

文章编号: 1671-7449(2024)05-0513-07

弹头形状对TC4-Al₃Ti叠层复合板侵彻性能影响的数值分析

陈淑琴¹, 吴佳楠², 刘瑞², 梁壮丽², 王锦涛², 张煌²

(1. 中北大学 数学学院, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 机械工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: TC4-Al₃Ti叠层复合材料由于其低密度、高强度的特点被广泛应用于装甲防护材料。为深入研究TC4-Al₃Ti叠层复合板的抗侵彻性能, 结合弹道冲击试验和有限元数值模拟技术, 采用一级轻气炮试验台对TC4-Al₃Ti叠层复合板进行弹道冲击试验, 并利用LS-DYNA软件建立了接近弹道冲击试验工况的有限元模型, 通过对比分析模拟仿真及试验获得的弹体剩余速度和靶板破坏形态, 验证了该有限元模型的有效性。在此基础上, 重点开展了弹头形状对靶板抗侵彻性能的影响研究。结果表明: 在所研究速度范围内, TC4-Al₃Ti叠层复合板抗平头弹的侵彻能力最强, 其次是半球形头弹, 而对球形弹的抵抗能力最弱。

关键词: TC4-Al₃Ti叠层复合板; 弹道试验; 抗侵彻性能; 弹头形状

中图分类号: TJ411; TH142 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-7449.2024073

引用格式: 陈淑琴, 吴佳楠, 刘瑞, 等. 弹头形状对TC4-Al₃Ti叠层复合板侵彻性能影响的数值分析[J]. 测试技术学报, 2024, 38(5): 513-519.

CHEN Shuqin, WU Jianan, LIU Rui, et al. Numerical examination of influence of warhead shape on penetration performance of TC4-Al₃Ti laminated composite plate[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(5): 513-519.

Numerical Examination of Influence of Warhead Shape on Penetration Performance of TC4-Al₃Ti Laminated Composite Plate

CHEN Shuqin¹, WU Jianan², LIU Rui², LIANG Zhuangli², WANG Jintao², ZHANG Huang²

(1. School of Mathematics, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Since TC4-Al₃Ti laminated composite has a low density and a high strength, it is frequently utilized in armor protection materials. Ballistic impact testing of TC4-Al₃Ti laminated composite boards was conducted using a first-stage light gas gun test bench in order to better investigate the penetration resistance of the laminated board. Additionally, LS-DYNA software was utilized to establish a finite element model that was close to the conditions of the ballistic impact test. Through a comparison of the projectile's residual velocity and the target plate failure pattern determined by both simulation and experimentation, the efficacy of the finite element model is confirmed. Based on this, the impact of the shape of the warhead on the target plate's resistance to penetration is examined. The findings indicate that the TC4-Al₃Ti laminated composite plate has the best resistance to flathead projectiles in the speed range of this investigation, followed by semi-spherical projectiles, and the lowest resistance to spherical projectiles.

Key words: TC4-Al₃Ti laminated composite plate; ballistic tests; penetration resistance; warhead shape

收稿日期: 2024-03-28

基金项目: 山西省科技合作交流专项项目(202104041101022); 山西回国留学人员科研资助项目(2021109, 2021118); 山西省留学回国人员科技活动择优资助项目(20210040)

作者简介: 陈淑琴(1979-), 女, 讲师, 博士, 主要从事先进制造数值仿真技术研究。E-mail: chenshuqin@nuc.edu.cn.

