

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0230

# 波阻抗梯度材料加强型 Whipple 结构 撞击极限研究\*

张品亮<sup>1</sup>, 曹 燕<sup>1</sup>, 陈 川<sup>1</sup>, 宋光明<sup>1</sup>, 武 强<sup>1</sup>, 李 宇<sup>1</sup>, 龚自正<sup>1</sup>, 李 明<sup>2</sup>

(1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094;

2. 中国空间技术研究院, 北京 100094)

**摘要:** 为研究一种改进型的波阻抗梯度材料防护结构 Ti/Al/Mg 结构的撞击极限, 采用二级轻气炮以 3.0~8.0 km/s 的速度对 Ti/Al/Mg 结构、Al/Mg 结构和 2A12 结构开展了超高速撞击实验, 建立了 Ti/Al/Mg 结构的撞击极限曲线。结果表明: 高阻抗的钛合金表层能产生更高的冲击压力和温升, 使弹丸充分破碎; 在面密度相同的条件下, 与 Al/Mg 结构和 2A12 结构相比, Ti/Al/Mg 结构具有更强的防护性能。通过理论计算得到 Ti/Al/Mg 结构撞击极限曲线的区间转变速度小于 7.0 km/s, 但其实验撞击极限曲线上并未出现明显的区间转变, 在实验速度范围内, 撞击极限随着撞击速度的提升而增大, 这与典型 Whipple 结构撞击极限曲线存在差异。

**关键词:** 超高速撞击; Whipple 结构; 阻抗梯度材料; 撞击极限; 空间碎片

中图分类号: O389 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

## Ballistic limit of an impedance-graded-material enhanced Whipple shield

ZHANG Pinliang<sup>1</sup>, CAO Yan<sup>1</sup>, CHEN Chuan<sup>1</sup>, SONG Guangming<sup>1</sup>,

WU Qiang<sup>1</sup>, LI Yu<sup>1</sup>, GONG Zizheng<sup>1</sup>, LI Ming<sup>2</sup>

(1. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China;

2. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Impedance-graded-material enhanced Whipple shields have excellent protective performance. The purpose of this paper is to study the ballistic limit of Ti/Al/Mg shields, which is an improved impedance-graded-material enhanced Whipple shield. Hypervelocity impact experiments on Ti/Al/Mg, Al/Mg and 2A12 shields were performed using a two-stage light-gas gun at impact velocities of 3.0–8.0 km/s. The hypervelocity impact characteristics, the ballistic limit curve and shielding performance of the Ti/Al/Mg shields were studied. The reason of its excellent performance is explained by comparative analysis. As the impact velocity increases, the failure mode of the rear wall showed a detached spall or tearing damage instead of tiny perforations similar to an aluminum shield. The results show that a high-acoustic-impedance titanium alloy layer can generate higher shock pressures and induce a greater temperature increase, which is more effective for fragmenting an impacting projectile. The shock pressure and specific internal energy in the projectile increased by 23.0% and 30.7% compared to the aluminum on aluminum impact event at 8.0 km/s, respectively. The shielding capability of a Ti/Al/Mg shield is significantly greater than that of 2A12 and Al/Mg shields when the bumper has the same areal density. The critical projectile diameter of Ti/Al/Mg shields is 6.58 mm at ~8.0 km/s, which is an improvement of approximately 34.8 % compared to the 4.88 mm of aluminum shields. Finally, to explore the transition velocities of the ballistic limit curve of the Ti/Al/Mg shields,

\* 收稿日期: 2021-06-04; 修回日期: 2021-08-10

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB0702000); 民用航天预研项目 (D020304); 空间碎片科研项目 (KJSP2016030301)

第一作者: 张品亮 (1986—), 男, 博士, 高级工程师, zhangpinliang620@126.com

通信作者: 龚自正 (1964—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, gongzz@263.net

a theoretical analysis was conducted, which suggests that for an aluminum projectile impacting a Ti/Al/Mg bumper, this value might be  $<7.0$  km/s. However, a transition point is not apparent in the experimental ballistic limit curve, and the critical projectile diameter increases with increasing velocity in the range of 3.0–8.0 km/s. It is different from the typical Whipple shield. Further hypervelocity impact tests and additional research needs to be conducted to study in detail the ballistic limit of the Ti/Al/Mg shields.

**Keywords:** hypervelocity impact; Whipple shield; impedance-graded material; ballistic limit; space debris

微流星体和空间碎片与航天器发生碰撞的平均速度高达 7 km/s, 对在轨航天器造成了严重威胁。为了应对这一威胁, 通常通过加装 Whipple 结构的方式对航天器进行防护<sup>[1]</sup>。其基本原理是: 在航天器舱壁外部一定间隔处放置防护屏, 使初始入射物体先与防护屏发生碰撞, 使之碎裂、熔化甚至气化形成碎片云, 最大限度地减小和分散入射物体的动能, 降低其对航天器舱壁的损伤。目前, 基于典型 Whipple 结构, 已经开发了多种类型的防护结构<sup>[2-6]</sup>。国际空间站上的防护结构由 15 万块 20 cm×20 cm 的单元组成, 使用了约 400 种类型的防护结构<sup>[7-8]</sup>。

由波阻抗梯度材料防护屏替代均质铝合金防护屏而形成的增强型 Whipple 结构具有优异的防护性能。Zhang 等<sup>[9-10]</sup>通过大量超高速撞击实验研究了 Al/Mg 防护结构的超高速撞击特性, 验证了其防护性能, 结果表明: Al/Mg 防护屏与典型铝合金防护屏具有相同的表面材料, 弹丸中产生的冲击压力和温升相等。由于波阻抗梯度结构改变了冲击波的传播路径和内能转化效率, 提升了弹丸的破碎程度, 使碎片云的扩散区域更大, 分散了撞击动能, 从而提高了结构的防护性能。

