

梯度复合 Whipple 防护结构的超高速撞击实验^{*}

黄 鑫¹, 凌 中¹, 刘宗德², 张虎生¹, 戴兰宏¹

(1. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100190;

2. 华北电力大学电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 北京 102206)

摘要: 利用二级轻气炮在撞击速度 3.5 和 5.5 km/s 下对 3 种防护结构(两种梯度复合 Whipple 防护结构以及传统 Whipple 防护结构)进行了超高速撞击实验, 并利用 SEM 对前板冲孔进行了微观观测。实验结果表明: 采用非晶合金复合的梯度防护结构, 在弹丸撞击速度为 3.5 和 5.5 km/s 时, 防护性能均优于传统 Whipple 防护结构; 而采用陶瓷复合的梯度防护结构, 则在弹丸撞击速度为 5.5 km/s 时具有明显的优势。通过量纲分析, 获得了影响梯度复合 Whipple 防护结构防护性能的重要量纲一参数, 揭示梯度层的存在, 可有效提高弹丸破坏数, 从而提高新结构防护性能。

关键词: 固体力学; 非晶合金; 陶瓷; 超高速撞击; 空间碎片; Whipple 防护结构

Whipple 防护结构是一种包括前板、间隙和后板的双层板防护结构, 最早由天体物理学家 F. L. Whipple^[1] 提出。它广泛应用于航天器结构防护工程设计中, 能够有效防止超高速运动的空间碎片给航天器安全运行带来的威胁^[2-4]。已有的研究表明, Whipple 防护结构的几何参数(如前板厚度、间隙宽度、后板厚度)以及材料参数(如材料密度、声速、熔点等)都会对防护性能产生影响^[5-7], 并且前板往往是影响防护性能的关键因素^[8], 因为前板对空间碎片的破碎过程决定了碎片云中颗粒的大小、分布、速度等重要参数, 从而影响到整个结构的防护效果。因此, 对前板的合理设计(如材料选取、结构设计等)对提升 Whipple 防护结构的防护性能尤其重要。

在航天器工程设计中, 传统 Whipple 防护结构的前板通常由单一均匀材料制作, 选用比强度较高的材料如铝合金等。这种单一均匀的铝合金前板在保证航天器结构强度的同时, 能有效降低航天器的质量, 从而降低发射成本。然而, 作为防护结构, 选用密度、强度、硬度等更高的材料(如新型金属陶瓷、非晶合金等), 通常更有利于破碎空间碎片, 但完全使用此类材料也往往意味着发射成本及材料生产成本的提高。因此, 需要将不同类型材料的优势结合起来, 在基本不提高防护结构密度、也不占用更多空间的同时, 提升防护性能。

为了提高传统 Whipple 防护结构的防护性能, 戴兰宏等^[9-10] 提出了一种新概念防护结构——梯度复合 Whipple 防护结构。该防护结构将梯度复合板作为防护结构前板, 取代以往由单一均匀材料制作的离散的多层防护屏; 梯度复合板的梯度层选用比强度比传统金属材料更高的新型金属陶瓷、非晶合金, 用梯度层材料与铝合金复合形成 Whipple 防护屏的前板, 以抵御空间碎片的撞击。为了验证这种新型梯度复合 Whipple 防护结构的防护性能, 本文中, 在二级轻气炮上开展超高速撞击实验; 利用 SEM 对前板冲孔的损伤特性进行表征; 通过量纲分析获得影响防护结构防护性能的重要量纲一参数, 试图揭示梯度层对于提高新结构防护性能的重要作用。

1 实 验

1.1 材料制备

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(11132011, 11021262, 11002144);
国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金项目(10976100);
国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2009CB724401, 2012CB937500)

