伸强度和杨氏模量 (E) 均随吸收剂量增加呈现先上升后下降的趋势。然而, 东华大学 Xiao 等^[93]却发现, 吸收剂量在 30 kGy 以下时, E 会迅速升高, 30~300 kGy 范围内, E 增长速率变缓。这是由于不同吸收剂量范围内, 主导 E 变化的机制不同。低吸收剂量下 (0~30 kGy), CF 中相邻石墨层会发生层间共价交联, 导致 E 迅速升高; 高吸收剂量下 (30~300 kGy), 层间交联程度趋于饱和, 此时晶面间距逐渐减小成为 E 缓慢升高的主要原因。他们还通过 Ruland-Northolt 均匀应力模型有效描述了高度取向纤维材料宏观模量、层间剪切模量和晶粒取向的定量关系 (式 (7) ~ (8)), 该模型预测的层间剪切模量在 0~30 kGy 会快速增长, 30 kGy 后趋于稳定, 与 CF 拉曼光谱的 I_D/I_G 变化规律吻合。在该模型基础上所建立的 E 与吸收剂量的数学关系 (式 9) 和实测值高度吻合。在此基础上, 该课题组还利用 Reynolds-Sharp (式 10) 和 Griffith 半经验模型 (式 11) 建立了 300 kGy 以内 CF 拉伸强度随吸收剂量的变化关系预测模型 (式 12), 所得到的预测曲线与实验值吻合度高。

$$\frac{1}{E_{\text{corr}}} = \frac{1}{e_1} + \frac{\langle \cos^2 \zeta \rangle - \langle \cos^4 \zeta \rangle}{g} \quad (7)$$

$$E_{\text{corr}} = \frac{\rho_g \times d_g}{\rho \times d_{002}} \times E \quad (8)$$

$$E = \frac{0.83}{0.01 + \frac{0.005321}{4.893[7.13 - \exp(-0.104D) - 10.02]}} \quad (9)$$

$$\sigma \sin \phi_m \cos \phi_m = g \cdot \epsilon_c \quad (10)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma_a}{\pi C}} \quad (11)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{EP_\gamma}{\pi [\sqrt{P_s(x-30)} + P_G]}} \quad (12)$$

式中: E_{corr} 为校正后的模量 (消除密度和层间距影响), e_1 为石墨单晶垂直于 c 轴的模量, $\langle \cos^2 \zeta \rangle$ 和 $\langle \cos^4 \zeta \rangle$ 是 X 射线衍射谱拟合得到的取向参数, g 为层间剪切模量, $\rho_g = 2.26 \text{ g/cm}^3$, $d_g = 0.3354 \text{ nm}$, ρ 为实测纤维密度, d_{002} 为 (002) 晶面实测层间距,

E 为实测杨氏模量, D 为吸收剂量, γ_a 为表面能, C 为临界缺陷尺寸, P_G 为 30 kGy 时的初始缺陷尺寸, P_s 为缺陷增长速率系数。

OF 的辐射损伤行为与高分子基体的损伤行为相似, 力学性能在不同吸收剂量下表现出不同的变化趋势。低吸收剂量辐照 (通常 <100 kGy) 时, OF 分子链的交联反应可以增加交联点密度, 减少分子链滑移的可能性, 使纤维的拉伸强度小幅提升或保持稳定, 弹性模量略微提高, 断裂伸长率呈下降趋势。而在高吸收剂量辐照 (通常 >100 kGy) 时, 降解反应占主导, 高分子主链断裂和分子量下降导致纤维脆化, 拉伸强度和断裂伸长率将显著下降^[94-96]。哈尔滨工业大学谢非^[67]在氮气气氛下辐照对位芳杂环共聚酰胺类 Arimad 纤维, 并研究了辐照对其力学性能的影响, 结果表明吸收剂量率对于此类 Arimad 纤维的裂解和交联有着显著影响, 当吸收剂量率为 6 kGy/h 时, Arimad 纤维内部辐射交联反应占主导, 此时, Arimad 纤维的单丝拉伸强度较未辐照的提升了 8.4%, 而当吸收剂量率高于 10 kGy/h 时, 纤维内辐射裂解反应为主导反应, 此时, 纤维的单丝拉伸强度下降了 24.2%。惰性气氛和空气气氛中剂量率效应对高分子辐射损伤的影响趋势截然相反^[14], 证明氧气参与的反应对损伤机制具有至关重要的影响。

2.3 高分子复合材料的宏观性能变化

高分子基体、增强纤维、以及界面处的结构变化, 均会影响复合材料宏观性能。尤其是界面处的结构损伤机理十分复杂, 涉及多尺度的化学、物理过程。然而, 现有研究多侧重于复合材料在不同条件下性能退化规律及机理的定性分析, 缺乏能够定量预测复合材料性能的系统理论。

纤维-基体界面的相互作用对复合材料性能至关重要。低吸收剂量 γ 射线辐照时, 热固型 EP 高分子基体主要发生交联反应, 分子链之间形成更多的化学键, 并且当空气存在时, 纤维表面还会生成极性官能团, 这些变化有助于改善界面结合性能, 提高界面剪切强度 (IFSS) 和层间剪切强度 (ILSS)^[97-98]。在高吸收剂量 γ 射线辐照下, 树脂基体主要发生裂解反应, 同时纤维与基体表面的化学键也会断裂, 导致界面结合性能逐渐劣化, 直至失效^[99-100]。中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所张艳华等^[16]研究了 γ 射线辐照对

Aramid 纤维增强 EP 复合材料 (AFRC) 界面性能的影响。随着吸收剂量增加, AFRC 的 ILSS 和 IFSS 均逐渐增加, 并在 500 kGy 时达到最大值。当吸收剂量进一步增加时, AFRC 中降解反应占据主导地位, 分子链大量断裂, 生成小分子产物, 同时纤维表面的化学结合层被破坏, 界面脱黏加剧, 微裂纹增多, 界面结合性能显著下降, 导致 ILSS 和 IFSS 逐渐降低。徐志伟^[23, 78]、薛玉雄^[79]、曹荣幸^[79]和塞尔维亚核科学研究所的 Sekulic^[101] 在各自的研究中均证实了辐照后 CF/EP 复合材料的拉伸强度、弯曲强度、弹性模量和层间断裂韧性等宏观力学性能退化与界面损伤密切相关。低剂量辐照后, 由于含氧极性基团增加, 界面相互作用增强, 上述宏观性能会不同程度的有所提升。而吸收剂量增加到一定程度, CF/EP 复合材料微观结构上可观察到明显的界面脱黏、基体剥离、界面裂纹, 此时, 复合材料宏观性能出现大幅下降。

