



着靶攻角对 12.7 mm 穿燃弹侵彻陶瓷复合装甲板的影响

冯立华^{1*}, 张兴金¹, 谭小辉¹, 纪杨子焱²

(1.陕西飞机工业有限责任公司, 陕西 汉中 723000; 2.南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要:针对某构型陶瓷复合装甲板开展了 12.7 mm 穿甲燃烧弹的侵彻试验,得到了枪弹对复合装甲板的极限穿透速度和靶板的毁伤形态。基于 LS-DYNA 光滑粒子动力学方法,建立了枪弹侵彻陶瓷复合装甲板的有限元模型,通过对比试验和数值模拟得到的枪弹对靶板的极限穿透速度、陶瓷板正面的破坏形态和穿孔尺寸、复合靶板背面变形及损伤情况,验证了该模型的正确性。利用建立的有限元模型分析了枪弹着靶攻角对侵彻过程中枪弹和靶板动态响应的影响规律。研究表明:相较无攻角情况,攻角不大于 6° 时,由于枪弹头部与接触面积较小,增加攻角可增强枪弹对陶瓷复合装甲板的侵彻能力;当攻角进一步增大后,枪弹穿透陶瓷靶板后,由于枪弹偏转角度较大,其尾部仍与陶瓷板中央破碎区外未破碎的陶瓷相互作用,消耗了其部分动能,导致其侵彻能力下降。陶瓷吸收的能量约为复合材料层的 5 倍,即枪弹着靶攻角主要通过影响陶瓷板的吸能情况影响最终靶板的穿透情况。

关键词:陶瓷复合装甲;穿甲燃烧弹;攻角;侵彻

中图分类号:TJ303.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-499X(2024)04-0039-09

Study on the Effect of Attack Angle on 12.7 mm Armor-piercing Incendiary Projectile Penetrating Ceramic Composite Plate

FENG Lihua^{1*}, ZHANG Xingjin¹, TAN Xiaohui¹, JI Yangziyi²

(1.AVIC Shaanxi Aircraft Industry Co., Ltd., Hanzhong 723000, China;

2.School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The penetration test of 12.7 mm armor-piercing incendiary ammunition on a certain type of ceramic composite armor plate structure was carried out. The limit penetration velocity of the projectile to the composite armor plate and the damage pattern of the target plate was obtained. The finite element model of the projectile penetration of ceramic composite armor plate was established based on the smoothed particle hydrodynamics method in LS-DYNA. The finite element model was verified by comparing the maximum penetration velocity of the projectile, damage patterns and perforation size on the front side of the ceramic plate, deformation and damage on the back side of the composite target plate obtained from the experiment and numerical simulation. Then, the effect of the attack angle on the dynamic response of the projectile and the target plate in the penetration process was simulated and analyzed. The results show that, the penetration ability of the projectile to the ceramic composite armor plate is enhanced due to the decreasing of contact area between the head of projectile and target when the attack angle increasing from 0° to 6°. With the attack angle further increasing, the penetration ability of the projectile penetration ability decreases. It is resulted from the interaction the tail of projectile with the unbroken ceramic outside the central crushing area of the ceramic plate after the projectile penetrates the ceramic target plate due to the large deflection angle of the projectile. The interaction consumes part of its kinetic energy and leads to the decrease of its penetration ability. The energy absorbed by the ceramic is

approximately 5 times that of the composite material layer, indicating that the attack angle mainly affects the energy absorption of the ceramic plate and consequently influences the penetration of the target plate.

Key words: ceramic composite armor plate; armor-piercing incendiary projectile; attack angle; penetration

陶瓷复合装甲板是目前高性能轻型防护装甲的常见形式^[1],学者已对枪弹侵彻陶瓷复合装甲的过程开展了大量研究^[2-5]。孙非等^[6]分析了枪弹撞击位置对陶瓷片铺层复合装甲板抗弹性能的影响。包阔等^[7]开展了 12.7 mm 穿甲燃烧弹侵彻碳化硼陶瓷复合靶的试验和数值模拟,研究结果表明陶瓷/PE (polyethylene) 复合装甲靶结构适合抵抗低速弹体的侵彻破坏,陶瓷/铝复合靶结构适合抵抗高速弹体的侵彻破坏。张林等^[8]设计了一种陶瓷复合装甲板结构,分析了厚度匹配、底板材料和柔性芯材等因素对靶板抗弹性能的影响。李永鹏等^[9]分析了组元厚度对 SiC 陶瓷板/超高分子量聚乙烯 (ultra high molecular weight polyethylene, UHMWPE) 纤维复合装甲板抗弹性能的影响规律。

FAWAZ 等^[10]对比分析了枪弹正侵彻和斜侵彻陶瓷复合装甲板时弹-靶响应的差别。研究表明,相较于正侵彻,斜侵彻时弹体/陶瓷界面和陶瓷/复合材料界面上的应力更小。王维占等^[11]分析了 12.7 mm 穿燃弹以 0~60° 斜侵彻陶瓷复合装甲时弹道极限速度的变化。研究表明弹道极限速度随着入射角的增大呈指数增大,且枪弹的剩余质量不断减小。ZAREA 等^[12]提出了枪弹正侵彻和斜侵彻陶瓷/金属轻型装甲的理论分析模型。YAZIV 等^[13]的研究表明相同条件下垂直放置的陶瓷板抗枪弹性能优于斜放置的陶瓷板。TOMCZYK 等^[14]分析了攻角对 7.62 mm 穿甲弹侵彻陶瓷板的影响,发现枪弹穿靶后的速度降随着攻角的增大呈线性上升。WASTON 等^[15]分析了攻角对 7.62 mm 穿燃弹侵彻陶瓷板的影响,发现小攻角能增强枪弹对陶瓷板的侵彻能力,但作者并没有进一步分析产生该现象的原因。

由上述研究可知,枪弹的着靶姿态是影响其侵彻能力的重要因素,但攻角对侵彻陶瓷装甲板的影响规律和机理并不清晰。因此,本文开展了 12.7 mm 穿甲燃烧弹对某构型陶瓷复合装甲板的侵彻试验,总结枪弹对复合装甲板的极限穿透速度和破坏模式。并基于 LS-DYNA 的光滑粒子动力学 (smoothed-particle hydrodynamics, SPH) 方法建立相应的有限元模型,模拟计算枪弹以不同攻角侵彻靶