0 引言

近年来,随着装甲防护技术的快速发展,对装甲防护材料的性能提出了更严格的标准^[1-2]。以TC4-Al₃Ti叠层复合材料为代表的轻质装甲材料,因其具有高强度、高韧性等特点,在航空航天、武器装备等众多领域得到了广泛应用,其抗弹冲击性能也引起了国内外学者的关注^[3]。为更精准评估TC4-Al₃Ti叠层复合装甲的防护能力,国内外学者从多个方面开展了Ti/Al₃Ti叠层复合材料抗侵彻性能的研究。Grujicic等^[4]采用碎片对Ti/Al₃Ti层状复合材料靶板进行正碰撞冲击试验,发现该复合材料具有较高的弹道极限速度和优异的断裂韧性;Liu等^[5]利用子弹冲击不同厚度的Ti/Al₃Ti叠层复合材料靶板,发现Ti/Al₃Ti叠层靶板的弹道极限速度以及能量吸收情况随着靶板面密度的增大呈正相关增长;周培俊^[6]研究了在低速、中速、高速等不同条件下,TC4/Al₃Ti层状复合材料的抗侵彻性能,结果显示其具有出色的抗冲击性能;Yuan等^[7]从Ti-Al₃Ti靶板的弹道极限速度、穿透过程、裂纹扩展等方面,揭示了韧性铝含量对其抗侵彻性能的影响机制;曹阳等^[8]利用数值模拟分析弹道冲击下,Ti/Al₃Ti的失效模式和损伤缓解机制,以研究界面对其抗冲击性能的影响;Li等^[9]采用有限元遗传算法对Ti-Al₃Ti-Al层状复合材料的排列顺序及层厚比进行了优化,当层厚比为3:14:4时其具有最佳的抗侵彻能力;辛乐^[10]采用有限元方法探讨了Ti/Al₃Ti叠层复合材料微观结构与抗侵彻性能之间的关系。

综合以上文献可以发现,目前对于Ti/Al₃Ti叠层复合材料的抗侵彻性能研究主要聚焦于如何通过优化复合材料的结构来提高其性能。然而,关于弹头形状对其抗侵彻性能影响的研究尚不明确,缺乏系统性的分析。在实际工程应用中,武器装备面临的冲击状况往往多种多样,弹头形状的差异会给材料的抗侵彻性能带来不同的挑战。且由于层状复合材料独特的结构特性和力学性能,使得其不同弹头形状冲击下的抗侵彻行为更加复杂。因此,开展弹头形状对TC4-Al₃Ti叠层复合材料的抗冲击性能研究尤为重要,不仅能够深入揭示弹头形状对抗侵彻性能的影响机制,还能够为工程应用提供更为准确和全面的性能评估依据。

为探究不同弹头形状对TC4-Al₃Ti叠层复合板抗侵彻性能的影响,本文通过弹道冲击试验及

数值模拟相结合的方法,开展了弹体侵彻TC4-Al₃Ti层状复合板的弹道冲击试验,将试验结果与有限元数值模拟结果进行对比,验证了模型的有效性,并进一步深入研究弹头形状对TC4-Al₃Ti层状复合板抗侵彻性能的影响机制。通过模拟与实验相结合的方法,不仅能够全面了解TC4-Al₃Ti层状复合板在不同冲击工况下的性能,更能为防护结构设计提供技术支持和理论支撑,为其在装甲防护的应用奠定理论基础。

1 有限元模型的建立

利用LS-DYNA有限元软件,建立近似于弹道冲击试验工况的有限元模型,如图1所示。模型由弹体和靶板两部分组成,其中,靶板由TC4层和Al₃Ti交替叠放组成,TC4共13层,每层厚度0.26 mm,Al₃Ti共12层,每层厚度0.47 mm。



图1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

为提高计算精度,在求解过程中采用映射方式进行网格划分,并将靠近弹体侵彻的靶板中心区域网格加密,而远离冲击中心的靶板边缘区域网格划分较为稀疏,以确保弹靶之间复杂的相互作用,如图2所示。

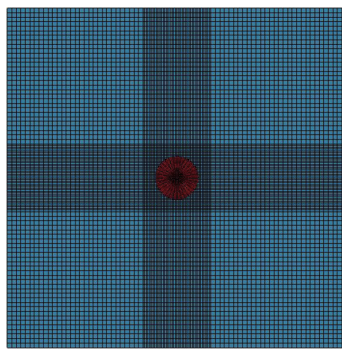


图2 网格划分示意图

Fig. 2 Grid diagram

在有限元模型的YZ平面和XY平面分别设置对称边界,并在靶板的边界处定义非反射边界条件Boundary-NON-Reflecting,以防止模型边界处产生的应力波反射重新进入模型而对结果造成影响^[11]。整个模拟过程利用Lagrange算法进行求解计算。

在模拟时,金属 TC4 层采用 JOHNSON-COOK 本构模型,具体见式(1)。JC 模型参数如表 1 所示^[12]。

$$\sigma_y = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*)(1 - T^{*m}), \quad (1)$$

