

内辐射带质子和电子被动屏蔽

蔡毓龙 崔帅 刘洋 张冬冬 陆宇历 张勇

(上海微小卫星工程中心 中国科学院微小卫星创新研究院 上海 201203)

摘要 高能量/高通量的质子和电子环境对穿越地球内辐射带的椭圆轨道卫星造成超高剂量的累积辐射效应。代替传统单质铝屏蔽防护措施,提出一种用于屏蔽空间质子和电子的复合材料屏蔽结构。采用多层屏蔽程序(Multi-Layered Shielding Simulation Software, MULASSIS)对穿越内辐射带的卫星轨道质子和电子与4种屏蔽材料(聚乙烯、聚丙烯、钽、铝)相互作用进行仿真计算,比较分析屏蔽后的总剂量、位移剂量随4种屏蔽材料面密度变化规律。结果表明:相同面密度下4种不同材料轨道粒子综合屏蔽效能从大到小分别是:聚丙烯、聚乙烯、铝、钽,其中聚丙烯和聚乙烯对质子和电子的屏蔽效果几乎相同。综合考虑4种材料的质子和电子屏蔽效果及机械性能,设计采用聚乙烯/铝复合屏蔽结构。为保障穿越内辐射带的卫星在轨可靠运行,要求总剂量和位移剂量屏蔽防护目标分别为:50 krad(Si)、 $2 \times 10^{10} \text{ p} \cdot \text{cm}^{-2}$ (等效10 MeV质子)。仿真验证结果表明,实现上述卫星抗辐射防护指标条件下,聚乙烯/铝复合结构比单质铝结构节省了至少约27.8%屏蔽质量。

关键词 质子, 电子, 聚合物, 辐射防护

中图分类号 V45

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.020501

Passive shielding against proton and electron in the inner radiation belt

CAI Yulong CUI Shuai LIU Yang ZHANG Dongdong LU Yuli ZHANG Yong

(Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China)

Abstract [Background] Elliptical orbiting satellites passing through the inner radiation belt are exposed to high-energy and high-flux protons and electrons. Therefore, electronic devices of satellites need to resist ultra-high cumulative radiation doses. [Purpose] This study aims to propose a composite material structure for shielding space protons and electrons, instead of the traditional aluminum structure. [Methods] The interaction of elliptical orbital protons and electrons with four shielding materials (polyethylene/polypropylene, tantalum and aluminum) was simulated by the MULASSIS (Multi-Layered Shielding Simulation Software). The radiation particle energy spectrum calculated by SPENVIS software was used as the input of MULASSIS particle energy spectrum. The changes of total dose and displacement dose after shielding with areal density of the four shielding materials were compared and analyzed. Finally, the most suitable composite shielding structure was selected by considering the proton and electron shielding effects and mechanical properties of the four materials. [Results] The results show that under same areal density, the order of the shield effectiveness from large to small, of four different materials on orbital proton and electron is polypropylene, polyethylene, aluminum and tantalum, among which polypropylene and polyethylene have almost the same shielding effect. The polyethylene-aluminum composite shielding structure is selected for

快速扶持项目(No.80924010202)、中国科学院国防科技创新重点部署项目(No.KGFZD-135-20-03)资助

第一作者: 蔡毓龙, 男, 1992年出生, 2021年于中国科学院新疆理化研究所获博士学位, 助理研究员, 研究领域为卫星用器件材料抗辐射通信作者: 崔帅, E-mail: cuis@microsat.com

收稿日期: 2022-08-29, 修回日期: 2022-10-31

Supported by Fast Support Project (No. 80924010202), Project of National Defense Science and Technology Innovation of Chinese Academy of Sciences (No.KGFZD-135-20-03)

First author: CAI Yulong, male, born in 1992, graduated from Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences with a doctoral degree in 2021, assistant research, focusing on space radiation effects of device and material in satellite

Corresponding author: CUI Shuai, E-mail: cuis@microsat.com

Received date: 2022-08-29, revised date: 2022-10-31

construction design. The shielding targets of total dose and displacement dose to ensure the reliable operation of elliptical satellites are 50 krad(Si) and $2 \times 10^{10} \text{ p} \cdot \text{cm}^{-2}$ (equivalent to 10 MeV protons) respectively. **[Conclusions]** Compared with the single aluminum shield, at least 27.8% shielding mass is saved by using the polyethylene-aluminum composite protective structure in the above ratio.

