



## 孔结构金属装甲抗弹能力的数值模拟

秦庆华,崔天宁,施 前,金永喜,张建勋

### 引用本文:

秦庆华,崔天宁,施前,等. 孔结构金属装甲抗弹能力的数值模拟 [J]. 高压物理学报,2018,32(5): 055105.

QIN Qinghua,CUI Tianning,SHI Qian,et al. Raman Evidences for Phase Transition of Sodium Perchlorate at High Pressure [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2018,32(5):055105.

[当期更多内容>>](#)

---

### 您可能感兴趣的其他文章:

[攻角对卵形头弹撞击铝合金薄板影响的数值研究](#)

邓云飞,袁家俊

DOI: 10.11858/gywlxb.20170601

[预应力对陶瓷抗侵彻性能影响规律的数值模拟](#)

吴雪,张先锋,丁力,谈梦婷,包阔,陈贝贝

DOI: 10.11858/gywlxb.20170610

[平头弹穿透接触式双层金属板的理论研究](#)

任善良,文鹤鸣,周琳

DOI: 10.11858/gywlxb.20170695

[一种长杆弹超高速贯穿陶瓷/金属复合靶板的简化模型](#)

翟阳修,吴昊,方秦

DOI: 10.11858/gywlxb.2017.06.009

[冲击载荷下  \$\text{Al}\_2\text{O}\_3\$  抗弹陶瓷的力学性能实验研究](#)

段卓平,关智勇,黄风雷

DOI: 10.11858/gywlxb.2003.01.005

[爆炸反应装甲防护包络的数值仿真](#)

孙建军,李如江,万清华,张明,杨玥,孙森

DOI: 10.11858/gywlxb.20180523

# 孔结构金属装甲抗弹能力的数值模拟<sup>\*</sup>

秦庆华<sup>1,2</sup>, 崔天宁<sup>1</sup>, 施 前<sup>1</sup>, 金永喜<sup>2</sup>, 张建勋<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学航天航空学院机械结构强度与振动国家重点实验室,

陕西省航天结构振动控制工程实验室, 陕西 西安 710049;

2. 中国兵器工业第208研究所瞬态冲击技术重点实验室, 北京 102202)

**摘要:**采用数值模拟方法研究了高速弹体冲击下孔结构金属装甲的抗弹能力,系统讨论了弹体冲击速度、入射角、弹着点、孔径、孔间距等因素对抗弹能力的影响。结果表明,在弹道极限速度附近,随着弹体冲击速度的增加,弹着点效应逐渐变得不明显;弹体垂直入射不对称弹着点时会出现明显偏转,而倾斜入射时即使在对称弹着点上也会出现明显的偏转现象;当弹体入射角度大于45°时,弹体剩余速度和侵彻深度出现较明显的下降,当入射角度大于65°时,出现弹跳现象。

