

TiB₂ 基陶瓷复合材料超高速撞击损伤行为研究

黄雪刚, 黄洁, 文雪忠, 李晶, 姜林, 张军, 邢英丽, 柳森

(中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000)

摘要:为了提高航天器对空间碎片的防护能力,设计了以 TiB₂ 基陶瓷复合材料为缓冲屏的 Whipple 式防护构型(单层 TiB₂ 基陶瓷缓冲屏以及 TiB₂ 基陶瓷/铝合金缓冲屏),利用二级轻气炮在 2.88~7.32 km/s 的撞击速度范围内开展超高速撞击实验,并对上述缓冲屏与典型全铝合金缓冲屏进行比较验证。通过分析不同撞击速度下缓冲屏的穿孔、后墙损伤、碎片云结构特征,并结合 SEM 微观损伤形貌和 EDS 元素分布模式,重点阐述了不同缓冲屏材料特性与结构特性对碎片云形成以及后墙撞击成坑之间的作用关系。研究表明,单层 TiB₂ 基陶瓷复合材料缓冲屏可以有效破碎铝合金弹丸获得更加细小的碎片云颗粒,由于碎片云动能被有效分散到更为广泛的细小碎片颗粒当中,从而获得比等面密度典型全铝缓冲屏更为优异的防护性能,且防护性能随着撞击速度的增加而有所提高。相反的, TiB₂ 基陶瓷/铝合金缓冲屏由于异质材料之间波阻抗的明显差异,在超高速撞击下会导致陶瓷前面板的严重断裂并造成铝合金后板的花瓣状破坏,且损伤程度随着撞击速度和弹丸尺寸的增加而增加,由于不能有效细化碎片云颗粒,其防护效能反而低于等面密度典型全铝缓冲屏。

关键词: TiB₂ 基陶瓷; 超高速撞击; 损伤行为; 碎片云; 防护构型

中图分类号: TB331

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)10-3081-10

随着各类太空探索活动的开展,数量众多的航天飞机、探测器、运载工具被发射到外层空间,随之而来的是不断增加的微流星体以及空间碎片(micro-meteoroid and orbital debris, MMOD)的危害^[1]。时至今日,各类在轨航天器受 MMOD 撞击损伤的事件不断增加,对航天器的工作效能、使用寿命以及司乘人员安全都提出了严峻挑战。针对尺寸较大的空间碎片可以实现监测和预警,并通过航天器的姿态控制和轨道调整对碎片进行规避,而对于尺寸较小的碎片则需要有效的被动防护手段^[2-5]。Whipple 防护构型作为一种典型的防护结构最早由天体物理学家 F. L. Whipple 提出,并在过去几十年间得到广泛研究和不断发展^[6]。典型的 Whipple 防护构型由一较薄的前缓冲屏和安装于后一定距离的后墙构成,通过缓冲屏对超高速弹丸的破碎而形成不断扩张的碎片云,由于撞击能量被数量众多的碎片云颗粒分散,从而减小了对后墙的损伤。

基于 Whipple 防护构型类似的防护机制,一些改进防护构型不断涌现,例如填充式防护构型和多层结构防护构型。相关的超高速撞击实验和仿真研究也随之开展,以评估各类增强型防护构型(如:单层缓冲屏、双层缓冲屏、多层缓冲屏、N 型防护构型、夹层泡沫

铝等等)的防护效能。已有研究表明,防护构型的几何结构(例如间隔距离、倾斜角、厚度等)和材料属性(例如密度、弹性模量、强度等)对防护效能有显著影响^[7,8]。由于缓冲屏的作用在于初始撞击阶段对弹丸进行破碎并决定了碎片云的形成特点,因此配合适当的缓冲屏材料对提高整体防护效能非常重要^[9]。铝合金具有较好的强度-重量比,且加工制备工艺相对简单,是一种常用的缓冲屏材料。然而,随着太空探索活动的快速发展,需要研究高性能的防护材料以满足未来更高的防护需求。为了实现这一目标,一些新防护材料不断涌现,如陶瓷材料、聚合物材料、非晶合金、梯度复合材料等等^[10-14],有关的超高速撞击实验和理论研究也不断开展,其发展目标是在基本不增加防护结构质量以及防护结构体积的前提下,提高各类防护结构的实际防护效能。

不同于传统的单相陶瓷, TiB₂ 基陶瓷复合材料不仅表现出极高的硬度和高温化学稳定性,而且由于一定含量金属粘接相的加入在一定程度上克服了陶瓷材料固有的脆性,使其具有更高的断裂韧性和强度,大大提高了工程应用价值^[15-17]。此外, TiB₂ 基陶瓷复合材料的密度为 4.2~4.5 g/cm³,比铝合金略高,但低于常规金属陶瓷及非晶合金材料。本研究设计了以

收稿日期: 2016-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(51502338)

作者简介: 黄雪刚,男,1985年生,博士,助理研究员,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: 0816-2465288, E-mail: emei-126@126.com

TiB₂ 基陶瓷复合薄板为缓冲屏的防护结构, 考虑到实际使用过程中单层 TiB₂ 基陶瓷复合薄板的运输、组装的适用性, 还设计了 TiB₂ 基陶瓷薄板与铝合金薄板粘合的陶瓷/铝合金缓冲屏结构。通过二级轻气炮开展超高速撞击实验对上述缓冲屏的防护性能进行评价, 并与等面密度的典型全铝缓冲屏进行了对比验证。实验中利用超高速序列激光阴影成像仪记录了碎片云的形成和与后墙撞击的过程, 并运用 SEM 和 EDS 微观分析测试手段对缓冲屏穿孔和后墙的微观损伤模式进行研究。

1 实验

本实验所用 TiB₂ 基陶瓷复合材料用超重力场燃烧合成工艺制备, 主要由大量细小的 TiB₂ 片状晶体作为基体相, 不规则 TiC 晶体作为第二相, 以及填充在 TiB₂ 片晶与 TiC 晶粒之间的 Ni 金属相构成, 如图 1 所示。TiB₂ 与 TiC 的摩尔比测定约为 2:1, 约 5% (质量分数) 的 Ni 金属主要作为粘接相用以提高陶瓷复合材料的致密性和断裂韧性。物理和力学性能测试结果表明, TiB₂ 基陶瓷复合材料的密度、硬度、断裂韧性和抗弯强度分别为 4.3 g/cm³、21±1.5 GPa、11.5±1.8 MPa m^{1/2} 以及 800±25 MPa。