Key words Proton, Electron, Polymer, Radiation shielding

通常卫星轨道设计会优先避开范艾伦辐射带,尤其是质子为主的内辐射带,内辐射带辐射粒子强度中心区域在2 000 km轨道附近。但由于空间任务的需要,一些卫星不得不运行在内辐射带,这些卫星不可避免地遭受着恶劣的质子和电子辐射。质子和电子会造成卫星内电子器件发生累积辐射效应(总剂量和位移剂量),导致电子器件性能退化甚至失效,进而引起系统功能故障,严重威胁卫星在轨稳定运行。

材料质量屏蔽是减轻空间质子或电子造成电子器件累积辐射效应的有效被动防护方法,国内外研究者已经开展了空间质子或电子单质或复合轻质材料屏蔽研究。针对以空间电子为主的中高轨道研究表明,高原子序数(Z)金属材料能够有效屏蔽空间电子造成的总剂量,但是随着金属屏蔽厚度的增加,韧致辐射造成的总剂量值接近甚至超过初级电子影响^[1-4]。中国科学院空间中心韩建伟团队研究了低 Z /高 Z 双层结构对电子造成总剂量的屏蔽效能,证明上述结构相比单一铝屏蔽有效降低韧致辐射造成的总剂量^[4]。针对以质子为主的低轨道,国内外研究者先后比较了多种单质材料和化合物材料质子屏蔽效果^[5-9]。2007年,上海射线应用研究所王朝壮团队^[7]仿真研究了4种单质(铝、钨、钽、铅)材料对低轨(556 km)质子屏蔽效果,研究证明,相同面密度下铝比其他三种材料屏蔽效果好。除了金属材料,研究表明,一些化合物材料表现出更优的质子屏蔽效果。2016年吉林大学物理学院孙慧斌团队^[8]通过Geant4软件研究铝、碳纤维、聚乙烯和水等4种常用屏蔽材料对不同能量质子(50 MeV、100 MeV、200 MeV)的屏蔽性能,研究发现:聚乙烯质子屏蔽性能最好,水次之,碳纤维材料第三,铝最差。2017年德国弗劳恩霍夫研究所(Fraunhofer INT)的Steffens等^[9]比较了4种材料对高能电子和质子的屏蔽效果,试验表明,钨强化的聚乙烯具有最好的质子屏蔽效果。

目前,国内外空间辐射粒子屏蔽的研究多关注屏蔽材料对一种粒子的屏蔽效果,鲜有考虑同时屏蔽卫星轨道电子和质子效果的研究。本文以穿越内辐射带的卫星为背景,该卫星遭遇容易在元器件上累积超高总剂量值的高能量/高通量质子和电子环境,因此需要对质子和电子进行屏蔽防护。首先介

绍模拟仿真方法和卫星轨道空间环境特点;然后通过蒙特卡罗方法仿真研究4种不同材料对卫星内辐射带质子电子综合屏蔽效果;最后,基于上述比较结果,提出一种适用于同时屏蔽质子和电子环境的复合材料屏蔽结构,并仿真验证复合材料屏蔽结构综合屏蔽效果。

1 仿真介绍

地球辐射带包括内辐射带和外辐射带,内辐射带距离地表高度在600~10 000 km,其中2 000 km左右是辐射粒子强度最高的区域^[10]。地球内辐射带由高能质子和电子组成,且内辐射带电子通量较为稳定,大于10 MeV质子主要分布在2 000 km轨道^[11-12]。本文考虑的卫星轨道运行在内辐射带中,穿过2 000 km轨道区域。卫星轨道对应的空间辐射粒子环境通过欧空局的空间环境信息系统(Space ENVironment Information System, SPENVIS)软件中标准的粒子模型进行仿真计算^[13]。图1中内辐射带质子仿真数据依据美国国家航空航天局的AP8、AE8模型,太阳质子发射模型(Emission of Solar Proton, ESP)被用来计算长期的太阳质子事件,置信度设置为95%。从图1(a)可以看出,卫星内辐射带质子通量比太阳质子通量高三个数量级,因此,相比内辐射带质子影响,太阳质子造成的总剂量和位移剂量可以忽略不计。卫星内辐射带质子能量范围在0.1~400 MeV,10 MeV的质子通量接近 $1 \times 10^5 \text{ p} \cdot \text{cm}^{-2}$,质子环境呈现出高通量、高能量的特点。图1(b)是依据美国国家航空航天局的AE8模型计算出的该环境电子通量谱,结果表明:卫星内辐射带电子能量范围和通量与地球同步(GEostationary Orbit, GEO)轨道电子谱相差不多,因此电子造成的总剂量不能忽视。总体上来说,卫星内辐射带电子、质子环境都呈现出高通量、高能量的特点,恶劣的辐射环境对在轨卫星的电子器件构成严重威胁。因此,如何同时屏蔽质子、电子成为电子器件可靠运行的关键技术。

