doi：10. 12068/j. issn. 1005－3026. 2026. 20240028

着靶姿态对破片侵彻性能的影响

郝 博[1,2]，杨 斌[1,2]，陈丹丹[1,2]，吕 超[1,2]
（1. 东北大学 机械工程与自动化学院，辽宁 沈阳 110819；
2. 东北大学 航空动力装备振动及控制教育部重点实验室，辽宁 沈阳 110819）

摘 要：为研究破片着靶姿态对侵彻性能的影响，基于ABAQUS有限元软件对典型柱形破片斜侵彻铝合金靶板进行仿真分析．设置柱形破片以10°～60°入射角斜侵彻铝合金靶板，探究着靶姿态与冲击速度对侵彻性能的影响．结果表明：当入射角小于30°时，对柱形破片的侵彻性能影响较小；当入射角大于30°时，入射角的增加将会严重削弱柱形破片的侵彻性能．随着入射角的增加，破片的弹道极限速度不断增加，并且入射角越大，其弹道极限速度的增幅越明显，侵彻性能越差．靶板的破孔尺寸随入射角的增加而增大，入射角越大，破孔尺寸的增加量越大．

关 键 词：着靶姿态；破片；侵彻性能；铝合金靶板；数值模拟
中图分类号：TJ 410.1 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-3026(2026)02-0050-08

Influence of Target Attitude on Fragment Penetration Performance

HAO Bo[1,2], *YANG Bin*[1,2], *CHEN Dan-dan*[1,2], *LYU Chao*[1,2]
(1. School of mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory of Vibration and Control of Aero-Propulsion System Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China. (Corresponding author: YANG Bin, E-mail: yang95921b@163.com))

Abstract: To study the influence of the fragment's impact posture on the penetration performance, a simulation analysis was conducted on the typical cylindrical fragments' oblique penetration of an aluminum alloy target plate using the ABAQUS finite element software. The cylindrical fragments were set to penetrate the aluminum alloy target plate at an incidence angle ranging from 10° to 60°. The effects of the impact posture of the target plate and the impact velocity on the penetration performance were investigated. The results show that when the incidence angle is less than 30°, the penetration performance of the cylindrical fragments is not significantly affected; when the incidence angle is greater than 30°, the increase in the incidence angle will severely weaken the penetration performance of the cylindrical fragments. As the incidence angle increases, the ballistic limit velocity of the fragments continuously increases, and the greater the incidence angle, the more significant the increase in the ballistic limit velocity and the worse the penetration performance. The size of the target plate's perforation increases with the increase in the incidence angle, and the increase in the perforation size is greater when the incidence angle is larger.

Key words: target attitude; fragment; penetration performance; aluminum alloy target plate; numerical simulation

侵彻力学属应用力学领域，研究的是侵彻体与目标的相互作用，对军事、航空航天及民用领域有重要意义[1-2]．近年来，随着小型无人机集群在侦察、探测等军事领域的作用日益明显，学者们逐渐开展针对小型无人机集群的毁伤性武器的研究．子母战斗部作为一种有效打击小型无人机集群的杀伤性武器，其弹药的材质、结构是影响毁伤效果的重要指标．预制、半预制破片作为

收稿日期：2024-02-02
作者简介：郝 博(1963—)，男，辽宁沈阳人，东北大学教授，博士生导师．
通信作者：杨 斌，E-mail:yang95921b@163.com

一种广泛应用于子母战斗部的主要毁伤元素,对无人机集群的毁伤效果具有明显作用.

针对破片战斗部的毁伤性能研究,国内外已开展各类破片对靶板的侵彻研究.Rusinek等[3]通过ABAQUS软件对弹体侵彻进行了数值模拟,发现弹道极限与弹体直径呈线性关系;Warren等[4]采用数值模拟分析了球形钢弹对6061-T6511铝合金靶板的侵彻能力,得到了铝板的弹道毁伤效应;Iqbal等[5-6]借助ABAQUS软件,研究了不同靶板的抗侵彻性能,发现单层靶抗卵形弹体侵彻性能要优于双层靶;Elek等[7]采用ABAQUS软件分析了圆柱形钢弹对薄钢板的穿孔特性,提出了最小穿孔动能的经验关系式;Han等[8]对不同厚度的铝合金板抵抗平头弹的侵彻性能进行了研究,发现靶板破坏形式都是剪切堵塞,与靶板厚度无关;Hong等[9]研究了钨合金方形破片对不同厚度钢靶的侵彻性能,发现在破片未穿透靶板前,靶板的鼓包高度随破片动能增加,穿靶后鼓包高度随破片动能减小;Cheng等[10]研究了大质量低速破片和小质量高速破片对高强度装甲钢的侵彻性能,发现破片对靶板的损伤模式为绝热剪切破坏.Wei等[11]采用两种形状的战斗部对不同结构的层合板进行测试,发现靶板对平头弹的抗冲击性能要优于椭圆形弹的抗冲击性能.Mohammad等[12]研究了卵形、钝形、圆锥形和半球形4种头部形状的弹丸对整体靶和层状靶的抗冲击性能,发现除钝形头部外,其余头部结构的弹丸对靶板进行撞击时,整体靶比层状靶的抗冲击性能更优.