**关键词:**孔结构金属装甲;高速冲击;侵彻;贯穿;弹道极限

**中图分类号:** O347;O385

**文献标识码:** A

在军用装甲车辆中,防护装甲是保护装甲车辆免受爆炸冲击、弹道冲击等破坏的重要部件。针对装甲车辆机动性、载重能力以及经济性等要求,轻型高效防护装甲是目前国内外研究的重要领域。孔结构装甲板因具有轻质、高抗弹能力等优点,正受到越来越多的关注。有关孔结构装甲的研究最早可追溯到1986年,Ben-moshe等<sup>[1]</sup>通过在普通均质钢板上有规则地加工出一定数量的圆形孔洞,制成一种新型装甲板,该新型装甲的质量更轻,同时还可以实现对入射弹体的侵蚀和偏转。Chocron等<sup>[2]</sup>进行了 $\varnothing 7.62$  mm穿甲弹分别侵彻RHA钢板和6061铝合金板边缘的弹道冲击试验、理论分析和数值模拟,研究表明,弹体侵彻靶板边缘时,受到强烈的不对称力,导致弹体侵蚀和断裂。Balos等<sup>[3]</sup>研究了两种不同材料的孔结构装甲板的抗弹能力,并考虑了靶板的安装方式和几何特性,发现合理优化靶板几何尺寸和安装方式可以提高抗弹能力。Mishra等<sup>[4]</sup>实验研究了带有不同形状和尺寸孔洞的孔结构装甲板的抗弹能力,发现孔洞形状对靶板破坏面积和基板侵彻深度的影响不大,孔径与弹径接近时,靶板的抗弹能力最高。Radisavljevic等<sup>[5]</sup>得出了相似的结论:在弹体与靶板孔洞重合程度相同的情况下,弹径与孔径相近时弹体受到的不对称力最大。Kilic等<sup>[6]</sup>进行了 $\varnothing 7.62$  mm穿甲弹侵彻高强度孔结构装甲钢板的实验和有限元数值模拟,发现了3种典型失效模式。胡丽萍等<sup>[7]</sup>使用残余穿深法对两种不同结构的孔结构装甲板进行了弹道侵彻实验,发现弹体侵彻靶板不同位置时,靶板的抗弹能力差别极大。肖红亮等<sup>[8]</sup>研究了倾角效应对孔结构装甲板的影响,认为弹体以较大倾角入射时,孔结构装甲板的抗弹能力较好。李换芝<sup>[9]</sup>考虑了弹体倾角和弹体旋转对孔结构装甲抗弹能力的影响,进行了相关有限元模拟,发现大倾角与弹体旋转均能导致弹体发生较为严重的偏航和失稳。王建波等<sup>[10]</sup>对孔结构装甲板抗 $\varnothing 14.5$  mm穿甲燃烧弹侵彻进行了有限元数值模拟,发现孔洞中心处的防护能力最弱,孔洞边缘和三孔之间部分的防护能力最强。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2018-03-28; 修回日期: 2018-04-12

**基金项目:** 国家自然科学基金(11572234, 11502189, 11372235); 瞬态冲击技术重点实验室基金(614260601010117); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2017JM1020)

**作者简介:** 秦庆华(1976—),男,博士,副教授,主要从事冲击动力学研究. E-mail: qhqin@mail.xjtu.edu.cn

**通信作者:** 张建勋(1984—),男,副教授,主要从事冲击动力学研究. E-mail: jianxunzhang@mail.xjtu.edu.cn

与实体装甲板相比,高速弹体在侵彻孔结构装甲板的过程中,弹体与靶板之间的相互作用更加复杂,同时受到冲击速度、入射角、弹着点以及孔洞尺寸等因素的共同影响,然而目前已有的相关报道尚未见对这些影响因素进行较为全面的研究。本研究采用数值模拟方法,建立钨制弹芯和高强钢板的有限元模型,研究高速弹体冲击下孔结构金属装甲的抗弹能力,综合讨论弹体冲击速度、入射角、弹着点、孔径、孔间距等因素对抗弹能力的影响,主要考虑弹体剩余速度、偏转角度、侵彻深度等衡量指标。

## 1 数值模型

### 1.1 材料本构模型

为描述金属材料在高速冲击下的应变率效应,利用商业有限元分析软件 LS-DYNA (Version 971) 建立弹体与孔结构金属靶板的数值模型。钨制弹体和高强钢 (Secure 500 HHS) 靶板均采用 SOLID164 六面体单元进行划分,采用 Johnson-Cook 本构模型和损伤模型 (Material Type 15) 以及 Grüneisen 状态方程模拟弹体和靶板的变形与失效。

Johnson-Cook 模型<sup>[11]</sup>表示如下

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

式中:  $\sigma$  为当前应变率和温度下的等效应力;  $A$  为屈服应力;  $B$ 、 $n$  为应变硬化系数;  $\epsilon$  为等效塑性应变;  $C$  为应变率敏感系数;  $\dot{\epsilon}_e^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$  为无量纲应变率,其中  $\dot{\epsilon}_0$  为参考应变率;  $m$  为温度敏感性系数;  $T^*$  为无量纲温度,  $T^* = (T - T_0)/(T_m - T_0)$ ,其中  $T_0$  为室温,  $T_m$  为材料熔化温度。

