

B₄C-Al 基复合材料对空间碎片 超高速撞击的防护应用研究

黄雪刚¹, 殷春², 茹红强³, 邓勇军⁴, 郭运佳¹, 罗庆¹, 陈辉⁴, 柳森¹

(1. 中国空气动力研究与发展中心, 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: 为了提高航天器在应对空间碎片超高速撞击时的防护能力, 采用无压预烧和真空渗铝工艺制备了 B₄C-Al 基复合材料, 并制作了 B₄C-Al 缓冲屏的 Whipple 式空间碎片防护构型, 利用超高速弹道靶在 3~6.5 km/s 的撞击速度范围内对 B₄C-Al 缓冲屏和典型铝合金缓冲屏开展超高速撞击试验。通过比较不同撞击速度下的缓冲屏穿孔特征、后墙损伤特征、碎片云结构等, 结合 SEM 微观损伤形貌和 EDS 元素分布模式分析, 重点阐述了不同缓冲屏材料特性对超高速撞击碎片云形成以及后墙撞击损伤之间的作用关系。研究表明, B₄C-Al 缓冲屏可以更为有效地破碎超高速撞击弹丸甚至使弹丸碎片熔化, 同时基体中的金属增韧相又能保证缓冲屏整体结构不发生破坏。碎片云颗粒细化以及碎片云前端动能集中效应的缓解是 B₄C-Al 缓冲屏获得更佳防护性能的直接原因, 研究结果为 B₄C-Al 基复合材料对空间碎片超高速撞击的防护应用提供了一定的理论和技术支撑。

关键词: B₄C-Al; 空间碎片; 超高速撞击; 损伤行为; 碎片云

中图分类号: TB333

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)02-0487-07

在轨运行航天器不可避免地会遭受来自微小流星体以及轨道碎片等空间碎片的超高速撞击威胁, 速度通常达到几公里甚至几十公里每秒^[1-3]。具有巨大毁伤作用的厘米级以上空间碎片可以通过预警和航天器在轨调整对其规避, 然而对于毫米/微米级的空间碎片则无法进行预警和规避^[4,5]。伴随着空间碎片环境的日益恶化, 截止到 2016 年空间碎片总质量已达 7000 t, 近地空间毫米级碎片更是数以百亿计^[6,7]。因此, 暴露于空间碎片环境中的各类航天器必须进行超高速撞击防护设计与考核^[8]。经典空间碎片防护结构, 如 Whipple 防护构型, 由具有一定间隔的两层铝合金薄板组成, 其中前面板(也称为缓冲屏)主要作用是在超高速初始撞击过程中对空间碎片进行有效地缓冲和破碎, 并形成不断扩张发展的碎片云结构, 从而显著减少二次撞击动能对后板(也称为后墙)的损伤^[9]。

由于各类航天器的发射运载成本极高, 对航天器的整体重量具有非常严苛的限制, 相应也对各类航天材料的密度提出了一定要求。铝合金是一种常用的航天材料, 因其具有密度低、强度高以及加工制造成本低等优点,

通常也作为空间碎片防护结构的缓冲屏材料使用。然而, 由于铝合金材料硬度和模量较低, 作为缓冲屏时对超高速撞击物体的破碎能力有限, 因此需要发展新型的防护材料以弥补铝合金材料防护能力的不足^[10-12]。B₄C 陶瓷具有密度低、硬度高、强度高、以及高温和化学稳定性好等优点, 在轻质装甲、飞机腹板等常规防护领域得以应用^[13-15]。然而, 单相 B₄C 陶瓷韧性差且难以烧结致密, 通过与其他塑性较好的金属如钛、镁、铝等进行复合可改善其综合性能^[16,17]。其中铝及铝合金的密度与碳化硼相近、成本低、力学性能优良, 是与 B₄C 进行复合的优选金属材料^[18-20]。B₄C-Al 基复合材料具有密度低、硬度高、韧性好、成本低廉等优势, 且在空间辐照、高低温交替、高能粒子等极端空间环境下不易发生材料老化或功能退化, 是一种具有巨大应用潜力的航天器结构材料。