超高速撞击实验在中国空气动力研究与发展中心的弹道靶设备上开展, 所用二级轻气炮口径为 7.62 mm, 最高发射速度为 7.36 km/s, 弹丸材质为 LY12 铝合金。弹丸在真空靶室中的飞行时间间隔由安装在沿飞行方向的 3 个光电探测器确定, 结合探测器之间的距离可以自动获取弹丸飞行速度, 其测量精度优于 ±0.3%。缓冲屏撞击产生的碎片云扩张过程由超高速激光序列阴影成像仪拍摄记录, 最短曝光时间可到达 10 ns。实验中弹丸与缓冲屏为垂直正撞击, 预计发射速度在 3.0~7.0 km/s。实验中所用到的铝合金板均为 Al-6061 板材, 密度和屈服强度为 2.73 g/cm³ 和 276 MPa, 后墙所用铝合金板厚度为 2 mm, 缓冲屏与后墙

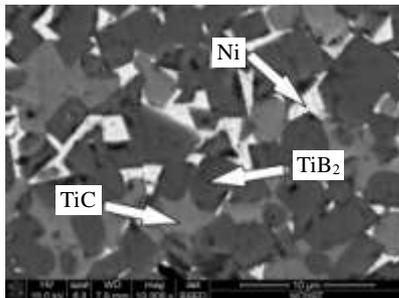


图 1 TiB₂ 基陶瓷复合材料 SEM 微观结构

Fig.1 SEM microstructure of the TiB₂-based composite

距离为 80 mm, 后墙主要作用是对比验证弹丸撞击缓冲屏后形成碎片云的毁伤程度, 图 2 所示为装配完成的防护构型。典型全铝防护构型如图 2a 所示, 铝板尺寸均为 200 mm×200 mm。TiB₂ 基陶瓷复合材料被切割并打磨成厚度 0.65 mm 的 60 mm×60 mm 薄板, 陶瓷/铝合金缓冲屏则由上述尺寸陶瓷薄板与 0.5 mm 厚 Al-6061 薄板粘接而成, 最后固定在具有 55 mm 直径中心孔的一对夹板之间, 如图 2b 所示。为了便于比较不同缓冲屏的防护效能, 其中 1#~6#实验缓冲屏的等效面密度约为 0.27 g/cm², 7#~12#实验缓冲屏的等效面密度约为 0.41 g/cm²。相关实验参数如表 1 所示。

2 结果与讨论

超高速撞击实验结果见表 2, 所有缓冲屏均被弹丸击穿。陶瓷缓冲屏的不规则穿孔直径按照穿孔处最小包络圆的直径测量, 不同陶瓷面板和铝合金面板的穿孔直径代表了面板的损伤区域大小, 面板穿孔直径越小则面板受到的损伤程度也越小, 也就意味着可重复使用的性能越好。为了验证整体结构的防护性能, 主要依靠检测碎片云对后墙验证板的损伤程度。由于实验后的后墙铝板正面有数量众多的不同直径和深度的撞击坑, 不易对其进行识别和分析, 而通过观测后墙背面的损伤变形情况则较易获得损伤特征和损伤程

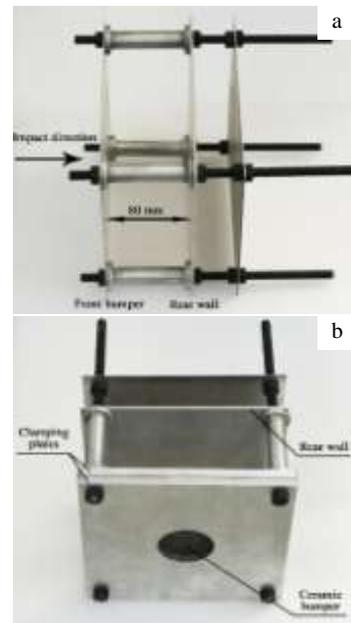


图 2 超高速撞击实验使用的全铝防护构型装配图和 TiB₂ 基陶瓷复合材料防护构型装配图

Fig.2 Experimental configurations with different bumpers: (a) configuration with aluminum bumper and (b) configuration with TiB₂-based composite bumper

表 1 超高速撞击实验参数

Table 1 Experimental parameters of hypervelocity impacts

No.	Bumper structure	Thickness of ceramic layer/mm	Thickness of aluminum layer/mm	Projectile diameter/mm	Estimated impact velocity/km s ⁻¹
1#	Ceramic	0.65	—	3.0	3.0
2#	Ceramic	0.65	—	3.0	5.0
3#	Ceramic	0.65	—	3.0	7.0
4#	Aluminum	—	1.0	3.0	3.0
5#	Aluminum	—	1.0	3.0	5.0
6#	Aluminum	—	1.0	3.0	7.0
7#	Ceramic/Aluminum	0.65	0.5	3.0	3.0
8#	Ceramic/Aluminum	0.65	0.5	3.0	5.0
9#	Ceramic/Aluminum	0.65	0.5	4.0	7.0
10#	Aluminum	—	1.5	3.0	3.0
11#	Aluminum	—	1.5	3.0	5.0
12#	Aluminum	—	1.5	4.0	7.0

表 2 超高速撞击实验结果

Table 2 Experimental results of hypervelocity impacts

No.	Measured impact velocity/km s ⁻¹	Diameter of ceramic perforation/mm	Diameter of aluminum perforation /mm	Damage situation of rear plate (the damage status and the number of discriminative defects)
1#	3.15	4.62	—	Failure, perforation×1, large bulge×5
2#	5.20	5.35	—	Pass, no perforation, small bulge×32
3#	7.22	5.57	—	Pass, no perforation, small bulge×3
4#	3.00	—	5.50	Failure, perforation×2, large bulge×13
5#	5.11	—	6.95	Pass, no perforation, small bulge×103
6#	7.32	—	7.62	Pass, no perforation, small bulge×287
7#	2.93	5.25	8.61	Failure, perforation×1, large bulge×1
8#	5.20	8.92	12.65	Pass, no perforation, small bulge×39
9#	6.84	19.31	24.16	Pass, no perforation, small bulge×4
10#	2.88	—	5.85	Failure, perforation×1, large bulge×3
11#	5.24	—	7.79	Pass, no perforation, small bulge×57
12#	6.90	—	11.23	Pass, no perforation, no obvious bulge

