

Al-Ti 微叠层材料结构优化及抗侵彻性能仿真模拟

张丹宁¹ 孟令刚¹ 杨 阳² 景 栋¹ 任 政² 吴建兵¹ 周秉文^{1,3} 张兴国^{1,3}

(1.大连理工大学材料科学与工程学院; 2.中国兵器科学研究院宁波分院; 3.大连理工大学宁波研究院)

摘 要 基于 LS-DYNA 软件模拟分析了 Al-Ti 微叠层材料结构不同时的抗侵彻性能,研究了微叠层结构中 Ti 体积分数和叠层结构变化对抗侵彻性能的影响,分析不同背板材料及面密度时 Al-Ti 微叠层复合靶板的抗侵彻性能。结果表明,当 Ti 体积分数为 27.7% 时材料抗侵彻性能最好; ϕ 7.62 mm 穿燃弹在初速为 808 m/s 时侵彻微叠层材料的极限厚度为 12 mm, ϕ 12.7 mm 穿燃弹在初速为 818 m/s、488 m/s 时侵彻微叠层材料的极限厚度分别为 18 mm 和 11 mm。韧性层呈正向梯度分布的 Ti/Al₃Ti 微叠层复合材料靶板的抗侵彻性能优于反向梯度分布及均匀分布的靶板;Al-Ti 微叠层材料靶板与 Q235 钢背板的厚度比为 2 : 1 时抗侵彻性能最好;Al-Ti 微叠层材料与 AZ31 镁合金构成复合靶板的抗侵彻性能最佳。

关键词 Al-Ti 微叠层材料;钛体积分数;抗侵彻性能;仿真

中图分类号 TB331;TG146.21;TP311 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.10.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Simulation Analysis of Structural Optimization and Anti-penetration Performance of Al-Ti Micro-laminated Material

Zhang Danning¹, Meng Linggang¹, Yang Yang², Jing Dong¹, Ren Zheng², Wu Jianbing¹,
Zhou Bingwen^{1,3}, Zhang Xingguo^{1,3}

(1.School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology; 2.Ningbo Branch of China Academy of Ordnance Science; 3.Ningbo Research Institute of Dalian University of Technology)

Abstract: The anti-penetration properties of Al-Ti micro-laminated material with different structures was analyzed by numerical simulation based on the LS-DYNA software. The effects of Ti volume fraction in micro-laminated structure and laminated structure on anti-penetration performance were investigated. The anti-penetration performance of Al-Ti micro-laminated composite target with different back plate materials and surface density was analyzed. The results indicate that when the volume fraction of Ti is 27.7%, the anti-penetration performance is desirable. When the initial velocity is 808 m/s, the limit thickness of ϕ 7.62 mm bullet penetrating the laminate material is 12 mm. When the initial velocity is 818 m/s or 488 m/s, the limit thickness of ϕ 12.7 mm bullet penetrating the laminate material is 18 mm or 11 mm, respectively. The anti-penetration performance of Ti/Al₃Ti micro-laminated composite target with positive gradient distribution of toughness layer is better than that with reverse gradient distribution or uniform distribution. When the thickness ratio of target plate to Q235 steel back plate is 2 : 1, the anti-penetration performance is satisfied, and the compound target composed of Al-Ti micro-laminated material and AZ31 magnesium alloy exhibits desirable anti-penetration performance.

Key Words: Al-Ti Micro-laminated Material, Ti Volume Fraction, Anti-penetration Performance, Simulation

航空、航天和国防领域的快速发展,迫切需求具有轻质、高强、高韧特性的新型材料。近年来,由 Ti-Al 复合制备的金属-金属间化合物层状复合材料(Metal-Intermetallic-Laminated composite,简称 MILc)受到材料研究者的广泛关注。Al-Ti 叠层材料以高硬度、高弹性模量的金属间化合物(Al₃Ti)作为强性层,与高韧性的金属 Ti 交替叠加,实现微米尺度结合的新型仿贝壳类层状复合材料。微叠层复合材料通过微米级层间距

收稿日期:2021-12-11;修改稿收到日期:2022-01-21
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51971049);装备预先研究项目(xxxxxxx603);中央高校基本科研业务费资助项目(DUT19GF110)
第一作者简介:张丹宁,女,1995 年出生,硕士研究生,辽宁大连(116000),E-mail:zhangdn958@163.com
通信作者:周秉文,男,1981 年出生,副教授,辽宁大连(116000),E-mail:zbw@dlut.edu.cn
张兴国,男,1960 年出生,教授,辽宁大连(116000),E-mail:zxgwj@dlut.edu.cn
引用格式:张丹宁,孟令刚,杨阳,等. Al-Ti 微叠层材料结构优化及抗侵彻性能仿真模拟[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(10):1 242-1 249.
ZHANG D N, MENG L G, YANG Y, et al. Simulation analysis of structural optimization and anti-penetration performance of Al-Ti micro-laminated material[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(10):1 242-1 249.

和多界面效应,有效提高了叠层材料的断裂韧度,是兼具高强度、高比模量和良好韧性的结构功能一体化材料,可望应用于抵抗冲击、爆炸等动态载荷的武器装备防护系统^[1~3]。

Al-Ti 微叠层材料可设计性强,强性层 Al_3Ti 和韧性层 Ti 的交替复合将产生界面效应,致使裂纹偏转、钝化,显著提高材料的防护性能,因此受到国内外研究者的关注。史明东等^[4]模拟分析了 6.15 mm 钨合金柱以 900 m/s 的初速度侵彻 Ti 体积分数分别为 15%、20.9% 和 51.4% 的叠层复合材料,认为 Ti 含量为 20.9% 的叠层材料抗侵彻性能最好。ZELEPUGIN S 等^[5]通过数值模拟发现子弹的侵彻深度取决于 Ti 的体积分数。HARACH D J^[2]进行了 Ti 体积分数分别为 14%、20% 和 35% 时 Al-Ti 叠层材料在初速度为 950 m/s 时的弹道试验。结果表明,Ti 含量为 20% 和 35% 时叠层材料的抗侵彻性能相当,且均优于 Ti 含量为 14% 的叠层复合材料。RAGHAVENDRA R 等^[6]研究了叠层材料的疲劳裂纹扩展行为,发现随 Ti 体积分数增加疲劳裂纹扩展速率提高。VECCHIO K S^[7]对 Al-Ti 叠层材料进行弹道冲击试验的结果表明,钨合金柱以 900 m/s 的初速度侵彻 Ti 体积分数为 20%、厚度为 20 mm 的靶板时,其侵彻深度为 10 mm,Al-Ti 叠层材料表现出比装甲钢更好的抗侵彻性能。