高阻抗迎撞击面可以产生更高的冲击波压力和温升, 有利于进一步提升防护性能<sup>[11-12]</sup>。宋光明等<sup>[13]</sup>基于 Al/Mg 结构进行改进, 在保持面密度相同的条件下, 提出了一种新型波阻抗梯度材料 Whipple 防护结构——Ti/Al/Mg 结构, 该结构由高阻抗的 TC4 钛合金表层、2A12 铝合金夹层和 AZ31B 镁合金底层组成<sup>[13]</sup>。Long 等<sup>[14]</sup>开展了 Ti/Al/Mg 材料的制备和超高速撞击特性的初步研究, 张品亮等<sup>[13]</sup>研究了 Ti/Al/Mg 结构的碎片云特性, 但是, 还没有系统地开展 Ti/Al/Mg 结构的超高速撞击实验, 并建立其撞击极限曲线。因此, 本文将通过开展一系列超高速撞击实验, 研究 Ti/Al/Mg 的超高速撞击特性, 建立撞击极限曲线, 并试图发现一些规律性的认识。

## 1 实验方法

实验使用的 Ti/Al/Mg 波阻梯度防护屏由 0.3 mm 厚的 TC4 钛合金、0.2 mm 厚的 2A12 铝合金和 1.3 mm 厚的 AZ31B 镁合金组成, 采用扩散焊接法制备<sup>[14-15]</sup>。超高速撞击实验在二级轻气炮上开展, 速度范围为 3~8 km/s, 实验原理如图 1 所示。针对 Ti/Al/Mg 结构, 进行了 14 次超高速撞击实验。为了验证该结构的防护性能, 还开展了 11 次 2A12 结构超高速撞击实验和 2 次 Al/Mg 结构超高速撞击实验。2A12 防护屏厚度为 1.5 mm, Al/Mg 防护屏厚度为 0.8 mm/1.1 mm。在所有的实验中, 防护屏的面密度 ( $\rho=0.419$  g/cm<sup>2</sup>)、间距 ( $S=100.0$  mm) 和 5A06 铝合金后墙厚度 ( $t_w=2.5$  mm) 保持恒定, 通过改变弹丸直径来确定特定速度点的撞击极限(临界弹丸直径)。失效准则定义为后墙后表面有材料剥落或清晰的穿孔, 临界状态为后墙出现层裂鼓包并伴随着单一的非穿透裂纹。具体实验参数和结果列于表 1 中。

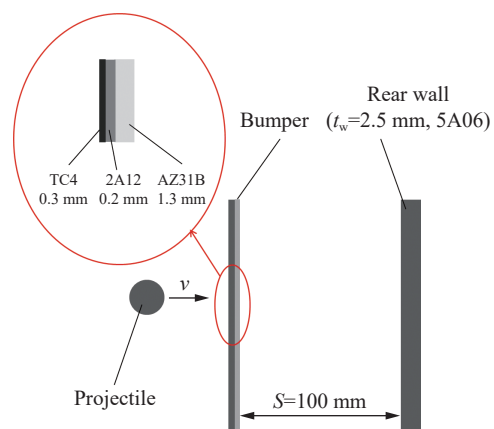


图 1 实验原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental configuration

表 1 超高速撞击实验参数与结果

Table 1 Hypervelocity impact test conditions and results

实验	结构类型	撞击速度/(km·s <sup>-1</sup> )	弹丸直径/mm	失效状态	实验	结构类型	撞击速度/(km·s <sup>-1</sup> )	弹丸直径/mm	失效状态
1-1	Ti/Al/Mg	3.512	3.99	未失效	2-1	2A12	3.596	3.50	未失效
1-2	Ti/Al/Mg	3.440	4.25	未失效	2-2	2A12	3.440	3.75	失效
1-3	Ti/Al/Mg	3.473	4.51	失效	2-3	2A12	3.480	4.02	失效
1-4	Ti/Al/Mg	5.051	4.74	未失效	2-4	2A12	6.518	4.50	未失效
1-5	Ti/Al/Mg	4.951	4.99	未失效	2-5	2A12	6.296	4.74	临界
1-6	Ti/Al/Mg	4.827	5.25	失效	2-6	2A12	6.442	5.01	失效
1-7	Ti/Al/Mg	6.227	5.77	未失效	2-7	2A12	7.170	5.00	失效
1-8	Ti/Al/Mg	6.400	6.00	未失效	2-8	2A12	7.930	4.75	未失效
1-9	Ti/Al/Mg	6.412	6.27	失效	2-9	2A12	7.900	5.00	失效
1-10	Ti/Al/Mg	7.011	6.00	未失效	3-1	2A12	3.540	4.25	失效
1-11	Ti/Al/Mg	7.181	6.25	失效	3-2	Al/Mg	3.476	4.24	临界
1-12	Ti/Al/Mg	7.907	6.25	未失效	3-3	2A12	6.079	5.73	失效
1-13	Ti/Al/Mg	7.920	6.50	失效	3-4	Al/Mg	6.332	5.74	失效
1-14	Ti/Al/Mg	8.037	6.75	失效					

