

文章编号: 1001-4888(2010)02-0113-07

铝-碳纤维复合材料复合防护屏设计与实验研究^{*}

苗常青^{1,2}, 王华吉¹, 曹昱¹, 李焱¹, 谭惠丰¹

(1. 哈尔滨工业大学 复合材料与结构研究所, 黑龙江 150080; 2. 天津大学 材料学院, 天津 300072)

摘要: 针对空间碎片防护性能要求, 本文设计了一种新型的多层铝-碳纤维复合材料防护屏, 本文应用二级轻气炮对铝防护屏、碳纤维环氧树脂复合材料防护屏及铝-碳纤维环氧树脂复合材料防护屏进行了高速撞击实验, 对比了三种防护屏的防护性能, 研究了厚度和面密度相同时防护屏的防护性能差异。研究结果表明铝-碳环氧树脂复合材料复合防护屏具有更加优异的防护性能。

关键词: 空间碎片; 高速撞击; 防护屏

中图分类号: V423.41 **文献标识码:** A

0 引言

随着人类航天活动的发展, 空间碎片日益增多, 严重地威胁着在轨航天器安全运行甚至是宇航员的生命安全^[1-3]。空间碎片对航天器的危害主要是撞击毁伤, 对于毫米级空间碎片, 采用设置防护屏进行碎片防护是非常有效的措施^[4-6]。空间碎片防护屏的研究对航天器设计、试验与航天飞行活动等具有重要意义。

目前的防护屏常采用的材料^[7]主要有金属材料、高分子材料、高性能复合材料等。金属防护屏材料包括铝及铝合金等, 常以铝网、铝蜂窝板等形式使用; 高分子材料有 Kevlar、Vectran 等高强度高性能纤维; 金属基复合材料有铝基-碳化硅颗粒材料、铝基-三氧化二铝材料等; 陶瓷基复合材料有在碳化锆-二硼化锆片晶材料等。

铝合金由于其比重小、比强度较高, 因此在航空航天发展的初期得到了广泛应用, 铝合金也是最早应用于空间碎片防护屏的防护材料。虽然铝合金比 Nextel 和 Kevlar 比重高, 但具有良好的防护性能, 在许多空间碎片防护方案中, 被用于航天器舱壁和防护屏材料。铝网有时被用在第一层防护屏的前部, 它有助于在弹丸撞击防护屏之前击碎弹丸以减缓对防护屏的冲击损伤。Kevlar 纤维用来减轻空间碎片的撞击。Nextel 是一种陶瓷编织纤维, 它的氧化铝-硼-硅纤维能将高速弹丸击碎成更小的二次碎片, 从而减小对航天器的威胁。并且 Nextel 陶瓷织物在高速撞击受损后, 形成的是大量的细小粉末, 对后方的结构不再构成威胁。Nextel 陶瓷织物还是性能良好的绝热材料, 可以用于航天器热控系统。日本科学家 M. Tanaka 和 Y. Moritaka 用高强度纤维 Vectran 设计了一种厚度仅为 7mm 的超薄单层防护屏^[8], 经高速撞击实验证明它可以防护直径为 14mm, 重量为 1g, 速度为 6.45km/s 的聚亚胺酯粒子的高速撞击。这种新型防护屏够提供基本的空间碎片的高速撞击防护能力并能显著减少防护屏的重量。

根据航天器防空间碎片撞击的防护要求, 本文设计了一种新型的复合防护屏: 铝板/碳纤维复合材料复合防护屏, 利用铝合金做为防护屏的前部材料用于击碎弹丸以减缓对防护屏的冲击损伤, 利用比强度较高的碳纤维增强环氧树脂做为防护屏的后部材料, 两者复合到一起形成新型的复合防护屏, 并通过高速撞击实验对防护屏的空间碎片防护性能进行了研究。