度。表 2 中后墙铝板背面的损伤情况可主要分为 3 类: 穿孔, 明显鼓包和细小鼓包。其中, 后墙出现穿孔是最为严重的损伤状态, 出现穿孔代表后墙已经失效, 穿孔数量越多则后墙损伤越大; 后墙背面鼓包高度大于 0.1 mm、鼓包直径 2 mm 以上的变形区域定义为显著鼓包, 通常情况下显著鼓包时的碎片撞击坑深度已经接近甚至大于后墙的厚度, 代表了碎片云颗粒对后墙造成比较严重的后墙损伤甚至接近穿孔失效, 显著鼓包数量越多则后墙损伤越大; 后墙背面鼓包高度小于 0.1 mm、鼓包直径 2 mm 以下的变形区域定义为细小鼓包, 通常情况下细小鼓包时的碎片云颗粒的撞击坑较浅, 这种浅撞击坑对后墙不会造成严重损伤, 后墙能够基本保持原来的使用性能, 如果整个后墙出现大量细小鼓包而显著鼓包较少时, 证明碎片云颗粒明显碎化分解, 撞击动能显著分散, 防护效果相应提高。

通过比较后墙的损伤情况, 可以得出初步结论: 在缓冲屏具有相同面密度的情况下, 单层 TiB₂ 基陶瓷

复合材料缓冲屏具有比传统铝合金缓冲屏更为优异的防护性能, 且随撞击速度的增加, 防护效果更为显著; TiB₂ 基陶瓷/铝合金粘合的缓冲屏在较低撞击速度时的防护能力与等面密度铝合金缓冲屏相当, 但是在较高的撞击速度下防护效果明显低于等面密度的铝合金缓冲屏。

2.1 缓冲屏穿孔特征

缓冲屏的穿孔特征是由撞击动能和材料特性所决定的, 研究缓冲屏的穿孔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。单层 TiB₂ 基陶瓷薄板的典型穿孔如图 3a 所示, 与铝合金薄板的规则圆形穿孔相比 (如图 3b 所示), TiB₂ 基陶瓷复合材料薄板的穿孔呈边缘不规则的圆形, 并且在穿孔边缘还存在一个环形断裂带, 该环形断裂带在穿孔正反两面均有发现。除此以外, 在陶瓷薄板其他区域并没有发现明显的裂纹损伤和面积失效, 陶瓷缓冲屏保持了整体结构的完整

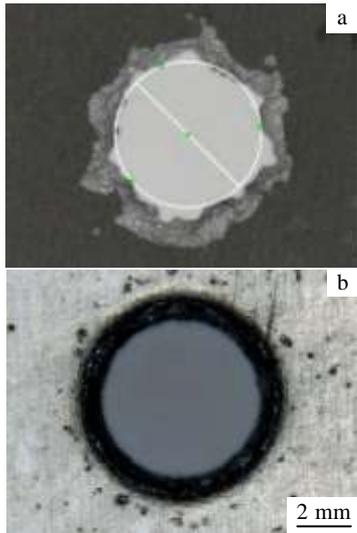


图 3 陶瓷基复合材料和铝合金缓冲屏的穿孔特征

Fig.3 Perforation characteristics of the bumpers: (a) TiB₂-based composite and (b) aluminum

性。随着撞击速度的提高，陶瓷缓冲屏穿孔直径随之增加，但是环形断裂带的宽度始终维持在 1~2 mm 之间。与铝合金缓冲屏相比，陶瓷缓冲屏穿孔直径略小于铝合金缓冲屏穿孔直径，且对撞击速度的变化不敏感。根据相关研究^[18,19]，薄板穿孔直径随着弹丸直径、撞击速度以及缓冲屏厚度的增大而增大，造成陶瓷缓冲屏穿孔直径较小的主要原因是陶瓷缓冲屏厚度小于铝合金缓冲屏厚度。

在较低撞击速度下，陶瓷/金属缓冲屏的 TiB₂ 基陶瓷前板的穿孔特征与单层陶瓷薄板的比较一致，而背面的铝合金后板则呈现出一定的花瓣状破坏。图 4 为不同撞击速度和弹丸直径下陶瓷/铝合金缓冲屏背面的花瓣状穿孔特征。而随着撞击速度和弹丸直径的增加，背面铝合金薄板的花瓣状破坏特征更加明显，并

且伴有很长的裂纹损伤。与此同时，在更高的撞击动能下陶瓷前板也出现了不一样的穿孔特征，在同一穿孔边缘存在 2 种不同特征的断裂边缘形貌，如图 5 所示。可以看到，在靠近撞击中心位置的断裂边缘具有一定的扩张角，具有与单层陶瓷薄板穿孔相似的断裂带特征，而在远离撞击中心位置的断裂边缘表面干净平整且与薄板表面垂直，不存在环形断裂带的扩张角特征。为了进一步研究上述 2 种断裂损伤模式和断裂失效原因，使用 SEM 对不同的陶瓷复合薄板的穿孔断面形貌进行观察，如图 6 所示。可以看到，靠近撞击中心位置的环形断裂带的断口表面呈现明显的粉碎性破坏特征，部分 TiB₂ 片晶被破碎成不规则的颗粒。且表面上覆盖了大量撞击形成的碎片颗粒。可以认为，该断裂是由弹丸初始撞击造成的动态冲击破碎造成的。与上述断口形貌明显不同，平整失效断口上存在完整的 TiB₂ 片晶的明显拔出痕迹，其断口形貌特征与准静态断裂条件下的断口形貌基本一致，且整个断口表面仅存在少量的碎片颗粒附着，从而判断出该断裂并非由弹丸初始撞击形成，应当是在初始撞击后陶瓷前板发生严重变形而造成的脆性断裂破坏。上述分析表明，陶瓷/铝合金的缓冲屏的双层板设计在较高的撞击动能下不仅对铝合金后板造成显著的花瓣状失效破坏，而且对 TiB₂ 基陶瓷前板造成了额外的结构破坏。