Johnson-Cook 损伤模型如下

$$\epsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)] (1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}_e^*) (1 + D_5 T^*) \quad (2)$$

$$\sigma^* = p/\sigma = -\eta \quad (3)$$

式中:  $\epsilon_f$  为失效应变,  $D_1 \sim D_5$  为失效系数,  $\eta$  为应力三轴度,  $p$  为静水压。

弹体材料选用钨合金<sup>[12]</sup>,靶板材料选用 Secure 500 高强度装甲钢<sup>[6]</sup>,具体材料参数见表1,其中  $\rho$  为密度,  $G$  为剪切模量,  $c_p$  为定压比热容,  $c$  为声速,  $S_1 \sim S_3$  为冲击波波速-粒子速度曲线的斜率系数,  $\gamma_0$  为 Grüneisen 系数。

表1 钨合金和 Secure 500 高强钢的模型参数<sup>[6,12]</sup>

Table 1 Material model parameters for tungsten alloy and Secure 500 high hardness steel (HHS)<sup>[6,12]</sup>

| Material       | $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$                   | $G/\text{GPa}$ | $A/\text{MPa}$ | $B/\text{MPa}$                   | $n$   | $C$   | $m$        |
|----------------|----------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------------------------|-------|-------|------------|
| Tungsten alloy | 17.70                                                    | 160            | 631            | 1258                             | 0.092 | 0.014 | 0.94       |
| Secure 500 HHS | 7.85                                                     | 80             | 1200           | 1580                             | 0.175 | 0.004 | 1.00       |
| Material       | $c_p/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ | $T_m/\text{K}$ | $T_0/\text{K}$ | $\dot{\epsilon}_0/\text{s}^{-1}$ | $D_1$ | $D_2$ | $D_3$      |
| Tungsten alloy | 0.134                                                    | 1723           | 293            | 1.0                              | 0.0   | 0.04  | 0.63       |
| Secure 500 HHS | 0.450                                                    | 1800           | 300            | 0.0001                           | 0.1   | 0.4   | -1.3       |
| Material       | $c/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$                       | $D_4$          | $D_5$          | $S_1$                            | $S_2$ | $S_3$ | $\gamma_0$ |
| Tungsten alloy | 4029                                                     | 0.0            | 0.0            | 1.237                            | 0.0   | 0.0   | 1.54       |
| Secure 500 HHS | 4570                                                     | 0.05           | 0.0            | 1.730                            | 0.0   | 0.0   | 1.67       |

### 1.2 结构模型

本有限元模型中靶板由四边固支的孔结构装甲板及其后方的后效板组成,如图1所示。弹体的入射速度  $v_i$  在 100~1000 m/s 范围,入射角在  $0^\circ \sim 75^\circ$  区间。弹体贯穿孔结构装甲板之后,弹体与靶板的碎片被后效板阻挡回收。

弹体直径  $D=10.8 \text{ mm}$ ,总长  $L=52 \text{ mm}$  ( $L/D=4.81$ ),质量为 64 g。孔结构装甲板为  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$  的钢板,其中交错排布着众多圆形孔洞,孔径  $d$  为 5.4~10.8 mm,孔间距  $s$  为 10.5~22.5 mm,基板尺寸为  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。考虑到实际工程应用中弹体冲击位置的随机性及

数值计算效率,选定如图 2 所示的 5 个典型弹着点,研究不同冲击位置靶板的抗弹能力。

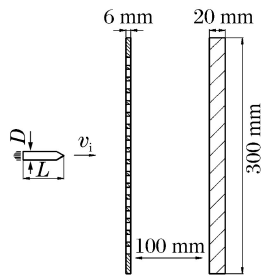


图 1 弹体冲击孔结构装甲板示意图

Fig. 1 Perforated plate impacted by projectile

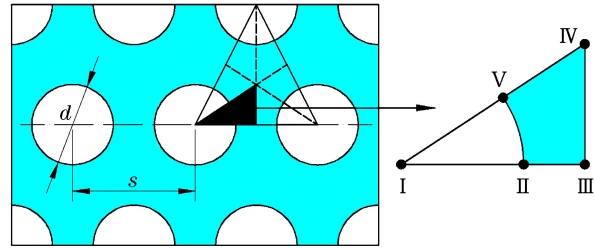
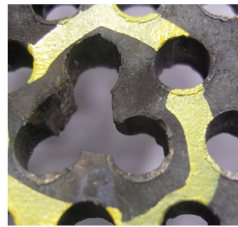


