

弹体斜撞击单层金属薄靶的数值仿真*

郭子涛¹, 郭 钊¹, 张 伟²

(1. 九江学院土木工程和城市建设学院, 江西 九江 332005;
2. 哈尔滨工业大学高速撞击动力学实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:通过调用 ABAQUS 子程序引入修正的靶板 J-C 本构模型和修正的应力三轴度三分段式失效准则, 开展了平头、卵形弹 $0^\circ \sim 60^\circ$ 斜撞击单层 Q235 钢薄靶的数值仿真计算, 分析了弹体头部形状、撞击角度对靶板防护性能及失效模式的影响, 同时对弹体击穿靶板后的角度偏转问题进行了分析, 并提出了一个改进的角度偏转半理论模型。结果发现: 平头弹在各个撞击角度下较卵形弹更容易击穿靶板; 靶板的防护性能与弹体造成的靶板损伤及失效模式紧密相关, 单层靶板在平头弹以同一角度分别低速和高速斜撞击后具有不同的失效模式, 而在卵形弹斜撞击下失效模式相差不大; 仿真与实验结果吻合较好。

关键词:失效准则; 斜撞击; 防护性能; 失效模式; 角度偏转; 数值仿真

中图分类号: O347.3 **文献标识码:** A

高速弹体对金属靶的贯穿行为十分复杂, 在弹体侵彻靶板过程中, 靶板的毁伤失效特性与弹体头型有重要关系, 同时靶板的失效模式又影响着靶板的防护能力。为了研究弹体头型对靶板弹道极限的影响, Børvik 等^[1-2]进行了平头、半球头及圆锥形头弹体对 12 mm 厚钢靶的侵彻实验及数值仿真, 发现平头较半球头及圆锥形头弹体更容易击穿靶板, 其原因归结于靶板失效模式的不同。Gupta 等^[3-4]利用平头、卵形、半球头弹进行了对 0.5~3.0 mm 铝板的撞击实验, 结果表明卵形弹穿透靶板的弹道极限最小, 平头弹次之, 半球头弹的弹道极限最大。关于弹体头型对靶板弹道极限的影响, Zhou 等^[5]对以往文献进行了归纳总结。不过由于不同实验条件、靶板材料及厚度、弹体尺寸等因素的影响, 对于不同头型弹体侵彻效能的各种实验和仿真研究结果并不能统一, 甚至结论截然相反。

关于穿甲问题的研究, 无论实验、理论分析还是数值模拟, 依旧大多集中在正撞击上, 国内外对于斜穿甲等非理想撞击的研究相对较少。Goldsmith^[6]对早期关于非理想弹靶撞击(包括斜撞击、攻角撞击、跳飞现象等)的研究做了相当详细的总结。斜穿甲研究中, 大多针对金属薄靶在弹体斜撞击后的失效行为及防护特性。Zhou 等^[5]利用实验和数值仿真研究了平头、半球头弹体和撞击角度对单层及双层结构防护能力及靶板失效模式的影响。Iqbal 等^[7-10]针对弹体斜撞击不同靶板结构开展了一系列数值仿真研究, 获得了斜撞击角度、头型及靶板结构等对靶板防护能力及失效模式的影响。Børvik 等^[11]进行了弹体以 $0^\circ \sim 60^\circ$ 斜角撞击 20 mm 厚铝板的斜穿甲实验和数值仿真, 发现在斜角小于约 30° 时弹体穿过靶板的剩余速度几乎不受角度的影响, 而在更大的斜角度下剩余速度才会受到影响。国内陈刚等^[12-14]对截锥形战斗部以 $0^\circ, 45^\circ$ 斜撞击单层或双层 45 钢板进行了实验及数值仿真研究, 描述了靶板在弹体以不同角度和速度撞击后的失效模式, 分析了弹体穿靶速度、角度等因素对战斗部斜穿靶性能的影响。黄涛等^[15]通过分析截锥形弹体斜穿甲的破坏过程, 提出了一种新的花瓣型破坏模式。徐双喜等^[16]分析了锥头弹小斜角侵彻薄板的花瓣破坏模式, 推导了弹体的剩余速度公式, 理论结果与数值仿真结果吻合较好。

* 收稿日期: 2018-01-09; 修回日期: 2018-01-28

基金项目: 国家自然科学基金(11072072); 江西省青年基金(20161BAB211001)

作者简介: 郭子涛(1979—), 男, 博士, 讲师, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: guozitao@hotmail.com

通信作者: 张 伟(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: zhangdawei64@hotmail.com

材料的断裂失效与多种因素有关并夹着复杂的物理机制,常见的有塑性应变断裂准则、最大剪应力/主应力断裂准则、基于塑性功的 C-L 断裂准则以及经验型 Johnson-Cook(J-C)断裂准则等。Bao 和 Wierzbicki^[17]在 J-C 模型基础上对低应力三轴度区间进行了修正,提出用分段函数表示的 B-W 断裂准则,引起了各国广泛关注。本工作通过 ABAQUS 子程序引入类似 B-W 失效模型的分段式断裂准则,以此开展平头、卵形弹 0°~60°斜撞击单层薄 Q235 钢靶的数值仿真,主要研究弹体头部形状、撞击角度对靶板的防护性能的影响,并对靶板失效模式以及弹体击穿靶板前、后的角度偏转问题进行分析。

1 有限元模型

1.1 数值仿真设置

弹体分为平头弹和卵形弹,材料为高强度钢,质量均为 24.7 g,直径均为 12.66 mm,平头弹弹体长度为 25.4 mm,卵形弹头部曲率半径比(Caliber-Radius-Head,CRH)为 2,总长度为 33.5 mm。弹体形状如图 1 所示。弹体撞击速度范围为 50~200 m/s。靶板为 1 mm 厚的 Q235 钢板,弹体斜撞击角度 β 及击穿靶板后的角度偏转 δ 如图 2 所示, β 设置在 0°~60°之间。