背板对装甲材料的抗冲击性能有重要的影响。DEN REIJER P C^[8]发现钢背板对陶瓷靶板的支撑作用可以有效提升陶瓷/钢复合靶板的抗侵彻性能。焦志刚等^[9]通过有限元数值模拟对 Al_2O_3 陶瓷、SiC 陶瓷与装甲钢复合靶板的抗侵彻性能进行研究,发现复合靶板能够显著提高抗侵彻性能。张元豪等^[10]也采用数值模拟方法分析了陶瓷靶板和钛合金背板厚度分布对抗侵彻性能的影响,发现陶瓷与钛合金厚度比在 1~2 之间时具有最好的抗侵彻性能。在实际应用和弹道试验中,Al-Ti 叠层材料可以与背板复合使用,但是关于背板对微叠层材料的抗侵彻性能影响的研究报道很少。

综上所述,已有研究中 Ti 的体积分数梯度较大,未给出更细致的量化对比结果以指导材料的优化设计,而且针对以不同速度侵彻叠层材料靶板时的极限厚度尚未有深入的研究报道。因此,模拟分析不同条件下的 Al-Ti 叠层材料的侵彻极限,指导微叠层材料结构的优化设计,对研制新型轻质 Al-Ti 微叠层材料装甲材料具有重要意义。

本课题依据制备 Al-Ti 微叠层材料结构建立了三维有限元模型,通过 Al-Ti 叠层材料结构设计和抗侵彻极限数值模拟分析,提出优化思路。首先模拟分析不同 Ti 含量时的抗侵彻性能,探讨不同初速度下 $\phi 7.62$ 、

$\phi 12.7$ mm 穿燃弹侵彻 Al-Ti 微叠层材料靶板的极限厚度,研究了强性层和韧性层结构变化对抗侵彻性能的影响,最后模拟分析了总面密度相同时复合靶板的厚度比及与不同背板构成复合靶板时的抗侵彻性能。

1 Al-Ti 叠层复合材料制备与模型验证

1.1 Al-Ti 叠层复合材料制备

Al-Ti 微叠层复合材料采用厚度为 0.5 mm 的 TA2 Ti 箔材和质量分数为 99.99% 的 0.2 mm 厚的 Al 箔材,经叠层排列后置于真空热压机中在 658 ℃ 下,通过固-液扩散反应制备而成。试验选用 20 层钛箔、19 层铝箔交替堆叠,最外层为 Ti 层。

试验前先对箔材表面进行预处理,利用 HF 与 HNO_3 的混合溶液对 Ti 箔进行酸洗,去除表面氧化膜;再采用砂纸打磨酸洗后的 Ti 箔和 Al 箔,去除 Ti 箔表面钝化膜和 Al 箔表面氧化膜;然后将打磨后的金属箔依次放入去离子水、乙醇中进行超声清洗,去除打磨产生的金属粉及表面油脂。最后将晾干后的板材交替堆叠,放入真空热压炉中进行烧结。图 1 为 Al-Ti 叠层复合材料的制备原理图及制备的试样。

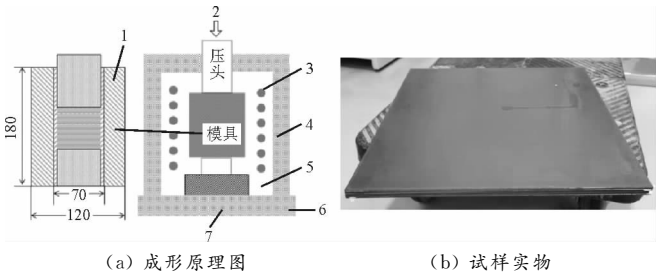


图 1 Ti-Al 微叠层复合材料板材制备原理及试样
Fig.1 Manufacture principle of Ti-Al micro-laminated composite sheet and specimens

- 1. 外壁套筒 2. 载荷 3. 碳硅棒加热器 4. 绝热层 5. 真空
- 6. 基台 7. 炉体

1.2 材料模型选择

1.2.1 Al_3Ti 材料本构模型

Al-Ti 叠层复合材料微观组织由强性层 Al_3Ti 和韧性层 Ti 构成。基于 Al_3Ti 的脆性特征,采用模拟陶瓷等脆性材料在动态载荷下力学响应的 JH-2 (Johnson-Holmquist-Ceramics) 构建强性层 Al_3Ti 本构模型。

JH-2 模型可以从损伤、强度及压力状态方程等因素描述材料在动态载荷下的响应,损伤参数 D 用以描述材料的损伤演化,其定义是塑性累积应变 $\Delta\epsilon_p$ 和断裂应变 $\Delta\epsilon_p^f$ 的比值^[11]。

$$D = \sum \Delta\epsilon_p / \epsilon_p^f \tag{1}$$

当 $D=0$ 时,材料未发生损伤; $D=1$ 时,材料完全失效。断裂应变表示为:

ε_p^f = D₁(P^{*} + T^{*})D₂ (2)

式中, D₁、D₂为材料损伤程度参数; P^{*}为归一化静水压力, P^{*} = P/P_{HEL}, 其中, P_{HEL}为材料处于 Hugoniot 弹性极限时的压力分量; T^{*}为归一化最大静水应力, T^{*} = T/P_{HEL}, 其中, T 为最大静水拉应力。

材料强度模型分为 3 个响应阶段:

(1) D = 0 时, 为无损阶段, 强度表示为:

σ_i^{*} = A(P^{*} + T^{*})ⁿ(1 + Clnε̇^{*}) (3)

(2) D = 1 时, 材料发生断裂, 断裂强度表示为:

σ_f^{*} = B(P^{*})^m(1 + Clnε̇^{*}) (4)