此外, 界面的存在使复合材料整体本构模型的建立趋于复杂化。中国工程物理研究院化工材料研究所 Shao 等^[102] 借助低场 NMR (LF-NMR) 技术, 并基于非高斯链统计建立的 Arruda-Boyce 八链模型, 构建了适用于气相二氧化硅填充 SR 的扩展双网络本构模型 (式 (13))。首先通过 LF-NMR 鉴定了辐射诱导界面层和 SR 基体分子链弛豫时间的差异, 并根据信号强度定量分析了基体中界面层比例随吸收剂量的变化关系 (式 (14)); 随后, 将填充橡胶的应变能分解为橡胶化学交联网络与填料-橡胶物理吸附网络的叠加, 并引入拉伸诱导的填料网络渐进损伤函数 (式 (15)), 建立扩展双网络本构模型 (式 (13))。将该本构模型和实验测得的循环加载-卸载曲线进行拟合, 得到填料和 SR 之间有效分子链段长度 (M) 和损伤演化指数 (z), 对不同吸收剂量下 M 和 z 进行拟合得到式 16 和 17。该本构模型在拉伸比小于 1.85 的循环加载-卸载工况下, 对工程应力-应变曲线展现出优异的预测精度 ($R^2 > 0.999$, 图 6 (a))。

$$\delta = 2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) = \mu_1 \sum_{i=1}^3 \frac{c_i}{N^{i-1}} \times i \times I_1^{i-1} + \mu_2 e^{-z} \sum_{i=1}^3 \frac{c_i}{M^{i-1}} \times i \times I_1^{i-1} \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \quad (13)$$

$$A = 1.205 \times \left(1 - e^{-\frac{D}{229.5}} \right) + 7.639 \quad (14)$$

$$\mu_2(\varepsilon) = \mu_2 e^{-z\varepsilon} \quad (15)$$

$$M = -2.614 \times \left(1 - e^{-\frac{D}{229.5}} \right) + 2.734 \quad (16)$$

$$z = 8.973 \times 10^{-4} D + 0.4513 \quad (17)$$

式中: W 是 SR 总应变能; I 为第一应变不变量; μ_1 为 SR 网络初始剪切模量; N 为 SR 网络平均分子链长度; c_i 为 Arruda-Boyce 级数展开系数 ($c_1=1/2$ 、 $c_2=1/20$ 、 $c_3=11/1050$); μ_2 为填料网络初始剪切模量; M 为填料网络的平均分子链长度; λ 为拉伸比; A 为界面层自由感应衰减 (FID) 信号占总体系 FID 信号的百分比; D 为吸收剂量; z 为损伤演化指数; ε 为拉伸应变。

除了界面损伤, 复合材料的基体、纤维损伤也会影响其宏观性能, 令实际情况更为复杂。Park 等^[76] 研究了 CF/HDPE 复合材料 (CFRTP) 在电子束辐照后 (400 kGy), 不同吸收剂量率下, PE 基体、CF 及其复合材料的拉伸强度与复合材料含氧基团、基体-纤维间氢键相互作用的关系, 结果图 6 (b) 所示。剂量率降低, PE 基体的拉伸强度降低, 而 CF 的拉伸强度增加; 扩散至基体内部的氧分子可以充分参与反应, 复合材料的含氧基团增多, CF 和 PE 间的氢键等相互作用增强, 最终, PE 基体、CF 和界面处截然不同变化规律使复合材料在吸收剂量率为 6.8 Gy/s 时, 拉伸强度有极大值。

上述研究揭示了高分子复合材料辐射损伤研究中的一个重要的现象——剂量率效应, 即在总吸收剂量相同的条件下, 采用不同的剂量率进行辐照, 材料辐照后的性能大相径庭。高剂量率辐照时, 材料内的自由基浓度更高, 使自由基进攻高分子链生成链自由基的速率加快, 不同高分子链上自由基复合概率也随之增大, 从而加快聚合物交联网络的生成。此外, 氧气分子与自由基反应生成过氧自由基也会进攻高分子链导致氧化裂解。但是高剂量率下, 氧气的消耗速率也加快, 难以扩散至材料内部, 从而减轻了氧化降解的损伤。最终, 三者的竞争反应决定了宏观上复合材料是以交联为主还是裂解为主。低剂量率辐照时, 材料内自由基浓度低, 氧气分子在材料内扩散也更充分, 通常会使氧化裂解更为严重, 宏观上呈现出更明显的性能退化。在 PAN、XLPE、CF 增强 HDPE 树脂等材料中均观察到了这一现象^[76, 103-104]。

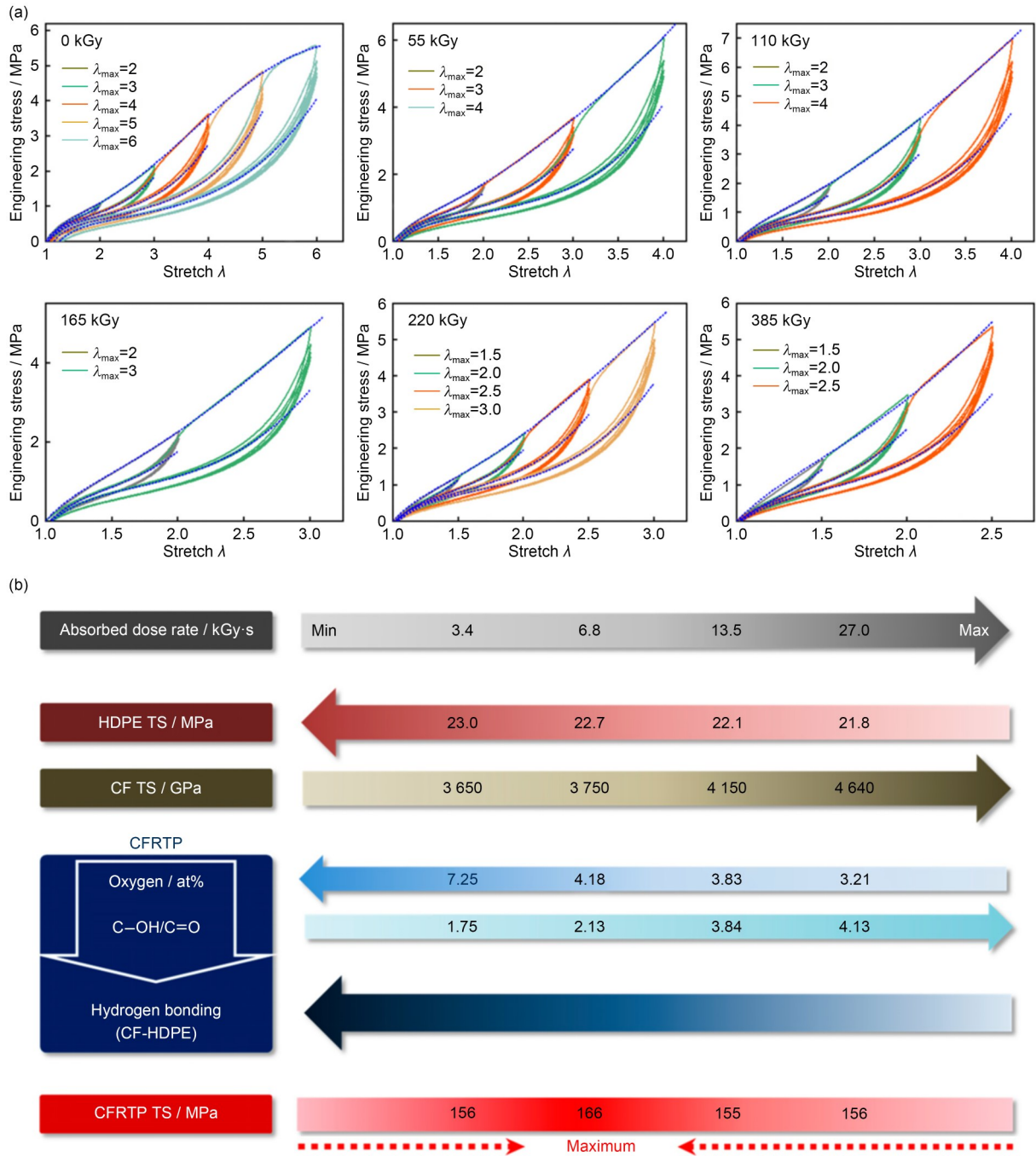


图6 (a)不同辐射剂量下的循环加载-卸载曲线,其中实线为实验数据,不同颜色为不同最大拉伸比(λ_{max})下的循环加载-卸载曲线,短虚线为本构模型拟合结果^[102]; (b)CFRTP的拉伸强度、HDPE基体和CF拉伸强度以及界面氢键相互作用随吸收剂量率的变化关系^[76]