文献[13-25],关于破片对靶板的侵彻性能研究大多仅涉及单一形状、垂直着靶的破片.然而,对破片的着靶姿态对靶板的破坏机制和侵彻性能的影响还有待于全面深入的研究.由于在实际的反无人机集群作战中,子母战斗部开舱抛撒后的破片群很难保证垂直射出,破片与敌方无人机的相对位置处于动态变化中,同时在重力和空气阻力不对称的作用下往往难以实现理想的垂直着靶姿态.因此,探究着靶姿态对其侵彻性能的影响,具有重要的研究价值.通常,破片对目标的侵彻过程呈现为斜侵彻形式.弹体的速度矢量与目标表面法线之间的夹角为入射角,当入射角θ=0°时为正侵彻,也称为法向侵彻;反之,则属于斜侵彻范畴.

本文通过ABAQUS仿真软件对典型柱形破片斜侵彻铝合金靶板的过程进行了数值仿真.为探明入射角的影响,对柱形破片10°~60°斜侵彻进行仿真试验,系统分析了侵彻性能随角度变化的内在规律.

1　数值模型

1.1　有限元模型的建立

破片战斗部的材料广泛采用钨合金破片,其具有较高的强度和硬度,对无人机集群具有显著的杀伤效果,无人机结构采用2A12高硬铝等效替代.为准确计算钨合金破片的毁伤效果,为战斗部威力分析提供计算依据,需要建立破片对金属目标的侵彻模型.

本文涉及的破片形状为柱形破片,在ABAQUS/Explicit模块中对破片和靶板进行三维建模,并对柱形破片对靶板的斜侵彻过程进行了有限元分析.其中柱体破片的长径比为5∶4,直径为4.0 mm.靶板为铝合金材质,厚度为2 mm,直径为100 mm,大约是破片口径的30倍.仿真试验中,破片与靶板均采用C3D8R单元进行建模,并利用通用接触算法来模拟破片在侵彻过程中的消蚀行为.破片的网格尺寸根据不同形状划分为0.15~0.20 mm,靶板在厚度方向的网格密度为0.20 mm,在靶板半径方向采用变密度网格划分方法,即在中心的侵彻区域布置致密网格,并使其尺寸沿径向向外逐渐增大.最终网格划分效果如图1所示.

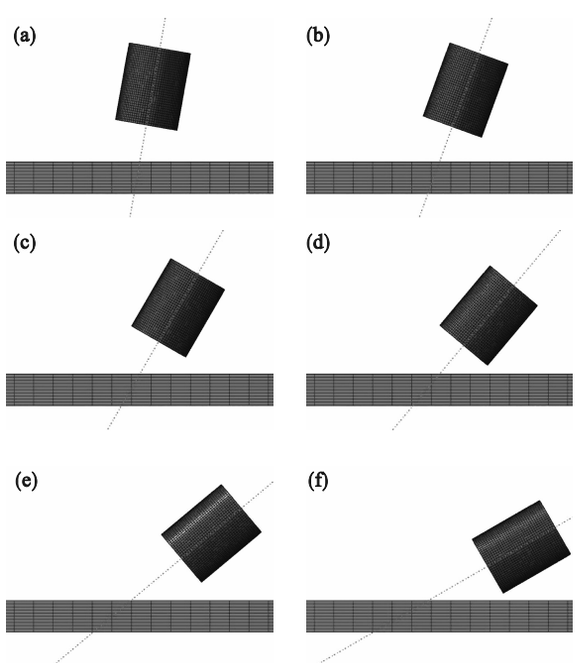


图1　不同入射角下的柱形破片的侵彻模型

Fig. 1　Penetration model of cylindrical fragments at different incidence angles

(a)—10°; (b)—20°; (c)—30°; (d)—40°; (e)—50°; (f)—60°.

1.2 材料参数

为准确对破片的侵彻过程进行数值模拟,钨合金破片和2A12铝合金靶板均采用Johnson-Cook本构模型和Johnson-Cook损伤模型[26-27],Johnson-Cook本构模型形式简单、精度高、物理意义明确,被广泛应用于高应变率、大变形及高温情况.Johnson-Cook本构模型是一种理想刚塑性模型,它能同时表征金属材料的应变强化、应变率效应及温度软化行为,其表达式如下:

$$\sigma_p=\left(\sigma_s+B\varepsilon_p^n\right)\left(1+C\ln\dot{\varepsilon}^*\right)\left(1-T^{*m}\right). \tag{1}$$

式中:σ_p为等效应力;σ_s为材料在参考应变率和参考温度下的屈服强度;B和n为应变硬化参数;C为应变率敏感系数;m为温度软化指数;ε_p为等效塑性应变;$\dot{\varepsilon}^*=\varepsilon_p-\varepsilon_0$为无量纲化等效塑性应变率;$\varepsilon_0$为参考应变率;$T^*=(T-T_r)/(T_m-T_r)$为温度软化因子;$T_r$为参考温度;$T_m$为材料熔点;$T$为材料温度.