作者简介: 黄 鑫(1984—), 男, 博士, 工程师, lhdai@lnm.imech.ac.cn。

梯度复合 Whipple 防护结构由梯度复合前板、间隙和后板构成,其中,梯度复合前板由非晶合金(或金属陶瓷)梯度层以及铝合金基底组成。非晶合金梯度复合前板采用电热爆炸超高速喷涂法制备^[11]。喷涂过程中,喷涂材料(厚 50 μm 的 $\text{Fe}_{77}\text{Si}_{14}\text{B}_9$ 非晶合金条带)被电流加热到液态和气态,汽化膨胀产生的高压在爆炸室约束下驱动熔滴对铝合金基底进行定向喷涂,从而实现涂层和基底的梯度复合^[12]。为了确定梯度层的组分,利用 XRD 对非晶合金梯度层进行检测,结果表明梯度层主要由非晶相组成。金属陶瓷梯度复合前板采用原位复合制备技术。制备时,先在铝合金基底上利用交流氩弧焊机制备 NiAl 过渡层并打磨至合理厚度,再在 NiAl 过渡层上利用等离子弧熔覆法原位合成 TiC/Al 复合层,由于熔覆过程的自稀释作用,从而形成 TiC/Al 复合层。

1.2 超高速撞击实验

超高速撞击实验在二级轻气炮上进行。图 1 为实验装置示意图,主要由 3 部分构成:球形弹丸、梯度复合 Whipple 防护结构以及观测板。球形弹丸材料为 LY12 硬铝,直径为 4 mm,以垂直于前板的方向入射。梯度复合 Whipple 防护结构由梯度复合前板、间隙和后板组成。其中,梯度复合前板厚为 3 mm,由梯度层和铝合金基底组成。梯度层分别选用 2 种材料:(1) Fe 基非晶合金, $\text{Fe}_{77}\text{Si}_{19}\text{B}_4$;(2) TiC 金属陶瓷;基底材料为 LY12 硬铝。间隙宽度 100 mm。后板厚度 3 mm,材料均为 LY12 硬铝合金。由于碎片云撞击后板时有可能穿透后板,在距后板 100 mm 处放置了观测板。作为对比,还选择了前板为单一均匀铝合金材料的传统 Whipple 防护结构进行了实验。

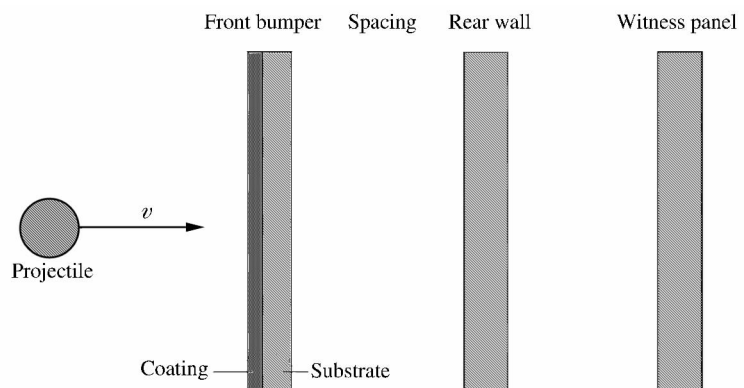


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Experimental configuration

表 1 为超高速实验具体参数。由于材料制备困难,所以实验次数有限。为了考察新防护结构在不同速度的防护性能,选择了两个撞击速度,分别为 3.5 和 5.5 km/s。在相同的撞击速度下,分别对 3 种防护结构进行实验,分别为:(1)前板为单一均匀 LY12 铝合金材料的传统 Whipple 防护结构;(2)Fe 基非晶合金梯度复合 Whipple 防护结构;(3)TiC 金属陶瓷梯度复合 Whipple 防护结构。

表 1 撞击实验参数

Table 1 Experimental parameters

No.	$v/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	d_p/mm	梯度层材料	t_c/mm	t'_c/mm	t_b/mm
1-1	3.44	4	—	—	3.00	3
1-2	3.55	4	$\text{Fe}_{77}\text{Si}_{19}\text{B}_4$	0.15	2.85	3
1-3	3.34	4	TiC	1.08	1.92	3
2-1	5.33	4	—	—	3.00	3
2-2	5.70	4	$\text{Fe}_{77}\text{Si}_{19}\text{B}_4$	0.15	2.85	3
2-3	5.36	4	TiC	1.99	1.01	3