图 2 孔结构尺寸及 5 个典型弹着点

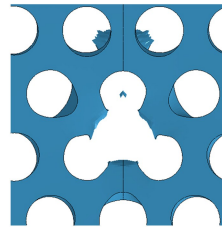
Fig. 2 Hole size and 5 typical hitting positions

### 1.3 模型验证

为验证计算模型的有效性,使用本模型对文献[6]的弹道冲击实验进行数值模拟,如图 3 所示。对比弹体侵彻孔结构装甲板后靶板失效模式的实验结果和有限元计算结果发现,数值模拟得到的靶板失效模式与实验结果基本吻合,验证了计算模型的有效性。



(a) Experimental target<sup>[6]</sup>



(b) Numerical target

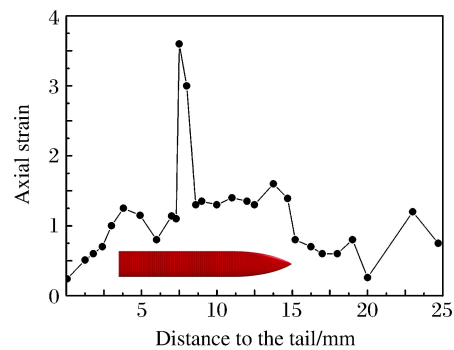
图 3 弹体侵彻孔结构装甲板后靶板的失效模式

Fig. 3 Failure modes of perforated plates after penetration

此外计算结果表明,最大轴向应变出现在靠近弹体尾端 1/3 处,该计算结果与文献[2]报道的长度为 25 mm 的弹芯侵彻金属装甲板边缘时出现的折断且断裂位置靠近弹体尾端 1/3 处的实验现象吻合,如图 4 所示。



(a) Fractured projectile<sup>[2]</sup>



(b) Strain distribution of projectile

图 4 计算结果与实验结果<sup>[6]</sup>对比

Fig. 4 Comparison of numerical simulations and experimental results<sup>[6]</sup>

## 2 结果与讨论

### 2.1 弹着点效应

为研究不同弹着点对孔结构装甲板抗弹能力的影响,以弹体入射速度  $v_i = 800 \text{ m/s}$  为例,对 5 个典型弹着点工况进行数值模拟,得到弹体冲击不同弹着点的速度时程曲线,如图 5 所示,其中  $t_{\text{tot}}$  为总计算

时间。从图5可以看出,弹体的速度变化很明显地分为3个阶段:弹体刚接触孔结构装甲板时,速度突降;随着侵彻继续进行,由于接触面积变小,使得速度下降趋势变缓;最后弹体以恒定速度射出。虽然弹体冲击不同弹着点的速度变化趋势相似,但是不同弹着点对应的速度变化规律却存在差异。弹体冲击弹着点Ⅳ时,其与靶板的接触面积最大,对应的弹体速度一直保持在较低水平;而对于弹着点Ⅰ,尽管弹体与靶板的接触面积最小,但在侵彻开始阶段速度下降不明显,最终弹体出射后的剩余速度同样也保持着较低水平;最高的剩余速度出现在接触面积较大的弹着点Ⅲ。这说明对于孔结构装甲板而言,不同弹着点的抗弹能力不能简单地通过弹体与靶板之间的接触面积判断。

图6给出了弹体初始速度 $v_i$  (100~1000 m/s)与弹体剩余速度 $v_r$ 的关系。当 $v_i=100$  m/s时,所有弹着点对应的弹体剩余速度均为零,此时弹体未穿透靶板,说明孔结构装甲板的弹道极限速度在100~300 m/s之间;随着 $v_i$ 的增大,不同弹着点对应的剩余速度略有不同,但总体呈上升趋势;当 $v_i$ 处于弹道极限速度附近时,不同弹着点对应的剩余速度的差异相对较大;当 $v_i$ 继续增加直至远高于弹道极限速度时,因弹着点不同而引起的剩余速度差异不断减小,最终趋近于零,说明在靶板弹道极限速度附近,弹着点效应较为明显。对于300和500 m/s两种工况,弹着点Ⅳ和弹着点Ⅰ分别对应最低和最高剩余速度,其他弹着点则相差不大。

