

Ti/Al/Mg 阻抗梯度结构超高速撞击数值模拟

陈兴¹, 徐大富², 刘占芳³, 卫国宁², 卢永刚^{1*}

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201108;
3. 重庆大学 航空航天学院, 重庆 400044)

摘要:基于 AUTODYN 有限元软件, 研究 Ti/Mg 厚度比值(简称 Ti/Mg 比值)、结构厚度/弹丸直径(t/D) 比值和撞击角度 θ 对 Ti/Al/Mg 阻抗梯度结构超高速撞击特性的影响。结果表明, Ti/Mg 厚度比值对外泡碎片云膨胀特性的影响在 5% 以内, 但增加 Ti/Mg 比值能提高弹丸的破碎程度, Ti/Mg 比值在 0.625 ~ 1 之间结构耗能特性最佳; 随着 t/D 比值的增加, 外泡碎片云膨胀速度和弹丸中心大碎片质量越小, 而结构的单位面密度吸能量降低; 斜撞击有利于阻抗梯度结构对弹丸动能的耗散, 但会降低弹丸的破碎程度, θ 大于 40° 或 50° 后, “滑弹效应” 对阻抗梯度结构撞击特性的影响较为显著; 阻抗梯度结构穿孔面积随 Ti/Mg 比值和 t/D 比值的增加而降低, 随 θ 增加而增加, 并基于量纲分析拟合出了阻抗梯度结构的无量纲穿孔面积经验计算公式。

关键词:空间碎片; 阻抗梯度结构; 超高速撞击; 撞击特性

中图分类号: O382 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2025)01-136-11



论
文
拓
展

Numerical simulation of Ti/Al/Mg impedance-graded structure under hypervelocity impact

CHEN Xing¹, XU Dafu², LIU Zhanfang³, WEI Guoning², LU Yonggang^{1*}

(1. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. Shanghai Institute of Aerospace Systems Engineering, Shanghai 201108, China;

3. College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The effects of Ti/Mg thickness ratio (abbreviated as Ti/Mg ratio), structural thickness/projectile diameter (t/D) ratio and impact angle θ on the hypervelocity impact characteristics of Ti/Al/Mg impedance gradient structures were studied with AUTODYN finite element software. Results show that the influence of Ti/Mg ratio on the expansion characteristics of the outer bubble fragment cloud is within 5%, but increasing the Ti/Mg ratio can improve the degree of fragmentation of the projectile. The structural energy absorption characteristics are best within the range of 0.625 to 1. The expansion speed of the outer bubble fragment cloud and the mass of the large fragment at the center of the projectile decrease with the increase of t/D ratio, while the unit face density energy absorption decreases. Oblique impact is beneficial to the dissipation of projectile kinetic energy by the impedance gradient structure, but it will reduce the degree of fragmentation of the projectile. After θ exceeds 40° or 50°, the "slip effect" has a significant impact on the impact characteristics of the impedance gradient structure. The perforation area of the impedance gradient structure decreases with the increase of Ti/Mg ratio and t/D ratio, and increases with the increase of θ , and an empirical formula for the dimensionless perforation area of the impedance gradient structure is obtained based on dimensional analysis.

Keywords: space debris; impedance-graded structure; hypervelocity impact; impact characteristics

目前, 空间碎片总质量已经高达 7 000 t, 近地空间 mm 级碎片总数量更是以百亿计, 其速度通常能够达到几 km/s 甚至几十 km/s。对于 cm 级及以上尺寸的空间碎片, 采取探测预警和机

动规避方式进行防御, 但是 mm 级碎片无法探测追踪, 导致近地空间航天器与 mm 级碎片存在极大的撞击概率^[1]。因此针对 mm 级空间碎片的撞击特性进行防护结构的研究具有极高的应用

收稿日期: 2022-10-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11672278)

第一作者: 陈兴(1993—), 男, 重庆潼南人, 博士研究生, E-mail: chenxing21@gscap.ac.cn

*通信作者: 卢永刚(1973—), 男, 四川遂宁人, 研究员, 博士, 博士生导师, E-mail: lygcap@263.net

引用格式: 陈兴, 徐大富, 刘占芳, 等. Ti/Al/Mg 阻抗梯度结构超高速撞击数值模拟[J]. 国防科技大学学报, 2025, 47(1): 136-146.

Citation: CHEN X, XU D F, LIU Z F, et al. Numerical simulation of Ti/Al/Mg impedance-graded shields under hypervelocity impact[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47(1): 136-146.

价值。

Whipple 构型属于典型的被动防护结构,由两层间隔薄板构成^[2]。其中缓冲屏(前板)的主要作用是在超高速初始撞击过程中使空间碎片破碎,形成不断扩张的碎片云,将点能量分散为面能量,降低舱壁(后墙)的毁伤^[3-4]。可见,缓冲屏决定了 Whipple 构型对空间碎片的破碎能力。基于 Whipple 构型衍生出多种增强型结构,如多层板构型、填充式构型、夹芯板构型、波纹板构型,防护材料也由铝合金扩展到了陶瓷材料、Nextel/Kevlar 纤维、Al/聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE)含能材料^[5-8]。在此背景下,学者提出了将阻抗梯度结构运用于缓冲屏的设计思路,超高速撞击试验表明正阻抗梯度结构能够增强 Whipple 结构的防护性能^[9-12]。

北京卫星环境研究所提出了一种由 Ti、Al、Mg 三种材料构成的功能梯度缓冲屏。侯明强等^[13]、张品亮等^[14-15]研究 Al/Mg 阻抗梯度结构的超高速撞击性能,相对于等面密度的铝合金防护屏,Al/Mg 梯度结构改变了冲击波在靶板中的传播特性,提升了防护屏的内能转化率,具有更高的动能耗散特性;宋光明等^[16]、张品亮等^[17]开展了 Ti/Al/Mg 阻抗梯度结构的撞击试验,研究了碎片云特性和撞击极限,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,使弹丸破碎更加充分,碎片云侧向扩展程度更高;郑克勤等^[18]在撞击试验的基础上,结合光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics, SPH)数值模拟方法,推导出 Ti/Al/Mg 结构中各材料的冲击相变判据,研究表明,当撞击速度大于 4 km/s 时,碎片云会发生不同程度的熔化和气化。

由上述研究不难看出 Ti/Al/Mg 阻抗梯度结构在超高速撞击防护领域有着很好的应用前景,但作为一种新结构,目前主要针对阻抗梯度结构超高速撞击碎片云分布、弹道极限等特性的研究,缺乏对阻抗梯度结构超高速撞击特性影响规律的研究。因此,本文以 Ti/Al/Mg 阻抗梯度结构为研究对象,采用 AUTODYN 有限元软件,在三种速度(3.5 km/s、5 km/s、6.5 km/s)下开展阻抗梯度结构超高速撞击数值模拟;从材料破碎、碎片云膨胀、能量耗散和穿孔特性四个方面出发,研究 Ti/Mg 厚度比(简称 Ti/Mg 比值)、撞击角度 θ 和 t/D (结构厚度/弹丸直径)比值对结构撞击特性的影响规律。

1 数值计算模型与有效性验证

1.1 数值计算模型

参考文献[17]中超高速撞击试验建立图 1 所示的数值计算模型。采用 SPH 算法,粒子大小为 0.01 mm, Ti/Al/Mg 结构总厚度 $t = 1.8$ mm, 面密度为 0.419 g/cm², 与 1.5 mm 厚的 2024-T4 铝合金结构等效,靶板平面尺寸为 4 cm × 4 cm^[18],靶板四周采取固定边界约束;弹丸材质为 2024-T4,直径 $D = 5.25$ mm。添加层裂失效模型,失效参数设置为 0.15,失效随机因子为 16.0^[19]。