本文基于QinetiQ、BIRA和ESA合作开发的多层屏蔽计算软件(Multi-Layered Shielding Simulation Software, MULASSIS)工具仿真不同材料屏蔽卫星内辐射带质子、电子的效果。

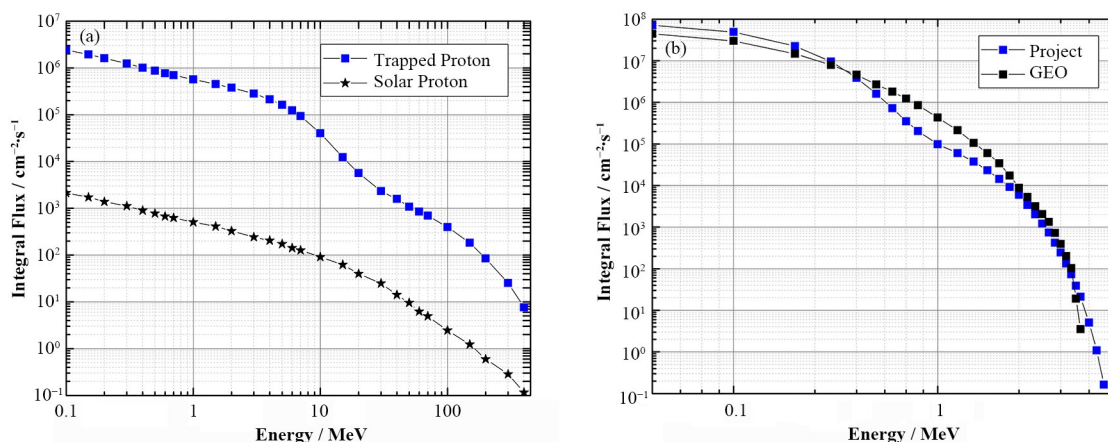


图1 卫星遭遇的质子(a)和电子(b)环境
Fig.1 Proton (a) and electron (b) environments of the satellite encountered

MULASSIS 能够用于分析多种不同材料屏蔽后的辐射粒子剂量和通量特征, SPENVIS 软件计算的辐射粒子能谱可以作为 MULASSIS 粒子能谱输入^[14]。研究人员基于屏蔽材料/敏感体屏蔽结构研究了不同材料的粒子屏蔽效果, 从物理机理分析了影响累积辐射剂量屏蔽效果的主要因素为剩余入射粒子和韧致辐射产生的光子通量^[15-16]。仿真中建立的屏蔽模型为平板模型, 如图2所示, 第一层为屏蔽材料, 第二层定义了 100 μm 厚的硅探测器结构。入射粒子可选择不同能量的质子或电子, 入射方向设置为垂直平行入射。仿真比较了4种不同材料的辐射粒子屏蔽效能, 包括: 铝、钽、聚乙烯和聚丙烯。聚乙烯和聚丙烯两种材料具有低原子序数, 另外两种金属材料具有高原子序数。