## 2 结果与分析

### 2.1 后墙损伤特征

图 2 为直径约 4.25 mm 的铝弹丸以约 3.5 km/s 速度撞击 2A12 结构、Al/Mg 结构和 Ti/Al/Mg 结构的后墙损伤形貌。撞击速度为 3.5 km/s 时, 弹丸和防护屏材料碎片仍为固态, 撞击坑的尺寸通常与弹丸碎片尺寸正相关。在实验 3-1 中, 后墙产生的撞击坑主要集中在中轴线附近, 在中心损伤区域有 7 个直径大于 3.0 mm 的撞击坑, 直径最大为 4.86 mm, 对后墙的损伤起决定性作用, 后墙后表面出现 3 个材料剥落区域, 并且在中心附近出现了穿孔, 这说明结构处于失效状态, 如图 2(a) 所示。在实验 3-2 和实验 1-2 中, 撞击坑围绕中轴线呈环状排列, 而在中心区域损伤较小。与 2A12 结构相比, 弹丸撞击 Al/Mg 结构后, 弹丸碎片的质量更加分散, 10 个直径大于 3.0 mm 的撞击坑呈环状排列, 直径最大为 4.30 mm。后墙后表面出现呈圆环排列的凸起, 以及一个非穿透性裂纹, 说明该结构处于临界状态, 如图 2(b) 所示。从图 2(c) 中可以看出, 与 2A12 结构和 Al/Mg 结构相比, Ti/Al/Mg 结构的撞击坑尺寸明显减小, 有超过 25 个直径大于 2.0 mm 的撞击坑呈环形排列, 直径最大为 3.51 mm, 后墙后表面环形排列的凸起更加轻微, 并且无裂纹和材料剥落。

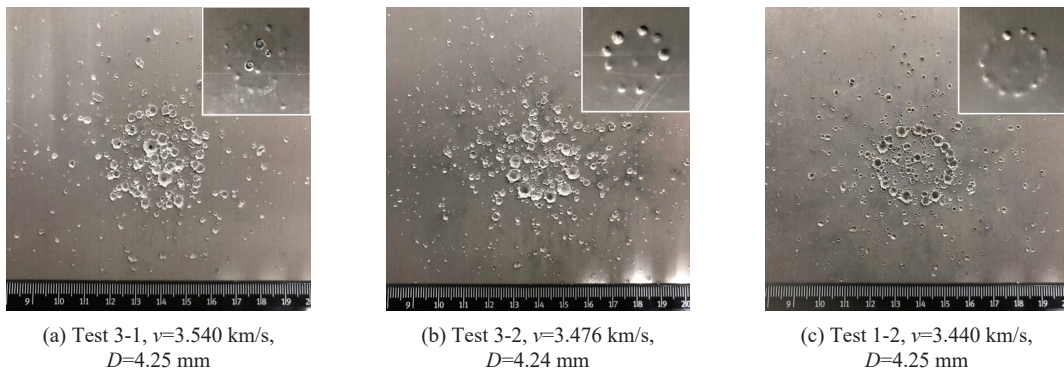


图 2 在约 3.5 km/s 速度撞击下后墙前表面和后表面(插图)损伤形貌

Fig. 2 Photographs of damage patterns on the front and rear (inset) surfaces of the rear wall produced by an aluminum sphere impacting at about 3.5 km/s

图 3 为直径约 5.75 mm 的铝弹丸以约 6.20 km/s 的速度撞击 2A12 结构、Al/Mg 结构和 Ti/Al/Mg 结构后墙的损伤形貌。通常, 典型 Whipple 结构的后墙损伤区由中心损伤区、环形损伤区和扩散损伤区 3 个区域组成。从图 3 中可以看出, Al/Mg 结构和 Ti/Al/Mg 结构的损伤区域由中心损伤区和扩散损伤区组成, 环形损伤区不明显。

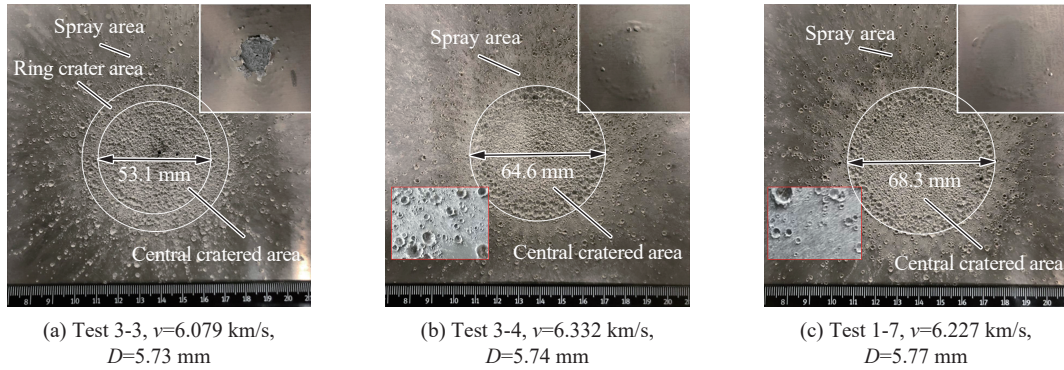


图 3 在约 6.2 km/s 速度撞击下, 后墙前表面和后表面的损伤形貌

Fig. 3 Photographs of damage patterns on the front and rear (inset) surfaces of the rear wall produced by an aluminum sphere impacting at about 6.2 km/s

后墙损伤模式与碎片云中的物质状态密切相关。在 2A12 结构中, 中心损伤区和扩散损伤区之间存在清晰的边界, 这说明撞击坑主要由固态材料碎片撞击形成, 这与前期结果一致<sup>[9]</sup>。在 Al/Mg 结构和 Ti/Al/Mg 结构中, 撞击坑在中心损伤区边缘有规律地排列, 中心损伤区边缘外侧形成了明显的由液滴或气体溅射而形成的“熔融或汽化痕迹”(图 3 中红色边框插图, 特别是在图 3(c)中)。经过测量, 2A12 结构、Al/Mg 结构和 Ti/Al/Mg 结构后墙的主要损伤区域直径分别为 53.1、64.6 和 68.3 mm。这说明弹丸撞击 Ti/Al/Mg 结构后, 碎片云的扩散角更大, 动能被分散到更大的面积上, 从而能够降低对后墙的损伤。此外, Ti/Al/Mg 结构在中轴线附近的损伤程度小于 2A12 和 Al/Mg 结构, 这说明 Ti/Al/Mg 结构碎片云中心大碎片的尺寸更小。