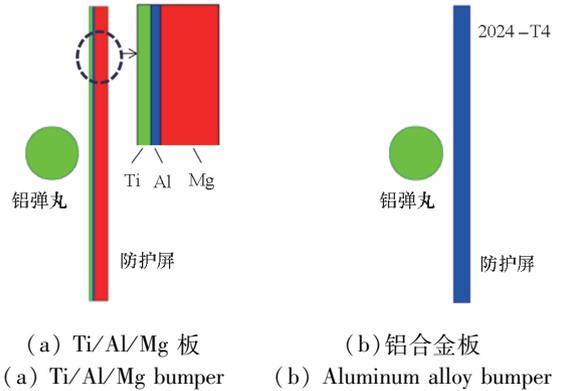


图 1 超高速撞击数值计算模型

Fig. 1 Numerical calculation model of hypervelocity impact

1.2 材料模型与参数

当撞击速度高于 4 km/s 时,涉及材料的相变,因此采用能够描述物质凝聚态和膨胀态的 Tilloston 状态方程。Tilloston 状态方程可以描述物质的固态、液态和气态,其具体表达式如下:

凝聚态压力为:

$$p_c = \left(a + \frac{b}{E/(E_0\eta^2) + 1} \right) \frac{E}{V} + A\mu + B\mu^2 \quad (1)$$

膨胀态压力为:

$$p_e = a \frac{E}{V} + \left[\frac{b}{E/(E_0\eta^2) + 1} \frac{E}{V} + A\mu e^{-\beta(\frac{\rho_0}{\rho} - 1)} \right] e^{-\alpha(\frac{\rho_0}{\rho} - 1)^2} \quad (2)$$

p_m 为混合相区域的压力,可以通过线性插值的方式得到,即:

$$p_m = p_c + \frac{(p_e - p_c)(E - E_s)}{(E'_s - E_s)} \quad (3)$$

其中: a 、 b 、 α 和 β 为材料参数; A 为弹性模量; B 为硬化模量; E 为比内能; V 为比容, $V = 1/\rho$, ρ 为密度; η 为压缩率, $\eta = \rho/\rho_0 = V/V_0$, ρ_0 为常温密度, V_0 为初始比容; $\mu = \eta - 1$; E_s 为升华能,即初始气化能量; E'_s 为完全气化所需的能量。

采用 Steinberg-Guinan 本构模型描述高温高压下材料的动态力学性能,本构方程具体表达式如下:

$$G = G_0 \left[1 + \frac{G'_p}{G_0} \cdot \frac{p}{\eta^{1/3}} + \frac{G'_T}{G_0} (T - 300) \right] \quad (4)$$

$$Y = Y_0 [1 + \beta'(\varepsilon + \varepsilon_i)]^n \cdot \left[1 + \frac{Y'_p}{Y_0} \cdot \frac{p}{\eta^{1/3}} + \frac{Y'_T}{Y_0} (T - 300) \right] \quad (5)$$

式中: G 为剪切模量; G_0 为常温常压下的剪切模量; G'_p 为 G 对压力 p 的 1 阶偏导数; G'_T 为 G 对温度 T 的 1 阶偏导数; Y 为屈服强度; Y_0 为取最高应变率或最低温度试验的初始屈服强度; β' 、 n 为应变硬化参数; ε 为塑性应变; ε_i 为初始塑性应变; Y'_p 为 Y 对压力 p 的 1 阶偏导数; Y'_T 为 Y 对温度 T 的 1 阶偏导数。三种材料参数见表 1 和表 2^[18]。

表 1 材料 Tilloston 状态方程参数

Tab. 1 Material Tilloston equation of state parameters

材料参数	材料		
	2024 - T4	Ti	Mg
$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	2.784	4.419	1.775
A / GPa	75	103	36.4
B / GPa	65	50	27.9
a	0.5	0.5	0.5
b	1.63	0.6	0.93
α	5	5	5
β	5	5	5
$E_0 / (\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	5	7	8.77
$E'_s / (\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	3	3.5	1.05
$E_s / (\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	15.7	12.5	5.278

表 2 材料 Steinberg-Guinan 本构模型参数

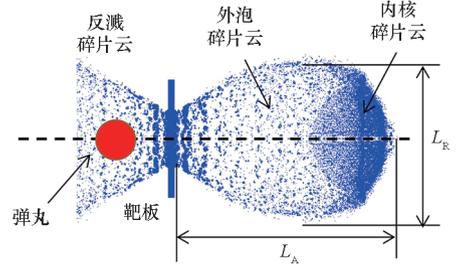
Tab. 2 Parameters of Steinberg-Guinan constitutive model

材料参数	材料		
	2024 - T4	Ti	Mg
G_0 / GPa	28.6	41.9	16.5
Y_0 / GPa	0.26	1.33	0.19
Y_m / GPa	0.76	2.12	0.48
β'	310	12	1 100
n	0.185	0.1	0.12
G_p	1.864 7	0.481 9	1.699 5
$G_T / (\text{MPa} \cdot \text{K}^{-1})$	-17.62	-26.98	-8.4
Y_p	0.016 95	0.015 3	0.019 57
T_m / K	1 220	2 110	1 150

1.3 碎片云参数定义

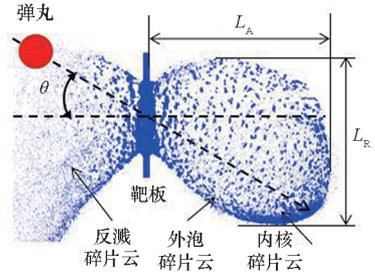
超高速撞击形成的碎片云由反溅碎片云、外泡碎片云及内核碎片云构成,如图 2 所示。反溅

碎片云运动方向与弹丸速度相反;外泡碎片云由靶板材料破碎后形成的封闭壳体构成;内核碎片云由弹丸碎片构成,位于外泡碎片云内部的前方。斜撞击时定义弹丸速度方向与梯度结构法向的夹角为撞击角度 θ 。碎片云的几何形貌由轴向长度 L_A 和径向尺寸 L_R 定义。



(a) 垂直撞击

(a) Normal impact



(b) 斜撞击

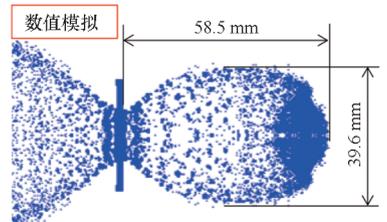
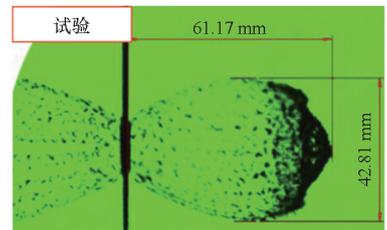
(b) Oblique impact

图 2 碎片云几何参数示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the geometric parameters of debris cloud