然而, 目前有关 B₄C-Al 基复合材料在航天器空间碎片防护应用领域的研究还未见报道, 相关的超高速撞击试验数据也比较匮乏, 需要尽快开展相关研究以弥补空白并进一步提升其应用价值。基于上述目的, 本研究以真空无压预烧工艺与真空熔渗法制备出 B₄C-Al 基复合

收稿日期: 2019-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(61873305, 51502338); 四川省科技计划项目(2018JY0410, 2019YJ0199); 绵阳市科技计划项目(17YFCL004); 超高速碰撞研究中心开放基金(20190101)

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学研究所, 四川 绵阳 621000, 电话: 0816-2465303, E-mail: emei-126@126.com

材料,制作了以 B₄C-Al 基复合材料为缓冲屏的防护构型样件。利用超高速弹道靶设备开展了空间碎片超高速撞击地面模拟实验,研究了 B₄C-Al 缓冲屏在超高速撞击时的损伤特性。通过与等面密度的典型铝合金缓冲屏进行对比,验证了 B₄C-Al 缓冲屏具有优异的防护能力,为新型 B₄C-Al 基复合材料对空间碎片撞击的防护应用提供了理论和技术支撑。

1 实验

采用真空无压预烧工艺与真空熔渗法进行材料制备,主要工艺流程为:将平均粒径 (D_{50}) 为 20 和 1 μm 的 B₄C 微粉按质量比 4:1 进行配料,同时还添加了质量分数约为 10% 的 TiO₂ 微粉(平均粒径为 1 μm),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 2000 $^{\circ}\text{C}$,保温时间为 30 min,升温速率为 400 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$)。预烧结过程可使 B₄C 表面活性降低,避免 B₄C 与熔融 Al 的剧烈界面反应,同时 TiO₂ 与 B₄C 反应原位生成少量 TiB₂ 以进一步提高材料的断裂韧性。最后,将金属 Al 块置于 B₄C 多孔预烧体上,在真空条件下升温使金属 Al 块熔化后,利用多孔预烧体的毛细孔作用力和熔融 Al 对预烧体的润湿使熔融 Al 自发渗入到多孔预烧体中,获得致密的 B₄C-Al 基复合材料(渗铝温度为 1100 $^{\circ}\text{C}$,保温时间为 120 min)。

图 1 所示为本项目制备的 B₄C-Al 基复合材料 SEM 图像。其基体主要由 B₄C 与 Al 组成,同时在 B₄C 基体上还存在少量 TiB₂。力学性能测试表明,B₄C-Al 基复合材料的密度约为 2.6 g/cm^3 ,硬度 HRA 约为 83.5,抗弯强度约为 500 MPa,断裂韧性约为 7.0 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

超高速撞击试验在超高速弹道靶设备上进行。所用二级轻气炮发射口径为 7.62 mm,弹丸飞行速度由三站光电探测器测定,速度测量精度优于 $\pm 0.3\%$ 。采用八序列超高速激光阴影成像仪拍摄弹丸撞击缓冲屏的碎片云

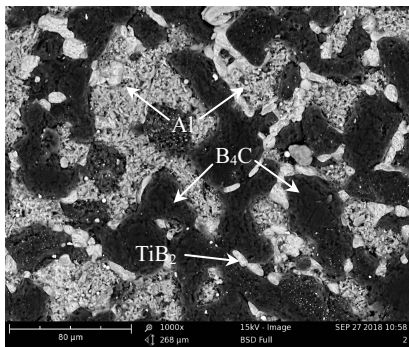


图 1 B₄C-Al 基复合材料的 SEM 图像
Fig.1 SEM image of B₄C-Al based composite

发展过程,拍摄曝光时间约为 10 ns。撞击试验所用弹丸直径为 3 mm 与 3.5 mm,材质为 LY12 铝合金,弹丸与缓冲屏垂直正撞击,预计撞击速度设定在 3.0~6.5 km/s 之间。厚度 1 mm、直径 90 mm 的 B₄C-Al 缓冲屏薄板固定于两块开孔铝合金夹板之间。用于对比的 2A12 铝合金缓冲板尺寸为 200 $\text{mm}\times 200 \text{mm}\times 1 \text{mm}$,密度和屈服强度分别为 2.73 g/cm^3 和 276 MPa,后墙所用铝合金验证板厚度为 2 mm,缓冲屏与后墙距离为 80 mm。图 2 所示为经弹丸超高速撞击测试后的铝合金 Whipple 防护构件照片。