式中: $\dot{\epsilon}^*$ 为无量纲应变率; A, B, C, m, n 分别为材料的屈服强度、应变强化常数、应变率强化系数、温度敏感系数、应变强化系数; T^* 为无量纲温度, $T^* = (T - T_r)/(T_m - T_r)$, T_r, T_m 分别为材料的室温和熔化温度。

表 1 靶板 TC4 层 JC 本构模型参数

Tab. 1 JC constitutive model parameters of TC4 layer of target plate

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E/GPa	ν	A/GPa	B/GPa
4.428	113.8	0.342	1 098	1 092
C	m	n	T_{melt}/K	
0.014	1.1	0.93	1 878	

注: ρ 为密度; E 为杨氏模量; ν 为泊松比; A 为屈服强度; B 为应变硬化常数; C 为应变率常数; m 为热软化指数; n 为应变硬化指数; T_{melt} 为材料熔化温度。

采用 Johnson-Holmquist- II (JH- II) 本构模型描述脆性 Al₃Ti 材料,模型参数如表 2 所示^[12]。

表 2 靶板 Al₃Ti 层 JH- II 本构模型参数

Tab. 2 JH-II constitutive model parameters of Al₃Ti layer of target plate

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	G/GPa	ν	A	B
3.35	216	0.17	0.85	0.31
C	M	N	T	$P_{\text{HEL}}/\text{GPa}$
0.013	0.21	0.29	0.2	1.842
D_1	D_2	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa
0.02	1.85	2.01	2.6	0

注: ρ 为密度; G 为剪切模量; ν 为泊松比; A, B 为完整给、断裂归一化强度参数; C 为强度参数(应变率依赖); M 为断裂强度参数; N 为完整强度参数; T 为最大抗拉强度; P_{HEL} 为 Hugoniot 弹性极限下的压力分量; D_1 为断裂塑性应变参数; D_2 为断裂塑性应变参数; K_1 为第一压力系数; K_2 为第二压力系数; K_3 为弹性常数。

JH-II 材料模型通常被用来描述在高压、大变形状态下脆性材料的力学行为,具体可表示为

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*), \quad (2)$$

式中: D 为材料的损伤参数; σ_i^* 和 σ_f^* 分别为材料在没有受到损伤和完全损伤时的等效强度,可表示为

$$\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right], \quad (3)$$

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right], \quad (4)$$

式中: $\dot{\epsilon}_0, \dot{\epsilon}$ 为参考应变率和等效应变率; A, B, C, M, N 为材料常数; $P^* = P/P_{\text{HEL}}, P^*$ 为无量纲材料的

等效静水压力, P_{HEL} 为材料在弹性极限下的压缩强度; $T^* = T/T_{\text{HEL}}, T^*$ 为最大等效静水拉力。

在弹靶侵彻过程中,忽略弹体的变形,选用刚体模型模拟弹体,其模型参数如表 3 所示。

表 3 弹体 RIGID 本构模型参数

Tab. 3 Parameters of RIGID constitutive model of projectile body

	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E/GPa	ν
弹体	7.8	206	0.3

注: ρ 为密度; E 为杨氏模量; ν 为泊松比。

2 TC4-Al₃Ti 叠层复合板的抗侵彻试验研究

利用一级轻气炮装置完成弹道试验,采用 12.7 mm 口径和 1.3 m 长度的枪管发射弹体,整体装置如图 3 所示。试验过程中通过改变装药量实现对弹体初始冲击速度的控制,同时利用高速摄像机捕捉弹体的冲击过程与着靶情况,并在靶架后安装缓冲装置,用于收集子弹的残体及塞块。

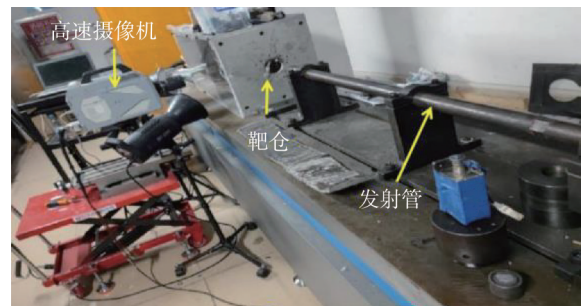
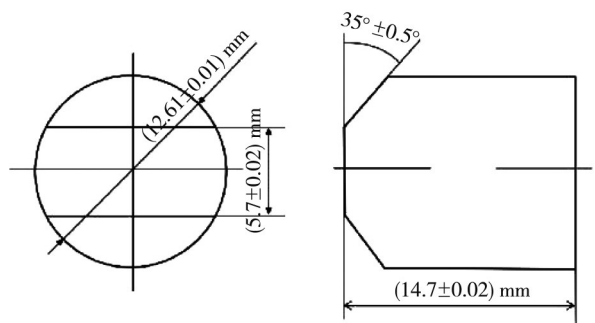