图 3 中的白色边框插图为对应结构后墙后表面的损伤形貌。对于 2A12 结构, 后墙中心区域出现了大面积材料剥落和穿孔, 这表明结构处于明显的失效状态。Al/Mg 结构的防护性能优于 2A12 结构, Al/Mg 结构中出現圆环状的塑性应变区和 3 个剥落区域(由大块固态材料碎片撞击引起)。而 Ti/Al/Mg 结构后墙没有出现材料剥落, 并且塑性应变程度更小, 这说明 Ti/Al/Mg 结构的防护性能明显优于其他结构, 高阻抗迎撞击面对弹丸的破碎效应更加明显。

## 2.2 理论分析

弹丸和靶材的断裂破碎可解释为多次层裂现象, 文献 [9] 中详细描述了弹丸撞击波阻抗梯度防护屏时波的相互作用和多次层裂过程。冲击波能量和传播过程是影响弹丸破碎程度的主要因素<sup>[16-17]</sup>。除了冲击压力, 由于热效应影响着材料的强度和相态, 也是影响碎片云中颗粒的尺寸的重要因素, 因此, 本文中对冲击压力和冲击波卸载后的剩余比内能进行了计算。

弹靶接触界面的最大冲击压力  $p_H$  由 Hugoniot 冲击条件<sup>[18]</sup> 决定:

$$p_H = \rho_0(c_0 u_p + \lambda u_p^2) \quad (1)$$

式中:  $u_p$  为粒子速度,  $\rho_0$  和  $c_0$  分别为材料的零压密度和声速,  $\lambda$  为雨贡纽系数。

比内能可根据 Rankine-Hugoniot 关系和 Mie-Grüneisen 状态方程计算<sup>[19-20]</sup>。冲击加载过程所做的功数值上等于  $p$ - $V$  图上瑞利线以下覆盖的面积, 冲击加载过程所产生的内能  $E_H$  为:

$$E_H = \frac{1}{2}(p_H - p_0)(V_0 - V_H) \quad (2)$$

式中:  $p_0$  为初始压力,  $V_0$  和  $V_H$  分别为初始压缩比容和最终压缩比容。

在等熵卸载至零压过程中, 冲击压缩的内能被释放出来。释放的内能  $E_S$  由等熵线  $p(S)$  以下的面积决定:

$$E_S = - \int_{V_H}^{V_R} p(S) dV \quad (3)$$

式中:  $V_R$  为卸载后的比容。材料的剩余比内能  $\Delta E$  为加载过程中产生的比内能与卸载过程中释放的比内能之差:

$$\Delta E = E_H - E_S \quad (4)$$

冲击压力计算结果如图 4(a) 所示, 计算所采用的材料参数列于表 2<sup>[21-24]</sup> 中。可以看出, 在 8.0 km/s 的速度下, 铝弹丸撞击 Ti/Al/Mg 防护屏产生的冲击压力为 137.7 GPa, 高于撞击 2A12 防护屏产生的冲击压力 117.3 GPa。弹丸比内能的计算结果如图 4(b) 所示, 可以看出, 在 8.0 km/s 时, 铝弹丸撞击 Ti/Al/Mg 防护屏产生的比内能为 1.780 MJ/kg, 高于撞击 2A12 防护屏产生的比内能 1.447 MJ/kg, 即采用 Ti/Al/Mg 防护屏后, 弹丸温升可提高 23.0%。因此, 在相同的撞击速度下, 使用 Ti/Al/Mg 防护屏时, 由于迎撞击面材料的波阻抗较高, 弹丸内的冲击压力和比内能均明显高于 2A12 和 Al/Mg 防护屏。因此, Ti/Al/Mg 防护屏产生的碎片云颗粒细化程度比 2A12 和 Al/Mg 防护屏更高, 这正好解释了其后墙撞击坑尺寸更加细化的现象。

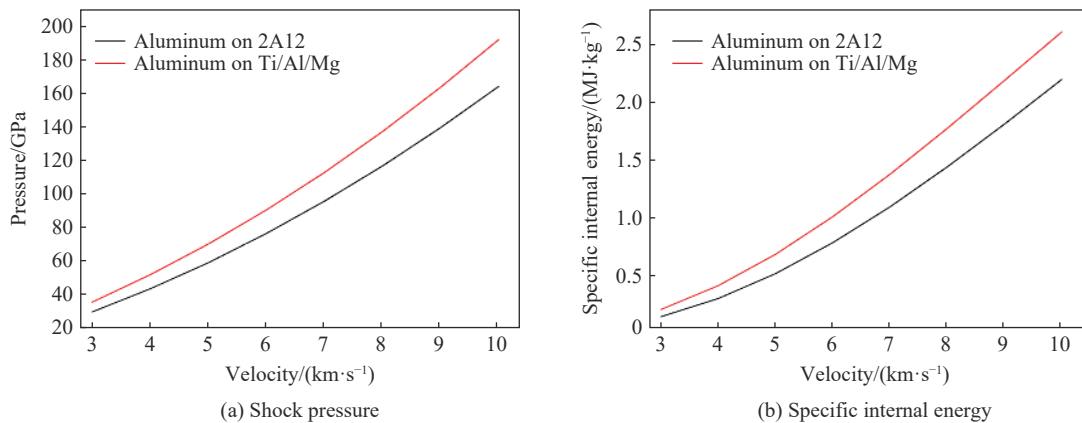


图 4 冲击压力和比内能与撞击速度的关系

Fig. 4 Calculated shock pressure and specific internal energy as a function of the impact velocity