2 结果与讨论

超高速撞击试验参数及后墙损伤结果如表 1 所示。试验中所有缓冲屏均被弹丸击穿,其中陶瓷缓冲屏上不规则穿孔直径按照穿孔处最小包络圆的直径测量,并对后墙背面鼓包直径 $\geq 2 \text{mm}$ 的显著鼓包进行统计以评估未穿透时的撞击损伤水平。

基于铝合金 Whipple 构型的 Christiansen 弹道极限方程^[9,10],可根据临界弹丸直径 d_c (既在某一撞击速度下能够达到刚好击穿防护构型后墙时的弹丸直径)的变化趋势,将整个撞击极限方程按速度分成 3 个区:0~3 km/s

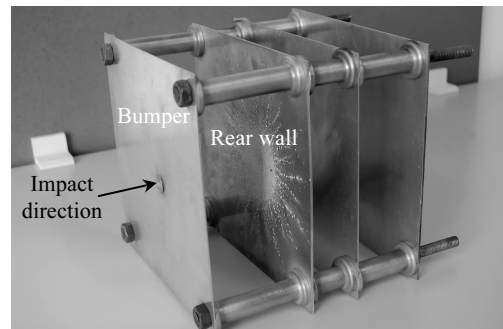


图 2 经超高速撞击测试后的防护构件
Fig.2 Shielding configuration after hypervelocity impact test

表 1 超高速撞击试验参数

Table 1 Experimental parameters of impact tests					
No.	Bumper material	Projectile diameter/mm	Impact velocity/ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	Penetration state of rear wall	Bulge number of rear wall
1#	Al6061	3.0	3.00	Penetrated	-
2#	B ₄ C-Al	3.0	3.07	Penetrated	-
3#	Al6061	3.0	5.11	Unpenetrated	57
4#	B ₄ C-Al	3.0	5.21	Unpenetrated	16
5#	Al6061	3.0	6.52	Unpenetrated	28
6#	B ₄ C-Al	3.0	6.44	Unpenetrated	5
7#	Al6061	3.5	4.98	Penetration	-
8#	B ₄ C-Al	3.5	4.82	Unpenetrated	-

为低速区, 临界弹丸直径随撞击速度增加呈-2/3 指数递减; 3~7 km/s 为中速区, 临界弹丸直径随撞击速度增加呈线性递增关系变化; 7 km/s 以上为高速区, 临界弹丸直径又随撞击速度增加呈指数形式递减。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。比如, 相对于 7#和 8#, 虽然 1#和 2#撞击速度更小, 弹丸直径更小, 但是 1#和 2#使用的 3 mm 弹丸已经超过了 3 km/s 对应的临界弹丸尺寸, 因此会造成 Whipple 构型后墙穿孔。

进一步的, 通过对使用不同缓冲屏材料的后墙损伤情况进行检测, 可以得出如下重要结论: 在缓冲屏具有相同面密度的情况下, B₄C-Al 缓冲屏具有比铝合金缓冲屏更为优异的防护性能, 且随撞击速度提高, B₄C-Al 缓冲屏的防护效果更为优异。如 7#和 8#试验所示, 在接近 5 km/s 的撞击速度下, 直径 3.5 mm 铝弹丸已经超过了铝合金缓冲屏构型的临界弹丸直径, 使得后墙发生了显著的穿孔。而使用 B₄C-Al 缓冲屏时, 直径 3.5 mm 铝弹丸未能击穿防护构型的后墙, 其结构具有更高的临界弹丸直径。

2.1 缓冲屏撞击损伤特征

缓冲屏撞击损伤特征是由撞击速度和材料特性所决定的, 研究缓冲屏的损伤特征可以了解弹丸撞击不同缓冲屏的初始状态, 并为分析后墙损伤特征和碎片云形成过程提供相应参考。B₄C-Al 缓冲屏的典型穿孔如图 3a 所示, 与铝合金薄板的规则圆形穿孔相比(如图 3b 所示), 复合材料缓冲屏的穿孔呈圆形, 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始终维持在 1~2 mm 之间。铝合金缓冲屏穿孔呈标准圆形, 内壁光滑且存在明显翻边现象。与铝合金缓冲屏相比, 相同撞击条件下 B₄C-Al 缓冲屏穿孔直径略小于铝合金缓冲屏穿孔直径, 且对撞击速度变化不敏感。