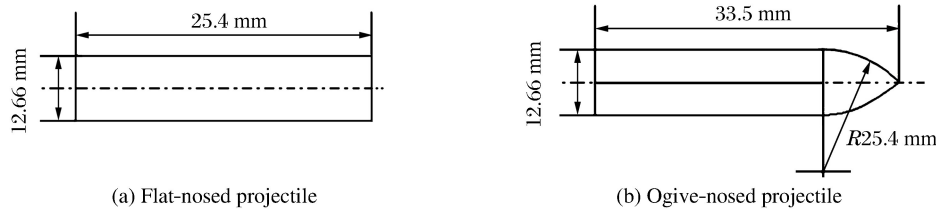


图 1 弹体形状示意

Fig. 1 Sketches of projectile shapes

利用 ABAQUS/EXPLICIT 建立了两种弹体斜撞击靶板的三维 1/2 有限元模型,如图 3 所示。为了兼顾计算效率和精度,靶板自撞击中心向外采用过渡网格,在弹体撞击周围区域其网格尺寸为 0.125 mm×0.125 mm×0.20 mm。实验中弹体几乎不发生变形,故仿真中弹体的网格划分尺寸约为 1 mm×1 mm×1 mm。靶板中与弹体作用的中心区域的单元类型为三维八节点线性减缩积分单元 C3D8R,过渡区域为三维六节点线性减缩积分单元 C3D6R,远离弹靶作用的区域单元类型为 C3D8R。对于卵形弹,由于其对靶板的韧性扩孔作用,设定摩擦系数为 0.2。

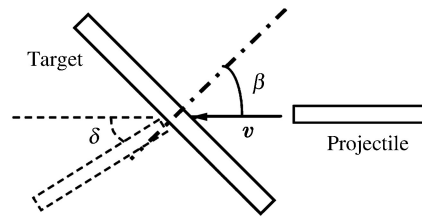


图 2 弹体斜撞击角度 β 定义

Fig. 2 Definition of oblique impact angle β



图 3 斜撞击数值仿真模型

Fig. 3 Numerical models for oblique impacts

1.2 材料本构及失效模型

由于弹体在穿甲过程中基本不发生变形,故采用双线性模型^[18]描述其本构关系,即

$$\sigma = \begin{cases} E\epsilon & \epsilon \leq \epsilon_0 \\ \sigma_0 + E_t(\epsilon - \epsilon_0) & \epsilon > \epsilon_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: E 、 E_t 分别为弹性模量和切线模量, σ_0 为屈服强度, ϵ 为真应变, ϵ_0 为屈服点处的应变。具体参数见表 1。

表 1 弹体的材料参数

Table 1 Material constants of projectile

Density/(kg · m ⁻³)	E/GPa	Possion's ratio	σ ₀ /MPa	E _t /GPa
7 850	204	0.33	1 900	15

前期研究中,已对 Q235 钢平板试件进行了常/高温、不同应变率及不同应力状态的力学性能试验,基于测试结果给出了修正的 J-C 本构关系和失效准则^[19-20],其本构模型采用以下形式

$$\sigma_{eq} = (A + B\epsilon_{eq}^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - m_1 T^{*m_2}) \quad (2)$$

靶板失效模型中除了对温度项进行修正外,其应力三轴度对断裂应变的影响采用类似 B-W 失效模型的分段函数表示,具体如下

$$\epsilon_f = \begin{cases} D_{01} e^{D_{02}\sigma^*} (1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*) (1 + D_5 T^{*D_6}) & \sigma^* < 0 \\ (D_{01} + D_{03}\sigma^*) (1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*) (1 + D_5 T^{*D_6}) & 0 \leq \sigma^* \leq 1/3 \\ (D_1 + D_2 e^{D_3\sigma^*}) (1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*) (1 + D_5 T^{*D_6}) & \sigma^* > 1/3 \end{cases} \quad (3)$$

式中:A、B、n、C、m₁、m₂ 都是与材料相关的常数;ε_{eq}为等效应变;ε̇*为无量纲等效塑性应变率,ε̇* = ε̇/ε̇₀,其中ε̇₀为参考应变率;无量纲温度 T* = (T - T_r)/(T_m - T_r),其中 T 为材料当前温度,T_r为参考温度,T_m为熔点;D₀₁~D₀₃及 D₁~D₆ 均为材料参数;σ*为应力三轴度,定义为 σ* = σ_m/σ_{eq},其中静水压力 σ_m = (σ₁₁ + σ₂₂ + σ₃₃)/3,σ_{eq}为等效应力。具体参数值见表 2,其中:c_p是定压比热容,χ是塑性功转热经验系数。

表 2 Q235 钢的本构模型及失效模型相关参数

Table 2 Material constants for Q235 steel

Density/(kg · m ⁻³)	E/GPa	Possion's ratio	T _r /K	T _m /K	A/MPa
7 800	200	0.33	293	1 795	293.8
B/MPa	n	C	m ₁	m ₂	c _p /(J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)
230.2	0.578	0.065 2	1.762	1.278	469
χ	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
0.9	0.472	18.73	-7.805	-0.019 3	13.017
D ₆	D ₀₁	D ₀₂	D ₀₃	ε̇ ₀ /s ⁻¹	
2.338	0.511	-6.80	4.047	2.1 × 10 ⁻³	

1.3 材料模型验证

为验证本研究采用的 Q235 钢本构及失效模型参数的正确性及适用性,对 Q235 弹体在高速 Taylor 撞击实验下得到的弹体花瓣型开裂现象进行了仿真,实验和仿真结果对比如图 4 所示,可看出所采用的修正的 Q235 材料本构及分段式失效模型能较好地对比实验中弹体的花瓣型破坏现象进行预测。

