

引用格式: 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 Dawei, CAI Minghui, YANG Tao, et al. Research progress on space radiation shielding materials[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2024, 44(3): 1-12.

## 空间辐射屏蔽材料研究进展

高大为<sup>1,2\*</sup>, 蔡明辉<sup>1,3\*</sup>, 杨涛<sup>1</sup>, 韩瑞龙<sup>1,3</sup>, 张哲<sup>4</sup>,  
唐玉华<sup>4</sup>, 韩建伟<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室, 北京 101499; 2. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049; 3. 中国科学院大学 航空宇航学院, 北京 100049; 4. 探月与航天工程中心深空探测实验室, 北京 100037)

**摘要:** 银河宇宙射线、太阳宇宙射线、辐射带等辐射环境会对元器件、航天员等产生各种空间辐射效应, 威胁航天器的正常工作以及航天员的生命健康。材料屏蔽是目前最有效的辐射防护措施之一, 对保障航天任务的顺利进行有着重要的作用。本文针对元器件、航天员以及飞行器平台防护 3 类典型对象, 梳理不同场景下空间辐射屏蔽材料研究进展, 并对金属复合材料、聚合物材料等空间辐射屏蔽材料的发展方向进行探讨。

**关键词:** 空间辐射; 屏蔽材料; 辐射粒子; 辐射效应

**doi:** 10.11868/j.issn.1005-5053.2023.000168

中图分类号: V257

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2024)03-0001-12

## Research progress on space radiation shielding materials

GAO Dawei<sup>1,2\*</sup>, CAI Minghui<sup>1,3\*</sup>, YANG Tao<sup>1</sup>, HAN Ruilong<sup>1,3</sup>, ZHANG Zhe<sup>4</sup>,  
TANG Yuhua<sup>4</sup>, HAN Jianwei<sup>1,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 101499, China; 2. College of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Aeronautics and Astronautics, University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Deep Space Exploration Laboratory of the Lunar Exploration and Aerospace Engineering Center, Beijing 100037, China)

**Abstract:** Radiation environments such as galactic cosmic rays, solar cosmic rays and radiation belts produce various space radiation effects on the components and astronauts, threaten the normal operation of spacecraft and life and health of astronauts. Material shielding is currently one of the most effective radiation protection measures and plays an important role in ensuring the smooth progress of aerospace missions. The research progress of space radiation shielding materials in different scenarios for three typical objects: components, astronauts, and aircraft platform protection is reviewed in this paper. Also the development direction of space radiation shielding materials such as metal composite materials and polymer materials is explored.

**Key words:** space radiation; shielding materials; radiation particles; radiation effect

随着航天技术的发展, 空间辐射屏蔽材料在航天领域的重要性日益突出, 先进的抗辐射材料对保障航天器的性能、延长航天器的寿命以及保护航天员的健康安全等有着重要的作用<sup>[1-5]</sup>。电子元器件在航天器中得到广泛的应用, 航天器依赖先进的电子元器件进行导航、通信及数据计算等工作, 太空中恶劣的辐射环境中高能粒子可能会引发元器件的

总剂量效应、单粒子效应等, 严重影响这些电子器件的正常运行与工作, 导致系统失效, 影响航天器的寿命<sup>[6-7]</sup>。在载人航天任务中, 银河宇宙射线 (galactic cosmic rays, GCR) 和随机的太阳质子事件 (solar proton event, SPE) 是威胁航天员健康的主要因素<sup>[8-10]</sup>。太阳质子事件主要由电子、质子和重核组成, 银河宇宙射线包含高能质子、 $\alpha$  粒子、电子和

原子序数大于2的原子核,其从太阳系外以接近光速进行传播,能量高达每核子10 GeV及以上<sup>[11]</sup>。在太阳极小期,银河宇宙射线粒子被冲击波加速,由于太阳活动减少,冲击波深入太阳系。当这些辐射穿入航天器的材料时,会产生韧致辐射等二次辐射。当航天器离开地球磁场的保护时,会暴露在太空中更高的电离辐射下,宇宙线离子和二次中子会与人体细胞中的分子发生相互作用,改变DNA的结构,对人体造成严重的危害<sup>[12-13]</sup>。如果没有良好的辐射屏蔽材料,更深和更长时间的太空领域的探索会受到严重的限制。对于太阳系边际探测等深空探测任务,在借力木星变轨中会遭受极强的辐射带粒子,同时核动力平台伴有中子、 $\gamma$ 射线等强辐射环境,因此航天器需要屏蔽自然空间环境的辐射,也需要屏蔽核动力平台的人工核辐射。

先进的航天材料要有良好的抗辐射能力,保障载荷的正常运行以及航天员的安全。屏蔽材料也需要有良好的力学性能、热传导性能、导电性能,能够承受空间环境的极端温度。同时需要对材料进行轻量化设计,轻质的材料对于降低发射成本以及提高航天器的机动性十分重要,并且材料长期的耐用性也是长期航天任务的重要保障。先进抗辐射材料的开发和应用是航天工程领域的一个重要组成部分,对保障航天任务的顺利进行有着极为关键的作用。本文从航天材料的应用场景出发,从航天器元器件、载人航天任务航天员以及深空探测飞行器平台三个方面,对空间辐射防护材料的最新进展进行介绍。

## 1 空间辐射环境与效应

地球的空间辐射环境主要包括银河宇宙射线、太阳宇宙射线以及辐射带粒子。银河宇宙射线是来自太阳系外的能量高但是通量低的带电粒子,其中质子占总数的85%, $\alpha$ 粒子占总数的14%,重核粒子占总数的1%<sup>[14]</sup>。在银河宇宙射线的组成元素中,随着原子序数的增大,通量逐渐减小。太阳宇宙射线是指太阳发生耀斑时发射的高能带电粒子流,其中绝大多数是质子,太阳宇宙射线粒子的通量比银河宇宙射线高几个数量级。地球辐射带是指被地磁场俘获的高能带电粒子区域,根据粒子的空间分布位置,可分为内辐射带和外辐射带。内辐射带的粒子组成成分主要为电子和质子,以及少量的重离子。外辐射带主要由0.1~10 MeV的高能电子以及少数的低能质子组成<sup>[15]</sup>。对于深空探测

的航天器而言,也会遭遇银河宇宙射线以及太阳宇宙射线。太阳系边际探测是深空探测的前沿领域,当进行太阳系边际探测时,需要借助木星的引力进行变轨,航天器会受到木星辐射带的影响<sup>[16]</sup>。木星辐射带相对于地球辐射带能量更高、通量更高、范围更广。