(3) 0 < D < 1 时, 为材料损伤累积阶段, 此时强度表示为:

σ^{*} = σ_i^{*} - D(σ_i^{*} - σ_f^{*}) (5)

归一化等效应力(σ^{*}, σ_i^{*}, σ_f^{*})具有一般形式:

σ^{*} = σ/σ_{HEL} (6)

静水压力表达式为:

P = K₁μ + K₂μ² + K₃μ³ + ΔP (7)

在 D = 0 时, ΔP = 0; D > 0 时, ΔP ≠ 0。

式中, A、B、C、m 和 n、K₁、K₂、K₃为材料常数; σ 为实际等效应力, σ_{HEL}是材料处于 Hugoniot 弹性极限时的等效应力; ε̇^{*}为归一化应变速率。

Al₃Ti 相的 JH-2 材料模型参数见表 1。

表 1 Al₃Ti 相的 JH-2 材料模型参数^[11]

Tab.1 JH-2 material model parameters of Al ₃ Ti phase ^[11]								
ρ/(g·cm ⁻³)	G/GPa	A	B	C	m	n	T/GPa	
3.35	84.6	0.887	0.29	0.003 77	0.53	0.748	0.2	
σ _{HEL} /GPa	P _{HEL} /GPa	β	D ₁	D ₂	K ₁ /GPa	K ₂	K ₃	
3.841	1.842	1	0.011	-0.325	106.25	0	0	

1.2.2 钛合金、钨合金材料本构模型

对于钛合金和钨合金, 采用 Johnson-Cook 本构模型和 Mie-Gruneisen 状态方程描述大应变、高应变率、高温环境下金属材料的强度极限和失效过程^[11]。

Johnson-Cook 模型主要包括强度模型和失效模型两部分, 与 JH-2 失效模型一样, JC 损伤演化可定义为^[12]:

D = ∑Δε_p/ε_p^f (8)

式中, Δε_p为一个积分循环的有效塑性应变; ε_p^f为量纲压力下的失效塑性应变, 具体表达式为^[12]:

ε_p^f = d₁(P^{*} + T^{*})^{d₂} (9)

D 值越大, 材料损伤越严重, 当 D = 1 时, 材料发生断裂。

Johnson-Cook 强度模型用来计算材料的流动应力, 具体表达式如下^[12]:

σ_{eq} = (A + Bε_{eq}ⁿ)(1 + Clnε̇_{eq}^{*})(1 - T^{*}^m) (10)

式中, A、B、n、C 和 m 为材料常数; ε_{eq}为塑性应变; T^{*}^m为相似温度; ε̇_{eq}^{*}为无量纲塑性应变率。

式(10)右边三项分别代表等效塑性应变、应变率和温度对流动应力的影响。钛合金和钨合金的 Johnson-cook 模型参数见表 2。

表 2 钛合金与钨合金本构模型参数^[12,13]

Tab.2 Constitutive model parameters of titanium and tungsten alloy ^[12,13]								
材料	ρ/(g·cm ⁻³)	E/GPa	ν	A/GPa	B/GPa	C	m	n
Ti	4.428	114	0.34	1.098	1.092	0.014	1.1	0.93
W	17.7	310	0.3	1.51	0.177	0.016	1.0	0.12

1.3 模拟结果与验证

为提高建模及计算效率, 假设层间的结合为固连接触, 因此可以利用 LS-Prepost 软件对模拟结果进行测量。采用与 VECCHIO K S^[7]相同 Ti 体积分数(20%)的 Al-Ti 叠层复合材料作为验证靶板。钨合金柱尺寸为 ϕ6.15 mm×23 mm, 初速度为 900 m/s。测试靶板尺寸为 200 mm×200 mm×20 mm, 共 35 层, 其中包含 18 层 Ti 和 17 层 Al₃Ti, 见图 2。

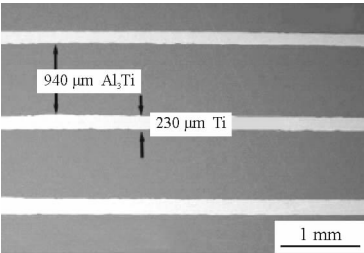
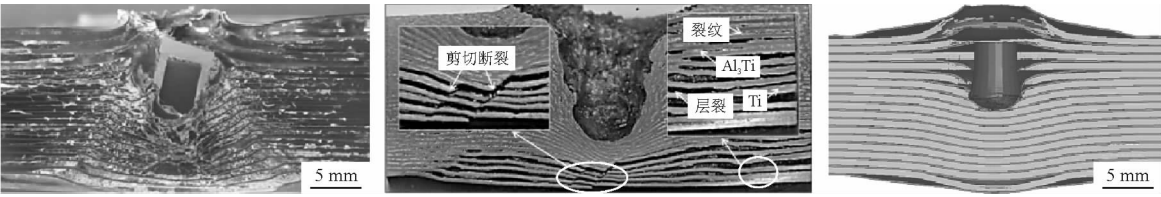


图 2 微叠层材料的微观组织结构图^[7]

Fig.2 Microstructure of micro-laminated materials^[7]

模拟与实弹冲击的对比结果见图 3。本试验模拟



(a) 弹道冲击试验结果 (b) 实际打靶过程中靶板的失效机制 (c) 本课题数值模拟结果

图 3 模拟结果与试验结果对比

Fig.3 Comparison of simulation and experimental results

的钨柱弹侵彻深度为 10.30 mm,相同靶板 VECCHIO K S^[7]弹道冲击试验深度为 10 mm,两者误差为 3%。实际打靶时采用的钨合金柱直径为 7.5 mm,初速度为 900 m/s,Ti/Al₃Ti 微叠层靶板的穿透深度为 14 mm,模拟结果和实际靶试结果(见图 3b)的变形特征、失效机制一致,其损伤范围与文献[7]的试验结果吻合,表明本课题模拟所用模型、选用参数和计算结果较准确可信。