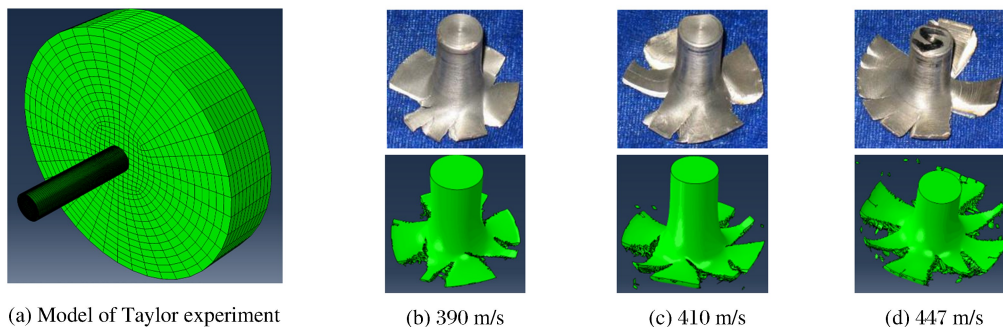


图 4 Q235 弹体的 Taylor 撞击实验结果与仿真结果对比

Fig. 4 Comparison of Q235 projectiles' fracture patterns in Taylor experiments and simulations

2 仿真结果分析

2.1 弹体斜撞击单层靶的弹道极限特性

实验和仿真获得的两种弹体斜撞击 1 mm 厚单层靶的典型贯穿过程分别如图 5 和图 6 所示。从图 5、图 6 中可以明显看出,平头弹撞击靶板后容易伴随着冲塞的产生,而卵形弹撞击后靶板一般表现为韧性扩孔的花瓣开裂失效。

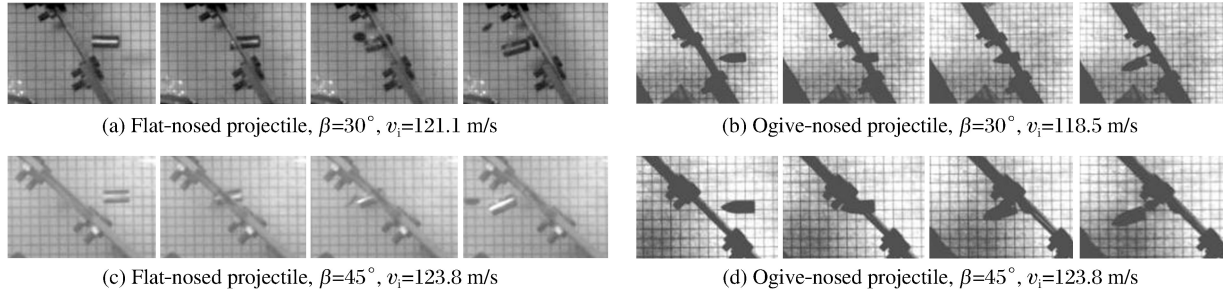


图 5 实验获得的两种弹体斜撞击 1 mm 厚单层靶的典型贯穿过程

Fig. 5 Typical oblique penetration processes of 1 mm-thick targets by two kinds of projectiles in experiments

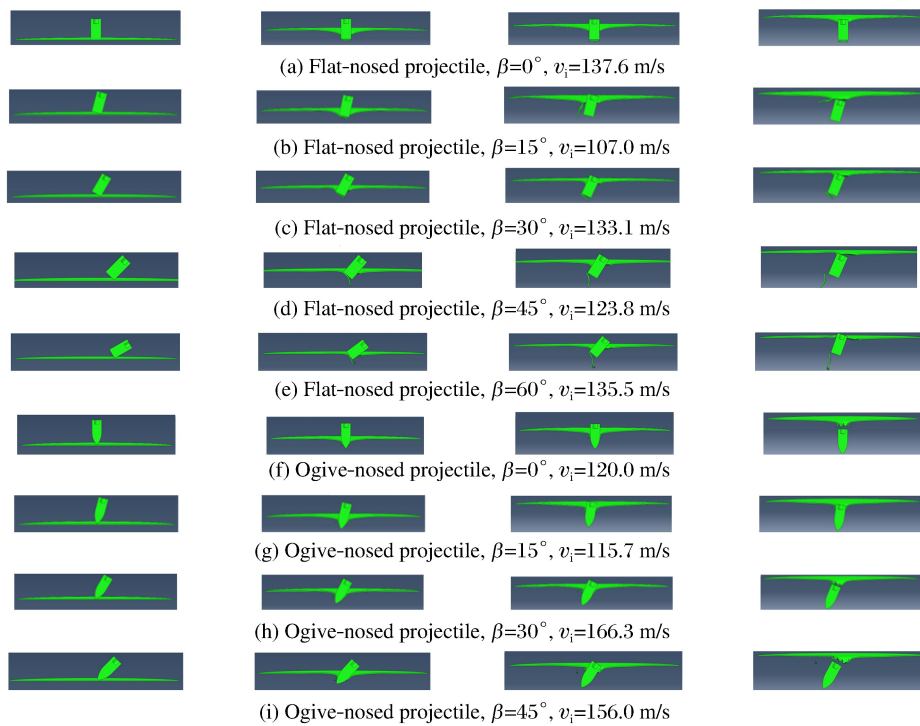


图 6 仿真获得的两种弹体斜撞击 1 mm 厚单层靶的典型贯穿过程

Fig. 6 Typical oblique penetration processes of 1 mm-thick targets by two kinds of projectiles in simulations

仿真得到平头弹和卵形弹斜撞击 1 mm 厚单层靶板的初始速度(v_i)-剩余速度(v_r)曲线如图 7 所示,同时将其与实验数据对比,并采用 Recht-Ipson 公式对图 7 中数据进行最小二乘法拟合,该公式为

$$v_r = a(v_i^p - v_{50}^p)^{\frac{1}{p}} \quad (4)$$

式中: v_{50} 表示弹道极限速度, a 和 p 为模型参数。通过拟合仿真获得的各种撞击角度下两种弹体的初始速度-剩余速度数据,得到 v_{50} 、 a 和 p 的取值,如表 3 所示。由于在实验中卵形弹 60°斜撞击靶板时有明显的弹体滑弹现象,导致未击穿靶板,故未进行卵形弹 60°斜撞击靶板的数值仿真计算。

