DOI:10.3724/zrht.1674-5825.2025069

•综述•

空间粒子辐射被动防护方法研究进展

韩雪岩[1,2,3], 池晓淼[1,2,3], 刘宇辰[1,2,3*], 韩 毅[1,2,3], 李国栋[1,2,3]

(1.中国辐射防护研究院,太原 030006;2.辐射安全与防护山西省重点实验室,太原 030006;
3.中核集团辐射防护技术重点实验室,太原 030006)

摘 要: 针对航天任务中航天员辐射暴露风险较高、航天器关键设备服役寿命易受其影响的问题,综述了空间辐射粒子的组成及其防护机理,并对近5年来空间粒子辐射屏蔽材料的相关研究进行系统梳理,总结了高分子聚合物及其复合材料、氢化物和储氢材料、金属材料和行星土壤、屏蔽结构和防护装备在空间辐射屏蔽效果、次级粒子产生率、轻量化设计和空间环境适应性等方面的研究现状,并展望未来空间粒子辐射屏蔽材料的发展趋势和面临挑战。

关键词: 空间粒子辐射; 被动防护; 屏蔽材料; 富氢材料

中图分类号: V45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5825(2026)01-0112-13

Research Progress on Passive Protection Methods Against Space Particle Radiation

HAN Xueyan[1,2,3], CHI Xiaomiao[1,2,3], LIU Yuchen[1,2,3*], HAN Yi[1,2,3], LI Guodong[1,2,3]

(1. China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China;
2. Shanxi Key Laboratory for Radiation Safety and Protection, Taiyuan 030006, China;
3. China National Nuclear Corporation Key Laboratory for Radiation Protection Technology, Taiyuan 030006, China)

Abstract: To address the challenges in high radiation exposure of astronauts and the potential degradation of key spacecraft components during space missions, this paper reviews the composition of space radiation particles and their shielding mechanisms. Then a systematic overview of the research progress over the past five years on shielding materials for space particle radiation is provided. The state-of-the-art in various material systems and technologies is summarized, including polymers and their composites, hydrides and hydrogen storage materials, metal materials, planetary regolith, as well as shielding structures and protective equipment, with focus on their radiation shielding effectiveness, secondary particle production, lightweight design, and adaptability to the space environment. Finally, this paper outlines the future development trends and discusses the persistent challenges in the field of space radiation shielding materials.

Key words: space particle radiation; passive shielding; shielding materials; hydrogen-rich materials

1 引言

空间辐射是限制深空探索和太空长期驻留任务推进的关键环境因素之一。其中,高线性能量传递(Linear Energy Transfer,LET)辐射能量沉积集中、生物损伤效应强,给载人航天任务的辐射防护工作带来巨大挑战。研究表明,长期暴露于银河宇宙射线(Galactic Cosmic Rays,GCR)和太阳质子事件(Solar Proton Event,SPE)等空间辐射环境中,将显著增加

收稿日期:2025-05-19; 修回日期:2025-09-18
基金项目:核技术研发项目
第一作者:韩雪岩, 男, 硕士, 研究实习员, 研究方向为辐射防护。E-mail:hanxueyan@cirp.org.cn
* 通讯作者:刘宇辰, 男, 硕士, 副研究员, 研究方向为辐射防护。E-mail:liuyuchen@cirp.org.cn
引用格式:韩雪岩,池晓淼,刘宇辰,等. 空间粒子辐射被动防护方法研究进展[J]. 载人航天,2026,32(1):112-124. Han X Y,Chi X M,Liu Y C,et al. Research progress on passive protection methods against space particle radiation[J]. Manned Spaceflight,2026,32(1):112-124.

航天员罹患癌症、心血管疾病和白内障等辐射诱导性病变的概率[1-3]；处于微重力、封闭的生活环境带来的生理和心理影响会进一步放大此类健康风险的危害[4]。女性航天员因具有更高的辐射敏感性，患放射性疾病的风险也会增大[5]。此外，高能空间粒子及其次级辐射会诱发单粒子效应、位移损伤效应和总剂量效应，导致航天器出现操作设备异常、电子器件故障甚至损坏等情况[6-9]。近年来，具有模块化设计、快速部署与集群组网优势的小型近地卫星正逐渐成为低轨通信、遥感监测与科学实验的核心载体[10,11]。但此类商业航天器和小型卫星的耐辐照性能远不如传统航天器，更容易受空间辐射影响[12]。因此，开展空间粒子辐射防护研究对保障航天员健康安全、确保空间任务顺利完成有重要意义。

与地面辐射防护所依据的时间、距离和屏蔽三要素不同，屏蔽几乎是目前太空环境中唯一可行的防护手段。通过电磁场偏转带电粒子的主动防护技术，提供了一种极具潜力和应用前景的空间辐射危害解决方案[13]。但受其技术发展和巨大的能源需求限制，短期内主动屏蔽方法仍难以实施。相比之下，使用高性能材料屏蔽空间辐射的被动防护方法是更简单有效的应对措施，也是当下的研究热点。

本文综述空间粒子辐射的主要来源和被动防护机理，并以空间质子屏蔽为主线梳理空间粒子辐射被动防护方法相关研究。重点评述了富氢材料在材料研发、性能增强、改性优化等方面的研究成果，以期为下一代卫星、航天器或航天员防护装备的屏蔽设计提供技术参考。

2　空间粒子来源及防护机理

2.1　空间辐射环境

空间辐射来源主要有银河宇宙射线、太阳质子事件和行星辐射带等3种。

银河宇宙射线是来自太阳系外的高能粒子，由约99%的重子和不到1%的电子组成。重子中质子占比约87%~90%，α粒子占比约9%~12%，重离子/HZE粒子(High Z and Energy，HZE)占比约1%。GCR粒子在空间中近似为各向同性分布，粒子能量范围为10^6~10^{22} eV。其强度与太阳活动成负相关，在太阳活动极小期GCR强度最大，在太阳活动极大期GCR强度最小。图1所示为1977年和1981年空间环境中的GCR粒子能谱[14]。

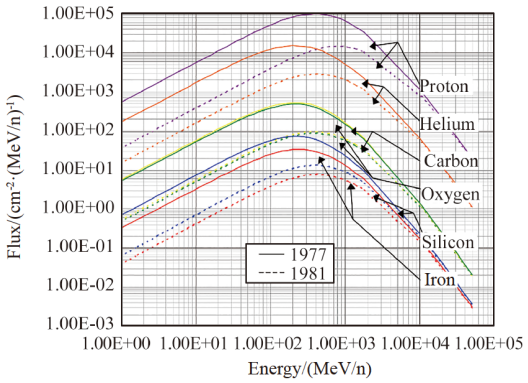


图 1　1977年和1981年空间环境中的GCR粒子谱[14]

Fig. 1　GCR particle spectra in the space environment in 1977 and 1981[14]

太阳质子事件释放的粒子中质子占比约90%，其次是α粒子，还有少量电子和重离子。每次事件释放的粒子在能量和数量上各不相同，中等太阳耀斑约释放10^8 particles/cm^2 [15]。SPE质子的能量大多低于600 MeV，最大能量在GeV量级。2022年2月15日太阳质子事件最初12 h内火星位置的质子通量如图2所示[16,17]。为了保障航天员安全，用于建造SPE避难所的材料至少需具有和30 g/cm^{3}铝相当的屏蔽效果[18]。

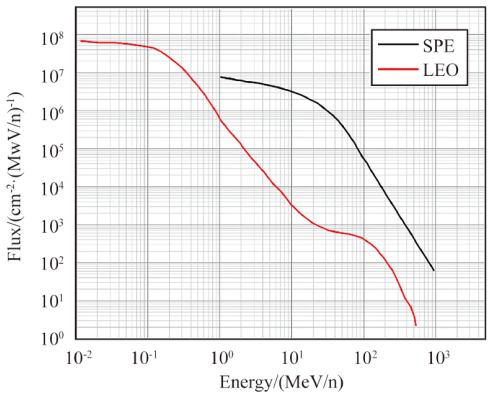


图 2　SPE质子谱和LEO质子谱[16,17]

Fig. 2　SPE proton spectrum and LEO proton spectrum[16,17]

行星辐射带是被磁场捕获在行星周围的各种带电粒子所在区域。如地球附近的范艾伦辐射带就由被地球磁场捕获的电子、质子和重离子组成，可分为内辐射带和外辐射带，辐射带形状和内部带电粒子数量与地球磁场和太阳活动有关。内辐射带中带电粒子多为高能质子，能量可达数百MeV；外辐射带中高能电子的占比较大，大多数电子的能量为几百keV[19]。图2中红色实线为2020年一天中的近地轨道(Low Earth Orbit，LEO)质子通量[17]。