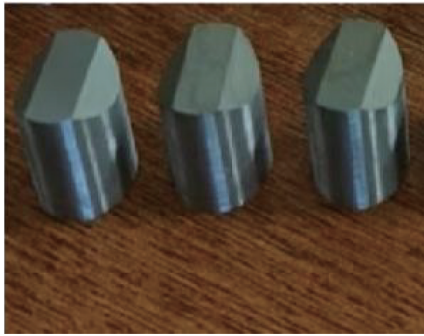
图 3 试验装置图

Fig. 3 Test device diagram

靶板材料为 TC4-Al₃Ti 叠层复合板,采用 12.7 mm 口径的穿甲弹,材质为 30CrMnSiNi2A 高强钢,长度 14.7 mm,弹体的尺寸示意图及实物图如图 4 所示。



(a) 弹体尺寸示意图



(b) 弹体实物图

图4 弹体尺寸示意图与实物图

Fig. 4 Bullet size schematic and physical drawings

2.1 弹道侵彻试验结果

考虑到装甲防护材料面临不同的防护要求, 选定300~700 m/s的初始速度开展一系列弹道试验, 弹体在不同初始速度下侵彻TC4-Al₃Ti叠层复合板的结果如表4和图5所示。

表4 弹道侵彻试验结果

Tab. 4 Ballistic penetration test results

弹体编号	初始速度 $v_0/(m\cdot s^{-1})$	剩余速度 $v_r/(m\cdot s^{-1})$	侵彻结果
D-2	414.17	0	子弹嵌入
D-3	494.56	178.54	穿透
D-4	683.24	421.26	穿透

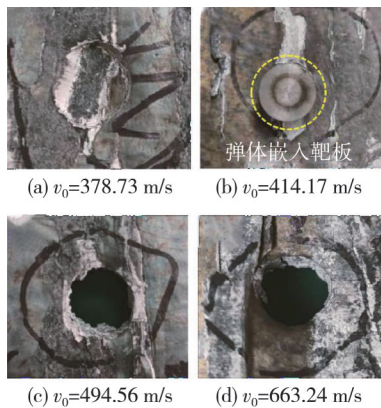


图5 不同冲击速度下靶板正反面形貌图

Fig. 5 The front and back morphologies of the target plate at different impact velocities

根据表4中弹道侵彻结果可知, 在4次弹道冲击试验中, 共有2发子弹穿透整个靶板, 1发子弹嵌入靶板内, 1发子弹在冲击靶板后发生回弹。弹体穿透TC4-Al₃Ti叠层复合靶板的最低初始速度为494.56 m/s, 当弹体冲击速度为414.17 m/s时, 弹体嵌入靶板, 此时靶板对弹体的摩擦力以及夹紧力之和小于弹体的回弹力, 最终弹体嵌入

靶板, 可知未穿透靶板的弹体最高初始速度为414.17 m/s, 因此, 弹体能够穿透TC4-Al₃Ti叠层复合靶板的弹道极限速度在414.17~494.56 m/s之间。选取第2组、第4组数据平均值作为TC4-Al₃Ti叠层复合靶板弹道极限 V_{50}

$$V_{50} = (414.17 + 494.56) / 2 = 454.37。 \quad (5)$$

根据计算得知TC4-Al₃Ti叠层复合靶板弹道极限 V_{50} 约为454.37 m/s。

2.2 模型有效性验证

为了验证弹道侵彻TC4-Al₃Ti叠层复合板有限元模型及材料模型的有效性, 将模拟结果与试验结果进行对比, 着重比较了弹体的剩余速度与靶板的破坏情况, 结果如表5所示。