针对破片侵彻靶板问题,基于ABAQUS有限元软件,通常选用Johnson-Cook损伤模型,Johnson-Cook损伤模型能较好地描述其在大变形、高应变率、高温下的材料失效行为,其表达式如下:

$$\varepsilon_f=\left[D_1+D_2\mathrm{e}^{D_3\eta}\right]\left(1+D_4\ln\dot{\varepsilon}^*\right)\left(1-D_5T^*\right). \tag{2}$$

式中:ε_f为当前应力、应变率和温度条件下的断裂应变;η为应力三轴度;D_1,D_2,D_3,D_4,D_5为材料损伤失效参数.

钨合金破片和2A12铝合金靶板的Johnson-Cook材料模型参数如表1和表2所示,其中ρ为材料密度,E为弹性模量,G为剪切模量.

表1 钨合金破片Johnson-Cook材料参数

Table 1 Johnson-Cook material parameters of tungsten alloy fragments

ρ/(kg·m^{-3})	E/GPa	G/GPa	σ_s/MPa	B	C	n	m
17 650	410	137	1 500	177	0.016	0.12	1.0
T_m/K	T_r/K	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	ε_0/(s^{-1})
1 498	293	2.0	1.77	−3.4	0	0	1

表2 2A12铝合金靶板Johnson-Cook材料参数

Table 2 Johnson-Cook material parameters of 2A12 aluminum alloy target plate

材料	ρ/(kg·m^{-3})	E/GPa	G/GPa	σ_s/MPa	B/MPa	C	n	m
2A12铝合金	2 780	73.083	26.9	369	684	0.008 3	0.73	1.7
材料	T_m/K	T_r/K	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	$\varepsilon_0\times10^4$/(s^{-1})
2A12铝合金	775	300	0.13	0.13	−0.15	0.011	0.0	5

在高速冲击动力学问题中,应力波幅值通常远超材料的动态屈服强度.材料处于高压流动状态,材料中的静水压力一般通过状态方程来计算.状态方程是描述物质宏观物理行为热力学参量之间的关系式,包括物质体积、密度、压力、温度和能量等.

在材料模型中,引入Grüneisen状态方程(EOS)用以定义材料受压时的静水压力响应,其关系式为

$$p_h=\frac{\rho_0c_v^2\mu\left[1+\left(1-\frac{\gamma_0}{2}\right)\mu-\frac{a}{2}\mu^2\right]}{\left[1-\left(S_1-1\right)\mu-S_2\frac{\mu^2}{\mu+1}-S_3\frac{\mu^3}{\left(\mu+1\right)^2}\right]^2}+\left(\gamma_0+a\mu\right)E_0. \tag{3}$$

式中:c_v为体积声速,即冲击波波速与波后质点粒子速度关系曲线的截距;μ为无量纲压缩参数;S_1,S_2,S_3为曲线的斜率系数;γ_0为Gruneisen Gamma常数;a为对γ_0的一阶体积修正系数;E_0是初始体积内能;ρ_0为材料初始密度.

该Grüneisen状态方程在材料模型中完整定义了材料在压缩与膨胀状态下的静水压力响应,其关系式为

$$p_h=\rho_0c_v^2\mu+\left(\gamma_0+a\mu\right)E_0. \tag{4}$$

而μ与ρ_0的关系式为

$$\mu=\frac{\rho}{\rho_0}-1. \tag{5}$$

钨合金破片和2A12铝合金靶板的状态方程参数如表3所示.

表3 钨合金破片和2A12铝合金靶板状态方程参数

Table 3 State equation parameters of tungsten alloy fragment and 2A12 aluminum alloy target plate

材料	S_1	S_2	S_3	γ_0	a	c_v (m·s^{-1})	E_0 (J·m^{-3})
钨合金	1.237	0.0	0.0	1.54	0.0	4 029	0.0
2A12铝合金	1.400	0.0	0.0	1.97	0.0	5 240	0.0

2 数值方法验证

为验证数值方法的准确性,在完全相同的侵

彻条件下,结合弹道极限速度,对文献[28]中的钨合金球形破片侵彻铝板的过程进行数值模拟和理论计算.通过数值模拟与理论计算分析球形破片侵彻靶板情况,得到了球形破片对靶板的弹道极限速度,并将数值模拟结果和理论计算结果与文献[28]的实验结果进行对比,如表4所示.