1.4 数值计算结果有效性验证

为验证数值计算结果的有效性,利用本文中的数值计算方法和材料参数对文献[14,16]中的试验进行数值模拟,结果对比如图 3、图 4 所示。



(a) 铝合金板

(a) Aluminum alloy bumper

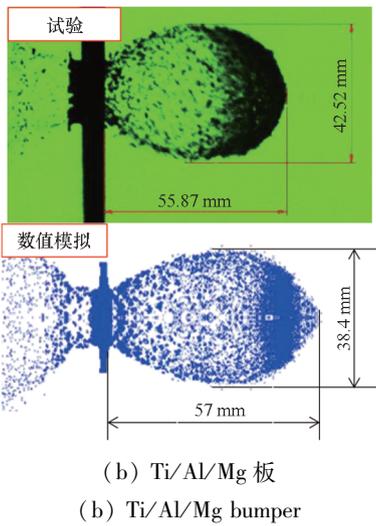
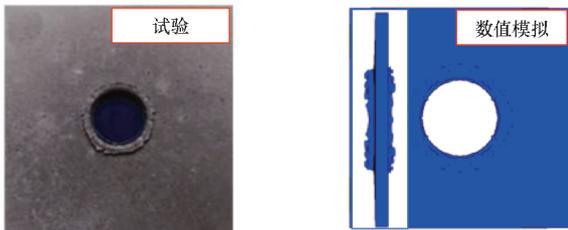


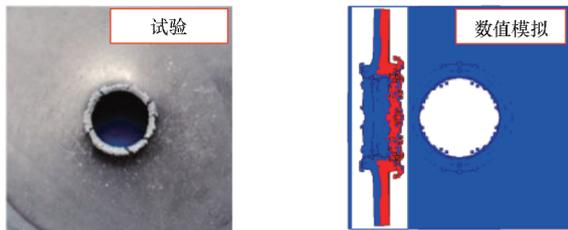
图 3 碎片云几何尺寸对比^[16]

Fig. 3 Comparison of debris cloud geometry^[16]

由图可知数值计算能够准确反映出碎片云的几何特征和靶板穿孔形貌。表 3 为特征参数对比结果,由表可知结果误差绝对值在 10% 以内。可见,本文所采用的数值方法和材料参数能够准确模拟超高速撞击现象。



(a) 铝合金板
(a) Aluminum alloy bumper



(b) Al/Mg 板
(b) Al/Mg bumper

图 4 防护屏穿孔形貌对比^[14]

Fig. 4 Comparison of perforation morphology of shield bumpers^[14]

2 阻抗梯度结构防护特性分析

2.1 材料破碎特性

材料的破碎特性与波系的传播和演化有直接联系,以阻抗梯度结构为例,简要说明冲击波和稀疏波相互作用过程,如图 5 所示。弹丸和靶板撞

表 3 特征参数试验与数值计算对比

Tab. 3 Comparison of characteristic parameters experiment and simulation

特征参数	铝合金靶板		
	试验结果/ mm	数值结果/ mm	误差/%
碎片云直径	42.81	39.6	-7.5
碎片云长度	61.17	58.5	-4.4
穿孔直径	12.20	11.0	-9.8
特征参数	阻抗梯度靶板		
	试验结果/ mm	数值结果/ mm	误差/%
碎片云直径	42.52	38.4	-9.7
碎片云长度	55.87	57.0	2.02
穿孔直径	13.50	12.7	-5.9

击后产生的冲击波 S_1 和 S_2 分别向弹丸和靶板中传播,弹丸和靶板接触边缘位置会产生稀疏波 R'_1 ,当 S_2 到达钛铝界面时,界面处产生透射波 S'_2 和反射稀疏波 R_2 ,同理 R_3 和 R_4 也为反射稀疏波, R_2 、 R_3 和 R_4 向弹丸中传播并追赶 S_1 ,若未追赶上 S_1 ,则 S_1 在弹丸尾部自由面反射稀疏波 R_1 ,当 R_1 和 R_2 、 R_3 、 R_4 相遇,将形成拉伸作用,拉伸应力高于材料强度将发生层裂失效。材料层裂失效模式与撞击速度、弹靶材料、弹靶径厚比有关。

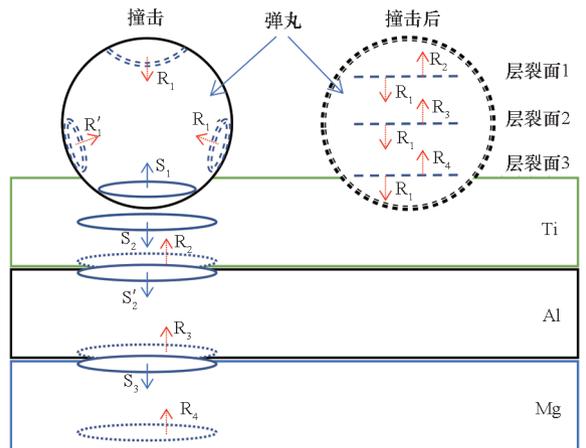


图 5 冲击波和稀疏波传播过程示意图

Fig. 5 Shock wave and rarefaction wave propagation processes

以撞击速度 6.5 km/s 为例,分析阻抗梯度结构的材料破碎特性,并与铝合金结构对比,图 6 为弹丸/靶板材料失效情况。由图可知,相同速度下阻抗梯度结构失效区域大于铝合金结构,失效区域呈“半月型”,失效区域宽度与弹丸直径相当;

而铝合金防护屏的失效区域主要位于鼓包内侧,呈点状分布,各失效区域并未相互贯通。弹丸材料的失效模式相似,尾部发生层裂并逐渐扩展到侧面,头部存在未失效的完整区域,当弹丸材料扩散后,此部分材料将形成弹丸中心大碎片,是舱壁结构的主要威胁来源。

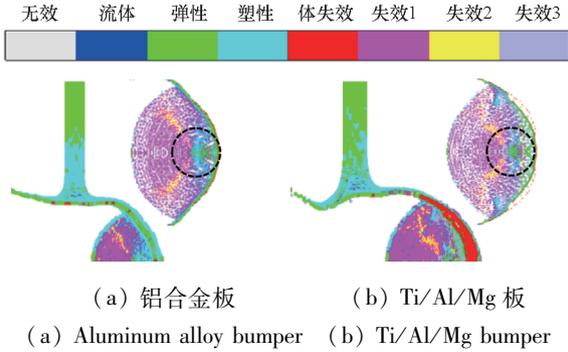


图 6 弹丸/靶板材料失效情况 ($V=6.5 \text{ km/s}$)
Fig. 6 Material failure of projectile/target plate ($V=6.5 \text{ km/s}$)

受限于建模粒子尺寸 (0.01 mm), 统计碎片特征长度 0.01 mm 以上的碎片, 统计情况如图 7 和表 4 所示。可知碎片云总数量均随着撞击速度的增加而增加, 阻抗梯度结构碎片总数量增加更为显著; 阻抗梯度结构 $[0.001 \text{ mg}, 0.01 \text{ mg}]$ 的碎片数量占比 (71%) 明显高于铝合金结构 (49%), 而质量大于 1 mg 的碎片数量却低于铝合金结构; 并且采用阻抗梯度结构, 弹丸中心大碎片的质量较铝合金结构低。可见钛合金的高阻抗特性, 使阻抗梯度结构产生的冲击压力更高, 压力脉冲持续时间更长, 且冲击波多次加载、卸载, 材料发生多次层裂, 碎片数量更多, 弹丸中心大碎片质量更小^[12,14,16]。

