

密度梯度薄板超高速撞击特性的实验研究*

侯明强¹⁾ 龚自正^{1)†} 徐坤博¹⁾ 郑建东²⁾ 曹燕¹⁾ 牛锦超¹⁾

1) (中国空间技术研究院北京卫星环境工程研究所, 可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100094)

2) (中国空间技术研究院通信卫星事业部, 北京 100094)

(2013年7月15日收到; 2013年10月11日收到修改稿)

以二级轻气炮作为加载手段, 在撞击速度范围为 4.0—7.0 km/s 内获得了 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板的穿孔特性、验证板损伤特性和弹道极限特性. 与 Ly12 Al 薄板的相应实验结果的对比显示, 在相同撞击速度下, 该密度梯度薄板的穿孔直径更大, 且随撞击速度的增大而增加; 其验证板上的撞击坑尺寸小, 且随撞击速度的增大而减小; 其弹道极限比 Ly12 Al 薄板的弹道极限高 50% 以上. 分析认为, 超高速撞击下 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板中高阻抗的 Ti6Al4V 产生的峰值冲击压力比 Ly12 Al 薄板的峰值冲击压力高, 这增强了对弹丸的破碎能力; 而其中的聚酰胺纤维层延长了冲击波在薄板中的传播时间, 增大了冲击波的耗散, 使撞击过程中转化的不可逆功增多, 从而消耗了弹丸更多的动能. 使用这种密度梯度材料作为防护屏具有很好的抗撞击能力, 在航天器空间碎片防护工程应用中具有很大的潜力.

关键词: 超高速撞击, 密度梯度材料, 弹道极限, 空间碎片

PACS: 47.40.Nm, 46.50.+a, 47.40.-x, 64.30.Jk

DOI: 10.7498/aps.63.024701

1 引言

超高速碰撞(撞击)是指碰撞物体间的相对速度超过了被撞材料的声速(声速的典型值约为 4—5 km/s), 或撞击时被撞材料中产生的压力远远大于被撞材料的屈服强度(至少 10 倍以上)^[1,2]. 超高速碰撞的速度范围一般从每秒几公里到每秒数十公里, 它引起的动力学过程十分复杂, 涉及材料、结构、相变等诸多因素及其耦合作用, 目前还难以对其进行完整的解析描述.

超高速碰撞现象研究的兴起与发展是和军事工程、航天工程以及地球和行星物理等领域的需求与研究紧密相关. 半个多世纪以来, 超高速碰撞现象的研究在高压下材料状态方程和动态响应特性研究、类行星表面的陨石撞击效应和陨石坑研究、小行星撞击地球研究、生命起源研究、惯性约束聚变技术、高速撞击下发生热核反应的概念研究、

核反应堆外壳安全防护设计、空间碎片撞击下航天器的效应评估与防护技术、反弹道导弹技术和轻质装甲设计技术等领域中都发挥了重要作用.

超高速弹丸与薄靶碰撞后, 弹丸和靶中分别传播一个冲击波, 当靶中的冲击波到达靶板后表面时, 将会反射一个稀疏波, 靶板后表面的材料将被向前高速抛出. 同时, 弹丸中的反向冲击波与其侧面及背部自由面作用后使弹丸破碎, 其中的一小部分“粒子”反向抛出, 大部分“粒子”随靶材“粒子”一起向前抛出. 结果是弹丸穿透靶板形成穿孔, 弹丸破碎, 甚至熔化/汽化. 破碎的弹丸材料和靶板穿孔处材料向前高速运动, 宏观上形如云团, 被称作碎片云, 如图 1 所示. 由于碎片云在向前运动中还伴随着膨胀运动, 在通过一段距离之后, 碎片云对置于其后的物体的碰撞面积要大于弹丸直接撞击薄板的面积, 加之弹丸和靶板材料的破碎、熔化/汽化过程也消耗了弹丸的部分能量, 因而大大降低了对置于其后的物体的破坏.

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2010CB731600)和国家国防科工局空间碎片专项研究计划(批准号: KJSP06209, K0202210)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: gongzz@263.net

1947年, Whipple^[3]利用弹丸超高速撞击薄板产生碎片云这一现象,提出了一种双层板防护结构,即在航天器舱壁(后墙)外间隔一定距离放置一薄板(缓冲屏),起到粉碎空间碎片形成碎片云的作用,从而降低了空间碎片对航天器舱壁的冲击破坏,达到保护航天器舱壁的目的.这种双层板防护结构被称为Whipple防护结构.迄今,Whipple防护结构已经被广泛应用于航天器空间碎片防护设计中,特别是在国际空间站上获得了大量应用,后来所开发的所有防护结构都是在Whipple防护结构的基础上演变而来.

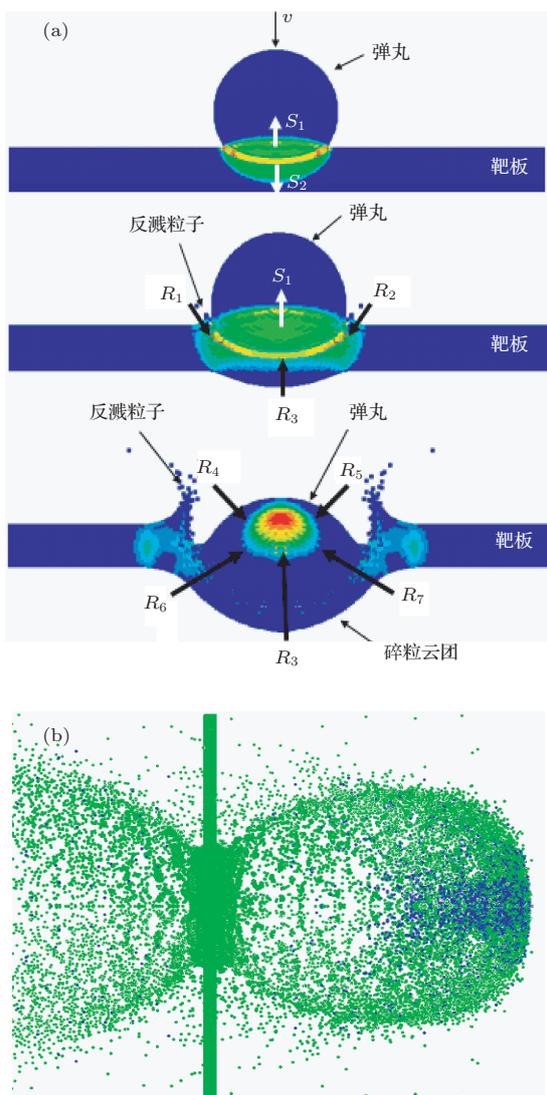


图1 弹丸超高速撞击薄靶的过程及碎片云 (a) 撞击过程示意图; (b) 碎片云示意图

由于薄板超高速撞击特性研究具有重要的学术意义和工程应用价值,人们采用实验、理论和数值仿真手段对其进行了大量研究,先后提出了基于Whipple防护结构的各种增强型防护结构如多层