表4　弹道极限速度结果对比

Table 4　Comparison of ballistic limit velocity results

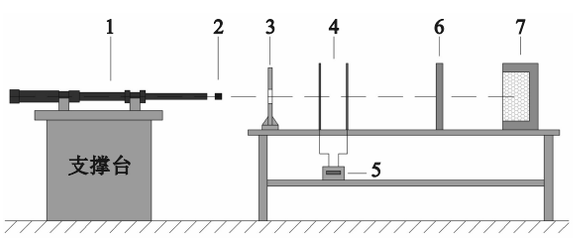
序号	破片直径/mm	靶厚/mm	弹道极限速度/(m·s^{-1})			仿真误差/%	理论误差/%
			试验值	仿真值	理论值		
1	10.0	8	306	311	321	1.63	4.90
2	9.2	8	341	333	342	−2.35	0.29
3	7.0	10	510	519	497	1.76	−2.55
4	5.0	10	627	653	639	4.15	1.91
5	3.0	8	806	823	793	2.11	−1.61
6	3.0	10	919	922	937	0.33	1.96

根据钨球、钢球侵彻各类靶板(如钢、铝及复合板)的弹道极限速度数据[3],在不同弹靶条件下,破片的弹道极限速度V_{50}

$$V_{50}=c\cdot\left(\frac{h}{d\cdot\cos\alpha}\right)^{b}\cdot\frac{\rho_{t}^{0.3}}{\rho_{p}^{0.8}}\cdot\sigma_{t}^{0.5}. \tag{6}$$

式中:V_{50}为弹道极限速度,m·s^{-1};h为靶板厚度,m;d为球形破片直径,m;ρ_t为靶板材料密度,kg·m^{-3};ρ_p为破片材料密度,kg·m^{-3};σ_t为靶板强度极限,Pa;α为侵彻角度,(°);b,c为与弹靶条件相关的修正系数.

从表4可以看出,试验值与仿真值的最大误差为4.15%,理论值与试验值的最大误差为4.90%,这2种相对误差均不超过5%.由表4可知,本文的实验值、仿真值和理论值的一致性较好,仿真值和理论值与文献[28]的实验结果非常接近,从而验证了本文数值模拟方法的准确性.图2为试验装置示意图.



1—为弹道枪;2—为破片;3—为挡板;4—为光电测速靶;5—为电子测试仪;6—为靶板;7—为回收箱.

图2　试验装置示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the test device

3　结果与讨论

3.1　残余速度分析

图3和图4分别是柱形破片在入射角为10°,20°,30°,40°,50°和60°的条件下,破片以不同的冲击速度侵彻2 mm厚铝靶后,破片的残余速度和速度衰减率随入射角的变化曲线.

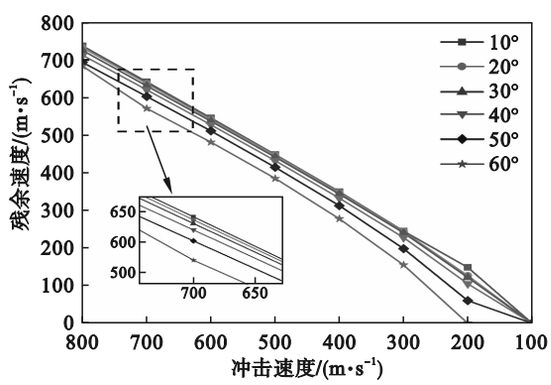


图3　柱形破片的残余速度曲线

Fig. 3　Residual velocity curves of cylindrical fragments

图3为破片在不同的入射角下以不同冲击速度侵彻薄铝靶后残余速度的变化曲线.由图3可知,当破片以相同的冲击速度侵彻靶板时,当入射角为10°时,柱形破片的残余速度最高,柱形破片侵彻靶板后残余速度随着入射角减小而不断减小;当入射角为60°时,破片的残余速度达到最低.当破片的冲击速度下降到200 m/s时,入射角为10°~50°的破片依然可以贯穿靶板;当入射角为60°时,破片已经无法贯穿靶板.随着破片冲击速度的降低,入射角越大,其侵彻靶板后的残余速度就越低.

图4为柱形破片在不同的入射角下以不同的冲击速度侵彻薄铝靶后速度衰减率的变化曲线.由图4可知,随着破片冲击速度的降低,破片的速度衰减率逐渐增加.当入射角为10°时,同一冲击速度下,破片的速度衰减率最低,并且随着入射角的增加,速度衰减率逐渐提高,且不同角度下的速

度衰减率差距逐渐增大.当冲击速度为200 m/s时,入射角为20°的破片比入射角为10°的破片速度衰减率提高了10.9%,而入射角为60°的破片速度衰减率达到最高,为100%.当冲击速度为100 m/s时,这6种入射角下的速度衰减率都达到了100%,表明速度衰减率达到100%后,破片已经发生跳飞现象,无法穿透靶板.

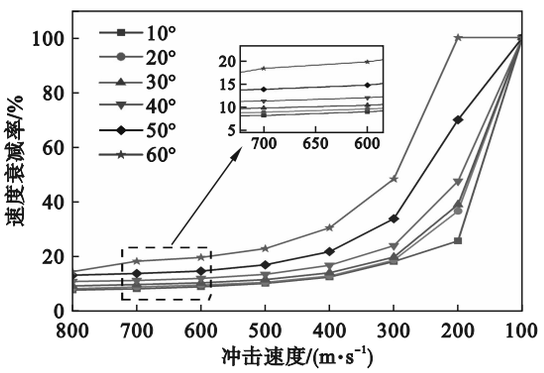


图4 柱形破片的速度衰减率曲线

Fig. 4 Velocity decay rate curves of cylindrical fragments

从图3和图4可以看出,当入射角在小于30°时,破片的残余速度和速度衰减率相差不大,当入射角大于30°时,残余速度和速度衰减率的差距越来越明显.这表明30°是侵彻性能变化的临界值.低于此值时,入射角影响不显著;超过此值,则性能急剧恶化,且当破片冲击速度降至200 m/s时,柱形破片已经无法贯穿靶板,出现跳飞现象,已经无法对靶板进行有效毁伤.

