



抗辐射高强韧镁合金的空间站舱外暴露研究进展

苏阳, 李扬欣*, 曾小勤

上海交通大学材料科学与工程学院轻合金精密成型国家工程研究中心, 上海 200240

* E-mail: astatium@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2025-09-09; 接受日期: 2025-11-10; 网络版发表日期: 2025-12-11

中国载人航天工程空间应用系统项目(编号: KJZ-YY-WCL04)资助

摘要 结构轻量化在航天领域可产生显著的社会和经济效益。镁合金作为实际工程应用中密度最低的金属结构材料, 是实现各类航天飞行器结构轻量化的理想材料之一。宇宙空间的高能粒子对飞行器的长期服役稳定性提出了挑战, 研发具备优良辐射屏蔽能力的高性能镁合金材料, 并在轨测试其在空间长期服役稳定性, 不仅能提升航天器的服役寿命, 还能实现结构轻量化, 是一种经济高效的解决方案。本研究首先针对几种抗辐射高强韧镁合金, 使用Geant4蒙特卡罗程序对材料的中子屏蔽性能进行了评估, 同时开展了为期1年的空间站舱外暴露实验, 评估了材料在空间环境综合因素影响下的性能演化规律。通过扫描电子显微镜(scanning electron microscopy, SEM)、能量色散X射线光谱分析(energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS)等表征手段, 对比分析了空间暴露样品与地面原子氧模拟暴露样品的微观形貌和表面氧元素含量变化。结合前期低温力学性能测试结果, 从材料的低温力学行为和原子氧侵蚀对材料性能影响的两个关键维度, 深入探讨了镁合金在空间环境下的适用性。研究表明, 空间辐射屏蔽镁合金具备优良的热中子屏蔽性能, 在低温环境下可展现优异的力学性能, 空间返回样品和地面原子氧模拟样品在经过1年期暴露后表面保持完整, 表面氧元素含量无显著上升, 论证了镁合金作为空间辐射屏蔽材料在长期服役条件下的稳定性与可靠性。本研究为镁合金在航天飞行器辐射防护结构中的工程化应用提供了重要的实验数据和理论支撑。

关键词 镁合金, 辐射屏蔽, 低温强韧化, 原子氧, 组织表征

1 引言

随着《国家空间科学中长期发展规划(2024—2050年)》的不断推进, 我国相继施行了嫦娥工程和天问工程, 逐渐构建覆盖月球、火星、小行星、木星等天体的深空探测网络, 已形成月球与行星探测并进的立体化格局。在我国航空航天事业蓬勃发展的今天,

如何低成本、高效率地遂行航天发射任务, 保障在轨飞行器服役期间的稳定性, 提高飞行器的服役寿命已成为航天领域重点关注的课题之一。

航天器在宇宙空间飞行过程中主要面临银河宇宙射线、太阳宇宙射线以及地球辐射带三个方面的高能辐射粒子的挑战, 辐射粒子呈现能量高、能量范围广、中低能粒子通量高以及高能粒子通量低的特点^[1]。

引用格式: 苏阳, 李扬欣, 曾小勤. 抗辐射高强韧镁合金的空间站舱外暴露研究进展. 中国科学: 技术科学, 2025, 55: 2101–2110

Su Y, Li Y X, Zeng X Q. Progress in the study of radiation-resistant high-strength magnesium alloys for space station extravehicular exposure (in Chinese). Sci Sin Tech, 2025, 55: 2101–2110, doi: [10.1360/SST-2025-0254](https://doi.org/10.1360/SST-2025-0254)

空间高能粒子(如质子、电子和中子等)可通过引发单粒子效应(single event effect, SEE)和总剂量效应(total ionizing dose, TID)等辐射损伤效应, 破坏航天器内置的芯片、电路、光纤等构件, 严重影响航天器的服役稳定性、缩短其服役寿命^[2,3]。根据国内外综合统计, 60%以上的航天飞行器故障由空间高能粒子引起^[4-6], 如何设计和制备轻质高效的屏蔽防护材料已成为国内外的一大研究热点^[7,8]。镁合金作为目前实际工程应用中密度最低的金属结构材料, 其密度约为 1.8 g/cm^3 , 是铝合金的2/3, 钢的1/4, 具有比强度和比刚度高、阻尼减震和电磁屏蔽性能良好等特点, 是航天领域飞行器结构轻量化的理想材料之一^[9,10]。相比于目前主流使用的各种铝合金, 镁合金不仅具备轻量化方面的优势, 在面对高能空间粒子时, 因镁的原子序数($Z=12$)较铝的原子序数($Z=13$)更低, 镁合金产生的次级辐射更少, 屏蔽后的剂量水平更低^[11]。更为重要的是, 天然钷元素(Gd)对热中子吸收截面为46000 b, 其热中子吸收效率是天然硼(B)的64倍, 且在镁基体中的最大固溶度高达23.49 wt.%, 这为制备抗辐射高强韧镁合金的成分和组织设计提供了丰富的想象空间。

然而, 宇宙空间环境十分复杂, 存在如超低温环境、原子氧、高能粒子和空间微尘等不利于空间飞行器服役的因素^[12]。其中, 材料在空间中长期低温服役将面临低温脆性的考验^[13]。与此同时, 化学性质活泼的原子氧自带约5 eV的动能, 易对航天器舱外暴露材料产生氧化-剥蚀的协同作用^[14]。美国国家航空航天局(national aeronautics and space administration, NASA)利用氧元素与材料相互作用评估III号飞行实验(evaluation of oxygen interactions with materials III, EOIM-III)和长期暴露设施卫星(long duration exposure facility, LDEF), 对多种聚合物空间暴露样品进行研究发现, 原子氧对聚合物的侵蚀作用较为明显^[15]。对于金属材料, 如银(Ag)、铜(Cu)、钽(Ta)等, 原子氧的损伤现象也十分明显^[16]。Qi等人^[17,18]在研究不同镁合金镀层对聚合物材料的保护作用时, 发现镁合金镀层在经过高通量原子氧暴露后镀层表面形貌发生较大变化, 表面生成 MgO 及 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 。因此, 利用中国空间站宝贵的资源条件, 在轨评估抗辐射空间应用材料的服役行为, 对地面研制适用空间环境的新材料具有重要意义。