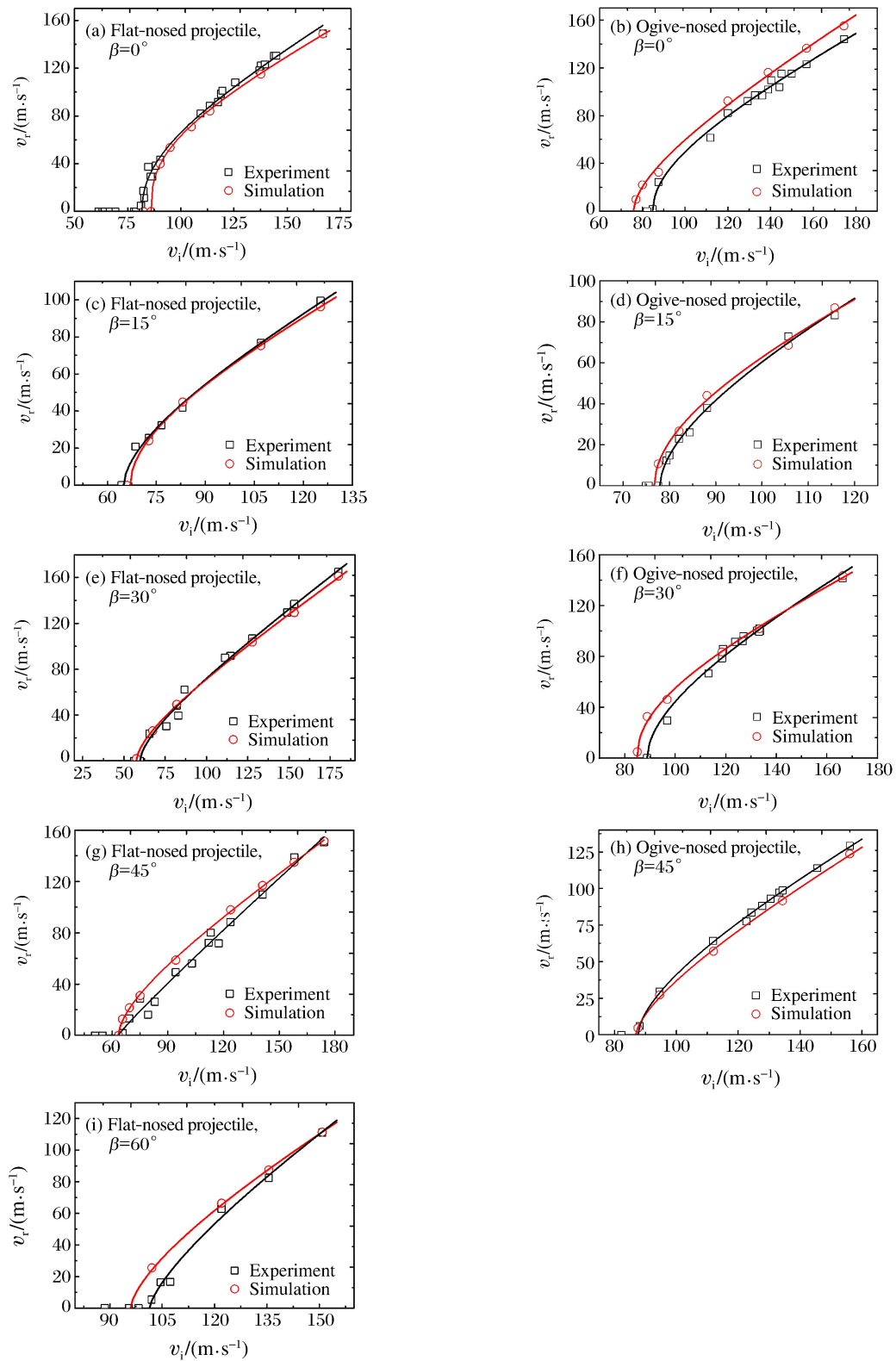


图 7 实验和仿真得到的两种头型弹体斜撞击单层 1 mm 厚 Q235 钢板的初始速度-剩余速度比较

Fig. 7 Comparison of initial velocity-residual velocity between experiments and simulations for 1 mm-thick single target obliquely impacted by two nose shape projectiles

表 3 平头弹和卵形弹斜撞击单层靶的弹道极限及相应模型参数

Table 3 Ballistic limits and other model constants for single target obliquely impacted by flat- and ogive-nosed projectiles

β	Flat-nosed projectile			Ogive-nosed projectile		
	a	p	$v_{50}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	a	p	$v_{50}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
0°	0.95	2.68	86.10	1.06	1.69	75.76
15°	0.92	1.93	67.04	1.01	1.93	76.75
30°	0.99	1.61	57.44	0.97	2.16	84.90
45°	0.99	1.68	63.50	1.14	1.48	86.90
60°	1.18	1.51	95.91			

通过图 7 可见,各个撞击角度下仿真和实验结果对应较好。仿真确定的平头弹和卵形弹击穿靶板的弹道极限随撞击角度的变化如图 8 所示,与实验结果进行对比,二者吻合较好。平头弹斜撞击靶板的弹道极限随撞击角度的增加先减小后增大;而卵形弹撞击靶板的弹道极限随撞击角度的增加平缓变化,不同角度下数值相差不大;这种区别是由靶板在弹体斜撞击下失效模式的变化所决定的。图 9 对比了分别通过实验和仿真获得的平头弹和卵形弹以不同斜角度穿透靶板的弹道极限,可见除 0°正撞击的结果稍有差异外,靶板在卵形弹撞击下的弹道极限都大于平头弹撞击下的弹道极限。