空间辐射环境极为恶劣,高能带电粒子与航天器的材料与电子元器件接触,会将所带能量及电荷进行传递,可在材料中形成额外的电子-空穴,原子发生位移和电荷积累,称为空间辐射效应。空间辐射效应包括电离总剂量效应、单粒子效应、位移损伤效应、充放电效应等<sup>[17-18]</sup>。航天器在轨期间,不断遭受空间中高能辐射带电子、质子以及太阳宇宙射线质子的电离作用,在元器件内部的材料上累积大量的电离电荷,造成元器件的功能退化乃至最终失效,这称为电离总剂量效应。航天器在飞行期间,可能会遇到单个能量较强的辐射带质子或宇宙线粒子在元器件内部产生较强的瞬时电流脉冲,导致元器件内部产生CMOS器件锁定等单粒子效应。航天器会在飞行当中受到高强度的太阳质子或辐射带电子、质子的位移作用,使得元器件的材料内部产生更多的缺陷,影响载流子的运输,造成精密器件的电参数退化,最终可能会失效,这称为位移损伤效应。航天器在短时间遇到高强度的带电粒子会导致材料带电,当材料的局部电场强度增大超过一定阈值会造成静电放电,放电脉冲使电子元器件受到干扰,导致信息紊乱等,最终造成航天器电子设备故障,这称为充放电效应。能量较高的带电粒子入射到航天器材料,受到阻挡导致速度慢化,伴随速度变化,会辐射出高能量光子,继续穿透产生电离辐射剂量,这称为韧致辐射。当空间高能粒子作用于生物体时,将引发一系列辐射生物学效应,其中最显著的就是电离辐射效应。电离辐射不仅可能导致机体细胞损伤和细胞核破碎,而且还可能导致染色体畸变、线粒体肿胀和形成多倍体细胞等其他生物学效应。当人体受到辐射剂量达到一定阈值时,机体的各种生物学效应都将增强,出现放射病。电离辐射作用于人体细胞DNA上时,还可能导致DNA结构破坏,严重影响正常生命活动,包括损伤生物体的生殖细胞遗传物质,造成染色体畸变与基因突变等<sup>[19]</sup>。

## 2 元器件空间辐射屏蔽材料

随着我国卫星任务长寿命、高可靠、低成本发

展趋势,对元器件空间辐射屏蔽材料提出了更高的要求,在提升抗辐射性能的同时尽量占用质量资源小,同时具备良好的力、热、电性能和空间环境适应性。良好的力学性能可以满足载荷结构板的设计要求,导热性良好能够实现载荷高效的热传导需求,较高的电导率可以防止材料充电。对于不同辐射环境下的轨道任务,需要设计不同的抗辐射材料对元器件进行保护。

### 2.1 高地球轨道任务用辐射屏蔽材料

对于地球同步轨道等高地球轨道,卫星受到总剂量的影响以辐射带电子为主,能量越高,电子通量越小<sup>[20]</sup>。电子经过屏蔽材料时,会与材料原子壳中的电子发生非弹性碰撞,造成原子的电离和激发。电子的质量较小,因此经过碰撞发生电离与激发后的运动方向会产生较大变化。在电离的过程中会产生次级电子,若次级电子的能量足够大,会在屏蔽材料中继续运动,继续与原子发生作用导致电离。电子还会在屏蔽材料中与靶物质作用发生韧致辐射,在电子的运动方向及速度发生变化时,电子的一部分能量会转化为电磁辐射。韧致辐射强度与带电粒子质量的平方成反比,与靶核原子序数的平方成正比。

高原子序数材料对电子的屏蔽较好,但是原子序数越高,产生的韧致辐射也越严重。为了降低次

级韧致辐射,应选择低原子序数材料。因此采取高低原子序数材料进行复合屏蔽来降低总剂量的影响。金属钽的熔点高、耐热性能好,具有极高的化学稳定性和优异的抗腐蚀性能,还具有良好的塑韧性,易加工成形。金属钽的优异性能使其成为制备层状金属复合材料的首选高原子序数材料。采取外层为低原子序数材料的屏蔽结构来减少韧致辐射的产生。低原子序数材料铝可以在屏蔽入射电子的同时产生较少的韧致辐射,高原子序数材料钽能够在慢化低能电子的同时吸收韧致辐射,通过复合屏蔽策略可以实现对高能子及其二次辐射的有效屏蔽。

空间辐射环境的多变以及不同半导体器件的结构复杂性决定了抗辐射加固方法的多样性,目前大多采用被动辐射屏蔽方法,即使用抗辐射的屏蔽材料来对器件进行防护。Fan等利用Monte Carlo仿真发现,对于中地球轨道的电子辐射环境,使用相同面密度的“铝层-钽层-铝层”的组合材料结构比单层铝的辐射屏蔽效果高60%<sup>[21]</sup>。对辐射敏感的微电子半导体器件如芯片等,可在其外表面使用局部屏蔽,涂上抗辐射材料涂层。徐加强等使用钽作为高原子序数防护层,使用防辐射稳定性好的聚醚醚酮(PEK)作为粘接剂,可以在质量尽可能减轻的情况下达到良好的抗辐射效果(图1)<sup>[22]</sup>。

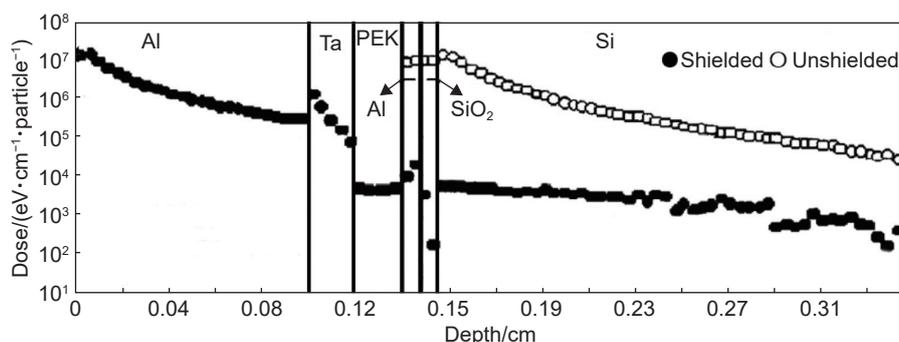


图1 屏蔽和未屏蔽的深度剂量分布比较<sup>[22]</sup>

Fig. 1 Comparison of depth-dose distribution between shielded and unshielded semiconductor<sup>[22]</sup>

在电子为主的高轨辐射环境中,使用“铝层-钨层-铝层”三层屏蔽结构,也会取得良好的效果。曹洲等使用钽层和镁层构成复合屏蔽材料,当面密度为 $2\text{ g/cm}^2$ 时,该复合屏蔽材料对 $3.5\text{ MeV}$ 电子的屏蔽性能大于80%<sup>[23]</sup>。胡鉴航等发现使用高低原子序数的材料组合而成的复合屏蔽材料对电子的屏蔽效果主要受到入射电子的能量以及屏蔽材料的厚度影响,当入射电子的能量越高时,屏蔽材料的等效厚度越大,复合材料的屏蔽

效果相比单一材料的屏蔽效果越明显<sup>[24]</sup>。Tokar等在铝合金表面制备了三氧化二铋和硅酸锂的重金属层,离子辐照实验表明,该重金属涂层可以把地球静止轨道的辐射吸收剂量减小10~1000倍<sup>[25]</sup>。Devanzo等使用铁锈加入三防漆来代替铝,发现铁锈屏蔽辐射的能力与传统铝粉相当,该屏蔽材料可以降低防辐射材料的质量成本<sup>[26]</sup>。赵鹤然等<sup>[20]</sup>通过冷喷涂方法得到纳米铝钽复合涂层,解决传统封装加固中对于辐射屏蔽中“越挡越乱”