本文结合蒙特卡罗模拟、地面低温力学实验、原

子氧实验以及空间环境暴露实验, 对抗辐射高强韧镁合金的空间环境耐受能力进行了综合评估, 揭示了镁合金材料组织损伤机制, 为后续地面开发适用于低轨道空间的抗辐射高强韧镁合金奠定了基础。

2 地面实验及结论

2.1 中子屏蔽性能模拟评估

中子屏蔽的过程通常包括快中子慢化和热中子吸收两个过程^[19]。因中子不带电, 其与屏蔽材料原子间相互作用可由与能量无关的几何截面公式描述, 这种描述方法使用参数较少, 对于多种入射粒子、靶材料以及较广的能量范围都能达成较为合理的精度^[11]。对于给定相互作用的截面(σ), 在屏蔽材料内深度 x 处该相互作用发生的概率可以被简化为 $\exp(-x/\lambda)$, 其中 λ 是靶材料原子间的平均自由距离, 其与作用截面的关系如式(1)所示:

$$\lambda = \frac{A}{N_A \sigma}, \quad (1)$$

其中, A 是靶材料的相对原子质量, N_A 是阿伏伽德罗常数。Gd元素与热中子相互作用截面较大, 因此该相互作用发生的概率由截面大小主导。实际情况中, 高能粒子在穿透屏蔽材料过程中的作用十分复杂。为了更为真实地模拟实际物理过程, 20世纪40年代发展出的蒙特卡罗方法, 基于概率和统计理论, 通过随机抽样统计模拟高能粒子与屏蔽材料原子间的相互作用, 该方法在计量分布计算和辐射防护优化中具有显著优势^[20]。基于该方法由欧洲核子研究组织(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, CERN)开发的开源蒙特卡罗粒子模拟软件工具包Geant4, 具备强大的几何建模能力和截面数据库, 可模拟物质区域中原子核与中子的相互作用^[21]。本工作蒙特卡罗模拟程序的建模示意图如图1所示, 对中子采用了Shielding列表, 并以G44EMStandardPhysics_option4替换其电磁部分, 以平衡屏蔽几何下的精度与效率。对于不同组分的高强度辐射屏蔽镁合金, 模型的几何设置保持不变, 中子源设置为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 与样品等大的正方形面源平行发射中子, 中子源距离屏蔽层7.5 mm, 中子源能量分布设置为一白光中子源直采能谱。样品尺寸同样为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 屏蔽层厚度设置为5 mm, 在样品前后各设有6 mm厚的真空计数层, 针对SJTU-Mg5, SJTU-

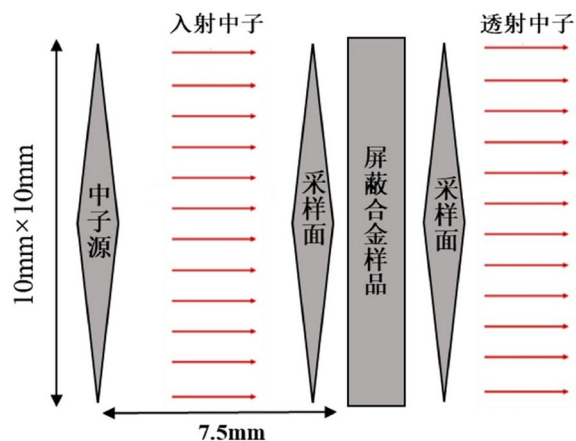


图 1 (网络版彩图)蒙特卡罗模拟模型示意图
Figure 1 (Color online) Schematic of the Monte Carlo simulation model.

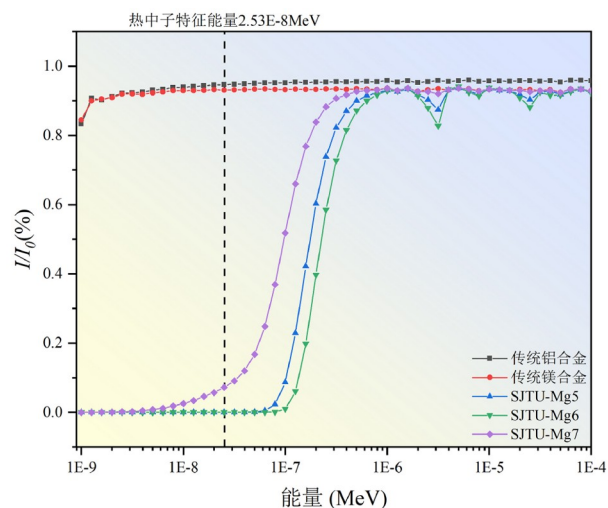


图 2 (网络版彩图)蒙特卡罗白光中子谱模拟屏蔽结果(屏蔽层厚度: 5 mm)
Figure 2 (Color online) Monte Carlo white light neutron spectrum simulation shielding results (shield thickness: 5 mm).

