

SiC/Al 复合缓冲屏材料制备及其空间碎片撞击损伤行为

黄雪刚¹, 谭旭彤², 雷光钰², 茹红强³, 张魁宝⁴, 罗庆¹, 殷春²

(1. 中国空气动力研究与发展中心 超高速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

(2. 电子科技大学, 四川 成都 611731)

(3. 东北大学, 辽宁 沈阳 110819)

(4. 西南科技大学, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为保障长期在轨航天器的安稳运行, 提高防护构型应对微小空间碎片超高速撞击时的防护性能, 需要对防护构型的缓冲屏材料进行优化和改进。通过在碳化硅多孔陶瓷预烧体中以压力熔渗方式制备了 SiC/Al 复合缓冲屏材料, 利用二级轻气炮开展了 SiC/Al 缓冲屏防护构型的空间碎片超高速撞击试验, 重点研究了 SiC/Al 缓冲屏材料的冲击破坏行为、二次碎片云结构特征以及二次碎片云对后墙撞击损伤规律。结果表明, 相比传统铝合金缓冲屏, SiC/Al 缓冲屏能够在初始超高速撞击过程中有效破碎空间碎片, 形成颗粒更加细小和扩张更加充分的二次碎片云结构, 从而有效地缓解了对后墙的撞击损伤。结合后墙撞击坑的 SEM 微观损伤形貌分析发现, 随着空间碎片撞击速度的提高, 发生了更为显著的液相二次碎片颗粒撞击现象, 增强了防护构型在超高速撞击时的防护性能。

关键词: 空间碎片; SiC/Al; 缓冲屏材料; 碎片云; 撞击行为

中图分类号: TB333

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)03-0983-07

日益恶化的空间碎片环境对航天器带来严重威胁^[1,2], 特别是微小流星体和轨道垃圾 (micro-meteoroid and orbital debris, MMOD) 等大量厘米级以下微小空间碎片, 撞击速度通常能够达到几公里甚至几十公里每秒, 且无法对其进行跟踪预警和机动规避, 危害相当巨大^[3,4]。目前, 近地空间毫米级碎片数以百亿计, 对航天器撞击概率极高, 而且空间碎片数量还在不断增加。长期在轨航天器均遭受过不同程度的微小空间碎片撞击, 如空间站、航天飞机等, 因此, 必须针对空间碎片撞击特性进行特殊的防护材料与结构设计^[5]。

目前, 广泛应用于空间碎片防护构型主要是基于 Whipple 防护构型发展起来的, 由具有一定间隔的 2 层薄板组成, 其中缓冲屏 (前板) 主要作用是在超高速初始撞击过程中对空间碎片进行破碎, 形成不断扩张的碎片云结构, 其中包含大量极为细小的碎片颗粒, 通过碎片云扩张并分散撞击在后墙上, 从而减少对航天器舱壁 (后墙) 的损伤^[6]。由此衍生出来的其它构型, 如多层板构型、填充式防护构型等, 也遵循了上述基本防护原理。可见, 缓冲屏材料在防护构型设计中扮演了极为关键的角色。

铝合金作为一种常用的空间碎片防护构型材料, 其硬度和模量较低, 作为缓冲屏使用时对超高速物体的破碎能力有限, 需要发展新型轻质高性能缓冲屏材料以进一步提高防护性能。SiC 陶瓷密度与铝合金相当, 具有高硬度、高模量、高熔点以及优异环境稳定性等优点, 作为耐热材料广泛应用于航天器表面热防护系统, 同时, 也是一种性价比比较高的抗侵彻防护材料^[7]。通过将铝合金材料与 SiC 陶瓷材料进行复合, 既可以改善铝合金材料的综合力学性能, 又能够弥补单一陶瓷材料在韧性和加工性能的不足^[8]。

作为一类轻质陶瓷/金属复合防护材料, SiC/Al 复合材料主要有金属连续相中分散陶瓷颗粒型和陶瓷骨架中渗金属型 2 种。其中, 陶瓷骨架中渗金属型^[9]为三维网络复合材料, 其金属相和陶瓷相均为连续分布, 与颗粒增强相的弥散分布显著不同。由于陶瓷骨架为三维连通网状结构, 它自身不但能传递载荷, 还可以承受载荷, 这是弥散增强体所不具备的 (弥散增强复合材料中的增强体只能传递载荷而不能承载)。因此在这种陶瓷/金属复合材料中, 金属相会由于陶瓷骨架的刚性承载作用而得到增强, 可以显著提