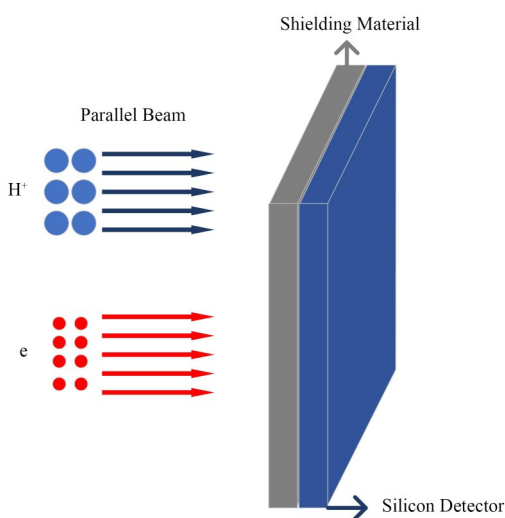


图2 屏蔽模型示意图
Fig.2 Schematic diagram of the shield model used in simulation

2 仿真结果与讨论

通过屏蔽材料防护空间宽能谱的辐射粒子(内辐射质子和电子), 很难将所有能段辐射质子和电子都阻挡在屏蔽层之中, 所以通常是屏蔽一定能量范围的质子和电子, 并使通过屏蔽材料后的剩余粒子在被防护的对象中沉积能量最小。考虑到银河宇宙射线和太阳质子对本卫星轨道累积辐射效应影响可以忽略, 仿真中只考虑地球内辐射带质子和电子环境。

2.1 单质材料辐射粒子屏蔽分析

图3显示了卫星内辐射带质子总剂量随4种单质屏蔽材料面密度变化关系。屏蔽材料的面密度和厚度成正比, 容许直接比较相同屏蔽质量条件下不同材料的屏蔽效能。采用面密度可以忽略对材料密度的依赖性, 在讨论卫星屏蔽特性时特别有用。对于4种屏蔽材料, 随着面密度的增加, 卫星内辐射带质子造成的总剂量变化趋势相同, 即先快速下降, 后下降速度逐渐减缓。

下文以铝为例, 分析质子总剂量下降幅度随面密度定量变化关系和影响机制。当铝面密度小于 $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ (对应铝厚度约为 3.7 mm) 时, 面密度每增加 $0.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$, 总剂量下降的比例最小为 96%。随着铝面密度继续增加, 质量屏蔽效能显著降低。当铝面密度从 $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 增加到 $1.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, 总剂量下降比例降低约 19%。为了分析材料面密度对质子总剂量屏蔽效能的影响, 利用粒子在材料中阻止本领和射程 (The Stopping and Range of Ions in Matter, SRIM) 工具仿真了质子能量和其在4种材料中射程的关系, 如图4所示。由图4可知, $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 面密度的铝屏蔽的质子能量阈值约为 30 MeV, 即小于 30 MeV 能量的质子都被阻挡在屏蔽材料中。卫星

内辐射带质子能谱显示低能质子通量显著高于高能质子通量,低能质子通量比更高能段质子高了1~4个数量级。因此,低能质子造成的总剂量大部分可以通过 $1\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 厚度铝屏蔽,此时材料面密度总剂量屏蔽效能较高。之后,随着面密度的增加,被屏蔽的总剂量都为高能量、低线性能量传输(Linear Energy Transfer, LET)值、低通量的质子产生,因此材料的面密度屏蔽效能逐渐降低。

相比铝屏蔽,质子造成的总剂量随聚乙烯和聚丙烯面密度下降更快,而质子总剂量随钽的面密度缓慢减小。聚乙烯和聚丙烯屏蔽下,总剂量随面密度变化基本相同。因此,卫星内辐射带质子能谱穿过相同面密度4种屏蔽材料后,在探测器中沉积的总剂量值从低到高分别是:聚丙烯、聚乙烯、铝、钽。聚乙烯和聚丙烯含有相近的低Z元素(C和H)。相同面密度下,低Z材料表现出更好的屏蔽效能。质子在物质传输过程中,会通过物质原子核外电子和原子核发生弹性和非弹性碰撞损失能量。因为对于重带电粒子(如质子),韧致辐射产生的能量损失可以忽略。所以质子主要通过原子核外电子发生非弹性作用损失能量。低Z元素具有更低的平均原子质量,相同面密度下低Z材料电子密度更大,使得空间质子在传输路径上更容易与原子核外电子发生非弹性相互作用,造成入射质子能量降低。因此,考虑相同面密度条件,低Z材料具有更好的空间质子屏蔽效果。