表 1 蒙特卡罗模拟所用的材料成分和密度
Table 1 Material components and densities used for Monte Carlo simulations

样品编号	模拟用组分 (wt.%)	模拟用密度 (g/cm ³)
传统镁合金 (AZ31)	Mg-3Al-1Zn	1.8
传统铝合金 (2A12)	Al-4.3Cu-1.5Mg-0.6Mn-0.5Fe-0.5Si-0.15Ti-0.1Ni-0.3Zn	2.7
SJTU-Mg5	Mg-6Gd-1Al	1.8
SJTU-Mg6	Mg-12Gd-0.5Zr	1.8
SJTU-Mg7	Mg-3Nd-1.5Gd	1.8

Mg6及SJTU-Mg7三种含Gd量(Gd含量Mg7<Mg5/Mg4<Mg6)不同的合金以及用作对比的不含稀土元素的传统镁、铝合金开展了模拟,模拟合金组分如表1所示,模拟粒子数量为 10^9 个,结果如图2所示。

结果显示,进行了辐射屏蔽特化设计的几种高强韧辐射屏蔽镁合金展现出对热中子出色的屏蔽性能,5 mm厚的材料对热中子的屏蔽率均达到90%以上,但在更高的中子辐射能量段因缺乏有效的慢化元素(如氢、锂等),屏蔽效能逐渐降低,而普通的镁合金及铝合金对白光中子各能量段几乎没有屏蔽作用。此外,三种高强韧辐射屏蔽镁合金的屏蔽效能随Gd含量提高而提高。

2.2 低温力学性能评估

在地面匹配实验阶段,针对屏蔽性能优良的SJTU-Mg4合金开展了一系列低温力学性能测试与机理研究,该合金的设计组分为Mg-8Gd-3Y-0.5Zr (wt.%),其强度随温度降低而单调递增,延伸率随温度降低而呈现先增后减的趋势。合金的延伸率于 -70°C 时达到最高,可达12%,同时保持了接近400 MPa的抗拉强度,是一种适合空间低温环境服役的高强韧辐射屏蔽镁合金。

上海交通大学曾小勤研究团队^[22,23]对该合金前期的研究发现,该合金在 -70°C 可实现较好的强度-塑性协同提升是多重变形机制耦合作用的结果。其核心在于不同温度下临界分切应力(critical resolved shear stress, CRSS)比值变化,随着温度降低CRSS_{棱柱面a/<math>CRSS_{基面a</math>从室温的1.72~2.00降低至 -196°C 的1.17~1.46,在低温变形前期,棱柱面a位错大量累积,虽然早期累积对塑性提升有限,但后期这些位错可诱导沿[0001]轴旋转的低角度晶界(low angle grain boundaries, LAGBs)形成。这些LAGBs作为位错源发射可动}

$\langle c+a \rangle$ 位错, 并通过迁移缓解局部应力集中, 显著提升后期变形能力. 而 $\text{CRSS}_{\langle c+a \rangle}/\text{CRSS}_{\text{基面}\langle a \rangle}$ 的比值在 -70°C 达到最小值7.4, -70°C 下变形的样品拥有较常温和 -196°C 下变形样品更高的 $\langle c+a \rangle$ 位错密度, 样品在 -70°C 下变形时 $\langle c+a \rangle$ 位错密度积累速率比在 -196°C 变形时高28.6%. $\langle c+a \rangle$ 位错可直接协调 c 轴应变, 其在 -70°C 下较高的密度与线性滑移的特征表明其优异的可动性, 成为塑性提升的直接载体. 与此同时, 利用高分辨扫描透射电子显微镜高角环形暗场成像技术(high angle angular dark field-scanning transmission electron microscopy, HAADF-STEM)分析不同温度下样品第二相的变形行为可以发现, 在 -70°C 下纳米 β' 相剪切比例超过30%, 第二相的变形可显著延长位错运动的平均自由程, 进一步提升材料的变形能力. 综上所述, 变形前期累积并转化为LAGBs的棱柱面 $\langle a \rangle$ 提供了 $\langle c+a \rangle$ 位错源, $\langle c+a \rangle$ 位错在 -70°C 的高可动性以及高累积率提供了塑性和强度两方面的增益,

可变形第二相也协助提供了一定的塑性, 多因素共同作用下使得材料在 -70°C 获得了较为优异的强塑协同性能.

2.3 地面原子氧装置模拟评估

空间实验同期, 针对空间与上行样品相同组分的地面样品, 利用哈尔滨工业大学的空间环境地面模拟装置中的微波原子氧发生装置模拟空间原子氧暴露, 以反映原子氧单一影响下不同组分镁合金的响应. 以 $5 \times 10^{15} \text{ atoms}/(\text{cm}^2 \text{ s})$ 的原子氧(5 eV)通量进行为期72 h的加速实验, 累积总通量达到 $\sim 1.3 \times 10^{21} \text{ atoms}/\text{cm}^2$, 可模拟在轨迎风面样品暴露1年的累积通量. 样品暴露前后的宏观形貌如图3所示, 可以看出样品表面宏观未发生明显变化, 仍保持金属光泽, 表面质量完好. 针对其中有代表性的与SJTU-Mg5, SJTU-Mg6及SJTU-Mg7组分、工艺相同的三种合金(以下以空间样品编号代称地面模拟样品)进行进一步分析. 三种样品的精密天平称重结果如表2所示, 三种样品增重幅度均保持在最后