收稿日期: 2021-03-24

基金项目: 国家自然科学基金 (61873305, 51502338); 装备预研共用技术 (41422010905); 四川省科技计划项目 (2018JY0410, 2019YJ0199)

作者简介: 黄雪刚, 男, 1985 年生, 博士, 副研究员, 中国空气动力研究与发展中心超高速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000, 电话: 0816-2465303, E-mail: emei-126@126.com

高材料的强度和弹性模量；另一方面，陶瓷骨架因为金属相所具有的韧性而得到增韧，因此两者互为依托，相互补强^[10]。

目前，有关 SiC/Al 复合材料研究主要集中在合成原理、制备工艺和力学性能等方面，在空间碎片超高速撞击机制和防护应用领域的研究成果较少。为此，本研究基于无压预烧工艺与真空压力熔渗法制备了 SiC/Al 复合材料，并开展了 SiC/Al 缓冲屏防护构型的空间碎片超高速撞击试验，重点研究了 SiC/Al 缓冲屏材料的冲击破坏行为、二次碎片云结构特征以及二次碎片云对后墙撞击损伤规律等，为新型 SiC/Al 缓冲屏材料的航天应用提供了理论和数据支撑。

1 实验

采用熔体浸渗法制备高体积分数 SiC/Al 复合材料的基本工艺流程为：多孔预制件制备→预制件处理→铝合金高温熔融→挤压浸渗→复合材料。该工艺所得的制品可实现金属相体积分数在较大范围内可调，且陶瓷相与金属相能在微观上形成一种三维网状结构，有利于提高复合材料的综合性能，尤其是抗冲击强度。主要工艺参数包括，选取平均粒径 (d_{50}) 为 20~100 μm 的 SiC 微粉，添加体积分数约为 40% 的粘结剂（聚乙烯、糊精等），均匀混合后压制成坯，然后对坯体进行无压预烧结（预烧结温度为 1100 $^{\circ}\text{C}$ ，保温时间为 60 min，升温速率为 200 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ）。高温预烧结过程可使粘结剂完全挥发，并使得碳化硅颗粒之间形成粘结面，提高多孔陶瓷坯体的烧结强度。最后，将铝合金块置于 SiC 多孔预烧体上，升温使金属铝合金块完全熔化后，利用多孔预烧体的毛细孔作用力以及在液压压头的压力的双重作用下，使得熔融金属铝快速地渗入到多孔预烧体中，最终获得致密的 SiC/Al 基复合材料（渗铝温度为 1100 $^{\circ}\text{C}$ ，保温时间为 120 min）。

图 1 为本研究制备的 SiC/Al 基复合材料 SEM-EDS 照片，其主要由 SiC 与 Al 组成。力学性能测试表明，SiC/Al 复合材料的密度约为 3.0 g/cm^3 ，硬度 HRA 为 80 ± 5 ，抗弯强度为 (450 ± 35) MPa，断裂韧性为 (6.8 ± 0.5) $\text{MPa m}^{1/2}$ 。

空间碎片超高速撞击防护性能测试试验在中国空气动力研究与发展中心超高速弹道靶设备上开展，采用铝合金弹丸用于模拟微小空间碎片，用于发射铝合金弹丸的设备为口径 7.62 mm 二级轻气炮，弹丸飞行和撞击过程在不锈钢靶室中进行测量和拍摄，靶室为真空环境（靶室压力 ≤ 100 Pa）。采用光电探测器测得弹丸撞击速度，测量精度优于 $\pm 0.3\%$ 。铝合金弹丸超高速撞击缓冲屏以及二次碎片云形成和扩展过程由超高速