3.2 弹道极限速度分析

由表5和图5可知,当柱形破片分别以10°,20°,30°,40°,50°和60°的入射角斜侵彻2 mm厚铝靶时,其弹道极限速度有着显著的差异.随着入射角的增加,破片的弹道极限速度逐渐增加,依次为165,168,169,172,196和265 m/s,其相对于正侵彻状态下的弹道极限速度分别增长0.6%,2.4%,3.1%,4.9%,19.5%和61.6%.当入射角小于40°时,破片的弹道极限速度增幅较小;当入射角大于40°时,破片的弹道极限速度的增幅开始急剧增加.因此,在破片侵彻薄铝靶时,一定范围内的角度改变对破片的侵彻性能影响相对较小.当入射角度大于某一数值时,入射角的增加对破片侵彻性能的影响变得明显.随着入射角的增加,破片的弹道极限速度不断增加,并且入射角越大,其弹道极限速度的增幅就越明显,侵彻性能就越差.

表5 柱形破片的弹道极限速度对比

Table 5 Comparison of ballistic limit velocity of cylindrical fragments

入射角/(°)	弹道极限速度 (m·s⁻¹)	柱形破片较正侵彻弹道极限速度提升比/%
10	165	0.6
20	168	2.4
30	169	3.1
40	172	4.9
50	196	19.5
60	265	61.6

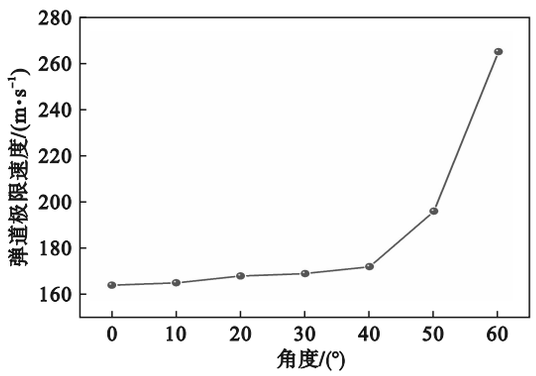


图5 柱形破片的弹道极限速度曲线

Fig. 5 Trajectory limit velocity curves of cylindrical fragments

3.3 破孔尺寸分析

为了直观地对比不同角度下柱形破片对靶板的侵彻状态,对靶板的破孔尺寸进行了研究.图6为800 m/s冲击速度下,不同入射角冲击铝靶形成的正面扩孔与弹坑剖面.由于固定角度下改变冲击速度仅引起弹坑尺寸的微小变化,而未改变侵彻机理与形貌特征,故未列出其他速度对应的形貌图.

由图6可知,当破片以相同速度不同入射角斜侵彻靶板时,靶板应力范围近似,但是其应力分布不同,靶板的出口侧具有比入口侧更大的高应力区域,且随着入射角的增大,破片与靶板的接触应力不断提高.靶板被侵彻产生的破孔形状和尺寸与入射角有关,入射角越大,破孔尺寸越大.当入射角为10°,20°时,破孔尺寸增长的幅度较小;当入射角大于30°时,破孔尺寸增长明显.孔洞形状近似于标准的圆形,X方向的孔径尺寸和Y方向孔径尺寸基本一致.随着入射角的增加,靶板的孔径尺寸明显变化,Y方向的孔径尺寸不断增加,而X方向的孔径尺寸基本不变,孔洞形状开始由圆形逐渐转变为椭圆形.当入射角为60°时,破孔尺寸增幅变大,Y方向的孔径尺寸达X方向孔径尺寸的2倍.