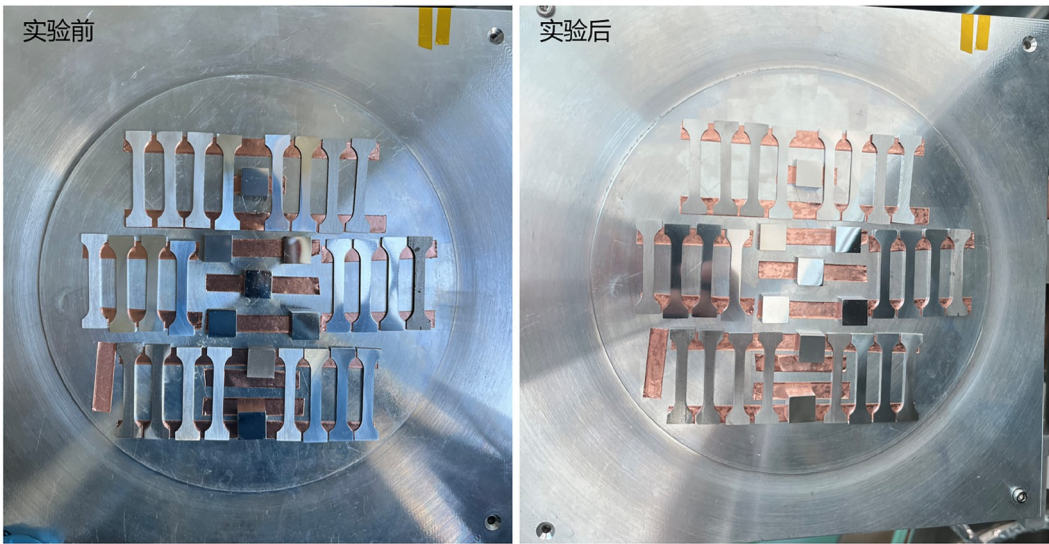


图3 (网络版彩图)地面模拟原子氧暴露实验前后样品宏观形貌

Figure 3 (Color online) Macroscopic morphology of samples before and after ground-simulated atomic oxygen exposure experiments.

表2 SJTU-Mg5, SJTU-Mg6及SJTU-Mg7地面样品模拟空间原子氧暴露后质量变化情况

Table 2 Mass changes of SJTU-Mg5, SJTU-Mg6 and SJTU-Mg7 ground samples after simulated space atomic oxygen exposure

样品编号	实验前 (g)	实验后 (g)	增失重情况
SJTU-Mg5 地面	0.85557	0.85565	无显著变化
SJTU-Mg6 地面	1.16925	1.16930	无显著变化
SJTU-Mg7 地面	0.93712	0.93720	无显著变化

一位数字的变化,均为仪器误差范围内的变化,可视为三种样品均未发生显著的质量变化。

样品表面预制有准原位标记,对三种样品原子氧模拟暴露实验前后的同一位置进行扫描电子显微镜(SEM)及能量色散X射线光谱分析(EDS)表征,结果如图4~6所示。SJTU-Mg5及SJTU-Mg6表面在局部发生较为细微的变化,从其疏松的形貌可初步判定为氧化物,对发生变化的部分局部放大,进行进一步EDS表

征发现新出现的物质富含氧元素,进一步确定为模拟原子氧暴露过程中新产生的氧化物。SJTU-Mg7为进行耐蚀特化设计的一款高强韧辐射屏蔽镁合金,经过模拟原子氧暴露,准原位区域未发生明显变化,进行进一步EDS面扫描表征,发现仅氧元素含量有略微上升,未见局部氧化,说明SJTU-Mg7镁合金有较为优异的耐蚀性能。准原位实验表明,三种样品经过一年期等量原子氧通量的加速暴露实验后,表面变化较为有限,

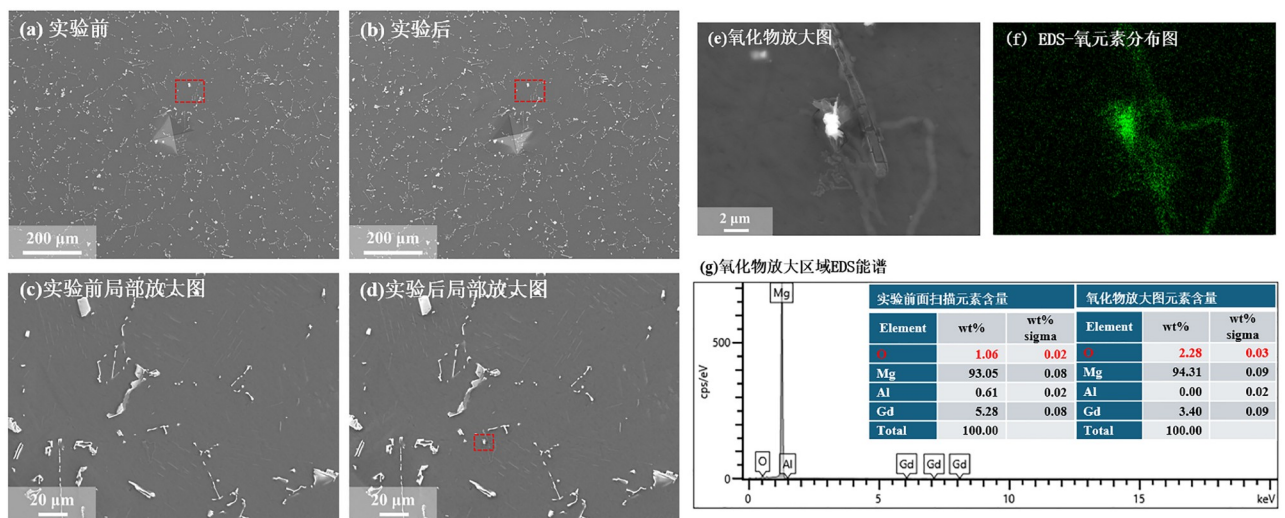


图 4 (网络版彩图) SJTU-Mg5样品地面模拟原子氧暴露前后准原位SEM形貌与EDS能谱
Figure 4 (Color online) Quasi-in situ SEM morphology and EDS energy spectra of SJTU-Mg5 sample before and after ground-simulated atomic oxygen exposure experiments.