图 4 所示为不同撞击速度下 B₄C-Al 缓冲屏穿孔的 SEM 断面形貌。当撞击速度较低的时候(3.07 km/s), 穿孔断面可以看到明显的 B₄C 颗粒的脆性断裂以及 Al 金属相撕裂形成的锐利棱角和韧窝, 整个断面比较干净, 可观察到极少量的断裂碎片。可见, Al 金属相的存在有效地阻碍了撞击点附近裂纹的扩展, 使得 B₄C-Al 缓冲屏不至于整体发生明显断裂和崩落, 最终的穿孔直径更小。在更高的弹丸撞击速度下(5.21 km/s), 穿孔断面形貌发生明显改变, B₄C 颗粒的破碎程度显著提高, 碎片颗粒的尺寸更小、数量也更多, 并且整个断面附着

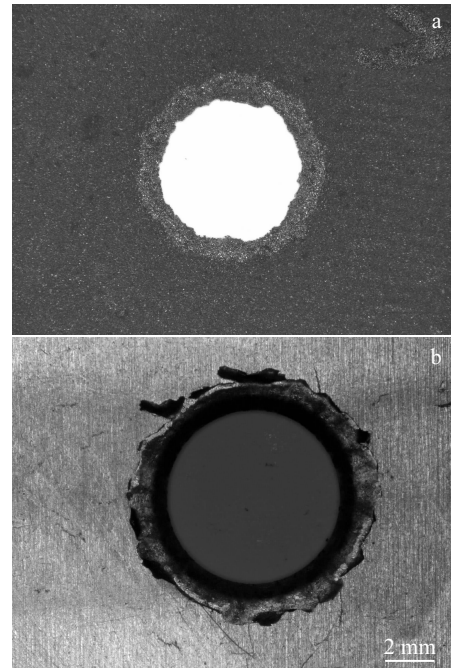


图 3 4# B₄C-Al 缓冲屏和 3#铝合金缓冲屏撞击穿孔

Fig.3 Perforation characteristics of the bumpers: (a) 4# B₄C-Al bumper and (b) 3# aluminum bumper

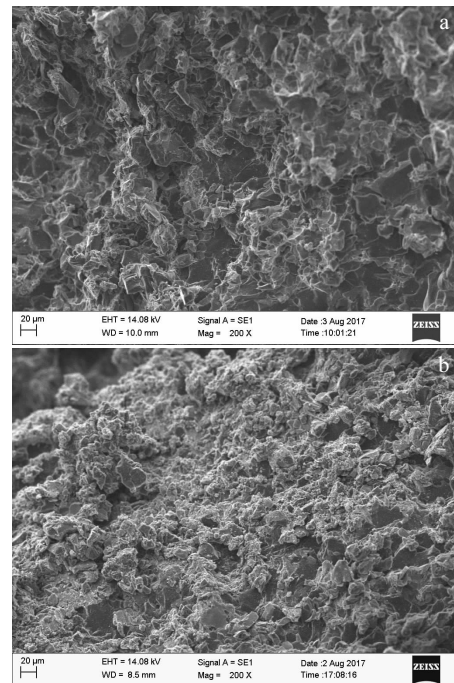


图 4 2#试验和 4#试验的 B₄C-Al 缓冲屏穿孔 SEM 形貌

Fig.4 SEM images of perforation microfractograph of the B₄C-Al bumpers: (a) 2# test and (b) 4# test