冲击防护结构^[4,5]、铝网双层防护结构^[6,7]、蜂窝夹层板防护结构^[8]、填充Whipple防护结构^[9]和泡沫铝防护结构^[10-12].与此同时,为了克服增强型防护结构构型复杂的缺陷,国内外学者进行了很多新的尝试.例如哈跃等^[13]对玄武岩纤维布穿孔的研究,宋卫东等^[14]对钛基复合材料的研究,李金柱等^[15]对三维编织C/SiC复合材料的研究,Rudolph等^[16]对柔性材料粉碎弹丸能力的研究,Baluch等^[17]对碳纤维/树脂复合材料的研究,Francesconi等^[18]对一种具有损伤自修复能力的聚合物材料的研究,Zheng等^[19]对 $Zr_{51}Ti_5Ni_{10}Cu_{25}Al_9$ 金属玻璃的研究等.然而,这些研究在抗撞击性能上均没有获得显著高于铝合金的防护材料.

密度梯度材料(严格而言应称为波阻抗梯度材料,波阻抗为密度与声速的乘积)是一种在厚度方向上具有密度变化的复合材料.密度梯度材料已成功应用于获取准等熵压缩和超高速发射领域^[20,21].在密度梯度材料的抗超高速撞击响应研究方面,Riney^[22]最早研究了层压薄板的撞击特性,认为防护结构性能取决于缓冲屏的面密度,提升冲击压力只是处于从属地位.Stilp和Weber^[23]通过研究W/Ti和Ti/W两种材料的碎片云特性否认了Riney^[22]的观点,认为由密度梯度导致的冲击波压力传播规律的变化也是改变抗撞击性能的主要因素.Hou等^[24,25]首先报道了密度梯度型防护结构优异的防护性能,并证实了密度梯度在提高防护结构性能上具有至关重要的作用.Huang等^[26]研究了一种 $Fe_{77}Si_{19}B_4/Ly12$ Al层压材料的超高速撞击特性.Tamura等^[27]研究了弹丸撞击SiC-fiber/3004 Al产生的碎片云的特性,但是没有研究其抗撞击性能.

本文以二级轻气炮为加载手段,实验研究了超高速撞击下Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板的穿孔特性、碎片云分布特性和弹道极限特性,并分析揭示了密度梯度材料高抗撞击性能的机理,为防护结构理论设计和工程应用提供了研究基础.

2 超高速撞击实验

2.1 密度梯度薄板样品参数

本文所用的Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度复合材料由武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室采用层间平面扩散焊接法制备,材

料样品厚度参数列于表1, 典型的横断面面貌如图2所示. 实验中把Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度复合材料制备成 $\Phi 100$ mm的圆片. 为了对比, 我们同时进行了同等面密度的Ly12 Al薄板(厚度为1.5 mm)的超高速撞击实验.

表1 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板的材料参数

样品编号	Ti6Al4V 厚度/mm	Ly12Al 厚度/mm	聚酰胺纤维 厚度/mm
2#	0.343	0.429	1.480
3#	0.349	0.441	1.541
4#	0.396	0.476	1.659
5#	0.345	0.441	1.495
6#	0.350	0.443	1.538
7#	0.346	0.447	1.547
8#	0.342	0.444	1.517
9#	0.346	0.443	1.511
10#	0.341	0.442	1.520
11#	0.349	0.447	1.529

2.2 实验结果

超高速撞击实验在二级轻气炮上进行, 采用激光束遮断测速系统测量弹丸速度, 测量精度优于5%. 超高速撞击实验选择在4.5和6.5 km/s两个

关键速度点上进行, 球形弹丸材料为Ly12 Al. 实验时在距薄板后表面100 mm处放置3.0 mm厚的Ly12 Al验证板. 实验结果列于表2. 表中shot1和shot2分别是指撞击速度在4.5和6.5 km/s时的实验, 在这两个速度点上均进行了5发实验, 因此我们在shot1和shot2后分别用1, 2, 3, 4和5加以区别.



图2 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度复合材料样品的断面图

3 实验结果分析

3.1 穿孔特性

Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板的典型穿孔如图3所示. 与Ly12 Al薄板规则的圆形穿孔(图4)相比, Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板穿孔呈现出复杂的形貌. 当撞击速度

表2 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板的超高速撞击实验结果

实验编号	样品编号	撞击速度/ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	弹丸直径/mm	薄板前表面 穿孔直径/mm	薄板裂纹 长度/mm	验证板 损伤情况	验证板 穿透情况
Shot1-1	4#	6.368	6.00	23.14	57.56	小鼓包	未穿透
Shot1-2	3#	6.526	7.02	24.10	61.40	背部撕裂	穿透
Shot1-3	5#	6.482	6.52	23.10	59.90	背部层裂, 但未剥落	临界
Shot1-4	6#	6.363	6.50	25.12	59.92	背部层裂	未失效
Shot1-5	9#	6.552	7.02	25.00	55.60	背部撕裂且剥落	失效
Shot2-1	7#	4.640	5.02	12.02	28.54	背部层裂	未失效
Shot2-2	8#	4.519	5.04	13.40	30.90	3个穿孔 $2 \times \Phi 1.5$ mm, $1 \times \Phi 2.2$ mm	失效
Shot2-3	10#	4.509	5.02	12.28	32.00	小鼓包	未失效
Shot2-4	2#	4.576	5.52	16.56	33.60	背部层裂	未失效
Shot2-5	11#	4.482	5.52	13.50	30.32	5个穿孔 $1 \times \Phi 2.8$ mm, $4 \times \Phi 1.5$ mm	失效