弹丸撞击速度不仅影响缓冲屏的穿孔尺寸和宏观特征，同时也显著影响穿孔断口的微观形貌。图 7 显示了在不同撞击速度下单层 TiB₂ 基陶瓷缓冲屏(迎弹面)的穿孔断裂带的 SEM 断口形貌。当撞击速度较低的时候(3.15 km/s)，穿孔断面可以看到明显的 TiB₂ 片晶的穿晶断裂以及 TiC 和 Ni 金属相撕裂形成的锐利棱角，整个断口表面比较干净，可观察到极少量的断裂碎片。随着弹丸撞击速度的提高(5.2 km/s)，穿孔断面发生明显改变，TiB₂ 片晶的破碎程度显著提高，即使尚未破碎的晶粒之间也萌生了细小的晶间裂纹，整个

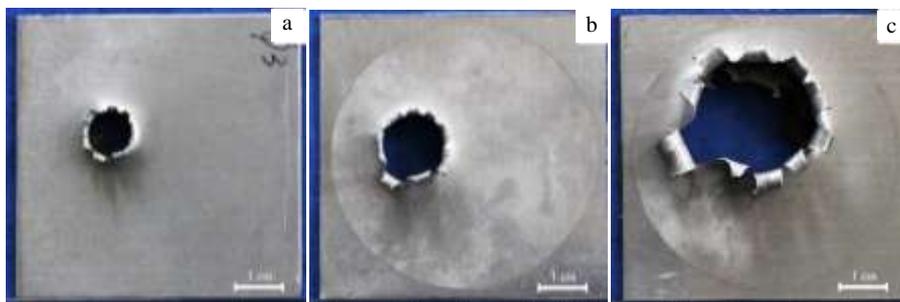


图 4 陶瓷/铝合金缓冲屏的铝合金背板穿孔特征

Fig.4 Perforation characteristics of rear aluminum plate of ceramic/aluminum bumper: (a) $d=3$ mm, $v=2.93$ km/s; (b) $d=3$ mm, $v=5.2$ km/s; (c) $d=4$ mm, $v=6.84$ km/s

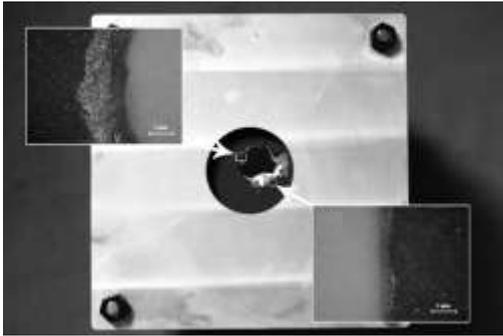


图 5 陶瓷/铝合金缓冲屏的陶瓷面板穿孔特征
Fig.5 Perforation characteristics of front ceramic plate of ceramic/aluminum bumper ($v=7.32$ km/s)

断口表面附着了大量细小的碎片颗粒。在更高的撞击速度下(7.22 km/s), 碎片颗粒的尺寸越小、数量也越多, 同时, 在断口表面观察到明显的球形微珠附着, 如图 7c 中箭头所示。EDS 分析结果表明, 球形微珠以及大部分碎片颗粒附近主要分布聚集着 Al 元素, 如图 8a 所示。球形微珠的产生是因为铝合金弹丸在超高速撞击陶瓷缓冲屏时, 冲击压力远大于铝合金弹丸强度, 促使弹丸破碎甚至发生熔化, 熔化产物在穿孔断口表面附着并凝固形成球形微珠。事实上, 对缓冲屏背面的穿孔断面进行分析, 可以发现, 在超高速撞击下的铝合金熔化凝固特征更加明显, 其穿孔背面的断口表面已经完全被铝合金凝固产物所覆盖, 观察到尺寸更大的球形微珠以及扁平状覆盖物, 如图 8b 所示, 这些铝合金凝固产物既来自弹丸初始撞击形成的产物也来自碎片云撞击后墙二次飞溅形成的产物。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影响。

2.2 后墙损伤特征

不同缓冲屏材料的防护性能可以通过碎片云颗粒对后墙的损伤情况进行评估, 例如: 穿孔、撞击坑、鼓包等等, 同时, 后墙的不同损伤模式也与碎片云的特征息息相关, 因此研究后墙的损伤模式有助于了解不同的碎片云的形成和结构特征, 进而得出不同缓冲屏材料对弹丸的破碎机制。根据本实验中碎片撞击后墙损伤模式的不同可以将损伤分为以下 4 类:(1)穿孔, 通常位于撞击区域的中心, 是造成后墙完全失效破坏的主要原因; (2)主撞击坑, 即撞击坑深度接近或大于后墙厚度的主要撞击坑, 通常位于撞击中心区域并造成后墙背面明显鼓包; (3)次撞击坑, 撞击坑深度小于后墙厚度的撞击成坑, 能造成后墙背面细小鼓包; (4)微撞击坑, 撞击深度基本不能造成后墙鼓包, 并且大

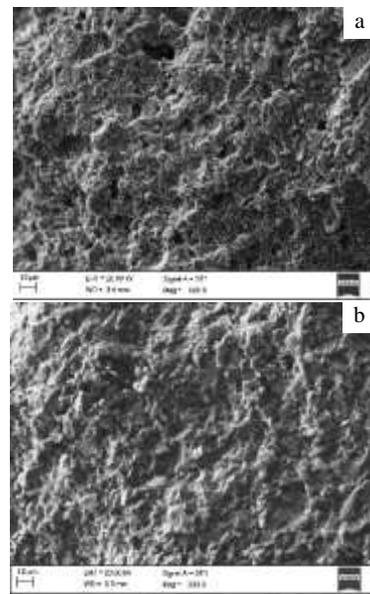


图 6 陶瓷/铝合金缓冲屏的陶瓷面板穿孔的断口 SEM 形貌
Fig.6 SEM images of the perforation microfractography of the front ceramic plate in ceramic/aluminum bumper: (a) fractography of annular fracture region and (b) fractography of vertical fracture region