表5 有限元模拟结果

Tab. 5 Finite element simulation result

No.	初始速度 $v_0/(m\cdot s^{-1})$	剩余速度 $v_r/(m\cdot s^{-1})$		侵彻结果	误差/%
		实验	仿真		
D-1	378.73	0	32.54	未穿透	—
D-2	414.17	0	47.17	未穿透	—
D-3	494.56	178.54	186.90	穿透	4.68
D-4	683.24	421.26	446.37	穿透	5.96

同时, 对弹体初速度为683.24 m/s条件下靶板的破坏情况进行分析, 结果如图6所示。

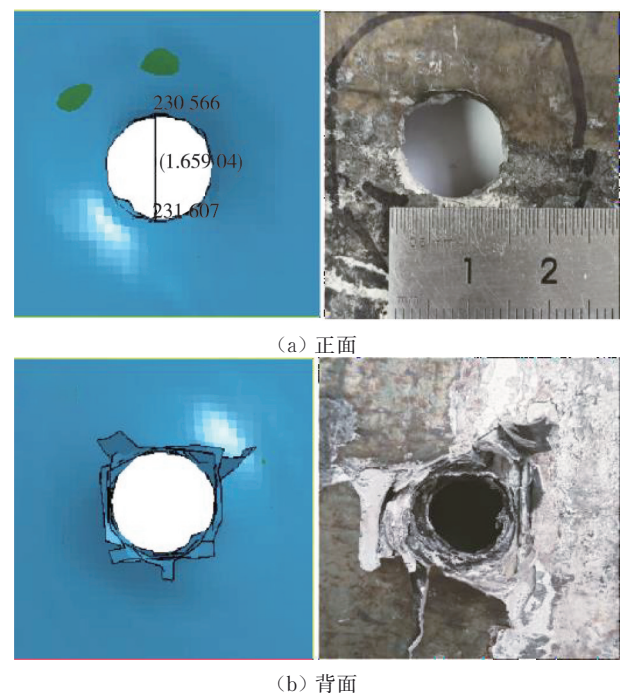


图6 靶板正面与背面破坏情况

Fig. 6 Damage condition of front and back of target plate

从图中可以看出, 试验后靶板正面的弹孔直径约为 15 mm, 而有限元模拟的弹孔直径约为 16.6 mm, 二者较为接近, 此外, 靶板正面均形成了以弹体为直径的圆形弹孔, 背面发生花瓣状的向下开裂现象, 二者破坏情况基本一致。综上所述, 无论从弹体的剩余速度, 还是靶板的损伤破坏情况, 有限元模拟结果与弹道试验结果均较为吻合。因此, 本文有限元仿真模型及材料模型参数能够较好模拟 TC4-Al₃Ti 叠层复合板在弹体冲击载荷作用下的动态响应过程。

3 弹头形状对侵彻 TC4-Al₃Ti 叠层复合板的影响

基于上述有限元模型准确性的基础, 在保证子弹质量相等的情况下, 分别建立 4 种不同弹头形状的弹体, 探究弹头形状对 TC4-Al₃Ti 叠层复合板抗侵彻性能的影响, 如图 7 所示。

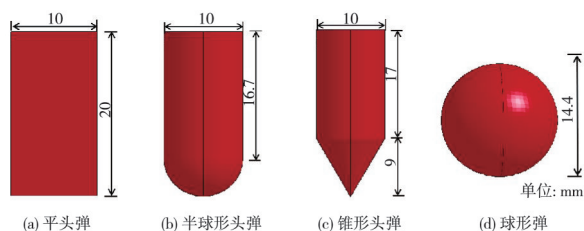


图 7 不同弹头形状子弹尺寸
Fig. 7 Different bullet shapes and sizes

3.1 弹体侵彻速度与能量变化分析

在控制有限元模型其它条件不变的基础上, 让 4 种弹头形状的弹体以 400~800 m/s 的入射速度分别垂直侵彻 TC4-Al₃Ti 叠层复合板, 弹体最终剩余速度的变化情况如图 8 所示。