约为6.5 km/s时, Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板前表面呈现出明显的花瓣状破坏, 并伴有较长的裂纹损伤. 花瓣状结构和裂纹同时发生在

钛合金和铝合金材料上. 当撞击速度约为4.5 km/s时, Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板前表面花瓣状破坏并不明显, 且花瓣状破坏和裂纹只

发生在钛合金材料上, 铝合金材料上只形成凸起的圆形穿孔. 在这两个撞击速度下, 处于后面的尼龙材料均形成了一个规则的穿孔. 在穿孔周围形成了很大的冲塞区, 其中当撞击速度为 6.5 km/s 时,

有些实验的冲塞区已经完全脱落, 从而导致穿孔直径变大. 在聚酰胺纤维材料中心穿孔的边缘, 可以发现破坏发生在 45° 方向, 这是很明显的剪切破坏形貌.

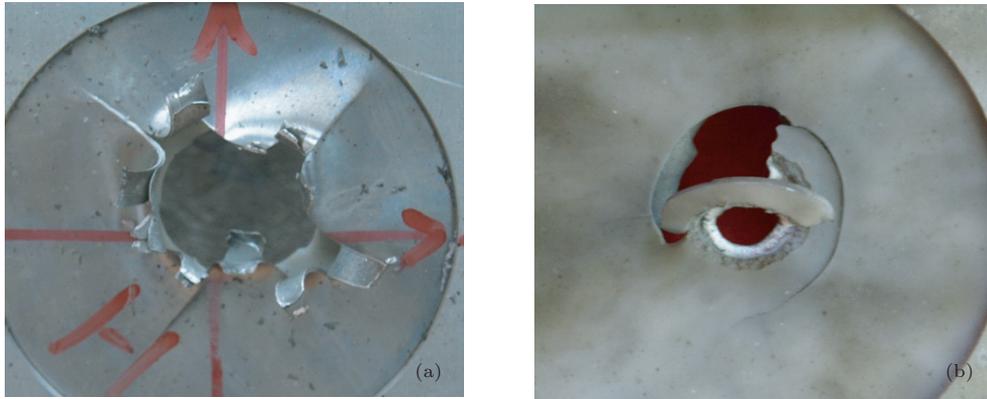


图3 当撞击速度为 6.482 km/s 时 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板的典型穿孔形貌 弹丸直径为 6.52 mm (a) 前表面; (b) 后表面

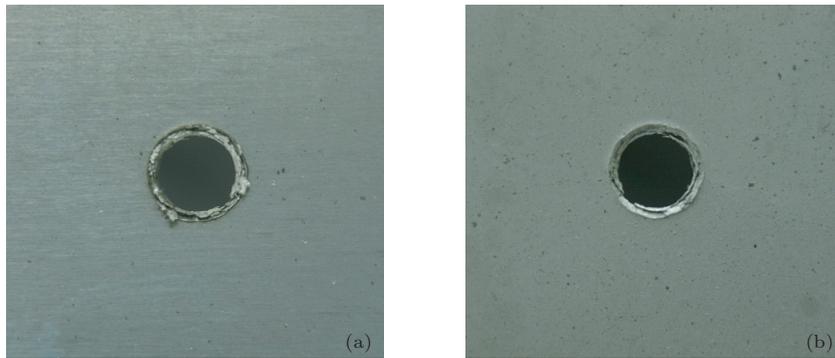


图4 当撞击速度为 6.221 km/s 时铝合金薄板的典型穿孔形貌 弹丸直径为 5.00 mm (a) 前表面; (b) 后表面

图 5 给出了 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板和 Ly12 Al 薄板的归一化穿孔直径(穿孔直径 d_h 与弹丸直径 d 的比值)比较, 其中穿孔直径按照通用办法取穿透处最小包络圆的直径, Ly12 Al 薄板的归一化穿孔直径由文献 [28] 给出的公式获得. 从图 5 可以看出, 在 3.0—7.0 km/s 范围内, Ly12 Al 薄板的归一化穿孔直径随速度的增加而增大, 该比值在 1.9—2.2 范围内变化, 归一化穿孔直径仅相差 15.8%; 但对于 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板而言, 其归一化穿孔直径明显变大, 从 2.1 变化到 3.8, 且其随撞击速度的变化增幅远大于 Ly12 Al 薄板的相应结果. 当撞击速度为 3.0 和 7.0 km/s 时, Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板的归一化穿孔直径相对于 Ly12 Al 薄板的归一化穿孔直径分别增大了 10.5% 和 72.7%.

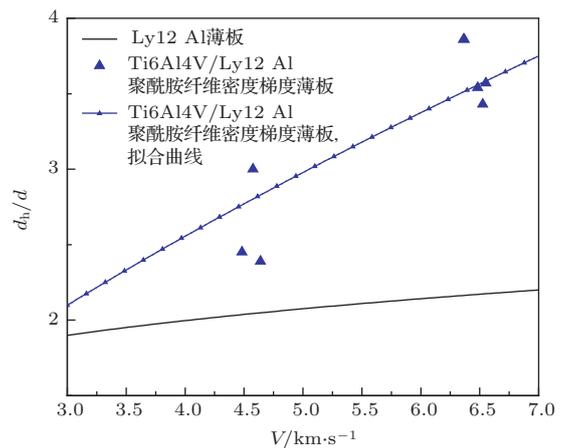


图5 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板和 Ly12 Al 薄板的归一化穿孔直径比较

穿孔直径越大, 破碎薄板消耗的能量越大, 撞击后产生的碎片云中含有的薄板碎片质量也越大, 这对于降低碎片云动能具有更明显的效果. 由两者

的穿孔直径对比结果可见, 密度梯度薄板比 Ly12 Al 薄板具有更高的抗撞击能力.

3.2 验证板损伤特性

图 6 和图 7 分别为 Ly12 Al 薄板的验证板和 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板的验证板损伤形貌.