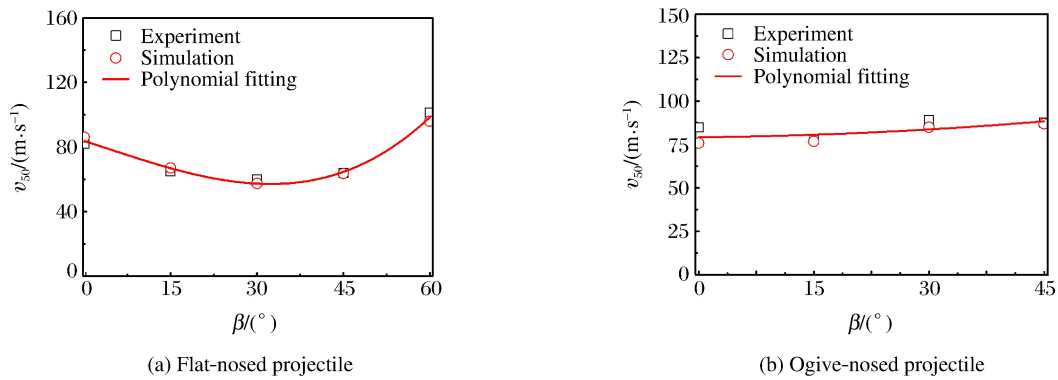


图 8 实验和仿真确定的弹体穿透靶板的弹道极限随弹体撞击角度的变化对比

Fig. 8 Comparison of ballistic limits vs. impact angle between experiments and simulations

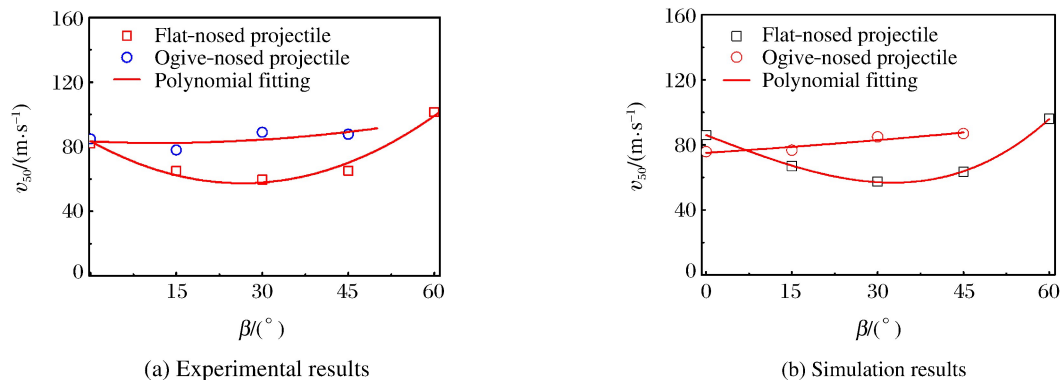


图 9 两种弹体在各个角度斜撞击靶板下的弹道极限的实验与仿真结果比较

Fig. 9 Comparison of ballistic limits obtained by simulations and experiments for two nose shape projectiles at different obliquity angles

2.2 单层薄靶在弹体斜撞击下的失效模式

仿真获得的靶板在两种头型弹体斜撞击下的失效形式如图 10 所示,与实验结果进行对比,二者吻合较好。实验中发现,平头弹以稍高于弹道极限的低速撞击靶板时,靶板在各个撞击角度下都容易产生撕裂和塑性较外翻现象^[5],但通常不会有塞块脱离靶板;当弹体撞击速度远离弹道极限而变得很大时,除 15° 撞击外,其他撞击角度下靶体上的塑性较大来不及外翻,而被后面弹体剪切形成塞块并脱离靶板,同时靶体撕裂程度也比低速时明显减轻。仿真结果完全预测了这一现象。同一撞击角度下,平头弹分别以低速和高速撞击后单层薄靶的失效模式如图 11 所示。与此相对应地,卵形弹斜撞击后靶板的失效形式通常表现为非对称韧性扩孔及花瓣开裂失效,失效模式随着撞击角度的增加变化不大。

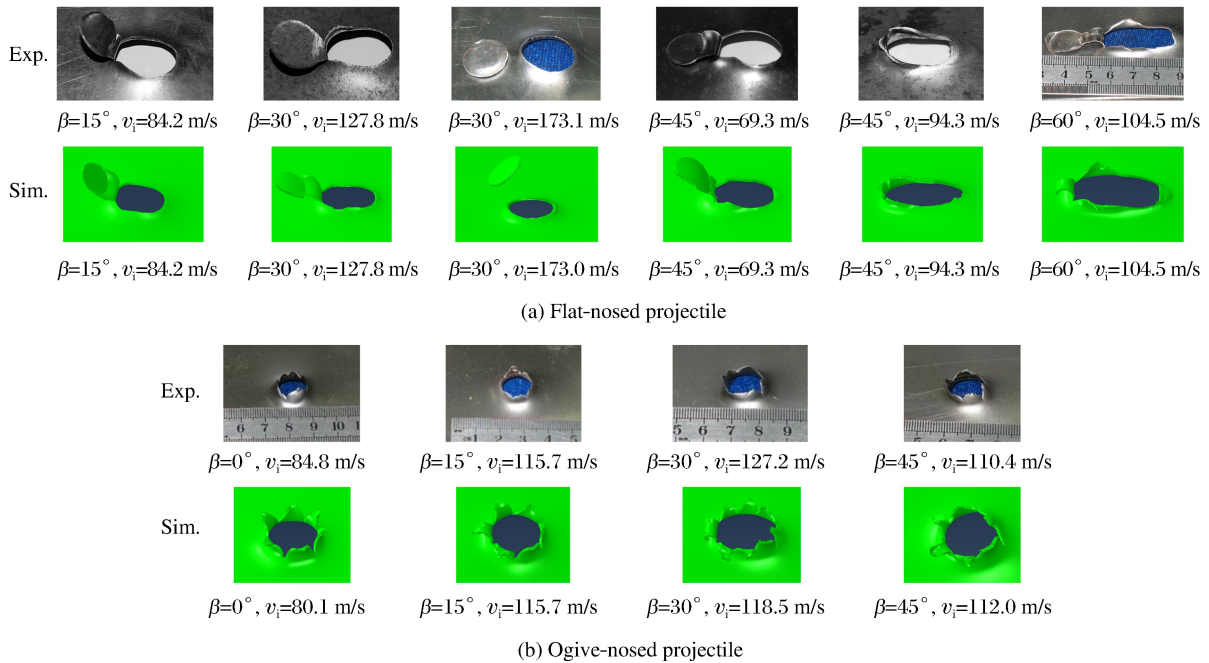


图 10 实验和仿真获得的单层靶板在两种头型弹体斜撞击下的失效形式对比

Fig. 10 Comparison of failure patterns of single target impacted by two nose shape projectiles between experiment and simulation