板的过程,得到枪弹着靶攻角对侵彻过程中枪弹和靶板动态响应的影响规律。

1 12.7 mm 穿燃弹侵彻陶瓷复合装甲的试验分析

1.1 试验布置

图 1 所示为 12.7 mm 穿燃弹侵彻陶瓷复合装甲的试验系统图,主要由弹道枪、枪弹、靶板、测速装置、高速摄影机、陶瓷复合装甲板等组成。测速装置由两套通断靶和计时仪组成,用于测量枪弹的速度。取两套通断靶得到速度的平均值作为枪弹的着靶速度。高速摄影机用于记录枪弹侵彻的全过程。

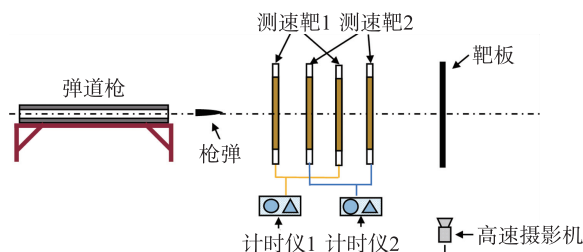


图 1 试验布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

试验用陶瓷复合装甲板的组成如图 2 所示,其尺寸为 300 mm×300 mm,主要由碳化硼 (B₄C) 陶瓷、碳纤维板、芳纶复合板和 UHMWPE 板组成,各层之间采用环氧树脂黏结剂粘接。装甲板表面包覆一层纤维止裂层,主要防止陶瓷碎片反向飞溅,对侵彻过程的影响较小。

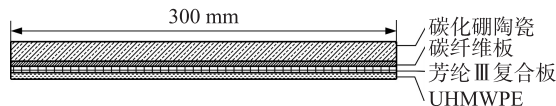


图 2 陶瓷复合装甲结构

Fig. 2 Structure of the ceramic composite armor

试验用枪弹为 54 式 12.7 mm 穿燃弹,质量约 48.5 g,主要由铜质被甲、头部的燃烧剂和钢质弹芯组成。其中,弹芯材料为碳素工具钢 (T12A 钢),弹头主要由卵形弹芯、被甲和燃烧剂构成。弹头直径为 12.7 mm,质量为 48 g,全长 63 mm。弹芯直径为 10.4 mm,长度为 52 mm,被甲的厚度约为 1 mm。详

细结构参数如图 3 所示^[16]。

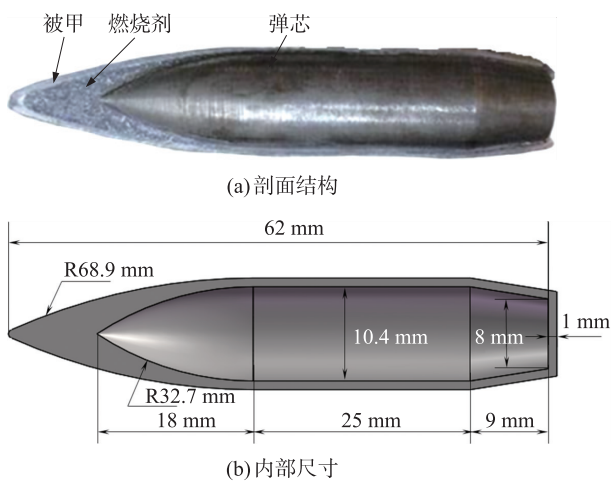


图 3 穿甲燃烧弹剖面结构
Fig. 3 Structure of API

1.2 试验结果及分析

试验共进行了 8 次试射,其中 2 发穿透靶板,6 发未穿透靶板。穿透靶板的最小着靶速度为 620.1 m/s,未穿透靶板的最大着靶速度为 616.7 m/s,则枪弹对靶板的极限穿透速度为 618.4 m/s。

图 4 为试验后靶板的毁伤情况,包覆层表面由于燃烧剂的作用出现烧蚀区域,正面穿孔区域较小。靶板未被穿透时,从侧面视角可以看出明显的纤维分层,背板变形鼓包范围更大;而靶板被穿透时,背板仅在枪弹穿透位置附近出现变形。

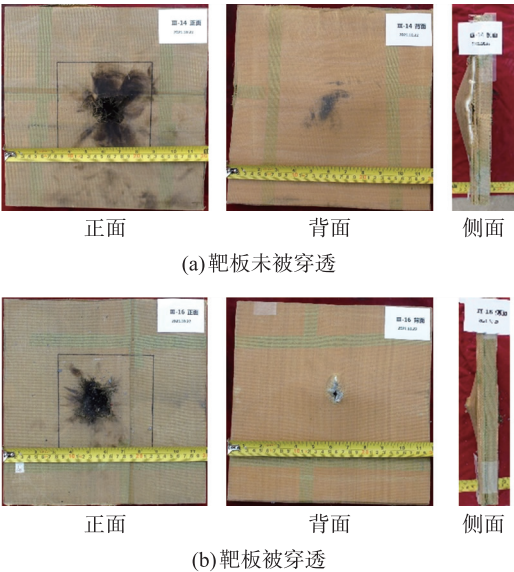


图 4 陶瓷复合装甲板的毁伤情况
Fig. 4 Damage of the ceramic composite armor

图 5 为除去表面包覆层后,陶瓷正面的损伤情况。由于复合材料层的粘接作用,碎裂的陶瓷基本

保持完整,并可清晰看见径向裂纹。沿弹着点向外发散的径向裂纹与以弹着点为圆心的环向裂纹呈经纬交错,形成沿环向近似均匀分布的类扇形陶瓷碎块,且距离弹着点越远,陶瓷碎块越大。锥形裂纹由弹着点陶瓷锥顶部环向裂纹向陶瓷锥底部环向裂纹扩展,最终形成完整的陶瓷锥。