对于 Ly12 Al 薄板撞击实验而言, 当直径为 4.00 mm 的铝合金弹丸以 4.795 km/s 的速度进行撞击时, 验证板前表面中心处散布着大量 1—4 mm 的撞击坑. 这些成簇聚集或分散孤立的撞击坑导致验证板背部略微向外凸起, 尺寸较大的撞击坑直接导致了验证板背面出现鼓包 (图 6 (b)). 验证板遭受的损伤情况说明弹丸在撞击 Ly12 Al 薄板后没有被完全粉碎, 碎片云中含有数量众多的大尺寸碎片. 当撞击速度为 6.221 km/s, 弹丸直径为 5.00 mm 时, 验证板成坑比较均匀 (图 6 (c)), 在验证板中心密集分布了直径在 1.0 mm 以下的撞击坑. 这些撞击坑绝大部分分布在直径为 75 mm 的圆形区域内. 在此撞击速度下, 验证板背部中心处出现了直径约为 15 mm 的剥落区 (图 6 (d)).

对于 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板撞击实验而言, 当撞击速度为 4.640 km/s 时, 验证板正面损伤呈现明显的三个损伤区 (图 7 (a)): 中心密集损伤区 (I 区)、环形散布成坑区 (II 区) 和外围辐射撞击区 (III 区). I 区位于损伤区域中心, 形成直径为 30 mm 的圆形区域. 在此区内撞击坑直径较小, 撞击坑最大直径约为 2 mm, 但数量很多. 从验证板背部的损伤情况看, 这一区域没有形成明显的鼓包 (图 7 (b)). II 区位于 I 区的外围, 形成宽度约为 10 mm 的环形区域. 这一区域内, 撞击坑直径为 1—3.5 mm, 明显大于 I 区的撞击坑直径. 从验证板背部损伤情况看, 该区域的验证板形成了环形的鼓包 (图 7 (b)), 损伤明显比 I 区的损伤大. III 区位于 II 区的外围, 零星地分布着直径小于 2 mm 的撞击坑. 验证板背部在这一区域没有明显损伤 (图 7 (b)). 当撞击速度为 6.363 km/s 时, 在遭受碎片云撞击后, 验证板正面的撞击坑尺寸非常小 (图 7 (c)), 撞击坑最大直径约为 0.3 mm, 碎片云粒子侵蚀验证板的深度也远小于 Ly12 Al 薄板实验的相应结果. 在此撞击速度下, 验证板损伤也可以分为三个区域, 但是 I 区和 II 区的差别远小于撞击速度为 4.640 km/s 时的相应结果.

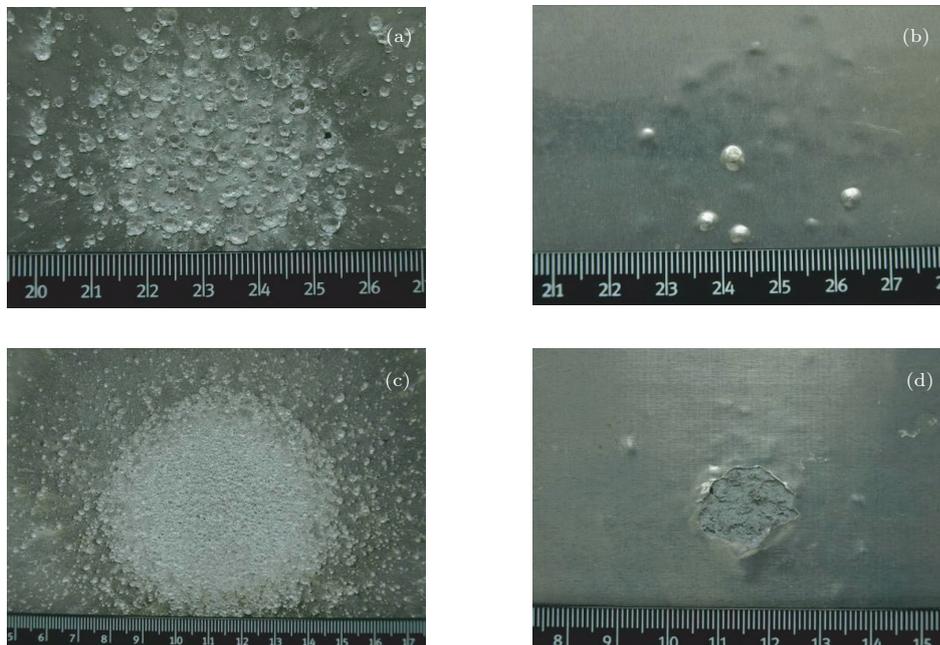


图 6 在不同撞击速度下 Ly12 Al 薄板的验证板的损伤形貌 (a) 前表面的损伤形貌 ($V = 4.795 \text{ km/s}$, $d = 4.00 \text{ mm}$); (b) 后表面的损伤形貌 ($V = 4.795 \text{ km/s}$, $d = 4.00 \text{ mm}$); (c) 前表面的损伤形貌 ($V = 6.221 \text{ km/s}$, $d = 5.00 \text{ mm}$); (d) 后表面的损伤形貌 ($V = 6.221 \text{ km/s}$, $d = 5.00 \text{ mm}$)

为了进一步量化分析验证板的损伤, 我们统计了图 6 (a) 和图 7 (a) 所示的验证板上的撞击坑信息, 结果列于表 3. 从表 3 可见, Ly12 Al 薄

板的验证板有 25 个直径大于 3 mm 的撞击坑, 而 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板的验证板上仅有 3 个, 直径为 2—3 mm 的撞击坑两者

分别有 41 个和 13 个, 而直径为 1—2 mm 的撞击坑在 Ly12 Al 薄板的验证板上有 111 个, 远远多于 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板实验的 54 个. 当撞击速度约为 4.5 km/s 时, Ly12 Al 薄板的验证板共有 177 个直径大于 1 mm 的撞击坑, 而 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板的验证板仅有 70 个, 比前者减少了一半以上. 值得注意的是, Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度

薄板实验中使用的弹丸的直径为 5.02 mm, 而 Ly12 Al 薄板实验使用的弹丸的直径为 4.00 mm. 前者的弹丸直径虽然更大, 但是其验证板撞击坑数更少, 这更加可以说明在遭受相同速度的弹丸撞击时, Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板对弹丸的破碎效果更好, 即在抗弹丸超高速撞击能力上, Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板明显高于 Ly12 Al 薄板.