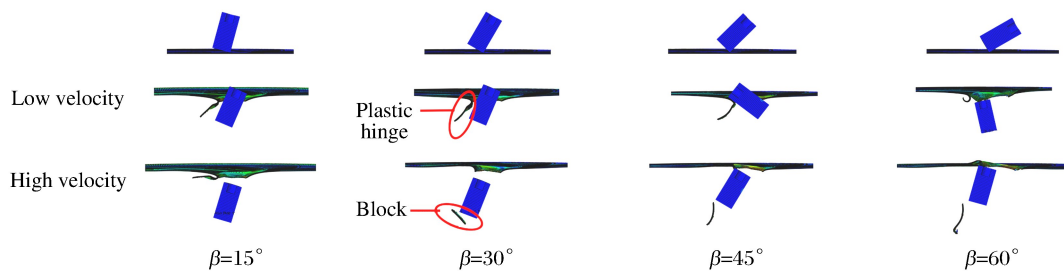


图 11 单层靶板在平头弹以低速和高速不同角度斜撞击后的失效形式

Fig. 11 Failure modes of single target impacted by flat-nosed projectiles at low and high velocities

弹体击穿靶板的弹道极限与靶板的穿孔失效模式紧密相关。薄靶在受到平头弹正撞击时,靶板局部以剪切失效为主,同时伴随大的整体结构的拉伸薄膜变形;随着斜撞击角度变大,靶板穿孔逐步由剪切失效转向以拉伸撕裂失效为主,靶板局部开始出现撕裂现象,同时整体结构的弯曲和薄膜变形减小,整体耗能也有所降低,因此靶板变得易被击穿,即弹道极限随撞击角度的增加而变小;但当斜撞击超过一定角度时,靶板穿孔面积随之变大,靶板上开始出现一个两边平行且细长的撕裂带并外翻形成所谓的

塑性较^[5],此时整体耗能随着角度的增加而逐渐变大,因此该角度区域内的弹道极限是随着角度增加而增加的。薄靶在受到卵形弹斜撞击时,弹体推动靶板材料向前运动,在扩孔周围形成很高的径向和环向拉伸应力,当达到靶板材料的拉伸强度时即在四周产生裂纹,此时中间裂缝处于松弛环向应力状态并逐步向外扩展,形成背面的非对称花瓣型破坏。在卵形弹以 0°和 15°撞击单层薄靶时,靶板穿孔形态相差不大,因此靶板的弹道极限也应相差不大;当撞击角度大于 30°时,靶板穿孔直径及塑性变形区域变大,靶板整体耗能增加,故弹道极限也随之增大。

2.3 弹体斜撞击单层靶的角度偏转特性

弹体高速斜撞击靶板时,由于接触不对称以及偏转力的作用,弹体将在穿甲过程中发生角度偏转。研究弹体击穿靶板前、后的角度变化规律,对于研究靶体的防护有着重要意义。

Recht 和 Ipson^[21-22]利用扩展的正撞击理论和动量守恒思想研究了平头弹斜撞击薄板的角偏转问题,得到了偏转角 δ 的近似表达式

$$\delta = \frac{1}{2} \arcsin [1 - (1 - \kappa)^{\frac{1}{2}} \sin 2\delta_{50}] \quad (5)$$

式中: $\kappa = (v_{50}/v_i)^2$, δ_{50} 表示弹道极限 v_{50} 所对应的弹体最大偏转角。显然(5)式中 δ 的最大取值为 $\pi/4$,但实验中观测到,弹道偏角在弹道极限附近时往往大于 $\pi/4$,甚至接近 $\pi/2$ 。基于此,郭子涛^[20]通过理论分析给出了一个修正的 R-I 半理论公式,即

$$\delta = \arctan \{ [1 - (1 - \kappa)^{\frac{1}{2}}] \tan \delta_{50} \} \quad (6)$$

式中: $0 < \kappa \leq 1$, $\tan \delta_{50} > 0$ 。因此有 $0 < \delta \leq \delta_{50} \leq \pi/2$,且 δ 在 $(0, \pi/2]$ 范围内为连续单调函数。

实验和仿真获得的卵形弹以 45°斜撞击靶板前、后的角度偏转随撞击速度的变化如图 12 所示,可见二者吻合较好,验证了仿真的正确性。

图 13 给出了仿真获得的平头弹和卵形弹斜撞击靶板的角偏转与无量纲初始速度 v_i/v_{50} 的关系,并利用(6)式进行了拟合,可见(6)式能很好地描述每个撞击角度下的角偏转规律。

由图 13 可看出,当模型中 v_i/v_{50} 值一定时,角偏转随着撞击角度的增加而增大。图 14 给出了平头弹和卵形弹的 $\tan \delta_{50}$ 值与撞击角度之间的关系,容易看出, $\tan \delta_{50}$ 与 $\tan \beta$ 存在以下线性关系

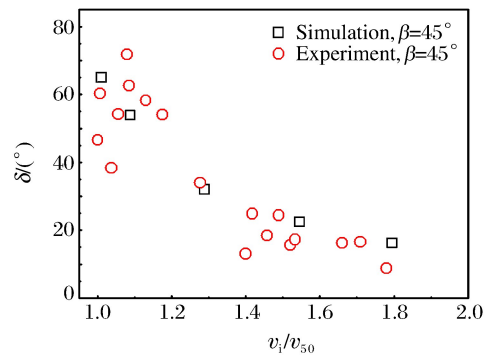


图 12 实验和仿真获得的卵形弹以 45°斜角度撞击靶板前、后偏转角随撞击速度的变化

Fig. 12 Experimental and simulated angular deflection vs. impact velocity for ogive-nosed projectiles impacting target at 45° oblique angle