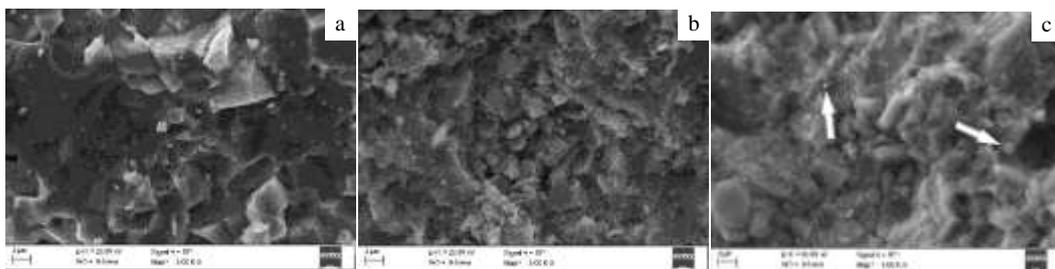


图 7 不同撞击速度下陶瓷缓冲屏穿孔断口形貌

Fig.7 Perforation fracture morphologies of ceramic bumper under different impact velocities: (a) 3.15 km/s, (b) 5.2 km/s, and (c) 7.22 km/s

部分需要在显微镜下才能分辨。本实验中约 3 km/s 撞击速度下的后墙均发生了穿孔失效，并在穿孔周围伴随着数个主撞击坑并造成后墙背面明显的鼓包，采用单层陶瓷缓冲屏以及陶瓷/铝合金粘接缓冲屏时还可观察到主撞击坑之间分布着许多微撞击坑。

图 9 为使用铝合金缓冲屏和陶瓷复合材料缓冲屏时超高速撞击后墙的损伤情况。可以看到，后墙正面损伤根据撞击坑损伤模式的不同分为 3 个明显不同的撞击区：中心密集撞击区(A 区)、环形散布撞击区(B 区)以及外围辐射撞击区(C 区)。对于典型铝合金薄板缓冲屏，当直径为 3 mm 的铝合金弹丸以 7.32 km/s 的速度撞击后，中心密集撞击区(A 区)密集分布着大量相连重叠的直径约为 2 mm 的撞击坑，在环形散布撞击区分布着大量 2~4 mm 的撞击坑，这些撞击坑或分散孤立分布于中心区域，或呈放射状成簇分布于中心区域周围，其中尺寸较大的次撞击坑会导致后墙背面出现大量细小鼓包。铝合金缓冲屏的后墙损伤情况说明弹丸高速撞击铝合金缓冲屏后没有得到有效破碎，碎片云中包含大量尺寸较大的碎片颗粒，形成的次撞击坑导致后墙背面细小鼓包。对于单层 TiB₂ 基陶瓷复合材料缓冲屏，当直径为 3 mm 的铝合金弹丸以 7.22 km/s 的速度撞击后，在后墙前表面产生一个直径约 90 mm 的主要损伤区域，不同的是，除了在中心区域孤立分布着数量不多的尺寸在 1~2 mm 撞击坑以外，在损伤区域边缘和周围均不存在较大尺寸的撞击坑，取而代之的是数量极其巨大的细微撞击坑，这些细微撞击坑并没有造成后墙背面的鼓包。单层 TiB₂ 基陶瓷缓

冲屏的后墙损伤情况表明，弹丸高速撞击缓冲屏后得以有效破碎，碎片云由大量细小的碎片颗粒组成。

错误!

为进一步对采用 TiB₂ 基陶瓷复合材料缓冲屏时后墙撞击坑的成因进行分析，本实验分别在后墙选取了不同的损伤区域(选区如图 9b 所示)利用 SEM 和 EDS 对撞击坑形貌特征展开讨论。图 10 分别给出了中心密集撞击区(A 区)、环形散布撞击区(B 区)以及外围辐射撞击区(C 区)的 SEM 照片。可以看到，中心密集撞击区表面被大量碎片多次撞击后造成的表面凹凸不平，由于大量撞击坑互相嵌套、彼此重合，很难观察到完整的撞击坑。环形散布撞击区则包含了个别孤立分布的完整微撞击坑(直径~200 μm)以及散布的大量微细撞击坑(直径<100 μm)。通过坑底检测发现，少量的完整微撞击坑(直径~200 μm)多是由液滴超高速撞击开坑所致，其整个撞击坑表面比较光滑，均匀覆盖着一层光滑的覆盖层，如图 11a 所示。而大量微细撞击坑(直径<100 μm)则多是由微细固体颗粒撞击后墙造成的，其坑表面粗糙不平，但具有撞击二次加热熔化特征，如图 11b 所示。外围辐射撞击区由大量微细固体颗粒撞击坑组成，其撞击坑深度较浅，整个坑表面粗糙不平，坑底可见固体碎片颗粒，没有明显的撞击熔化迹象。利用 EDS 对外围辐射撞击区内的那些由固体颗粒撞击形成的撞击坑进行元素分布检测，结果表明，Ti 元素集中分布区域与微撞击坑位置是一致的，可以判断，微撞击坑多是由碎片云中的 TiB₂ 基陶瓷固

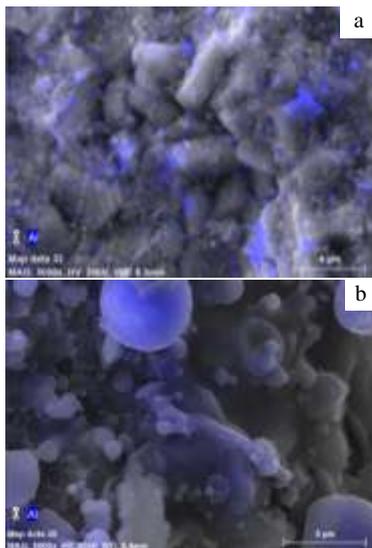


图 8 陶瓷缓冲屏穿孔断口 Al 分布

Fig.8 Al element distribution of the perforation in ceramic bumper (v=7.22 km/s): (a) front surface and (b) rear surface