1.3 实验结果

每次实验,弹丸均穿透前板,在前板形成冲孔。破碎的弹丸及一部分前板材料形成的碎片云撞击后板后在后板迎面留下大量弹坑,并在后板背面形成鼓包。未发生穿透后板的情况,因而观测板上未见损伤。由前后板的损伤情况来看:在撞击速度为 3.5 km/s 时,非晶合金梯度复合 Whipple 防护结构的防护性能最优,传统 Whipple 防护结构次之,金属陶瓷梯度复合 Whipple 防护结构较差;而当撞击速度提高到 5.5 km/s 时,两种梯度复合 Whipple 防护结构防护性能均优于传统 Whipple 防护结构,并且金属

陶瓷梯度复合 Whipple 防护结构的防护性能最显著。

1.3.1 宏观损伤形貌

图 2 为碎片云撞击后板迎面形成的弹坑形貌。由图 2 可以看出,后板迎面均分布大量弹坑,在中心处弹坑尺寸较大,分布也较密集。随着撞击速度的提高,弹坑数目增加,弹坑尺寸却在减小。这说明,随着撞击速度的升高,弹丸破碎得更加充分。为了定量表征后板的损伤程度,对弹坑数目进行了统计,如表 2 所示。表中, d_{\max} 为最大坑径, P_{\max} 为最大坑深, n_1 、 n_2 和 n_3 分别为主弹坑数、次弹坑数和微弹坑数。在对后板迎面弹坑数目进行定量测量时,通常将弹坑分为 3 类^[13]:(1)主弹坑,这类弹坑从尺寸上明显大于其他弹坑,其数量只有 1 个,在后板背面对应的鼓包尺寸及高度也明显大于其他弹坑对应的鼓包,并且其位置正对弹丸穿透前板形成的孔洞。(2)次弹坑,其直径大于 1 mm 而小于主弹坑尺寸,通常可以在其后板背面对应位置上观测到鼓包。(3)微弹坑,直径小于 1 mm 的弹坑称为微弹坑,这类弹坑通常不会在后板背面形成鼓包,对后板的损伤最小。由表 2 可以看出,在弹丸撞击速度为 3.5 km/s 时,与铝合金相比,非晶合金梯度复合材料对应的后板迎面没有主弹坑,却有更多的次弹坑和微弹坑,显示出对弹丸较强的破碎能力。金属陶瓷对应的弹坑数比较特殊,不但具有主弹坑,并且次弹坑及微弹坑数目均大于前两者。而在撞击速度为 5.5 km/s 时,3 种材料都没有主弹坑出现,这时次弹坑是造成后板损伤的主要因素。从次弹坑数目看,金属陶瓷对应的次弹坑数目最少,非晶合金次之,铝合金最多。这说明在撞击速度较高时,相对于单一均匀的铝合金前板,两种梯度复合前板对弹丸具有较强的破碎能力。