Fig.6 (a) Cyclic loading-unloading curves under different radiation doses, where the solid line represents the experimental data, different colors represent the cyclic loading-unloading curves with different λ_{max} , and the short dotted line represents the fitting results through the constitutive model^[102]; (b) tensile strength of CFRTP, HDPE and CF, and interfacial hydrogen bonding interaction at different absorbed dose rate^[76]

3 空间因素与辐射场耦合对高分子复合材料损伤的影响

航天飞行器在轨运行期间所处空间环境复杂,不仅包含辐射场,还会受到氧分子解离形成的原子氧、太阳辐射引起的温度场周期性变化等因素

影响^[105-106]。这些因素与辐射场耦合,加剧了材料宏观性能退化,缩短了其服役寿命,严重影响航天飞行器结构安全。因此,为更加深入地理解高分子复合材料在真实空间环境中的辐射损伤行为,需要综合考虑辐射场与其他空间因素的耦合效应,

以揭示多场耦合作用对材料化学结构和宏观性能的影响规律。

3.1 原子氧与辐射场的耦合作用

LEO内大气环境主要由氮气、氧气、氦、氩、氢和氧原子组成^[107-109]。早在1996年,美国国家航空航天局的Silverman就在“LEO航天飞行器材料选择指南”报告中指出,原子氧是对航天飞行器影响最为显著的空间环境因素之一^[110]。航天飞行器在LEO中以8 km/s的速度飞行时,原子氧的碰撞能量可达4~5 eV,其较高的动能与强氧化性共同作用,使材料表面在持续轰击下发生氧化与分解反应,进而导致质量损失、表面粗糙化及宏观性能的劣化。

针对原子氧的损伤效应,哈尔滨工业大学陈磊研^[111]究了原子氧作用下PBO纤维/EP复合材料宏观性能的变化。结果表明,在原子氧注量率为 $2.1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、累积注量为 $2.1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ 的条件下,PBO纤维表面粗糙度略有增加,单丝拉伸强度仅下降1.8 GPa;相比之下,EP基体受侵蚀更为严重,表面出现大量微裂纹。此外,原子氧还会通过基体表面微裂纹渗透扩散至纤维-基体界面区域,削弱界面结合能力,导致复合材料的界面剪切强度显著下降,降至辐照前的60%。日本大阪大学Kinoshita等^[112]利用石英晶体微天平原位测量了4.7 eV原子氧(累积注量 $3.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$)轰击下聚酰亚胺(PI)薄膜的质量变化。结果表明,随着原子氧的轰击,PI薄膜质量呈现先增加后稳步下降的趋势。这是因为轰击初期,原子氧与PI薄膜表面聚合物链结合形成含氧基团,导致质量增加;随原子氧累积注量增加,PI表面氧化层逐渐形成,此时与原子氧结合的C原子以CO/CO₂形式脱离,导致PI薄膜质量下降。此外,基于Langmuir-Hinshelwood机理的动力学计算表明,PI薄膜氧化区域的脱碳几率比非氧化区域高出两个数量级,进一步证实了原子氧对PI的侵蚀以氧化损伤为主导。与此同时,日本宇宙航空研究开发机构Goto和东京大学Yamashita^[113-114]利用FT-IR和正电子湮没寿命谱证实了原子氧轰击下聚合物氧化层的存在。

原子氧与辐射场的耦合效应不仅取决于两者的单独作用,还与二者的作用顺序密切相关。日本名古屋工业大学Nishida等^[115]依次采用电子束与原子氧照射聚酰亚胺基碳纤维增强复合材料

(CFRP),发现CFRP的弯曲模量等力学性能持续劣化。然而,北京师范大学Zhang等^[116]研究发现,将聚四氟乙烯(Teflon)预先暴露于原子氧环境后再进行电子束辐照(10 keV, 30 s),其表面并未出现单独电子束辐照时特有的空洞形貌。结合分子动力学模拟对原子氧作用下Teflon分解行为的分析可知,由于Teflon分子链具有超共轭效应和独特的螺旋结构,原子氧撞击时所提供的能量并未导致其主链C-C键断裂,而是引起分子链的整体迁移,从而使Teflon表面结构状态发生改变。这一机制的提出,有助于理解为何原子氧预处理能提升Teflon的耐电子束辐照性能。

3.2 温度与辐射场的耦合作用

航天飞行器在LEO运行期间会周期性进出地球阴影,当航天飞行器运行进入地球阴影区时,会向周围环境释放热量,导致表面温度降低;当运行出地球阴影区时,会吸收太阳辐射能量,令表面温度升高。因此,在航天飞行器用高分子复合材料的服役过程中,需充分考虑温度场周期性变化所带来的影响。对于纤维增强树脂基复合材料而言,一方面,纤维与树脂基体热膨胀系数的差异会在材料内部引发热应力,长期处于周期性变化温度场中,应力累积会导致树脂基体产生微裂纹或引发纤维-基体界面脱黏^[117];另一方面,高温环境可为分子链断裂提供足够的活化能,从而诱发树脂基体的热降解反应^[104]。在上述两种损伤机制作用下,材料的力学性能与物理性能逐渐退化,最终影响其整体服役可靠性。

温度场与辐射场耦合作用下,高能电离辐射为分子链断裂提供主要的能量来源,而高温则促进分子链运动,二者共同作用显著影响聚合物的辐射损伤行为。日本早稻田大学Ohki团队^[118-120]研究了高温条件下,一系列聚合物在 γ 射线作用下的辐射损伤行为。结果表明,对于辐射裂解型聚合物,高温会加速裂解反应进程,使其力学性能迅速劣化。例如在温度为373 K时,以80 kGy的吸收剂量(吸收剂量率为100 Gy/h)对交联PE进行 γ 射线辐照,其拉伸强度仅为原始强度的61%,压痕模量只有轻微损失;但当温度升至428 K时,拉伸强度仅为原始强度的22%,压痕模量也仅剩30%^[118];对于辐射交联型聚合物,辐照温度升至材料 T_g 以上,有利于分子链段运动,从而促进了分子链的交联反应^[34]。

重带电粒子辐照与温度场的耦合作用同样会导致材料的力学性能发生比单一辐射场中更为严重的劣化。哈尔滨工业大学张丽新等^[121-122]采用质子束对SR进行辐照(200 keV, 累积注量为 10^{16} cm^{-2}), 随后在123 K~403 K范围内进行热循环实验(循环300次)。结果表明, 仅质子束辐照后, SR的拉伸强度降至原始强度的55%; 经辐照和热循环实验后, SR的拉伸强度下降更为显著, 仅为原始强度的42%。此外, 若先对SR进行热循环实验再进行质子辐照, 所得结果与先质子束辐照后热循环实验的结果一致, 即辐射与热循环共同作用后SR的力学性能劣化更为显著。

4 总结与展望

航天飞行器常用的先进复合材料包含陶瓷基、金属基和高分子复合材料。其中金属基和陶瓷基复合材料辐射稳定性很高, 辐射损伤以缺陷、位错等形式的位移损伤为主, 对力学性能影响较小。高分子复合材料因有机官能团丰富且主链分子共价键的键能较低, 辐射稳定性最差。本文从航天飞行器用高分子复合材料的各组分及不同组分间界面结构出发, 系统综述了高分子基体、增强纤维及纤维-基体界面各自在辐射场中的损伤机制与性能演化规律。这三个层次的核心损伤机制在于, 高能电离辐射可使材料的弱化学键断裂, 生成活性自由基, 自由基随后既可通过相互结合促使分子链交联, 也可通过进攻主链致使链断裂, 从而改变材料的微观结构, 并最终影响其宏观性能。对于树脂基体和增强纤维, 会发生辐射交联或辐射裂解反应, 二者对力学性能的影响往往呈相反趋势, 何种反应占主导决定了强度、韧性等关键力学性能的变化趋势。对于纤维-基体界面, 其辐射损伤行为则更为复杂, 除上述辐射化学反应外, 还须考量界面物理作用的演变。此外, 空间环境因素(原子氧、周期性循环温度场等)与辐射场耦合同样会使高分子复合材料的损伤行为趋于复杂。