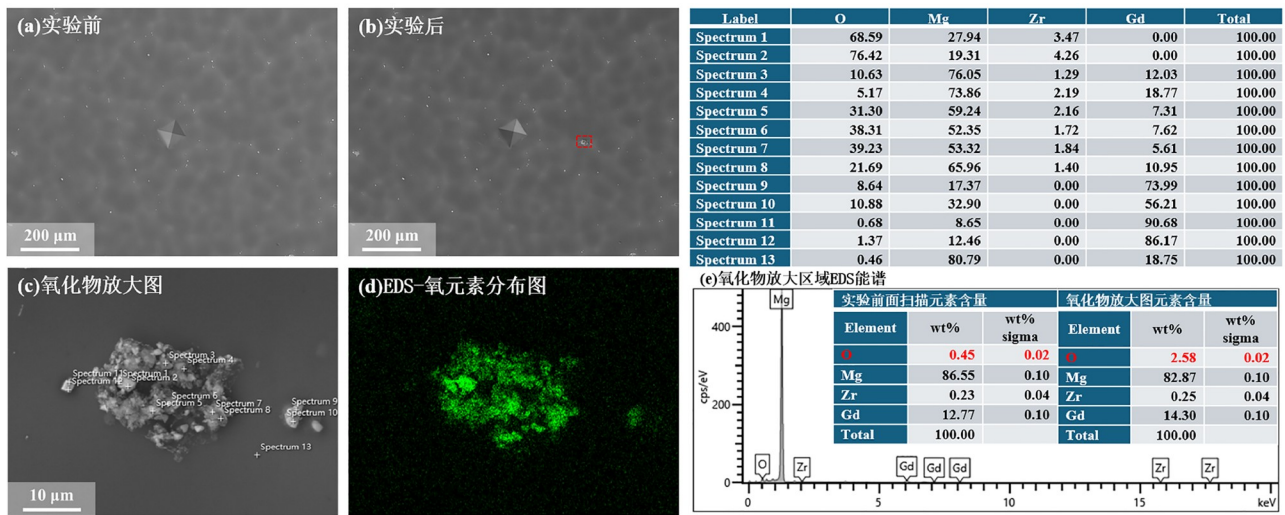


图 5 (网络版彩图) SJTU-Mg6样品地面模拟原子氧暴露前后准原位SEM形貌与EDS能谱
Figure 5 (Color online) Quasi-in situ SEM morphology and EDS energy spectra of SJTU-Mg6 sample before and after ground-simulated atomic oxygen exposure experiments.

反映出各合金体系对于原子氧这一单一损伤因素拥有较为优秀的耐受能力。

3 空间暴露实验及结论

空间暴露镁合金样品于2022年11月12日随TZ5号货运飞船上行, 于2023年3月8日出舱, 于2024年3月14日完成舱外暴露实验, 成功返回中国空间站内。项目组

对随SZ17号飞船先行下行的SJTU-Mg5, SJTU-Mg6及SJTU-Mg7开展了初步研究。下行样品与上行前的宏观形貌对比如图7所示, 样品上行前、下行后的宏观形貌未发生明显变化。为了进一步探究空间暴露对于已下行的三片样品的影响, 先在无损条件下对三片样品进行表面微结构和成分的精细分析, 并和地面放置的抛光样品进行对比。如图8~10所示, 三片下行样品SEM形貌存在类似划痕痕迹是由于上行的镁合金样品采用

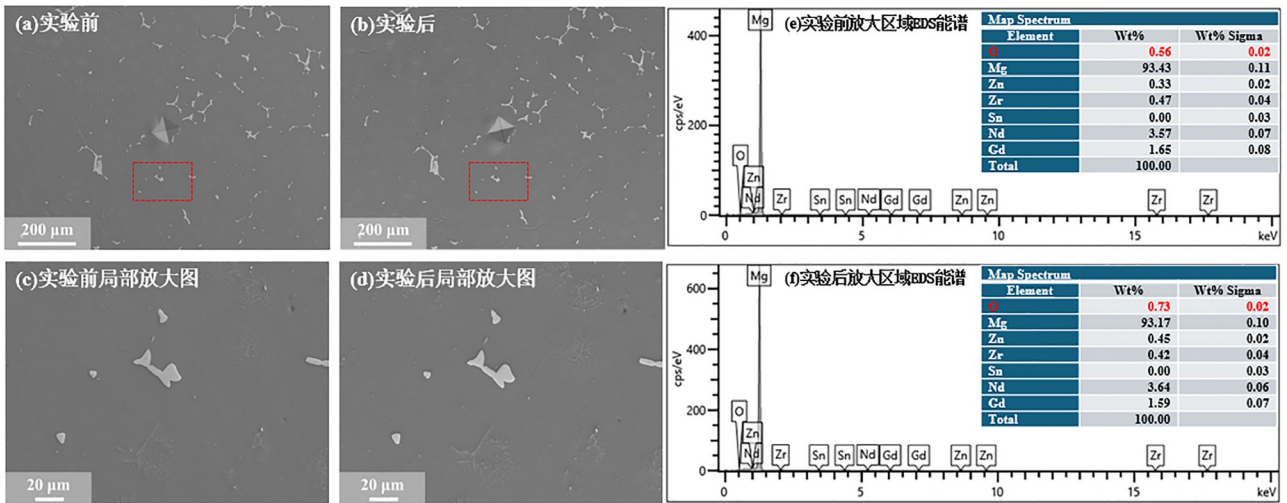


图 6 (网络版彩图) SJTU-Mg7样品地面模拟原子氧暴露前后准原位SEM形貌与EDS能谱
Figure 6 (Color online) Quasi-in situ SEM morphology and EDS energy spectra of SJTU-Mg7 sample before and after ground-simulated atomic oxygen exposure experiments.