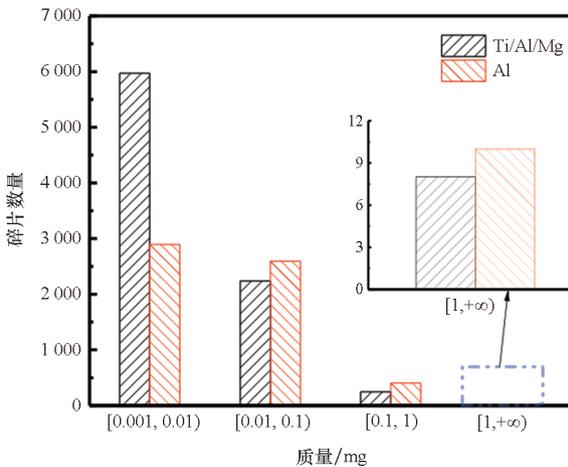


图 7 碎片云质量分布特性 ($V=6.5 \text{ km/s}$)
Fig. 7 Mass distribution characteristics of debris cloud ($V=6.5 \text{ km/s}$)

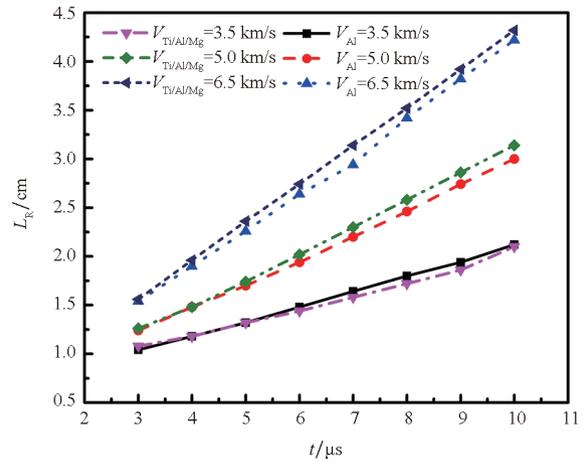
表 4 碎片云特征参数统计

Tab. 4 Characteristic parameter statistics of debris cloud

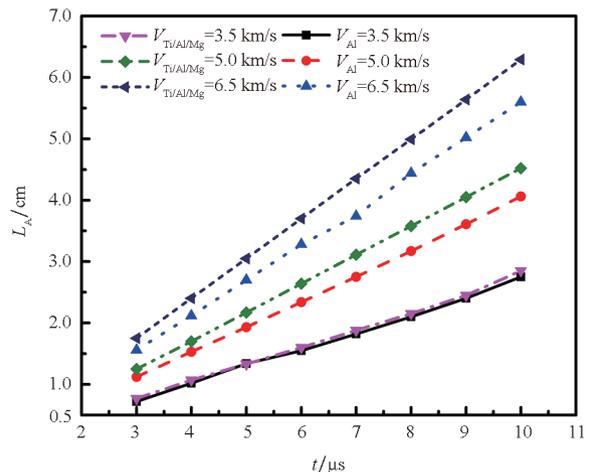
$V/$ (km/s)	碎片云总数量		中心大碎片质量/mg	
	阻抗 结构	铝合金 结构	阻抗 结构	铝合金 结构
3.5	1 360	930	157	258
5.0	3 380	2 213	18	49
6.5	8 454	5 899	1.9	22

2.2 碎片云膨胀特性

外泡碎片云直径和长度随时间的变化规律如图 8 所示。由图可知, 碎片云直径和长度与时间近似呈线性关系, 撞击速度越大, 直线斜率越大, 即碎片云膨胀速度越大。在速度为 3.5 km/s 时, 两种结构产生的碎片云直径和长度增长速率相近; 在 5.0 km/s 和 6.5 km/s 时, 阻抗梯度结构碎



(a) 碎片云直径
(a) Diameter of debris cloud



(b) 碎片云长度
(b) Length of debris cloud

图 8 碎片云直径、长度随时间变化曲线
Fig. 8 Diameter and length of debris cloud with times

片云径向膨胀速度高于铝合金结构,但碎片云头部膨胀速度大致相等。碎片云径向膨胀速度越高,表明碎片云的扩散面积越大,有利于降低碎片云的能量密度,减轻舱壁的毁伤程度。

2.3 结构耗能特性

超高速撞击阻抗梯度结构材料内能会增加,通过研究材料内能变化规律,能够分析出结构的动能耗散特性。图 9 为阻抗梯度结构内能时程曲线,由图可知,材料内能随撞击速度的增加而增加,当撞击速度相同时,阻抗梯度结构的内能均大于铝合金结构,撞击速度由 3.5 km/s 增加至 6.5 km/s 时,两种结构的内能差增加了约 8.9 倍。表 5 为阻抗梯度结构各层材料的内能占比情况,可以看出镁合金吸能最多,其次是钛合金,铝合金最少;随着撞击速度的增加,钛合金吸能占比逐渐下降,镁合金吸能占比逐渐增加,而铝合金吸能占比几乎不变。可知在该阻抗梯度结构中,低阻抗的镁合金层是主要的吸能部件。

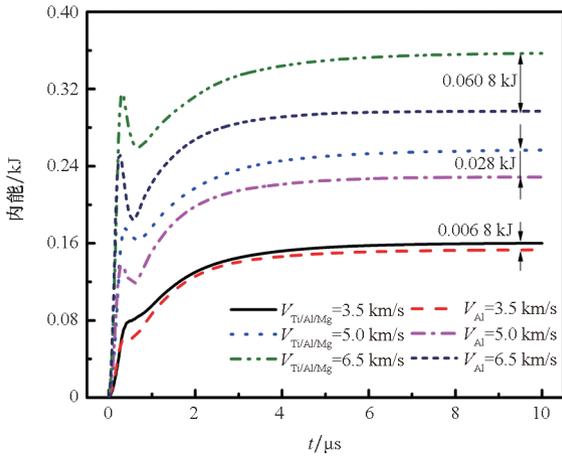


图 9 阻抗梯度结构内能时程曲线

Fig. 9 Internal energy time history curve of impedance gradient structure

表 5 波阻抗梯度结构材料内能占比

Tab. 5 Internal energy ratio of wave impedance gradient structural materials

V/ (km/s)	阻抗梯度结构		
	Ti/%	2024-T4/%	Mg/%
3.5	41.52	12.95	45.53
5.0	37.31	12.39	50.30
6.5	33.83	12.98	53.19

图 10 为两种结构穿孔面积随撞击速度的变化规律。由图可知,随着撞击速度的增加,穿孔面积近似线性增加,相同撞击速度下,阻抗梯度结构

的穿孔面积大于铝合金结构,且随着速度的增加,面积差值越大。穿孔面积与弹丸动能耗散量呈正相关^[20],表明在相同面密度条件下,阻抗结构耗散的弹丸动能越多。

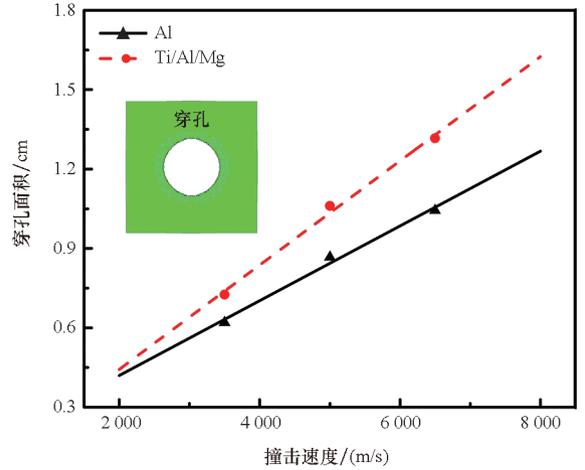


图 10 穿孔面积随撞击速度的变化

Fig. 10 Variation of perforation areas with impact velocity

通过对比两种结构的防护特性可知,阻抗梯度结构使碎片云扩展区域更广,降低碎片云能量密度,增加弹丸和防护屏材料的破碎程度,降低弹丸中心大碎片质量,耗散更多的弹丸动能。因此,阻抗梯度结构的防护性能优于相同面密度的铝合金结构。