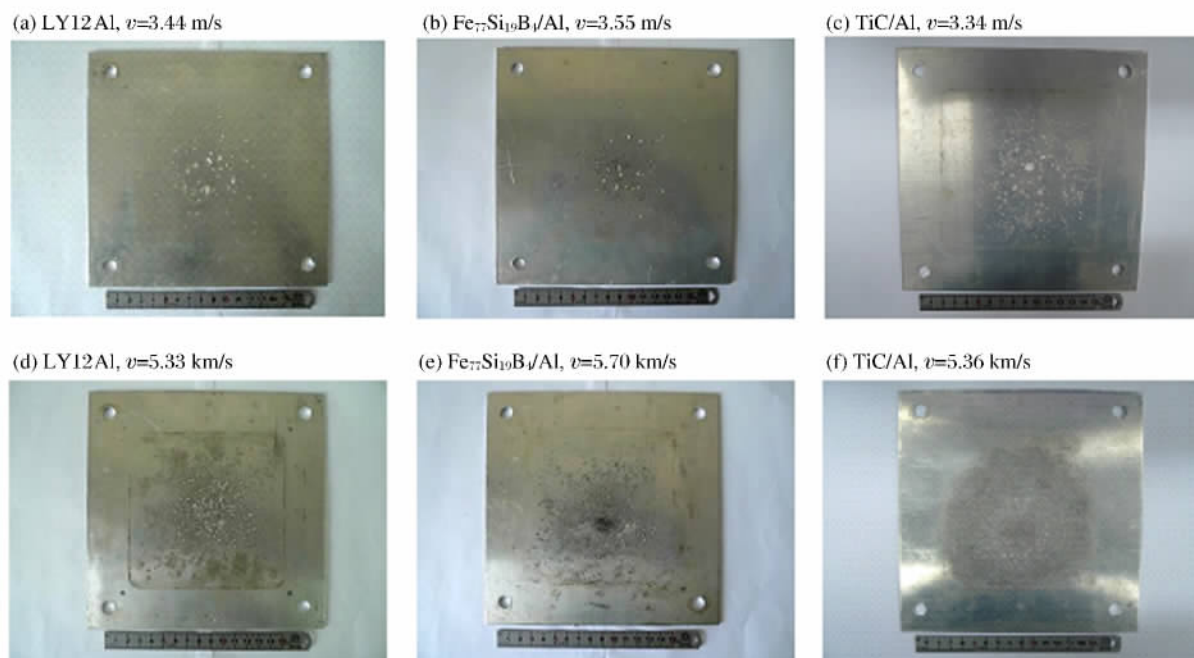


图 2 后板迎面宏观形貌

Fig. 2 Front side of the rear wall

表 2 后板迎面损伤特性

Table 2 The characteristics of craters on the rear wall

$v/(km \cdot s^{-1})$	材料	d_{\max}/mm	P_{\max}/mm	n_1	n_2	n_3
3.5	LY12Al	6.5	1.0	1	95	374
	Fe ₇₇ Si ₁₉ B ₄	4.0	0.7	0	125	995
	TiC	12.0	1.0	1	227	3 513
5.5	LY12Al	3.0	1.0	0	438	2 337
	Fe ₇₇ Si ₁₉ B ₄	3.0	1.0	0	323	3 757
	TiC	2.5	0.7	0	59	~10 ⁵

1.3.2 微观损伤形貌

由于梯度复合 Whipple 防护结构与传统 Whipple 防护结构相比, 差异主要体现在前板, 并且前板是决定整个结构防护性能的关键因素, 因此对前板损伤形貌进行更细致的研究非常必要。考虑到前板冲孔的边缘是距离弹丸撞击点的最近位置, 很可能留下了超高速撞击过程中的重要信息, 利用 SEM 对前板孔边形貌进行了微观观测。

图 3 为不同撞击速度下前板孔边特征形貌。随着弹丸撞击速度从 3.5 km/s 提高到 5.5 km/s, 铝合金及非晶合金材料前板孔边微观特征趋向于呈现颗粒状形貌。可能的原因是, 随着撞击速度的提高, 弹丸对前板材料的破碎程度更充分。后板迎面微弹坑数目的增加, 可能与这种颗粒状形貌的出现密切相关, 因为前板材料粉碎程度增加, 碎片云中的微小颗粒也会增多。而金属陶瓷材料在 3.5 km/s 时, 就表现出颗粒状形貌, 但这种颗粒状不是由于撞击产生, 而是 TiC 金属陶瓷本身微结构具有的特征。随着撞击速度提高到 5.5 km/s, 其微观样貌表现出一定熔化流动的特征, 这种熔化现象的出现, 极有可能是对应的后板迎面观测到大量微弹坑的原因之一。