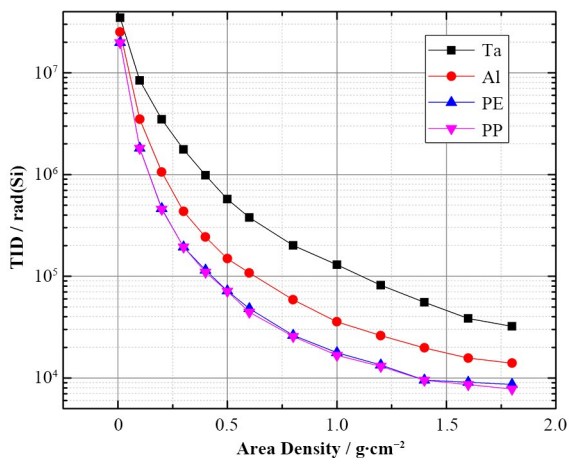


图3 4种不同材料对卫星内辐射带质子贡献的总剂量屏蔽效能

Fig.3 Total dose shielding effect of four different materials under proton radiation

图5显示了卫星内辐射带电子产生的总剂量随屏蔽材料面密度变化关系。随着屏蔽材料面密度的增加,卫星内辐射带电子总剂量值出现波动。这是因为MULSSIS仿真考虑了入射粒子穿过屏蔽材料产生的剩余粒子和韧致辐射对探测器中总剂量的贡

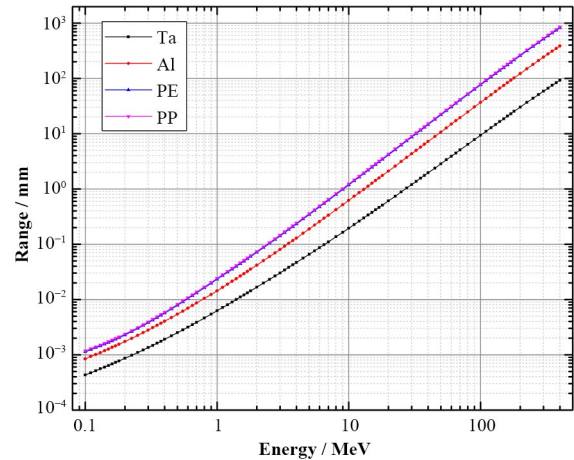


图4 质子在4种不同材料的射程随能量变化
Fig.4 Proton range as a function of energy in four different materials

献。韧致辐射增加会导致探测器中沉积的总剂量增加,而电离作用引起的能损增加(剩余粒子能量减少)造成探测器中总剂量减少。另外,在较大面密度处电子束快速下降造成剂量统计误差变大,统计误差达到了剂量的0.3倍左右。电离作用和韧致辐射竞争及统计误差两种因素共同引起了图5中的波动现象。屏蔽材料面密度较小时,相比剩余电子产生的总剂量,韧致辐射的贡献可以忽略。随着屏蔽材料面密度增加,韧致辐射在探测器中沉积的总剂量快速增加,从而影响总剂量变化趋势。这是因为随着屏蔽厚度的增加,在弹性和非弹性碰撞作用下入射电子能量和射程快速下降,造成的总剂量快速下降。相反,韧致辐射产生的光子不易屏蔽,随屏蔽厚度增加衰减很小,此时韧致辐射产生的光子成为总剂量的主要贡献。

图5表明,面密度小于 $1\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 条件下,4种不同

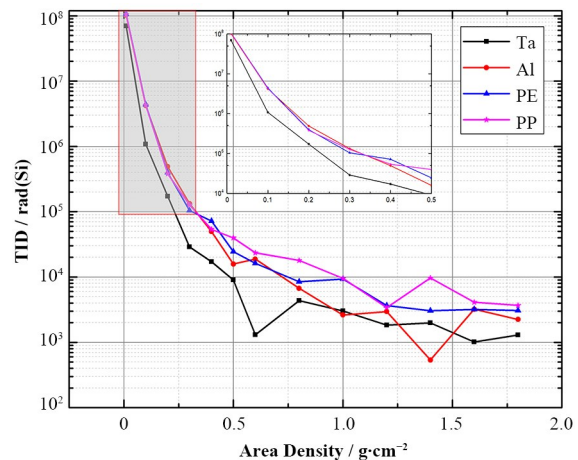


图5 4种不同材料对卫星内辐射带电子贡献的总剂量屏蔽效能

Fig.5 Total dose shielding effect of four different materials under electron radiation