了大量细小的碎片颗粒。

进一步结合 SEM 和 EDS 分析结果表明,超高速撞击穿孔边缘的 B₄C 晶粒表面上附着的大量细小碎片颗粒以及熔融凝固微珠主要是 Al 元素,如图 5 箭头所示。熔融凝固形成的肾状或球状微珠主要是铝合金弹丸在超高速撞击陶瓷缓冲屏时产生的,由于在超高速撞击瞬间的极高冲击压力和温度使得弹丸完全破碎甚至发生熔化,其中部分熔化产物在穿孔断口表面附着并凝固形成肾状或球状微珠。上述结果表明,陶瓷缓冲屏由于其高硬度、高弹性模量、高压缩强度等特点,在较高的撞击速度下,不仅可以更有效地破碎甚至熔化弹丸,其撞击点处陶瓷的破碎也更加充分,从而对碎片云的形成和结构特征产生重要影响。

2.2 后墙撞击损伤特征

后墙的损伤是由缓冲屏和弹丸初始撞击形成碎片云的二次撞击造成的,它不仅可用于评价不同缓冲屏的防护能力,而且其特定的损伤模式有助于理解不同的碎片云的形成和结构特征,进而了解不同缓冲屏材料对弹丸的破碎机制。

典型超高速撞击后墙损伤模式如图 6 所示。损伤区域主要包含:(1)穿孔,造成后墙完全失效破坏的损伤类型;(2)中心撞击区,该区域撞击动能比较集中,撞击坑深度接近或大于后墙厚度,造成后墙背面明显变形和鼓包;(3)外围撞击区,撞击坑深度小于后墙厚度的撞击成坑,不能造成后墙背面明显变形和鼓包。对比图 6a 铝缓冲屏和图 6b B₄C-Al 缓冲屏的后墙损伤可以发现,在相同的撞击速度下,B₄C-Al 缓冲屏的后墙不仅没有发生穿孔,而且其中心撞击区的撞击坑尺寸更小和数量更少,同时,外围撞击区主要由数量极多的微小撞击坑构成,绝大部分需要借助显微镜才能清晰分辨。

为进一步对 B₄C-Al 缓冲屏的后墙撞击坑成因进行分析,分别在后墙选取了中心撞击区和外围撞击区的典

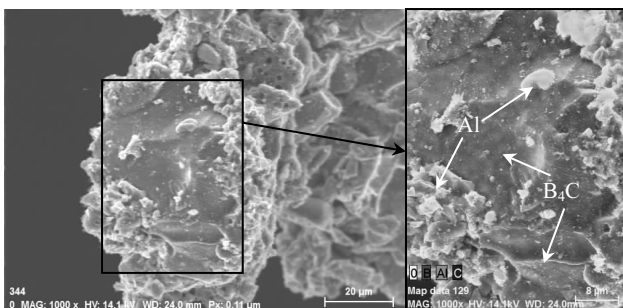


图 5 B₄C-Al 缓冲屏穿孔 SEM 形貌与 EDS 分析 (6.44 km/s)
Fig.5 SEM image and EDS element analysis of the perforation in B₄C-Al bumpers (6.44 km/s)

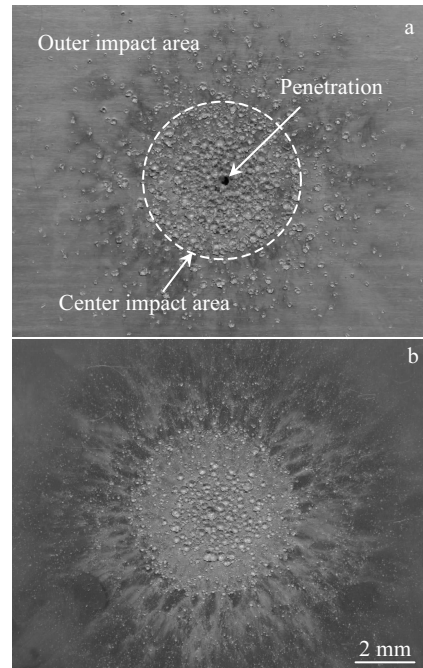


图 6 7#试验和 8#试验的后墙撞击损伤图像
Fig.6 Damage images of the rear wall: (a) 7# test and (b) 8# test