3 阻抗梯度结构撞击特性影响因素分析

本文研究 Ti/Mg 比值、撞击角度 θ 和 t/D 比值三种因素对阻抗梯度结构防护性能的影响,具体计算工况如表 6 所示,单一因素研究时,控制其余因素不变。文中阻抗梯度结构的面密度在分析中保持不变,因此在分析 t/D 比值时,结构厚度 t 不变,只改变弹丸直径 D 。

表 6 计算工况

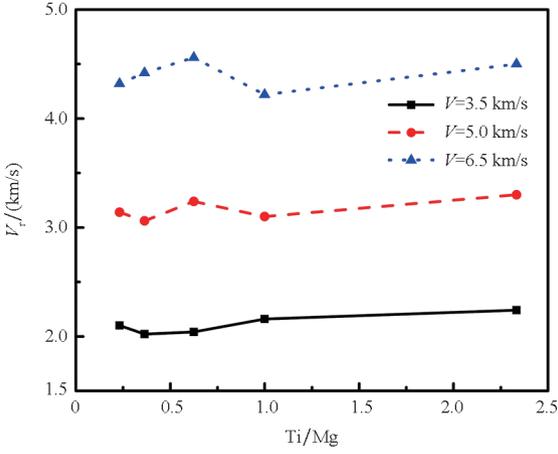
Tab. 6 Numerical simulation calculation conditions

Ti/Mg 比值	$\theta/(\circ)$	t/D 比值	V/(km/s)
0.231 ~ 2.333	0	0.343	3.5, 5.0, 6.5
0.231	0 ~ 60	0.343	
0.231	0	0.343 ~ 0.554	

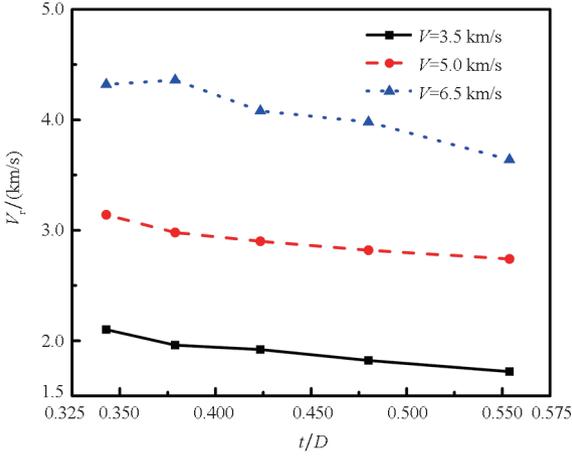
3.1 外泡碎片云膨胀特性分析

以外泡碎片云径向膨胀速度 V_r 和头部膨胀速度 V_a 来表征碎片云的膨胀特性。图 11、图 12 分别为外泡碎片云径向膨胀速度和头部膨胀速度变化规律。由图 11、图 12 可知,随着撞击速度的

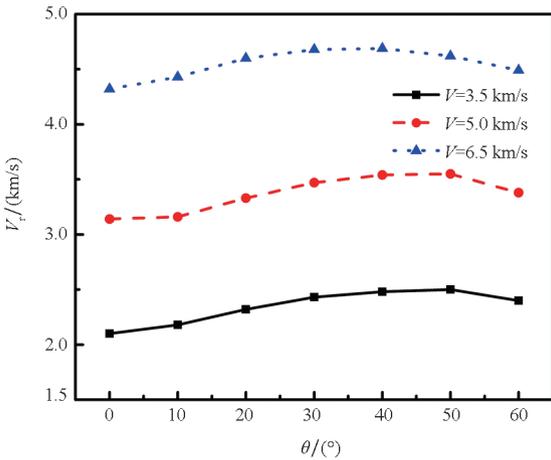
增加,外泡碎片云膨胀速度越大,并且头部膨胀速度高于径向膨胀速度。外泡碎片云径向和头部膨胀速度随着 Ti/Mg 比值的增加振荡变化,但是整



(a) Ti/Mg 比值
(a) Ratio of Ti/Mg



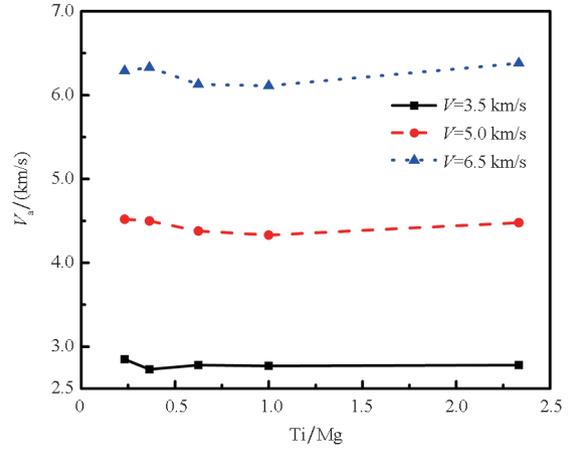
(b) t/D 比值
(b) Ratio of t/D



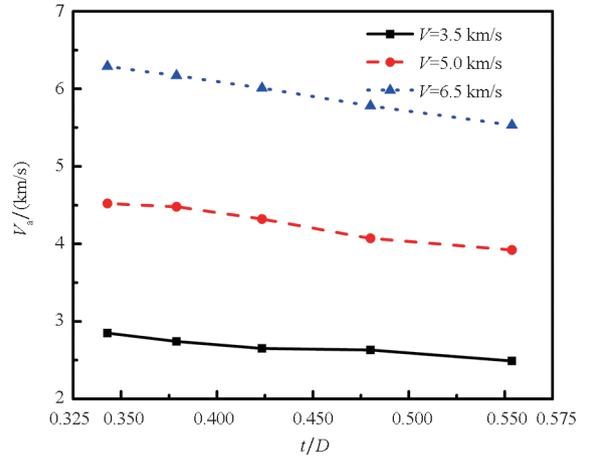
(c) 撞击角度 θ
(c) Impact angle θ

图 11 外泡碎片云径向膨胀速度

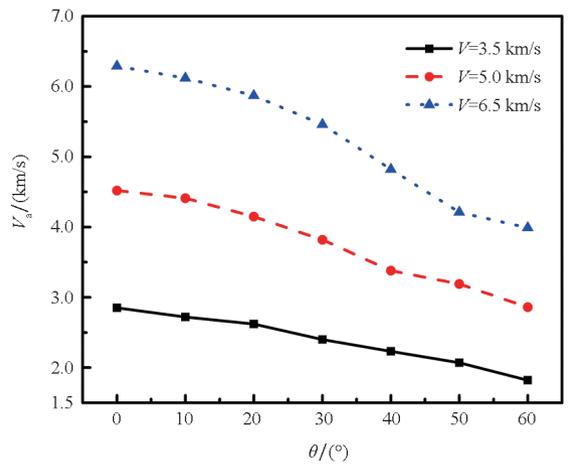
Fig. 11 Radial expansion velocity of external bubble debris