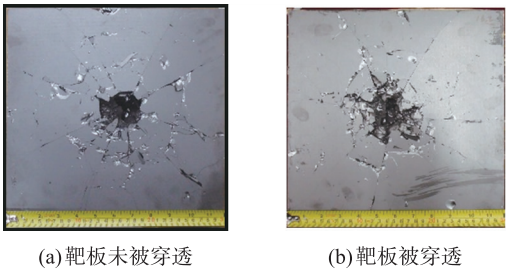


图 5 陶瓷面板正面的毁伤情况
Fig. 5 Damage of ceramic plate's front face

2 有限元数值模拟模型

2.1 有限元几何模型

利用 LS-DYNA 建立了 12.7 mm 穿甲燃烧弹侵彻陶瓷复合装甲板的有限元模型,如图 6 所示。考虑到中心入射问题的对称性,建立 1/2 尺寸模型以减小计算量。

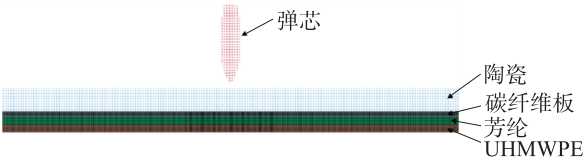


图 6 穿燃弹侵彻陶瓷复合装甲板有限元模型
Fig. 6 Finite element model of API penetration ceramic composite armor

由于侵彻过程中弹芯的动能起主要作用,燃烧剂和被甲对侵彻的影响很小^[9]。因此,仿真模型只建立了弹芯的模型。陶瓷板和枪弹均采用 SPH 粒子离散,粒子间距为 1 mm。碳纤维板、芳纶复合板和 UHMWPE 板采用厚度为 0.5 mm 的单层拉格朗日实体单元离散,并加密中心区域。层与层之间的连接采用 LS-DYNA 中提供的 * AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK 接触关键字实现。

弹芯、陶瓷板 SPH 粒子与复合材料层的接触方式为点-面侵蚀接触;同一复合材料层的层间连接、不同复合材料层之间的连接方式均采用自动面-面固接失效接触以模拟粘接层作用;靶板与支架之间采用自动面-面接触。

2.2 材料模型及参数

采用 LS-DYNA 中的 * MAT_JOHNSON_COOK 材料本构模型描述弹芯材料在动态载荷作用下的材料响应,其材料参数见表 1^[7]。采用 * MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CERAMICS 材料本构模型描述陶瓷面板的动态响应,模型包含材料连续强度模型、破碎模型和状态方程 3 部分,其材料参数见表 2^[17]。采用带损伤复合材料模型 * MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE 描述碳纤维、芳纶和 UHMWPE3 种复合材料的动态响应,失效准则采用 Chang/Chang 准则,其材料参数见表 3^[18]。

表 1 弹芯的材料模型参数^[7]

Table 1 Material model parameters of projectile core^[7]

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/GPa	ν	A/GPa	B/GPa	n
7 850	210	0.33	1.54	0.477	0.16
C	m	$\dot{\varepsilon}_0/\text{s}^{-1}$	T_m/K	D_1	
0	1.0	1.0	1763	1.4	

表 2 陶瓷的材料模型参数^[17]

Table 2 Material model parameters of ceramic^[17]

$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	G/GPa	A	N	B	M
2 510	197	0.927	0.67	0.7	0.85
C	T/MPa	HEL/GPa	D_1	D_2	K_1
0.005	265	19	0.001	0.5	2.33

表 3 复合材料的材料模型参数^[18]

Table 3 Material model parameters of composite materials^[18]

材料	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E_1/GPa	E_2/GPa	E_3/GPa	ν_{12}
碳纤维	1 800	141	141	11.4	0.028
芳纶	1 440	20.5	20.5	6	0.21
UHMWPE	970	51.1	51.1	3.62	0.01
材料	ν_{13}	ν_{23}	G_{12}/GPa	G_{23}/GPa	G_{13}/GPa
碳纤维	0.04	0.04	5	4.5	4.5
芳纶	0.33	0.33	0.77	2.71	2.71
UHMWPE	0.013	0.013	3.6	6	6
材料	X_c/GPa	X_t/GPa	Y_c/GPa	Y_t/GPa	S_c/GPa
碳纤维	1.656	2.105	1.656	2.105	0.114
芳纶	0.29	0.595	0.29	0.595	0.25
UHMWPE	1.9	1.25	1.9	1.25	0.575

2.3 有限元模型验证

2.3.1 极限穿透速度对比

采用“升-降法”计算枪弹对复合装甲板的极限

穿透速度。如图 7 所示,当枪弹着靶速度 v_i 为 640 m/s 时,靶板未被穿透,枪弹停留在靶板内;当枪弹着靶速度为 645 m/s 时,UHMWPE 板开裂,靶板被穿透,部分陶瓷粉末流出。因此,数值模拟中枪弹对陶瓷复合装甲板的极限穿透速度为 642.5 m/s,与试验结果(618.4 m/s)的相对误差为 3.90%。

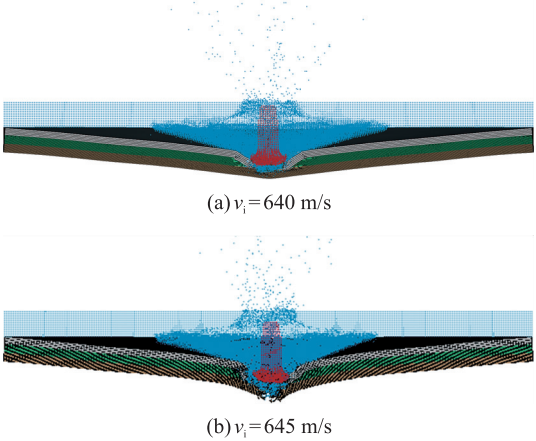


图 7 枪弹以不同速度着靶时对靶板的穿透情况
Fig. 7 Perforation results of armor impacted by projectile at different velocities