屏蔽材料中钽的电子屏蔽效能最优,这和已知的一定面密度范围内高Z材料在电子屏蔽上更有效结论一致^[15]。但随着材料面密度的增加,钽相对铝的电子屏蔽优势逐渐减弱,这是因为电子在较厚的钽中产生韧致辐射明显高于铝。相比聚乙烯和聚丙烯,具有更高Z值的铝并没有展示出明显的电子屏蔽优势。这是因为电子在高Z屏蔽材料除了产生更多的电离能损,也会导致韧致辐射的增加。而对于低Z屏蔽材料,电子入射路径上更多的原子核导致碰撞概率增加,这造成韧致辐射对总剂量的贡献减小。

图6显示了卫星内辐射带质子、电子造成的整体总剂量和位移剂量(等效10 MeV质子)随屏蔽材

料面密度变化关系。图6显示轨道总剂量与电子屏蔽规律不同,而和质子屏蔽规律相同,即相同面密度下聚乙烯和聚丙烯表现出更优的屏蔽效能。这是因为虽然无屏蔽情况下,轨道电子引起的总剂量是质子造成总剂量的数倍,但随着屏蔽材料面密度增大,电子引起的总剂量快速下降,质子很快成为轨道总剂量的主要来源。以聚乙烯为例,当聚乙烯面密度增加到 $0.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,电子引起的总剂量降低到24.5 krad,此时电子引起的总剂量只占轨道总剂量值的25.4%。和总剂量效应不同,位移效应主要由质子引起,电子引起的位移效应可以忽略。

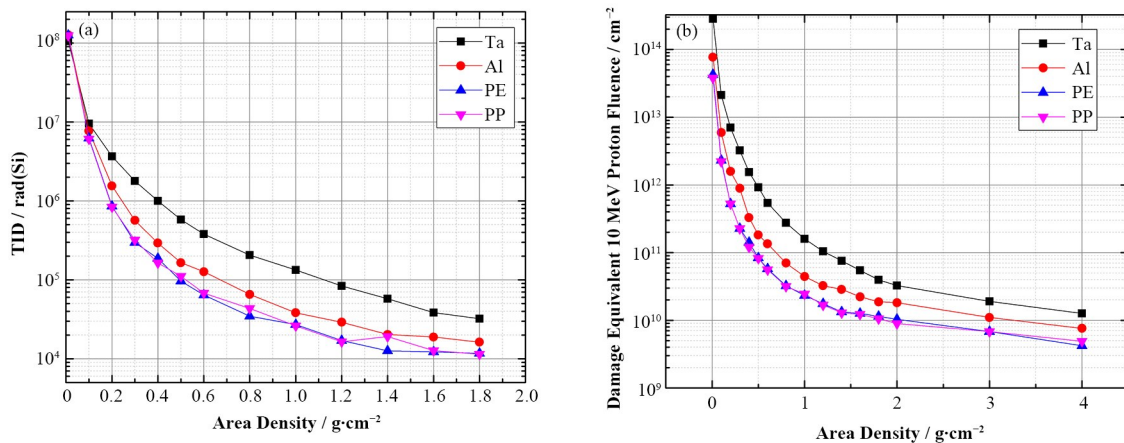


图6 4种不同材料对卫星内辐射带质子、电子贡献的总剂量屏蔽效能(a)和位移屏蔽效能(b)
Fig.6 Total dose shielding effect (a) and displacement shielding effect (b) of four different materials under protons and electrons environments

2.2 复合材料辐射粒子屏蔽分析

考虑到本文涉及的卫星内辐射带质子相比内辐射带电子对器件影响更大,复合材料设计时优先考虑质子防护效果好的单质材料,其次考虑电子屏蔽效果,同时综合考虑屏蔽材料的温度特性、韧性、机械性能。聚乙烯和聚丙烯两种材料对质子和电子屏蔽效果几乎相同,综合考虑选择聚乙烯作为复合屏蔽材料设计时的候选材料。一定面密度范围内单质钽的电子屏蔽效果最优,但考虑到钽屏蔽引起的过量韧致辐射及其质子屏蔽效果不足的缺点,选择铝作为复合屏蔽材料设计时的候选材料。因此,本文设计聚乙烯和铝复合屏蔽结构,用于屏蔽防护卫星轨道高通量/高能量质子和电子。