为深入理解高分子复合材料的辐射损伤机理, 并提升对其长期服役性能的预测能力, 未来研究还需重点关注以下方向: (1) 低剂量率损伤增强效应研究。高分子复合材料的辐射损伤行为具有剂量率依赖性, 低剂量率下氧化损伤会显著加剧材料的辐射损伤, 表现出低剂量率损伤增强效应。然而, 现有加速老化试验多采用高剂量率、相同

吸收剂量的方式进行, 难以准确评估氧化损伤对整体损伤的贡献, 因而无法准确反映实际剂量率下长期服役的损伤行为。因此, 需要开展低剂量率损伤增强效应研究, 厘清剂量率对材料辐射损伤的影响规律, 进而明确高剂量率下加速老化试验结果的等效性, 最终建立可靠试验方法。(2) 纤维-基体界面的辐射损伤研究。界面是复合材料载荷传递与性能演化的核心区域, 但其辐射损伤研究仍以定性描述为主, 界面微观损伤参量与宏观性能退化之间缺乏明确的定量关系。因此, 亟需借助高分辨先进表征技术, 解析辐照后原子/分子尺度化学结构、界面微观结构及力学性能的演变规律, 并在此基础上建立辐照条件、界面微观结构与宏观性能之间的跨尺度定量关系。(3) 复合材料辐射损伤本构模型研究。航天飞行器用高分子复合材料的真实服役环境是多类型高能电离辐射和多环境因素共同作用的结果。需基于相关实验数据, 融合分子动力学模拟与反应动力学分析, 量化各因素及其相互作用对关键辐射化学反应以及宏观性能的影响。最终建立起能够集材料微观结构、环境参数与辐照条件于一体的本构模型, 实现从“极端环境输入-微观结构演化-宏观性能输出”的全链条预测。

作者贡献声明 郑伟负责本综述整体构思、方向指导、架构规划; 张宝莹和王金龙负责文献收集归纳, 图片处理和论文初稿整理工作; 翁汉钦、姚同杰和汤晓斌负责论文修订工作。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

参考文献

- 1 Bazilevskaya G A. Solar cosmic rays in the near Earth space and the atmosphere[J]. *Advances in Space Research*, 2005, **35**(3): 458-464. DOI: 10.1016/j.asr.2004.11.019.
- 2 Horne R B, Thorne R M, Shprits Y Y, *et al.* Wave acceleration of electrons in the Van Allen radiation belts [J]. *Nature*, 2005, **437**(7056): 227-230. DOI: 10.1038/nature03939.
- 3 Shkaplerov A N, Cherkashina N I, Pavlenko V I, *et al.* Changes in the Vickers hardness, wettability, structural and mechanical properties of the "shielding composite" under exposure to cosmic radiation[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, **152**: 107470. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107470.

- 4 Huang S L, Wen K, Liu Y C, *et al.* Optimized design, fabrication, and enhanced performance of honeycomb sandwich structure for excellent impact resistance and broadband microwave absorption[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2025, **681**: 365-375. DOI: 10.1016/j.jcis.2024.11.160.
- 5 Iqbal A, Saeed A, Ul-Hamid A. A review featuring the fundamentals and advancements of polymer/CNT nanocomposite applications in aerospace industry[J]. Polymer Bulletin, 2021, **78**(1): 539-557. DOI: 10.1007/s00289-019-03096-0.
- 6 Meng J X, Wang Y, Yang H Y, *et al.* Mechanical properties and internal microdefects evolution of carbon fiber reinforced polymer composites: Cryogenic temperature and thermocycling effects[J]. Composites Science and Technology, 2020, **191**: 108083. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108083.
- 7 Yin Y, Liu S K, Wu X Y, *et al.* MOF-based interfacial phase inhibiting structural damage of carbon fiber reinforced polymer composites derived from high-energy irradiation[J]. Composites Part B: Engineering, 2025, **306**: 112817. DOI: 10.1016/j.compositesb.2025.112817.
- 8 陈可平. 聚氨酯弹性体伽马辐射损伤行为及耐辐射性能研究[D]. 四川: 中国工程物理研究院, 2020.
CHEN Keping. Study on gamma irradiation damage behaviors and irradiation resistance of polyurethane elastomers[D]. Sichuan: China Academy of Engineering Physics, 2020.
- 9 王双, 周立康, 沈自才, 等. 航天器展开结构用复合材料空间辐射防护技术研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2026, **56**: 32-44. DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2026.04.003.
WANG Shuang, ZHOU Likang, SHEN Zicai, *et al.* Research progress on space radiation protection technology for composites used in spacecraft deployable structures[J]. Aerospace Materials & Technology, 2026, **56**: 32-44. DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2026.04.003.
- 10 沈自才, 闫德葵. 空间辐射环境工程的现状及发展趋势[J]. 航天器环境工程, 2014, **31** (3): 229-240. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2014.03.001.
SHEN Zicai, YAN Dekui. Present status and prospects of space radiation environmental engineering[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2014, **31**(3): 229-240. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2014.03.001.
- 11 陈可平, 刘文, 赵秀丽, 等. 环氧树脂辐射老化的研究进展[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2022, **40**(1): 010101. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021-0101.
- CHEN Keping, LIU Wen, ZHAO Xiuli, *et al.* Progress in radiation aging of epoxy resins[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2022, **40**(1): 010101. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021-0101.
- 12 Xu Z W, Huang Y D, Min C Y, *et al.* Effect of γ -ray radiation on the polyacrylonitrile based carbon fibers[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2010, **79**(8): 839-843. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2010.03.002.
- 13 Giovedi C, Machado L D B, Augusto M, *et al.* Evaluation of the mechanical properties of carbon fiber after electron beam irradiation[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2005, **236**(1/2/3/4): 526-530. DOI: 10.1016/j.nimb.2005.04.033.
- 14 Plaček V, Bartoníček B, Hnát V, *et al.* Dose rate effects in radiation degradation of polymer-based cable materials [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2003, **208**: 448-453. DOI: 10.1016/S0168-583X(03)00626-8.
- 15 Jiao L M, Wang Y, Wu Z H, *et al.* Effect of gamma and neutron irradiation on properties of boron nitride/epoxy resin composites[J]. Polymer Degradation and Stability, 2021, **190**: 109643. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109643.
- 16 张艳华, 黄玉东, 刘丽, 等. γ -射线辐照 Armos 纤维对 AFRC 界面性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 2010, **18** (5): 648-652.
ZHANG Yanhua, HUANG Yudong, LIU Li, *et al.* Influence of γ -ray radiating Armos fiber on interface properties of AFRC[J]. Materials Science and Technology, 2010, **18**(5): 648-652.
- 17 Zhang J M, Garton D J, Minton T K. Reactive and inelastic scattering dynamics of hyperthermal oxygen atoms on a saturated hydrocarbon surface[J]. The Journal of Chemical Physics, 2002, **117**(13): 6239-6251. DOI: 10.1063/1.1460858.
- 18 Ohki Y, Hirai N. Thermal ageing of soft and hard epoxy resins[J]. High Voltage, 2023, **8**(1): 12-20. DOI: 10.1049/hve.2.12259.
- 19 Ishii H, Hirai N, Ohki Y. Comparison of degradation behavior between soft and hard epoxy resins[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2021, **58**(5): 620-628. DOI: 10.1080/00223131.2020.1848655.
- 20 Li H F, Liu C, Zhu J B, *et al.* Spider silk-inspired heterogeneous interphase featuring hybrid interaction for