^{*} 收稿日期: 2009-09-14; 修订日期: 2009-11-25

通讯作者: 苗常青(1972-), 男, 博士, 副教授, 研究领域: 充气展开结构技术。E-mail: miaocq@hit.edu.cn

1 实验方案

1.1 高速撞击实验方案

采用哈尔滨工业大学空间碎片超高速撞击研究中心二级轻气炮(见图1)进行高速撞击实验。



图1 二级轻气炮

Fig. 1 Two-stage light gas gun

实验采用的防护屏靶件和模拟舱壁靶件的尺寸均为 $200\text{mm}\times 200\text{mm}$ 。防护屏之间的间距 S_1 为 100mm ,第三层防护屏与模拟舱壁之间的间距 S_2 为 150mm 。防护屏靶件和舱壁靶件的4边均固定在靶架上,撞击实验总体结构如图2所示。撞击速度为 $3.00\text{km/s}\sim 3.50\text{km/s}$,撞击角度为 0° 。撞击时靶舱内抽真空,靶舱内压力小于 100Pa ,环境温度为室温^[9]。

1.2 防护屏材料方案

根据空间充气展开结构特点及不同防护屏材料的防护性能,本文选用了铝合金和碳纤维环氧树脂材料制作的防护屏,并进行高速撞击实验。其中铝合金材料型号为2A12,碳纤维环氧树脂材料型号为CW-3K,模拟舱壁采用铝合金材料5A16,厚度为 3mm 。

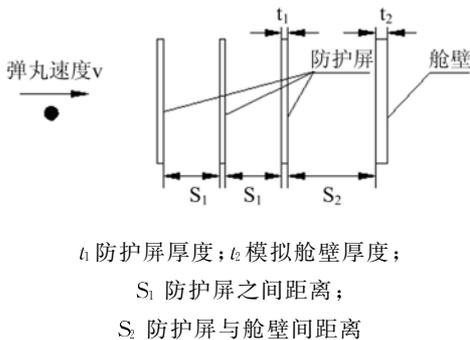


图2 防护屏结构

Fig. 2 The configuration of the shield

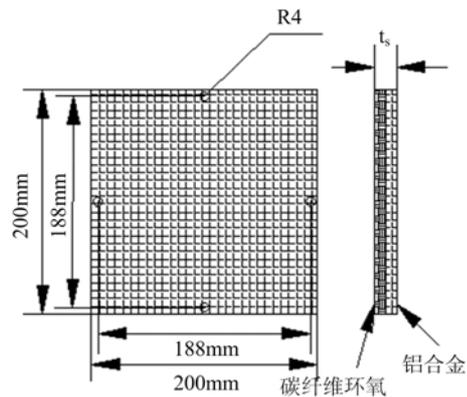


图3 铝合金-碳纤维增强环氧树脂防护屏

Fig. 3 Shield of aluminum-fiber reinforced epoxy

在弹丸撞击防护屏时,防护屏的正反面区域因受弹丸撞击而处于压缩状态,为压缩区,而背面处则处于拉伸状态,为拉伸区;根据这一撞击特点,本文设计了一种新型复合防护屏:使用高强度的铝合金薄板作为防护屏正面撞击材料,以提高防护屏抗弹丸冲击能力和对弹丸的破碎能力;在防护屏后部的拉伸区,则采用抗拉伸性能好、比强度高的碳纤维增强环氧复合材料,将两者复合到一起制成新型的复合防护屏(简称铝-碳环氧防护屏,见图3),以提高防护屏整体的抗弹丸撞击破坏能力,最大程度地降低弹丸穿透防护屏的能力,提高其防护性能,并显著降低防护屏重量。防护屏实验参数见表1。

表1 防护屏实验参数

Tab. 1 Test parameters of the shields

防护屏材料	碳纤维增强环氧树脂		铝-碳环氧		铝/铝-碳环氧/碳环氧	
	铝合金					
撞击速度(km/s)	3.25	3.27	3.21	3.32	3.17	3.19
平均弹丸质量(g)	0.1556	0.1557	0.1557	0.1559	0.1558	0.1558
平均厚度(mm)	1.00	1.34	1.90	1.36	1.68	1.24
平均面密度(g/cm^2)	0.253	0.160	0.255	0.210	0.262	0.210
弹丸直径(mm)	4.76					