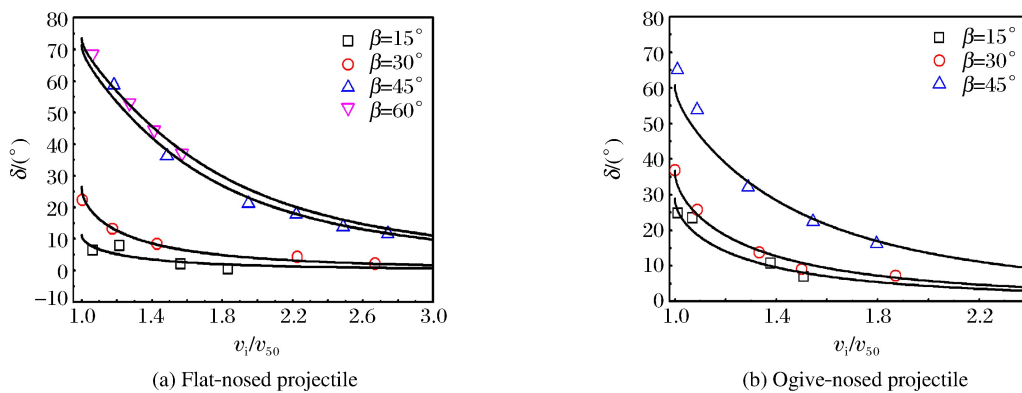
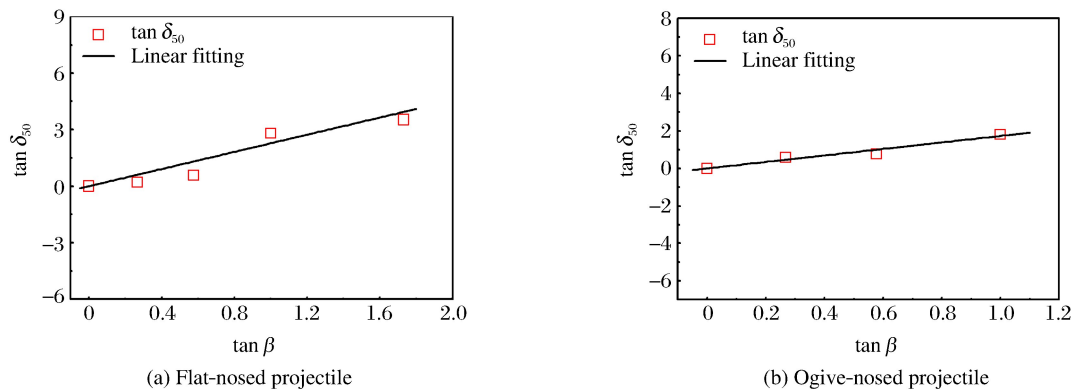


图 13 仿真得到的平头弹和卵形弹斜撞击 1 mm 厚单层靶的角偏转随无量纲速度的变化
Fig. 13 Numerical variation of angular deflection with dimensionless velocity for flat- and ogive-nosed projectiles obliquely perforating single target with the thickness of 1 mm

图 14 模型中 $\tan \delta_{50}$ 值与弹体撞击角度之间的关系Fig. 14 Relations between the value of $\tan \delta_{50}$ and impact angle of projectiles

$$\tan \delta_{50} = \lambda \tan \beta \quad (7)$$

将(7)式代入(6)式,可获得弹体偏转角度 δ 与撞击角度 β 、撞击速度 v_i 之间的关系

$$\delta = \arctan\{\lambda [1 - (1 - \kappa)^{\frac{1}{2}}] \tan \beta\} \quad (8)$$

3 结 论

通过引入修正的靶板 J-C 本构模型和修正的应力三轴度三分段式失效准则,开展了平头、卵形弹以不同角度斜撞击 1 mm 厚单层 Q235 钢薄靶的数值仿真计算,考察了弹体头部形状、撞击角度对靶板防护性能及失效模式的影响,同时分析了弹体撞击前、后的角度偏转特性,得到如下主要结论。

(1) 平头弹斜撞击靶板的弹道极限随角度的增加先减小后增大;而卵形弹撞击靶板的弹道极限随角度的增加变化平缓,稍有增大。

(2) 除正撞击实验与仿真结果稍有差异外,平头弹在其他撞击角度下较卵形弹更容易击穿薄靶。靶板的防护性能与弹体造成的靶板损伤及失效模式紧密相关。单层靶板在平头弹以稍高于弹道极限的低速斜撞击后容易产生塑性较外翻现象,而在平头弹以远离弹道极限的高速斜撞击后容易形成塞块并脱离靶板;靶板在卵形弹斜撞击下的失效模式则以局部斜形非对称花瓣开裂为主,且失效模式随着撞击角度的增加变化不大。

(3) 弹体击穿靶板后的角度偏转的仿真数据与理论吻合较好,弹道极限时的最大偏转角度正切值与弹体入射角度正切值呈正比关系。

(4) 仿真中采用的修正的 J-C 本构模型和应力三轴度三分段式失效准则能有效预测弹体的弹道极限和靶板破坏毁伤形式。

参考文献:

- [1] BØRVIK T, LANGSETH M, HOPPERSTAD O S, et al. Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses; Part I : experimental study [J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27: 19-35.
- [2] BØRVIK T, HOPPERSTAD O S, BERSTAD T, et al. Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses; Part II : numerical simulations [J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27: 37-64.
- [3] GUPTA N K, IQBAL M A, SEKHON G S. Experimental and numerical studies on the behavior of thin aluminum plates subjected to impact by blunt and hemispherical-nosed projectiles [J]. International Journal of Impact Engi-