(a) Ti/Mg 比值
(a) Ratio of Ti/Mg



(b) t/D 比值
(b) Ratio of t/D



(c) 撞击角度 θ
(c) Impact angle θ

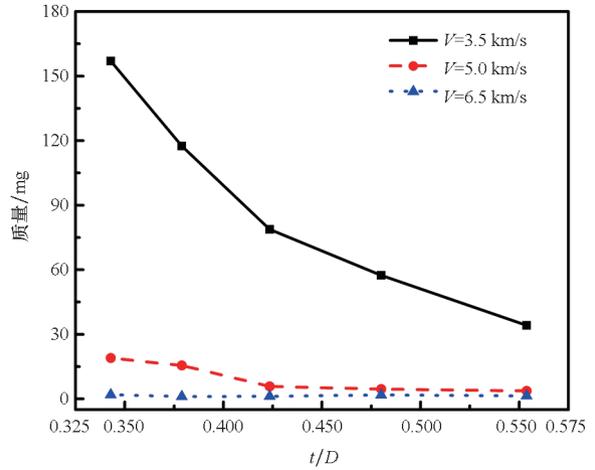
图 12 外泡碎片云头部膨胀速度

Fig. 12 Head expansion velocity of external bubble debris
体速度的变化在 5% 以内,可见阻抗梯度结构配置方案不变时,Ti/Mg 比值的变化对外泡碎片云膨胀特性的影响较小。随着 t/D 比值的增加,阻

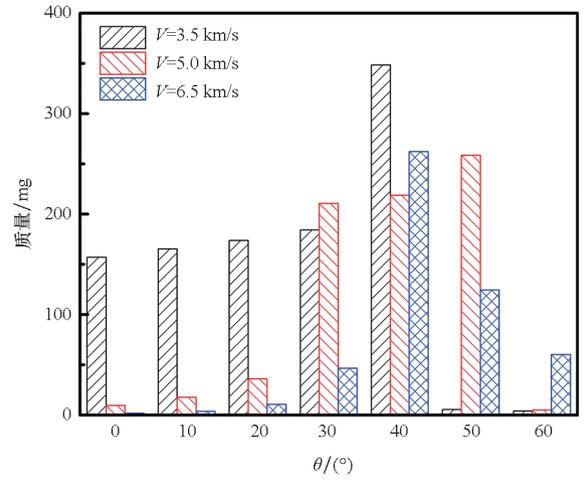
抗梯度结构单位厚度所占弹丸动能的比值逐渐降低,因此外泡碎片云径向、头部膨胀速度随 t/D 比值的增加而线性下降。当斜撞击时,弹丸存在切向和法向的速度分量,随着 θ 的增加,切向速度逐渐增加,而法向速度逐渐降低,因此外泡碎片云径向膨胀速度随 θ 的增加而逐渐增加,头部膨胀速度逐渐降低;当 θ 大于 40° (或 50°) 时,弹丸“滑弹效应”较为明显,用于侵彻靶板的弹丸质量会减少,导致弹丸切向的动量降低,因此碎片云径向膨胀速度又逐渐降低。

3.2 弹丸中心大碎片质量特性分析

弹丸中心大碎片质量如图 13 所示,由图可知,撞击速度越大,弹丸破碎程度越高,中心大碎片质量越小。由图 13 (a) 和图 13 (b) 可知, Ti/Mg、 t/D 比值对中心大碎片质量变化规律的影响差不多;速度为 3.5 km/s 和 5.0 km/s 时,中心大碎片质量逐渐下降,但 3.5 km/s 速度下中心大碎片质量下降更为显著;6.5 km/s 时中心大碎片质量呈振荡变化,但是振荡幅度在 5% 以内,可以认为 6.5 km/s 撞击速度下, Ti/Mg、 t/D 比值对弹丸中心大碎片质量无影响。这是因为 Ti/Mg 和 t/D 比值的增加等同于增加靶板厚度,由图 5 可知,靶板厚度直接影响界面反射稀疏波对冲击波 S_1 的追赶卸载,根据“薄板最优厚度”理论可知,随着靶板厚度和弹丸初速的增加,弹丸破碎程度加剧,当靶板达到某临界厚度时,靶板厚度对弹丸破碎程度的影响不大^[21]。由图 13 (c) 可知,中心大碎片质量随 θ 先增加后降低,在 $40^\circ \sim 50^\circ$ 时达到最大值。斜撞击时弹丸入射速度沿靶板平面存在法向和切向速度,导致应力波在弹丸材料中分布不均,应力波的传播会受到削弱,因此弹丸破碎程度降低;而当 θ 超过临界值时会发生“滑弹效应”,



(b) t/D 比值
(b) Ratio of t/D



(c) 撞击角度 θ
(c) Impact angle θ

图 13 弹丸中心大碎片质量

Fig. 13 Mass of the large fragment in the centre of the projectile

且 θ 越大弹丸质量损失越大^[22],因此中心大碎片质量又下降,但总体而言斜撞击不利于弹丸的层裂破碎。

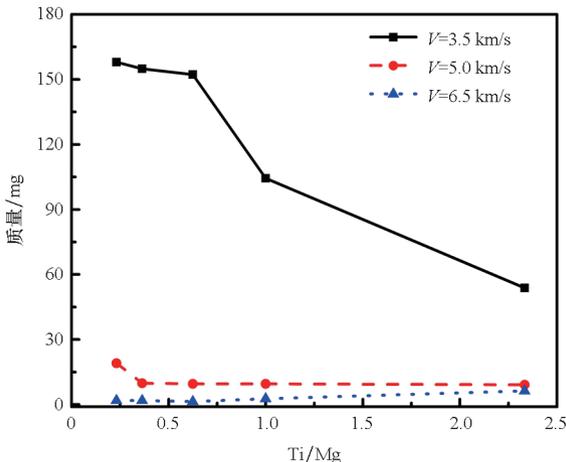
3.3 阻抗梯度结构吸能特性分析

弹丸撞击阻抗梯度结构之后,部分动能转换为结构的能量,阻抗梯度结构的吸能性能可用单位面密度吸收能 E_A 表征,则:

$$E_A = \frac{E_t}{\rho_A} \quad (6)$$

式中: E_t 为梯度结构总的吸收能,在文中用弹丸撞击前后动能差来表征; ρ_A 为梯度结构面密度,文中为 0.419 g/cm^2 。

计算得到不同条件下结构单位面密度吸能变化规律,如图 14 所示。由图可知,随着 Ti/Mg 比值的增加, E_A 先增加后下降, Ti/Mg 比值在



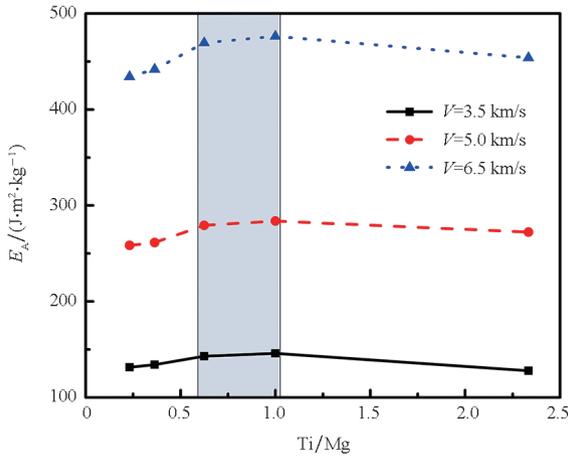
(a) Ti/Mg 比值
(a) Ratio of Ti/Mg

0.625 ~ 1 之间时达到最大值,由此可见 Ti/Mg 比值在 0.625 ~ 1 之间结构吸能性能最佳;随着 t/D 比值的增加,单位面密度吸能逐渐降低,并且撞击