- simultaneously improving the interfacial strength and fracture toughness between carbon fiber and epoxy by regulating hydrogen bond density[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, **280**: 111476. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111476.
- 21 Oshima S, Seryo Y, Kimura M, *et al.* Mesoscale mechanism of damage in fracture process zone of CFRP laminates simulated with triaxial stress state-dependent constitutive equation of matrix resin[J]. *Composites Science and Technology*, 2024, **257**: 110837. DOI: 10.1016/j.compscitech.2024.110837.
 - 22 Hoffman E N, Skidmore T E. Radiation effects on epoxy/carbon-fiber composite[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2009, **392**(2): 371-378. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2009.03.027.
 - 23 Liu L S, Feng L, Ma T S, *et al.* Mechanical properties, thermal stability and microstructure evolution of carbon fiber-reinforced epoxy composites exposed to high-dose γ -rays[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2022, **194**: 110056. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2022.110056.
 - 24 张坤毅, 王世金. 空间中的中子辐射环境及探测[C]//中国宇航学会飞行器总体专业委员会2006年学术研讨会, 2006: 188-192.
ZHANG Shenyi, WANG Shijin. Neutron radiation environment in space and its detection[C]//2006 Academic Symposium of Aircraft General Design Committee, Chinese Society of Astronautics, 2006: 188-192.
 - 25 张紫霞, 魏志勇, 方美华, 等. 空间环境中子效应及测量技术[J]. *装备环境工程*, 2009, **6**(4): 5-11. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9242.2009.04.002.
ZHANG Zixia, WEI Zhiyong, FANG Meihua, *et al.* Neutron radiation effects of space environment and measuring technique[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2009, **6**(4): 5-11. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9242.2009.04.002.
 - 26 Zhang X L, Yang M T, Zhang X M, *et al.* Enhancing the neutron shielding ability of polyethylene composites with an alternating multi-layered structure[J]. *Composites Science and Technology*, 2017, **150**: 16-23. DOI: 10.1016/j.compscitech.2017.06.007.
 - 27 Zhang W, Feng Y, Althakafy J T, *et al.* Ultrahigh molecular weight polyethylene fiber/boron nitride composites with high neutron shielding efficiency and mechanical performance[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2022, **5**(3): 2012-2020. DOI: 10.1007/s42114-022-00539-7.
 - 28 Charlesby A, Ross M. The effect of cross-linking on the density and melting of Polythene[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences*, 1953, **217**(1128): 122-135. DOI: 10.1098/rspa.1953.0049.
 - 29 Ohnishi S I. ESR study of the radiation chemical process in polyethylene[J]. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 1962, **35**(2): 254-259. DOI: 10.1246/bcsj.35.254.
 - 30 Stephens C P, Benson R S, Chipara M. Radiation induced modifications in ultra-high molecular weight polyethylene [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2007, **201**(19/20): 8230-8236. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.03.055.
 - 31 Martínez-Pardo M E, Cardoso J, Vázquez H, *et al.* Characterization of MeV proton irradiated PS and LDPE thin films[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1998, **140**(3/4): 325-340. DOI: 10.1016/S0168-583X(98)00013-5.
 - 32 Rival G, Paulmier T, Dantras E. Influence of electronic irradiations on the chemical and structural properties of PEEK for space applications[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2019, **168**: 108943. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2019.108943.
 - 33 Lanouette A M, Potvin M J, Martin F, *et al.* Residual mechanical properties of a carbon fibers/PEEK space robotic arm after simulated orbital debris impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, **84**: 78-87. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.05.010.
 - 34 Yang L Q, Ohki Y, Hirai N, *et al.* Aging of poly(ether ether ketone) by heat and gamma rays: Its degradation mechanism and effects on mechanical, dielectric and thermal properties[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2017, **142**: 117-128. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2017.06.002.
 - 35 Kornacka E M, Przybytniak G, Nowicki A. Radical processes initiated by ionizing radiation in PEEK and their macroscopic consequences[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2019, **30**(1): 79-85. DOI: 10.1002/pat.4445.
 - 36 Li H M, Fouracre R A, Given M J, *et al.* The effects on polyetheretherketone and polyethersulfone of electron and γ irradiation[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1999, **6**(3): 295-303. DOI: 10.1109/94.775614.
 - 37 Sasuga T, Kudoh H. Ion irradiation effects on thermal and

- mechanical properties of poly(ether - ether - ketone) (PEEK) [J]. *Polymer*, 2000, **41**(1): 185-194. DOI: 10.1016/S0032-3861(99)00143-3.
- 38 吴良义. 航空航天先进复合材料现状[C]//第十三次全国环氧树脂应用技术学术交流会, 2009: 117-132.
WU Liangyi. Current status of advanced composite materials for aeronautics and astronautics[C]// Proceedings of the 13th national symposium on epoxy resin application technology, 2009: 117-132.
- 39 Devanne T, Bry A, Raguin N, *et al.* Radiochemical ageing of an amine cured epoxy network. Part II: kinetic modelling[J]. *Polymer*, 2005, **46**(1): 237-241. DOI: 10.1016/j.polymer.2004.07.041.
- 40 常乐, 张衍, 刘育建, 等. 环氧树脂的 γ 射线辐照损伤机理研究[J]. *热固性树脂*, 2016, **31**(1): 10-14.
CHANG Le, ZHANG Yan, LIU Yujian, *et al.* Study on the damage mechanism for epoxy resin under gamma irradiation[J]. *Thermosetting Resin*, 2016, **31**(1): 10-14.
- 41 潘祖雄, 王佳健, 葛志青, 等. 环氧树脂及h-BN/环氧树脂复合材料的辐射效应[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2023, **41**(5): 050202. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0040.
PAN Zuxiong, WANG Jiajian, GE Zhiqing, *et al.* Radiation effects of epoxy resin and h-BN/epoxy resin composites[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2023, **41**(5): 050202. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0040.
- 42 Diao F Y, Zhang Y, Liu Y J, *et al.* γ -Ray irradiation stability and damage mechanism of glycidyl amine epoxy resin[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2016, **383**: 227-233. DOI: 10.1016/j.nimb.2016.07.009.
- 43 季琰琰, 张帆, 陈洪兵, 等. 双酚A型环氧树脂的1.5 MeV电子束辐照效应[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2022, **40**(2): 020103. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021-0203.
JI Zhenyan, ZHANG Fan, CHEN Hongbing, *et al.* Radiation effects of a 1.5 MeV electron beam on bisphenol A epoxy resin[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2022, **40**(2): 020103. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021-0203.
- 44 包建文, 钟翔屿, 李晔, 等. 环氧树脂电子束辐照效应研究[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2006, **24**(1): 15-22. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3436.2006.01.004.
BAO Jianwen, ZHONG Xiangyu, LI Ye, *et al.* Radiation effect of epoxy resin by electron beams[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2006, **24**(1): 15-22. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3436.2006.01.004.
- 45 Hill D J T, Preston C M L, Whittaker A K. NMR study of the gamma radiolysis of poly(dimethyl siloxane) under vacuum at 303K[J]. *Polymer*, 2002, **43**(4): 1051-1059. DOI: 10.1016/S0032-3861(01)00711-X.
- 46 Huang W, Fu Y B, Wang C Y, *et al.* Radiation effects on methyl vinyl polysilicone foam[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2003, **89**(13): 3437-3441. DOI: 10.1002/app.12550.
- 47 Menhofer H, Heusinger H. Radical formation in polydimethylsiloxanes and polydimethyldiphenylsiloxanes studied by the ESR spintrap technique[J]. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation Part C Radiation Physics and Chemistry*, 1987, **29**(4): 243-251. DOI: 10.1016/1359-0197(87)90029-4.
- 48 Chen H B, Liu B, Huang W, *et al.* Gamma radiation induced effects of compressed silicone foam[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2015, **114**: 89-93. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2015.02.007.
- 49 陈洪兵, 秦梓铭, 王浦澄, 等. 硅橡胶辐射老化的研究进展[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2020, **38**(3): 030101. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2020.rj.38.030101.
CHEN Hongbing, QIN Ziming, WANG Pucheng, *et al.* Recent progress in irradiation-induced aging of silicones [J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2020, **38**(3): 030101. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2020.rj.38.030101.
- 50 刘强, 豆睿扬, 张祎茜, 等. 硅橡胶辐射老化理论模拟研究进展[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2024, **42**(3): 030102. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0106.
LIU Qiang, DOU Ruiyang, ZHANG YiQian, *et al.* Progress on the theoretical simulations of the radiation aging of silicon rubber[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2024, **42**(3): 11-28. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0106.
- 51 高巨龙, 于锦生. 复合材料发动机壳体在航天运载中的应用[J]. *纤维复合材料*, 2005, **22**(3): 53-54, 60. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6423.2005.03.015.
GAO Julong, YU Jinsheng. Application of composite motor case in space carrier rocket[J]. *Fiber Composites*, 2005, **22**(3): 53-54, 60. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6423.2005.03.015.
- 52 Abdukadyrova I K. Effect of neutron irradiation on the