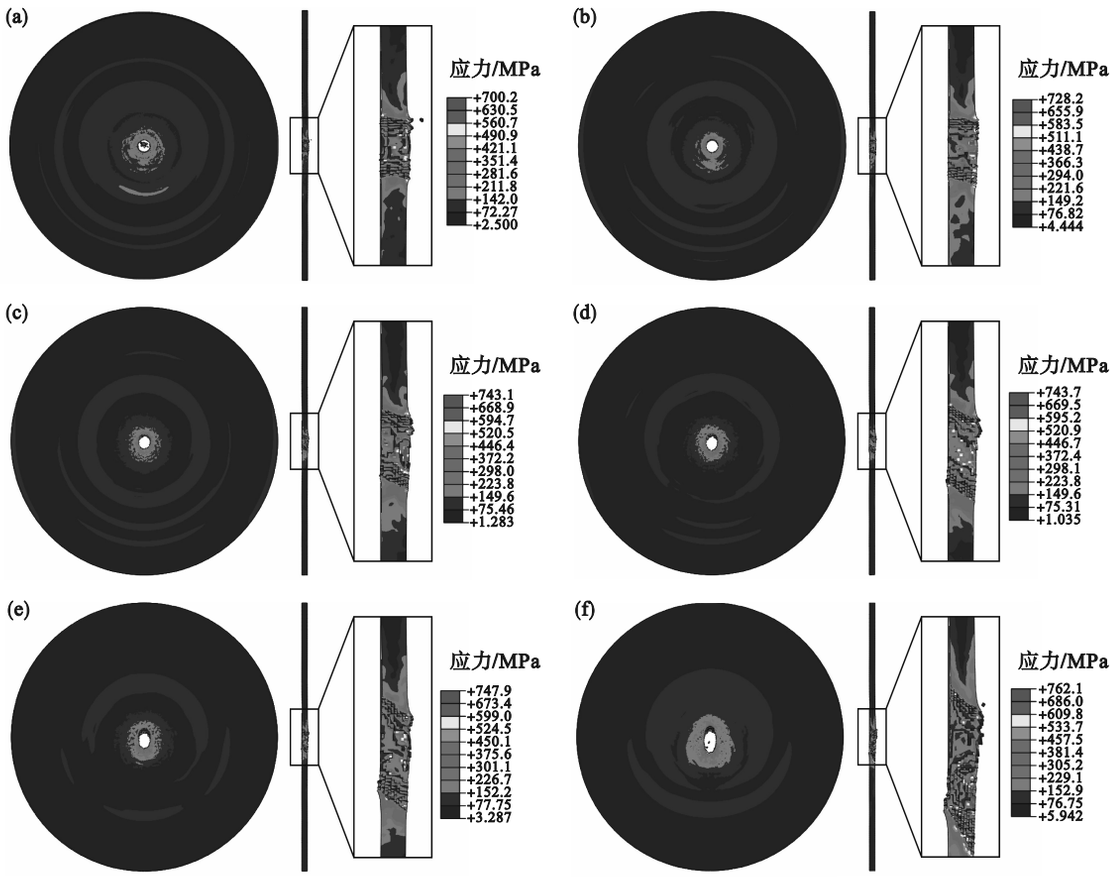


图6　不同入射角下靶板的正面及局部剖面形貌

Fig. 6　Front and local profile topography of the target plate at different incidence angles

(a)—10°; (b)—20°; (c)—30°; (d)—40°; (e)—50°; (f)—60°.

表6与图7分别给出了不同入射角下Y方向的孔径尺寸及其变化曲线.由于X方向孔径(约4.5 mm)在此角度范围内基本保持不变(图6),表6中未予单独列出.

表6　不同入射角下的靶板孔径尺寸

Table.6　The aperture size of the target plate at different incidence angles

初速度/($m\cdot s^{-1}$)	入射角/(°)	入口孔径/mm	中部孔径/mm	出口孔径/mm
800	10	4. 82	4. 83	5. 03
800	20	4. 87	4. 97	5. 27
800	30	5. 50	5. 75	6. 00
800	40	6. 59	6. 73	6. 96
800	50	7. 53	7. 63	7. 68
800	60	10. 22	10. 92	11. 84

由表6可知,当入射角从10°增至20°时,尽管靶板正面入口孔径仅增加0.05 mm,但其中部孔径与出口孔径已呈现显著增大趋势.当入射角为30°,40°和50°时,靶板的破孔尺寸已经明显增大,其入口孔径依次为5.50,6.59和7.53 mm,与入射角为0°时比较,入口孔径分别增加了22.2%,46.4%和67.3%.当入射角增至60°时,入口孔径达到最大值10.22 mm,较0°入射角时增加127.1%,即超过2倍.该现象可归因于随入射角增大,破片在Y方向的分速度上升,而在X方向的分速度下降,导致单位时间内对靶板的法向侵彻深度减小,破片更多沿Y方向扩展,从而形成更大的椭圆形孔洞.

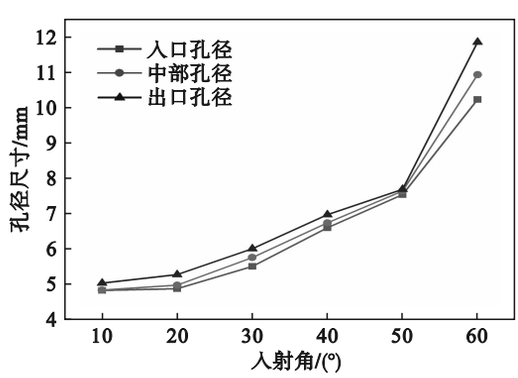


图7　各部位孔径尺寸随入射角的变化曲线

Fig. 7　The variation curve of the aperture size of each part with the incidence angle

由图7可知,各部位孔径随入射角的变化规律:入口、中部与出口孔径均随入射角度增加而

增大,且增幅逐渐变大;此外,当入射角相同时,中部孔径始终介于入口与出口孔径之间.