2.3.2 陶瓷复合靶板破坏形态对比

试验和数值模拟得到的陶瓷板正面的破坏形态如图 8 所示。由于试验中陶瓷材料自身存在孔隙、夹杂物和其它缺陷,试验中陶瓷材料的裂纹呈不对称扩展,数值模拟得到的陶瓷裂纹长度与试验结果并不一致。但总体上,数值模拟较好地复现了陶瓷中裂纹的扩展及破坏形貌,且数值模拟得到的靶板穿孔尺寸和试验结果相比误差约为-8.3%。

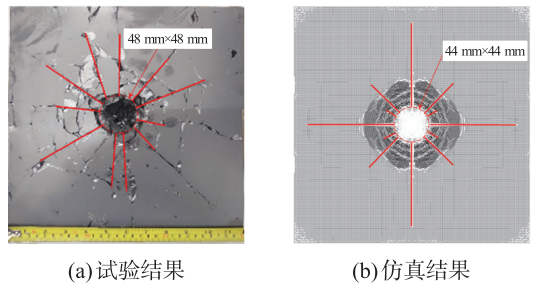


图 8 陶瓷板迎弹面损伤情况对比
Fig. 8 Comparison of the damage of ceramic plate's front face

图 9 所示为试验和数值模拟得到的靶板背面的变形及损伤情况对比。由图可知,数值模拟较好地复现了不同撞击速度下靶背的鼓包范围和鼓包变形。

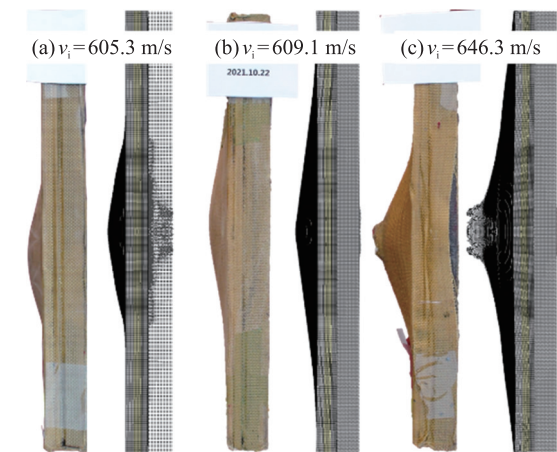


图 9 复合靶板背面变形及损伤情况对比
Fig. 9 Comparison of composite plate's back deformation and damage

通过上述对比,可以认为建立的有限元模型可以较准确地描述枪弹侵彻陶瓷复合装甲板的过程。

3 枪弹着靶攻角对弹靶响应的影响

为了分析枪弹着靶攻角对弹靶系统响应的影响,设置枪弹的着靶速度分别为 645 m/s 和 640 m/s,且方向垂直靶板。记枪弹初始的着靶攻角 α 为枪弹轴向和着靶速度矢量方向的夹角,如图 10 所示。取 α 在 $0\sim12^\circ$ 之间开展有限元仿真。同时,为分析枪弹的姿态变化,记枪弹轴线与豎直方向的夹角为 β ,侵彻开始时 $\beta=\alpha$ 。

表 4 为数值模拟得到的不同攻角时靶板的穿透情况。由表可知,攻角对侵彻能力的影响与枪弹的着靶速度有关,着靶速度为 645 m/s 的工况下, $\alpha\leq10^\circ$ 时靶板均被穿透,攻角进一步增大则靶板无法被穿透,枪弹侵彻能力随着攻角的增大逐渐减弱;着靶速度为 640 m/s 的工况下,枪弹在攻角为 0 时无法

穿透靶板,但在 $2^\circ\sim6^\circ$ 时均穿透靶板,攻角进一步增大则无法穿透靶板,枪弹侵彻能力随着攻角的增大先增强后减弱。这与文献[15]的试验结论一致,即小攻角增强了枪弹对陶瓷复合装甲板的侵彻能力。

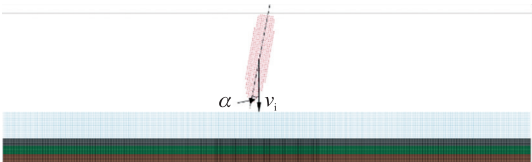


图 10 枪弹着靶攻角的定义
Fig. 10 Definition of the projectile's attack angle

表 4 数值模拟得到的靶板被穿透结果 Table 4 Perforation results of armor obtained by simulation		
$v_i/(m\cdot s^{-1})$	$\alpha/(^\circ)$	靶板是否被穿透
645	0	是
	2	是
	4	是
	6	是
	10	是
	12	否
640	0	否
	2	是
	4	是
	6	是
	8	否
	10	否
	12	否

3.1 着靶攻角对枪弹侵彻过程的影响

图 11 所示为着靶速度 640 m/s 时,3 种不同攻角(0° 、 6° 和 10°)下枪弹对陶瓷复合装甲板的侵彻过程,图 12 所示为不同攻角时枪弹沿弹道方向的速度、角度($\beta-\alpha$)、角速度随时间的变化。

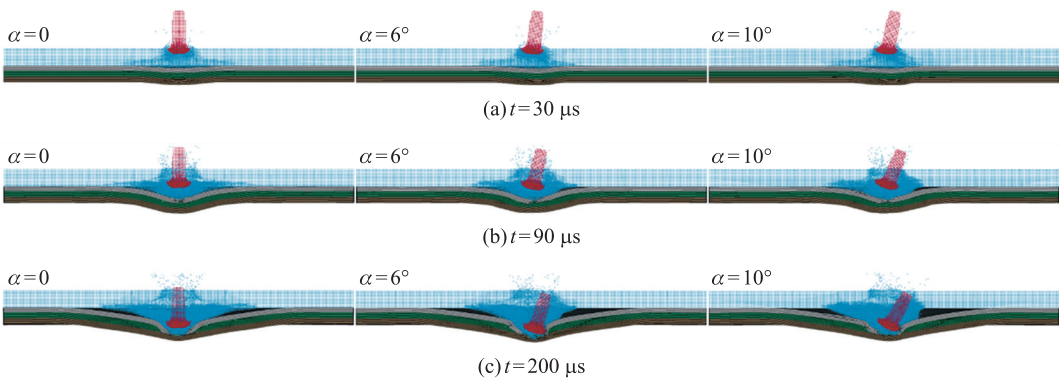


图 11 不同攻角下枪弹对陶瓷复合装甲板的侵彻过程($v_i=640\text{ m/s}$)
Fig. 11 Process of projectile penetrates the ceramic composite armor at different attack angles($v_i=640\text{ m/s}$)