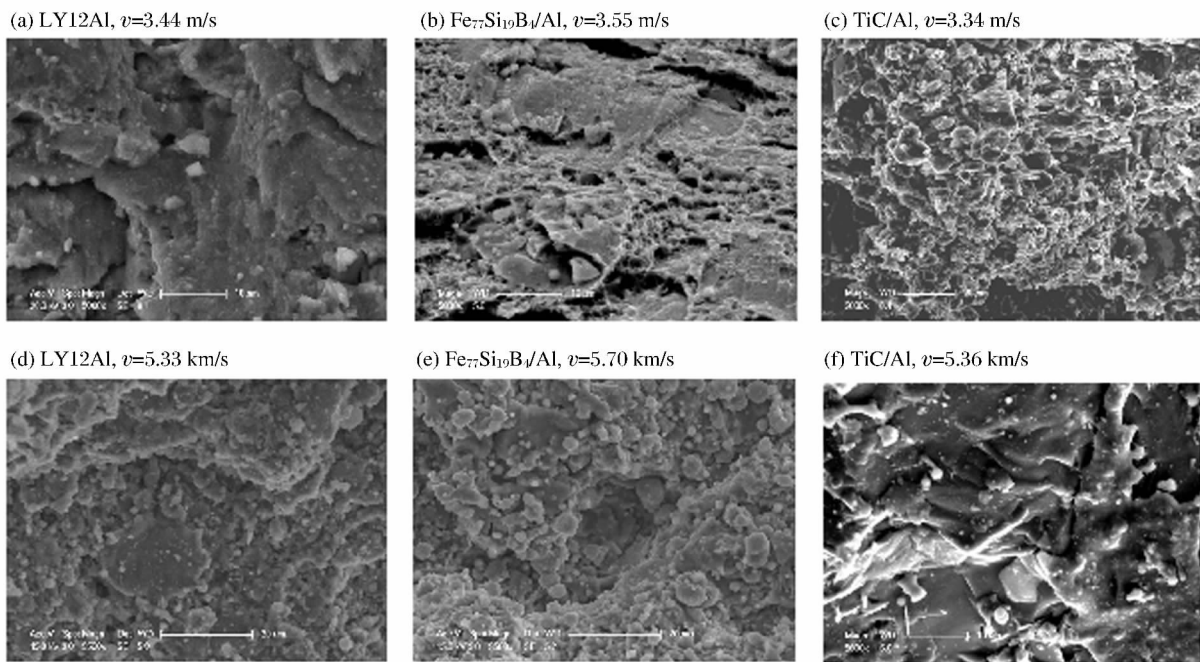


图 3 前板孔边形貌

Fig. 3 Inner surfaces in the penetration holes

2 讨论与分析

弹丸超高速撞击前板形成碎片云的过程非常复杂, 各种因素(撞击参数、弹丸及前板的材料参数、几何参数等)都会影响碎片云的形态, 进而影响结构的防护性能。为了找出这个过程中影响结构防护性能的关键量纲一参数, 对弹丸超高速撞击前板的过程进行量纲分析^[10]。

前板的作用是破碎弹丸形成碎片云, 碎片云有两个重要特征量^[14-15]: (1) 中心最大碎片的尺寸; (2) 碎片云尾部微小碎片的平均尺寸。考虑到 Whipple 防护结构的失效判据是后板出现通孔或崩落^[16], 而中心最大碎片最有可能引起防护结构失效, 因此选用中心最大碎片尺寸 d_{\max} 作为表征前板防护性能的特征参量, d_{\max} 越小, 防护性能越好。

影响 d_{\max} 的参数有: (1) 几何参数: 弹丸直径 d_p 、靶板厚度 t_b 、梯度层厚度 t_c 。(2) 材料参数: 弹丸材料密度 ρ_p 、弹丸声速 c_p 、弹丸强度 Y_p 、弹丸比热容 c_{p0} 、弹丸熔点 T_p , 前板梯度层密度 ρ_c 、梯度层声速 c_c 、梯度层比热容 c_{c0} 、梯度层熔点 T_c , 并且考虑到梯度层材料拉压强度的差异(特别对于陶瓷材料而言, 拉