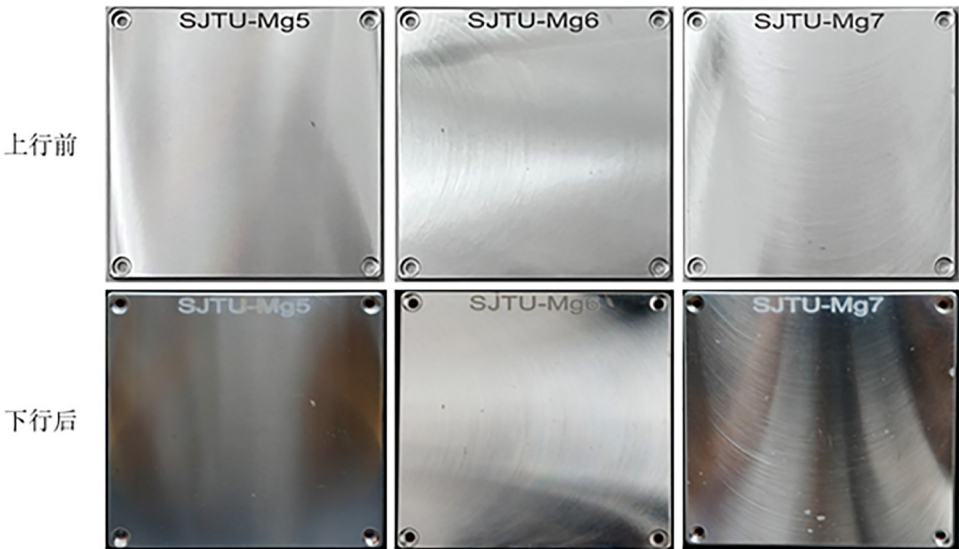


图 7 (网络版彩图) SJTU-Mg5-7样品舱外暴露实验前后宏观形貌对比
Figure 7 (Color online) Comparison of macroscopic morphology of SJTU-Mg5-7 samples before and after exposure experiments.

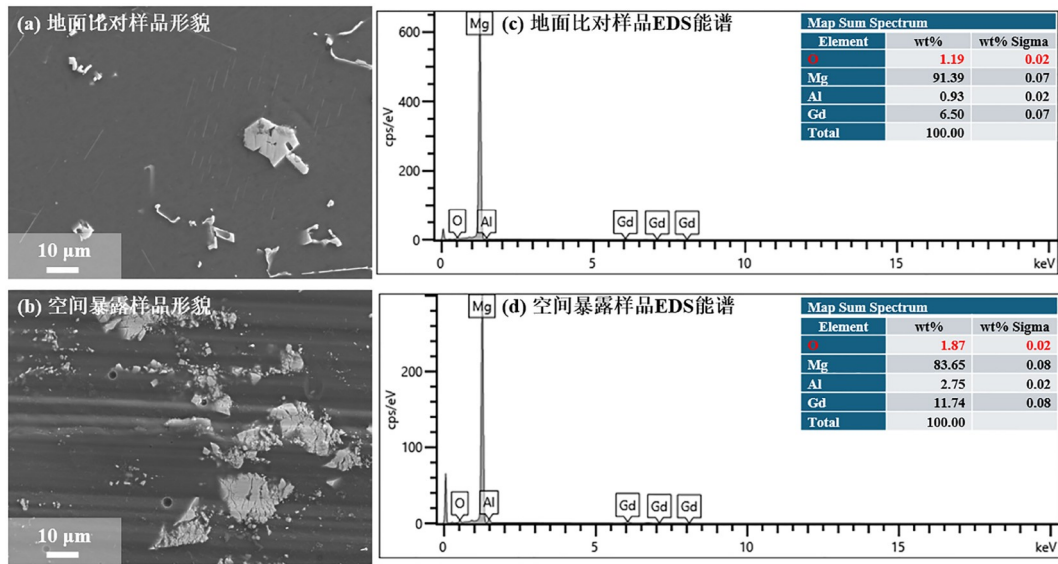


图 8 (网络版彩图) SJTU-Mg5样品暴露前后表面形貌及氧含量对比分析

Figure 8 (Color online) Comparative analysis of surface morphology and oxygen content before and after exposure of sample SJTU-Mg5.

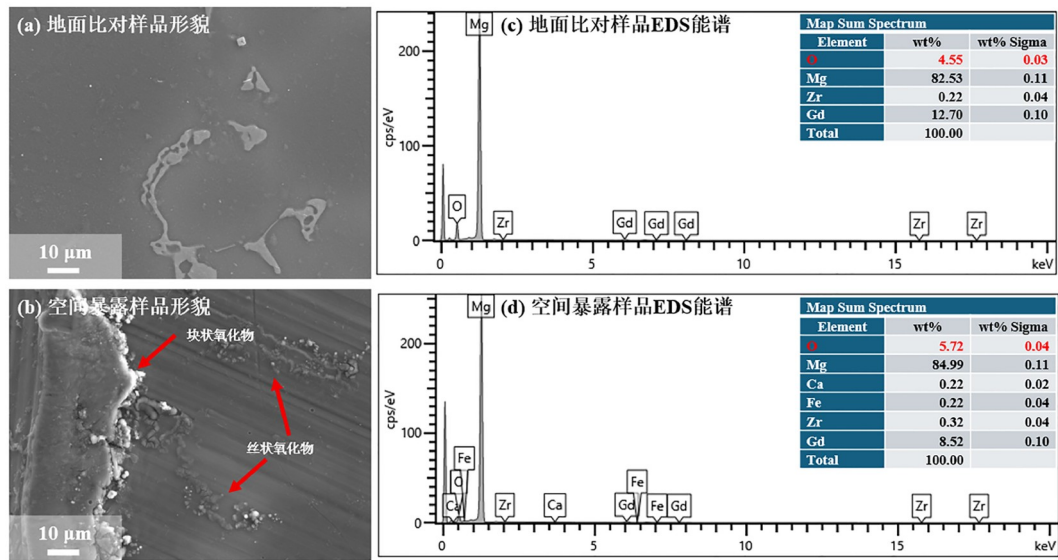


图 9 (网络版彩图) SJTU-Mg6样品暴露前后表面形貌及氧含量对比分析

Figure 9 (Color online) Comparative analysis of surface morphology and oxygen content before and after exposure of sample SJTU-Mg6.