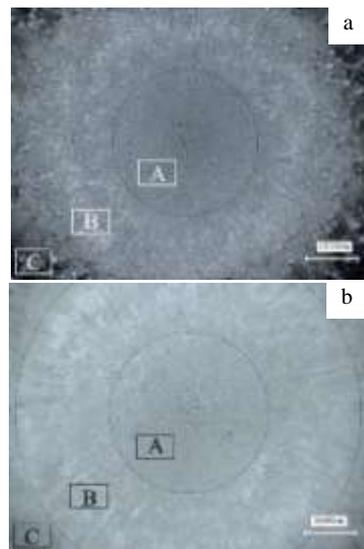


图 9 铝合金缓冲屏的后墙损伤情况 (v=7.32 km/s) 和陶瓷缓冲屏的后墙损伤情况 (v=7.22 km/s)

Fig.9 Damage situation of the rear wall: (a) rear wall behind the aluminum bumper (v=7.32 km/s) and (b) rear wall behind

the ceramic bumper ($v=7.22$ km/s)

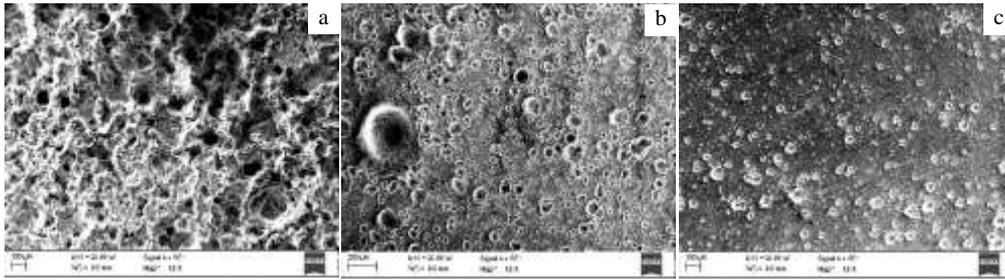


图 10 陶瓷缓冲屏后墙不同撞击区的 SEM 形貌

Fig.10 SEM images of various impact area on the rear wall: (a) centre intensive impact region, (b) annular disperse impact region, and (c) outer radial impact region

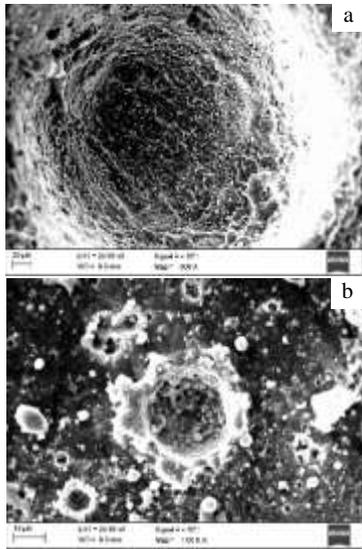


图 11 环形散布撞击区内的撞击坑 SEM 照片

Fig.11 SEM images of craters in the annular disperse impact region: (a) crater caused by liquid drop and (b) craters caused by solid particles

体碎片撞击形成的。上述研究结果证明, TiB₂ 基陶瓷缓冲屏使超高速铝合金弹丸有效破碎甚至发生熔化,同时,撞击位置的缓冲屏材料则被破碎成大量尺寸极其细小的固体颗粒,上述 2 种因素的共同作用导致了不同于铝合金缓冲屏形成的后墙损伤模式及其防护性能的提升。

图 12 对比了 TiB₂ 基陶瓷/铝合金缓冲屏与单层铝合金缓冲屏的后墙损伤模式。可见 TiB₂ 基陶瓷/铝合金缓冲屏没有对弹丸进行有效破碎,在中心密集撞击区和环形散布撞击区还存在数量众多的次撞击坑,特别是撞击中心位置存在个别尺寸较大的撞击坑,其坑表面粗糙不平但具有撞击二次加热熔化

特征,坑底形貌与固体破片的超高速撞击损伤模式

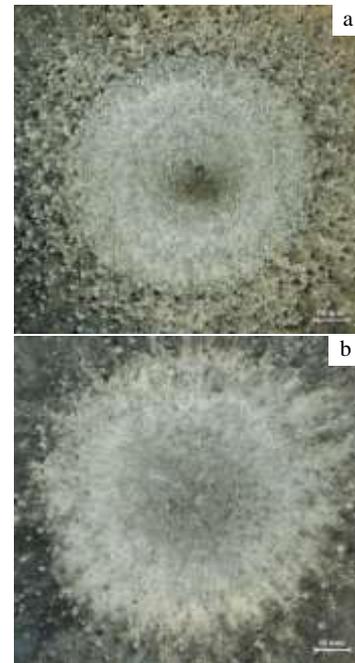


图 12 铝合金缓冲屏的后墙损伤情况和陶瓷/铝合金缓冲屏的后墙损伤情况

Fig.12 Damage situation of the rearwall behind the aluminum bumper (6.9 km/s) (a) and the rearwall behind the ceramic/aluminum alloy bumper (6.84 km/s) (b)

一致,并导致后墙背面出现显著鼓包。超高速撞击后墙损伤实验结果表明, TiB₂ 基陶瓷/铝合金缓冲屏在面对具有更高撞击动能弹丸时的防护能力低于典型单层铝合金缓冲屏。

2.3 碎片云特征

后墙的损伤是由碎片云直接造成的,利用超高

速序列激光阴影成像仪可以准确记录碎片云的发展过程，通过研究弹丸高速撞击缓冲屏的碎片云形成过程和结构特点，可以更加直观地解释后墙的损伤行为。图 13 展示了单层铝合金缓冲屏的碎片云扩张及与后墙撞击的过程。根据文献[20]，碎片云团实际上是一个由碎片形成的薄壳空泡结构，其大部分碎片几乎都集中在薄壳云团的前端椭球形内部结构中，这也是造成后墙损伤的主要因素。在较低的撞击速度下，大块固体破片集中于碎片头部，撞击动能的集中造成后墙的穿孔失效。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，分散的撞击动能减少了对后墙的密集损伤。