的问题。经实验证明 0.4 mm 以上的铝钽复合涂层的屏蔽效率超过 90%，并通过了可靠性测试，

该材料具有设计周期短、成本低及效果好等优点(图 2)<sup>[20]</sup>。

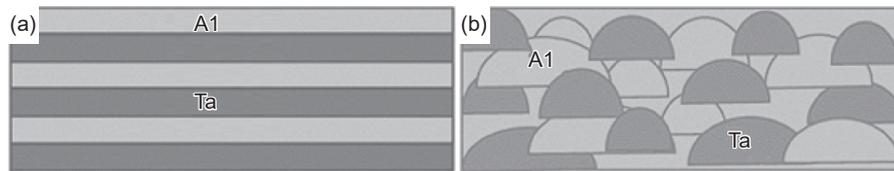


图 2 复合涂层结构示意图<sup>[20]</sup> (a)传统多层屏蔽结构;(b)冷喷涂复合纳米涂层

Fig. 2 Schematic diagrams of composite coating structure<sup>[20]</sup> (a)traditional multi-layer shielding structure; (b)cold spray composite nano-coating

## 2.2 中低地球轨道任务用辐射屏蔽材料

地球的内辐射带高能质子通量大,因此辐射环境极为恶劣。由于地球成像和通信技术的发展,卫星在中地球轨道区域能发挥更大的价值,在地球观测应用中,中轨道卫星结合了低地球轨道高空间分辨率和地球同步轨道高时间分辨率的优点,在通信应用中,中地球轨道的往返延迟比地球同步轨道低得多。越来越多的中地球轨道卫星计划被提出,但是此轨道处于地球内辐射带的核心区域,高能质子为主的辐射环境非常恶劣,会导致严重的辐射损伤和电子学的瞬态反应。

Steffens 等研究了钨强化的聚乙烯(PE)对质子的屏蔽效果,该材料在以质子为主的辐射环境中有良好的辐射屏蔽效果,该结构具有很好的稳定性<sup>[27]</sup>。Daneshvar 等研究发现三层屏蔽比纯铝材料等传统屏蔽具有优势,因为它具有多样性和较低的层数以及较低的加工成本。通过对屏蔽结构施加限制,最佳结构为三层“铝青铜/钽/铝青铜”的组合,可以显著屏蔽质子辐射<sup>[28]</sup>。Fourie 等制备了“聚(2,5)苯并咪唑/多壁碳纳米管(ABPBI/MWCNT)”纳米复合材料,并对其在近地轨道空间区域的质子辐射屏蔽能力进行了评估。通过将 ABPBI/MWCNT 纳米复合材料的质子传输性能和二次中子产生与原始 ABPBI 进行比较发现,在 ABPBI 基体中添加 MWCNT 进一步减少了原始 ABPBI 产生的二次中子。随着 MWCNT 质量分数的增加,质子对复合材料本体的渗透降低。含有 MWCNT 的复合材料表现出比原始 ABPBI 更好的热稳定性,所呈现的总体特性表明 ABPBI/MWCNT 纳米复合材料是一种可在航天工业中应用的有效材料<sup>[29]</sup>。图 3 为中国第一个中地球轨道卫星 CX-12(01)轨道中不同材料 5 年内的剂量-深度曲线,表明低原子序数的元素可以有效地屏蔽质子<sup>[30]</sup>。Zhang 等使用基于聚乙烯的复合材料作为卫

星的局部屏蔽材料,保护对电离总剂量和位移损伤敏感的 CMOS 图像传感器,为了降低充放电的风险,在聚乙烯中加入质量分数 0.6% 碳纳米管,降低了电阻率,提高电荷泄露性能。与等质量的铝材料相比,该复合材料的电离总剂量降低了 40%<sup>[30]</sup>。

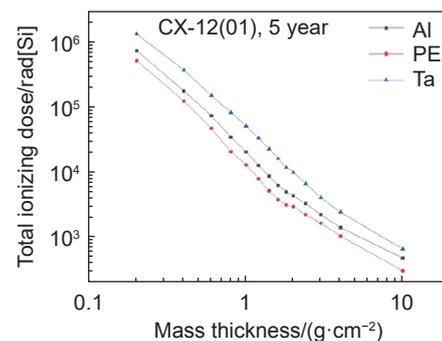


图 3 CX-12(01)轨道对于不同材料的剂量-深度曲线<sup>[30]</sup>  
Fig. 3 Dose-depth curve in CX-12(01) orbit for different shielding materials<sup>[30]</sup>

## 2.3 航天级复合材料制备技术

复合材料可通过冷压轧焊接技术及热压轧焊接技术相结合的技术进行制备。该制备过程主要由三个阶段组成:物理接触形成阶段、化学相互作用阶段和扩散阶段。(1)物理接触形成阶段:发生于复合金属在轧制塑性变形的过程中,接触面相互接近至能够引起物理作用的距离,接触面硬脆层破裂,新鲜金属嵌入达到物理接触形成阶段;(2)化学相互作用阶段:复合金属接触表面激活并形成化学键,实现复合金属的结合;(3)扩散阶段:复合金属在完成物理接触实现初步结合后,各组元金属中的原子通过结合面相互扩散,以增进结合强度<sup>[31]</sup>。

复合材料应用于未来的航天任务需要克服众多制造生产中的难题。在质量控制方面,确保复合材料的均匀性和一致性具有一定的挑战性。材料特性的变化可能导致结构不一致,例如由于不同金属的塑变机制不同,难以协同变形,从而损害航天

部件的整体完整性。因此在整个制造过程中,需要采取严格的质量控制措施。在耐久性和抗疲劳性方面,航天部件在使用寿命期间会受到循环载荷和各种应力条件的影响。确保复合材料随着时间的推移表现出高耐久性和抗疲劳性至关重要,减轻如分层和微裂纹等因素的影响是持续存在的挑战。在损伤检测和修复方面,复合材料结构可能容易受到难以识别的隐性损伤,如内部分层或微裂纹,开发可靠的方法来检测和修复复合材料的损伤对于保持航天部件的结构完整性十分重要<sup>[32]</sup>。从实验室规模的生产向大规模制造的转变难以保持相同质量和一致性水平。在保持成本可控和确保可靠性的同时扩大规模是一个重大障碍。

层状复合卷材高效轧制制备技术是多层材料制备涉及的关键技术,未来需要深入研究叠层结构及成分设计对于多层状复合材料性能的影响及复合轧制协同变形控制技术对轧制过程的影响机理。同时要探究热处理对多层复合材料力学性能、界面微观组织和表面性能的影响规律,建立复合卷材制备工艺与性能间的关系。热处理全过程组织性能与界面调控技术需要根据材料的力学和界面剪切性能进行固溶、时效热处理,同时热应力控制在合理的区间内以防止界面层分层,进行退火工艺优化。在未来要开发抗辐射用层状复合材料高效轧制、综合性能调控技术,提高层状材料的生产工艺<sup>[33]</sup>。

### 3 航天员辐射屏蔽材料

随着我国空间站的全面建成,载人航天任务将由近地向月球及深空转变。由于缺少磁场和大气的屏蔽,航天员在月球及深空飞行中遭遇的日均辐射剂量远远高于近地空间站轨道。NASA好奇号辐射评估探测器探测结果表明,平均辐射剂量约为1.84 mSV/d,而且95%的辐射剂量来源于银河宇宙射线<sup>[34]</sup>。中国嫦娥四号搭载的月球中子和剂量探测器最新探测结果表明,月面平均辐射剂量大约为1.37 mSV/d,其中77%来自银河宇宙射线,23%来自月表次级中子辐射;如果遭遇类似1972年8月的强太阳质子事件,辐射剂量可在短时间内达到1000 mSV,远远超过美国辐射防护与测量委员会规定的剂量限制值150 mSV。由于月球及深空轨道遭遇的高能粒子能量更高,屏蔽所需的质量成本也更大,因此宇航员防辐射屏蔽材料的研制对于保护航天员的生命安全,免受辐射生物学效应的影