2 试验结果与分析

2.1 Ti 体积分数的优化

Ti 的体积分数对抗侵彻性能至关重要,而已有研究中 Ti 的体积分数变化梯度大,因此本课题通过数值模拟计算准确确定 Ti 的体积分数。假设叠层材料总厚度和层数不变的条件下,可通过调整 Ti 和 Al₃Ti 层厚度控制 Ti 的体积分数。模拟采用 ϕ 7.62 mm 穿燃弹,弹芯为硬质钢,材料模型选用理想弹塑性模型^[11],以 808 m/s 的速度分别侵彻 Ti 含量为 16.7%、18.2%、20.9%、24.6%、27.7% 和 32.4% 的微叠层复合靶板。靶板尺寸为 200 mm×200 mm×8 mm,总层数为 25 层,其中包括 13 层 Ti 和 12 层 Al₃Ti,模型参数见表 3。

表 3 叠层复合材料几何模型参数

Tab.3 Geometric model parameters of the laminated composites			
试样编号	Ti 层厚度/mm	Al ₃ Ti 层厚度/mm	Ti 含量/%
1	0.11	0.55	16.7
2	0.12	0.54	18.2
3	0.14	0.53	20.9
4	0.16	0.49	24.6
5	0.18	0.47	27.7
6	0.22	0.43	32.4

有限元模型见图4,将Ti/Al₃Ti叠层材料中心区

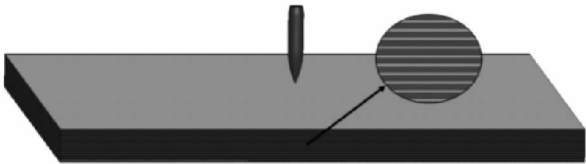


图 4 子弹冲击叠层复合材料有限元模型
Fig.4 Finite element model of bullet penetrating laminated composites

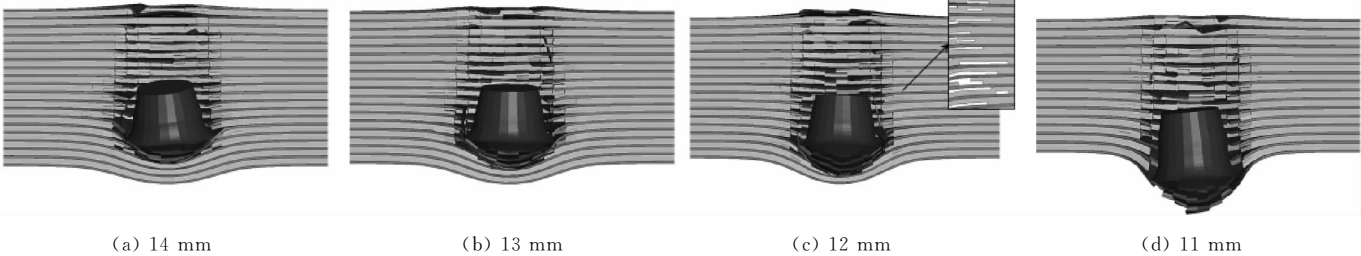


图 6 ϕ 7.62 mm 子弹冲击不同厚度靶板的穿深对比
Fig.6 Depth comparison of ϕ 7.62 mm bullet penetrating targets with different thickness

域网格进行加密处理^[14],保持子弹网格与靶板接触区域网格大小相近。层间采用 Contact-Tiebreak-Surface-to-Surface 接触,钨柱弹与叠层材料界面采用 Contact-Eroding-Surface-to-Surface 接触。整体采用三维 Lagrange 方法计算,六面体网格进行划分^[15],模型单元总数为 1 620 434 个。

图 5 为模拟计算的微叠层材料在 ϕ 7.62 mm 穿燃弹侵彻下的剩余速度曲线。结果表明,Ti 体积分数为 27.7% 时剩余速度最小,表明此时具有最佳的抗冲击性能。分析认为,抗侵彻性能主要与材料的体积模量、剪切模量、强度、密度和厚度有关^[2]。Ti 体积分数增加,微叠层材料的屈服强度和韧性增大,而且 Ti 层厚度增加对金属间化合物层间的桥接作用增强,可以降低金属间化合物层中的残余应力,使裂纹和裂纹密度减小^[16]。因此认为 Ti 含量为 27.7% 时具有最佳的强韧性匹配和界面效应,微叠层材料的抗侵彻性能最佳。Ti 体积分数继续增加则金属间化合物层厚度减小,高模量和高剪切强度金属间化合物数量降低,难以使弹丸尖端钝化或者被折断^[2],导致微叠层材料的抗侵彻性能下降。

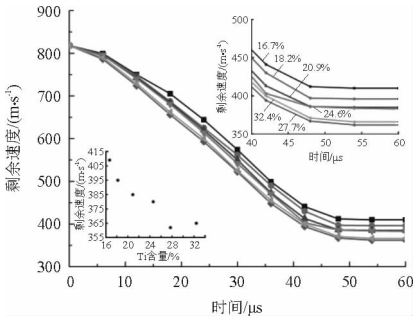


图 5 不同 Ti 体积分数下子弹的剩余速度
Fig.5 Residual velocity of bullet with different Ti volume fractions

2.2 Al-Ti 叠层复合材料抗侵彻极限厚度分析

2.2.1 弹径对叠层材料侵彻极限厚度的影响

模型选用抗侵彻性能最佳的叠层靶板(27.7% 的 Ti),采用 ϕ 7.62、 ϕ 12.7 mm 穿燃弹分别以 808、818 m/s 的着靶速度,分析侵彻不同厚度 Al-Ti 叠层材料时的抗侵彻效果,模拟结果见图 6 和图 7。

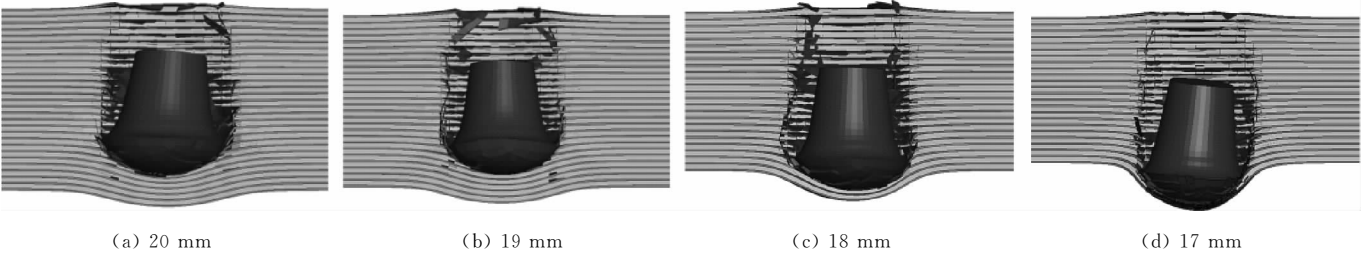


图 7 $\phi 12.7$ mm 子弹冲击不同厚度靶板的穿深对比

Fig.7 Depth comparison of $\phi 12.7$ mm bullet penetrating targets with different thickness