表 2 材料主要参数<sup>[21-24]</sup>

Table 2 Key parameters of materials for shock coupling<sup>[21-24]</sup>

材质	$\rho_0$ (g·cm <sup>-3</sup> )	$c_0$ (km·s <sup>-1</sup> )	$\lambda$	$\gamma_0$
铝合金	2.784	5.370	1.290	2.000
钛合金	4.419	5.130	1.028	1.230
镁合金	1.775	4.516	1.256	1.540

### 2.3 撞击极限曲线

撞击极限是指防护结构受撞击后发生失效与否的临界状态, 是评价防护性能的重要形式, 通常用临界弹丸直径表示。在某一速度下, 如果弹丸直径大于临界直径, 撞击后结构将失效, 如果弹丸直径小于临界直径, 结构将能成功抵御其撞击。本文中分别以 3.5、5.0、6.5、7.0 和 8.0 km/s 的速度开展超高速撞击实验, 通过改变每次实验的弹丸直径, 来获得临界弹丸直径。

图 5 为撞击速度为 3.5 km/s 时后墙后表面的损伤形貌。实验 1-1 和实验 1-2 中弹丸直径分别为

3.99 和 4.25 mm, 在后墙上产生了呈环形排列的凸起, 没有材料剥落和穿孔, 如图 5(a)~(b)所示。当弹丸直径提升至 4.51 mm 时, 实验 1-3 中后墙上形成了两个穿孔, 说明结构失效, 如图 5(c)所示。因此, 在撞击速度为 3.5 km/s 时, 临界弹丸直径位于 4.25~4.51 mm 之间。

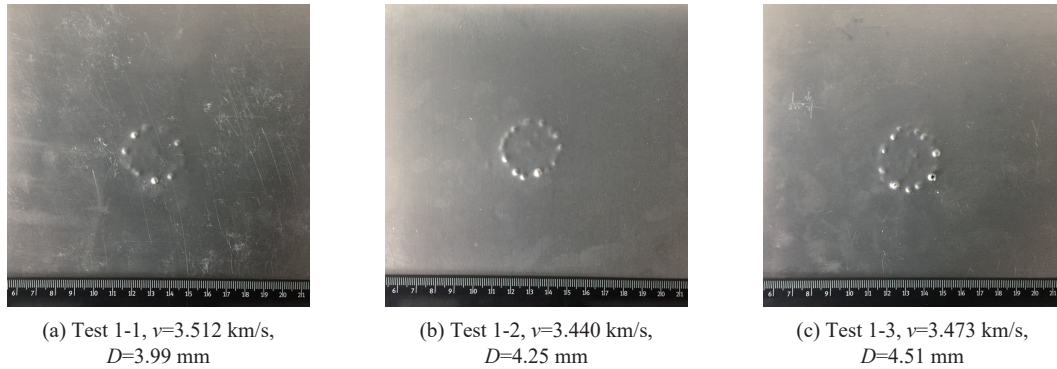


图 5 撞击速度约 3.5 km/s 时 Ti/Al/Mg 结构后墙后表面损伤形貌

Fig. 5 Photographs of damage to the rear surface of Ti/Al/Mg shield's rear walls when the impact velocity is about 3.5 km/s

图 6 为撞击速度为 5.0 km/s 时后墙后表面的损伤形貌。实验 1-4 和实验 1-5 中弹丸直径分别为 4.75 和 5.00 mm, 撞击后后墙无材料剥落、穿孔、裂纹产生, 如图 6(a)~(b)所示。当弹丸直径增加到 5.25 mm 时, 后墙出现微小穿孔, 如图 6(c)所示, 表明实验 1-6 结构失效。在撞击速度为 5.0 km/s 时, 临界弹丸直径位于 5.00~5.25 mm 之间。

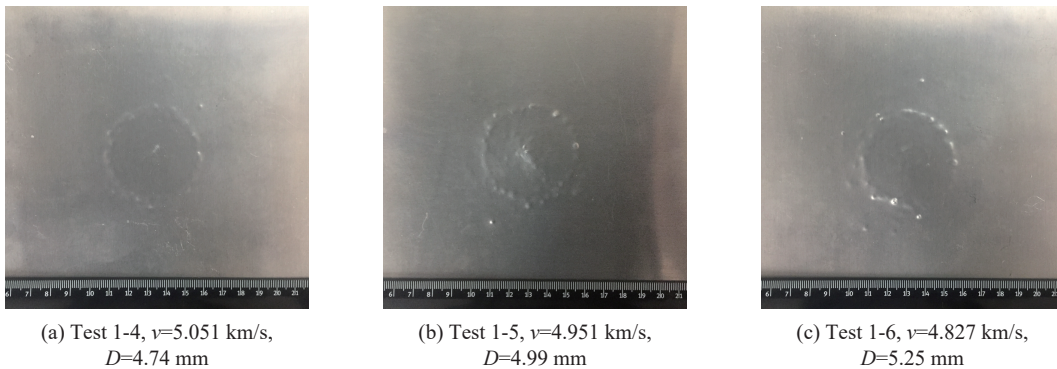


图 6 撞击速度约 5.0 km/s 时 Ti/Al/Mg 结构后墙后表面损伤形貌

Fig. 6 Photographs of damage to the rear surface of Ti/Al/Mg shield's rear walls when the impact velocity is about 5.0 km/s

在 6.5 km/s 速度撞击下, 弹丸直径为 6.27 mm 时, 实验 1-9 中后墙出现材料剥落, 但未出现穿孔和裂纹, 定义为失效状态, 如图 7(c)所示。而在实验 1-7 和实验 1-8 中, Ti/Al/Mg 结构能够抵御直径为 5.77 和 6.00 mm 弹丸的撞击。因此, 临界弹丸直径位于 6.00~6.27 mm 之间。