响至关重要。对于宇航员的辐射屏蔽材料不仅需要良好的辐射屏蔽效果,也需要轻质化及良好的弯曲模量等力学性能便于宇航员的活动与工作。载人航天领域的辐射屏蔽方法主要分为被动屏蔽材料和主动屏蔽方法。

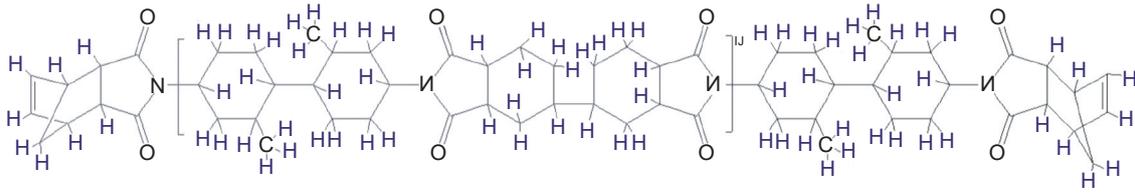
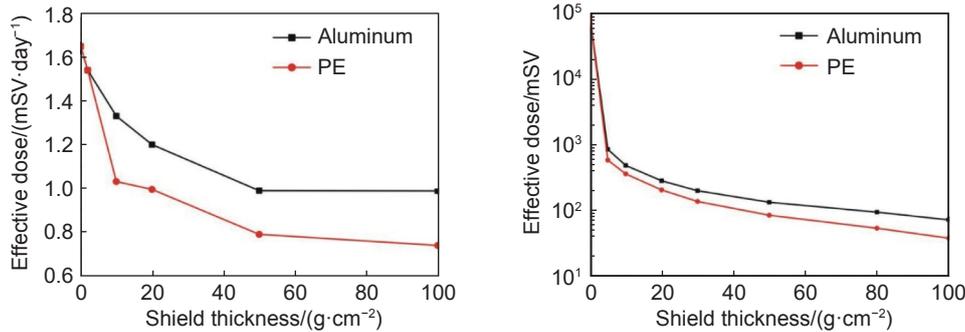
#### 3.1 被动屏蔽材料

被动辐射屏蔽材料是目前使用最广泛的方法,即使用抗辐射的屏蔽材料对器件进行防护。对于银河宇宙射线中发现的大多数的粒子和能量,材料的辐射屏蔽效果随着原子序数的减小而增加,因此氢的屏蔽效果最好。富氢材料可以实现良好的抗辐射性能,同时可以降低辐射屏蔽所需要的质量,越来越多的研究人员在考虑与富氢材料相关的研究方法。

Zhong等提出了超高分子量聚乙烯与纳米环氧树脂组成复合材料,经过GCR重粒子辐射实验证明该材料对宇宙辐射高屏蔽效果与聚乙烯相当,并且具有良好的力学性能与较低的成本,在太空中更有应用价值<sup>[35]</sup>。为了降低空间中的高能粒子对宇航员的危害,Stemrad和洛克希德马丁使用富氢聚合物研发了Astrorad屏蔽辐射可穿戴设备,该设备可有效降低空间中的辐射及二次辐射的产生。Astrorad能够对辐射敏感的身体部位进行选择性地保护,在具有良好的辐射屏蔽效果的同时,兼具佩戴的便携性和舒适性,可以用最小的质量提供最大的防护<sup>[36]</sup>。

在聚合物中,聚乙烯的化学组成式为 $C_2H_4$ ,其中氢拥有很大的占比。作为辐射屏蔽材料,硼也可以发挥重要的作用,因为 $^{10}B$ 同位素具有利于吸收中子较高的横截面。由于聚乙烯的低熔点,无法在100℃以上的环境中单独使用,并且 $^{10}B$ 填料与聚乙烯基体之间缺少界面黏合力,导致复合材料的辐射屏蔽性能以及物理性能无法满足要求。可以通过压制成型以及高温加工技术研制力学性能优异的富氢复合材料。

蔡明辉等通过对分子结构进行设计,合成含氢量高的专用树脂,树脂基体的分子结构图如图4所示<sup>[37]</sup>。使用高密度的聚乙烯纤维,制作高含氢复合材料;使用硼粉作为添加剂来优化复合材料的辐射屏蔽性能。图5<sup>[37]</sup>为聚乙烯和纯铝对GCR和SPE的屏蔽效果。从图5可以看出,对于空间中的辐射,聚乙烯比铝具有更好的屏蔽性能。此外,聚乙烯对GCR的屏蔽效果比SPE的屏蔽效果更好,这是因为GCR粒子能量更高,可以产生更多的二次辐射。聚乙烯达到与铝相同的辐射防护效果所

图4 高含氢专用树脂基体的分子结构图<sup>[37]</sup>Fig. 4 Molecular structure diagram of high hydrogen content special resin matrix<sup>[37]</sup>图5 聚乙烯和纯铝材料对空间辐射屏蔽效果<sup>[37]</sup> (a)GCR; (b)SPEFig. 5 Space radiation shielding effect of polyethylene and pure aluminum material<sup>[37]</sup> (a)GCR; (b)SPE

需的质量将显著减少。通过对真实的空间辐射环境进行蒙特卡洛模拟,得到当屏蔽厚度大于  $10 \text{ g/cm}^2$  时,与传统的铝屏蔽材料相比,对于银河宇宙射线和太阳质子事件屏蔽所需要的质量分别减少超过 77% 和 33%。

Winroth 等采用低压真空装袋工艺制备了由超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维增强材料和富氢聚苯并恶嗪基体组成的复合材料。聚苯并恶嗪基体源自新型苯并恶嗪树脂,该树脂具有独特的特性:高氢含量可屏蔽 GCR,低聚合温度可避免复合材料制造过程中对 UHMWPE 纤维造成损坏,低黏度有助于提高成型过程的流动性。与纯铝材料相比,该复合材料的比强度增加了 325%,等效辐射剂量减少了 31%。改进后,含有碳纤维表层的复合材料样品拉伸模量增加了 144%,弯曲模量增加了 227%。该复合材料的屏蔽性能接近纯聚乙烯,在面密度为  $15 \text{ g/cm}^2$  时,预计差异小于 3%<sup>[38]</sup>。

### 3.2 主动屏蔽方法

国际上现有的载人航天方向的主动防护方法有静电场防护、等离子体防护以及磁场防护。静电场防护的原理是基于静电场会对带电粒子发生作用,会在防护区域外部使用体积较大的设备,采取的结构主要为多球结构或双球同心结构。但是静电场防护不适合屏蔽 GCR 和 SPE,且需要的静电势超过现有技术数量级<sup>[39]</sup>。等离子体防护的原理是在防护区域的表面增加正电势来排斥重离子

以及质子,在防护区域周围设置捕获电子的弱磁场来阻碍电子的进入。使用等离子体防护屏蔽 SPE 可能会节省大量的质量,但是等离子体防护面临诸多挑战,如在航天器表面需要  $2 \times 10^5 \text{ kV}$  的静电势,碰撞会导致等离子体云不稳定等<sup>[40]</sup>。磁场防护的原理是基于带电粒子受到洛伦兹力的作用发生偏转使其无法进入防护区域,磁场防护又分为约束磁场防护和非约束磁场防护。主动磁场防护的四个最主要的系统分别为超导体、结构、热力系统和电力系统。随着高温超导与新型磁场构型的提出使得磁场屏蔽成为可能,NASA 发布的磁场防护技术系统论证了高温超导实现磁场防护的可行性。综上,磁场防护是未来载人深空探测任务中空间辐射防护的一个重要方向<sup>[41]</sup>。