图 14 展示了 TiB₂基陶瓷缓冲屏的碎片云扩张及与后墙撞击的过程。与铝合金缓冲屏相比，陶瓷缓冲屏在相近撞击速度下的碎片云形成和撞击过程具有不同的特点，其主要区别在于：(1)碎片云颗粒明显细化，在较高的撞击速度下无肉眼可见的碎片颗粒；(2)碎片云的前端椭球形结构所占整个薄壳云团的体积比明显增加；(3)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。结合不同缓冲屏材料的后墙损伤模式，可以得出碎片云结构特征对后墙损伤的影响。由于 TiB₂基陶瓷声阻抗较高，会提高铝合金弹丸撞击

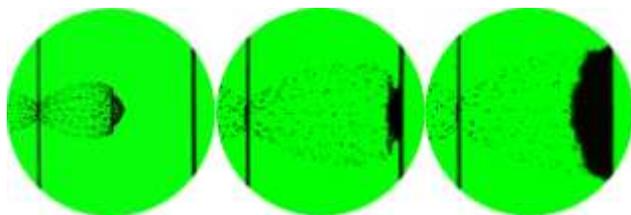


图 13 铝合金缓冲屏在 5.11 km/s 撞击速度下的碎片云扩张过程

Fig.13 Expanding process of debris cloud behind the aluminium bumper under impact velocity of 5.11 km/s (time interval is 10 μs)

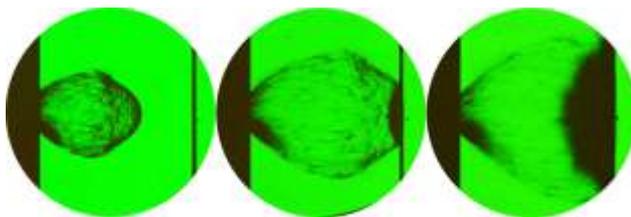


图 14 TiB₂基陶瓷缓冲屏在 5.20 km/s 撞击速度下的碎片云扩张过程

Fig.14 Expanding process of debris cloud behind the TiB₂-based

ceramic bumper under impact velocity of 5.20 km/s (time interval is 10 μs)

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当低，其自身的破碎也必然充分。上述研究表明，在 5 km/s 或更高的撞击速度下，TiB₂基陶瓷缓冲屏不仅能够有效破碎弹丸形成极为细小的碎片颗粒，而且使得碎片云头部碎片质量集中效应明显缓解，大大降低了后墙单位面积上的冲击动能，最终形成如图 9b 所示的微弹坑均匀分布的损伤模式，显著提高了陶瓷缓冲屏防护性能。不过，在 3 km/s 撞击速度下，虽然 TiB₂基陶瓷复合材料缓冲屏仍然比铝合金缓冲屏能够较好地破碎细化弹丸，但是并没有显著改变碎片云头部的碎片质量集中，造成的后墙穿孔失效主要是由于大块碎片主要集中于碎片云头部，导致后墙中心的单位面积上受到的碎片冲击动能集中，造成后墙穿孔失效，其防护能力提升有限。

图 15 对比了等面密度的陶瓷/铝合金缓冲屏与铝合金缓冲屏的碎片云结构特征。可以看到，陶瓷/铝合金缓冲屏的碎片云结构与铝合金缓冲屏相比存在的区别是：(1)部分碎片云颗粒明显细化，但是仍然有大量肉眼可见的碎片颗粒；(2)碎片云的扩散角明显减小，云团的横向扩散受到限制；(3)碎片云头部结构形状发生改变，前端结构的边界模糊，大尺寸破片集中于碎片云头部。对比 TiB₂基陶瓷与铝合金的力学性能可知，陶瓷层具有高弹性模量、高抗压强度、低抗拉强度、高声阻抗的特点，而铝合金层具有高韧性、低弹性模量、低声阻抗的特点。弹丸撞击缓冲屏形成碎片云实际上可以认为是一个多重层裂的过程，由于 TiB₂基陶瓷与铝合金的声阻抗相差很大，当冲击压缩波达到二者界面时，TiB₂基陶瓷层受到反射拉伸波的作用，由于陶瓷层抗拉强度低而产生破碎。同

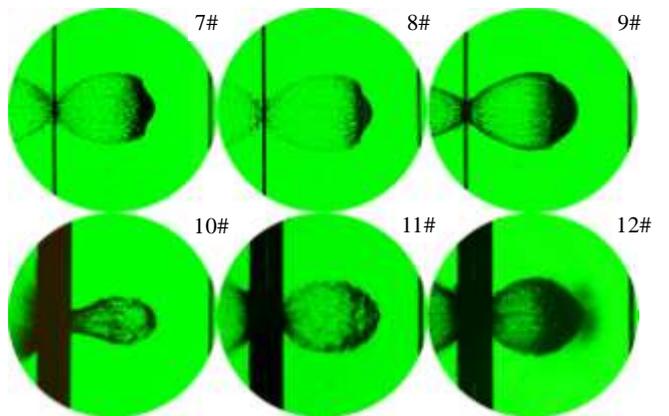


图 15 陶瓷/铝合金缓冲屏与铝合金缓冲屏的碎片云特征比较
Fig.15 Comparison of debris cloud characteristic between the

ceramic/aluminum alloy bumper (7#, 8#, 9#) and the aluminum alloy bumper (10#, 11#, 12#)

时, 铝合金层则受到透射波的作用而破碎并发生大变形撕裂, 形成如图 4 的花瓣状穿孔特征。随着撞击速度和弹丸直径的增加, 铝合金层的变形破坏更加显著。由于陶瓷层的断裂韧性明显低于铝合金, 若不能随着铝合金而产生显著形变, 最终陶瓷层将产生附加的断裂破坏, 由此形成了图 5 所示的 2 种不同的陶瓷断裂特征。陶瓷/铝合金缓冲屏的碎片云形成过程受到上述动态破坏机制的影响, 不利于 TiB₂ 基陶瓷层发挥应有的对超高速弹丸的破碎作用, 造成碎片颗粒没有明显细化, 并且碎片云的横向扩张也受到限制, 最终使得后墙的损伤程度更高, 防护性能反而低于等面密度铝合金板。因此, 在实际防护构型设计当中不能简单地将陶瓷复合材料与金属材料进行贴合, 需要通过合理的界面过渡手段, 消除异质材料界面之间的声阻抗失配, 从而更好地发挥 TiB₂ 基陶瓷层的防护效果。