- neering, 2006, 32:1921-1944.
- [4] GUPTA N K, IQBAL M A, SEKHON G S. Effect of projectile nose shape, impact velocity and target thickness on deformation behavior of aluminum plates [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2007, 44:3411-3439.
- [5] ZHOU D W, STRONGE W J. Ballistic limit for oblique impact of thin sandwich panels and spaced plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35:1339-1354.
- [6] GOLDSMITH W. Non-ideal projectile impact on targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1999, 22(2/3):95-395.
- [7] IQBAL M A, GUPTA G, GUPTA N K. 3D numerical simulations of ductile targets subjected to oblique impact by sharp nosed projectiles [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2010, 47(2):224-237.
- [8] 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.
- [9] IQBAL M A, SENTHIL K, MADHU V, et al. Oblique impact on single, layered and spaced mild steel targets by 7.62 AP projectile [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 110:26-38.
- [10] GUPTA P K, IQBAL M A, MOHAMMAD Z, et al. Energy absorption in thin metallic targets subjected to oblique projectile impact: a numerical study [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018[2018-01-09]. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.08.005>.
- [11] BØRVIK T, OLOVSSON L, DEY S, et al. Normal and oblique impact of small arms bullets on AA6082-T4 aluminium protective plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(7):577-589.
- [12] 陈刚, 陈忠富, 张方举, 等. 截锥形弹体侵彻薄靶板实验研究 [J]. *弹箭与制导学报*, 2005, 25(4):888-890.
CHEN G, CHEN Z F, ZHANG F J, et al. Experimental study on the penetration of thin plates by truncated conical projectiles [J]. *Missiles and Guidance*, 2005, 25(4):888-890.
- [13] 陈刚, 陈忠富. 截锥形空心弹体侵彻薄靶板的数值模拟 [J]. *弹箭与制导学报*, 2008, 28(6):99-102.
CHEN G, CHEN Z F. Numerical study on the penetration of thin plates by truncated hollow conical projectiles [J]. *Missiles and Guidance*, 2008, 28(6):99-102.
- [14] 张青平, 陈刚, 屈明. 截锥型战斗部斜穿靶数值模拟研究 [J]. *含能材料*, 2005, 13(4):222-224.
ZHANG Q P, CHEN G, QU M. Numerical study on the oblique perforation of targets by truncated conical warhead [J]. *Energetic Materials*, 2005, 13(4):222-224.
- [15] 黄涛, 吴卫国, 李晓彬, 等. 截锥形弹体斜穿甲花瓣型破坏模型 [J]. *振动与冲击*, 2010, 29(2):125-127.
HUANG T, WU W G, LI X B, et al. Oblique armor-piercing effect of a truncated cylindroconical projectile [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(2):125-127.
- [16] 徐双喜, 吴卫国, 李晓彬, 等. 锥头弹小斜角侵彻薄板剩余速度理论分析 [J]. *弹道学报*, 2010, 22(3):58-62.
XU S X, WU W G, LI X B, et al. Theoretical analysis on residual velocity of conical projectile after penetrating thin plate at low oblique angle [J]. *Journal of Ballistics*, 2010, 22(3):58-62.
- [17] BAO Y B, WIERZBICKI T. On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2004, 46(1):81-98.
- [18] 肖新科. 双层金属靶的抗侵彻性能和 Taylor 杆的变形与断裂 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
XIAO X K. The ballistic resistance of double-layered metallic target and deformation & fracture of Taylor rod [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [19] 郭子涛, 高斌, 郭钊, 等. 基于 J-C 模型的 Q235 钢的动态本构关系研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(4)[2018-01-09]. <http://www.bzyj.cn/CN/10.11883/bzyj-2016-0333>. DOI:10.11883/bzyj-2016-0333.
GUO Z T, GAO B, GUO Z, et al. Study on the J-C model based dynamic constitutive relation of Q235 steel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(4)[2018-01-09]. <http://www.bzyj.cn/CN/10.11883/bzyj-2016-0333>. DOI:10.11883/bzyj-2016-0333.
- [20] 郭子涛. 弹体入水特性及不同介质中金属靶的抗侵彻性能研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012.
GUO Z T. Research on characteristics of projectile water entry and ballistic resistance of targets under different mediums [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

- [21] RECHT R, IPSON T W. Ballistic perforation dynamics [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1963, 30(3): 384-390.
- [22] IPSON T W, RECHT R. Ballistic penetration resistance and its measurement [J]. *Experimental Mechanics*, 1975, 15(7): 249-257.

Numerical Study of the Oblique Perforation of Single Thin Metallic Plates

GUO Zitao, GUO Zhao, ZHANG Wei

(1. *Department of Civil Engineering, Jiujiang University, Jiujiang 332005, China;*

2. *Hypervelocity Impact Research Center, Harbin Institute of Technology,*

Harbin 150080, China)

Abstract: In this study, we conducted numerical simulations of the oblique perforation of single 1 mm-thick Q235 steel plates subjected to flat- and ogive-nosed projectiles at $0^\circ \sim 60^\circ$ by invoking the ABAQUS subroutine to introduce a modified J-C constitutive model and a modified three-section failure criterion of stress triaxiality, and examined the effects of the projectile nose shape and the obliquity on the ballistic resistance and failure modes of the targets. We also investigated the angle-deflection of the projectiles perforating targets and proposed a modified semi-theoretical model to describe the angle-deflection laws. The results show that the target perforation by flat-nosed projectiles is easier than that by ogive-nosed projectiles at each oblique angles; the ballistic resistance of targets is closely related to the target damages induced by projectile impact; the target has different failure modes as impacted by flat-nosed projectiles at low and high velocities in the same oblique angle respectively, while the failure modes of single target due to impact of ogive-nosed projectiles at different angles do not show much difference. The results of numerical simulation agree well with those of experiments.

Keywords: failure criterion; oblique impact; ballistic resistance; failure mode; angle deflection; numerical simulation