2 高速撞击实验

为研究所设计的铝-碳纤维复合材料复合防护屏的防护性能,本文进行了铝合金防护屏、碳纤维复合材料防护屏和复合防护屏的高速撞击实验研究。图4所示为不同防护屏的撞击实验结果照片。

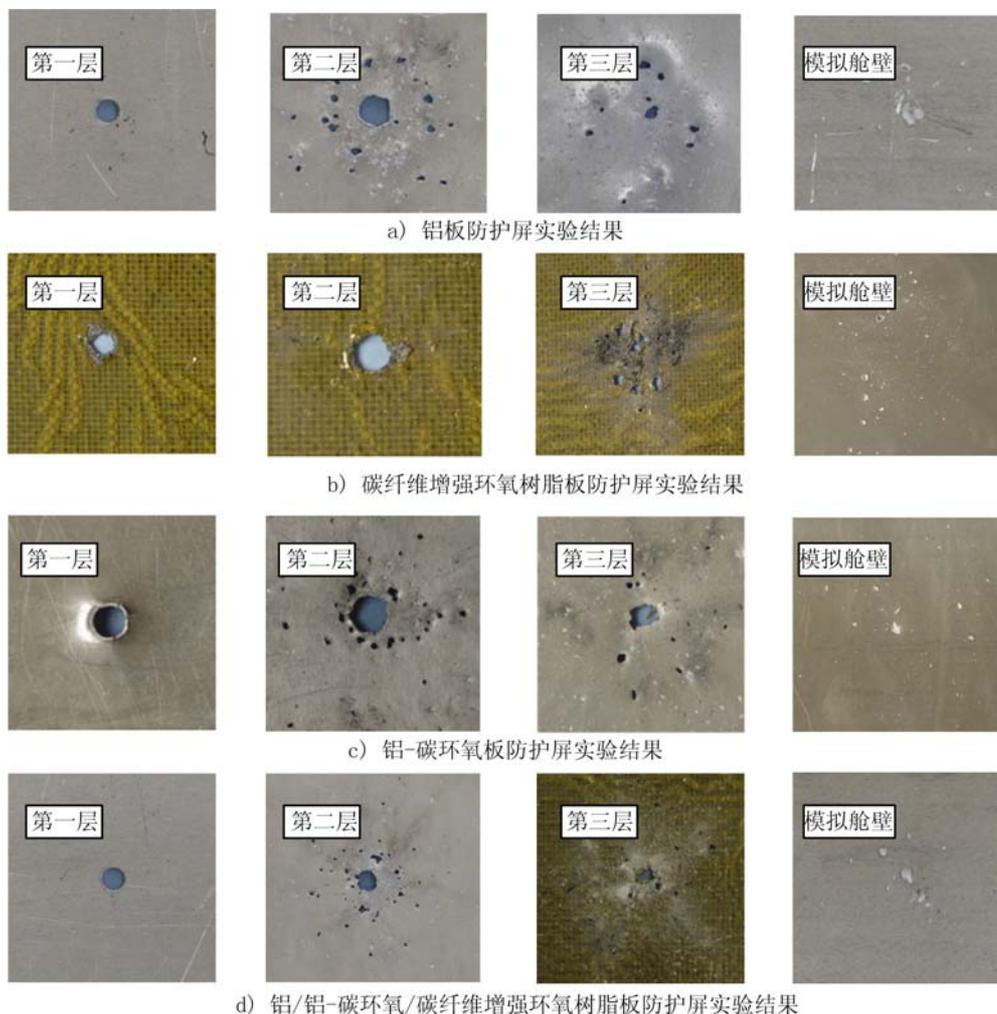


图4 各防护屏撞击照片

Fig. 4 Photos of the test

由以上各图可以看出,各种材料排布方式的高速撞击实验的各层破坏形式基本相同。但是碳纤维增强环氧树脂防护屏的第二层防护屏的中间穿孔区域周围基本上无小的穿孔区域,这说明弹丸撞击到第一层碳纤维增强环氧树脂防护屏之后破碎不够充分,仍以较大的弹体撞击到第二层防护屏上;对于铝-碳环氧防护屏,其第一层防护屏除了有边缘整齐的圆形穿孔外还有裂纹和撕裂现象,并且复合防护屏发生了脱层,铝合金防护屏部分形成了向外的突起,这是其它各种材料防护屏所没有的。这是由于弹丸与铝撞击后产生的弹体碎片被碳纤维增强环氧树脂包络住,而碎片云迅速膨胀导致反弹而形成的撕裂现象。这一现象也充分说明了本文所设计的防护屏的防护效果。