由图 6 可知, $\phi 7.62$ mm 穿燃弹穿透了 11 mm 靶板, 而 12、13 和 14 mm 靶板未被击穿。图 7 的模拟结果表明, 20 mm、19 mm、18 mm 靶板未被 $\phi 12.7$ mm 穿燃弹击穿, 而子弹穿透 17 mm 靶板。由此可见, $\phi 7.62$ 、 $\phi 12.7$ mm 穿燃弹侵彻 Ti 含量为 27.7% 的 Al-Ti 叠层靶板的极限穿深分别为 12 mm 和 18 mm。

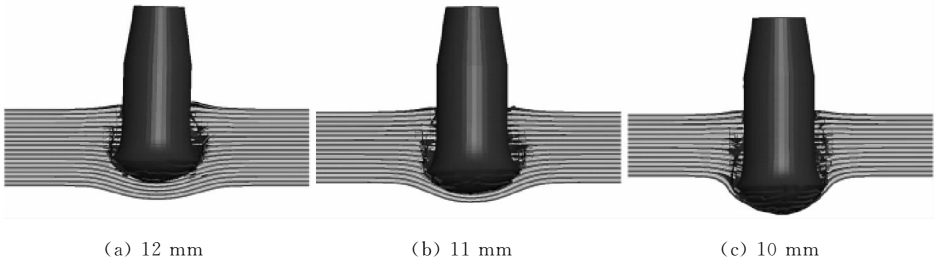


图 8 12.7 mm 子弹以 488 m/s 冲击不同厚度靶板的深度对比

Fig.8 Depth comparison of 12.7 mm bullet penetrating targets with different thickness at 488 m/s

Al-Ti 微叠层靶板的侵彻过程涉及到波的传播、裂纹产生与扩展等。裂纹扩展在叠层复合材料中大致有 3 种情况, 即裂纹偏转、多重裂纹扩展以及裂纹桥接。当发生裂纹偏转时, 裂纹平面将会在垂直于张应力方向上重新选择取向, 这就造成裂纹扩展路径增加。裂纹的偏转可以促使其远离平面应力的最大位置, 且发生偏转的裂纹越长, 裂纹偏转的角度越大, 则越能够有效地降低裂纹的尖端局部应力^[17]。

子弹击中靶板时首先进入靶体的压缩应力波会诱发金属间化合物产生横向微裂纹, 而后裂纹尖端在脆性层 Al_3Ti 中快速隧穿, 导致层中裂纹前端比韧性层 Ti 相中的裂纹延伸得更远; 当裂纹扩展到 Ti 与 Al_3Ti 层间界面时, 由于韧性层 Ti 的桥接效应而被阻止, 形成桥接区。然而, 在一定量的裂纹扩展后, 距离裂纹尖端最远的桥接金属韧性层因超过临界位移的塑性拉伸极限而失效, 在相邻 Ti 层中发生剪切断裂, 并且不同脆性层中的裂纹通过韧性 Ti 层相互连接, 导致靶板背部出现层裂现象。当压缩应力波到达靶板背面的自由表面时, 将产生反射拉伸冲击波, 并在靶板中产生拉应力, 拉伸波与子弹相遇时形成界面速度梯度, 导致子弹承受压剪耦合作用被连续侵彻破坏^[18,19], 微叠层靶板的失效机制见图 3b。

2.2.2 弹速对叠层材料侵彻极限厚度的影响

模拟了 $\phi 12.7$ mm 穿燃弹以 488 m/s 的速度分别侵彻 12、11、10 mm 靶板, 结果见图 8, 总时间为 150 μs 。结果表明, 12、11 mm 叠层材料均未被穿透, 而 10 mm 叠层材料被击穿。可认为 11 mm 的 Al-Ti 叠层材料是抵御 $\phi 12.7$ mm 穿燃弹冲击的极限厚度。

表 4 为子弹侵彻靶板的几何参数。分析表 4 可知, 在子弹侵彻靶板的极限厚度值附近, 靶板越厚对子弹冲击的阻力越大, 叠层材料内部的界面速度梯度越大, 既有利于子弹破碎和减小侵彻深度, 也可抑制靶板背部变形。在靶板厚度增量相同的情况下, $\phi 12.7$ mm 穿燃弹的侵彻深度增量大于 $\phi 7.62$ mm 的, 分析认为随子弹动能增大, 施加于靶板的压缩应力波增大, 需要更厚的靶板以增加 Al_3Ti 层数量和界面效应, 以吸收子弹的动能, 并对子弹产生侵蚀破碎。

表 4 子弹侵彻靶板几何参数

Tab.4 Geometric parameters of bullet penetrating target				
枪弹类型	初速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	靶板厚度/ mm	侵彻层数	侵彻深度/ mm
$\phi 7.62$ mm 穿燃弹	808	14	32	13.28
		13	32	13.44
		12	30	13.57
		11	31	穿透
$\phi 12.7$ mm 穿燃弹	818	20	46	18.20
		19	45	18.72
		18	45	20.13
		17	47	穿透
	488	12	26	10.84
		11	27	12.32
		10	27	穿透

2.3 层厚梯度变化对抗侵彻性能的影响

针对 Al-Ti 叠层复合材料独特的结构特点,在保证靶板厚度及面密度相同的前提下,对复合材料靶板的分布方式做出改变,使 Ti 层的厚度和 Al₃Ti 层的厚度分别呈现梯度变化,模拟计算层厚梯度变化对抗侵彻性能的影响。