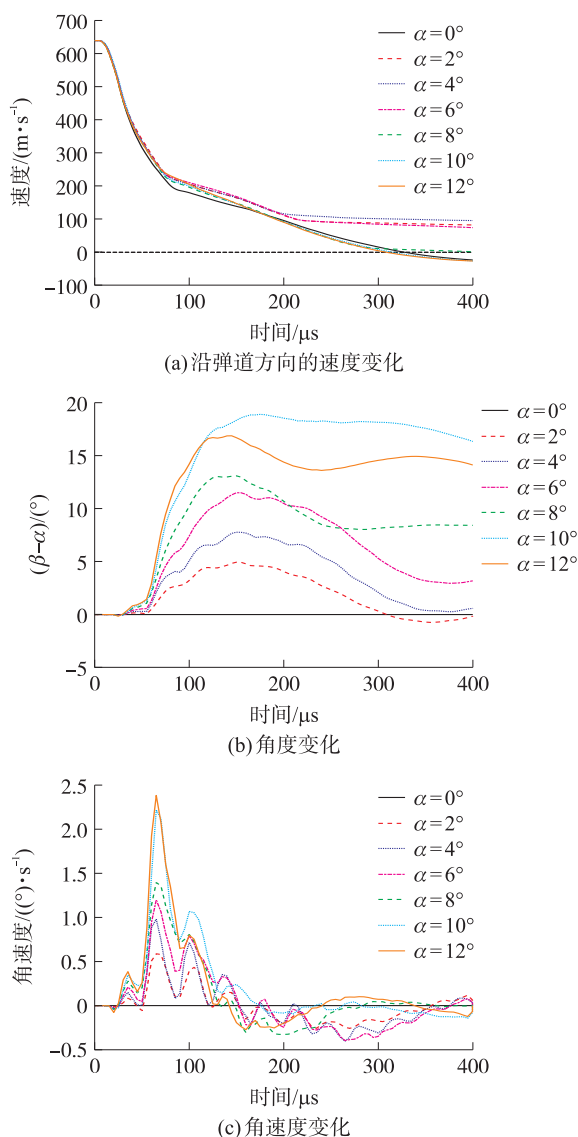


图 12 不同攻角下枪弹的速度、角度和角速度变化

Fig. 12 Variation of velocity, angle, and angular velocity of projectile at different attack angles

由图 11 可知,前 30 μs 内枪弹撞击陶瓷面板并在其内部形成锥形裂纹,而枪弹有攻角时可以观察到面板裂纹的不对称性。随后,枪弹侵入陶瓷内部,接触界面的陶瓷不断破碎,陶瓷面板内部的锥形裂纹扩展形成陶瓷锥。同时,枪弹头部不断墩粗并变成蘑菇状,而有攻角时枪弹头部右侧的磨损程度明显高于左侧。由图 12 可知,不同攻角下枪弹的速度变化无明显区别,无攻角侵彻时,由于枪弹头部侵彻过程中受力均匀,枪弹角度无明显变化。有攻角侵彻时,由于枪弹的头部形状呈卵形,在陶瓷板不均匀抗力的作用下,弹体沿顺时针偏转,导致角度和角速度迅速增大,且角速度随着攻角的增大而增大。枪

弹无攻角侵彻时,枪弹头部在侵彻陶瓷初期被墩粗,枪弹与陶瓷的接触面积增大;而侵彻时存在攻角时,被墩粗的枪弹侧面和靶板接触,枪弹和陶瓷板的接触面积减小,降低了枪弹受到的阻力,因此该阶段内有攻角工况对应的枪弹速度衰减慢于无攻角工况。

约 90 μs 左右,枪弹对陶瓷的侵彻和破坏基本结束,枪弹开始推动头部堆积的破碎的陶瓷材料侵彻并破坏复合材料背板。UHMWPE 板在冲击轴线方向产生丘陵状背凸变形,同时枪弹的速度衰减放缓。对比可以发现,攻角为 8°~12°的枪弹衰减速度明显快于其余工况,并在约 200 μs 速度减小至和无攻角时一致。

对于靶板穿透的工况 ($\alpha = 2^\circ \sim 6^\circ$),枪弹在约 200 μs 穿透靶板。此时靶板与枪弹接触的部分大部分已破碎,靶板提供的抗力较小且抗力的方向垂直于枪弹,对枪弹沿弹道方向的影响较小,因此枪弹沿弹道方向的速度不再发生明显变化。随后,枪弹在复合材料层提供的力矩的作用下逆时针转动,角度减小,姿态部分回正。枪弹未穿透时 ($\alpha = 0^\circ, 10^\circ$ 和 12°),其速度持续降低,直至 320 μs 左右降为零。随后,由于 UHMWPE 板弹性势能的释放,枪弹获得反向的速度,而其角度不再发生明显变化。

3.2 枪弹攻角对弹/靶能量变化的影响

陶瓷复合装甲靶板的抗弹机理为:陶瓷面板使枪弹发生磨蚀、破碎,耗散枪弹的部分动能;陶瓷面板断裂、破碎,并在背面形成破碎锥,将枪弹的侵彻作用化为冲击作用,利用复合材料层吸收、耗散枪弹通过陶瓷锥传输的动能^[19-20]。因此,枪弹侵彻陶瓷复合装甲板的过程中,枪弹的动能在不同阶段以不同的形式耗散。

图 13 和图 14 分别为不同攻角时枪弹和陶瓷的能量变化。由图 13(a) 所知,枪弹动能与图 12(a) 中的速度变化相似,前 90 μs 内 0° 攻角时枪弹在侵彻时消耗动能最多;枪弹消耗的动能受攻角的影响较小。该阶段由于复合装甲背板的变形较小,枪弹的动能主要消耗弹靶撞击界面附近陶瓷材料的断裂和破碎导致的陶瓷板内能变化,弹体的变形与破碎导致的枪弹内能变化以及弹体推动已破碎的陶瓷运动导致的陶瓷动能变化 3 方面。由图 13(b) 可知,枪弹的内能在枪弹着靶后迅速增大,并在约 60 μs 后基本稳定。这是由于枪弹强度远大于复合材料层,枪弹侵彻过程中已不再发生侵蚀,整体呈刚性侵彻。零攻角侵彻时枪弹内能的峰值大于有攻角侵彻