3 结果分析

对于相同结构形式的三层防护屏,当防护屏的厚度和面密度发生变化时,防护屏的性能也会出现差异。现在比较防护屏厚度相同,材料不不同时防护屏的性能差异以及比较防护屏的面密度相同,材料和厚度不同时防护屏防护性能的差异。

3.1 厚度相同防护屏的防护性能比较

厚度相同的碳纤维增强环氧树脂、铝-碳环氧和铝/铝-碳环氧/碳环氧三种防护屏的防护性能有很大差异,现根据模拟舱壁的撞击特性来比较它们的防护性能差异。其性能参数见表2。

表2 防护屏性能参数

Tab. 2 The property of the shields

防护屏材料	碳纤维增强环氧树脂	铝-碳环氧	铝/铝-碳环氧/碳环氧	
撞击速度(km/s)	3.27	3.32	3.19	
平均弹丸质量(g)	0.1557	0.1559	0.1558	
平均厚度(mm)	1.34	1.36	1.24	
舱壁	最大弹坑面积(mm ²)	27.57	11.28	16.43
	弹坑最大深度(mm)	3.48	1.07	1.84
	总的弹坑面积(mm ²)	143.16	54.51	68.64

采用激光共聚焦方法测量实验后模拟舱壁上最大弹坑面积、弹坑最大深度以及总的弹坑面积并对其加以比较,将等厚度防护屏实验结果绘制为柱状图,见图5。

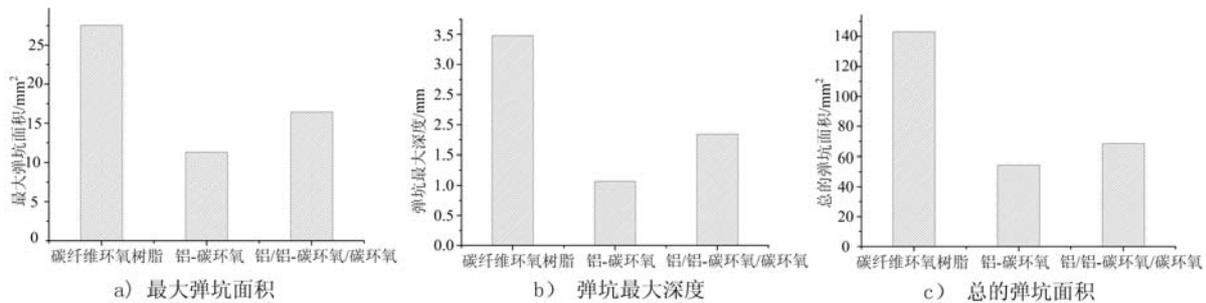


图5 相同厚度防护屏的实验结果

Fig. 5 The results of the test for the shield with the same thickness

由图5的比较可知,在相同的厚度情况下,由于每次撞击实验时,弹丸的撞击速度和质量基本相同,也就是能量基本相同,那么弹丸高速撞击到碳环氧、铝-碳环氧以及铝/铝-碳环氧/碳环氧三种防护屏之后,模拟舱壁上的最大弹坑面积、弹坑最大深度以及总的弹坑面积就能够反映弹丸撞击所剩余的能量,进而估计各种防护屏防护性能的差异。

通过图5的比较,铝-碳环氧防护屏的模拟舱壁的最大弹坑面积、弹坑最大深度以及总的弹坑面积明显小于其它两种防护屏,这就是说弹丸撞击到铝-碳环氧防护屏之后的能量损失最大,亦即其防护效果最好。其次是铝/铝-碳环氧/碳环氧防护屏,它们都要好于碳环氧防护屏。