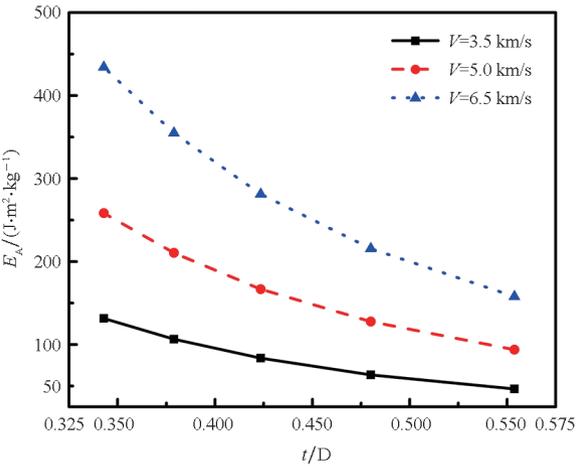
速度越高, E_A 下降速度越快;随着撞击夹角 θ 的增加, E_A 逐渐增加,因为斜撞击,相当于在侵彻方向上增加了靶板厚度,弹靶作用时间增加导致更多的弹丸动能传递给靶板。

3.4 阻抗梯度结构穿孔特性分析

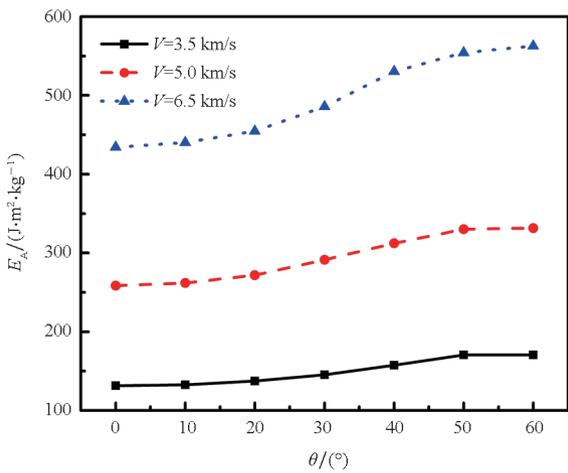
因为文中涉及圆孔和椭圆孔,为统一衡量标准,所以用穿孔面积表征结构穿孔特性,阻抗梯度结构穿孔特性如图 15 所示。由图可知,穿孔面积随撞击速度的增加而增加。如图 15(a) 所示,穿孔面积随 Ti/Mg 比值的增加而降低,表明在结构面密度不变的条件下,增加 Ti/Mg 的比值能够提高结构的抗侵彻能力。随着 t/D 比值的增加,单位面密度上的动能逐渐降低,因此穿孔面积随着 t/D 比值的增加而降低,如图 15(b) 所示。随着 θ 的增加,侵彻孔逐渐由圆孔过渡到椭圆孔, θ 小于 30° 时, θ 对结构穿孔特性的影响不明显, θ 大于 30° 后,穿孔面积显著增加,如图 15(c) 所示。



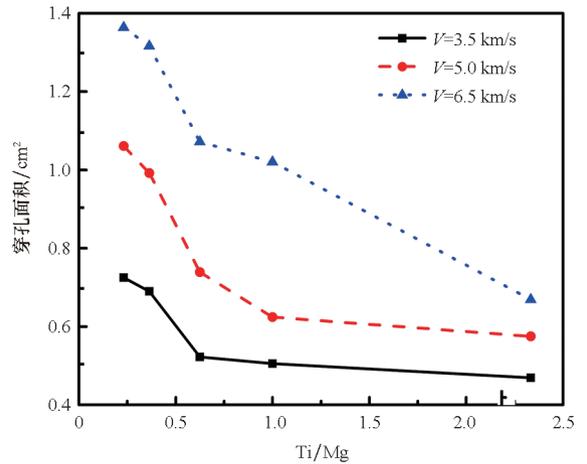
(a) Ti/Mg 比值
(a) Ratio of Ti/Mg



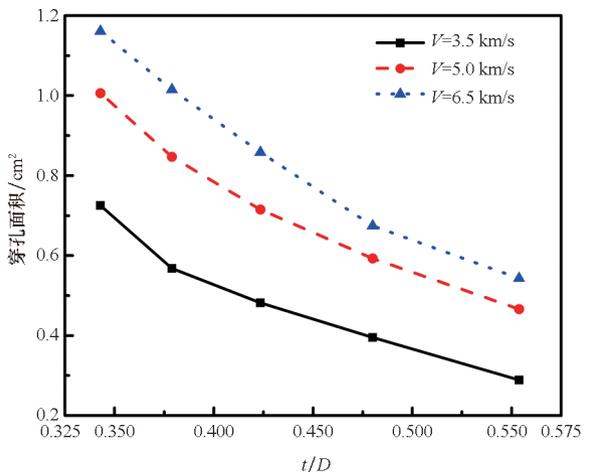
(b) t/D 比值
(b) Ratio of t/D



(c) 撞击角度 θ
(c) Impact angle θ



(a) Ti/Mg 比值
(a) Ratio of Ti/Mg



(b) t/D 比值
(b) Ratio of t/D

图 14 阻抗梯度结构吸能特性

Fig. 14 Energy absorption properties of impedance-graded shields

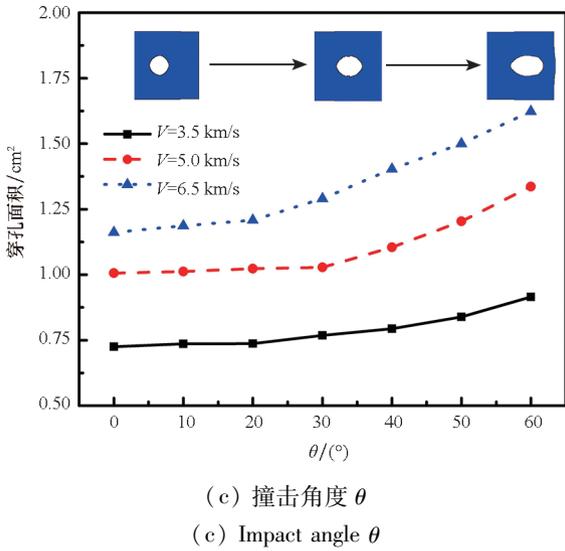


图 15 阻抗梯度结构穿孔特性

Fig. 15 Perforation properties of impedance-graded shields

根据量纲分析可知,结构穿孔尺寸由弹丸参数(D 、 V 、 ρ_p 、 c_p)、结构参数(t 、 ρ_t 、 c_t)和夹角 θ 决定,由 π 定理可得穿孔面积的无量纲函数表达式^[23]:

$$\frac{S_e}{S} = f\left(\frac{\rho_p}{\rho_t}, \frac{V}{c_p}, \frac{t}{c_p}, \frac{t}{D}, \cos\theta\right) \quad (7)$$

在阻抗梯度结构超高速碰撞的研究中,主要变化的参数为弹丸直径、撞击速度以及撞击角度,而弹丸和结构的材料密度均保持不变,即无量纲比常数。若不考虑材料可压缩性的影响,则式(7)可简化为如下表达式:

$$\frac{S_e}{S} = X_1 \left(\frac{V}{c_p}\right)^{X_2} \left(\frac{t}{D}\right)^{X_3} (\cos\theta)^{X_4} \quad (8)$$