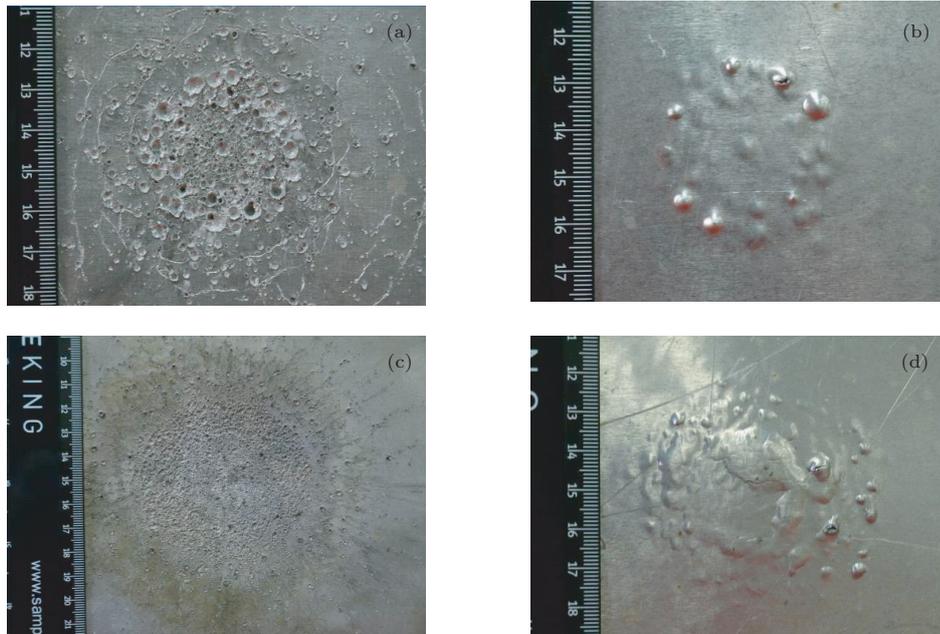


图 7 在不同撞击速度下 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板的验证板的损伤形貌 (a) 前表面的损伤形貌 ($V = 4.640 \text{ km/s}$, $d = 5.02 \text{ mm}$); (b) 后表面的损伤形貌 ($V = 4.640 \text{ km/s}$, $d = 5.02 \text{ mm}$); (c) 前表面的损伤形貌 ($V = 6.363 \text{ km/s}$, $d = 6.50 \text{ mm}$); (d) 后表面的损伤形貌 ($V = 6.363 \text{ km/s}$, $d = 6.50 \text{ mm}$)

表 3 Ly12 Al 薄板和 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板的验证板的撞击坑数量

验证板	弹丸速度/ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	弹丸直径/mm	直径大于 3 mm 的撞击坑数量	直径为 2—3 mm 的撞击坑数量	直径为 1—2 mm 的撞击坑数量
Ly12 Al 薄板的验证板	4.795	4.00	25	41	111
Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板的验证板	4.640	5.02	3	13	54

3.3 弹道极限特性

弹道极限特性是指在验证板临界穿透下弹丸直径与撞击速度、薄板厚度、薄板与验证板间距参数之间的关系. 实验获得的 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板的弹道极限曲线如图 8 所示, 曲线采用最小二乘法拟合获得.

当撞击速度为 4.5 km/s 左右时, 共进行了 5 发实验, Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度

薄板的验证板临界穿透弹丸直径为 5.3 mm, 而 Ly12 Al 薄板的验证板临界穿透弹丸直径约为 3.3 mm. 前者比后者抗撞击能力提高了 60.6%. 当撞击速度为 6.5 km/s 左右时, 也进行了 5 发实验, Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板的验证板临界穿透弹丸直径为 6.8 mm, 对比 Ly12 Al 薄板的验证板临界穿透弹丸直径 (4.5 mm), 前者的防护性能提高了 51.1%.

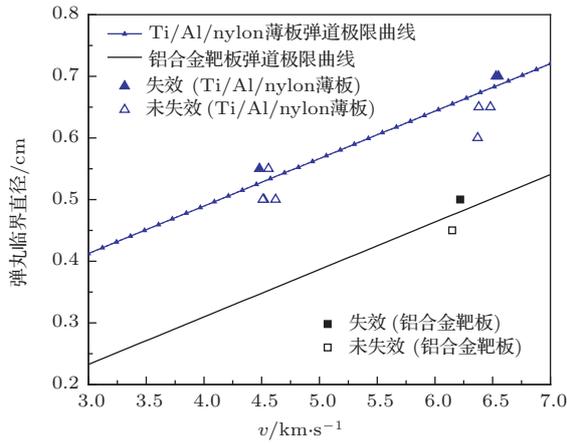


图8 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板的弹道极限曲线

4 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板超高速撞击特性的理论分析

4.1 冲击波传播规律

通常情况下,在遭受弹丸超高速撞击时,密度梯度薄板产生的冲击波压力随时间的变化如图9(b)所示.冲击波峰值压力越高对弹丸的破碎作用越大;压力持续时间越长对冲击波能量的耗散越大,对弹丸动能的消耗也越大.

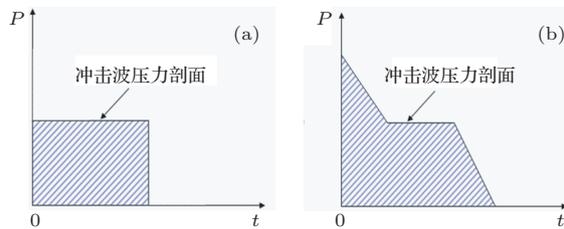


图9 理想情况下薄板中冲击波的压力-时间($P-t$)曲线 (a) 单一密度薄板; (b) 密度梯度薄板

为了定量解释这一特性,采用AUTO-DYN-2D软件对超高速撞击过程中Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板的冲击波传播规律进行仿真,并与Ly12 Al薄板中的相应情形进行对比. Ti6Al4V(0.3 mm)/Ly12 Al(0.4 mm)/聚酰胺纤维(1.5 mm)密度梯度薄板的面密度与1.5 mm厚的Ly12 Al薄板的面密度相等.所使用的材料模型为Grüneisen状态方程和Steinberg-Guinan强度模型,球形Ly12 Al弹丸的直径为6.0 mm,撞击速度为7.0 km/s,计算结果如图10和图11所示.图10和图11中的不同曲线代表不同示踪点的压力历史,示踪点在薄板轴线上,从下至上的曲线所对应的

示踪点是从薄板轴线起点开始,依次间隔0.1 mm.由图10和图11可知, Ly12 Al薄板中的峰值压力为136 GPa,压力脉冲持续的最长时间为480 ns; Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板撞击的峰值压力为143 GPa,压力脉冲持续的最长时间为680 ns,分别比Ly12 Al薄板中的相应结果增加了5.1%和41.7%.