数控车床进行批量大样品加工, 其表面类似划痕形貌为机加工过程的铣削痕迹. 和地面样品小尺寸抛光对比样品相比, 空间暴露样品除了多出机加工划痕之外, 材料的显微组织表征显示并未发生明显改变. 三片下行样品表面的氧含量均比地面对比样品的氧含量有所提升, 与地面原子氧实验相比, 空间样品的表面出现的氧化物更多, SJTU-Mg6表面可见较大的块状氧化物及

丝状氧化物. 空间其他损伤因素叠加条件下, 镁合金表面的氧化情况有恶化的倾向, 在未来研究中需要重点关注. Noguchi等人^[24]关于LEO轨道上捕获微流星体的研究表明, 该轨道上的微流星体主要由含铁正交辉石单晶组成, 其化学通式为 $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$, 同时也包含微量的Ca元素, 这与早期相关研究一致^[25,26]. 我们在中国空间站LEO轨道上的暴露的镁合金样品不可避免地

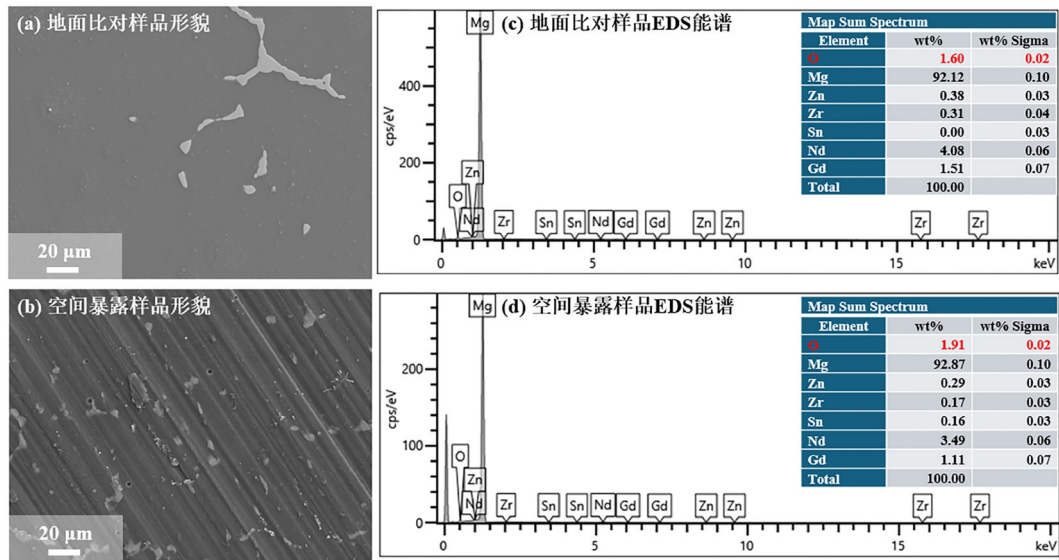


图 10 (网络版彩图) SJTU-Mg7样品暴露前后表面形貌及氧含量对比分析
Figure 10 (Color online) Comparative analysis of surface morphology and oxygen content before and after exposure of sample SJTU-Mg7.

受到微流星体的撞击, 因此会引入LEO轨道上微流星体的组分元素(如Fe, Ca等).

4 结论

利用蒙特卡罗计算模拟, 结合地面与空间实验, 本文论证了抗辐射高强韧镁合金对中子辐射的优良屏蔽

性能, 该合金在空间站舱外低温环境下具备优良的强度和塑性, 并对原子氧的长期侵蚀有良好的抵抗能力, 在中国空间站舱外暴露实验平台暴露1年后合金表面完整, 氧化程度可控, 表明设计的新型抗辐射高强韧镁合金具备优良的空间极端环境长期服役耐受能力, 这为后续地面研制新型航天器用高性能轻质镁合金的应用提供了理论和数据支持.

致谢 感谢中国载人航天工程空间应用系统项目(编号: KJZ-YY-WCL04)对本工作的资助. 感谢上海交通大学轻合金精密成型国家工程研究中心主任丁文江院士对本研究工作的支持与指导.

参考文献

- 1 Jun I, Garret H, Kim W et al. A review on radiation environment pathways to impacts: Radiation effects, relevant empirical environment models, and future needs. *Adv Space Res*, 2024, doi: 10.1016/j.asr.2024.03.079
- 2 Shen Z C. *Space Radiation Environmental Engineering* (in Chinese). Beijing: China Astronautic Publishing House, 2013. 120–121 [沈自才. 空间辐射环境工程. 北京: 中国宇航出版社, 2013. 120–121]
- 3 Shen Z C, Ding Y G. *Anti-Radiation Design and Radiation Effects* (in Chinese). Beijing: China Science and Technology Press, 2015. 70–74 [沈自才, 丁义刚. 抗辐射设计与辐射效应. 北京: 中国科学技术出版社, 2015. 70–74]
- 4 Quan L, Liu Y, Li L, et al. Study on matching between environmental warning information and spacecraft anomalies. *J Spacecraft Rockets*, 2022, 59: 1455–1462
- 5 Ahmad N, Herdiwijaya D, Djameluddin T, et al. Diagnosing low earth orbit satellite anomalies using NOAA-15 electron data associated with geomagnetic perturbations. *Earth Planets Space*, 2018, 70: 91