压强度差异较大,而非晶合金材料拉压强度也有一定差异),其强度参数用抗压强度 Y_{cc} 和抗拉强度 Y_{ct} 分别表征。需要注意的是,对于很多材料,由于熔化热与 cT 成正比^[17],因此这里没有列出弹丸和梯度层材料的熔化热。并且由于前板基底与弹丸采用同种材料,因而基底材料参数不再单独列出。(3)撞击参数:撞击速度 v ,只考虑正撞击的情况,因而忽略撞击倾角 θ 。

可见, d_{\max} 是以上参数的函数,即

$$d_{\max} = f(d_p, t_b, t_c, \rho_p, c_p, Y_p, c_p T_p, \rho_c, c_c, Y_{cc}, Y_{ct}, c_c T_c, v) \quad (1)$$

根据 π 定理,选择弹丸直径 d_p 、靶板材料密度 ρ_c 、撞击速度 v 为基本量,则可以得到以下量纲一关系式:

$$\frac{d_{\max}}{d_p} = g \left(\frac{t_b}{d_p}, \frac{t_c}{d_p}, \frac{\rho_p}{\rho_c}, \frac{v}{c_p}, \frac{\rho_c v^2}{Y_p}, \frac{\sqrt{c_p T_p}}{v}, \frac{v}{c_c}, \frac{\rho_c v^2}{Y_{cc}}, \frac{\rho_c v^2}{Y_{ct}}, \frac{\sqrt{c_c T_c}}{v} \right) \quad (2)$$

考虑到实验中,是在相同的撞击速度下,将梯度复合 Whipple 防护结构与传统防护结构对比,主要差异在于梯度层厚度及材料的不同(传统防护结构可以理解为梯度层厚度为零)。弹丸的几何参数及材料参数完全相同,所以

$$\frac{t_b}{d_p} = C_1, \quad \frac{v}{c_p} = C_2, \quad \frac{\sqrt{c_p T_p}}{v} = C_3$$

因此,式(2)可以简化为:

$$\frac{d_{\max}}{d_p} = g \left(\frac{t_c}{d_p}, \frac{\rho_p}{\rho_c}, \frac{\rho_c v^2}{Y_p}, \frac{v}{c_c}, \frac{\rho_c v^2}{Y_{cc}}, \frac{\rho_c v^2}{Y_{ct}}, \frac{\sqrt{c_c T_c}}{v} \right) \quad (3)$$

式中: t_c/d_p 为梯度层量纲一厚度; ρ_p/ρ_c 为密度比;量纲一数 $\rho_c v^2/Y_p$ 、 $\rho_c v^2/Y_{cc}$ 和 $\rho_c v^2/Y_{ct}$,常被称为破坏数^[18],表征动压与强度的比; v/c_c 为马赫数,表征惯性与可压缩性的比; $\sqrt{c_c T_c}/v$ 是一个表征能量之比的量纲一数,分子可以理解材料被加热到熔化所需的质量热量,分母则可以理解为材料的质量动能。这 7 个量纲一参数是影响结构防护性能的关键参数。

表 3 为铝合金、非晶合金 $Fe_{77}Si_{19}B_4$ 和 TiC 金属陶瓷的材料参数。

表 3 铝合金基底及梯度层材料参数

Table 3 Material properties of coating and LY12 Al substrate

材料	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	Y_c/MPa	Y_t/MPa	$c/(km \cdot s^{-1})$	$c_p/(J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1})$	T/K
LY12Al	2.78	340	340	6.32 ¹⁾	0.90 ¹⁾	933 ¹⁾
$Fe_{77}Si_{19}B_4$	7.20 ²⁾	2 980 ³⁾	2 980 ³⁾	5.94 ⁴⁾	0.45 ⁴⁾	1 198 ⁵⁾
TiC	4.94	2 500	118.6	9.00	0.75	3 100

1)参考纯铝;2)由原子比计算得到;3)参考 $Fe_{77}Ga_3P_{9.5}C_4B_4Si_{2.5}$,忽略拉压强度差异;