Al-Ti 叠层复合材料靶板总厚度为 8 mm,包括 8 层 Ti 和 7 层 Al₃Ti。将 Ti 层厚度从子弹的入射面到出射面逐渐递增的方向定义为正方向,递减的方向则定义为反方向。梯度分布及方向见图 9。

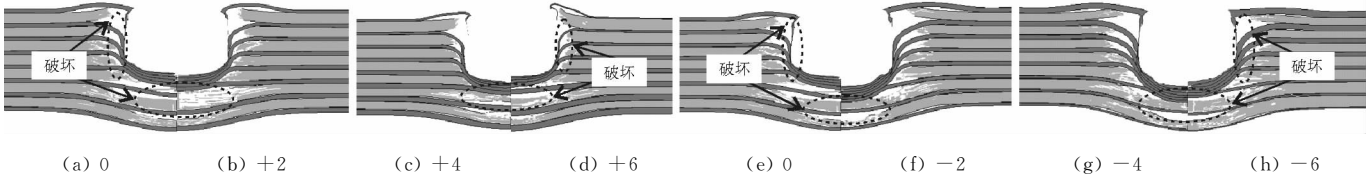


图 9 梯度分布示意图

Fig.9 Schematic diagram of gradient distribution

子弹侵彻不同厚度梯度 Ti/Al₃Ti 叠层复合材料的模拟计算结果见图 10。图 10 中 2、4、6 分别代表 Ti 层

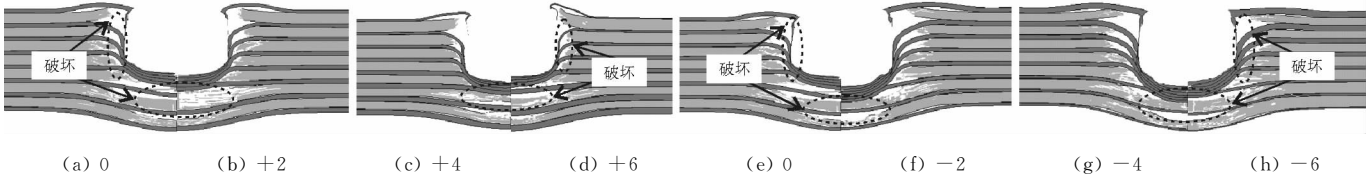


图 10 梯度分布靶板被侵彻的状态

Fig.10 The penetrated state of target with gradient distribution

厚度分别以 0.02、0.04、0.06 mm 递增或递减,其结果说明相对厚度均匀的叠层材料,在正向梯度分布方向上随靶板厚度梯度的增加,靶板背部 Ti 层厚度逐渐增加,因而其具有更高的韧性,有利于减少叠层背部由于反射波造成的损伤。而在反向梯度分布方向,随厚度增加 Ti 层厚度减小,Al₃Ti 层的厚度增大,微叠层靶板的脆性增加,将会产生与陶瓷靶板类似的性质,材料背部有可能产生冲塞破坏。

图 11 为不同厚度梯度下子弹的剩余速度。结果表明,正向梯度分布微叠层材料靶板均高于负梯度分布的抗侵彻性能,也高于相同面密度下 Ti 层和 Al₃Ti 层无变化的均匀靶板。并且随着厚度梯度增加,子弹的剩余速度逐渐降低,特别是厚度梯度为 +6 时,剩余速度最低,为 433 m/s,表明此种厚度梯度下叠层材料的抗侵彻性能最好。而在厚度梯度为 -6 时,剩余速度最高,为 505 m/s,表明靶板的抗侵彻性能最差。因此,应该按照正梯度变化设计 Ti/Al₃Ti 叠层复合材料,从而取得更好的抗侵彻效果。

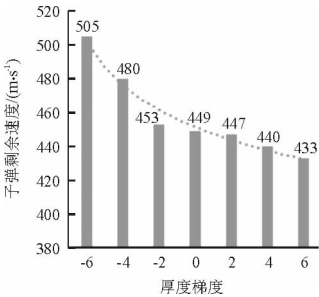


图 11 不同厚度梯度下子弹的剩余速度

Fig.11 Residual velocity of bullets with different thickness gradients

2.4 背板材料对抗侵彻性能的影响

研究发现,采用金属材料作为背板时可以对靶板材料起到支撑和耗散冲击能量的作用,提高材料的抗侵彻性能^[20]。采用 Q235 钢、铝合金和镁合金为背板,分别与 Al-Ti 叠层材料构成复合靶板,模拟分析背板材料及面密度对微叠层材料复合靶板抗侵彻性能的影响。

2.4.1 靶板与背板厚度比的影响

以 Q235 钢为背板,采用 Johnson-cook 模型^[21]。为了探究靶板与背板复合结构对抗侵彻性能的影响,寻求靶板与背板最优厚度比,计算了在结构面密度相同,厚度比分别为 4 : 1、3 : 1、2 : 1、1 : 1 和 1 : 2 时子弹的剩余速度,复合靶板参数和模拟结果见表 5。

表 5 不同厚度比时靶板及背板厚度

Tab.5 Thickness of target plate and back plate with different thickness ratio

厚度比	靶板/mm	背板/mm	剩余速度/(m · s ⁻¹)
4 : 1	8	2	184
3 : 1	7.3	2.3	165
2 : 1	6	3	51.5
1 : 1	4	3.9	217
1 : 2	2.2	4.6	358

结果表明,微叠层材料靶板与钢背板厚度比为 2 : 1 时剩余速度最小(51.5 m/s),说明抗侵彻性能最佳。图 12 为不同厚度比下 $\phi 7.62$ mm 穿燃弹的动能曲线,可见厚度比增大,动能衰减的越多。分析认为,韧性层 Ti 的桥接作用阻止了裂纹扩展,而当裂纹进一步扩展时需要在 Al₃Ti 层中重新生成裂纹,因此需要消耗更多的能量^[11]。随着靶板/背板厚度比进一步增大,背板厚度逐渐减小,对叠层材料支撑效果减弱,消耗动能的作