序列激光阴影成像仪进行拍摄，曝光时间约为 10 ns，拍摄帧频由弹丸速度决定。

空间碎片超高速撞击试验所用铝合金弹丸直径为 2~5 mm 不等，发射速度设定在 3.0~6.5 km/s 之间，垂直正撞击。将厚度 1 mm、直径 90 mm 的 SiC/Al 缓冲屏薄板固定于 2 块开孔夹板之间，并与后墙铝合金板间隔 80 mm，后墙所用铝合金验证板厚度为 2 mm。空间碎片超高速撞击试验结果如表 1 所示，所有 SiC/Al 缓冲屏均被铝合金空间碎片击穿，并形成近似圆形的撞击穿孔，穿孔直径随着碎片直径和撞击速度的增加而增加。在典型 Whipple 防护构型的破坏（击穿）准则中，通常认为后墙在遭受碎片云撞击后出现“碎片穿透后墙”或者“后墙分层剥落”的情况，则表明防护结构失效；若不出现“碎片穿透后墙”或者“后墙分层剥落”，则表明防护结构不失效。在本试验中，2#与 4#试验的后墙被二次碎片云击穿，形成可透光的穿孔，可认为防护结构失效；6#试验的后墙虽未产生可透光的穿孔，但是后墙背面已经产生明显的分层剥落现象，因此可认为防护结构发生失效；其余 1#、3#和 5#试验的后墙均只有表面撞击坑，无穿孔和分层剥落情况，其防护结构均未失效。

根据经典 Whipple 构型的 Christiansen 弹道极限经验公式^[11,12]，在 3~7 km/s 的撞击速度范围内，临界弹

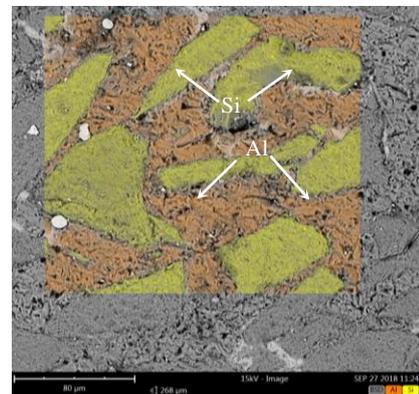


图 1 SiC/Al 复合材料的 SEM-EDS 照片
Fig.1 SEM-EDS image of SiC/Al composite

表 1 超高速撞击试验参数

Table 1 Experimental parameters of impact tests

No.	Diameter of space debris/mm	Impact velocity/ km s^{-1}	State of rear wall	Fail/Pass
1#	2.00	3.05	Impact craters	Pass
2#	3.00	3.01	Perforation	Fail
3#	3.00	5.26	Impact craters	Pass
4#	4.00	5.30	Perforation	Fail
5#	3.00	6.59	Impact craters	Pass
6#	5.00	6.52	Spallation	Fail

丸直径 d_c (既在某一撞击速度下能够达到刚好使防护构型后墙发生失效时的弹丸直径)随撞击速度的增大而增加,也就是说撞击速度越高,防护构型的防护能力越强。从表1中可以看到,当缓冲屏材料相同时,撞击速度越高,后墙损伤情况反而明显减轻,这与 Whipple 构型的弹道极限方程趋势是一致的。但是在同等撞击速度下,当空间碎片直径超过临界弹丸直径 d_c 时,防护结构依然会发生失效。参考前期试验结果^[10],本研究设计的 SiC/Al 缓冲屏材料的防护效果显著优于传统铝合金缓冲屏,与 B_4C/Al 缓冲屏材料防护性能相当,且 SiC/Al 缓冲屏材料在低成本制备方面具有优势。