## 4 深空探测飞行器平台辐射屏蔽材料

### 4.1 木星辐射环境屏蔽材料

木星探测是未来深空探测领域的热点之一,太阳系边际探测是空间科学研究的前沿领域,航天器借助木星引力实现变轨是太阳系边际探测的重要组成部分,但木星空间辐射环境极为恶劣,木星辐射带电子通量比地球高 2~3 个数量级,其中占主导的高能电子是诱发电离总剂量效应的主要原因,严重危害航天器电子器件的寿命。卫星在借助木

星引力变轨时, 单次借力受到的总剂量可达数百 krad[Si]。

木星的辐射环境以高能电子为主, 采取高原子序数材料(钽、钨、钛等)与低原子序数材料组成复合屏蔽可有效屏蔽木星的辐射环境。Cheng 针对木星辐射环境使用铝层钨层进行复合屏蔽, 发现当屏蔽厚度  $> 10 \text{ g/cm}^2$  时铝钨复合屏蔽效果优于单层铝的屏蔽<sup>[42]</sup>。为了对强辐射环境进行屏蔽, 还需对敏感器件进行单独防护, 实现点屏蔽。Juno 卫星采用钽材料做成矩形屏蔽盒, 对其中的遥测、通信等分系统的辐射敏感器件进行有效防护<sup>[43]</sup>。除金属材料外, 聚合物也可用于辐射屏蔽, 钨加强型聚酰胺虽然结构稳定性较差, 但是绝缘性好, 可用于电子为主辐射环境中的点屏蔽。

#### 4.2 飞行器平台辐射屏蔽材料

对于深空探测, 卫星需要核动力平台提供动力支持, 因此在木星辐射环境的基础上, 也需要考虑核动力辐射平台环境的影响。核能作为一种能量密度极高且能被长期使用的能源, 受到广泛关注, 但是核能在使用过程中会产生核辐射, 在多种辐射射线中, 穿透力强且能量高的  $\gamma$  射线和中子, 会产生更严重的损害, 因此需要对其进行重点防护, 这要求辐射屏蔽材料的质量更轻, 满足航天器移动平台的需要, 且具有耐腐蚀和良好的力学性能, 起到一定的结构支撑作用。

现在能同时屏蔽  $\gamma$  射线和中子的材料有屏蔽混凝土、铅硼聚乙烯以及硼钢。屏蔽混凝土的价格较低, 但是对于单位厚度的辐射屏蔽效果有限, 需要通过较大的厚度来满足辐射屏蔽要求, 不适合可移动式的核反应堆的防护。铅硼聚乙烯的耐热性较差, 在屏蔽辐射的过程中会产生二次韧致辐射。硼钢中熔点较低且硬而脆的硼化物会在晶界析出, 使得材料的物理性能以及辐射屏蔽性能受到影响。因此, 核辐射的屏蔽材料研究的重点是兼具良好物理性能以及抗辐射性能的材料。

聚乙烯含氢量高, 对快中子有较好的减弱能力<sup>[44-46]</sup>;  $\text{B}_4\text{C}$  粉含硼量高, 对中子的吸收截面较高,

对中子有较强的俘获能力, 但是吸收中子后会因能量释放产生  $\gamma$  射线<sup>[47-48]</sup>; Pb 粉对于  $\gamma$  射线的吸收率高, 因此使用聚乙烯、 $\text{B}_4\text{C}$  粉和 Pb 粉复合而成的新材料能同时屏蔽多种射线, 在核反应堆的辐射屏蔽防护中得到广泛应用<sup>[49]</sup>。对于 14.1 MeV 快中子的屏蔽性能主要与复合材料内中低原子序数的含量有关, 含硼的复合材料对于热中子的屏蔽效果主要与硼含量有关, 伴生的  $\gamma$  射线光子的衰减与材料中高原子序数元素的含量以及材料的密度有关<sup>[50]</sup>。周玉超使用钨硼化合物作为功能粒子用来屏蔽  $\gamma$  射线和中子, 选择能保证力学性能且质量较轻的铝合金作为基体材料, 设计出钨硼化合物/铝复合材料, 钨硼功能粒子的体积分数为 30%, 通过球磨混粉及放电等离子烧结制作复合材料。钨硼化合物/铝复合材料对  $\gamma$  射线的线吸收系数为  $0.32 \text{ cm}^{-1}$ , 对于热中子的宏观反应截面为  $5.62 \text{ cm}^{-1}$ <sup>[51]</sup>。牛昊轩等研制出高含钨铝基复合材料, 使用高纯铝作为基体材料, 钨和碳化硼作为屏蔽组元, 能够同时屏蔽  $\gamma$  射线、快中子以及热中子, 对于实现核反应堆的体积与质量的轻量化设计有重要的借鉴意义。该材料的密度为  $8.2 \text{ g/cm}^3$ , 钨的质量分数为 75%~80%,  $\text{B}_4\text{C}$  的质量分数为 0.5%~2.5%, 实现相同厚度下优于铅硼聚乙烯对快中子的屏蔽, 同时优于一般钢材对于  $\gamma$  射线的屏蔽性能<sup>[52]</sup>。

王静等<sup>[53]</sup> 通过研究尼龙 6(PA6)、高密度聚乙烯(HDPE)、低密度聚乙烯(LDPE)3 种典型聚乙烯材料的熔体流动性及力学性质来选择合适的复合材料基体。实验结果如表 1<sup>[53]</sup> 所示, 用 PA6 作为基体材料力学性能高, 但是熔体流动性较差, 材料成型时会产生粉体聚团现象, 而用 HDPE 和 LDPE 为基体材料力学性能相似, 但是 LDPE 的熔体流动性更优, 因此选择 LDPE 作为基体材料。

高填充量铅硼/聚乙烯复合材料使用聚乙烯作为基体, 铅硼混合粉体作为辐射屏蔽的功能增强体, 采用混炼、熔融挤出-层压二段成型的工艺, 实现了高填充量铅硼/聚乙烯抗辐射复合材料的连续成型制备。图 6<sup>[53]</sup> 为 4 种不同配方的复合材料拉

表 1 不同基体的辐射屏蔽复合材料性能<sup>[53]</sup>  
Table 1 Properties of radiation shielding composite materials with different matrices<sup>[53]</sup>

Substrate type	Tensile strength /MPa	Elongation / %	Compressive strength /MPa	Elastic modulus /GPa	Impact strength / ( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ )	Density / ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )	Melt flow rate / ( $\text{g} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$ )
PA6	22.8	29.2	58.7	1.61	3.9	2.228	21.9
HDPE	20.7	7.6	43.3	1.63	3.8	2.326	23
LDPE	21.9	17.8	42.9	1.77	4.8	2.147	42.2

伸断裂截面电子扫描显微镜照片。由图6可观察到,粉团没有明显团聚现象,样品断裂面随着铅硼含量的提高而变得更加粗糙,证实了填补颗粒对材料的补强效果,力学性能随着填料的增加而提