时,说明侵彻过程中枪弹在陶瓷面板的作用下变形程度更严重,进而导致该阶段零攻角工况下的枪弹的速度和动能衰减最快。

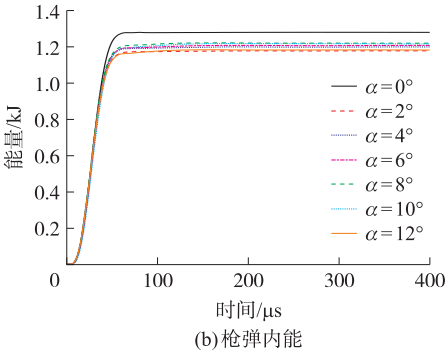
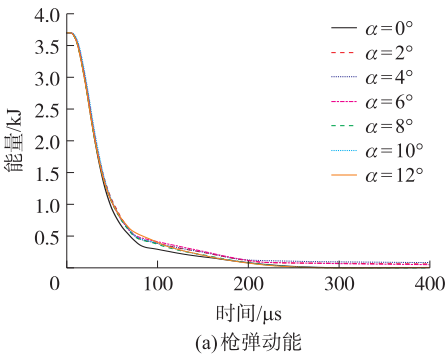


图 13 不同攻角时枪弹能量随时间的变化
Fig. 13 Variation of energy of projectile at different attack angles

由图 14 可知,陶瓷的动能远小于其内能。从图 14(a)可以看出,不同攻角时的陶瓷动能差异可以忽略,靶板未被穿透的工况($\alpha=0^\circ$ 及 $8^\circ\sim 12^\circ$)中,陶瓷动能持续传递给复合材料层,因此最终陶瓷动能稳定值小于靶板被穿透的工况。前 $90\ \mu\text{s}$ 时,与枪弹内能类似,攻角为 0° 时陶瓷的内能略大于有攻角时; $90\ \mu\text{s}$ 后,小攻角($0^\circ\sim 6^\circ$)时枪弹内能不再发生明显变化,而对于攻角较大的 3 个工况($\alpha=8^\circ\sim 12^\circ$),陶瓷内能仍不断增大,最终稳定值超过其余工况。结合图 11 可知,大攻角时,虽然枪弹在 $90\ \mu\text{s}$ 后已穿透陶瓷板,但由于此时枪弹偏转角度较大,其尾部已超出陶瓷中央的粉碎区范围,在复合材料背板提供的阻力作用下,枪弹侧面不断与未破碎的陶瓷相互作用,导致陶瓷进一步破碎,内能继续增大。该过程部分消耗了枪弹的动能,导致该阶段这 3 个工况枪弹的速度和动能衰减快于其余工况。

图 15~图 17 分别为碳纤维板、芳纶板以及 UHMWPE 板的能量时程曲线。3 种材料的能量变化规律相似: $0\sim 25\ \mu\text{s}$ 内,能量基本为零,这是由于

该时间段是枪弹撞击陶瓷面板的初始阶段,陶瓷锥尚未完全形成,产生的应力波还没有传播到背板; $25\sim 60\ \mu\text{s}$ 内,碳纤维板、芳纶板和 UHMWPE 板的能量相继达到峰值,开始变化的先后顺序与枪弹侵彻作用的次序一致。

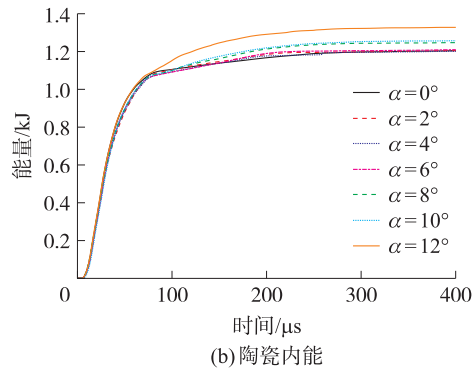
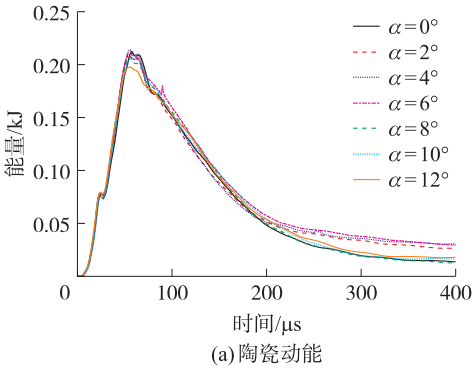


图 14 不同攻角时陶瓷能量随时间的变化
Fig. 14 Variation of energy of ceramic at different attack angles

由图 15 和图 16 可知,与陶瓷板类似,攻角为 0° 时碳纤维板和芳纶板的动能和内能峰值均大于有攻角时。对于 3 种靶板被穿透的工况,背板穿透后,枪弹不再传递能量给前两层背板,背板的动能和内能均出现一定程度下降。从图 17 可以看出,靶板被穿透的 3 种工况中,UHMWPE 板在 $200\ \mu\text{s}$ 左右被穿透时,由于其内部纤维断裂,UHMWPE 板内部部分弹性势能被释放,导致其内能突然下降,而动能出现二次上升。

图 18 所示为计算完成时陶瓷总能量和 3 种复合材料总能量与枪弹初始动能的比值。由图可知,陶瓷和复合材料层吸收的枪弹动能分别约占 $32\%\sim 37\%$ 和 $7\%\sim 9\%$ 。随着枪弹着靶攻角的增大,陶瓷的能量占比呈增大趋势,而复合材料层的能量占比呈先减小后增大的趋势。结合前述分析可知,枪弹着靶攻角主要通过影响陶瓷板的吸能情况影响最终靶板的穿透情况。