2 结果与讨论

2.1 SiC/Al 缓冲屏撞击损伤特征

缓冲屏材料特性直接决定了对空间碎片的破碎性能,并对二次碎片云的形成起到了关键作用。图2给出了 SiC/Al 缓冲屏材料在相同直径空间碎片不同撞击速度下的典型穿孔形貌。可以看到, SiC/Al 复合材料形成的穿孔近似圆形,边缘不规则且存在一个环形断裂带,除此以外在陶瓷复合薄板其他区域并没有发现明显的裂纹损伤和大面积失效,陶瓷复合材料缓冲屏保持了整体结构的完整性。随着撞击速度的提高,陶瓷复合材料缓冲屏穿孔直径增大,但是环形断裂带的宽度变化较小。对于相同陶瓷/金属复合缓冲屏材料而言,环形断裂带的直径和宽度主要与2个试验参数有关,即撞击速度和缓冲屏厚度。距离撞击中心点越远,冲击波的峰值压力越低,破坏效果越小。在距离撞击中心某个位置,其受到冲击压力刚好足以引起材料发生断裂和分层,但又不足以引起严重的大规模剥落时,即会形成环形断裂带。随着撞击速度的增大,撞击中心点的冲击压力也随之上升,因此冲击波的作用距离也相应扩大,因此,较高的撞击速度会导致较大的断裂区域和穿透孔。此外,缓冲屏厚度对断裂带的影响主要是由厚度方向上的几何效应引起的,即越厚的缓冲屏形成的断裂带宽度越大。

图3为 SiC/Al 缓冲屏材料在 3.01 和 6.59 km/s 撞击速度下的微观损伤形貌。在较低的撞击速度下, SiC/Al 缓冲屏穿孔上的 SiC 陶瓷颗粒断口表面光滑平整,除了断裂面以外并没有观察到其它现在的内部裂纹,可认为 SiC 陶瓷颗粒发生了以穿晶断裂为主的脆性断裂特征,同时, Al 金属相发生了塑性变形和拉伸撕裂,形成了明显的锐利棱角和韧窝。可见,具有较高断裂韧性的 Al 金属相有效地阻碍了撞击点附近裂纹的持续扩展,并在一定程度上阻止了 SiC 陶瓷颗粒的大规模崩落。在更高的弹丸撞击速度 (6.59 km/s)

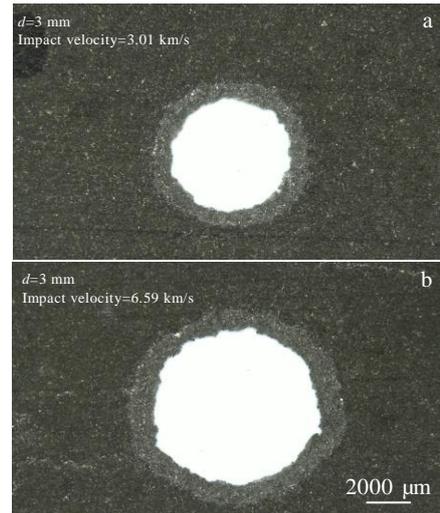


图2 不同撞击速度下 SiC/Al 缓冲屏穿孔特征

Fig.2 Perforation characteristics of the bumpers with the impact velocity of 3.01 km/s (a) and 6.59 km/s (b)

下,穿孔断面形貌发生明显改变, SiC 陶瓷颗粒不仅发生显著的脆性断裂,而且自身发生了非常严重的挤压破碎,并且整个断面附着了大量细小的 SiC 陶瓷碎片颗粒和 Al 金属碎片颗粒,同时还能观察到少量的铝金属熔融颗粒。可见,在 3.01 km/s 撞击速度下, SiC/Al 缓冲屏材料的破坏效应属于结构损伤范畴,空间碎片对缓冲屏的破坏由局部撞击和目标结构变形效应耦合而成;而在超高速撞击下,目标撞击区的能量沉积速度很快,破坏效应主要受材料的惯性效应、可压缩效应及相变效应影响,结构效应退居次要地位。

2.2 缓冲屏二次碎片云特征

图4~图6分别展示了基于超高速序列激光阴影成像仪记录下了 SiC/Al 缓冲屏材料受到不同速度撞击产生的二次碎片云发展过程和内部结构特征。可以看到,二次碎片云实际上是由大量细小二次碎片颗粒构成的,其主要由两部分结构组成,一个是与撞击方向相反的呈喇叭状的反溅二次碎片云,另一个是与撞击方向相同的具有薄壳空泡结构特征的正向二次碎片云^[13-15]。由于反溅碎片云不会对后墙造成损伤,因此本研究重点讨论正向二次碎片云结构特征。从图4中可以看到,二次碎片云中的颗粒质量分布并不是均匀的,在薄壳空泡结构的顶端集中分布了大部分二次碎片颗粒,并且顶端碎片颗粒尺寸明显大于薄壳空泡结构后部的碎片颗粒。同时,考虑到碎片云前端颗粒飞行速度明显大于后部的碎片颗粒速度,并且与后墙为正撞击,因此前端碎片颗粒的整体撞击动能水平更高,造成的后墙损伤更加严重。