可以看出，空间粒子辐射防护主要是对高能重带电粒子的防护。空间质子通量高、α粒子和重离子对航天员暴露剂量当量的贡献大，基于空间重带电粒子的防护机理开展新型屏蔽材料研究工作，是减小空间辐射危害的关键。

2.2 空间粒子辐射防护机理

重带电粒子与物质相互作用时主要通过与靶物质的原子核和核外电子发生弹性碰撞或非弹性碰撞损失能量。具体的能量损失方式可分为电离能损、辐射能损、核反应能损和弹性散射等。带电粒子穿过屏蔽材料时在单位距离上损失能量的量度通常用阻止本领表示，与入射带电粒子的电荷数、能量及靶原子的性质有关。材料对重带电粒子的阻止本领可以由Bethe-Bloch公式计算[20,21]，见式(1)。

$$S=-\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}=NZ\frac{4\pi z^4e^4}{m_0v^2}\left[\ln\frac{2m_0v^2}{I}-\ln\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)-\frac{v^2}{c^2}\right] \quad (1)$$

式中，e和v分别代表入射粒子的电荷和速度；z为入射粒子的原子序数；N和Z分别为屏蔽材料的原子密度和原子序数；m_0为电子质量；I为吸收材料的原子电离势。

鉴于航天领域对材料轻量化的核心需求，质量阻止本领更能凸显材料的屏蔽性能。由式(1)可知，对于特定的入射粒子，屏蔽材料的质量阻止本领满足式(2)。

$$S/\rho\propto\frac{NZ}{\rho}=N_{\mathrm{A}}\frac{Z}{A} \quad (2)$$

式中，ρ为吸收材料的质量密度；N_{A}为阿伏伽德罗常数，A为吸收材料的相对原子质量。从式(2)可以看出，电荷质量比高的材料会有着更大的重带电粒子阻止本领，即有更优屏蔽效果。因此，屏蔽空间粒子辐射时多使用富氢材料，且富氢材料也具有很好的中子屏蔽性能，在屏蔽次级中子方面更为有效。

此外，空间粒子与高Z材料之间的相互作用会产生大量次级粒子，而低Z材料则能更有效地降低辐射引起的能量损失[22,23]。例如，铝或铝合金屏蔽高能质子时产生的次级粒子通量显著高于聚乙烯、水和碳纤维等低Z材料[24,25]。根据上述理论，目前空间粒子屏蔽材料的研究多集中于高分子聚合物材料和储氢材料。这两类材料含氢量高，可以在最大程度上减小碎片粒子的产生概率[26]。

综上所述，高性能空间粒子屏蔽材料应满足以下条件：轻质，电荷质量比大，单位质量核反应截面大，产生的二次粒子少[27]。考虑到α粒子和重离子具有与质子相似的防护机理，且空间粒子中质子通量占比极高，本文以空间质子防护为主线论述空间粒子辐射被动防护方法的研究进展，将空间任务中常见的材料分为金属材料和行星土壤、高分子材料、氢化物和储氢材料3类。

3 金属材料和行星土壤

各种卫星和航天器的结构材料通常采用金属材料或合金。Bond等[28]研究表明，铅、钨等高Z金属材料用于屏蔽高能质子时会产生大量的二次粒子，使得剂量有较大增加；钛、不锈钢和铜与高能质子相互作用产生的二次粒子少于铅和钨；铝或铝合金是所评估的金属材料中质子屏蔽效果最好的材料。钽是常用的空间电子屏蔽材料，但其对空间质子的屏蔽效果不如铝[29]。

在5 g/cm^{2}和20 g/cm^{2}铝屏蔽下，太阳质子造成的人体剂量当量明显减小，但GCR粒子造成的剂量当量没有显著降低[30]。说明质量屏蔽方法仅对能量相对较低的太阳质子有效，屏蔽高能GCR粒子时，选取屏蔽性能更佳的材料比增加屏蔽厚度更有效。

月球和火星表面的风化层等材料明显有着比高Z金属材料更好的防护效果。其中，火星和月球风化层材料的核密度均小于铝，但月球风化层材料的防护效果不如铝，火星风化层材料的防护效果则优于铝。此外，在风化物材料中加入环氧树脂粘合剂可显著减少次级质子的产生。996 MeV质子环境中，5 g/cm^{2}环氧树脂和月壤复合材料比纯月壤材料降低了约20%的吸收剂量[28]。

4 高分子聚合物屏蔽材料

4.1 常见高分子材料屏蔽性能对比

高分子材料及其复合材料中含有大量的氢，是较为理想的空间辐射屏蔽材料。尤其是多种材料组合屏蔽设计中，复合屏蔽材料可以在很大程度上增强屏蔽效果并减小材料质量。由于材料间的成分和密度相似，各种聚合物材料的屏蔽性能差别不大，如图3所示[31,32]。常见高分子材料的信息如表1所示[33,34]。其中，聚乙烯基材料的质子防护性能最好。Gohel等[31]的研究表明，对于GCR中的高能质子，低密度聚乙烯比高密度聚乙烯的屏蔽效果更优，且屏蔽后的二次中子剂量更小。

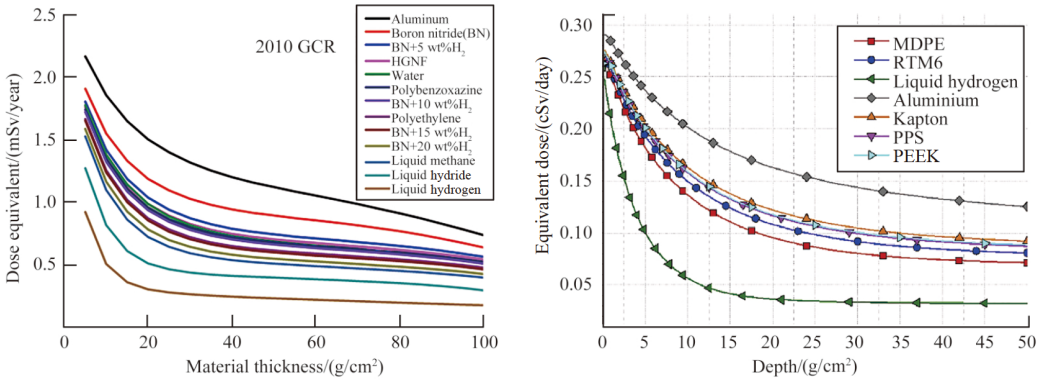


图 3　GCR环境中不同材料屏蔽下的剂量当量[31,32]

Fig. 3　Dose equivalents under different material shielding in GCR environment[31,32]

表 1　部分高分子材料信息[33,34]

Table 1　Information of some polymer materials[33,34]

材料	分子式	密度/(g/cm³)	氢含量/%
Polyethylene	C_2H_4	1.00	14.29
Kevlar	$C_{14}H_{14}N_2O_4$	1.44	5.11
Polycarbonate	$C_{15}H_{16}O_2$	1.20	7.02
Kapton	$C_{22}H_{10}N_2O_5$	1.42	2.62
Epoxy	$C_{21}ClH_{25}O_5$	1.30	6.37
Dacron	$C_{10}H_8O_4$	1.38	4.17
Vectran	$C_{18}H_{10}O_4$	1.40	3.45
Natural Rubber	C_5H_8	0.92	11.76
Cotton	$C_6H_{10}O_5$	1.50	6.17
Jute	$C_{29}H_{33}N_3Na_2O_{18}S_2$ (65% Cellulose, 12% Lignin, 12% Hemi - cellulose, 10% Water)	1.50	4.02
Silk	$C_{15}H_{23}N_5O_6$	1.60	6.23
PTFE	C_2F_4	2.20	—
ETFE	$C_4H_4F_4$	0.97	3.13
Dyneema	C_2H_4	1.90	14.37
Nomex	$C_{14}H_{10}N_2O_2$	1.38	4.20
EP	$C_{11}H_{12}O_3$	1.20	6.25

Zaman等[33]对比了橡胶、棉、黄麻和丝绸4种天然材料与聚乙烯、凯夫拉(Kevlar)、聚碳酸酯、Kapton、环氧树脂、Dacron和Vectran 7种常用高分子聚合物材料的空间质子屏蔽性能，在相同面密度下天然材料有着与新兴聚合物材料相当的质子屏蔽效果。上述材料的屏蔽性能对比为：聚乙烯>棉>Kevlar≈Kapton≈黄麻>丝绸≈橡胶>Dacron>聚碳酸酯>Vectran>环氧树脂。此外，天然橡胶还表现出较好的重离子屏蔽性能。