型撞击坑内部微观形貌进行 SEM 观察。图 7 所示为处于中心撞击区的撞击坑及其坑底形貌。可以看到整个撞击坑表面比较平整,在坑底表面可以明显地发现光滑的熔融覆盖层,覆盖层中有一些小气孔和固体小颗粒。根据超高速撞击原理和金属学知识可以判断,坑底表面覆盖层是由液滴超高速撞击开坑所致,小气孔则是被熔融液封盖住的气泡受热膨胀而形成的。因此可以推断,在弹丸初始超高速撞击缓冲屏时,处于撞击中心点的弹丸以及缓冲屏材料已经发生了较大程度熔化现象,形成了以液态颗粒和固体颗粒混合的碎片云前端结构。

图 8 所示为处于外围撞击区的撞击坑及其坑底形貌。可以看到整个撞击坑形状不规则,撞击坑表面粗糙不平,坑底未发现明显的熔融覆盖层,但可见大量细小颗粒以及不连续的熔融区。产生上述现象的原因是,在弹丸和缓冲屏撞击中心点附近的冲击压力和温度较低,来自于缓冲屏材料的固体碎片颗粒尺寸更小且撞击速度较低,对后墙的损伤有限,同时,在撞击后板的过程中仅会发生一定程度二次加热熔化而形成少量熔融物质。

2.3 超高速撞击碎片云特征

利用超高速序列激光阴影成像仪记录下了超高速撞击产生碎片云的高清阴影图像,通过分析比较不同缓冲屏产生碎片云的结构特征,可以搭建缓冲屏损伤模式与后墙损伤模式之间联系的桥梁,从而更加直观地解释

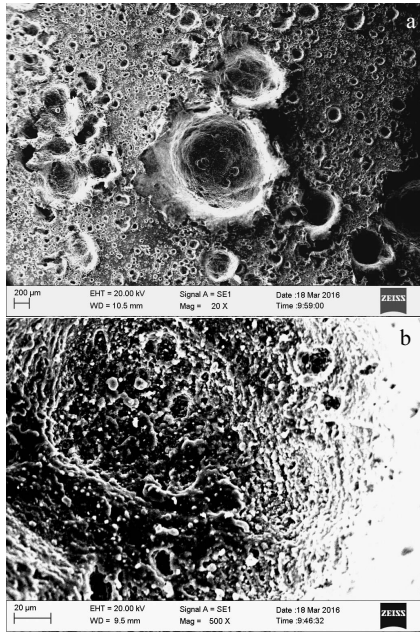


图 7 中心撞击区撞击坑和坑底的 SEM 图像

Fig.7 SEM images of the central impact area: (a) impact craters and (b) bottom of impact crater

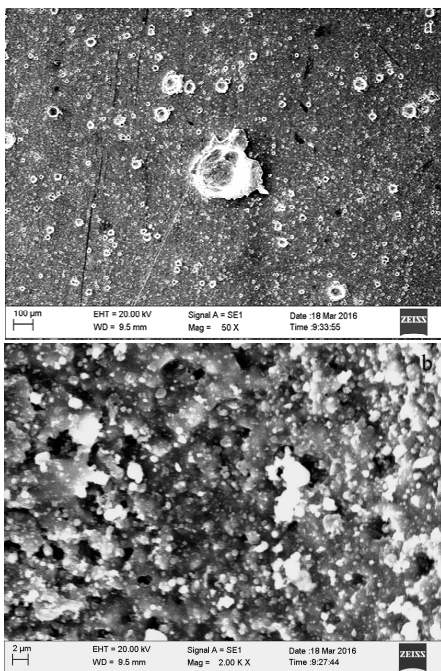


图 8 外围撞击区撞击坑和坑底的 SEM 图像

Fig.8 SEM images of the outer impact area: (a) impact craters and (b) bottom of impact crater

B₄C-Al 缓冲屏获得更佳防护性能的原因。图 9 和图 10 分别展示了不同撞击速度下铝合金缓冲屏和 B₄C-Al

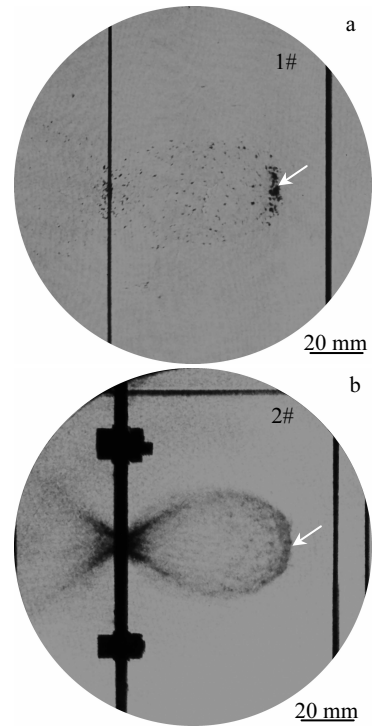


图 9 1#和 2#缓冲屏的碎片云结构 (3 km/s)