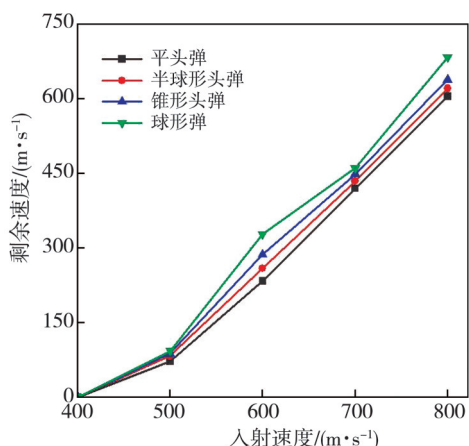


图 8 不同入射速度下弹体剩余速度
Fig. 8 Residual velocity of the projectile body at different incident velocities

比较图 8 中 4 条曲线可以发现, 弹头的形状对剩余速度有着明显的影响, 具体表现为: 当初始速度为 400 m/s 时, 弹体无法贯穿靶板, 当入射速度超过弹道极限速度, 达到 500 m/s 时, 弹体能够穿透 TC4-Al₃Ti 叠层复合板, 且弹体的剩余速度都随着其初始速度的增加而增加。

以弹体初速度 800 m/s 为例, 对装甲防护材料在工程应用中的使用进行深入研究。图 9 为不同弹头形状弹体的速度变化情况。

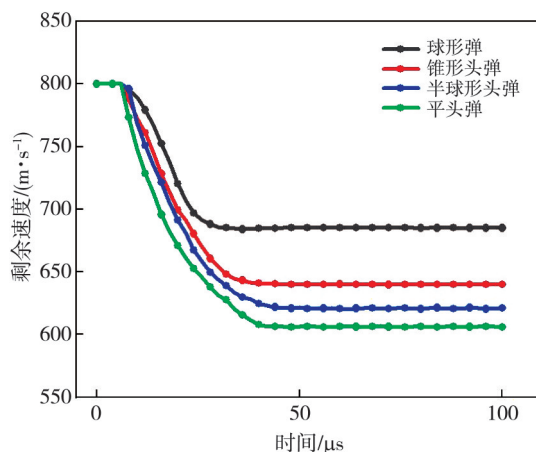


图 9 不同弹头形状弹体的速度变化
Fig. 9 The velocity change of the projectile body with different warhead shapes

根据图 9 可知, 当弹体的初始速度为 800 m/s 时, 4 种不同形状弹头的子弹在穿透 TC4-Al₃Ti 叠层复合板后, 仍有部分速度被保留。弹体的剩余速度随平头弹、半球形头弹、锥形头弹、球形弹的顺序依次增大, 弹体达到恒定速度时, 球形头弹用时最少约 30 μs, 锥形头弹用时 38 μs, 半球形头弹和平头弹耗时最长约 44 μs。由此可知, TC4-Al₃Ti 叠层复合板对球形弹体的抗侵彻性能较弱, 锥形头子弹次之, 而抗平头弹的侵彻能力最强。

结合表 6 中 4 种弹体的动能变化情况来, 在初始动能相同的情况下, 球形弹剩余的动能为 799 J, 而平头弹剩余动能仅为 456 J, 可见球形弹在冲击靶板的过程中被消耗的能量最少, 表明 TC4-Al₃Ti 叠层复合板抗球形弹的侵彻能力最弱, 而平头弹的能量损失率最高, 消耗的动能最大, TC4-Al₃Ti 叠层复合板抗平头弹的侵彻能力最强。

对这一现象分析其原因可知, 在弹体质量相同的条件下, 球形弹的长度要比长杆弹短, 因此弹体穿透靶板所需的时间较短, 球形弹消耗的能量最少。此外, 杨慧等^[13]对弹体头部形状对侵彻

能力的影响进行了研究分析,结果表明弹头部外形“越尖越长”时,受到的侵彻阻力越小,从而弹体侵彻靶板的深度也较大。由于平头弹的弹头表面积大,与靶板的接触面积也较大,在与靶板碰撞的瞬间,弹体受到巨大的阻力,从而产生大范围的应力波,使其速度急剧下降,耗能大幅增加,与此同时,弹体所耗动能被靶板迅速吸收;半球形头弹与锥形头弹在侵彻前期,弹靶接触面积相比平头弹较小,弹体受到的阻力也小,消耗的能量也更小,当弹体逐渐被磨损破坏后,在侵彻后期耗能情况与平头弹类似。

表6 不同形状子弹动能损失情况

Tab. 6 Kinetic energy loss of bullets of different shapes

弹头形状	初始动能/J	剩余动能/J	耗能/J	能量损失率/%
球形弹	973	799	174	20.2
锥形头弹	973	625	348	35.8
半球形头弹	973	512	461	47.4
平头弹	973	456	517	53.1