选取空间屏蔽材料时通常需要考虑多方面的因素，如抗空间环境能力、机械性能和热性能等。天然聚合物材料虽具有较好的空间粒子屏蔽效果和较低的使用成本，但其在空间环境中的长期稳定性和耐辐照性能不足。通过制备高性能复合材料或掺杂纳米增强材料，有望改善天然材料的整体性能，使之成为高效、经济、轻质的空间粒子屏蔽候选材料之一。

聚四氟乙烯(Poly-Tetrafluoroethylene，PTFE)、Kevlar、乙烯-四氟乙烯共聚物(Ethylene Tetrafluoroethylene，ETFE)、Dyneema纤维和Nomex具有轻质、性能优异、耐用和灵活等优点，是航天服设计备选材料。Korkut等[34]通过数值模拟对比分析了这5种聚合物材料对1、2、3 GeV高能质子的屏蔽性能。5种材料中，Dyneema材料有着最小的位移损伤和最大的质子阻止本领。PTFE密度最大，且不含氢，质子屏蔽性能最差。其余3种材料的质子屏蔽性能对比为：Kevlar>Nomex> ETFE。聚醚醚酮(Poly Ether Ether Ketone，PEEK)和聚酰亚胺(Polyimide，PI)均具有较好的耐热性和机械性能，是航空航天领域常用的聚合物材料。相同面密度下二者的空间质子屏蔽性能均显著好于铝、略差于聚乙烯，PEEK稍好于PI[35]。

但在相同的材料厚度下，此类高分子材料屏蔽0~1 TeV质子的效果则不如铁、镍、铅等高Z金属材料[36]。因此，在空间有限的屏蔽体设计中(如高辐射敏感电子器件的防护)，通常会采用金属材料。

研究表明，高分子聚合物材料受空间辐射后会发生自由基反应，导致其机械、热学和光学性能退化[37,38]。而将增强材料掺入聚合物形成聚合物复合材料，不仅可以提高聚合物的屏蔽性能，还能增强其机械性能和热性能[39]。填料对聚合物复合材料性能的影响很大程度依赖于填料的尺寸、聚合物与填料间的相互作用类型以及填料在聚合物中的分布情况[40]。针对这一情况，混合不同性能的填料，进行表面改性或设计具有壳结构的复合填料等方法，有望改善填料与聚合物基体材料之间的界面相互作

用[26]。此外，结合不同填料下复合材料的功效，设计多层结构聚合物基复合材料，可以更有效地散射、反射和吸收辐射。

4.2 聚乙烯

聚乙烯含氢量高、无毒、化学性质稳定、密度较小，是众多辐射防护材料中研究最多的材料之一。因其对太空中高能带电粒子有着很好的防护效果，聚乙烯已应用于国际空间站[41,42]。美国航天员配有聚乙烯材质的睡袋，以提供额外防护。但由于机械性能欠佳，聚乙烯主要应用于非结构部件。

近年来，研究人员发现在聚乙烯中掺杂某些纳米颗粒，如碳纳米管(Carbon Nanotube，CNT)、石墨烯纳米片(Graphene Nanoplatelet，GNP)等，可以在保持材料屏蔽性能基本不变的同时，显著提高其机械、电学和热性能。通过添加少量的中子吸收材料，如B_4C等，则可通过减少次级中子来提升复合材料屏蔽效果。Kanagaraj等[43]发现碳纳米管和高密度聚乙烯间有着良好的界面结合和载荷传递效果，掺杂碳纳米管能显著提升高密度聚乙烯的机械性能。

但可以预见，任何纳米颗粒的添加都会减少相同质量复合材料的氢原子总数。Laurenzi等[32]研究了添加氧化石墨烯(Graphene Oxide，GO)、单壁碳纳米管(Single-Walled Carbon Nanotubes，SWCNT)和B_4C纳米填料后，中密度聚乙烯(Medium Density Polyethylene，MDPE)基体材料空间辐射屏蔽性能的变化情况。屏蔽厚度约25 g/cm^{2}时，20 wt%填料占比的复合材料屏蔽效果相比纯MDPE最大恶化约6%。几种填料中，氧化石墨烯填料在各种情况下对复合材料屏蔽性能的影响均最小，碳化硼对复合材料屏蔽性能的负面影响最大，如图4所示[32]。这主要是因为氧化过程中石墨烯表面和边缘的官能团中附着了一些氢原子，而SWCNT和B_4C则没有氢原子来补偿填料导致的氢损失。因此，GO可能更适合用作聚乙烯基体的增强材料。C、W、B_4C 3种成分的混合填料也被用于改善聚乙烯的屏蔽效果，在众多组分配比、掺杂浓度、颗粒形状和尺寸下，C:W:B_4C配比为4:4:1时复合材料的屏蔽性能最佳[44]。

Zhang等[21]在PE中掺杂约0.6%的碳纳米管，制备了一种低体积电阻率的聚乙烯复合材料(体积电阻率由10^{17} Ω·cm降低至10^5 Ω·cm)。在LEO质子环境中，将铝屏蔽结构更换为同等面密度的该复合材料可使总电离剂量降低40%、位移损伤降低50%，但其对高能质子的屏蔽效果提升不显著。在200 MeV质子应用装置(XiPAF)上开展的实验验证了这一结果。该聚乙烯复合材料可用于地球轨道卫星中高辐射敏感性电子器件的防护。

纳米增强材料的添加还有助于提升聚乙烯复合材料的抗辐照性能。Zaccardi等[45]在中密度聚乙烯中掺杂不同质量占比的多壁碳纳米管(Multi-Walled Carbon Nanotube，MWCNT)和GNP，制备了一系列聚乙烯基纳米复合材料。其中，掺杂5 wt% MWCNT的复合材料最具空间辐射屏蔽应用前景。经能量64 MeV、总剂量50 Gy的质子束照射后(根据美国疾病控制和预防中心的信息，50 Gy的剂量会导致人类心血管和中枢神经系统致命崩溃[26])，掺杂MDPE/MWCNT 5 wt%的复合材料的化学结构、热性能、疏水性仅略微变差，表面光滑度有所提高。

此外，随着熔丝制造技术和原位资源利用技术的发展，未来航天任务中可以使用聚乙烯等热塑性材料和深空土壤材料制作复合屏蔽材料，用于辐射避难所建造。Zaccardi等[46]通过3D打印制作了聚乙烯/火星土壤模拟物(Regolith，RG)复合材料。研究发现，RG可作为成核剂提高PE/RG复合材料的结晶度，从而改善复合材料的热性能和机械强度。在RG

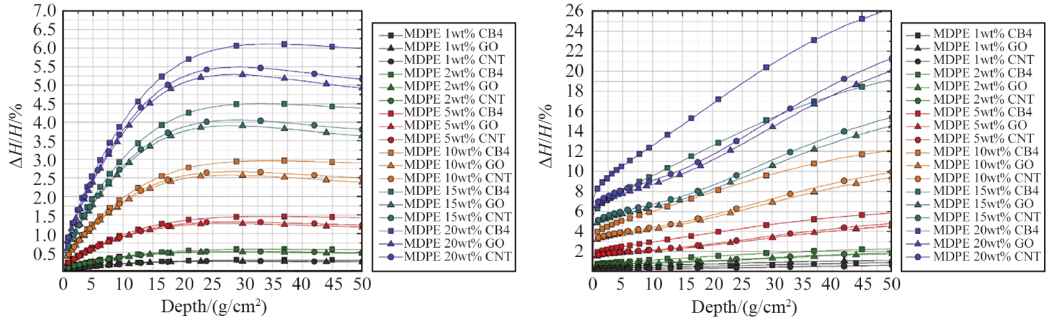


图 4 GCR(左)和SPE(右)环境下MDPE复合材料的屏蔽性能[32]

Fig. 4 The shielding performance of MDPE composites in GCR (left) and SPE (right) environments[32]

填充量达50 wt%的情况下，PE/RG复合材料仍表现出较好的SPE粒子和GCR粒子屏蔽效果，产生的次级中子剂量显著小于铝。该研究验证了PE/RG复合材料在深空任务中的应用潜力，为原位资源利用和3D打印技术在深空制造中的组合应用提供了重要理论和技术支持。原位资源的有效利用将会大幅降低深空任务的地球依赖性，并提升深空探索任务期间航天员的应急能力。但此类复合材料的制造工艺及其在空间极端环境中的长期稳定性仍需进一步研究。