3.4 剩余动能分析

结合式(7)和图4的结果,计算破片的初始动能和剩余动能,以及侵彻过程中的动能衰减率.图8和图9分别是柱形破片在入射角为10°,20°,30°,40°,50°和60°时,破片以不同的冲击速度侵彻2 mm薄铝靶后,其在不同工况下的剩余动能和动能衰减率随入射角的变化曲线.

$$E_k = \frac{1}{2} m_p v^2. \tag{7}$$

式中:E_k为破片动能;m_p为破片质量;v为破片速度.

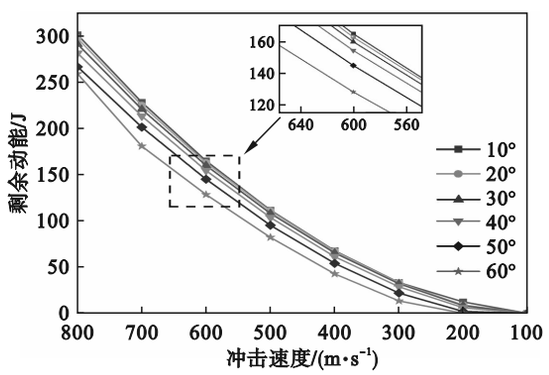


图8 不同入射角下柱形破片的剩余动能曲线

Fig. 8 Residual kinetic energy curves of cylindrical fragments at different incidence angles

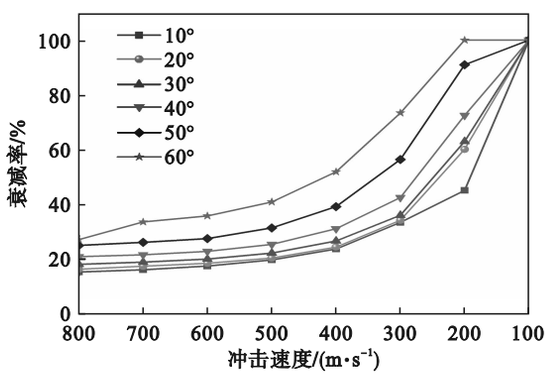


图9 不同入射角下柱形破片的动能衰减率

Fig. 9 Kinetic energy attenuation rate of cylindrical fragments at different incidence angles

由图8可知,破片的剩余动能随冲击速度的降低而不断减少,并且在同一冲击速度下,随着入射角的不断增加,其剩余动能不断降低.由图9可知,随着冲击速度的降低,破片的动能衰减率不断提高,当冲击速度为200 m/s,入射角为60°时破片已经无法贯穿靶板,且入射角越大,动能衰减率就越高,侵彻性能就越差.这是因为随着入射角度的增加,破片与靶板的等效接触面积不断增加,贯穿靶板需要的能量不断增加,从而剩余动能不断降低.

4 结 论

1)在破片侵彻薄铝靶时,当入射角小于30°时,入射角对破片的侵彻性能影响较小;当入射角大于40°时,入射角的增加对破片侵彻性能的影响变得明显.

2)随入射角的增加,破片的弹道极限速度不断增加,并且入射角越大,其弹道极限速度的增幅就越明显,侵彻性能越差.

3)靶板的破孔尺寸随入射角的增加而增加,入射角越大,破孔尺寸的增加量越大;当入射角相同时,中部孔径大于入口孔径而小于出口孔径.

4)破片的剩余动能随冲击速度的降低不断减少,且在同一冲击速度下,随入射角的不断增加,剩余动能不断降低.

参考文献:

[1] Backman M E, Goldsmith W .The mechanics of penetration of projectiles into targets [J]. *International Journal of Engineering Science*, 1978, 16(1):1-99.

[2] JonalA, Zukas. High velocity impact dynamics [M]. New York: John Wiley and Sons, Inc, 1990.

[3] Rusinek A, Rodriguez-Martinez J A, Arias A, et al. Influence of conical projectile diameter on perpendicular impact of thin steel plate [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75(10): 2946-2967.

[4] Warren T L, Poormon K L. Penetration of 6061-T6511 aluminum targets by ogive-nosed VAR 4340 steel projectiles at oblique angles: experiments and simulations [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 25(10):993-1022.

[5] Iqbal M A, Chakrabarti A, Beniwal S, et al. 3D numerical simulations of sharp nosed projectile impact on ductile targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(2): 185-195.

[6] Iqbal M A, Gupta P K, Deore V S, et al. Effect of target span and configuration on the ballistic limit [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 42: 11-24.

[7] Elek P M, Jaramaz S S, Mickovic D M, et al. Experimental and numerical investigation of perforation of thin steel plates by deformable steel penetrators [J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 102: 58-67.

[8] Han J, Shi Y H, Ma Q Q, et al. Experimental and numerical investigation on the ballistic resistance of 2024-T351 aluminum alloy plates with various thicknesses struck by blunt projectiles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 163:104182.

[9] Hong D, Li W B, Zheng Y, et al. Study on bulge state of PCrNi3MoV target plates penetrated by square fragments [J]. *Applied Sciences-Basel*, 2022, 12(14):6987.