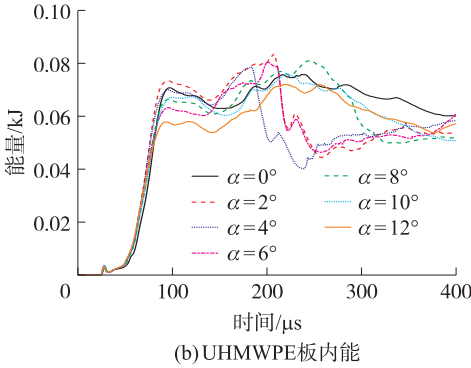
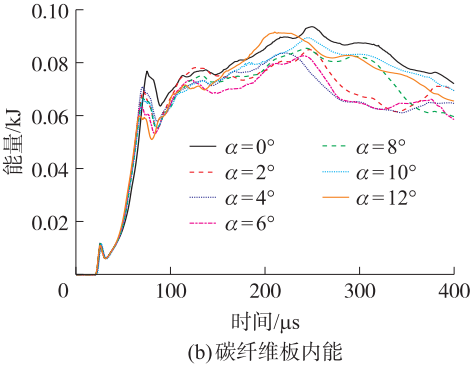
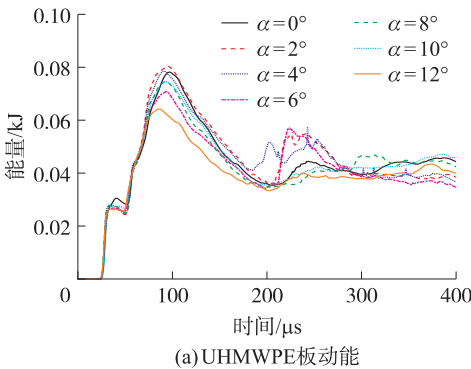
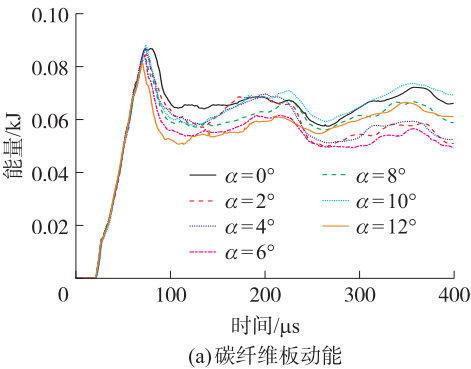


图 15 不同攻角时碳纤维板能量随时间的变化
Fig. 15 Variation of energy of carbon fiber plate at different attack angles

图 17 不同攻角下 UHMWPE 板能量随时间的变化
Fig. 17 Variation of energy of UHMPE plate at different attack angles

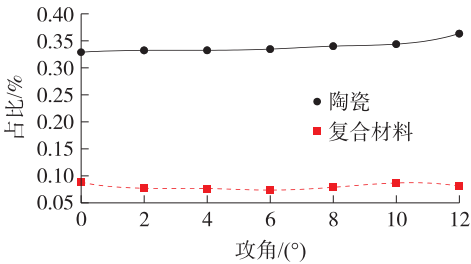
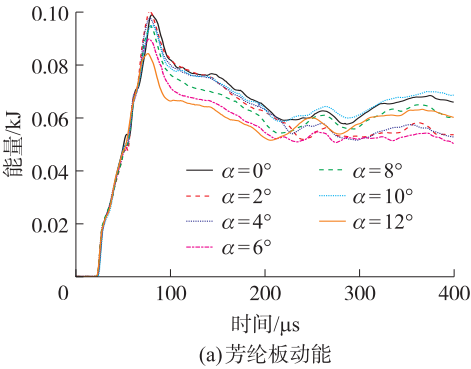


图 18 不同攻角下陶瓷及复合材料总能量占比
Fig. 18 Total energy proportion of ceramics and composite materials at different attack angles

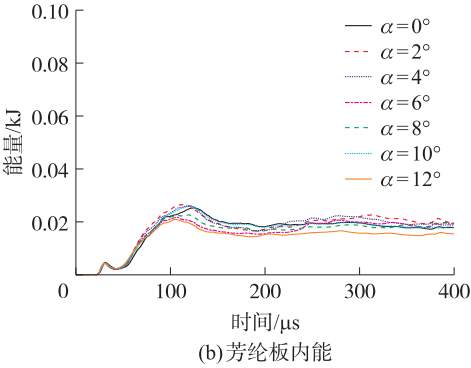


图 16 不同攻角时芳纶板能量随时间的变化
Fig. 16 Variation of energy of aramid fabric at different attack angles

4 结论

本文开展了 12.7 mm 穿甲燃烧弹对某构型陶瓷复合装甲板的侵彻试验和数值模拟研究,分析了枪弹着靶攻角对枪弹和复合装甲板相互作用过程中靶板动态响应的影响,得到以下结论:

①针对本文中研究的某构型陶瓷复合装甲,枪弹以小攻角($2^{\circ}\sim6^{\circ}$)着靶,且着靶速度(640 m/s)低于正侵彻时的极限穿透速度(642.5 m/s)时,仍能穿透靶板。

②当枪弹攻角较小($2^{\circ}\sim6^{\circ}$)时,相较无攻角时,枪弹头部与靶板的接触面积较小,减少了其在与陶瓷板相互作用的过程中能耗,增强了对陶瓷复合装