4.3　聚醚醚酮

PEEK是一种半结晶高分子聚合物材料，在航空航天、医疗植入、能源及高端工业领域有着广泛应用。为研制轻量化、高效的屏蔽材料，Li等[35]采用压模法制备了B_4C/PEEK复合材料（B_4C占比分别为10，20，30 wt%），发现B_4C的添加能明显提升PEEK的质子、中子和电子屏蔽性能[47]。质子束辐照实验也验证了这一结果，20 wt% B_4C占比的B_4C/PEEK复合材料几乎可以完全屏蔽16 MeV的质子，而10 wt% B_4C占比仅能屏蔽约48%的12 MeV质子。随着B_4C含量的增加，B_4C/PEEK复合材料的电子和中子屏蔽性能也得到改善，使其在减少空间质子屏蔽产生的二次粒子方面更加有效（图5[35]）。

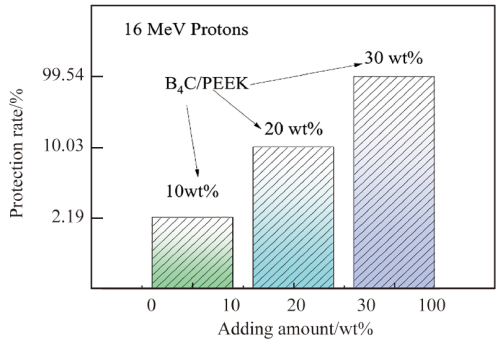


图 5　不同B_4C占比下B_4C/PEEK对16 MeV质子的防护效果[35]

Fig. 5　The protective effect of B_4C/PEEK on 16 MeV protons under different B_4C proportions[35]

在PEEK中掺杂合适的增强材料，能够提升PEEK复合材料的热性能和机械性能。Naito等[48]以碳纤维和PEEK制备了一种具有高机械强度的CF/PEEK复合材料。在GCR辐射环境中，将HTV（H-II Transfer Vehicle）的铝制结构部件替换为CF/PEEK后，可使整体屏蔽效果提升17%，同时使航天器结构重量减小40%。轻质、高机械强度的复合材料为未来深空任务中的航天器设计提供了更多选择。但耐热性、长期稳定性的不足仍是阻碍复合材料用作航天器结构材料的重要因素。

4.4　聚苯并咪唑

聚苯并咪唑（Polybenzimidazole，PBI）是一种高性能芳香族杂环聚合物，具有出色的耐高温性、化学稳定性和机械强度，在航空航天、能源存储和极端环境防护等领域具有重要应用。聚（2，5）苯并咪唑（ABPBI）是PBI的一种简化衍生物，结构更规整、合成路线更简单。Fourie等[49]通过原位聚合法制备出一种ABPBI/MWCNT复合材料，发现MWCNT能够明显增强ABPBI的质子防护效果。含3 wt% MWCNT的ABPBI/MWCNT复合材料屏蔽高能质子时产生的次级中子更少，且有着比纯ABPBI更优异的热稳定性。此外，MWCNT通过改变ABPBI/MWCNT复合材料的晶粒尺寸和内在应变，达到了增强复合材料抗辐照损伤性能的效果。

4.5　富氢苯并恶嗪

富氢苯并恶嗪（Hydrogen-Rich Benzoxazine，HRB）含氢量高，是较为理想的空间质子屏蔽材料。如图6所示，相同屏蔽效果的HRB材料可比环氧树脂节省约6%的屏蔽质量[50]。Cha等[50]发现，将胺功能化MWCNT（NH_2-MWCNT）引入HRB基质，可以改善HRB的力学性能、热机械性能及空间环境耐受性。NH_2-MWCNT与HRB基质之间的化学键合增强了界面结合力，使得复合材料的拉伸强度和模量明显提高。此外，NH_2-MWCNT的添加还能够改善复合材料的氧原子抗性和抗出气性能。该复合材料在复杂空间环境中表现出了比环氧树脂更好的稳定性。NH_2-MWCNT/HRB复合材料有望在未来的空间任务中替代环氧树脂，为航天员和电子器件提供更有效的辐射防护。

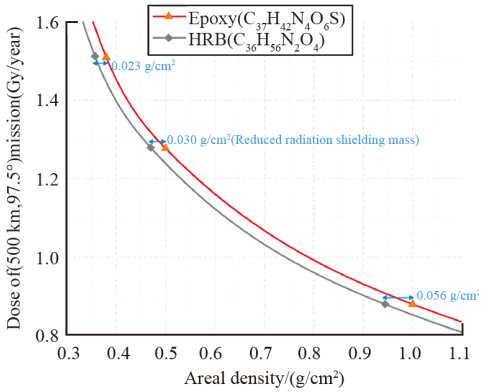


图 6　LEO辐射环境中HRB和Epoxy的屏蔽性能[50]

Fig. 6　The shielding performance of HRB and Epoxy in LEO radiation environments[50]

苯并恶嗪与其他高性能材料制作的多功能复合材料，或能同时满足结构功能和辐射屏蔽性能双重需求。由超高分子量聚乙烯(Ultra-High Molecular Weight Polyethylene，UHMWPE)纤维增强的HRB复合材料，在较低聚合温度(120 ℃)下即可实现高含氢量(6.22×10^{22} H 原子/cm^3)和良好的机械性能[51]。进一步添加碳纤维增强层后，复合材料的拉伸模量提高144%，弯曲模量提高227%，同时具备媲美纯聚乙烯的空间质子防护效果。与铝相比，该复合材料的比强度提高了325%、GCR辐射环境中的等效辐射剂量减少了31%，展现出其在深空辐射防护和结构材料领域的巨大应用潜力。

纤维与基体间的界面结合力对复合材料的性能有着重要影响。Cha等[52]利用聚多巴胺涂层(Polydopamine，PDA)、MWCNT和己二胺(Hexamethylendiamine，HMDA)接枝技术，制备出一种新型UMHWPE/HRB复合材料(UHC)。PDA涂层和MWCNT-HMDA接枝使得复合材料的层间剪切强度提高了161%，拉伸强度提高了20%。测试表明，UMHWPE/HRB复合材料的总质量损失和收集挥发性可冷凝物质分别为0.6343%和0.0202%，远优于空间材料标准要求。对于LEO质子环境，UHC的屏蔽性能与纯聚乙烯相当，比碳纤维复合材料的屏蔽效果好7%~10%，比铝好21%~28%(图7[52])。该复合材料可以用于商业化小型卫星，以保护电子器件、延长卫星寿命。

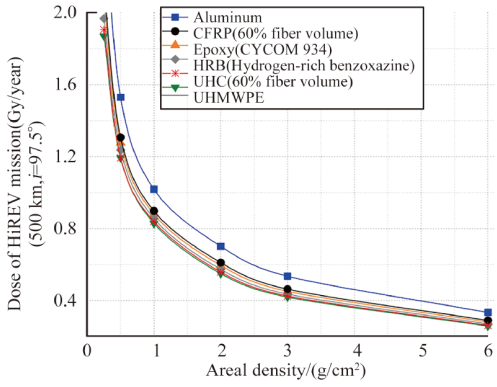


图 7 LEO辐射环境中UMHWPE/HRB复合材料(UHC)的屏蔽性能[52]

Fig. 7 The shielding performance of UMHWPE/HRB composites (UHC) in LEO radiation environments[52]

4.6 Nomex材料

Nomex是DuPont公司开发的一种高性能芳纶纤维，具有较好的阻燃性、耐高温性和机械强度，在航空航天领域有着广泛应用。因其具有较好的质子屏蔽效果和稳定性，Nomex常用于航天员个人防护装备的制作。但GCR中的高能质子成分与Nomex材料的相互作用会产生大量次级中子(图8)，可能会造成更大的辐射暴露风险[53]。20 g/cm^2 Nomex材料屏蔽50~1000 MeV的GCR质子时，逃逸的次级辐射甚至会导致总剂量增加约14%[54]。因此，在Nomex中加入中子吸收材料有望改善其防护效果。

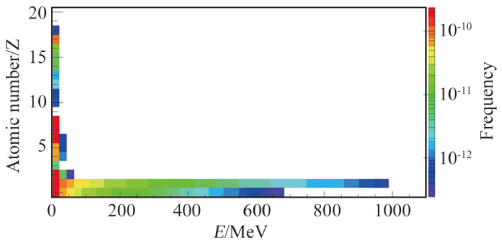


图 8 GCR质子与Nomex材料相互作用产生的次级粒子[53]