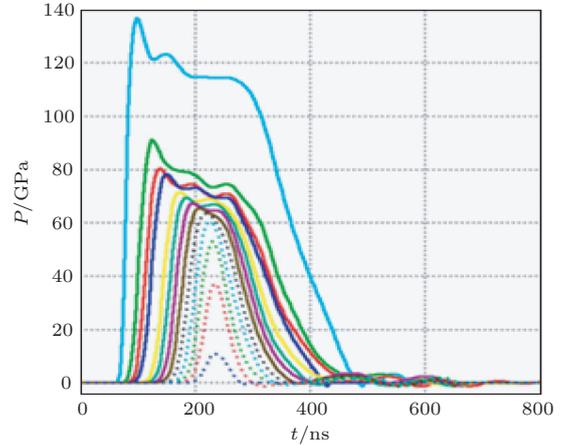


图10 Ly12 Al薄板中的冲击压力历史图

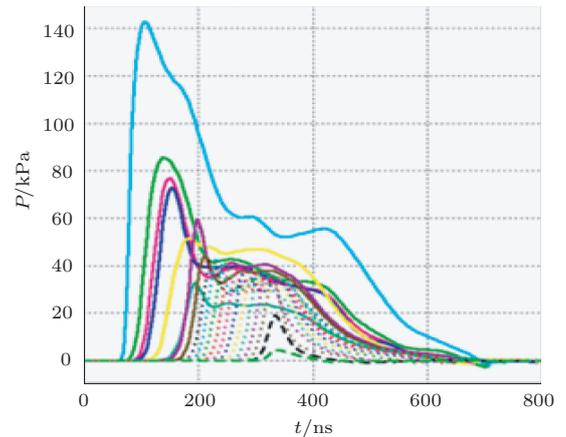


图11 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板中的冲击压力历史图

密度梯度薄板之所以能提升冲击波强度是因为采用了波阻抗更大的材料.而其能延长冲击波作用时间是因为波阻抗梯度改变了其中冲击波的卸载方式,将一次很陡的卸载(单一波阻抗材料)变成了多次缓慢卸载(波阻抗梯度材料),如图12所示.图12中采用的材料参数如表4所列,其中 ρ 为密度, C_0 为体波声速, λ 为材料常数, γ_0 为Grüneisen系数, T_0 为参考温度, α 为体膨胀系数, c_V 为定容比热容. Hugoniot曲线和等熵卸载线的计算方法参见文献[29].计算过程忽略了材料的熔化和汽化.

表4 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板的材料参数

材料参数	Ti6Al4V	Ly12 Al	聚酰胺纤维
$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	4.419	2.785	1.146
$C_0/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	5.13	5.37	3.91
λ	1.028	1.29	1.18
γ_0	1.23	2.00	0.87
T_0/K	300	300	300
$\alpha/10^{-6}\text{K}^{-1}$	25.05	71.4	130
$c_V/10^{-3}\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	0.496	0.85	1.72

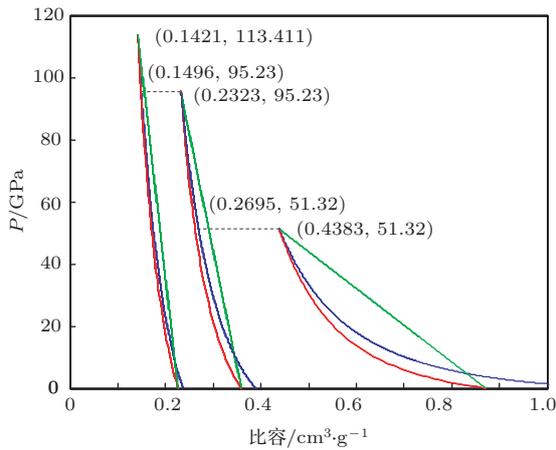


图12 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板中的冲击波卸载图 V 为 7 km/s, 铝弹丸, 始于点 (0.1421, 113.41) 的 3 条曲线、点 (0.2323, 95.23) 的 3 条曲线和点 (0.4383, 51.32) 的 3 条曲线从左至右依次为 Hugoniot 曲线、等熵卸载线和瑞利线

在铝弹丸撞击 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板时, 由于首先撞击钛合金, 冲击波压力沿钛合金的瑞利线到达点 (0.1421, 113.411). 当冲击波到达钛合金和铝合金的界面时, 钛合金中的压力将被卸载, 卸载路径沿钛合金的等熵线进行. 与此同时, 透射冲击波将使得铝合金压力沿其瑞利线加载. 当压力达到平衡时, 铝合金将阻止钛合金压力的进一步卸载, 使平衡压力维持在 96.23 GPa. 随后铝合金中的透射冲击波向前传播, 当到达铝合金和聚酰胺纤维的界面时, 冲击波再次发生反射和透射. 在达到平衡压力 51.32 GPa 时, 聚酰胺纤维材料将阻止铝合金中的压力进一步卸载. 聚酰胺纤维中的透射冲击波继续向前传播, 在到达材料自由面时将发生卸载, 使得压力沿等熵卸载线变化到零. 当聚酰胺纤维中的压力卸载到零时, 其对铝合金中压力卸载的迟滞作用消失, 铝合金中的压力将紧随其后, 从点 (0.2695, 51.32) 开始沿其等熵卸载线减小到零. 同理, 当铝合金中的压力卸载到零

时, 钛合金将从点 (0.1496, 96.23) 沿等熵卸载线变化到零.