在 7.0 km/s 速度撞击下, 弹丸直径为 6.00 mm 时, 后墙出现环形塑性变形区域, 但未失效, 如图 8(a)所示。当弹丸直径为 6.25 mm 时, 环形区域塑性变形程度更大, 后墙中心出现严重的穿透性裂纹, 但没有材料损失, 如图 8(b)所示。因此, 临界弹丸直径位于 6.00~6.25 mm 之间。

图 9 为 8.0 km/s 速度撞击下 Ti/Al/Mg 结构的后墙损伤形貌。实验 1-12 结果表明, 结构能够抵御 6.25 mm 弹丸的正撞击, 如图 9(a)所示。当弹丸直径大于等于 6.5 mm 时, 后墙明显失效, 实验 1-13 和实验 1-14 后墙中心区域出现严重撕裂损伤, 如图 9(b)~(c)所示。临界弹丸直径位于 6.25~6.50 mm 之间。

从实验结果可以看出, 随着撞击速度的增加, 中心区域损伤变得更加严重。高速段的失效模式与低速段明显不同。在低速段, 损伤模式通常为一个微小的穿孔。而在高速段, 则是中心区域的大面积脱落

或撕裂损伤。这是由碎片云形态决定的, 在较低的撞击速度下, 固态颗粒的撞击是点撞击, 容易形成微小的穿孔。随着撞击速度的增加, 碎片云开始液化、汽化, 撞击后墙面积增大, 造成脱落、剥落或撕裂损伤。

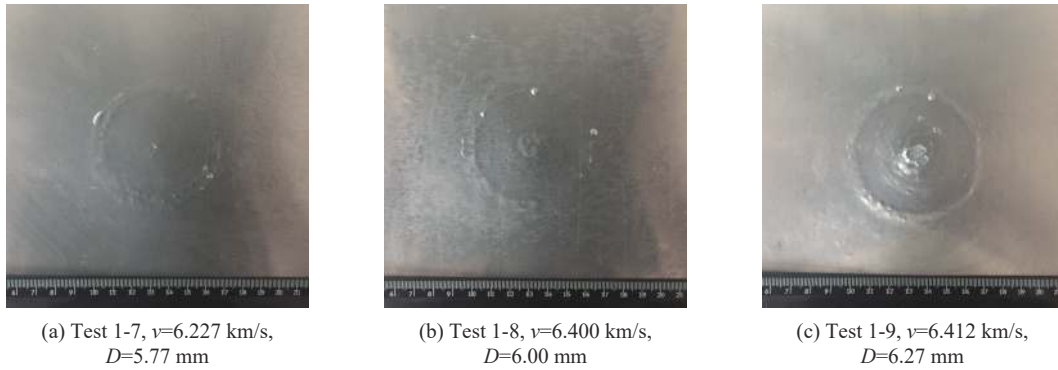


图 7 撞击速度约 6.5 km/s 时 Ti/Al/Mg 结构后墙后表面损伤形貌

Fig. 7 Photographs of damage to the rear surface of Ti/Al/Mg shield's rear walls when the impact velocity is about 6.5 km/s

图 10 中显示了 Ti/Al/Mg 结构的实验结果, 同时, 采用最小二乘法进行拟合得到了 Ti/Al/Mg 结构的撞击极限曲线。作为比较, 2A12 结构的实验结果和撞击极限曲线也显示在图中。2A12 结构在 3~7 km/s 的撞击极限曲线采用最小二乘法根据实验结果拟合得到。由于铝合金结构的区间转变速度为 7 km/s<sup>[25-26]</sup>, 本文中根据 7 km/s 临界弹丸直径计算结果和 8 km/s 临界弹丸直径实验结合拟合得到大于 7 km/s 的撞击极限曲线。对比后可以看出, 在实验速度范围内, Ti/Al/Mg 结构的临界弹丸直径明显大于 2A12 结构: 撞击速度为 3.5 km/s 时, Ti/Al/Mg 结构的临界弹丸直径为 4.49 mm, 与 2A12 结构的 3.66 mm 相比提升了 22.7%; 撞击速度为 6.5 km/s 时, Ti/Al/Mg 结构的临界弹丸直径为 5.88 mm, 比 2A12 结构的 4.82 mm 提高了 22.2%; 撞击速度为 8.0 km/s 时, Ti/Al/Mg 结果的临界弹丸直径为 6.58 mm, 比 2A12 结构的 4.88 mm 提高了 34.8%。因此, 随着撞击速度的提升, Ti/Al/Mg 结构的防护效能更加明显。

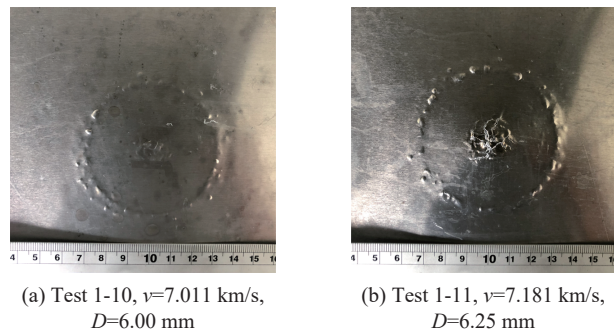


图 8 撞击速度约 7.0 km/s 时 Ti/Al/Mg 结构后墙后表面损伤形貌

Fig. 8 Photographs of damage to the rear surface of Ti/Al/Mg shield's rear walls when the impact velocity is about 7.0 km/s