Fig. 8 Secondary particles produced by the interaction between GCR protons and Nomex materials[53]

Loffredo等[55]分析了硼酸、Gd对Nomex材料质子屏蔽效果的改善情况。不同组分复合材料的厚度均设置为20 g/cm^2，该厚度为国际空间站内部的平均屏蔽厚度，接近火星大气的屏蔽水平[56]。结果表明，硼酸和Gd的添加并未显著降低屏蔽后的总剂量。所有复合材料中，30%硼酸占比的Nomex复合材料屏蔽效果最佳，总剂量比纯Nomex减小5%。但复合材料实现更好屏蔽效果的同时，可以大幅缩减屏蔽厚度，更有利于提升Nomex防护装备的穿戴舒适性和灵活性。

4.7 凝胶材料

传统舱外航天服通常未设置屏蔽层，其中用于隔热的镀铝聚酯薄膜和涤纶树脂(聚对苯二甲酸乙二醇酯，PET)等材料具有一定的辐射防护效果[57]。随着深空探索任务的推进，航天服设计中应考虑增加专门的辐射防护层。Lambertini等[17]以硼酸(BA)为交联剂制备的一种PVA/BA凝胶，可用于航天服辐射防护层制作。研究表明，BA的添加显著提高了凝胶的机械性能，PVA/BA凝胶的储能模量是普通PVA凝胶的2倍。在室温下制备的凝胶样品含水量约为20%，空间质子屏蔽性能最佳。GCR、SPE和LEO质子辐射环境中，该凝胶样品有着几乎与液态水相当的防护效果(图9)[17]。因此PVA/BA凝胶是一种极具潜力的航天服屏蔽层候选材料。

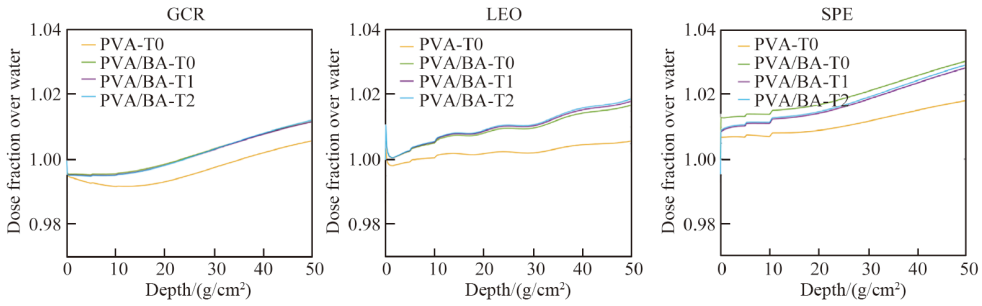


图 9　不同辐射环境中PVA基凝胶与水屏蔽后的当量剂量之比[19]

Fig. 9　The ratio of equivalent doses after PVA-based gel and water shielding in different radiation environments[19]

5　氢化物和储氢材料

储氢材料是一类能够可逆地吸附和释放氢气的物质，在能源存储领域具有重要应用[58]。独特的氢富集特性与轻量化优势也使得储氢材料成为空间质子屏蔽领域的研究热点之一。目前相关研究主要集中于金属氢化物、纳米管类储氢材料等方面。

5.1　金属氢化物

金属掺杂使得掺杂后的聚合物具有致密的几何结构，这种结构为金属原子吸附氢气提供了足够空间。Lee等[59]基于第一性原理密度泛函计算，从众多金属修饰聚合物材料中找出了一种金属修饰的反式聚乙炔储氢材料。当反式聚乙炔中的一个氢原子被TiH_3或ScH_2取代时，TiH_3的一个结构单元最大能结合5个氢分子，ScH_2单元能结合6个氢分子，最佳结构的分子式为$(C_4H_2{\cdot}2TiH_3)_n$和$(C_4H_2{\cdot}2ScH_2)_n$。理论上，Ti修饰聚乙炔最大储氢量为12 wt%，Sc修饰聚乙炔最大储氢量可达14 wt%。在此基础上，将Ti原子分散到顺式聚乙炔中可以显著提高其储氢能力[60]。在常规环境条件下，这种Ti修饰顺式聚乙炔能够储存7.6 wt%的可用氢分子(体积密度63 kg/m^3)，最大储氢量达12 wt%。

Li等[61]基于密度泛函理论评估了锂、硼修饰聚乙炔的储氢潜力。与掺钛的顺式聚乙炔不同，锂抗聚簇，可以可逆地储存高达10.8%的H_2，但分子动力学模拟表明，该结果只能在低温条件下实现。硼掺杂的顺式聚乙炔可以储存高达9.8 wt%的H_2，且氢与材料间的结合很强。LiH是一种较好的储氢材料，但其化学性质不稳定，具有极易与水反应、易燃、有毒等特性。

在上述研究的基础上，Yang等[62]进一步分析了钛、硼、锂修饰聚乙炔材料的空间辐射屏蔽性能，3种聚合物自身的屏蔽性能虽不如聚乙烯，但会随储氢量的增加而提升，并在最大储氢量时略优于聚乙烯。此外，在屏蔽GCR粒子时，钛修饰聚乙炔所产生的次级粒子数(最大为0.03 particle/cm^2)少于聚乙烯(最大为0.04 particle/cm^2)和其余2种聚乙炔。因此，高含氢量的钛掺杂聚乙炔材料有望取代聚乙烯用作航天器结构材料夹层的填充物。

5.2　储氢材料

纳米管类储氢材料的屏蔽性能依赖于其储氢量。CNT和氮化硼纳米管(Boron Nitride Nanotubes，BNNT)因其管状结构和较大的表面积，是2种极具潜力的储氢材料，吸引国内外研究人员开展了大量研究[63,64]。14.4 wt%氢含量的碳纳米管或氮化硼纳米管有着和聚乙烯相当的质子屏蔽效果，且屏蔽性能随氢含量的增加而明显增加[28,31]。

Boronite公司生产了一种CNT/BNNT/CNT的服装织物，发现将聚乙烯热粘合到CNT上可提高其机械强度，并为组件提供更多的氢。Paige等[65]结合BNNT、CNT、气凝胶和聚乙烯等材料，开发了一种结合辐射防护、热防护和微流星体防护的多层材料系统，可用于舱外防护服或睡眠舱屏蔽材料。通过将BNNT中的天然硼元素替换为中子吸收截面大的B-10，可进一步提升材料的防护效果，其与铝、聚乙烯的屏蔽效果对比如图10所示[65]。用CNT和气凝胶取代传统航天服中的正交织物和铝涂层聚酯薄膜大大减少了航天服添加辐射防护层所需的额外重量。此外，在纳米管内引入缺陷可以提高其储氢能力，但缺陷和含氢量的增加均可能削弱纳米管的力学性能[66]。

储氢材料不仅可以用于空间质子屏蔽，还可以用作氢气燃料的存储材料。基于储氢材料构建“屏蔽–能源”一体化系统，搭配原位资源利用技术，能够大幅降低深空探索任务的地球补给依赖性。但当前储氢材料的应用仍面临诸多阻碍，如常态下储氢量

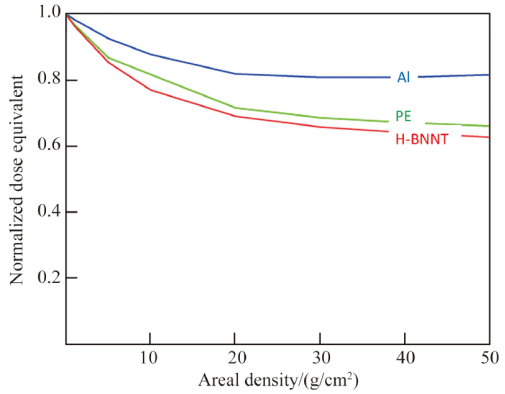


图 10 铝、聚乙烯、富氢^{10}BNNT(20 wt%)屏蔽下730天深空任务归一化总剂量当量[65]

Fig. 10 The normalized total dose equivalent of the 730-day deep space mission under the shielding of aluminium, polyethylene, and hydrogen-rich ^{10}BNNT (20 wt%)[65]

不足、循环稳定性和空间环境适配性差等。未来需进行多学科交叉研究,充分发挥储氢材料在空间质子屏蔽领域“轻量化–多功能–可持续”的突出优势,为载人深空探索提供可靠保障。