[10] Cheng C, Li T P, Li G, et al. Ballistic response of a high-strength steel [J]. *Mechanics of Advanced Materials and*

Structures, 2023.31(21):5377-5388.

[11] Wei G, Hao C Y, Ai J Y, et al. Effect of lamination sequence and warhead shape on impact resistance of fiber-metal laminates[J]. *Polymer Composites*, 2023, 44(12): 8510-8528.

[12] Mohammad Z, Gupta P K, Baqi A. Experimental and numerical investigations on the behavior of thin metallic plate targets subjected to ballistic impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 146:103717.

[13] Lu Y Y, Zhang Q M, Xue Y J, et al.High-velocity impact performance of aluminum and B4C/UHMW-PE composite plate for multi-wall shielding[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(2):721.

[14] Palta E, Gutowski M, Fang H B. A numerical study of steel and hybrid armor plates under ballistic impacts [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2018, 136: 279-294.

[15] Zhang W, Deng Y F, Cao Z S, et al. Experimental investigation on the ballistic performance of monolithic and layered metal plates subjected to impact by blunt rigid projectiles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 49: 115-129.

[16] Kumar M, Bharadwaj M R. Numerical simulation of ballistic impact response on composite materials for different shape of projectiles [J]. *Sadhana-Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 2022, 47(3):145.

[17] Shi Y H, Hu A, Du T S, et al. Experimental and numerical study on the protective behavior of weldox 900 E steel plates impacted by blunt-nosed projectiles [J]. *Metals*, 2022, 12(1):141.

[18] 郝鹏,卿光辉,李建峰,等.2A12铝合金薄板对卵形头弹抗冲击性能研究[J].振动与冲击, 2016, 35(17):19-25.
(Hao Peng, Qin Guang-hui, Li Jian-feng, et al. Ballistic resistance of 2A12 thin plates against ogival-nosed projectiles impact [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016,35(17):19-25.)

[19] 邓云飞,孟凡柱,李剑锋,等.Q235钢板对半球形头弹抗侵彻特性[J].爆炸与冲击,2015,35(3):386-392.
(Deng Yun-fei, Meng Fan-zhu, Li Jian-feng, et al. The ballistic performance of Q235 metal plates subjected to impact by hemispherically-nosed projectiles[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35 (3):386-392.)

[20] 程瑶,刘晓蕾,张晓东,等.典型立方体破片侵彻装甲钢的数值模拟研究[J].兵器装备工程学报,2022,43(8):106-111.
(Cheng Yao, Liu Xiao-lei, Zhang Xiao-dong, et al. A numerical simulation study of typical cube fragments invading armored steel[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*,2022,43(8):106-111.)

[21] 李金福,智小琦,范兴华.钨球及六棱钨柱破片侵彻Q235叠层靶特性研究[J].火炮发射与控制学报,2021, 42(2): 28-33,39.
(Li Jin-fu, Zhi Xiao-qi, Fan Xing-hua. Study on the characteristics of the tungsten ball and hexagonal tungsten prism fragments penetrating Q235 laminated targets [J]. *Journal of Gun Launch & Control*,2021,42(2):28-33,39.)

[22] 赵小峰.破片质量对钨合金破片侵彻威力的影响[J].科学技术与工程,2020,20(10):3967-3971.
(Zhao Xiao-feng. Impact of fragment mass on the penetration capacity of tungsten alloy fragment[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20 (10): 3967-3971.)

[23] 张钰龙,郑宾,郭华玲,等.球形钨破片侵彻钢靶毁伤效应研究[J].兵器装备工程学报, 2020, 41 (5):32-36.
(Zhang Yu-long, Zheng Bin, Guo Hua-ling, et al. Study on damage effect of spherical tungsten fragments penetrating steel targets [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2020, 41(5):32-36.)

[24] 王帅,智小琦,范兴华,等.小质量钨球侵彻凯夫拉极限穿透速度研究[J].弹箭与制导学报, 2019, 39 (4):123-126.
(Wang Shuai, Zhi Xiao-qi, Fan Xing-hua, et al. Study on the ultimate penetration velocity of kevlar penetrated by low masses tungsten balls[J]. *Journal of Projectiles*, *Rockets*, *Missiles and Guidance*, 2019, 39(4):123-126.)

[25] 陈亚,谈超,郭亚洲.金属靶板侵彻数值模拟对比研究[J].爆炸与冲击,2022,42(4):111-127.
(Chen Ya, Tan Chao, Guo Ya-zhou. Comparative study of numerical simulations of projectile penetration into metal targets[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(4):111-127.)

[26] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1983, 21:541-548.

[27] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(1):31-48.

[28] 黄长强,朱鹤松.球形破片对靶板极限穿透速度公式的建立[J].弹箭与制导学报,1993,(2):58-61.
(Huang Chang-qiang, Zhu He-song. Establishment of the formula for the ultimate penetration velocity of spherical fragment to target [J]. *Journal of Projectiles*, *Rockets*, *Missiles and Guidance*, 1993,(2):58-61.)