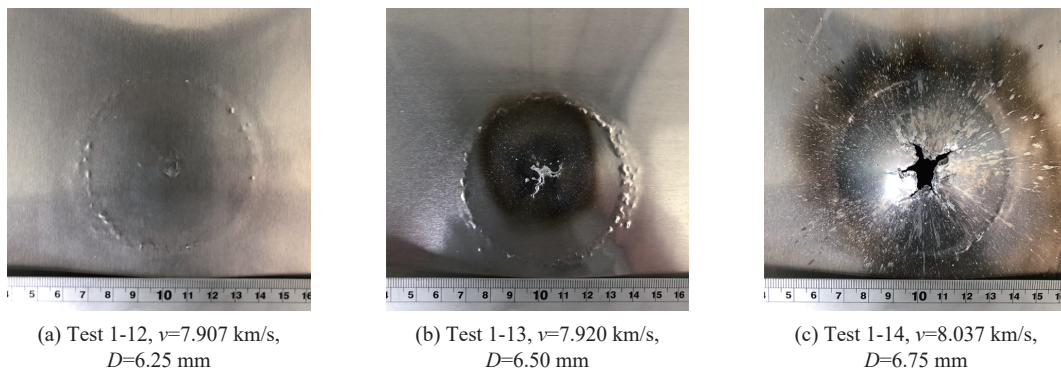


图 9 撞击速度约 8.0 km/s 时 Ti/Al/Mg 结构后墙后表面损伤形貌

Fig. 9 Photographs of damage to the rear surface of Ti/Al/Mg shield's rear walls when the impact velocity is about 8.0 km/s

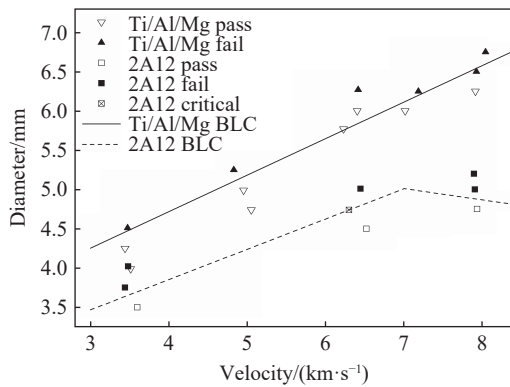


图 10 Ti/Al/Mg 结构和 2A12 结构的撞击极限

Fig. 10 Ballistic limit curves and test data for Ti/Al/Mg shields compared to 2A12 shields

## 2.4 区间转变速度

依据弹丸撞击防护屏后的响应模式, Whipple 结构的典型撞击极限曲线可分为 3 个区间: 弹道区 (I 区)、破碎区 (II 区)、熔化/气化区 (III 区)<sup>[7,25]</sup>, 主要取决于弹丸的法向分速度, 即产生的冲击压力和碎片云相态。在 I 区, 撞击冲击压力较低, 弹丸与防护屏碰撞后发生塑性变形, 但基本上保持完整, 随着弹丸速度的提升, 临界弹丸直径减小。在 II 区, 碎片云由固态颗粒和熔融液滴组成, 熔融的比例随着速度的提高而增加, 由于熔融需要消耗大量动能, 随着弹丸速度的提升, 临界弹丸直径增大。在 III 区, 弹丸破碎已经达到极限, 弹丸完全熔融, 撞击速度的提高将造成更加

严重的后墙损伤, 即随着弹丸速度的提高, 临界弹丸直径减小。

冲击压力决定了碎片云中固态、熔融和气化物质的比例。铝弹丸撞击铝合金防护屏时, 弹丸在 5.5 km/s 开始熔融, 在 7.0 km/s 完全熔融<sup>[26]</sup>。II 区到 III 区的转变速度是弹丸完全熔融开始气化时的碰撞速度, 因此, 典型铝合金防护结构的区间转变速度为 7.0 km/s。然而, 当铝弹丸撞击非铝质防护屏时, 区间转变速度可能不为 7.0 km/s。

从图 4(a) 可以看出, 铝弹丸以 7.0 km/s 的速度撞击 2A12 防护屏产生的冲击压力为 96.3 GPa, 等于铝弹丸以 6.2 km/s 的速度撞击 Ti/Al/Mg 防护屏时所产生的冲击压力。也就是说, 铝弹丸撞击 Ti/Al/Mg 防护屏发生完全熔融, 从 II 区到 III 区转变速度应小于 7.0 km/s。然而, 从图 10 的实验结果中可以看出, Ti/Al/Mg 结构的 II 区到 III 区的转变点并未出现, 在 3~8 km/s 的速度时, 临界弹丸直径随撞击速度的提高而增加, 这与典型 Whipple 结构在 II 区到 III 区转变点 (7 km/s) 之后临界弹丸直径随着撞击速度的提高而减小不同。

## 3 结 论

针对 Ti/Al/Mg 防护结构的撞击极限开展了实验研究。在二级轻气炮超高速发射装置上, 开展了 Ti/Al/Mg 结构、2A12 结构和 Al/Mg 结构以 3~8 km/s 速度的超高速撞击实验 27 发。与 2A12 结构和 Al/Mg 结构相比, Ti/Al/Mg 结构具有更加优异的防护性能。在撞击速度为 8.0 km/s 时, 冲击压力和弹丸中的比内能分别增加了 23.0% 和 30.7%, 这对碎片云颗粒的进一步细化具有重要作用。建立了 Ti/Al/Mg 结构在 3~8 km/s 范围内的撞击极限曲线, 并与相同面密度的 2A12 结构进行了对比。结果表明: 与 2A12 结构相比, Ti/Al/Mg 结构的防护性能大幅提升, 在约 8.0 km/s 速度下, Ti/Al/Mg 结构的弹丸临界直径为 6.58 mm, 与 2A12 结构的 4.88 mm 相比提高了 34.8%。计算结果表明: Ti/Al/Mg 结构从 II 区到 III 区的转变速度小于 7.0 km/s。然而, 从实验结果上看, Ti/Al/Mg 结构区间转变速度点并未出现, 这与典型 Whipple 结构撞击极限曲线存在差异。后续还需要开展更多的超高速撞击实验, 进一步研究 Ti/Al/Mg 结构的撞击极限以及未出现区间转变的原因。