- 6 Bedingfield K L, Leach R D, Alexander M B. Spacecraft system failures and anomalies attributed to the natural space environment. NASA Reference Publication 1390, 1996
- 7 Shuvalov V A, Reznichenko N P, Tsokur A G, et al. Synergetic effect of the action of atomic oxygen and vacuum ultraviolet radiation on polymers in the Earth's ionosphere. *High Energy Chem*, 2016, 50: 171–176
- 8 Ghidini T. Materials for space exploration and settlement. *Nat Mater*, 2018, 17: 846–850
- 9 Pollock T M. Weight loss with magnesium alloys. *Science*, 2010, 328: 986–987
- 10 Su Y, Hao L, Li Y X, et al. Research and development of high-performance magnesium alloys for aerospace applications (in Chinese). *Air Space Defense*, 2024, 7: 1–11 [苏阳, 郝亮, 李扬欣, 等. 航空航天用高性能镁合金的研究进展. *空天防御*, 2024, 7: 1–11]
- 11 Zeitlin C. Handbook of Bioastronautics. Cham: Springer International Publishing, 2021. 353–375
- 12 Edward M S. Space environmental effects on spacecraft: LEO materials selection guide, part 1. NASA Contractor Report 4661-PT-1, 1995
- 13 Chernov V M, Kardashev B K, Moroz K A. Low-temperature embrittlement and fracture of metals with different crystal lattices—Dislocation mechanisms. *Nucl Mater Energy*, 2016, 9: 496–501
- 14 Reddy M R. Effect of low earth orbit atomic oxygen on spacecraft materials. *J Mater Sci*, 1995, 30: 281–307
- 15 Banks B A, de Groh K K, Miller S K. Low earth orbital atomic oxygen interactions with spacecraft materials. *MRS Proc*, 2004, 851: 426–437
- 16 Gregory J C. Low Earth orbital atomic oxygen erosion effect on spacecraft materials. *Space Res J*, 2014, 7: 1–13
- 17 Qi H, Qian Y, Xu J, et al. An AZ31 magnesium alloy coating for protecting polyimide from erosion-corrosion by atomic oxygen. *Corrosion Sci*, 2018, 138: 170–177
- 18 Qi H, Qian Y, Xu J, et al. Studies on atomic oxygen erosion resistance of deposited Mg-alloy coating on Kapton. *Corrosion Sci*, 2017, 124: 56–62
- 19 El-Khayatt A M, El-Sayed Abdo A. MERCSF-N: A program for the calculation of fast neutron removal cross sections in composite shields. *Ann Nucl Energy*, 2009, 36: 832–836
- 20 Xun M Z, He C F, Zheng Y Z. Monte carlo simulation of space heavy particles incident on shielding materials (in Chinese). *Manned Spaceflight*, 2019, 25: 159–163 [荀明珠, 何承发, 郑玉展. 空间重粒子入射屏蔽材料的蒙特卡罗模拟. *载人航天*, 2019, 25: 159–163]
- 21 Agostinelli S, Allison J, Amako K, et al. Geant4—a simulation toolkit. *Nucl Instrum Meth A*, 2003, 506: 250–303
- 22 Qi X, Li Y, Zeng X. Role of prismatic $\langle a \rangle$ dislocations in sub-zero temperature deformation of Mg-Gd-Y-Zr alloy. *J Alloys Compd*, 2023, 960: 170803
- 23 Qi X, Li Y, Xu X, et al. Enhancing strength–ductility synergy in a Mg–Gd–Y–Zr alloy at sub-zero temperatures via high dislocation density and shearable precipitates. *J Mater Sci Tech*, 2023, 166: 123–132
- 24 Noguchi T, Miyake A, Yabuta H, et al. Mineralogy of terminal grains recovered from the Tanpopo capture panel onboard the International Space Station. *Meteorit Planet Scien*, 2025, 60: 916–927
- 25 Rietmeijer F J M, Blanford G E. Capture of an olivine micrometeoroid by spacecraft in low-Earth orbit. *J Geophys Res*, 1988, 93: 11943–11948
- 26 Zolensky M E, See T H, Bernhard R P, et al. Final activities and results of the long duration exposure facility meteoroid and debris special investigation group. *Adv Space Res*, 1995, 16: 53–65

Progress in the study of radiation-resistant high-strength magnesium alloys for space station extravehicular exposure

SU Yang, LI YangXin & ZENG XiaoQin

National Engineering Research Center of Light Alloy Net Forming, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Structural lightweighting in aerospace engineering yields significant socioeconomic benefits. Magnesium alloys, as the metal structural material with the lowest density in practical engineering applications, represent an ideal candidate for achieving structural lightweighting across various aerospace vehicles. The challenging radiation environment in space poses long-term stability demands on spacecraft materials. Developing high-performance magnesium alloys with superior radiation shielding capabilities and conducting in-orbit validation of their long-duration service stability not only enhances spacecraft operational lifespan but also achieves structural weight reduction, presenting an economically efficient solution. This study first investigated the neutron shielding performance of several radiation-resistant high-strength magnesium alloys using Geant4 Monte Carlo simulations. Concurrently, a one-year space extravehicular exposure experiment evaluated material performance evolution under comprehensive space environmental factors. Through scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) characterization techniques, comparative analyses were performed on microstructural morphologies and surface oxygen content variations between space-exposed specimens and ground-based atomic oxygen simulation-exposed specimens. Integrating prior low-temperature mechanical property testing results, this research systematically examined magnesium alloy applicability in space environments from two critical dimensions: cryogenic mechanical behavior and atomic oxygen erosion effects. Experimental results demonstrated that space radiation-shielded magnesium alloys exhibited excellent thermal neutron shielding performance and maintained exceptional mechanical properties under cryogenic conditions. Post-exposure analysis revealed preserved surface integrity and negligible oxygen enrichment on both space-returned and ground-simulated specimens after 1-year exposure, confirming the long-term operational stability and reliability of magnesium alloys as space radiation shielding materials. This investigation provides critical experimental data and theoretical foundations for engineering applications of magnesium alloys in radiation protective structures for aerospace vehicles.

magnesium alloy, radiation shielding, cryogenic strength and toughening, atomic oxygen, microstructural characterization

doi: [10.1360/SST-2025-0254](https://doi.org/10.1360/SST-2025-0254)