高。在铅硼材料的质量分数为80%时的抗辐射复合材料的综合性能最好,其拉伸强度达到22.845 MPa,对于 $^{137}\text{Cs}$ 源的 $\gamma$ 射线的线性衰减系数为 $0.034\text{ mm}^{-1}$ [53]。

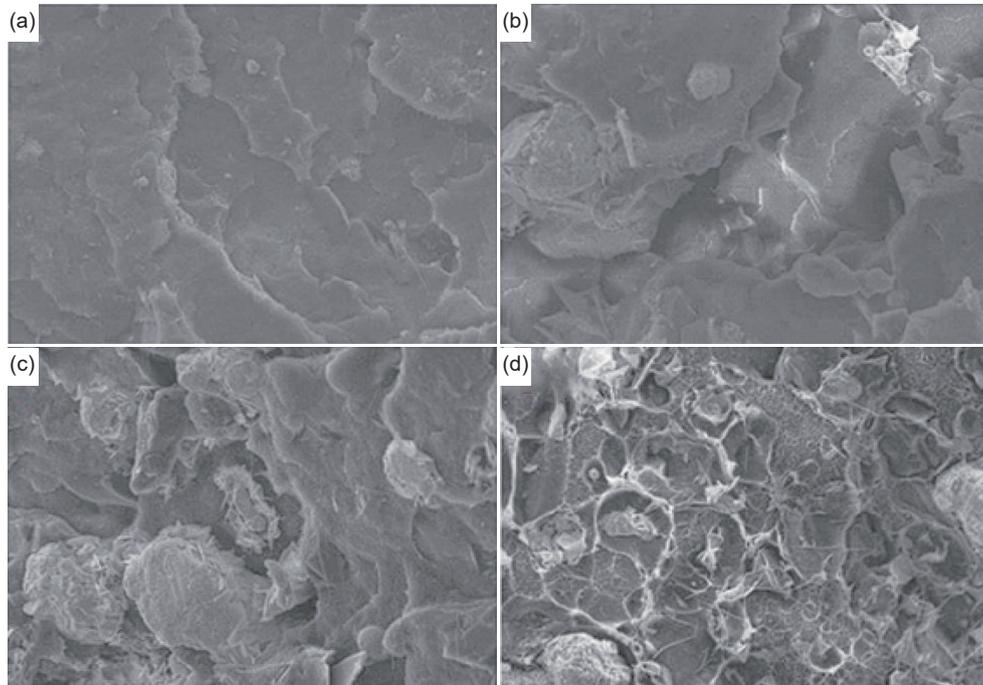


图6 辐射屏蔽复合材料拉伸断面扫描电镜图<sup>[53]</sup> (a)PB250; (b)PB260; (c)PB270; (d)PB280

Fig. 6 Scanning electron microscope images of tensile section of radiation shielding composite material<sup>[53]</sup>  
(a)PB250; (b)PB260; (c)PB270; (d)PB280

聚合物基中子屏蔽复合材料具有质量轻、易于制造、中子吸收剂分布均匀、耐化学腐蚀性能好等优点。与传统金属相比,基体聚合物含有大量氢元素,能通过弹性散射有效衰减高能中子并削弱 $\gamma$ 辐射。由于氢核中没有中子,氢具有无二次中子辐射的优势。基于不同环氧树脂增强材料的多层梯度材料中子屏蔽效果明显优于均匀混合材料。第一层选择具有高非弹性散射截面的元素来减慢快中子的速度;第二层选择具有高弹性截面值的元件将慢化中子转化为低能热中子;第三层选择热中子吸收截面高的元素;第四层选择 $\gamma$ 射线吸收截面高的元素,以屏蔽一次 $\gamma$ 射线和二次 $\gamma$ 射线。这种梯度材料具有密度低、质量轻、结构紧凑、针对性强等优点<sup>[54]</sup>。

## 5 未来发展方向

我国在航天领域辐射屏蔽材料的研究正处于上升阶段,航天任务对辐射屏蔽材料的性能要求逐步提高,辐射屏蔽材料的需求潜力巨大。针对空间辐射

屏蔽材料的特性,作者认为其发展方向有如下几点:

### (1)轻量化

为了节约航天器的质量资源,降低发射成本,提高航天器的机动性,材料要向轻量化的方向发展。在载人航天任务中,对于宇航员的辐射屏蔽材料不仅需要良好的辐射屏蔽效果,也需要轻量化及良好的弯曲模量等力学性能便于宇航员的活动与工作。未来抗辐射材料应向辐射屏蔽效果更好、质量更轻的方向发展。

### (2)多功能化

航天器元器件的辐射屏蔽材料需要在保持抗辐射性的同时兼具良好的力学性能、热传导性能、导电性能和空间环境适应性。多层金属材料、纳米铝钽复合涂层及纳米复合材料等可以有效屏蔽元器件所受地球辐射带电子及质子的影响。为了满足航天材料的需求,先进的材料应在保证结构强度的基础上,提升辐射屏蔽性能,向多功能方向发展,使航天材料具有更加多样化的性能<sup>[55]</sup>。

### (3)高可靠性

抗辐射材料的高可靠性对于保护航天器电子

设备的正常运行以及航天员的安全至关重要,材料需要在极端温度与真空环境下,确保具有稳定且高效的抗辐射性能,保证在服役期间正常工作。

#### (4)低成本化

低成本化包括材料的低成本化,设计的低成本化以及制造的低成本化。材料的低成本化主要是通过选择价格更为合理,且性能满足要求易于加工的原材料来实现。设计的低成本化可通过简化产品结构、减少冗余部件来降低制造成本,同时通过模块化设计使产品组装维护更便捷,减少时间和人力成本。制造的低成本化主要依赖优化生产流程和工艺、提高生产效率、减少浪费、降低制造成本<sup>[56]</sup>。

#### (5)智能化

将材料制造与数字化技术进行结合,发展制造仿真技术,实现设计制造一体化。将生产工艺向批量化生产方式转变,通过自动化提高生产效率,满足材料的制造需要。复合材料是一种多项结构,不同的复合设计会得到不同的性能,因而引发不同的材料损伤机制。因此需要利用智能化的设计手段,实现性能的定制化。实现智能化的材料技术,对服役状态下的材料变化的高精度预报,检测健康的状态,实现对结构的主动变形、性能检测以及材料的损伤修复<sup>[57]</sup>。

## 6 结束语

先进的抗辐射材料对于保障航天器件的正常运行、航天员的健康安全以及深空探测任务中隔绝核动力平台的核辐射有着重要的作用。本文总结了不同任务场景下的先进辐射屏蔽材料,高原子序数材料对电子的屏蔽较好,低原子序数材料对质子的屏蔽较好,富氢材料可以实现对银河宇宙射线良好的抗辐射性能,使用聚合物作为基体材料,铅硼等粉体作为辐射屏蔽的功能增强体,能够有效屏蔽核动力平台产生的中子和 $\gamma$ 射线。对于不同的材料进行组合,使用更先进的生产工艺进行制备,可以研制出更为先进的材料,对于多种辐射场景实现有效防护。空间辐射屏蔽材料在满足抗辐射性能的同时,应向轻量化、多功能化、高可靠性、低成本化及智能化的方向发展。