用以上三个指标来评价防护屏防护性能的优劣,并以好中差对各种防护屏进行综合评价(见表3)。

表3 同等厚度防护屏性能比较

Tab. 3 The comparison of the shields with the same thickness

评价标准	碳纤维增强环氧树脂	铝-碳环氧	铝/铝-碳环氧/碳环氧
最大弹坑面积(mm ²)	差	好	中
弹坑最大深度(mm)	差	好	中
总的弹坑面积(mm ²)	差	好	中
综合评价	差	好	中

通过比较可知,对于同等厚度的防护屏,铝-碳环氧防护屏的防护效果要好于碳纤维环氧树脂防护屏和铝/铝-碳环氧/碳环氧屏。

3.2 面密度相同时防护性能的差异

面密度相同的铝合金、碳纤维增强环氧树脂、铝-碳环氧三种防护屏(面密度为 0.255g/cm² 左右)以及面密度相同的铝-碳环氧、铝/铝-碳环氧/碳环氧两种防护屏(面密度为 0.210g/cm² 左右)防护性能有很大差异,现根据模拟舱壁的撞击特性来比较它们的防护性能差异。其性能参数见表 4 和表 5。

表 4 同等面密度(0.255g/cm²)防护屏性能比较

Tab. 4 The comparison of the shields with the same areal density (0.255g/cm²)

防护屏材料		铝合金	碳纤维增强环氧树脂	铝-碳环氧
撞击速度(km/s)		3.25	3.21	3.17
平均弹丸质量(g)		0.1556	0.1557	0.1558
平均面密度(g/cm ²)		0.253	0.255	0.262
舱壁	最大弹坑面积(mm ²)	15.47	26.38	9.8
	弹坑最大深度(mm)	1.05	1.69	0.85
	总的弹坑面积(mm ²)	48.69	48.44	23.54

表 5 同等面密度(0.210g/cm²)防护屏性能比较

Tab. 5 The comparison of the shields with the same areal density (0.210g/cm²)

防护屏材料		铝-碳环氧	铝/铝-碳环氧/碳环氧
撞击速度(km/s)		3.32	3.19
平均弹丸质量(g)		0.1559	0.1558
平均面密度(g/cm ²)		0.210	0.210
舱壁	最大弹坑面积/mm ²	11.28	16.43
	弹坑最大深度/mm	1.07	1.84
	总的弹坑面积/mm ²	54.51	68.64