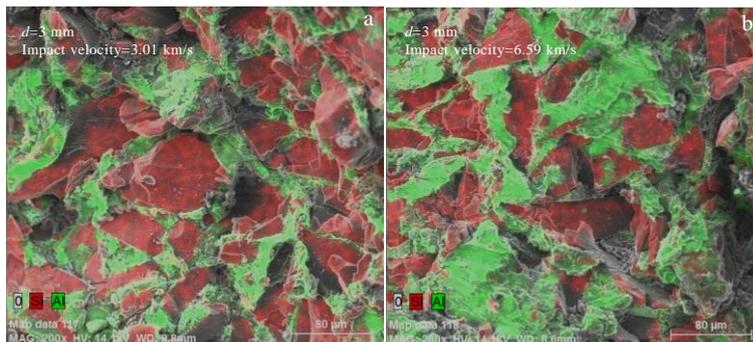


图 3 不同撞击速度下 SiC/Al 缓冲屏材料超高速撞击断口 SEM 照片

Fig.3 Perforation microfractography SEM images of the SiC/Al bumpers with the impact velocity of 3.01 km/s (a) and 6.59 km/s (b)

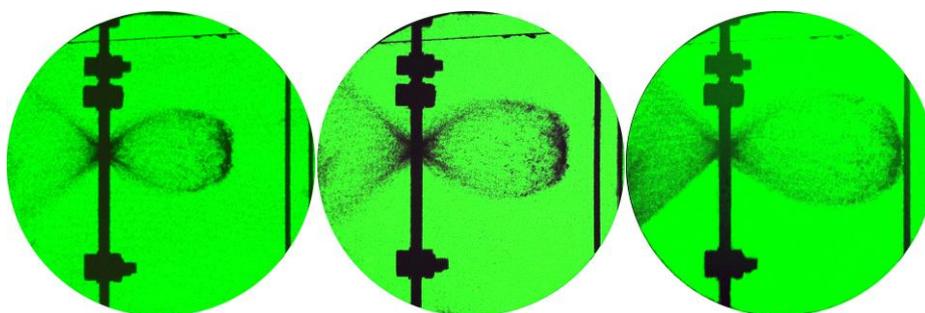


图 4 撞击速率为 3.01 km/s 时 SiC/Al 缓冲屏的二次碎片云

Fig.4 Secondary debris cloud of SiC/Al bumper with the impact velocity of 3.01 km/s

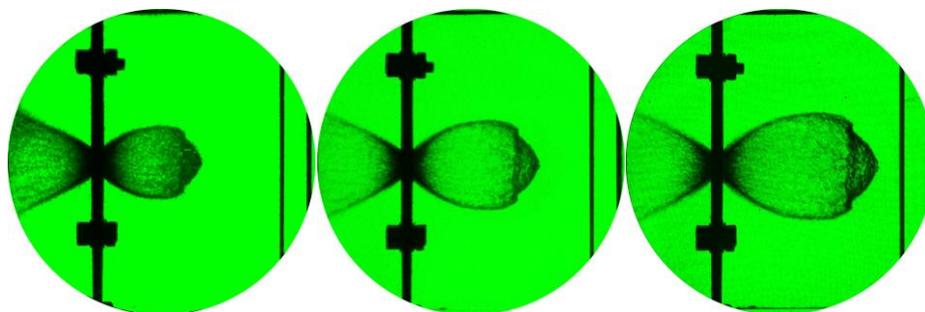


图 5 撞击速率为 5.26 km/s 时 SiC/Al 缓冲屏的二次碎片云

Fig.5 Secondary debris cloud of SiC/Al bumper with the impact velocity of 5.26 km/s