结合卫星器件和材料抗辐射能力,规定累积辐射剂量防护目标为:总剂量小于50 krad(Si),位移剂量小于 $2 \times 10^{10} \text{ p} \cdot \text{cm}^{-2}$ (等效10 MeV质子)。单质铝屏蔽下,铝面密度增加到 $1.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时可满足卫星抗辐射指标要求:位移剂量下降到约 $1.9 \times 10^{10} \text{ p} \cdot \text{cm}^{-2}$

(等效10 MeV质子),此时总剂量值约为16.2 krad。对于聚乙烯和铝组成的双层复合屏蔽结构,铝的厚度选用两种卫星工程上常用的典型面密度值: $0.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $0.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

复合材料的位置顺序会对辐射粒子屏蔽效果产生影响,Fan等^[16]研究了金属复合材料顺序对空间电子屏蔽的影响。本文仿真分析了不同顺序的聚乙烯/铝复合屏蔽下,实现上述卫星抗辐射指标对应的最小屏蔽材料面密度,结果如表1所示,总剂量和位移损伤值误差分别约为1.4 krad和 $1.3 \times 10^9 \text{ p} \cdot \text{cm}^{-2}$ (等效10 MeV质子)。结果表明:聚乙烯/铝表现出更优的卫星轨道电子和质子防护效果,即在实现几乎相同防护剂量目标条件下,聚乙烯/铝复合材料结构比传统的单质铝结构屏蔽节省至少27.8%的屏蔽质量。聚乙烯和铝前后位置对内辐射带质子和电子防护效果影响的数值差距比统计误差小一个数量级,工程上可以认为聚乙烯和铝前后位置对屏蔽效果影响可以忽略。

表1 聚乙烯-铝复合防护结构屏蔽效能
Table 1 Shielding effect of polyethylene-aluminum composite structure

第一层材料及面密度 First layer and areal density / g·cm ⁻²	第二层材料及面密度 Second layer and areal density / g·cm ⁻²	TID / krad(Si)	DDD (等效10 MeV 质子 Dmage equivalent 10 MeV proton fluence) / p·cm ⁻²	相比单一铝屏蔽质量降低比例 Proportion of shielding mass reduction compared to Al / %
PE,0.95	Al,0.3	16.9	1.94×10 ¹⁰	30.6
Al,0.3	PE,0.95	16.4	1.97×10 ¹⁰	30.6
PE,0.7	Al,0.6	17.5	1.86×10 ¹⁰	27.8
Al,0.6	PE,0.7	14.7	1.94×10 ¹⁰	27.8

3 结语

以穿越内辐射带的卫星遭遇恶劣质子和电子环境为背景,研究了代替传统铝屏蔽措施的轻质复合材料屏蔽方法。首先,仿真比较了4种单质材料对卫星内辐射带质子和电子屏蔽效能。质子屏蔽仿真表明:聚乙烯和聚丙烯因为含有高比例的低Z元素,相同质量厚度下表现更优的质子屏蔽特性。电子屏蔽仿真表明:随着面密度的增加,高Z钽轨道电子屏蔽效能显著降低。另外,具有高Z特性的铝对轨道电子屏蔽效能和聚乙烯、聚丙烯几乎相同,这是因为电子在高Z屏蔽材料除了产生更多的电离能损,也会导致韧致辐射的增加。4种材料对卫星内辐射带质子/电子综合能谱屏蔽结果显示:相同面密度下,聚乙烯和聚丙烯屏蔽了最多的总剂量和位移剂量。综合辐射粒子屏蔽效能和材料机械性能,确定聚乙烯/铝复合材料屏蔽结构。结果显示:聚乙烯和铝的位置顺序对轨道辐射粒子剂量屏蔽效果影响可以忽略。实现卫星总剂量和位移防护目标条件下,聚乙烯/铝复合结构比单质铝结构节省了至少约27.8%屏蔽质量。

作者贡献声明 蔡毓龙:负责文章框架、模拟仿真和最终版本的修订;崔帅:空间环境仿真及文章的整体把握;刘洋:负责文章资料的查阅及整理;张冬冬:负责文章资料的查阅;陆宇历:负责文章的修改;张勇:负责文章的语言。

参考文献

- Fujita Y, Myojoyama A, Saitoh H. Bremsstrahlung and photoneutron production in a steel shield for 15-22-MeV clinical electron beams[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2014, **163**(2): 148 - 159. DOI: 10.1093/rpd/ncu153.
- Fujimoto T, Monzen H, Nakata M, *et al.* Dosimetric shield evaluation with tungsten sheet in 4, 6, and 9 MeV electron beams[J]. Physica Medica, 2014, **30**(7): 838 - 842. DOI: 10.1016/j.ejmp.2014.05.009.