甲板的侵彻能力;当攻角进一步增大时($>6^\circ$),枪弹穿透陶瓷靶板后,尾部仍与未破碎的陶瓷相互作用,消耗部分动能,降低了其侵彻能力。

③陶瓷吸收的能量约为复合材料层的5倍,即枪弹着靶攻角主要通过影响陶瓷板的吸能情况影响最终靶板的穿透情况。

参考文献

- [1] 侯海量,朱锡,阚于龙. 轻型陶瓷复合装甲结构抗弹性能研究进展[J]. 兵工学报,2008,29(2):208-216.
HOU Hailing, ZHU Xi, KAN Yulong. The advance of ballistic performance of light ceramic composite armour under the impact of projectile[J]. Acta Armamentarii,2008,29(2):208-216. (in Chinese)
- [2] LIU W, CHEN Z, CHEN Z, et al. Influence of different back laminate layers on ballistic performance of ceramic composite armor[J]. Materials & Design,2015,87:421-427.
- [3] GUO G, ALAM S, PEEL L D. An investigation of the effect of a Kevlar-29 composite cover layer on the penetration behavior of a ceramic armor system against 7.62 mm APM2 projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering,2021,157:104000.
- [4] 潘志威,印立魁,易荣成,等. 双曲面陶瓷复合靶抗 12.7 mm 穿燃弹侵彻性能研究[J]. 兵器装备工程学报,2023,44(12):168-176.
PAN Zhiwei, YIN Likui, YI Rongcheng, et al. Study on penetration resistance of hyperboloid ceramic composite target to 12.7mm penetrating projectile[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2023,44(12):168-176. (in Chinese)
- [5] 高华,熊超,殷军辉,等. 多层异质复合靶板抗侵彻性能试验及结构优化设计[J]. 弹道学报,2018,30(3):67-72.
GAO Hua, XIONG Chao, YIN Junhui, et al. Anti-penetration performance test and structural optimization design of multilayer heterogeneous composite target-plate[J]. Journal of Ballistics,2018,30(3):67-72. (in Chinese)
- [6] 孙非,彭刚,王绪财,等. 撞击位置对陶瓷/纤维复合材料板抗弹评价的影响[J]. 弹道学报,2015,27(4):64-68.
SUN Fei, PENG Gang, WANG Xucai, et al. Influence of impact points on evaluation of anti-penetration performance of ceramic/fiber composite plates[J]. Journal of Ballistics,2015,27(4):64-68. (in Chinese)
- [7] 包阔,张先锋,谈梦婷,等. 子弹撞击碳化硼陶瓷复合靶试验与数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击,2019,39(12):57-68.
BAO Kuo, ZHANG Xianfeng, TAN Mengting, et al. Ballistic test and numerical simulation on penetration of a boron-carbide-ceramic composite target by a bullet[J]. Explosion and Shock Waves,2019,39(12):57-68. (in Chinese)
- [8] 张林,陈斌,谭清华,等. 陶瓷复合装甲抗 14.5 mm 穿燃弹侵彻性能[J]. 兵工学报,2022,43(4):758-767.
ZHANG Lin, CHEN Bin, TAN Qinghua, et al. Bullet-proof performance of ceramic composite armors against 14.5 mm armor-piercing projectiles[J]. Acta Armamentarii,2022,43(4):758-767. (in Chinese)
- [9] 李永鹏,徐豫新,张健,等. SiC 陶瓷/UHMWPE 纤维复合结构抗 12.7 mm 穿甲燃烧弹试验与仿真[J]. 兵工学报,2022,43(6):1355-1364.
LI Yongpeng, XU Yuxin, ZHANG Jian, et al. Test and simulation of SiC ceramic/UHMWPE fiber composite structure against 12.7 mm armor piercing incendiary projectile[J]. Acta Armamentarii,2022,43(6):1355-1364. (in Chinese)
- [10] FAWAZ Z, ZHENG W, BEHDINAN K. Numerical simulation of normal and oblique ballistic impact on ceramic composite armours[J]. Composite Structures,2004,63(3-4):387-395.
- [11] 王维占,赵太勇,冯顺山,等. 12.7 mm 动能弹斜侵彻复合装甲的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击,2019,39(12):81-90.
WANG Weizhan, ZHAO Taiyong, FENG Shunshan, et al. Numerical simulation study on penetration of a 12.7 mm kinetic energy bullet into a composite armor[J]. Explosion and Shock Waves,2019,39(12):81-90. (in Chinese)
- [12] ZAERA R, SÁNCHEZ-GÁLVEZ V. Analytical modelling of normal and oblique ballistic impact on ceramic/metal lightweight armours[J]. International Journal of Impact Engineering,1998,21(3):133-148.
- [13] YAZIV D, CHOCRON S, ANDERSON Jr C E, et al. Oblique penetration in ceramic targets[C]//19th International Symposium of Ballistics. Interlaken, Switzerland: Defence Procurement Agency,2001:1257-1264.
- [14] TOMCZYK K. The effect of bullet yaw on the threat level; a numerical investigation[C]//Personal Armour Systems Symposium 2014. Cambridge, UK: Royal Military Academy,2014.
- [15] WATSON C H, BATES L, HORSFALL I. The effect of low-angle yaw on the armour penetration of light armour-piercing projectiles[J]. Journal of Battlefield Technology,2010,13(3):1-4.
- [16] 陆文成,褚庆国,王晓东,等. 12.7 mm 穿燃弹侵彻 603 装甲钢行为研究[J]. 兵器材料科学与工程,2023,46(4):8-14.
LU Wencheng, CHU Qingguo, WANG Xiaodong, et al. Penetration behavior of 12.7 mm armor piercing incendiary into 603 armor steel[J]. Ordnance Material Science and Engineering,2023,46(4):8-14. (in Chinese)
- [17] VENKATESAN J, IQBAL M A, MADHU V. Experimental and numerical study of the dynamic response of B4C ceramic under uniaxial compression[J]. Thin-Walled Structures,2020,154:106785.
- [18] CHERNIAEV A, BUTCHER C, MONTESANO J. Predicting the axial crush response of CFRP tubes using three damage-based constitutive models[J]. Thin-Walled Structures,2018,129:349-364.
- [19] 蒋志刚,曾首义,申志强. 轻型陶瓷复合装甲结构研究进展[J]. 兵工学报,2010,31(5):603-610.
JIANG Zhigang, ZENG Shouyi, SHEN Zhiqiang. Research progress on lightweight ceramic composite armor structure[J]. Acta Armamentarii,2010,31(5):603-610. (in Chinese)
- [20] 陈斌,罗夕容,曾首义. 穿甲子弹侵彻陶瓷/钢靶板的数值模拟研究[J]. 弹道学报,2009,21(1):14-18.
CHEN Bin, LUO Xirong. ZENG Shouyi. Simulation study on ceramic/mild steel targets penetrated by APP[J]. Journal of Ballistics,2009,21(1):14-18. (in Chinese)