4.2 不可逆功

在冲击加载和卸载过程中, 材料所转化的不可逆功在数值上等于其瑞利线和等熵卸载线所包围的面积 (图 12). Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板所转化的总不可逆功是其各个组分材料转化的不可逆功按照质量分数的叠加. 1.5 mm 厚的 Ly12 Al 薄板和 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板转化的不可逆功的计算结果如图 13 所示, 其中弹丸材料为 Ly12 Al, 撞击速度范围为 3.0—7.0 km/s. 从图 13 可以看出, 在不同撞击速度下 9 种组合厚度的 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板所转化的不可逆功都远远大于 Ly12 Al 薄板的相应结果, 其中厚度组合为 0.3 mm/0.3 mm/1.8 mm 的 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板转化的不可逆功是 Ly12 Al 薄板相应结果的 8 倍. 这说明密度梯度薄板可以吸收更多的弹丸动能, 具有更好的抗撞击能力.

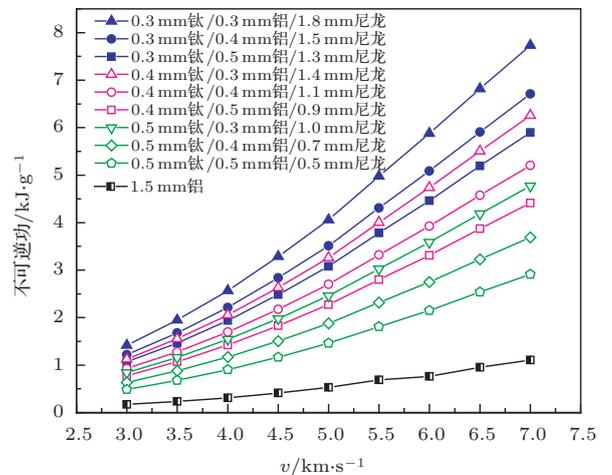


图13 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板和 Ly12 Al 薄板转化的不可逆功比较

5 密度梯度薄板应用举例

综上所述可知, 与 Ly12 Al 薄板相比密度梯度薄板具有很高的抗撞击性能. 基于经典的 Whipple 防护结构构形 (图 14 (a)), 我们用密度递减的薄板取代铝合金缓冲屏构成了新型的密度梯度型防护结构 (图 14 (b)). 显然本文提出的防护结构比 Whipple 防护结构有更高的防护性能.

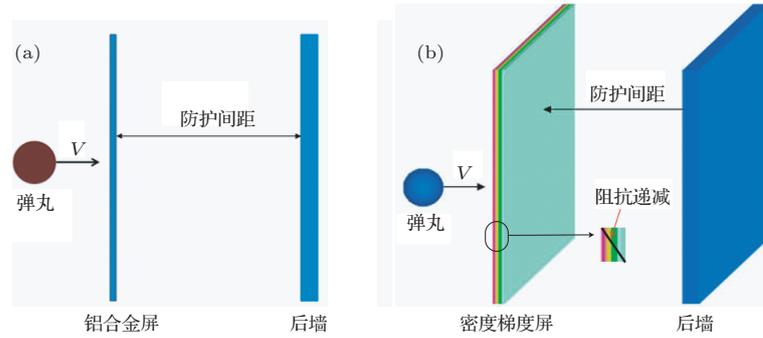


图 14 防护结构示意图 (a) Whipple 结构; (b) 本文提出的结构

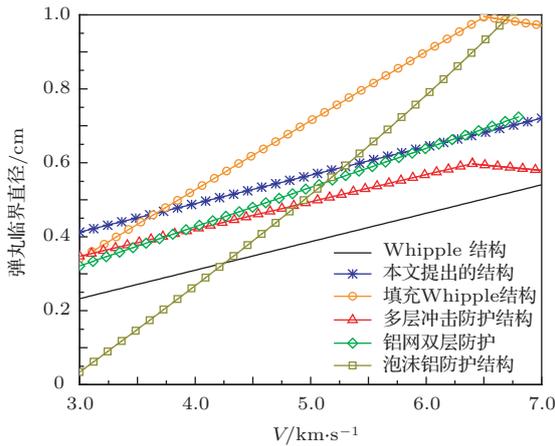


图 15 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度结构的防护性能与其他增强型结构的防护性能比较

进一步把 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度防护结构的防护能力与其他增强型防护结构的防护能力进行对比, 图 15 给出了 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度结构、多层冲击防护结构^[6]、铝网多层冲击防护结构^[7]、泡沫铝防护结构^[12]和填充 Whipple 防护结构^[9]的弹道极限曲线. 由于泡沫铝结构是根据蜂窝夹层板防护结构改进得到, 泡沫铝结构的防护性能高于蜂窝夹层板防护结构的性能, 因此图 15 没有给出蜂窝夹层板防护结构的弹道极限曲线. 从图 15 可以看出, 当撞击速度为 3.0—7.0 km/s 时, Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度结构的弹道极限整体优于其他增强型防护结构的弹道极限; 进一步, 若在各类增强型防护结构中使用密度梯度屏, 则其防护能力会大大高于原增强型防护结构的防护能力, 这使得密度梯度型防护结构具有非常诱人的工程应用前景.

6 结 论

通过对 Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板超高速撞击特性的实验研究, 证明了其比铝合金薄板具有更高的抗撞击性能, 并给出了物理解

释. 研究表明, Ti6Al4V/Ly12 Al/聚酰胺纤维密度梯度薄板防护结构的防护性能比铝合金 Whipple 防护结构的防护性能高 50% 以上, 具有很好的工程应用前景.