Fig.9 Debris cloud structure of 1# (a) and 2# (b) bumper (3 km/s)

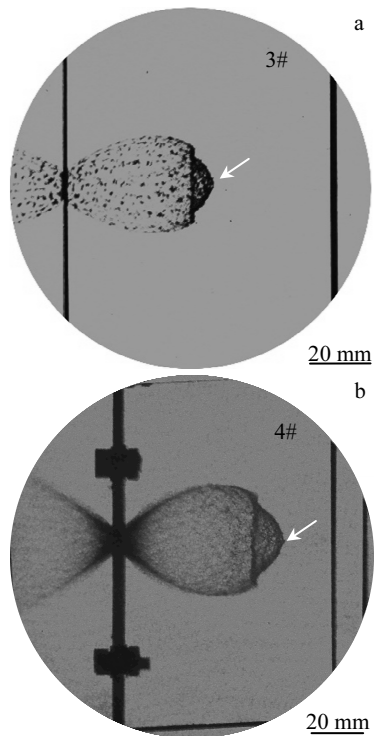


图 10 3#和 4#缓冲屏的碎片云结构 (5 km/s)

Fig.10 Debris cloud structure of 3# (a) and 4# (b) bumpers (5 km/s)

缓冲屏的典型碎片云结构特征。碎片云实际上是一个由碎片形成的薄壳空泡结构^[21,22], 其大部分碎片质量几乎都集中在薄壳云团的前端椭球形内部结构中, 如图 9 和图 10 中箭头所示, 这也是造成后墙中心撞击区动能集中损伤的原因。在 3 km/s 到 6.5 km/s 速度范围内, 随着撞击速度的提高, 碎片云的颗粒尺寸明显减小, 同时碎片云前端产生明显的膨胀和扩张, 如图 10 所示, 分散的撞击动能减少了对后墙的密集损伤, 因此撞击速度越高时同一防护构型的防护性能反而更好。

通过对比, B₄C-Al 缓冲屏碎片云区别于铝合金缓冲屏碎片云的主要特点在于: 碎片云颗粒明显细化, 在较高的撞击速度下大尺寸碎片颗粒显著减少; 碎片云的前端椭球形结构的质量集中效应明显弱化; 碎片云的扩散角更大, 碎片云与后墙的撞击接触面积明显增加。由于 B₄C-Al 基复合材料具有高弹性模量、高抗压强度、高声阻抗的特点, 会提高铝合金弹丸撞击过程中的冲击波幅值, 有利于破碎弹丸, 同时, 由于陶瓷抗拉强度相对较低, 其自身的破碎也必然充分。此外, B₄C-Al 缓冲屏穿孔没有像铝合金缓冲屏穿孔的塑形翻边而阻碍撞击碎片的横向扩张, 因此其碎片云扩散角相比于铝合金缓冲屏更大, 碎片云与后墙的撞击接触面积明显增加, 后墙单位面积遭受的碎片撞击动能也更低, 这也是 B₄C-Al 缓冲屏防护性能更好的主要原因之一。

3 结 论

1) 使用 B₄C-Al 缓冲屏的 Whipple 构型的防护性能明显高于典型铝合金缓冲屏, 且随撞击速度提高, B₄C-Al 缓冲屏的防护效果更为优异。

2) 缓冲屏穿孔特征表明, B₄C-Al 缓冲屏在超高速撞击时可以有效破碎弹丸甚至使弹丸碎片发生熔化, 同时自身较好的韧性保证了整体结构不发生破坏。

3) 后墙损伤表明, 使用 B₄C-Al 缓冲屏的后墙损伤情况明显改善, 撞击坑微观形貌特征进一步证实了熔融液滴撞击现象。

4) 碎片云结构特征表明, 更加细小的碎片颗粒以及碎片云前端动能集中效应的缓解是 B₄C-Al 缓冲屏获得更佳防护性能的直接原因。

参考文献 References

[1] Liou J C, Johnson N L. *Science*[J], 2006, 311(5759): 340
 [2] McKnight D S. *Acta Astronautica*[J], 2016, 126: 27
 [3] Skinner M A. *Journal of Space Safety Engineering*[J], 2017, 4(2):