#### 参考文献:

- [1] 王立,邢焰. 航天器材料的空间应用及其保障技术[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(1): 35-40.
- [2] 金恂叔. 航天器在轨故障与空间环境的关系[J]. 航天器环境工程, 2004(3): 1-6.
- [3] JIN X S. The relationship between spacecraft in orbit faults and space environment[J]. Spacecraft Environmental Engineering, 2004(3): 1-6.
- [4] TANNY S, HARRELL D, CHOPRA M, et al. SU-E-T-243: design of a novel testing port for radiation protection and shielding measurements[J]. Medical Physics, 2015, 42(6): 3388-3388.
- [5] YA'ACOB N, ZAINUDIN A, MAGDUGAL R, et al. Mitigation of space radiation effects on satellites at Low Earth Orbit(LEO)[C]//2016 6th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE). Batu Ferringhi, Malaysia: IEEE, 2016: 56-61.
- [6] MORE C V, ALSAYED Z, BADAWI M S, et al. Polymeric composite materials for radiation shielding: a review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2021, 19: 2057-2090.
- [7] 薛玉雄,杨生胜,把得东,等. 空间辐射环境诱发航天器故障或异常分析[J]. 真空与低温, 2012, 18(2): 63-70.
- [8] XUE Y X, YANG S S, BA D D, et al. Analysis of spacecraft failures or anomalies induced by space radiation environment[J]. Vacuum and Low Temperature, 2012, 18(2): 63-70.
- [9] 沈自才,夏彦,杨艳斌,等. 航天器空间辐射防护材料与防护结构[J]. 宇航材料工艺, 2020, 50(2): 1-7.
- [10] SHEN Z C, XIA Y, YANG Y B, et al. Spacecraft space radiation protection materials and protective structures[J]. Aerospace Materials and Technology, 2020, 50(2): 1-7.
- [11] 吴大蔚,张华,赵亚丽,等. 载人航天飞行空间辐射研究进展[J]. 航天医学与医学工程, 2018, 31(2): 152-162.
- [12] WU D W, ZHANG H, ZHAO Y L, et al. Research progress on space radiation in manned spaceflight[J]. Aerospace Medicine and Medical Engineering, 2018, 31(2): 152-162.
- [13] 贾向红,许峰,白延强,等. 银河宇宙射线对登月航天员辐射风险分析[J]. 航天医学与医学工程, 2013, 26(5): 410-414.
- [14] JIA X H, XU F, BAI Y Q, et al. Radiation risk analysis of galactic cosmic rays on lunar astronauts[J]. Aerospace Medicine and Medical Engineering, 2013, 26(5): 410-414.
- [15] SPILLANTINI P. Superconducting magnets and mission strategies for protection from ionizing radiation in interplanetary manned missions and interplanetary habitats

- [J]. *Acta Astronautica*, 2011, 68(9): 1430-1439.
- [11] ANKIT G, RAJNIKANT M, BHARGAV S. Evaluating shielding materials for high energy space radiation[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2022, 1221(1): 012003.
- [12] MANNING B, SINGLETERRY R. Radiation engineering analysis of shielding materials to assess their ability to protect astronauts in deep space from energetic particle radiation[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 171: 23-30.
- [13] HORNECK G, FACIUS R, REICHERT M, et al. HUMEX, a study on the survivability and adaptation of humans to long-duration exploratory missions, part II: missions to Mars[J]. *Advances in Space Research*, 2006, 38(4): 752-759.
- [14] 王晶, 程永宏, 叶宗海, 等. 太阳活动异常低年银河宇宙线特性研究 [J]. *地球物理学进展*, 2013, 8(5): 2207-2212.  
WANG J, CHENG Y H, YE Z H, et al. Analysis of cosmic ray intensity in 2009[J]. *Progress in Geophysics*, 2013, 8(5): 2207-2212.
- [15] 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. Analysis of environmental characteristics and Monte Carlo simulation of proton shielding in the core area of the Earth's radiation belt[J]. *Spacecraft Environmental Engineering*, 2022, 39(4): 355-360.
- [16] GAO D W, CAI M H, YANG T, et al. Simulations on the shielding performance of composite materials around Jupiter's radiation belts[J]. *AIP Advances*, 2023, 13(9): 095318.
- [17] 王建昭, 张庆祥, 田岱, 等. 木星系粒子辐射环境效应及防护关键技术 [J]. *航天器环境工程*, 2018, 35(5): 500-510.  
WANG J Z, ZHANG Q X, TIAN D, et al. Environmental effects of Jovian galaxy particle radiation and key protection technologies[J]. *Spacecraft Environmental Engineering*, 2018, 35(5): 500-510.
- [18] 赵阔, 文陈, 桑洁, 等. 空间电子产品辐照被动防护技术 [J]. *空间电子技术*, 2021, 18(3): 105-111.  
ZHAO K, WEN C, SANG J, et al. Passive protection technology for radiation of space electronic products[J]. *Space Electronics Technology*, 2021, 18(3): 105-111.
- [19] 马水英, 石莎, 银爱君. 电离辐射生物学效应研究综述 [J]. *北方环境*, 2012, 24(6): 9-13.  
MA S Y, SHI S, YIN A J. Review of the biological effects of ionizing radiation[J]. *Northern Environment*, 2012, 24(6): 9-13.
- [20] 赵鹤然, 王吉强, 陈明祥, 等. 抗辐射封装加固: 电子辐射屏蔽设计 [J]. *微处理机*, 2021, 42(5): 1-4.  
ZHAO H R, WANG J Q, CHEN M X, et al. Radiation-resistant packaging reinforcement: electronic radiation shielding design[J]. *Microprocessor*, 2021, 42(5): 1-4.
- [21] FAN W C, DRUMM C, ROESKE S, et al. Shielding considerations for satellite microelectronics[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1996, 43(6): 2790-2796.
- [22] 徐加强, 王传珊. 空间电子辐照下半导体器件的抗辐射屏蔽优化 [J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2003(3): 259-262.  
XU J Q, WANG C S. Optimization of radiation shielding of semiconductor devices under space electron irradiation[J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2003(3): 259-262.
- [23] 曹洲, 高欣, 薛玉雄, 等. 多层材料空间辐射屏蔽优化分析 [J]. *真空与低温*, 2011, 17(4): 224-229.  
CAO Z, GAO X, XUE Y X, et al. Optimization analysis of space radiation shielding of multi-layer materials[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2011, 17(4): 224-229.
- [24] 胡鉴航, 冯颖, 韩建伟, 等. 电离总剂量复合屏蔽模拟仿真及验证试验 [J]. *空间科学学报*, 2014, 34(2): 180-185.  
HU J H, FENG Y, HAN J W, et al. Simulation and verification test of total ionization dose composite shielding[J]. *Journal of Space Science*, 2014, 34(2): 180-185.
- [25] TOKAR S, GRIGORIEVSKY A, KISELEVA L. Integrated analysis of radiation-protective thermal control coatings[J]. *Protection of Materials and Structures from the Space Environment*, 2017, 47: 35-42.
- [26] DEVANZO M, HAYES R. Ionizing radiation shielding properties of metal oxide impregnated conformal coating[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2020, 171: 108685.
- [27] STEFFENS M, HEPP F, HOFFGEN S K, et al. Characterization of novel lightweight radiation shielding materials for space applications[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2017, 64(8): 2325-2332.
- [28] DANESHVAR H, MILAN K G, SADR A, et al. Multi-layer radiation shield for satellite electronic components protection[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 20657.
- [29] 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.
- [30] ZHANG Z, LIU Y, LIU J Q, et al. Study on radiation shielding of inner radiation belt protons[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2023, 70(4): 701-706.
- [31] QI Z, YANG Z, LI J, et al. The advancement of neutron-shielding materials for the transportation and storage of spent nuclear fuel[J]. *Materials (Basel)*, 2022, 15(9):