- high-frequency IR spectra of quartz glass[J]. *Inorganic Materials*, 2008, **44**(10): 1097-1100. DOI: 10.1134/s0020168508100130.
- 53 Zu Q, Song W, Zeng H D, *et al.* Glass resistance to radiation - part I: Preliminary investigation of three commercial glass fibers[J]. *International Journal of Applied Glass Science*, 2020, **11**(3): 522-536. DOI: 10.1111/ijag.15612.
 - 54 郑莉芳, 岳丽娜, 徐晓辉, 等. γ 辐照对 GFRP 拉-拉疲劳性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2017, **34**(10): 2240-2245. ZHENG Lifang, YUE Lina, XU Xiaohui, *et al.* Effects of γ irradiation on fatigue properties of GFRP[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, **34**(10): 2240-2245.
 - 55 Shao Y, Wang Y T, Ju X. Promotional effects of cerium in ytterbium doped fibers on proton irradiation damage[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2023, **25**(23): 15929-15940. DOI: 10.1039/d3cp01111a.
 - 56 聂婷, 王焕春, 李瑞怡, 等. 固体火箭发动机壳体碳纤维复合材料的溶胀降解[J]. *装备环境工程*, 2024, **21**(11): 82-91. DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.11.011. NIE Ting, WANG Huanchun, LI Ruiyi, *et al.* Swelling degradation of carbon fiber composites in solid rocket engine shells[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2024, **21**(11): 82-91. DOI: 10.7643/issn. 1672-9242.2024.11.011.
 - 57 马超, 王治国, 张如变, 等. 航天器复合材料桁架连接增强方法与验证[J]. *航天器工程*, 2024, **33**(3): 68-73. MA Chao, WANG Zhiguo, ZHANG Rubian, *et al.* Connection enhancement method and its verification for spacecraft composite truss[J]. *Spacecraft Engineering*, 2024, **33**(3): 68-73.
 - 58 Hill D J T, Lang A P, O'Donnell J H, *et al.* The effects of γ -radiation on polyacrylonitrile[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 1992, **38**(3): 193-203. DOI: 10.1016/0141-3910(92)90114-K.
 - 59 Xu Z W, Chen L, Zhou B M, *et al.* Nano-structure and property transformations of carbon systems under γ -ray irradiation: a review[J]. *RSC Advances*, 2013, **3**(27): 10579. DOI: 10.1039/c3ra00154g.
 - 60 盛炯森, 邵瑞琪, 田丰, 等. 电子束辐照对聚丙烯腈纤维皮芯结构及其热化学性能的影响[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2026, **44**(1): 010201. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0067. SHENG Jionsen, SHAO Ruiqi, TIAN Feng, *et al.* Effects of electron beam irradiation on the skin-core structure and thermochemical properties of polyacrylonitrile fibers[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2026, **44**(1): 010201. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0067.
 - 61 Liu Y C, Huang X Y, Liu J, *et al.* Structure and tensile properties of carbon fibers based on electron-beam irradiated polyacrylonitrile fibers[J]. *Journal of Materials Science*, 2020, **55**(12): 4962-4969. DOI: 10.1007/s10853-019-04182-4.
 - 62 赵卫哲. γ 射线辐照对聚丙烯腈纤维环化交联及碳纤维结构与性能的影响[D]. 上海: 东华大学, 2016. ZHAO Weizhe. The effects of gamma ray on cyclization and crosslinking of polyacrylonitrile fibers and structure and properties of carbon fibers[D]. Shanghai: Donghua University, 2016.
 - 63 王影. 臭氧改性碳纤维/氰酸酯复合材料及其电子质子辐照效应[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014. WANG Ying. O₃ modified carbon fiber/cyanate ester composites and electron and proton co-irradiation effect research[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
 - 64 Shi Z C, Liang Z H, Huang Z Y, *et al.* Revolutionizing fiber materials for space: Multi-scale interface engineering unlocks new aerospace frontiers[J]. *Materials Today*, 2025, **88**: 643-704. DOI: 10.1016/j.mattod.2025.06.010.
 - 65 于德润, 张松, 陈浩然, 等. 运载火箭用纤维复合材料整流罩研究进展[J]. *纤维复合材料*, 2022, **39**(3): 140-144. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6423.2022.03.026. YU Derun, ZHANG Song, CHEN Haoran, *et al.* Research progress of fiber composite fairing for launch vehicle[J]. *Fiber Composites*, 2022, **39**(3): 140-144. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6423.2022.03.026.
 - 66 Chen W T, Qi W, Du J F, *et al.* Radiation effects on Kevlar fibers through high energy electron beam[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2023, **63**(9): 3083-3090. DOI: 10.1002/pen.26429.
 - 67 谢非. γ 射线辐照强化 F-3A 芳纶纤维及表面活化改性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018. XIE Fei. Study on strengthening and surface modification of F-3A aramid fibers by γ -ray irradiation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
 - 68 张春华, 黄玉东, 王世威, 等. γ -射线辐照 PBO 纤维表面改性机理研究[J]. *材料科学与工艺*, 2007, **15**(3): 305-308. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0299.2007.03.003. ZHANG Chunhua, HUANG Yudong, WANG Shiwei, *et al.* Modification mechanism of PBO fiber surface by γ