用降低。

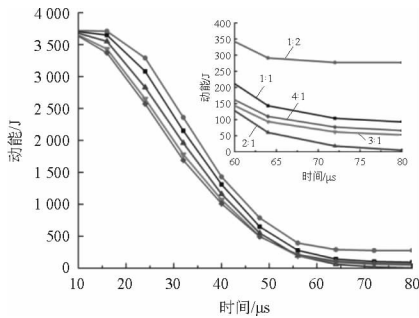


图 12 不同厚度比下 $\phi 7.62$ mm 子弹的动能曲线
Fig.12 Kinetic energy curves of $\phi 7.62$ mm bullet with different thickness ratio

2.4.2 不同背板材料时复合靶板的抗侵彻性能

选用钢、铝合金和镁合金作为背板材料，分别与 Al-Ti 微叠层材料构成复合靶板，探究在面密度相同情况下复合靶板的抗侵彻性能。背板材料参数见表 6。

表 6 不同材料背板参数表

Tab.6 Back plate parameters of different materials				
背板材料	靶板厚度/mm	背板厚度/mm	密度/(g·cm ⁻³)	背板面密度/(kg·m ⁻²)
Q235 钢	5	5.10	7.83	40.0
2024 铝合金	5	14.44	2.77	40.0
AZ31 镁合金	5	22.22	1.80	40.0

根据 RECHT R F 等^[22] 提出的 R-I 公式，采用最小二乘法对数据点进行拟合，得到曲线与横坐标轴的交点值，即为弹道极限速度，计算结果见图 13。结果表明，面密度相同时，以 Q235 钢、2024 铝合金和 AZ31 镁合金作为 Al-Ti 微叠层材料的背板时，复合靶板的弹道极限速度分别为 818、782 和 857 m/s。即当子弹初速度相同时，以镁合金为背板时复合靶板的剩余速度最小，表现出更好的抗侵彻性能，Q235 钢和 2024 铝合金的抗侵彻性能相近。

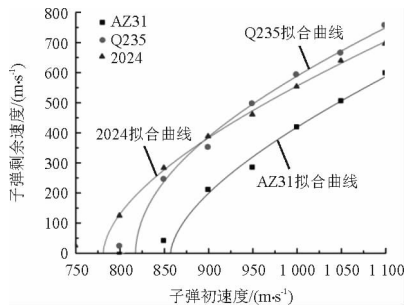


图 13 子弹剩余速度随冲击速度变化的曲线
Fig.13 Variation curves of residual velocity of bullet with penetrating velocity

保证 Al-Ti 叠层复合材料的厚度、层数及 Ti 含量不变，分别调整背板面密度为 20.0、30.0、40.0 kg/m²，对比分析其对复合靶板的弹道极限速度及抗侵彻性能的影响，结果见图 14。可以看出，随着背板面密度增

加，复合靶板的弹道极限速度均呈递增的趋势，但是以 AZ31 镁合金作为背板的弹道极限速度均最高，表明其与 Al-Ti 微叠层材料构成复合靶板时具有提高抗侵彻性能的潜力。

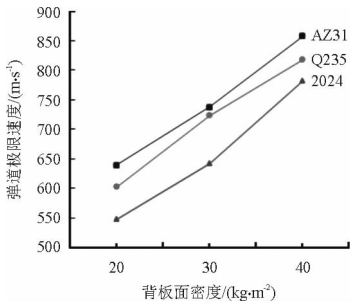


图 14 背板面密度对弹道极限速度的影响
Fig.14 Effect of back plate density on ballistic limit velocity

分析认为，侵彻过程中产生的压缩应力波反射会生成拉伸应力，由于 Al₃Ti 的脆性特征，在子弹的侵彻作用下破碎，而由于背板的支撑作用，破碎生成的颗粒会向相反方向运动，消耗子弹的部分动能^[23]。在背板面密度相同的情况下，靶板厚度对吸能有重要的影响。模拟计算中镁合金厚度最大，子弹被消耗的能量最多，抗侵彻性能最好。

模拟结果表明，在轻质装甲结构设计中，面密度与厚度效应均是不可忽视的重要因素。

3 结 论

(1)模拟结果表明，当 Ti 的体积分数为 27.7% 时，Al-Ti 微叠层材料的抗侵彻性能最好。此时强性层和韧性层具有最佳厚度匹配和界面效应，韧性 Ti 层对脆性 Al₃Ti 层具有更好的桥接作用，使残余应力降低、裂纹密度减小，耗散能量的性能最佳。

(2)Al-Ti 微叠层材料抵御 $\phi 7.62$ mm 穿燃弹在初速为 808 m/s 时的侵彻极限厚度为 12 mm，抵御 $\phi 12.7$ mm 穿燃弹在初速为 818 m/s 和 488 m/s 时的侵彻极限厚度分别为 18 mm 和 11 mm。靶板越厚侵彻深度越小，背部变形也越小，但侵彻层数基本不变。靶板厚度增量相同时， $\phi 12.7$ mm 穿燃弹的侵彻深度增量大于 $\phi 7.62$ mm 穿燃弹。

(3)呈正向梯度分布的 Ti/Al₃Ti 叠层复合材料靶板的抗侵彻性能优于反向梯度分布及均匀分布的靶板，且随厚度梯度的逐渐增加，抗侵彻性能逐渐提升。

(4)靶板/背板的厚度比和背板材料对 Al-Ti 叠层材料的抗侵彻性能有一定影响。当 Al-Ti 叠层材料/Q235 钢的厚度比为 2 : 1 时抗侵彻性能最佳；当面密度相同时，Al-Ti 微叠层材料与 AZ31 镁合金构成复合靶板时的抗侵彻性能最好。

参 考 文 献

[1] LIU C T, STIEGLER J O. Ductile ordered intermetallic alloys[J]. Science, 1984; 226: 636-42.

[2] HARACH D J. Processing, Properties, and Ballistic Performance of Ti-Al₃ Ti Metal-intermetallic Laminate(MIL) Composites[D]. California; University of California, 2000.

[3] VECCHIO K S, JIANG F C. Fracture toughness of ceramic fiber reinforced metallic laminate composites[J]. Mat. Sci. Eng., 2016, A649: 407-16.