3.2 侵彻过程及失效模式分析

为进一步研究弹头形状对TC4-Al₃Ti叠层复合板抗侵彻影响机制,分析了4种不同形状弹头的弹体,以800 m/s的初速度侵彻TC4-Al₃Ti叠层复合板时,靶板被侵彻过程及破坏失效情况,如图10所示。

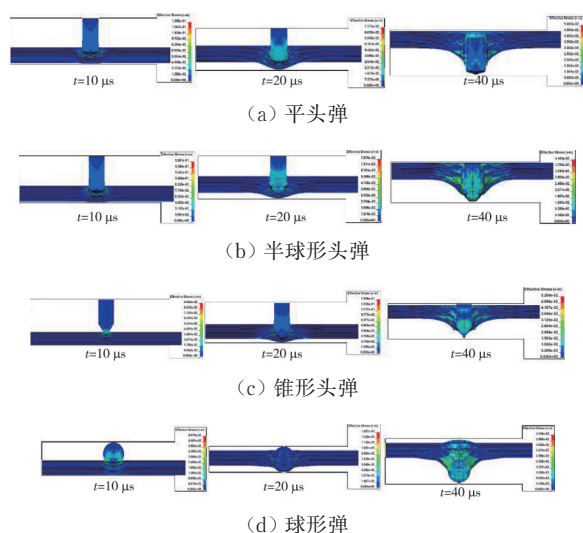


图10 不同弹头形状弹体在不同时刻侵彻靶板的应力云图

Fig. 10 Stress nephogram of the projectile with different warhead shapes penetrating the target plate at different times

如图10所示,靶板在受到平头弹冲击后,靶板背部产生微小的鼓包变形,在弹体持续的侵彻过程中,弹体发生压缩变形,且靶板背面鼓包逐

渐增大,弹靶接触的环形区域内发生塑性变形,直至弹体穿透靶板,产生约1.5倍弹体直径的弹道孔径。靶板在冲击波的作用下发生分层,并形成圆台形的冲塞从靶板脱落。

半球形头弹体在接触靶板后,球头部分发生挤压破坏,靶板背部同样发生鼓包变形,当弹体球头部分完全失效破坏后,侵彻过程便类似于平头弹。在侵彻结束后,TC4-Al₃Ti叠层复合板的分层现象更明显,并形成帽形冲塞塞块,但该塞块明显较平头弹造成的塞块更小,且厚度非常薄,这主要是由于弹体头部与靶板接触位置处形成颈缩失效^[14]。

在侵彻过程中,锥形头弹体的损伤模式与平头弹和半球头弹不同,在弹体穿靶后,并没有出现冲塞现象。当锥形头弹体撞击靶板后,由于弹体头部与靶板的接触面积很小,在强烈的应力集中效应下,弹体头部极易进入靶板内部,发生挤压破坏。锥形头弹体侵彻靶板时整体表现为延性扩孔破坏,最终开裂形成锥形穿孔。

从球形弹体侵彻靶板的应力云图可以看出,球形弹体在20 μs时已经快要穿透靶板,可见球形弹体的侵彻能力更强。靶板在球形弹体冲击下,失效模式与半球形弹体类似,有延性扩孔并呈花瓣状失效,与其它3种弹体相比,靶板分层现象、撕裂程度与花瓣状凸起程度均较大,弹体穿透靶板后,同样产生圆柱形塞块冲出靶板。

综合上述对4种典型弹头形状弹体侵彻TC4-Al₃Ti叠层复合板的研究分析,可以得出弹体头部形状对靶板的侵彻作用有着显著的影响,在本研究的速度范围内,TC4-Al₃Ti叠层复合板抗平头弹的侵彻能力最强,其次是半球形弹,而对球形弹的抵抗能力最弱。

4 结论

本文通过弹道试验与数值模拟相结合的方法对TC4-Al₃Ti叠层复合板的抗侵彻性能进行研究,得到以下结论:

1) 通过对比弹道试验与数值模拟结果,无论从弹体的剩余速度,还是靶板的损伤破坏情况,有限元模拟结果与弹道试验结果均较为吻合,验证了有限元仿真模型及材料模型参数的有效性。