- Sajid M, Chechenin N G, Sill Torres F, *et al.* Analysis of total ionizing dose effects for highly scaled CMOS devices in low earth orbit[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2018, **428**: 30 - 37. DOI: 10.1016/j.nimb.2018.05.014.
- 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 Jianhang, FENG Ying, HAN Jianwei, *et al.* Simulation and validation of composite shielding for total ionizing dose[J]. Chinese Journal of Space Science, 2014, **34**(2): 180 - 185.
- Waterman G, Kase K, Orion I, *et al.* Selective shielding of bone marrow: an approach to protecting humans from external gamma radiation[J]. Health Physics, 2017, **113**(3): 195 - 208. DOI: 10.1097/HP.0000000000000688.
- 荀明珠, 何承发, 郑玉展. 不同屏蔽材料对空间100 MeV质子防护效果分析[J]. 载人航天, 2018, **24**(6): 740 - 744. DOI: 10.16329/j.cnki.zrht.2018.06.005. XUN Mingzhu, HE Chengfa, ZHENG Yuzhan. Analysis of shielding ability of different materials for 100 MeV proton incident[J]. Manned Spaceflight, 2018, **24**(6): 740 - 744. DOI: 10.16329/j.cnki.zrht.2018.06.005.
- 王朝壮, 罗文芸, 查元梓, 等. 空间质子屏蔽材料优化选择的蒙特卡罗模拟[J]. 辐射防护, 2007, **27**(2): 79 - 86, 105. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-8187.2007.02.003. WANG Chaozhuang, LUO Wenyun, ZHA Yuanzi, *et al.* Monte-Carlo simulation of optimization choice of shielding materials for proton radiation in space[J]. Radiation Protection, 2007, **27**(2): 79 - 86, 105. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-8187.2007.02.003.
- 吴正新, 孙慧斌, 何承发, 等. 载人航天器舱内辐射环境及剂量分析[J]. 航天器环境工程, 2016, **33**(2): 154 - 157. WU Zhengxin, SUN Huibin, HE Chengfa, *et al.* Analysis of radiation environment and its dose within sealed cabin of manned spacecraft[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2016, **33**(2): 154 - 157.

- 9 Steffens M, Hepp F, Höffgen 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. DOI: 10.1109/TNS.2017.2703312.
- 10 van Allen J A, Frank L A. Radiation around the earth to a radial distance of 107, 400 km[J]. Nature, 1959, **183**(4659): 430 - 434. DOI: 10.1038/183430a0.
- 11 Stassinopoulos E G, Raymond J P. The space radiation environment for electronics[J]. Proceedings of the IEEE, 1988, **76**(11): 1423 - 1442. DOI: 10.1109/5.90113.
- 12 Nakamura K, Group P D. Review of particle physics[J]. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2010, **37**(7A): 075021. DOI: 10.1088/0954-3899/37/7a/075021.
- 13 Heynderickx D, Quaghebeur B, Wera J, *et al.* New radiation environment and effects models in the European Space Agency's Space Environment Information System (SPENVIS) [J]. Space Weather, 2004, **2**(10): S10S03. DOI: 10.1029/2004sw000073.
- 14 Lei F, Truscott R R, Dyer C S, *et al.* MULASSIS: a Geant4-based multilayered shielding simulation tool[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2002, **49**(6): 2788 - 2793. DOI: 10.1109/TNS.2002.805351.
- 15 Mangeret R, Carriere T, Beaucour J, *et al.* Effects of material and/or structure on shielding of electronic devices [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996, **43**(6): 2665 - 2670. DOI: 10.1109/23.556851.
- 16 Fan W C, Drumm C R, Roeske S B, *et al.* Shielding considerations for satellite microelectronics[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996, **43**(6): 2790 - 2796. DOI: 10.1109/23.556868.