式中: X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 均为待定系数。对式(8)两边取对数运算,可得:

$$\ln \frac{S_e}{S} = \ln X_1 + X_2 \ln\left(\frac{V}{c_p}\right) + X_3 \ln\left(\frac{t}{X_4}\right) + X_4 \ln(\cos\theta) \quad (9)$$

利用计算所得数据,对式(9)进行多元线性回归分析,可得球形铝合金弹丸对Ti/Al/Mg阻抗梯度结构的穿孔面积经验计算公式为:

$$\frac{S_e}{S} = 8.096 \left(\frac{V}{c_p}\right)^{0.91} \left(\frac{t}{X_4}\right)^{0.576} (\cos\theta)^{-0.623} \quad (10)$$

4 结论

本文基于AUTODYN有限元软件研究Ti/Al/Mg阻抗梯度结构的超高速撞击特性,得到以下主要结论:

1) 阻抗梯度结构较铝合金结构具有更优的防护性能,基于量纲分析获得了Ti/Al/Mg阻抗梯

度结构超高速撞击无量纲穿孔面积经验公式,即 $S_e/S = 8.096 (V/c_p)^{0.91} (t/D)^{0.576} (\cos\theta)^{-0.623}$ 。

2) 阻抗梯度结构面密度不变,Ti/Mg比值对外泡碎片云膨胀特性影响在5%以内,增加Ti/Mg比值能降低弹丸中心大碎片的质量,Ti/Mg比值在0.625~1之间结构吸能性能最佳。

3) 随着 t/D 比值的增加,外泡碎片云膨胀速度和弹丸中心大碎片质量越小,阻抗梯度结构的单位面密度吸能量降低。

4) 斜撞击有利于阻抗梯度结构对弹丸动能的耗散,但会降低弹丸的破碎效果, θ 大于 40° 或 50° 后,“滑弹效应”对阻抗梯度结构撞击特性的影响较为显著。

参考文献 (References)

- [1] 黄雪刚,殷春,茹红强,等. B₄C-Al 基复合材料对空间碎片超高速撞击的防护应用研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(2): 487-493.
HUANG X G, YIN C, RU H Q, et al. Shielding application of B₄C-Al based composites for hypervelocity impact of space debris[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(2): 487-493. (in Chinese)
- [2] HE Q G, CHEN X W, CHEN J F. Finite element-smoothed particle hydrodynamics adaptive method in simulating debris cloud[J]. Acta Astronautica, 2020, 175: 99-117.
- [3] WEN K, CHEN X W, LU Y G. Research and development on hypervelocity impact protection using Whipple shield: an overview[J]. Defence Technology, 2021, 17(6): 1864-1886.
- [4] 邢柏阳,郭锐,侯云辉,等. 爆炸成型弹丸贯穿靶板后破片空间分布模型[J]. 国防科技大学学报, 2022, 44(4): 141-150.
XING B Y, GUO R, HOU Y H, et al. Spatial distribution model for behind-armor debris formed by the perforation of explosively formed projectile through target[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2022, 44(4): 141-150. (in Chinese)
- [5] 陈莹,陈小伟. 改进的Whipple防护结构与相关数值模拟方法研究进展[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(2): 33-59.
CHEN Y, CHEN X W. A review on the improved Whipple shield and related numerical simulations[J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(2): 33-59. (in Chinese)
- [6] 周昊,郭锐,南博华,等. 填充式波纹夹层结构超高速撞击特性仿真[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(2): 57-63.
ZHOU H, GUO R, NAN B H, et al. Simulation on hypervelocity impact characteristics of stuffed corrugation-cored sandwiches[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2017, 39(2): 57-63. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] 黄雪刚,谭旭彤,雷光钰,等. SiC/Al复合缓冲层材料制备及其空间碎片撞击损伤行为[J]. 稀有金属材料与工

- 程, 2022, 51(3): 983 - 989.
- HUANG X G, TAN X T, LEI G Y, et al. Preparation and impact damage behavior of SiC/Al composite bumper for space debris shielding application [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2022, 51(3): 983 - 989. (in Chinese)
- [9] 黄雪刚, 谭旭彤, 雷光钰, 等. SiC/Al 复合缓冲屏材料制备及其空间碎片撞击损伤行为 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2022, 51(3): 983 - 989.
- HUANG X G, TAN X T, LEI G Y, et al. Preparation and impact damage behavior of SiC/Al composite bumper for space debris shielding application [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2022, 51(3): 983 - 989. (in Chinese)
- [10] 宋光明, 李明, 龚自正, 等. 波阻抗梯度材料超高速正/反撞击下防护特性研究 [J]. *北京理工大学学报自然版*, 2018, 38(增刊 2): 67 - 70.
- SONG G M, LI M, GONG Z Z, et al. Study on performances of graded-impedance materials under front/back side hypervelocity impact [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2018, 38(Suppl 2): 67 - 70. (in Chinese)
- [11] TAMURA H, TANAKA Y, SAITO F, et al. Quantitative analysis of debris from SiC-fiber-reinforced aluminum-alloy targets impacted by spherical projectiles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(8/9): 686 - 696.
- [12] 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.
- [13] 侯明强, 龚自正, 徐坤博, 等. Al/Mg 阻抗梯度材料超高速撞击机理数值仿真研究 [J]. *航天器环境工程*, 2013, 30(6): 581 - 585.
- HOU M Q, GONG Z Z, XU K B, et al. Numerical study on hypervelocity impact mechanism of Al/Mg wave impedance-grade material [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2013, 30(6): 581 - 585. (in Chinese)
- [14] 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): 109 - 116.
- 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): 109 - 116. (in Chinese)
- [15] 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.
- [16] 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): 72 - 83.
- 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): 72 - 83. (in Chinese)
- [17] 张品亮, 曹燕, 陈川, 等. 波阻抗梯度材料加强型 Whipple 结构撞击极限研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(2): 62 - 70.
- ZHANG P L, CAO Y, CHEN C, et al. Ballistic limit of an impedance-graded-material enhanced Whipple shield [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(2): 62 - 70. (in Chinese)
- [18] 郑克勤, 张庆明, 龙仁荣, 等. 超高速撞击波阻抗梯度材料形成的碎片云相变特性 [J]. *兵工学报*, 2021, 42(4): 773 - 780.
- ZHENG K Q, ZHANG Q M, LONG R R, et al. Phase transition characteristics of debris cloud of Ti/Al/Mg wave impedance gradient material subjected to hypervelocity impact [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(4): 773 - 780. (in Chinese)
- [19] 邸德宁, 陈小伟. 碎片云 SPH 方法数值模拟中的材料失效模型 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(5): 948 - 956.
- DI D N, CHEN X W. Material failure models in SPH simulation of debris cloud [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(5): 948 - 956. (in Chinese)
- [20] ZHANG Q, 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(12): 1884 - 1891.
- [21] WEN K, CHEN X W. Analysis of the stress wave and rarefaction wave produced by hypervelocity impact of sphere onto thin plate [J]. *Defence Technology*, 2020, 16(5): 969 - 979.
- [22] 刘昕, 邓勇军, 彭芸, 等. 球形弹丸超高速斜撞击薄板的碎片云和侵入特征仿真分析 [J]. *航天器环境工程*, 2021, 38(6): 615 - 624.
- LIU X, DENG Y J, PENG Y, et al. Simulation analysis of the characteristics of debris cloud and perforation caused by oblique hypervelocity impact of spherical projectile on a thin plate [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2021, 38(6): 615 - 624. (in Chinese)
- [23] 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.
- ZHANG Q M, HUANG F L. Introduction to hypervelocity collision dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)