6 屏蔽结构与防护装备设计

6.1 多层屏蔽结构设计

根据空间粒子与物质相互作用机理,结合不同材料优点设计的“金属+富氢材料+金属”多层夹心结构,既可以保持原有结构功能,又能实现更好的屏蔽效果。在内辐射带卫星轨道上,相同屏蔽效果的聚乙烯–铝多层屏蔽结构可比纯铝结构节省27.8%的屏蔽质量[67]。Gohel等[68]研究发现“铝–氢化锂–铝”的三明治结构在屏蔽GCR粒子和减少二次辐射方面均优于传统的“铝–聚乙烯–铝”。在此基础上设计的复杂多层结构“铝–聚乙烯–氢化氮化硼–氢化锂”,在较小厚度下就能达到显著的剂量减小效果。

多种金属材料间的相互组合也可以改善整体屏蔽效果。在质子辐射带中,相同厚度的钨–铅–钽三层屏蔽结构比传统铝屏蔽下的总电离剂量降低50%,同时大幅减少了二次粒子的产生[69]。将近地轨道卫星常用的钽制外壳更换为铝–钽–铝的三明治结构后,整体质子屏蔽效果明显提升[70]。这种多层屏蔽设计对保障卫星上电子设备的预期寿命有重要意义。

在深空探索任务中,高能粒子对航天器中关键或高辐射敏感性电子器件的危害是设计航天器时必须考虑的因素。Wang等[71]结合遗传算法和TID仿真工具开发了一种木星任务中电子器件屏蔽舱的优化设计方法,并给出一种用于屏蔽木星电子和质子的多层结构设计方案。以1 g/cm^{2}厚度的质量阈值为例,最佳屏蔽结构为0.829 mm Pb + 0.158 mm Mg,该屏蔽结构比相同屏蔽效果的铝减小了约43.6%的质量。

6.2 航天员防护装备

涉及舱外活动的太空任务、载人登月和火星探索等深空探测任务,首先要考虑的问题之一就是高能空间质子带来的危害。据统计,国际空间站航天员平均每天接受的辐射剂量为0.5~0.7 mSv;在强太阳耀斑期间,空间站中的最大剂量值甚至达到500~700 mRad/d(5~7 mGy/d)[72]。地球辐射带质子约贡献了空间站中航天员吸收剂量的80%,GCR质子贡献约15%[73]。嫦娥四号搭载的探测器测量结果表明,月球表面平均剂量水平约为1.37 mSv/d,其中GCR粒子约占77%,次级中子约占23%[74]。在未来的火星和深空任务中,更长的飞行时间使得航天员暴露在更高的空间辐射水平中。火星科学实验室的数据显示,往返火星将导致约660 mSv的空间累计剂量当量[75]。水屏蔽睡眠舱中水层厚度需达到25 cm才能将火星任务中的年平均剂量降低至30 cSv/年(300 mSv/年),且航天员每天需在睡眠舱度过12 h[76]。

空间任务中,航天员人体器官外的辐射屏蔽可分为人体固有屏蔽、航天器屏蔽体和个人防护装备[77]。人体固有屏蔽和航天器屏蔽体在任务期间均为既定条件。为了降低航天员的高能辐射暴露风险,需要根据空间辐射条件合理规划任务,并研制更有效的空间辐射防护装备。

近年来研究表明,储水材料制成的简易防护装备或屏蔽体也可以实现很好的屏蔽效果。Kodaira等[78]使用国际空间站中的剂量计测得6.3 g/cm^{2}水厚度的卫生湿巾和湿毛巾防护帘可减小约37%的剂量当量。Szántó等[79]设计了一种用于机组舱的含水防护帘,防护帘由4层湿巾和湿毛巾构成,可提供额外8 g/cm^{2}水当量的防护效果。以8 h/d的机组舱内时长计算,安装防护帘后机组舱内吸收剂量率降低25%,可将航天员总吸收剂量减少8%。

使用特殊材料制成的充水式防护服为航天员提供了更灵活的太阳质子事件应对策略。Vuolo等[80]研发了一种由高密度材料薄层和水制成的辐射防护

航天服。若舱外活动期间发生SPE事件，穿戴该防护服可减少44%~57%的造血器官剂量。PERSEO项目中使用Nomex和Coretech制成的充水式防护服原型也在国际空间站上成功测试，在低屏蔽场景下穿戴此防护服可将造血器官吸收剂量减少约42%[81]。防护服设有4个水袋，总水容量22 L，水层厚度7 cm。航天员Nespoli在空间站内完成了充水、穿戴和排放操作，过程中未出现水泄漏。Nespoli反馈该防护服穿戴舒适，但提出了增加隔热层和收紧系统的改良建议。

结构优化设计是改善防护装备穿戴效果的关键。StemRad和Lockheed Martin公司使用高含氢量、低Z固体聚合物复合材料，共同设计了一款用于SPE事件的空间辐射防护服AstroRad[82]。固体屏蔽部件间采用鳞片式结构设计，大大提升了穿戴舒适性和灵活性。为达到最佳的屏蔽质量利用率，AstroRad防护服根据人体器官分布做了厚度优化设计。对于人体自屏蔽最小的器官区域，最多使用17 g/cm^{2}的屏蔽材料；对于自屏蔽最多的人体区域，则设置最少1 g/cm^{2}的屏蔽材料。HZETRN模拟结果显示AstroRad防护服有着很好的SPE防护前景。

7　结语

1）金属材料（如钨、钽）虽具有良好的屏蔽性能，但用于高能空间粒子屏蔽时会产生大量次级粒子，且高密度特性也限制了其在航天器中的应用。

2）高分子材料凭借轻质和高含氢量的特性成为理想的候选材料，通过加入某些增强材料制成复合材料则可以进一步改善材料性能，但其机械性能和长期稳定性仍需进一步提升。

3）在高储氢量情况下，单位质量储氢材料的屏蔽效率甚至可以超越高分子材料，是未来研发高效屏蔽材料的重要方向，但其储氢量的进一步提高、氢的循环稳定性和材料的空间环境适应性仍是亟待解决的问题。

4）多层屏蔽结构能够结合现有材料的优点，在保障原有结构部件功能的同时优化整体屏蔽效果。

5）使用水等简单材料制成的航天员防护装备展现出了良好剂量减少效果，通过材料优化和结构优化提升屏蔽效果和长时间穿戴舒适性，是下一阶段航天员防护装备研发需关注的重点。

当前，纳米增强复合材料研究已取得了一定进展，但新材料研发仍需面对如何实现轻量化、低成本、屏蔽性能和空间环境适应性协同优化这一难题。随着人工智能技术在材料科学领域的应用，极端空间环境中的功能一体化材料研发或将成为空间辐射防护领域的研究热点。通过原位资源利用技术和3D打印技术制备高性能复合材料，是实现深空长期驻留的关键一步。

参考文献（References）

[1] Cucinotta F A，Durante M. Cancer risk from exposure to galactic cosmic rays: implications for space exploration by human beings[J]. The Lancet Oncology，2006，7(5): 431-435.

[2] Chancellor J C，Blue R S，Cengel K A，et al. Limitations in predicting the space radiation health risk for exploration astronauts[J]. Npj Microgravity，2018，4(1): 8.

[3] Mitchell A，Pimenta D，Gill J，et al. Cardiovascular effects of space radiation: Implications for future human deep space exploration[J]. European Journal of Preventive Cardiology，2019，26(16): 1707-1714.

[4] Afshinnekoo E，Scott R T，MacKay M J，et al. Fundamental biological features of spaceflight: Advancing the field to enable deep-space exploration[J]. Cell，2020，183(5): 1162-1184.

[5] Guo Y，Waisberg E，Ong J，et al. A future of personalized medicine for astronauts: Considering genetic variability and biologic sex-based differences in space medicine[J]. Acta Astronautica，2025，228: 527-531.

[6] Li M，Shen C，Sun Z，et al. Radiation hardness of semiconductor laser diodes for space communication[J]. Applied Physics Reviews，2024，11(2): 021315.

[7] Khamidullina N M，Zefirov I V，Chernikov P S. Analysis of single event effects created by space ionizing radiation in the microcircuits of the interplanetary spacecraft radio electronic equipment[J]. Solar System Research，2022，56(7): 537-544.

[8] Chen W，Luo Y H，Ma W Y，et al. Simulation test technique for nuclear and space radiation effects[J]. Scientia Sinica Physica，Mechanica & Astronomica，2023，53(7): 272003.

[9] Yang X，Tang Z，Yang Y，et al. Design and evaluation of a monitoring instrument for the high-energy proton and TID effects in LEO[J]. Space Science Reviews，2024，220(3): No.33.