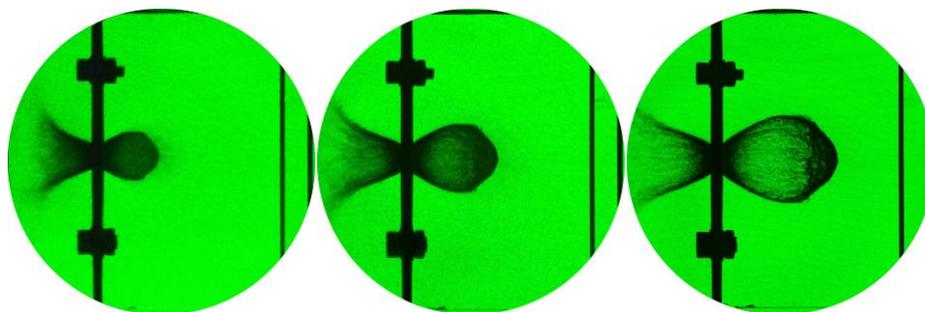


图 6 撞击速率为 6.59 km/s 时 SiC/Al 缓冲屏的二次碎片云

Fig.6 Secondary debris cloud of SiC/Al bumper with the impact velocity of 6.59 km/s

当撞击速度提高至 5.26 km/s 时,二次碎片云结构发生明显变化,首先是二次碎片云中的碎片颗粒明显细化,特别是位于碎片云前端的较大颗粒碎片数量显著减小,并在碎片云前端形成一个突出的椭圆空泡结构,如图 5 所示。随着撞击速度提高至 6.59 km/s 时,前端椭圆空泡结构在整个二次碎片云结构中的体积占比也在增加,如图 6 所示。可见,由于二次碎片云颗粒的细化以及前端碎片质量集中效益的弱化,使得二次碎片云投影在后墙上的单位面积撞击动能下降,这就是 SiC/Al 缓冲屏随着撞击速度的增大,其防护性能进一步提高的主要原因。此外,通过与传统铝合金缓冲屏材料的二次碎片云进行对比^[9],在相同弹丸直径和相同撞击速度下,得益于 SiC/Al 缓冲屏材料在硬度、弹性模量、抗压强度等方面的性能优势,有利于空间碎片在初始撞击过程中的冲击波幅值,并且其自身的破碎也更加充分,从而形成更为细密的二次碎片云结构,使得空间碎片防护性能得以提升。

2.3 二次碎片云撞击损伤特征

由超高速撞击缓冲屏产生的二次碎片云继续飞行扩张,并最终分散撞击在后墙表面,并形成大量密集分布的微小撞击坑。二次碎片云前端的椭圆空泡结构包含了动能分布较为集中的碎片颗粒,因此在后墙中心形成损伤程度较大的中心撞击区域,当出现较大动能的二次碎片颗粒时,有可能会发生后墙发生穿孔(如表 1 中的 2#和 4#试验)或者层裂剥落(如表 1 中的 6#试验)。此外,二次碎片云后部的薄壳空泡结构包含的碎片颗粒撞击动能较为分散,因此在后墙的中心撞击区域外形成外围撞击区域,其撞击坑尺寸明显小于中心撞击区。

图 7 展示了在 3.01 km/s 撞击速度下位于中心撞击区域和外围撞击区域的撞击坑 SEM 照片。可以看到中心撞击区域出现近似半球形的撞击坑,撞击坑边缘出现明显的翻边,撞击坑内壁和底部粗糙不平,此外还可以观察到现有的碎片颗粒附着或嵌入在撞击坑表面。在外围撞击区域出现的撞击坑尺寸较小且形状不规则,同时大部分撞击坑中还嵌入了不规则的固体碎片颗粒。总体而言,在 3 km/s 的撞击速度下,二次碎片云主要是以类似于固体破片开坑的方式对后墙形成损伤,并且在外围撞击区域,由于微小碎片颗粒撞击动能的不足,难以形成半球形的典型超高速撞击坑。

图 8 展示了在 5.26 km/s 撞击速度下位于中心撞击区域和外围撞击区域的撞击坑 SEM 照片。可以看到中心撞击区域出现多个半球形撞击坑交错嵌套的现象,撞击坑边缘出现明显的翻边,撞击坑内壁粗糙而底部光滑平整,没有观察到固体碎片颗粒附着或嵌入在撞