比较实验后具有相同面密度(0.255g/cm²)的模拟舱壁上的最大弹坑面积、弹坑最大深度以及总的弹坑面积,将等面密度防护屏实验结果绘制为柱状图,见图 6。

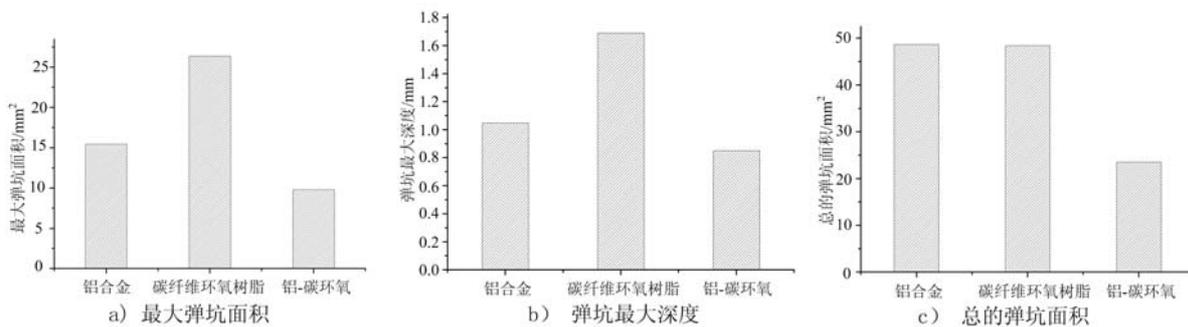


图 6 相同面密度(0.255g/cm²)防护屏的实验结果

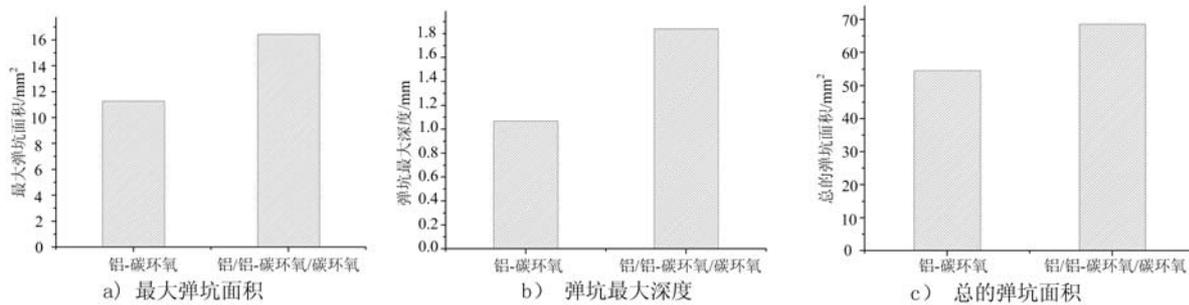
Fig. 6 The results of the test with the same areal density(0.255g/cm²)

用以上三个指标来评价防护屏防护性能的优劣,并以好中差对各种防护屏进行综合评价(见表 6)。通过这三种评价标准的比较可知,在相同面密度的情况下铝-碳环氧防护屏的性能均好于铝合金防护屏和碳纤维增强环氧树脂防护屏。

表6 同等面密度($0.255\text{g}/\text{cm}^2$)防护屏性能比较Tab.6 The comparison of the shields with the same areal density ($0.255\text{g}/\text{cm}^2$)

评价标准	铝合金	碳纤维增强环氧树脂	铝-碳环氧
最大弹坑面积(mm^2)	中	差	好
弹坑最大深度(mm)	中	差	好
总的弹坑面积(mm^2)	差	中	好
综合评价	中	差	好

比较实验后具有相同面密度($0.210\text{g}/\text{cm}^2$)的模拟舱壁上的最大弹坑面积、弹坑最大深度以及总的弹坑面积,将等面密度防护屏实验结果绘制为柱状图,见图7。

图7 相同面密度($0.210\text{g}/\text{cm}^2$)防护屏的实验结果Fig.7 The results of the test with the same areal density ($0.210\text{g}/\text{cm}^2$)

用以上三个指标来评价防护屏防护性能的优劣,并以好中差对各种防护屏进行综合评价(见表7)。通过这三种评价标准的比较可知,在相同面密度的情况下铝-碳环氧防护屏的性能均好于铝合金防护屏和碳纤维增强环氧树脂防护屏。

通过以上三种评价标准的比较可知,在相同面密度的情况下铝-碳环氧防护屏与铝/铝-碳环氧/碳环氧相比,性能均好于铝/铝-碳环氧/碳环氧防护屏。

通过以上的两组比较可知,所设计的铝-碳纤维增强环氧树脂防护屏的防护性能要好于其它两种防护屏。表明本文中所设计的铝-碳环氧复合屏具有较好的防护效果。

表7 同等面密度($0.210\text{g}/\text{cm}^2$)防护屏性能比较Tab.7 The comparison of the shields with the same areal density ($0.210\text{g}/\text{cm}^2$)

评价标准	铝-碳环氧	铝/铝-碳环氧/碳环氧
最大弹坑面积(mm^2)	好	差
弹坑最大深度(mm)	好	差
总的弹坑面积(mm^2)	好	差
综合评价	好	差

4 结论

本文设计了一种新型的铝-碳纤维复合材料复合防护屏,进行了铝合金防护屏、碳纤维复合材料防护屏和复合防护屏的高速撞击实验,研究了上述不同材料防护屏的空间碎片撞击防护性能,得到以下结论:

(1) 当防护屏的厚度相同时,铝-碳环氧防护屏的防护性能最好,其次是铝/铝-碳环氧/碳环氧防护屏和碳环氧防护屏。

(2) 当防护屏的面密度相同时,铝-碳环氧防护屏的防护性能略好于铝合金防护屏的防护性能,并且都要好于碳环氧防护屏。

(3) 实验结果也表明,所设计的铝-碳纤维复合材料复合防护屏能够有效地破碎撞击弹丸并降低弹丸穿过的速度,从而能够有效地防护空间碎片的撞击。

参考文献:

- [1] 李春来, 欧阳自远, 都亨. 空间碎片与空间环境[J]. 第四纪研究, 2002, 22(6): 540, 540—551 (LI Chunlai, OUYANG Ziyuan, DU Heng. Space Debris and Space Environment[J]. Quaternary Sciences, 2002, 22(6): 540, 540—551 (in Chinese))
- [2] 都亨, 刘静. 载人航天和空间碎片[J]. 中国航天, 2002, (2): 18—23 (DU Heng, LIU Jing. Manned Spaceflight and Space Debris[J]. Aerospace China, 2002, (2): 18—23 (in Chinese))
- [3] 魏龙涛. 空间碎片模型比较与减缓策略分析[D]. 哈尔滨工业大学硕士论文, 2006: 1—49 (WEI Longtao. Space Debris Modeling Comparasion and Mitigation Strategies Analysis[D]. Harbin Institute of Technology, 2006: 1—49 (in Chinese))
- [4] 朱光武, 李保权. 空间环境对航天器的影响及其对策研究(续) [J]. 上海航天, 2002, (5): 9—16 (ZHU Guangwu, LI Baoquan. Space Environment Effect and Countermeasure Research on Spacecraft[J]. Aerospace Shanghai, 2002(5): 9—16 (in Chinese))
- [5] Klinkrad H, Beltrami P, Hauptmann S, et al. The ESA space debris mitigation handbook 2002[J]. Advances in Space Research, 2004, 34(5): 1251—1259.
- [6] 李清源. 航天器对空间碎片撞击危害的被动防护技术[J]. 强度与环境, 2002, 29(4): 45—50 (LI Qingyuan. Passive Protection Technologies of Space Vehicle to Impact Hazard of Space Debris [J]. Structure & Environment Engineering, 2002, 29(4): 45—50 (in Chinese))
- [7] 袁俊刚 等. 空间碎片防护结构设计技术研究进展[C]. 2007年全国结构动力学学术研讨会论文集. 南昌, 2007: 285—293 (YUAN Jungang. Research State Of Designing For Orbital Debris Shielding Structure[C]. Proceedings Of The National Symposium On Structural Dynamics. NAN Chang, 2007: 285—293 (in Chinese))
- [8] Tanaka M, Moritaka Y. Single bumper shields based on Vectran fibers[J]. Advances in Space Research, 2004, (34): 1076—1079.
- [9] 管公顺. 航天器空间碎片防护结构超高速撞击特性研究 [D]. 哈尔滨工业大学博士论文, 2006: 21 (GUAN Gongshun. Hypervelocity Impact Characteristic Investigation Of Spacecraft Space Debris Shield Configuration[D]. Harbin Institute of Technology, 2006: 21 (in Chinese))

Design and Experimental Study of the Composite Shield Made of Aluminum and Carbon/Epoxy Resin Material

MIAO Chang-qing^{1,2}, WANG Hua-ji¹, CAO Yu¹, LI Yao¹, TAN Hui-feng¹

(1. Research Institute of Center of Composite Materials and Structure, Harbin Institute of Technology, Heilongjiang 150080, China;

2. School of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to simulate and study the high-velocity impact of space debris on aluminum-carbon/epoxy resin material, a multi-layered shields for the space debris was designed. According to the requirement of debris protection, the performance of three shields made of aluminum alloy, epoxy resin and aluminum-carbon/epoxy resin material respectively was studied by impact of sphere projectile launched by two-stage light gas gun. The particular performance of shield made of aluminum-carbon/epoxy resin material was analyzed and the protection differences of shields with the same thickness and area-density. were also studied. results show that the performance of aluminum-carbon/epoxy resin material is better than that of others.

Keywords: space debris; hypervelocity impact; shield configuration