[10] Siddique I M. Small satellites: Revolutionizing space exploration and earth observation[J]. European Journal of Advances in Engineering and Technology，2024，11(3):181-124.

[11] NASA. CubeSat 101: Basic concepts and processes for first-time CubeSat developers[EB/OL]. (2017-10-01)[2025-01-24]. https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2017/03/nasa_csli_-cubesat_101_508.pdf?emrc=05d3e2.

[12] Samwel S W，El-Aziz E A，Garrett H B，et al. Space radiation impact on small sats during maximum and minimum solar activity[J]. Advances in Space Research，2019，64(1): 239-251.

[13] Durante M. Space radiation protection: Destination Mars[J]. Life Sciences in Space Research，2014，1: 2-9.

[14] Badavi F F，West K J，Nealy J E，et al. A dynamic/anisotropic

Low Earth Orbit (LEO) ionizing radiation model[R]. NASA/TP-2006-214533L-19312,2006.

[15] NASA. Nuclear and space radiation effects on materials-space vehicle design criteria[EB/OL]. (1970-06-01)[2025-01-24]. https://ntrs.nasa.gov/citations/19710015558.

[16] Zhang J,Guo J,Zhang Y,et al. The 2022 February 15 solar energetic particle event at Mars: A synergistic study combining multiple radiation detectors on the surface and in orbit of Mars with models[J]. Geophysical Research Letters,2024,51(19): e2024GL111775.

[17] Lambertini L,Coccarelli G,Toto E,et al. Poly(vinyl alcohol) gels cross-linked by boric acid for radiation protection of astronauts[J]. Acta Astronautica,2024,221: 142-154.

[18] 呼延奇,吴正新,周强,等. 载人登月航天员辐射剂量分析与防护建议[J]. 载人航天,2020,26(4): 485-491+536.
Hu Y Q,Wu Z X,Zhou Q,et al. Radiation dose analysis and protection suggestions for manned lunar mission[J]. Manned Spaceflight,2020,26(4): 485-491+536(in Chinese).

[19] Norbury J W,Slaba T C,Aghara S,et al. Advances in space radiation physics and transport at NASA[J]. Life Sciences in Space Research,2019,22: 98-124.

[20] Kamislioglu M. Research on the effects of bismuth borate glass system on nuclear radiation shielding parameters[J]. Results in Physics,2021,22: 103844.

[21] Zhang Z,Liu Y,Liu J,et al. Study on radiation shielding of inner radiation belt protons[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science,2023,70(4): 701-706.

[22] Nambiar S,Yeow J T W. Polymer-composite materials for radiation protection[J]. ACS Applied Materials & Interfaces,2012,4(11): 5717-5726.

[23] Thibeault S A,Kang J H,Sauti G,et al. Nanomaterials for radiation shielding[J]. MRS Bulletin,2015,40(10): 836-841.

[24] 吴正新,孙慧斌,王义元,等. MC法构建空间舱内辐射环境[J]. 核电子学与探测技术,2022,42(4): 717-722.
Wu Z X,Sun H B,Wang Y Y,et al. Construction of the radiation environment in spacecraft by MC method[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology,2022,42(4): 717-722(in Chinese).

[25] 吴正新. 航天器舱内辐射环境及空间剂量学应用研究[D]. 长春: 吉林大学,2020.
Wu Z X. Research on Radiation Environment and Space Dosimetry Application in Spacecraft[D]. Changchun: Jilin University,2020(in Chinese).

[26] Toto E,Lambertini L,Laurenzi S,et al. Recent advances and challenges in polymer-based materials for space radiation shielding[J]. Polymers,2024,16(3): 1-35.

[27] Shen Z,Xia Y,Liu Y,et al. Protection of materials from space radiation environments on spacecraft[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,2019,585(1): 012089.

[28] Bond D K,Goddard B,Singleterry R C,et al. Evaluating the effectiveness of common aerospace materials at lowering the whole body effective dose equivalent in deep space[J]. Acta Astronautica,2019,165: 68-95.

[29] 蔡明辉,杨涛,许亮亮,等. 可穿戴太阳质子应急辐射防护服的仿真设计[J]. 载人航天,2022,28(2): 190-195.
Cai M H,Yang T,Xu L L,et al. Numerical investigation of wearable clothing for SPE shielding[J]. Manned Spaceflight,2022,28(2): 190-195(in Chinese).

[30] 赵磊,尚钰轩,袁爽,等. 载人深空探索中空间辐射防护技术的研究进展[J]. 科学通报,2019,64(20): 2087-2103.
Zhao L,Shang Y X. Yuan S,et al. Research progress of space radiation protection technologies in manned deep space exploration missions[J]. Chinese Science Bulletin,2019,64: 2087-2103(in Chinese).

[31] Gohel A,Makwana R,Soni B. Evaluating shielding materials for high energy space radiation[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,2022,1221(1): 012003.

[32] Laurenzi S,de Zanet G,Santonicola M G. Numerical investigation of radiation shielding properties of polyethylene-based nanocomposite materials in different space environments[J]. Acta Astronautica,2020,170: 530-538.

[33] Al Zaman M A,Roy S,Sarker S,et al. Comparative analysis of the effectiveness of natural polymers and conventional space radiation shielding polymers in spacecraft for prolonged space expeditions[J]. Materials Research Express,2023,10(11): 115301.

[34] Korkut T,Korkut H. Monte Carlo simulations of proton irradiation effects on PTFE,KEVLAR,EFTE,DYNEEMA, and NOMEX polymeric materials used in astronaut space suits[J]. International Journal of Polymer Analysis and Characterization,2023,28(3): 215-224.

[35] Li H,Guo H,Tu H,et al. Research on B4C/PEEK composite material radiation shielding[J]. Polymers,2024,16(20):1-11.

[36] Lee J H,Kim H N,Jeong H Y,et al. Optimization of shielding to reduce cosmic radiation damage to packaged semiconductors during air transport using Monte Carlo simulation[J]. Nuclear Engineering and Technology,2020,52(8): 1817-1825.

[37] Bhattacharya A. Radiation and industrial polymers[J]. Progress in Polymer Science,2000,25(3): 371-401.

[38] Bijanu A,Arya R,Agrawal V,et al. Metal-polymer composites for radiation protection: A review[J]. Journal of Polymer Research,2021,28(10): 392.

[39] Iqbal H M S,Bhowmik S,Benedictus R,et al. Processing and characterization of space-durable high-performance polymeric nanocomposite[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer,2011,25(1): 87-95.

[40] Prabhu S,Bubbly S G,Gudennavar S B. X-ray and γ-ray shielding efficiency of polymer composites: Choice of fillers, effect of loading and filler size,photon energy and multifunctionality[J]. Polymer Reviews,2023,63(1): 246-288.

[41] Shavers M R,Zapp N,Barber R E,et al. Implementation of ALARA radiation protection on the ISS through polyethylene shielding augmentation of the Service Module Crew Quarters[J]. Space Life Sciences: Radiation Risk Assessment and Radiation Measurements in Low Earth Orbit,2004,34(6): 1333-1337.

[42] Adams J H Jr,Hathaway D H,Grugel R N,et al. Revolutionary concepts of radiation shielding for human exploration of space[R]. NASA/TM-2005-213688M-1133,Huntsville,AL: NASA Marshall Space Flight Center,2005.

[43] Kanagaraj S,Varanda F R,Zhiltsova T V,et al. Mechanical properties of high density polyethylene/carbon nanotube composites[J]. Composites Science and Technology,2007,67(15): 3071-3077.

[44] 王磊. C/W/B_4C/PE复合材料的质子和电子屏蔽性能模拟研究

[D]. 扬州: 扬州大学，2024.
Wang L. Simulation Study on Proton and Electron Shielding Properties of C/W/B_4C/PE composites[D]. Yangzhou: Yangzhou University，2024(in Chinese).

[45] Zaccardi F，Toto E，Rastogi S，et al. Impact of proton irradiation on medium density polyethylene/carbon nanocomposites for space shielding applications[J]. Nanomaterials，2023，13(7): 1288.

[46] Zaccardi F，Toto E，Santonicola M G，et al. 3D printing of radiation shielding polyethylene composites filled with Martian regolith simulant using fused filament fabrication[J]. Acta Astronautica，2022，190: 1-13.