击坑表面。在外围撞击区域出现的撞击坑尺寸较小且形状趋于半球形,撞击坑中没有观察到固体碎片颗粒嵌入。可见,在 5.26 km/s 的撞击速度下,二次碎片云颗粒在撞击后墙的过程中被二次加热发生熔化,并且在外围撞击区域,由于微小碎片颗粒撞击速度的提高,逐渐形成半球形的典型超高速撞击坑。

图 9 为 6.59 km/s 撞击速度下中心撞击区域和外围撞击区域的的撞击坑形貌。在中心撞击区域,由于二次碎片颗粒撞击过于密集,因此难以观察到完整的单个撞击坑,整个撞击表面覆盖了一层明显的熔融覆盖层,覆盖层上附着有一些液体凝固微珠。基于超高速撞击原理和金属学知识可知,撞击表面的熔融覆盖层是由液相金属碎片云超高速撞击所形成。在外围撞击区域出现的撞击坑尺寸较小且具有典型半球形特征,并且在撞击坑底部同样可以观察到明显的熔融现象。可见,在 6.59 km/s 的撞击速度下, SiC/Al 缓冲屏二次碎片云结构中已经出现了大规模的微小熔融液相颗粒,这些液相颗粒相比于固体颗粒更加细小和分散,从而使得对后墙的撞击损伤进一步降低。

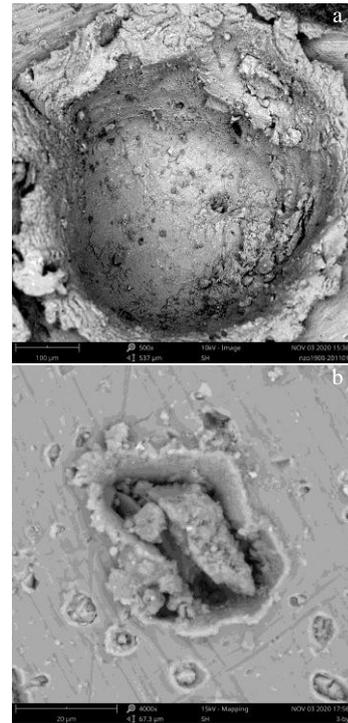


图 7 撞击速率为 3.01 km/s 时二次碎片云撞击形成的撞击坑 SEM 照片

Fig.7 SEM images of impact craters caused by the secondary impact of debris cloud with the impact velocity of 3.01 km/s: (a) central impact area and (b) peripheral impact area

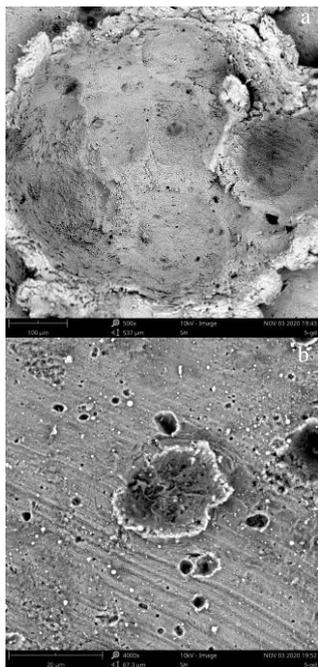


图 8 撞击速度为 5.26 km/s 时二次碎片云撞击形成的撞击坑 SEM 照片

Fig.8 SEM images of impact craters caused by the secondary impact of debris cloud with the impact velocity of 5.26 km/s: (a) central impact area and (b) peripheral impact area

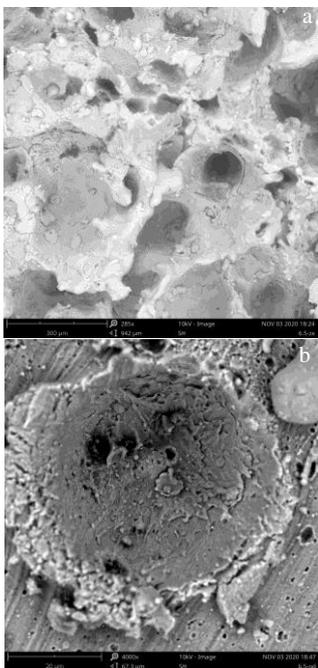


图 9 撞击速度为 6.59 km/s 时二次碎片云撞击形成的撞击坑 SEM 照片

Fig.9 SEM images of impact craters caused by the secondary impact of debris cloud with the impact velocity of 6.59 km/s: (a) central impact area and (b) peripheral impact area