- ray irradiation[J]. *Materials Science and Technology*, 2007, **15**(3): 305-308. DOI: 10.3969/j. issn. 1005-0299.2007.03.003.
- 69 王芳, 吴亚东, 琚丹丹, 等. 聚对苯撑苯并二噻唑纤维的电子束辐照效应研究[J]. *材料导报*, 2022, **36**(22): 169-173.
WANG Fang, WU Yadong, JU Dandan, *et al.* Research on electron beam irradiation effect of poly(p-phenylene benzobisoxazole) fiber[J]. *Materials Reports*, 2022, **36**(22): 169-173.
- 70 桑伟, 周岚, 冯新星, 等. 电子束辐照对尼龙 66 纤维结构和力学性能的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2016, **32**(2): 99-103. DOI: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2016.02.018.
SANG Wei, ZHOU Lan, FENG Xinxing, *et al.* Effects of electron beam irradiation on the structure and mechanical properties of nylon 66 fiber[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2016, **32**(2): 99-103. DOI: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2016.02.018.
- 71 Mallick B, Patel T, Behera R C, *et al.* Microstrain analysis of proton irradiated PET microfiber[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2006, **248**(2): 305-310. DOI: 10.1016/j.nimb.2006.04.153.
- 72 Singh P, Ram J, Chauhan V, *et al.* High dose gamma radiation exposure upon Kapton-H polymer for modifications of optical, free volume, structural and chemical properties[J]. *Optik*, 2020, **205**: 164244. DOI: 10.1016/j.ijleo.2020.164244.
- 73 Liao D D, Gu T, Liu J, *et al.* Degradation behavior and ageing mechanism of E-glass fiber reinforced epoxy resin composite pipes under accelerated thermal ageing conditions[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, **270**: 111131. DOI: 10.1016/j.compositesb.2023.111131.
- 74 Megusar J. Low temperature fast-neutron and gamma irradiation of glass fiber-epoxy composite. Part 2: Structure and chemistry[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1996, **230**(3): 233-241. DOI: 10.1016/0022-3115(96)80019-5.
- 75 郑莉芳, 邹江, 乔志明, 等. γ 辐照对玻璃布/环氧树脂层压板压缩性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2015, **32**(5): 1316-1320.
ZHENG Lifang, ZOU Jiang, QIAO Zhiming, *et al.* Effects of γ radiation on compression properties of glass-cloth/epoxy laminated sheet[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, **32**(5): 1316-1320.
- 76 Park S K, Choi D Y, Choi D Y, *et al.* Influences of absorbed dose rate on the mechanical properties and fiber - matrix interaction of high-density polyethylene-based carbon fiber reinforced thermoplastic irradiated by electron-beam[J]. *Polymers*, 2020, **12**(12): 3012. DOI: 10.3390/polym12123012.
- 77 Jung S, Park S K, Ghim H D, *et al.* Synergetic effect of cross-linking and interfacial interaction in carbon fiber reinforced thermoplastic to enhance its tensile strength by electron-beam irradiation[J]. *Carbon Letters*, 2020, **30**(2): 165-175. DOI: 10.1007/s42823-019-00082-4.
- 78 Liu S K, Wang L Y, Siddique A, *et al.* Irradiation multi-scale damage and interface effects of 3D braided carbon fiber/epoxy composites subjected to high dose γ -rays[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, **281**: 111575. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111575.
- 79 Liu H L, Xu Y D, He D P, *et al.* Evolution of the mechanical characteristics and microstructures of carbon fiber/epoxy resin composites under high-dose electron irradiation[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2025, **232**: 112679. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2025.112679.
- 80 陈洪兵. 有机材料的辐射效应[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2023: 1-406.
CHEN Hongbing. *Radiation effects in organic materials* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2023: 1-406.
- 81 孙安苇, 杨佳, 刘艺, 等. 环氧树脂辐射损伤行为研究进展[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2025, **43**(2): 020102. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0067.
SUN Anwei, YANG Jia, LIU Yi, *et al.* Research progress on radiation damage behavior in epoxy resins[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2025, **43**(2): 020102. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0067.
- 82 Nishiura T, Katagiri K, Nishijima S, *et al.* Gamma-ray irradiation effects on interlaminar tearing strength of epoxy-based FRP[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1990, **174**(1): 110-117. DOI: 10.1016/0022-3115(90)90428-P.
- 83 Chen K P, Zhao X L, Zhang F S, *et al.* Influence of gamma irradiation on the molecular dynamics and mechanical properties of epoxy resin[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2019, **168**: 108940. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2019.108940.
- 84 Vignoud L, David L, Sixou B, *et al.* Influence of electron irradiation on the mobility and on the mechanical properties of DGEBA/TETA epoxy resins[J]. *Polymer*, 2001, **42**(10): 4657-4665. DOI: 10.1016/S0032-3861(00)

- 00791-6.
- 85 Vignoud L, David L, Sixou B, *et al.* Effect of electron irradiation on the mechanical properties of DGEBA/DDM epoxy resins[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2001, **185**(1/2/3/4): 336-340. DOI: 10.1016/S0168-583X(01)00758-3.
 - 86 吴志豪, 李一帆, 沈杭, 等. 六方氮化硼含量及其尺寸对硅橡胶辐射稳定性的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2024, **42**(6): 060201. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0102.
WU Zhihao, LI Yifan, SHEN Hang, *et al.* Effects of the amount and size of hexagonal boron nitride on the radiation resistance of silicone rubber[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2024, **42**(6): 060201. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0102.
 - 87 Maiti A, Small W, Kroonblawd M P, *et al.* Constitutive model of radiation aging effects in filled silicone elastomers under strain[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2021, **125**(35): 10047-10057. DOI: 10.1021/acs.jpcc.1c04958.
 - 88 Çınar Esin Z, Şen M. Effect of radiation on the mechanical, energy dissipation and vibration-damping properties of platinum-cured vinyl-methyl-polysiloxane elastomer[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2023, **202**: 110568. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2022.110568.
 - 89 丁军, 索双富, 张琦, 等. 橡胶材料黏弹本构关系研究综述[J]. 合成橡胶工业, 2022, **45**(6): 523-529. DOI: 10.19908/j.cnki.ISSN1000-1255.2022.06.0523.
DING Jun, SUO Shuangfu, ZHANG Qi, *et al.* Review of viscoelastic constitutive relation of rubber materials[J]. China Synthetic Rubber Industry, 2022, **45**(6): 523-529. DOI: 10.19908/j.cnki.ISSN1000-1255.2022.06.0523.
 - 90 裴琦铭, 许泽建, 刘彦, 等. T800碳纤维环氧树脂复合材料应变率-温度损伤本构模型及失效机理[J/OL]. 复合材料学报, (2026-03-18)[2026-07-22]. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20260318.007.
PEI Qiming, XU Zejian, LIU Yan, *et al.* Strain rate temperature damage constitutive model and failure mechanism of T800 carbon fiber/epoxy resin composite[J/OL]. Acta Materiae Compositae Sinica, (2026-03-18)[2026-07-22]. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20260318.007.
 - 91 彭公秋, 李国丽, 石峰晖, 等. 第三代聚丙烯腈基碳纤维发展现状与分析[J]. 化工新型材料, 2023, **51**(S2): 65-70.
PENG Gongqiu, LI Guoli, SHI Fenghui, *et al.* Development status and suggestion of the third generation PAN-based carbon fiber[J]. New Chemical Materials, 2023, **51**(S2): 65-70.
 - 92 田军, 王齐祖, 杨生荣, 等. ^{60}Co 射线辐照对碳纤维表面及其复合材料层间剪切强度的影响[J]. 复合材料学报, 1998, **15**(4): 1-5. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-3851.1998.04.001.
TIAN Jun, WANG Qizu, YANG Shengrong, *et al.* Effect of carbon fiber surface and interlaminar shear strength of carbon fiber/epoxy composite by ^{60}Co -ray irradiation treatment[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1998, **15**(4): 1-5. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-3851.1998.04.001.
 - 93 Hao X, Lu Y G, Wang M H, *et al.* Effect of gamma-irradiation on the mechanical properties of polyacrylonitrile-based carbon fiber[J]. Carbon, 2013, **52**: 427-439. DOI: 10.1016/j.carbon.2012.09.054.
 - 94 李树军, 孙维钧, 刘秀菊, 等. 高能辐射对超高分子量聚乙烯纤维结构和力学性能的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 1998(3): 7-12.
LI Shujun, SUN Weijun, LIU Xiuju, *et al.* Effect of electron beam radiation on the structure and mechanical properties of ultra high molecular weight polyethylene fibers[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 1998(3): 7-12.
 - 95 张利华, 蔡玉臣, 于力, 等. 结晶聚合物的辐照效应: I. 尼龙-1010的聚集态结构对其辐射化学反应的影响[J]. 应用化学, 1990, **7**(2): 20-25.
ZHANG Lihua, QI Yuchen, YU Li, *et al.* Radiation effect on crystalline polymers: I. aggregated structure dependence of chemical reactions in irradiated nylon-1010[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 1990, **7**(2): 20-25.
 - 96 Dorneles de Castro B, Machado Neves Silva K M, Maziero R, *et al.* Influence of gamma radiation treatment on the mechanical properties of sisal fibers to use into composite materials[J]. Fibers and Polymers, 2020, **21**(8): 1816-1823. DOI: 10.1007/s12221-020-1106-z.
 - 97 张宗强, 万怡灶, 王玉林. γ -射线辐照对芳纶纤维复合材料力学性能的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2003(4): 11-13. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0999.2003.04.004.
ZHANG Zongqiang, WAN Yizao, WANG Yulin. Effect of kevlar fiber γ -ray surface treatment on mechanical properties of composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2003(4): 11-13. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0999.2003.04.004.
 - 98 Yu Q, Chen P, Gao Y, *et al.* Effects of electron irradiation in space environment on thermal and mechanical