4)参考钢;5)参考 $Fe_{77}Ga_5P_{12}C_4B_4$

对比铝合金和 Fe 基非晶合金的材料参数,两者的声速相差不大,忽略声速的影响。相差较大的主要是密度、强度及加热到熔化所需热量(即定压热容与熔点的乘积 cT)。在这 3 个量中,密度提高有利于提高冲击的动压,从而增大破坏数,加热到熔化所需热量的降低有利于降低材料强度(热软化引起的强度下降),因此非晶合金的这两个参数都有利于提高防护性能。而梯度层强度的提升会降低梯度层的破坏数 $\rho_c v^2/Y_c$,从而不利于梯度层自身的破坏。从实验结果看,非晶合金梯度层强度的提高并没有带来不利影响。主要原因可能有两个方面:(1)梯度层本身的厚度极薄,不可能形成太大的碎片,中心最大碎片主要还是弹丸或基底材料破碎形成的。(2)梯度层加热到熔化所需热量较小,冲击波加热造成的温升使梯度层强度大大降低,甚至已经发生了熔化。

对比铝合金和金属陶瓷的材料参数,密度、强度、声速及加热到熔化所需热量均相差较大。金属陶瓷梯度层密度较高,可以带来更高的动压,从而增大破坏数,对于提升结构的防护性能是有利的。与铝合金及非晶合金不同,金属陶瓷的拉压强度差异很大,两个梯度层破坏数中,哪一个对金属陶瓷自身的破碎影响更大呢?已有的研究表明^[10,19],弹丸冲击前板形成碎片云的过程通常可以理解成一个多重层

裂的过程, 拉伸波引起材料的动态破碎, 因而拉伸破坏数 $\rho_c v^2 / Y_{ct}$ 对梯度层的破坏起到了主要作用。金属陶瓷拉伸强度低, 其破碎必然充分。对比实验数据, 在不同的撞击速度下, 陶瓷梯度复合 Whipple 防护结构的后板迎面均有较多的微弹坑, 极有可能是陶瓷梯度层破碎产生的较小碎片造成的。而金属陶瓷声速较高, 会提升撞击过程中的冲击波幅值, 有利于破碎弹丸。另外, 金属陶瓷的熔化能较高, 不利于热软化造成强度下降, 但由于金属陶瓷本身拉伸强度较低, 因而熔化能高不会带来太大的不利影响。从实验结果看, 在较低速度 3.5 km/s 时, 陶瓷梯度复合 Whipple 防护结构的防护效果不明显, 而在较高速度 5.5 km/s 时防护效果显著, 主要原因可能在于较低撞击速度时梯度层量纲一厚度 t_c/d_p 较小, 以及金属陶瓷材料性质具有较大分散性。

3 结 论

利用二级轻气炮在两种撞击速度下对两种新型梯度复合 Whipple 防护结构以及传统的 Whipple 防护结构分别进行了超高速撞击实验, 并利用 SEM 对前板冲孔进行了微观观测。实验结果表明: 采用 Fe 基非晶合金复合的梯度防护结构, 在弹丸撞击速度为 3.5 和 5.5 km/s 时, 后板损伤程度均较低, 防护性能优于传统 Whipple 防护结构; 而采用陶瓷复合的梯度防护结构, 则在弹丸撞击速度为 5.5 km/s 时具有明显优势, 后板既没有主弹坑, 次弹坑数目也极少, 几乎全为微弹坑, 显示出极强的防护能力。量纲分析的结果表明, 防护结构的防护性能主要受到梯度层量纲一厚度、相对密度、马赫数、破坏数、相对熔化能等 7 个量纲一参数影响。梯度层的存在, 可有效增大弹丸破坏数, 有利于提高新型防护结构的防护性能。

参考文献:

- [1] Whipple F L. Meteorites and space travel[J]. *Astronomical Journal*, 1947, 52: 131-131.
- [2] Schonberg W P, Bean A J. Hypervelocity impact response of aluminum multi-wall structures[J]. *Acta Astronautica*, 1991, 25: 363-373.
- [3] Christiansen E L, Kerr J H. Ballistic limit equations for spacecraft shielding[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 26: 93-104.
- [4] 张庆明, 黄风雷. 超高速碰撞动力学引论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [5] Schonberg W P, Compton L E. Application of the NASA/JSC Whipple shield ballistic limit equations to dual-wall targets under hypervelocity impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35: 1792-1798.
- [6] Buyuk M, Kurtaran H, Marzougui D, et al. Automated design of threats and shields under hypervelocity impacts by using successive optimization methodology[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35: 1449-1458.
- [7] Zhang Q M, Chen Y, Huang F, et al. Experimental study on expansion characteristics of debris clouds produced by oblique hypervelocity impact of LY12 aluminum projectiles with thin LY12 aluminum plates[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35: 1884-1891.
- [8] Cour-Palais B G. Hypervelocity impact in metals, glass and composites[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1987, 5: 221-237.
- [9] 戴兰宏. 新型梯度复合 Whipple 空间防护结构的研究[R]. KJSP06204, 2010.
- [10] 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.
- [11] Wei S C, Xu B S, Wang H D, et al. Comparison on corrosion-resistance performance of electro-thermal explosion plasma spraying FeAl-based coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2007, 201: 5294-5297.
- [12] Tamura H, Konoue M, Sawaoka A B. Zirconium boride and tantalum carbide coatings sprayed by electrothermal explosion of powders[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1997, 6: 463-468.
- [13] 张庆明, 谈庆明, 张德良, 等. 超高速冲击铝双层板的熔化效应[J]. *力学学报*, 1995, 27: 257-266.
Zhang Qing-ming, Tan Qing-ming, Zhang De-liang, et al. Melting effects of aluminum dual-sheet structure in hy-

- pervelocity impact[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1995,27:257-266.
- [14] Grady D E. Comparison of hypervelocity fragmentation and spall experiments with Tuler-Butcher spall and fragment size criteria[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006,33:305-315.
- [15] Piekutowski A J. Formation and description of debris clouds produced by hypervelocity impact[R]. NASA CR-4707, 1996.
- [16] Christiansen E L. Design and performance equations for advanced meteoroid and debris shields[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1993,14:145-156.
- [17] Westine P S, Mullin S A. Scale modeling of hypervelocity impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1987,5:693-701.
- [18] Johnson W. *Impact Strength of Materials*[M]. London: Edward Arnold, 1972.
- [19] Anderson C E, Trucano T G, Mullin S A. Debris cloud dynamics[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1990,9:89-113.

Hypervelocity impact experiments on new gradient Whipple shield structure

Huang Xin¹, Ling Zhong¹, Liu Zong-de², Zhang Hu-sheng¹, Dai Lan-hong¹

(1. *State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*;

2. *Key Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment of Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China*)

Abstract: The protective capability of a new gradient Whipple shield structure was investigated. The new structure consists of a gradient bumper at some stand-off distance from a rear wall. Different from a traditional monolithic LY12 Al bumper, the gradient bumper is a double-layer structure in which a coating of metallic glass or ceramic is deposited on a substrate of LY12 Al alloy. To evaluate the performance of this new shield structure, hypervelocity experiments were conducted on two new Whipple shields (with different coating materials) and one traditional shield using a two-stage light-gas gun at the velocities of 3.5 and 5.5 km/s. Damages including a penetration hole in the front bumper and craters on the rear wall were studied. The results show that the protective capability of the new shield with Fe-based metallic glass coating is higher than that of the traditional one at the velocities of both 3.5 and 5.5 km/s, and the shield with ceramic coating is apparently better than the traditional one at the velocity of 5.5 km/s. A dimensional analysis of the parameters involved in the hypervelocity impact indicates the important dimensionless parameters that influence the performance of the new shields. It is found that the gradient bumper can increase the damage number of the projectile, therefore the new shield structure can provide higher protection level than the traditional one.

Key words: solid mechanics; metallic glass; ceramic; hypervelocity impact; space debris; Whipple shield