参考文献

- [1] Jing F Q 1990 *Expl. Shock Waves* **10** 279 (in Chinese) [经福谦 1990 爆炸与冲击 **10** 279]
- [2] Li D H, Gong Z Z, Jing F Q 2001 *Space Debr. Res.* **4** 50 (in Chinese) [李大红, 龚自正, 经福谦 2001 空间碎片研究 **4** 50]
- [3] Whipple F L 1947 *Astron. J.* **52** 137
- [4] Cour-Palais B G, Crews J L 1990 *Int. J. Impact Eng.* **10** 135
- [5] Christiansen E L, Kerr J H, Fuente H M, Schneider W C 1999 *Int. J. Impact Eng.* **23** 125
- [6] Christiansen E L 1993 *Int. J. Impact Eng.* **14** 145
- [7] Christiansen E L, Kerr J H 1993 *Int. J. Impact Eng.* **14** 169
- [8] Ryan S, Schaefer F, Destefanis R, Lambert M 2008 *Adv. Space Res.* **41** 1152.
- [9] Williamsen J E, Robinson J H, Nolen A M 1995 *Int. J. Impact Eng.* **17** 217
- [10] Yasensky J, Christiansen E L 2008 *Hypervelocity Impact Evaluation of Metal Foam Core Sandwich Structure* (Houston: Johnson Space Center) NASA/TP-2008-214776
- [11] Jia B, Ma Z T, Pang B J 2009 *Chin. J. High Press. Phys.* **23** 453 (in Chinese) [贾斌, 马志涛, 庞宝君 2009 高压物理学报 **23** 453]
- [12] Ryan S, Hedman T, Christiansen E L 2010 *Acta Astronaut.* **67** 818
- [13] Ha Y, Liu Z Y, Guan G S, Pang B J 2012 *Chin. J. High Press. Phys.* **26** 557 (in Chinese) [哈跃, 刘志勇, 管公顺, 庞宝君 2012 高压物理学报 **26** 557]
- [14] Song W D, Li J Q, Liu H Y 2011 *Chin. J. High Press. Phys.* **25** 435 (in Chinese) [宋卫东, 栗建桥, 刘海燕 2011 高压物理学报 **25** 435]
- [15] Li J Z, Huang F L, Zhang Q M 2004 *Chin. J. High Press. Phys.* **18** 163 (in Chinese) [李金柱, 黄风雷, 张庆明 2004 高压物理学报 **18** 163]
- [16] Rudolph M, Schäfer F, Destefanis R, Faraud M, Lambert M 2012 *Acta Astronaut.* **76** 42

- [17] Baluch A H, Park Y, Kim C G 2013 *Compos. Struct.* **96** 554
- [18] Francesconi A, Giacomuzzo C, Grande A M, Mudric T, Zaccariotto M, Etemadi E, Di Landro L, Galvanetto U 2013 *Adv. Space Res.* **51** 930
- [19] Zheng W, Huang Y J, Pang B J, Shen J 2011 *Mater. Sci. Eng. A* **529** 352
- [20] Huang H J, Shen Q, Luo G Q, Zhang L M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1538 (in Chinese)[黄海军, 沈强, 罗国强, 张联盟 2007 物理学报 **56** 1538]
- [21] Shen Q, Zhang L M, Wang C B, Hua J S, Tan H, Jing F Q 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1663 (in Chinese)[沈强, 张联盟, 王传彬, 华劲松, 谭华, 经福谦 2003 物理学报 **52** 1663]
- [22] Riney T D 1970 *In High-Velocity Impact Phenomena* (edited by Kinslow) (New York: Academic Press) p166
- [23] Stilp A J, Weber K 1997 *Int. J. Impact Eng.* **20** 765
- [24] Hou M Q, Gong Z Z, Yang J Y, Zheng J D, Tong J Y, Xiang S H 2009 *Space Environment and Material Science Forum* Beijing, 2009 p76 (in Chinese) [侯明强, 龚自正, 杨继运, 郑建东, 童靖宇, 向树红 2009 年空间环境与材料科学论坛, 北京, 2009 第 76 页]
- [25] Hou M Q, Gong Z Z, Zheng J D, Xu K B, Cao Y, Niu J C 2013 *the 6th European Conference on Space Debris* ESA/ESOC, Darmstadt, Germany, April 22–25, 2013 p52
- [26] Huang X, Ling Z, Liu Z D, Zhang H S, Dai L H 2012 *Int. J. Impact Eng.* **42** 1
- [27] Tamura H, Tanaka Y, Saito F, Kondo K 2011 *Int. J. Impact Eng.* **38** 686
- [28] Hill S A 2004 *Int. J. Impact Eng.* **30** 303
- [29] Tang W H 2011 *Shock Wave Physics* (Beijing: Science Press) p190 (in Chinese) [汤文辉 2011 冲击波物理 (北京: 科学出版社) 第 190 页]

Experimental study on hypervelocity impact characteristics of density-grade thin-plate*

Hou Ming-Qiang¹⁾ Gong Zi-Zheng^{1)†} Xu Kun-Bo¹⁾ Zheng Jian-Dong²⁾
Cao Yan¹⁾ Niu Jin-Chao¹⁾

1) (Science and Technology on Reliability and Environment Engineering Laboratory, Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

2) (Institute of Telecommunication Satellite, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

(Received 15 July 2013; revised manuscript received 11 October 2013)

Abstract

Hypervelocity impact (HVI) characteristics of Ti6Al4V/Ly12 Al/polyamide fibre density-grade thin-plate are investigated experimentally in a velocity range of 4.0–6.5 km/s by using two-stage light gas gun. The perforation in target, damage to witness wall, and ballistic limit curve are obtained and compared with those in the case of aluminum thin-plate. The results show that the diameter of the perforation hole is larger than that of aluminum thin-plate, the crater size in witness plate is smaller, and the ballistic limit curve is 50% larger than the latter. The analysis of shock wave propagation and the calculation of energy dissipation property in the density-grade thin-plate show that higher peak shock pressure is produced in it, and it has longer pressure duration time. Thus, more dissipation energy is consumed than in the case of aluminum thin-plate. So the density-grade thin-plate has a very good performance in withstanding HVI, and is promising in engineering application, e.g. protecting spacecraft from HVI of micro-meteoroid and orbital debris.

Keywords: hypervelocity impact, density-grade material, ballistic limit, space debris

PACS: 47.40.Nm, 46.50.+a, 47.40.-x, 64.30.Jk

DOI: 10.7498/aps.63.024701

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB731600) and the Specialized Research Program for the Protection against Space Debris of China (Grant Nos. KJSP06209, K0202210).

† Corresponding author. E-mail: gongzz@263.net