[4] Bradley A M. *Advances in Space Research*[J], 2009, 43(9): 1372
 [5] Christiansen E L, Hyde J L, Bernhard R P. *Advances in Space Research*[J], 2004, 34(5): 1097
 [6] Mark C P, Kamath S. *Space Policy*[J], 2019, 47: 194
 [7] 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
 [8] Wang Guoyu(王国语). *Spacecraft Environment Engineering(航天器环境工程)* [J], 2015, 32(2): 147
 [9] Christiansen E L, Crews J L, Williamsen J E et al. *International Journal of Impact Engineering*[J], 1995, 17(1-3): 217
 [10] Ryan S, Hedman T, Christiansen E L. *Acta Astronaut*[J], 2010, 67(7-8): 818
 [11] 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
 [12] Huang X, Yin C, Huang J et al. *Mater Des*[J], 2016, 97: 473
 [13] Xu Y, Ru H, Long H et al. *Ceramics International*[J], 2017, 43: 4062
 [14] Zhang C, Ru H, Zong H et al. *Ceramics International*[J], 2016, 42(16): 18 681
 [15] 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
 [16] Chen Hongsheng(陈洪胜), Wang Wenxian(王文先), Li Yuli(李宇力) et al. *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2016, 45(7): 1842
 [17] Liu Weicon(刘为聪), Lin Xuping(林旭平), Xu Shun(徐舜) et al. *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2018, 47(S1): 245
 [18] Yue X, Wang J, Li Y et al. *Materials Research Bulletin*[J], 2013, 48(4): 1720
 [19] Kang P C, Cao Z W, Wu G H et al. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2010, 28(2): 297
 [20] Wang Zhixuan(王治璇), Li Qiulin(李丘林), Zheng Jiyun(郑继云) et al. *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2017, 46(9): 2345
 [21] Piekutowski A J. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2001, 26(1-10): 613
 [22] Akahoshi Y, Nakamura T. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2001, 26(1-10): 1

Shielding Application of B₄C-Al based Composites for Hypervelocity Impact of Space Debris

Huang Xuegang¹, Yin Chun², Ru Hongqiang³, Deng Yongjun⁴, Guo Yunjia¹, Luo Qing¹, Chen Hui⁴, Liu Sen¹

(1. 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 improve the shielding ability of spacecraft against space debris hypervelocity impact, the B₄C-Al based composites prepared by pressureless presintering and aluminium infiltration in a vacuum were designed as the front bumper with Whipple shielding configuration, and the hypervelocity impact tests were carried out to evaluate the shielding performance of B₄C-Al bumper and Al alloy bumper at the impact velocity of 3~6.5 km/s. By comparing the bumper penetration, the rear wall damage state and the debris cloud structure of two different bumper materials at various impact velocities as well as the SEM and EDS results, the relationship among the bumper material properties, the cratering mechanics of rear wall and the debris cloud characteristics was discussed. The results indicate that the B₄C-Al bumper can break the projectile into smaller pieces and even melt the debris, and the impact damage of debris cloud on rear wall is alleviated significantly. Meanwhile, the good toughness of Al metallic phase can keep this bumper structure intact. Hence, both the pulverized small debris and the decreased impact kinetic concentration of debris cloud are the main reasons for obtaining a higher shielding capability of B₄C-Al bumper. This primary investigation provides theoretical and technical instruction for the design and application of B₄C-Al based composite materials in space debris shielding configuration.

Key words: B₄C-Al; space debris; hypervelocity impact; damage behavior; debris cloud

Corresponding author: Yin Chun, Ph. D., Professor, School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, P. R. China, Tel: 0086-28-61830301, E-mail: yinchun.86416@163.com