- 3255.
- [32] 王旭东, 张迎晖, 徐高磊. 轧制法制备金属层状复合材料的研 究与应用 [J]. 铝加工, 2008(3): 4.  
WANG X D, ZHANG Y H, XU G L. Research and application of metal layered composite materials prepared by rolling method[J]. Aluminum Processing, 2008(3): 4.
- [33] 彭大暑, 刘浪飞, 朱旭霞. 金属层状复合材料的研 究状况与展望 [J]. 材料导报, 2000(4): 23-24.  
PENG D S, LIU L F, ZHU X X. Research status and prospects of metal layered composite materials [J]. Materials Introduction, 2000 (4): 23-24.
- [34] 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.
- [35] ZHONG W H, SUI G, JANA S, et al. Cosmic radiation shielding tests for UHMWPE fiber/nano-epoxy composites[J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(13): 2093-2097.
- [36] WATERMAN G, KASE K, MILSTEIN O. Selective shielding bone marrow: an approach to create personal protective equipment for gamma radiation[J]. Transactions of the American Nuclear Society, 2017, 116(1): 921-924.
- [37] 蔡明辉, 杨涛, 韩建伟. 载人深空探测磁场主动辐射防护技术研究 [J]. 深空探测学报, 2019, 6(2): 165-172.  
CAI M H, YANG T, HAN J W. Research on magnetic field active radiation protection technology for manned deep space exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(2): 165-172.
- [38] WINROTH S, SCOTT C, ISHIDA H. Structure and performance of benzoxazine composites for space radiation shielding. molecules[J]. 2020, 25(18): 4346.
- [39] TOWNSEND L W. Galactic heavy-ion shielding using electrostatic fields[R]. [S. l.]: [s. n. ], 1984.
- [40] LEVY R H, FRENCH F W. Plasma radiation shield—concept and applications to space vehicles[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1968, 5(5): 570-577.
- [41] WASHBURN S A, BLATTNIG S R, SINGLETERRY R C, et al. Active magnetic radiation shielding system analysis and key technologies[J]. Life Sciences in Space Research, 2015, 4: 22-34.
- [42] CHERNG A M, JUN I, JORDAN T. Optimum shielding in Jovian radiation environment[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2007, 580(1): 633-636.
- [43] KAYALI S, MCALPINE W, BECKER H, et al. Juno radiation design and implementation[C]//Aerospace Conference. [S. l.]: IEEE, 2012.
- [44] 周成飞. 高分子辐射材料的研究进展 [J]. 化工新型材料, 2003, 31(9): 19.  
ZHOU C F. Research progress of polymer radiation materials[J]. New Chemical Materials, 2003, 31(9): 19.
- [45] YONATHAN K, EHUD G. Cost-effectiveness of new polynated materials for shielding against fusion neutrons[J]. Fusion Eng Design, 1995(28): 559.
- [46] ABDEL-AZIZ M M. Ethylene-propylene diene rubber/low density poly ethylene /born carbide composites as neutron shields[J]. Polym Degradation and Stability, 1995(50): 235.
- [47] 王零森, 吴芳, 樊毅, 等. 快中子堆用碳化硼材料的成分和性能设计 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 1999, 4(2): 105.  
WANG L S, WU F, FAN Y, et al. Composition and performance design of boron carbide materials for fast neutron reactors[J]. Powder Metallurgy Materials Science and Engineering, 1999, 4(2): 105.
- [48] 王零森, 方寅初, 吴芳, 等. 碳化硼在吸收材料中的地位及其与核应用有关的基本性能 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2000, 5(2): 113.  
WANG L S, FANG Y C, WU F, et al. The status of boron carbide in absorbing materials and its basic properties related to nuclear applications[J]. Powder Metallurgy Materials Science and Engineering, 2000, 5(2): 113.
- [49] 吕继新, 陈建廷. 高效能屏蔽材料铅硼聚乙烯 [J]. 核动力工程, 1994, 15(4): 370.  
LU J X, CHEN J T. High-efficiency shielding material lead-boron polyethylene[J]. Nuclear Power Engineering, 1994, 15(4): 370.
- [50] 李哲夫, 薛向欣. 含硼矿物及环氧树脂复合材料的 中子屏蔽性能 [J]. 原子能科学技术, 2011, 45(2): 223-229.  
LI Z F, XUE X X. Neutron shielding performance of boron-containing mineral and epoxy resin composite materials[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(2): 223-229.
- [51] 周玉超. 钨硼化合物/铝复合屏蔽材料设计及性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.  
ZHOU Y H. Design and performance research of tungsten boron compound/aluminum composite shielding materials [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [52] 牛昊轩, 杨剑, 陈富财, 等. 高含钨铝基复合屏蔽材料成分优化设计 [J]. 世界有色金属, 2020(8): 164-165.  
NIU H X, YANG J, CHEN F C, et al. Optimal design of composition of high-tungsten-aluminum-based composite shielding materials[J]. World Nonferrous Metals, 2020(8): 164-165.
- [53] 王静, 郑力, 余雪江, 等. 高填充铅硼屏蔽复合材料的制备及其性能研究 [J]. 防护工程, 2021, 43(5): 13-17.

- WANG J, ZHENG L, YU X J, et al. Preparation and performance research of highly filled lead-boron shielding composite materials[J]. Protection Engineering, 2021, 43(5): 13-17.
- [54] 高静, 丁谦学, 梅其良, 等. 核辐射综合屏蔽材料研究进展 [J]. 材料导报, 2023, 37(20): 11-18.
- GAO J, DING Q X, MEI Q L, et al. Research progress on comprehensive shielding materials for nuclear radiation[J]. Materials Review, 2023, 37(20): 11-18.
- [55] 赵振宁, 王辉, 虎琳. 航空航天先进复合材料研究现状及发展趋势 [J]. 炭素, 2021(2): 24-29.
- ZHAO Z N, WANG H, HU L. Research status and development trends of advanced composite materials in aerospace[J]. Carbon, 2021(2): 24-29.
- [56] 张婷, 许浩, 李仲杰, 等. 层状金属复合材料的发展历程及现状 [J]. 工程科学学报, 2021, 43(1): 67-75.
- ZHANG T, XU H, LI Z J, et al. Development history and current situation of layered metal composite materials[J]. Journal of Engineering Science, 2021, 43(1): 67-75.
- [57] 寇天翔. 航空航天领域先进复合材料的应用探讨 [J]. 中国高新科技, 2021, 21: 112-122.
- KOU T X. Exploration of the application of advanced composite materials in the aerospace field[J]. China High Tech, 2021, 21: 112-122.

---

收稿日期: 2023-10-07; 修订日期: 2023-12-18

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3705801, 2022YFB3705804)

通讯作者: 蔡明辉(1980—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为航天器空间环境效应, 联系地址: 北京市怀柔区中国科学院国家空间科学中心(101499), E-mail: [caiminghui@nssc.ac.cn](mailto:caiminghui@nssc.ac.cn); 高大为(1999—), 男, 硕士, 研究方向为航天器空间环境效应, 联系地址: 北京市怀柔区中国科学院国家空间科学中心(101499), E-mail: [gaodawei21@mails.ucas.ac.cn](mailto:gaodawei21@mails.ucas.ac.cn)

(责任编辑: 徐永祥)