## 参考文献:

- [1] WHIPPLE F L. Meteorites and space travel [J]. *Astronomical Journal*, 1947, 52(5): 131. DOI: 10.1086/106009.
- [2] SCHMIDT R M, HOUSEN K R, BJORKMAN M D, et al. Advanced all-metal orbital debris shield performance at 7 to 17 km/s [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1995, 17(4): 719–730. DOI: 10.1016/0734-743X(95)99894-W.
- [3] 郭运佳, 文雪忠, 黄洁, 等. 不同填充层材料的空间碎片防护结构性能试验研究 [J]. *航天器环境工程*, 2020, 37(6): 589–595. DOI: 10.12126/sec.2020.06.009.

GUO Y J, WEN X Z, HUANG J, et al. Experimental study of shielding performance of protecting structures stuffed with

- different materials [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2020, 37(6): 589–595. DOI: 10.12126/see.2020.06.009.
- [4] 黄鑫, 凌中, 刘宗德, 等. 梯度复合 Whipple 防护结构的超高速撞击实验 [J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(S1): 92–98.  
HUANG X, LING Z, LIU Z D, et al. Hypervelocity impact experiments on new gradient Whipple shield structure [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(S1): 92–98.
- [5] HOFMANN D C, HAMILL L, CHRISTIANSEN E, et al. Hypervelocity impact testing of a metallic glass-stuffed Whipple shield [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2015, 17(9): 1313–1322. DOI: 10.1002/adem.201400518.
- [6] PUTZAR R, ZHENG S G, AN J, et al. A stuffed Whipple shield for the Chinese space station [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 132: 103304. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.05.018.
- [7] CHRISTIANSEN E L. Meteoroid/debris shielding [R]. Houston, USA: NASA, 2003.
- [8] CHRISTIANSEN E L, NAGY K, LEAR D M, et al. Space station MMOD shielding [J]. *Acta Astronautica*, 2009, 65(7/8): 921–929. DOI: 10.1016/j.actaastro.2008.01.046.
- [9] ZHANG P L, GONG Z Z, TIAN D B, et al. Comparison of shielding performance of Al/Mg impedance-graded-material-enhanced and aluminum Whipple shields [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 126: 101–108. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.12.007.
- [10] 张品亮, 宋光明, 龚自正, 等. Al/Mg 波阻抗梯度材料加强型 Whipple 结构超高速撞击特性研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(12): 125101. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0461.  
ZHANG P L, SONG G M, GONG Z Z, et al. Shielding performances of a Whipple shield enhanced by Al/Mg impedance-graded materials [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(12): 125101. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0461.
- [11] HUANG X, LING Z, LIU Z D, et al. Amorphous alloy reinforced Whipple shield structure [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 42: 1–10. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.11.001.
- [12] ZHANG P L, XU K B, LI M, et al. Study of the shielding performance of a Whipple shield enhanced by Ti-Al-nylon impedance-graded materials [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 124: 23–30. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.08.005.
- [13] 宋光明, 李明, 武强, 等. 超高速撞击下波阻抗梯度防护结构碎片云特性研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(2): 021405. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0299.  
SONG G M, LI M, WU Q, et al. Debris cloud characteristics of graded-impedance shields under hypervelocity impact [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(2): 021405. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0299.
- [14] LONG L P, PENG Y B, ZHOU W, et al. Study on hypervelocity impact characteristics of Ti/Al/Mg density-graded materials [J]. *Metals*, 2020, 10(5): 697. DOI: 10.3390/met10050697.
- [15] LONG L P, LIU W S, MA Y Z, et al. Microstructure and diffusion behaviors of the diffusion bonded Mg/Al joint [J]. *High Temperature Materials and Processes*, 2017, 36(9): 897–903. DOI: 10.1515/htmp-2016-0023.
- [16] PIEKUTOWSKI A J, POORMON K L. Impact of thin aluminum sheets with aluminum spheres up to 9 km/s [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(12): 1716–1722. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.07.023.
- [17] GRADY D E, KIPP M E. Experimental measurement of dynamic failure and fragmentation properties of metals [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1995, 32(17): 2779–2791. DOI: 10.1016/0020-7683(94)00297-A.
- [18] MEYERS M A. 材料的动力学行为 [M]. 张庆明, 刘彦, 黄风雷, 等, 译. 北京: 国防工业出版社, 2006: 83.
- [19] 谭华. 实验冲击波物理导引 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [20] 经福谦. 实验物态方程导引 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 1999.
- [21] MARSH S P. LASL shock hugoniot data [M]. California, USA: University of California, 1980.
- [22] ANDERSON C E Jr, TRUCANO T G, MULLIN S A. Debris cloud dynamics [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1990, 9(1): 89–113. DOI: 10.1016/0734-743X(90)90024-P.
- [23] MCQUEEN R G, MARSH S P. Equation of state for nineteen metallic elements from shock-wave measurements to two megabars [J]. *Journal of Applied Physics*, 1960, 31(7): 1253–1269. DOI: 10.1063/1.1735815.
- [24] 徐锡申, 张万箱. 实用物态方程理论导引 [M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [25] CHRISTIANSEN E L, KERR J H. Ballistic limit equations for spacecraft shielding [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 26(1–10): 93–104. DOI: 10.1016/S0734-743X(01)00070-7.
- [26] SCHONBERG W P. Using modified ballistic limit equations in spacecraft risk assessments [J]. *Acta Astronautica*, 2016, 126: 199–204. DOI: 10.1016/j.actaastro.2016.03.038.

(责任编辑 曾月蓉)