3 结 论

1) 单层 TiB₂ 基陶瓷复合材料缓冲屏防护性能高于传统铝合金缓冲屏, 且防护效果随着撞击速度的增加明显提高。TiB₂ 基陶瓷/铝合金缓冲屏在较低撞击速度时的防护能力与传统铝合金缓冲屏相当, 但是在较高的撞击速度下防护效果明显低于等面密度的铝合金薄板。

2) 单层陶瓷板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, 且撞击位置的陶瓷本身破碎也更加充分, 而陶瓷/铝合金双层板则随着撞击动能的增加而产生结构性破坏失效, 陶瓷面板也出现断裂破坏。

3) 使用单层陶瓷复合材料缓冲屏的后墙损伤情况明显改善, 具有明显破坏作用的较大撞击坑明显减少, 取而代之的是大量均匀分布的细微撞击坑, 陶瓷/铝合金双层板则随着撞击动能的增加使得后墙损伤加剧。

4) 更加细小的碎片颗粒以及广泛的碎片动能分布是单层陶瓷复合材料缓冲屏获得更佳防护性能的主要原因, 而陶瓷/铝合金缓冲屏的材料声阻抗失配以及力学性质的差异是导致缓冲屏破坏失效以及防护性能下降的主要原因。

参考文献 References

- [1] Liou J C, Johnson N L. *Science*[J], 2006, 311: 340
- [2] Ryan S, Hedman T, Christiansen E L. *Acta Astronaut*[J], 2010, 67: 818
- [3] Bernhard R P, Christiansen E L, Kerr J H. *Int J Impact Eng*[J], 2001, 26: 33
- [4] Han Zengyao(韩增尧), Pang Baojun(庞宝君). *Spacecraft Environment Engineering* (航天器环境工程)[J], 2012, 29(4): 369
- [5] Yin C, Chen Y Q, Zhong S M. *Automatica*[J], 2014, 50(12): 3173
- [6] Whipple F L. *Astron J* [J], 1947, 1161: 132
- [7] Liu Sen(柳 森), Li Yi(李 毅), Huang Jie(黄 洁) *et al. Journal of Astronautics* (宇航学报)[J], 2010, 31(6): 1672
- [8] Liu Sen(柳 森), Huang Jie(黄 洁), Li Yi(李 毅) *et al. Manned Space Flight* (载人航天)[J], 2011, 6: 17
- [9] Huang X, Yin C, Huang J *et al. Mater Des*[J], 2016, 97: 473
- [10] Davidson M, Roberts S, Castro G *et al. Adv Eng Mater*[J], 2013, 15(1-2): 27
- [11] Zheng Xin(郑 欣), Bai Run(白 润), Wang Donghui(王东辉) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(10): 1871
- [12] Feng Yi(凤 仪), Zhu Zhengang(朱震刚), Pan Yi(潘 艺) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(4): 544
- [13] Katz S, Grossman E, Gouzman I *et al. J Spacecraft Rockets*[J], 2012, 49(2): 268
- [14] Francesconi A, Giacomuzzo C, Grande A M *et al. Adv Space Res*[J], 2013, 51(5): 930
- [15] Huang Xuegang(黄雪刚), Huang Jie(黄 洁), Zhao Zhongmin(赵忠民) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(S1): 769
- [16] Huang X, Huang J, Zhao Z *et al. J Adv Ceram*[J], 2015(4): 103
- [17] Huang X, Huang J, Zhao Z *et al. J Mater Eng Perform*[J], 2015(24): 4585
- [18] Guan Gongshun(管公顺), Pang Baojun(庞宝君), Cui Naigang(崔乃刚) *et al. Engineering Mechanics*(工程力学)[J], 2007, 24(12): 181
- [19] Hou Mingqiang(侯明强), Gong Zizheng(龚自正), Xu Kunbo(徐坤博) *et al. Acta Physica Sinica* (物理学报)[J], 2015, 44(S1): 769
- [20] Piekutowski A J, Poormon K L. *Procedia Eng*[J], 2013, 58: 642

Damage Behavior of TiB₂-based Ceramic Composites under Hypervelocity Impact

Huang Xuegang, Huang Jie, Wen Xuezhong, Li Jing, Jiang Lin, Zhang Jun, Xing Yingli, Liu Sen
(China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to improve the protective capability of spacecraft shielding configuration for hypervelocity impact of space debris, the Whipple-based shield configuration within the thin-plate bumpers of TiB₂-based ceramic composites were manufactured (i.e. the monolayer bumper of ceramic plate, the double-layer bumper of ceramic/metal plate). The hypervelocity impact experiments were carried out on a two-stage light-gas gun to compare the above novel bumpers with the typical aluminum alloy bumper under the impact velocity of 2.88~7.32 km/s. The perforation characteristics of front bumper, the damage characteristics of rear wall and the structural characteristics of debris were studied by combining the SEM fracture morphology and EDS elements distribution, especially, the relationship among the material properties and structure features of various bumpers, the formation process of debris clouds, the cratering mechanics of rear wall was discussed. The results show that the monolayer ceramic bumper can effectively smash the projectile to smaller pieces in debris cloud. Since the impact kinetic energy of projectile fragments is distributed into the smaller particles of expanded debris cloud, the protective capability of the monolayer ceramic bumper exceeds the typical aluminum alloy with equal areal density. Moreover, the protective capability of the monolayer ceramic bumper is obviously promoted with the increasing impact velocity. On the other hand, for the double-layer ceramic/metal bumper, due to the difference in acoustic impedance between the ceramic and aluminum, the impact wave could causes serious fracture in the front ceramic plate as well as the curling deformation of rear aluminum plate, and the damage degree of ceramic/metal bumper increases at higher impact velocity. Because of the larger impact fragments and the smaller expanding bubble of the debris cloud, the protective capability of the double-layer ceramic/metal bumper is worse than the traditional aluminum bumper on the contrary.

Key words: TiB₂-based ceramic composites; hypervelocity impact; damage behavior; debris cloud; shield configuration

Corresponding author: Huang Xuegang, Ph. D., Assistant Researcher, Hypervelocity Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, P. R. China, Tel: 0086-816-2465288, E-mail: emei-126@126.com