[4] 史明东, 原梅妮, 何小晶, 等. Ti-Al₃ Ti 金属间化合物基层状复合材料抗侵彻性能数值模拟[J]. 复合材料学报, 2018, 35(8): 2 286-2 292.

[5] ZEPEPUGIN S, MALI V, ZEPEPUGIN A, et al. Failure of metallic-intermetallic laminate composites under dynamic loading[J]. American Physical Society, 2012, 1 426: 1 119-1 123.

[6] RAGHAVENDRA R. Effects of ductile laminate thickness, volume fraction, and orientation on fatigue-crack propagation in Ti-Al₃ Ti metal-intermetallic laminate composites[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2005, A36: 1 595-1 607.

[7] VECCHIO K S. Synthetic Multi-Functional Materials for Structural+Ballistic and Blast Protection[R]. California Univ. Regents San Diego La Jolla Ca, 2005.

[8] DEN REIJER P C. Impact on Ceramic Faced Armor[D]. Netherlands; Technical Univerity of Delft, 1991.

[9] 焦志刚, 马明超. 陶瓷复合靶板抗侵彻性能数值仿真[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(12): 1-4.

[10] 张元豪, 程忠庆, 侯海量. 陶瓷/钛合金靶抗圆柱体弹侵彻的仿真研究[J]. 弹道学报, 2020, 32(2): 82-87.

[11] 曹阳. 层状复合材料 Ti/Al₃ Ti 动态力学行为与防护能力研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.

[12] LI T, GRIGNON F, BENSON D J, et al. Modeling the elastic properties and damage evolution in Ti-Al₃ Ti metal-intermetallic laminate (MIL) composites[J]. Materials Science and Engineering, 2004, A374(1): 10-26.

[13] 匡格平, 张庆明, 龙任荣, 等. 弹丸高速/超高速撞击陶瓷/金属复合靶的数值模拟[J]. 兵工学报, 2014, 35(S2): 373-377.

[14] 秦溶蔓, 朱波, 乔琨, 等. 陶瓷/纤维复合材料层间混杂结构对装甲板抗侵彻性能的影响[J]. 材料导报, 2020, 34(18): 183-187.

[15] 刘润华, 陈国光, 侯飞等. 弹丸侵彻陶瓷/钢复合靶板数值研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(3): 183-188.

[16] LI T, JIANG F, OLEVSKY E A, et al. Damage evolution in Ti-6Al-4V-Al₃ Ti metal-intermetallic laminate composites[J]. Materials Science and Engineering, 2007, A443: 1-15.

[17] ROY S, BUTZ B, WANNER A. Damage evolution and domain-level an-isotropy in metal/ceramic composites exhibiting lamellar micro-structures[J]. Acta Mater., 2010, 58: 2 300.

[18] CAO Y, ZHU S, GUO C, et al. Numerical investigation of the ballistic performance of metal-intermetallic laminate composites[J]. Applied Composite Materials, 2014, 22(4): 1-20.

[19] ADHARAPURAPU R R, VECCHIO K S, JIANG F C, et al. Fracture of Ti-Al₃ Ti metal-intermetallic laminate composites: Effects of lamination on resistance-curve behavior[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2005, A36: 3 217-3 234.

[20] 袁威, 苗成, 武海玲, 等. 陶瓷复合装甲抗超高速破片试验研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(3): 92-94.

[21] 李金福, 智小琦, 郝春杰, 等. Q235 钢靶分层结构抗异形破片侵彻性能研究[J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40(4): 55-60.

[22] RECHT R F, IPSON T W. Ballistic perforation dynamics[J]. Journal of Applied Mechanics, 1963: 384-389.

[23] 董彬, 魏汝斌, 宗昊, 等. 陶瓷/纤维复合装甲抗侵彻吸能机理及影响因素[J]. 兵器材料科学与工程, 2020, 43(5): 128-136.

(编辑: 栗万仲)

宜春市加速构建锂电新能源全绿色产业发展体系

近年来,随着国家政策支持和新能源汽车行业的崛起,江西省宜春市锂电产业发展势头迅猛,正加快构建“锂电资源—锂电材料—动力电池—电动汽车”新能源全绿色产业发展体系,不断增强锂电新能源产业的核心竞争力。

7月19日,科陆储能技术有限公司宜春基地项目二期签约仪式举行。据介绍,科陆储能宜春基地项目一期、二期总计规划年产能为8GW·h。

“公司储能产品主要应用场景包括火电厂联合调频、新能源配套储能、电网侧调峰、用户侧填谷套利、无电地区微电网、动力电池梯次利用等,应用场景非常丰富,市场前景广阔。”科陆储能技术有限公司介绍,一期项目自年初试产以来,订单量持续增长,现已实现满产。

在江西国轩新能源有限公司,一台台智能化生产设备有序运转,投料、合浆、涂布、分切等工序都有条不紊。经过连续奋战、抢抓工期,江西国轩已一次性建成投产10GW·h动力电池生产线,预计今年年底15GW·h动力电池生产线将全部投产。

“作为宜春市引进的首个百亿元项目,江西国轩已成功打通锂电产业链,实现了矿山的开采、锂云母的生产 and 碳酸锂的生产。”江西国轩新能源有限公司介绍。

目前,宜春市共有锂电新能源产业链企业137家。其中,规模以上企业111家,拥有主板上市及上市企业控股子公司19家。这些企业涵盖锂资源采、选、冶,锂电池关键材料与零配件、锂离子电池、绿色高效储能电池、新能源汽车、锂电池回收等,已基本形成锂电新能源全产业链。

“到2025年,宜春市规划打造‘五大基地、一个中心’”。宜春市锂电新能源产业发展中心主任吕军介绍,“五大基地”是指全球最大的碳酸锂基地、国内重要的正极材料基地、国内最大的负极材料基地、国内最大的锂电池基地、国内重要的锂电池应用基地;“一个中心”是指全国知名锂产品交易中心。

宜春市提出,到2025年,力争全市锂电新能源产业规模突破8000亿元,锂盐在国内市场份额占比超过1/3。同时,宜春市将构建高水平新能源(锂电)研发平台,建成国家级新能源(锂电)检测机构,努力打造产业链条健全、协作配套紧密、竞争力强劲的产业集群。

(摘自中国有色金属报)