- properties of carbon fiber/bismaleimide composite[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2014, **336**: 158-162. DOI: 10.1016/j.nimb.2014.07.007.
- 99 Spießberger S M, Humer K, Tschegg E K, *et al.* Reactor irradiation effects on the ultimate tensile and the interlaminar shear strength of carbon fibre reinforced epoxies at 77K[J]. Cryogenics, 1998, **38**(1): 79-83. DOI: 10.1016/S0011-2275(97)00114-8.
- 100 Weber H W, Kubasta E, Steiner W, *et al.* Low temperature neutron and gamma irradiation of glass fiber reinforced epoxies[J]. Journal of Nuclear Materials, 1983, **115**(1): 11-15. DOI: 10.1016/0022-3115(83)90337-9.
- 101 Sekulic D R, Gordic M V, Djordjevic I M, *et al.* Irradiation and annealing effects on delamination toughness in carbon/epoxy composite[J]. Journal of Nuclear Materials, 2009, **383**(3): 209-214. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2008.09.009.
- 102 Shao Z Q, Cheng H, Zhu M, *et al.* Constitutive model for investigating the effect of microstructure evolution on the macroscopic properties of silicone rubber during radiation aging[J]. Macromolecules, 2025, **58**(8): 4033-4042. DOI: 10.1021/acs.macromol.4c03245.
- 103 Sargin I, Beckman S P. Modeling the effect of dose rate and time on crosslinking and scission in irradiated polyethylene[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, **27**(3): 731-738. DOI: 10.1109/TDEI.2019.008495.
- 104 Madorsky S L, Straus S. Thermal degradation of polymers at high temperatures[J]. Journal of Research of the National Bureau of Standards Section A: Physics and Chemistry, 1959, **63A**(3): 261-268. DOI: 10.6028/jres.063a.020.
- 105 Everett M L, Hoflund G B. Erosion study of poly (ethylene tetrafluoroethylene) (tefzel) by hyperthermal atomic oxygen[J]. Macromolecules, 2004, **37**(16): 6013-6018. DOI: 10.1021/ma049515r.
- 106 Chen J, Ding N W, Li Z F, *et al.* Organic polymer materials in the space environment[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2016, **83**: 37-56. DOI: 10.1016/j.paerosci.2016.02.002.
- 107 Grossman E, Gouzman I. Space environment effects on polymers in low earth orbit[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2003, **208**: 48-57. DOI: 10.1016/S0168-583X(03)00640-2.
- 108 Bitetti G, Marchetti M, Mileti S, *et al.* Degradation of the surfaces exposed to the space environment[J]. Acta Astronautica, 2007, **60**(3): 166-174. DOI: 10.1016/j.actaastro.2006.07.019.
- 109 Li G H, Liu X, Li T. Effects of low earth orbit environments on atomic oxygen undercutting of spacecraft polymer films[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, **44**(1): 60-66. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.07.017.
- 110 Silverman E M. Space environmental effects on spacecraft: LEO materials selection guide[R]. Hampton: NASA Langley Research Center, NASA CR-4661, 1995.
- 111 陈磊. PBO 纤维/环氧复合材料界面相的引入及对原子氧的防护[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
CHEN Lei. Introduction of interphase of PBO fiber/epoxy composites and investigation of its atomic oxygen resistance[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- 112 Kinoshita H, Tagawa M, Yokota K, *et al.* Nonlinear phenomena in the mass loss of polyimide films under hyperthermal atomic oxygen beam exposure[J]. High Performance Polymers, 2001, **13**(4): 225-234. DOI: 10.1088/0954-0083/13/4/301.
- 113 Goto A, Michishio K, Oka T, *et al.* Formation of nanoscale protrusions on polymer films after atomic oxygen exposure: observations with positron annihilation lifetime spectroscopy[J]. Langmuir, 2023, **39**(34): 11954-11963. DOI: 10.1021/acs.langmuir.3c00224.
- 114 Goto A, Yamashita S, Tagawa M. Formation of nanoscale protrusions on polymer films after atomic oxygen irradiation: changes in morphologies, masses, and FT-IR spectra[J]. Langmuir, 2022, **38**(11): 3339-3349. DOI: 10.1021/acs.langmuir.1c02605.
- 115 Nishida M, Kimura D, Ashida K, *et al.* Effects of electron beam and atomic oxygen irradiation on hypervelocity - Impact tested/polyimide coated carbon fiber-reinforced plates[J]. Composites Part B: Engineering, 2025, **288**: 111877. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111877.
- 116 Zhang Y F, Yuan H, Yan W Q, *et al.* The effects of atomic oxygen and ion irradiation degradation on multi-polymers: a combined ground-based exposure and ReaxFF-MD simulation[J]. Polymer Degradation and Stability, 2022, **205**: 110134. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2022.110134.
- 117 Qian Z Y, Zhu T Q, Liu X Y, *et al.* Multiscale study of interfacial properties of carbon fiber reinforced

- polyphthalazine ether sulfone ketone resin matrix composites[J]. Composites Science and Technology, 2025, **259**: 110906. DOI: 10.1016/j.compscitech.2024.110906.
- 118 Miyazaki Y, Hirai N, Ohki Y. Effects of heat and gamma-rays on mechanical and dielectric properties of cross-linked polyethylene[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, **27**(6): 1998-2006. DOI: 10.1109/TDEI.2020.008840.
- 119 Yang L Q, Ohki Y, Hirai N, *et al.* Degradation behavior and mechanisms of several polymeric insulating materials exposed to heat and radiation[C]//2017 3rd International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON). November 16-18, 2017, Rupnagar, India. IEEE, 2018: 98-103. DOI: 10.1109/CATCON.2017.8280192.
- 120 Ishii H, Yamaguchi H, Mori K, *et al.* Degradation in dielectric behavior of soft epoxy resin by concurrent aging with heat and radiation[C]//2019 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). October 20-23, 2019. Richland, WA, USA. IEEE, 2019: 18-21. DOI: 10.1109/ceidp47102.2019.9010557.
- 121 张丽新, 杨士勤, 何世禹. 质子辐照与热循环联合作用对空间级硅橡胶损伤效应的研究[J]. 中国胶粘剂, 2002, **11**(3): 7-10. DOI: 10.3969/j. issn. 1004-2849.2002.03.003.
- ZHANG Lixin, YANG Shiqin, HE Shiyu. Study on damage of space grade silicon rubber induced by proton radiation combined with thermal cycling[J]. China Adhesives, 2002, **11**(3): 7-10. DOI: 10.3969/j.issn.1004-2849.2002.03.003.
- 122 张丽新, 王承民, 徐洲. 真空热循环与质子辐照顺次作用对甲基硅橡胶性能的影响[J]. 合成橡胶工业, 2005, **28**(5): 356-359. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-1255.2005.05.008.
- ZHANG Lixin, WANG Chengmin, XU Zhou. Effect of sequential action of vacuum thermocirculation and proton irradiation on properties of methyl silicone rubber[J]. China Synthetic Rubber Industry, 2005, **28**(5): 356-359. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1255.2005.05.008.