[47] 李红霞. PEEK和PI带电粒辐照损伤与B_4C增强辐射防护[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学，2021.
Li H X. Charged Particle Induced Damage in PEEK and PI and Radiation Shielding Enhanced by B_4C[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology，2021. (in Chinese)

[48] Naito M，Kitamura H，Koike M，et al. Applicability of composite materials for space radiation shielding of spacecraft[J]. Life Sciences in Space Research，2021，31: 71-79.

[49] Fourie L F，Square L，Arendse C，et al. ABPBI/MWCNT for proton radiation shielding in low earth orbit[J]. APL Materials，2023，11(7): 071103.

[50] Cha J H，Jang W H，Sarath Kumar S K，et al. Functionalized multi-walled carbon nanotubes/hydrogen-rich benzoxazine nanocomposites for cosmic radiation shielding with enhanced mechanical properties and space environment resistance[J]. Composites Science and Technology，2022，228: 109634.

[51] Winroth S，Scott C，Ishida H. Structure and performance of Benzoxazine composites for space radiation shielding[J]. Molecules，2020，25(18): 4346.

[52] Cha J H，Kumar Sarath Kumar S，Noh J E，et al. Ultra-high-molecular-weight polyethylene/hydrogen-rich benzoxazine composite with improved interlaminar shear strength for cosmic radiation shielding and space environment applications[J]. Composite Structures，2022，300: 116157.

[53] Loffredo F，Vardaci E，Bianco D，et al. Radioprotection for astronauts' missions: Numerical results on the Nomex shielding effectiveness[J]. Life，2023，13(3): 790.

[54] Loffredo F，Vardaci E，Bianco D，et al. Protons interaction with Nomex target: Secondary radiation from a Monte Carlo simulation with Geant4[J]. Applied Sciences，2022，12(5): 2643.

[55] Loffredo F，Vardaci E，Pugliese M，et al. Dosimetry in space: The shielding effectiveness for the radioprotection of astronauts against 1 GeV protons[J]. Nuclear Physics，2020，43(6): 133.

[56] Durante M，Cucinotta F A. Physical basis of radiation protection in space travel[J]. Reviews of Modern Physics，2011，83(4): 1245-1281.

[57] Weiss P，Mohamed M P，Gobert T，et al. Advanced materials for future lunar extravehicular activity space suit[J]. Advanced Materials Technologies，2020，5(9): 2000028.

[58] 刘名瑞，丁凯，王唯，等. 基于物理吸附储氢材料的研究进展[J]. 储能科学与技术，2023，12(6): 1804-1814.
Liu M R，Ding K，Wang W，et al. Research progress of hydrogen storage materials based on physical adsorption[J]. Energy Storage Science and Technology，2023，12(6): 1804-1814(in Chinese).

[59] Lee H，Choi W I，Ihm J. On hydrogen storage in metal-decorated trans-polyacetylene[J]. Proceedings of the International Symposium on Metal-Hydrogen Systems，Fundamentals and Applications (MH2006)，2007(446-447): 373-375.

[60] Lee H，Choi W I，Ihm J. Combinatorial search for optimal hydrogen-storage nanomaterials based on polymers[J]. Physical Review Letters，2006，97(5): 056104.

[61] Li S，Jena P. Li- and B-decorated cis-polyacetylene: A computational study[J]. Chemistry，Materials Science，Physics. Physical Review B，2008，77(19): 193101.

[62] Yang D，Bayazitoglu Y. Polymer composites as radiation shield against galactic cosmic rays[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer，2020，34(2): 457-464.

[63] 李秀玲，武晓君. 低维氮化硼纳米材料[J]. 中国科学技术大学学报，2014，44(5): 389-402.
Li X L，Wu X J. Low-dimensional boron nitride nanomaterials[J]. Journal of University of Science and Technology of China，2014，44(5): 389-402(in Chinese).

[64] 高佳佳，米媛媛，周洋，等. 新型储氢材料研究进展[J]. 化工进展，2021，40(6): 2962-2971.
Gao J J，Mi Y Y，Zhou Y，et al. Recent developments in new hydrogen storage materials[J]. Chemical Industry and Engineering Progress，2021，40(6): 2962-2971(in Chinese).

[65] Paige C，Newman D，Lombardo S J H. An integrated innovative 3D radiation protection fabric for advanced spacesuits and systems[C]//2020 IEEE Aerospace Conference，2020: 1-11.

[66] Darwish A A，Hassan M H，Abou Mandour M A，et al. Mechanical properties of defective double-walled boron nitride nanotubes for radiation shielding applications: A computational study[J]. Computational Materials Science，2019，156: 142-147.

[67] 蔡毓龙，崔帅，刘洋，等.内辐射带质子和电子被动屏蔽[J].核技术，2023，46(2):63-69.
Cai Y L，Cui Si，Liu Y，et al. Passive shielding against proton and electron in the inner radiation belt[J]. Nuclear Technique，2023，46(2): 63-69(in Chinese).

[68] Gohel A，Makwana R. Multi-layered shielding materials for high energy space radiation[J]. Radiation Physics and Chemistry，2022，197: 110131.

[69] Daneshvar H，Milan K G，Sadr A，et al. Multilayer radiation shield for satellite electronic components protection[J]. Scientific Reports，2021，11(1): 20657.

[70] 刘佳强，张振龙，赵班池，等. 地球内辐射带核心区环境特征分析及质子屏蔽的蒙特卡罗模拟[J]. 航天器环境工程，2022，39(4): 355-360.
Liu J Q，Zhang Z L，Zhao B C，et al. Characteristics of radiation environment of core region in inner Van Allen belt and Monte Carlo simulation of proton shielding[J]. Spacecraft Environment Engineering，2022，39(4): 355-360(in Chinese).

[71] Wang J Z，Ma J N，Qiu J W，et al. Optimization design of radiation vault in Jupiter orbiting mission[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science，2019，66(10): 2179-2187.

[72] Marov M Y. Radiation and space flights safety: An insight[J]. Acta Astronautica，2020，176: 580-590.

[73] 吴康，方美华，张昭，等. 空间辐射对空间站航天员的剂量影响分析[J]. 航天器环境工程，2023，40(5): 475-483.
Wu K，Fang M H，Zhang Z，et al. Analysis of the dose effect of space radiation to astronauts on the space station[J]. Spacecraft

Environment Engineering,2023,40(5): 475-483(in Chinese).
[74] 高大为,蔡明辉,杨涛,等. 空间辐射屏蔽材料研究进展[J]. 航空材料学报,2024,44(3): 1-12.
Gao D W,Cai M H,Yang T,et al. Research progress on space radiation shielding materials[J]. Journal of Aeronautical Materials,2024,44(3): 1-12(in Chinese).
[75] Zeitlin C,Hassler D M,Cucinotta F A,et al. Measurements of energetic particle radiation in transit to Mars on the Mars science laboratory[J]. Science,2013,340(6136): 1080-1084.
[76] Vanatta M,Moraguez M,Miller D. Integrative shielding: Reorganization and trade evaluation of ECLSS and propulsion systems for radiation mitigation on deep space missions[C]// 48th International Conference on Environmental Systems,2018: 247.
[77] 康金兰,管春磊,蔡琴,等. 载人深空探测任务太阳粒子事件物理防护研究进展[J]. 载人航天,2022,28(3): 315-322.
Kang J L,Guan C L,Cai Q,et al. Research progress of SPE physical protection for manned deep space exploration mission[J]. Manned Spaceflight,2022,28(3): 315-322(in Chinese).
[78] Kodaira S,Tolochek R V,Ambrozova I,et al. Verification of shielding effect by the water-filled materials for space radiation in the International Space Station using passive dosimeters[J]. Advances in Space Research,2014,53(1): 1-7.
[79] Szántó P,Apáthy I,Deme S,et al. Onboard cross-calibration of the Pille-ISS Detector System and measurement of radiation shielding effect of the water filled protective curtain in the ISS crew cabin[J]. Radiation Measurements,2015,82: 59-63.
[80] Vuolo M,Baiocco G,Barbieri S,et al. Exploring innovative radiation shielding approaches in space: A material and design study for a wearable radiation protection spacesuit[J]. Life Sciences in Space Research,2017,15: 69-78.
[81] Baiocco G,Giraudo M,Bocchini L,et al The PERSEO experience: A water-filled garment prototype for personal radiation protection of astronauts successfully tested on board the International Space Station[J]. Aerotecnica Missili & Spazio,2020,99(2): 111-114.
[82] Waterman G,Milstein O,Zlatsin Y,et al. AstroRad: personal radiation protection utilizing selective shielding for deep space exploration[C]//67th International Astronautical Congress, 2016,1: 133-146.

（责任编辑:高慧）