3 结 论

1) SiC/Al 缓冲屏材料结合了陶瓷相高硬度、高抗压强度以及金属相优异韧性的特点, 可对超高速空间碎片进行有效地缓冲破碎, 同时也能保证整体结构不发生严重断裂破坏。

2) 增强碎片云颗粒细化程度以及扩展前端质量分布范围是改善和减缓二次碎片对后墙损伤的主要原因。

3) 提高撞击速度可观察到熔融液滴撞击现象, 有利于缓冲屏防护性能的进一步提升。

参考文献 References

[1] Wang Haifu(王海福), Feng Shunshan(冯顺山), Liu Youying (刘有英) *et al. Introduction to Space Debris(空间碎片导论)*[M]. Beijing: Science Press, 2010: 1

[2] McKnight D S. *Acta Astronautica*[J], 2016, 126: 27

[3] Skinner M A. *Journal of Space Safety Engineering*[J], 2017, 4(2): 105

[4] Bradley A M. *Advances in Space Research*[J], 2009, 43(9): 1372

[5] Cherniaev A, Telichev I. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2018, 119: 45

[6] Huang Xuegang(黄雪刚), Huang Jie(黄洁), Wen Xuezhong (文雪忠) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2017, 46(10): 3081

[7] Zhang Cuiping(张翠萍), Ru Hongqiang(茹红强), Zhu Jinghui (朱景辉) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2018, 47(S1): 398

[8] Xiang Junfeng(项俊锋), Xie Lijing(解丽静), Hu Xin(胡鑫) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2019, 48(5): 1687

[9] Peng L M, Cao J W, Noda K *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2004, 374(1-2): 1

[10] Huang Xuegang(黄雪刚), Huang Jie(黄洁), Wen Xuezhong (文雪忠) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2020, 49(2): 487

[11] Christiansen E L, Crews J L, Williamsen J E *et al. International Journal of Impact Engineering*[J], 1995, 17(1-3): 217

[12] Ryan S, Hedman T, Christiansen E L. *Acta Astronautica*[J], 2010, 67: 818

[13] Piekutowski A J. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2001, 26(1-10): 613

[14] Akahoshi Y, Nakamura T. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2001, 26(1-10): 1

[15] Huang X, Yin C, Huang J *et al. Materials & Design*[J], 2016, 97: 473

Preparation and Impact Damage Behavior of SiC/Al Composite Bumper for Space Debris Shielding Application

Huang Xuegang¹, Tan Xutong², Lei Guangyu², Ru Hongqiang³, Zhang Kuibao⁴, Luo Qing¹, Yin Chun²

(1. Hypervelocity Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

(2. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

(3. Northeastern University, Shenyang 110819, China)

(4. Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to ensure the safety and operation of long-term orbiting spacecraft, and to improve the protection performance of the shielding configuration in response to the hypervelocity impact of small space debris, it is necessary to optimize and improve the bumper materials. The SiC/Al composite bumper material was prepared by pressure infiltration in the SiC porous ceramic pre-sintered body, and the space debris hypervelocity impact experiment of the SiC/Al bumper configuration was carried out on a two-stage light-gas gun. The impact damage behavior of the SiC/Al bumper material, the structural characteristics of the secondary debris cloud, and the impact damage feature of the rear wall were investigated. The results show that the SiC/Al bumper can break the space debris into smaller debris than traditional Al-alloy bumper did, and the expanded secondary debris cloud structure is formed behind the SiC/Al bumper, mitigating the impact damage to the rear wall effectively. Based on the SEM damage morphology analysis of the impact craters on the rear wall, with the increase of the impact velocity of space debris, a more significant impact phenomenon of secondary debris in the liquid phase occurs, and the protection performance of shielding configuration is enhanced accordingly.

Key words: space debris; SiC/Al; bumper material; debris cloud; impact behavior

Corresponding author: Yin Chun, Ph. D., Professor, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, P. R. China, E-mail: chunyin@uestc.edu.cn