2) 弹头的形状对剩余速度及动能损失有着明显的影响,弹体的剩余速度及剩余动能随平头

弹、半球形头弹、锥形头弹、球头弹的顺序依次增大。

3) 在质量相同的条件下, TC4-Al₃Ti 叠层复合板抗平头弹的侵彻能力最强, 抗球形弹体的侵彻能力最弱。在球形弹体侵彻过程中, 存在延性扩孔现象, 呈现花瓣形失效, 靶板分层现象、撕裂程度与花瓣状凸起程度均较大。

参考文献:

- [1] 曾凡, 张志明, 范根莲, 等. 仿贝壳层状复合装甲材料研究进展[J]. 中国材料进展, 2021, 40(3): 225-233.
ZENG Fan, ZHANG Zhiming, FAN Genlian, et al. Research progress on nacre-like laminated armor materials[J]. Materials China, 2021, 40(3): 225-233. (in Chinese)
- [2] ASSARI A H, EGHBALI B. Interfacial layers evolution during annealing in Ti-Al multi-laminated composite processed using hot press and roll bonding[J]. Metals and Materials International, 2016, 22(5): 915-923.
- [3] YUAN M, YAO Y, HAN F, et al. Evaluation of the compressive and anti-penetration properties of Ti-Al₃Ti-Al laminated composites [J]. Advanced Composites Letters, 2020. <https://doi.org/10.1177/2633366X2092187>.
- [4] GRUJICIC M, SNIPES J S, RAMASWAMI S. Penetration resistance and ballistic-impact behavior of Ti/TiAl₃ metal/intermetallic laminated composites (MILCs): a computational investigation [J]. AIMS Materials Science, 2016, 3(3): 686-721.
- [5] LIU Y, YIN C, HU X, et al. Ballistic limit velocity of tungsten alloy spherical fragment penetrating Ti/Al₃Ti-laminated composite target plates[J]. Advanced Composites Letters, 2020. <https://doi.org/10.1177/2633366X209222>.
- [6] 周培俊. TC4/Al₃Ti 层状复合材料的制备及动态力学性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [7] YUAN M, YAO Y, HAN F, et al. Effects of ductile Al on the anti-penetration performance of the Ti-Al₃Ti Laminated Composites [J]. Results in Physics, 2020, 18: 103308.
- [8] 曹阳, 张丹丹, 刘建秀, 等. Ti/Al₃Ti 叠层复合材料冲击损伤建模及失效分析[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(3): 116-121.
CAO Yang, ZHANG Dandan, LIU Jianxiu, et al. Modeling for impact damage and failure analysis of Ti/Al₃Ti laminate composite [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2019, 42(3): 116-121. (in Chinese)
- [9] LI Y, ZHANG H, YUAN M. Based on genetic algorithm to analyze the anti-penetration properties and optimize the structure of Ti-Al₃Ti-Al laminated composites [J]. Frontiers in Materials, 2022, 9: 806020.
- [10] 辛乐. Ti-Al₃Ti 叠层复合材料微观结构对其抗侵彻性能影响的数值模拟研究[D]. 太原: 中北大学, 2020.
- [11] 张丹宁. Al-Ti 叠层材料结构优化及抗侵彻效果数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [12] XIN L, YUAN M, YAO Y, et al. Numerical study the effects of defects on the anti-penetration performance of Ti6Al4V-Al₃Ti laminated composites [J]. Materials Research Express, 2019, 6(8): 0865f8.
- [13] 杨慧, 柯明, 李明, 等. 正侵彻半无限靶的刚性弹体头部形状优化分析[J]. 现代应用物理, 2022, 13(3): 188-195.
YANG Hui, KE Ming, LI Ming, et al. Optimization analysis of rigid projectile nose shape for normal penetrating into semi-infinite targets [J]. Modern Applied Physics, 2022, 13(3): 190-197. (in Chinese)
- [14] 余庆波, 郭焕果, 张田育子, 等. 不同头形刚性弹丸侵彻钢靶力学行为[J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(4): 331-336.
YU Qingbo, GUO Huanguo, ZHANG Tianyuzi, et al. Dynamic behavior of non-deformable projectiles with different nose shape penetrating steel plate [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(4): 331-336. (in Chinese)