图7给出了弹体在基板上的侵彻深度 $P$ 随 $v_i$ 的变化规律。 $v_i=100$  m/s时,由于弹体未穿透孔结构装甲板,因此没有与基板接触;随着 $v_i$ 的增加,不同弹着点对应的侵彻深度都逐渐增加; $v_i=800$  m/s时,三孔之间部位(弹着点Ⅳ)对应的侵彻深度最小,两孔之间部位(弹着点Ⅲ)和孔洞中心部位(弹着点Ⅰ)次之,孔洞边缘部位(弹着点Ⅱ、Ⅴ)对应的侵彻深度较大。

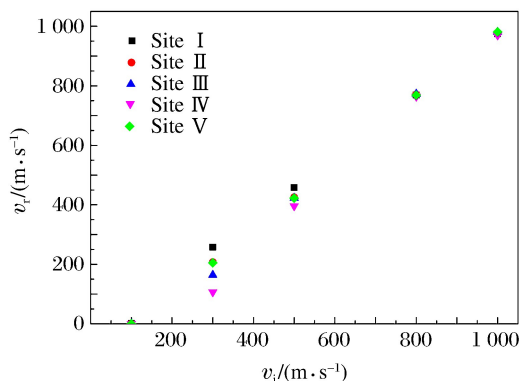


图6 不同弹着点对应的剩余速度随入射速度的变化

Fig. 6 Residual velocity vs. impact velocity of projectiles at different hitting positions

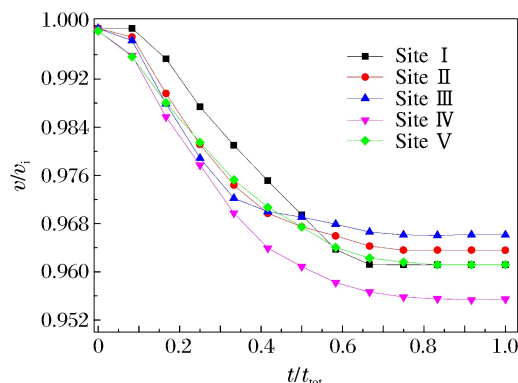


图5 不同弹着点的弹体速度时程曲线

Fig. 5 Velocity-time curves of projectiles at different hitting positions

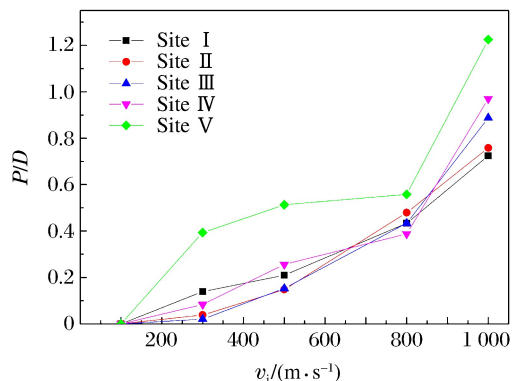


图7 不同弹着点对应的侵彻深度随入射速度的变化

Fig. 7 Penetration depth vs. impact velocity of projectiles at different hitting positions

进一步研究发现,对于非对称弹着点Ⅱ和Ⅴ,孔的边缘效应导致弹体运动轨迹发生较明显的偏转。由于侵彻之后的弹体发生了明显变形,故本研究参照文献[13]的方法,通过测量弹体头部和尾部坐标确定弹体的偏转角度 $\alpha$ ,结果见图8。 $v_i=100$  m/s时,弹体未能穿透孔结构装甲板,在弹体回弹过程中弹道发生了较大偏转;而弹体贯穿孔结构装甲板时,弹道偏转角度最高可达 $9^\circ$ ,有效地降低了弹体的后续侵彻能力。

2.2 孔径及孔间距的影响

以孔间距与孔径的比值( $s/d$ )作为研究对象,分别取为 1.25、1.50、2.00 和 2.50,如表 2 所示,对具有 8 种不同孔结构尺寸的装甲板进行弹道冲击数值模拟。

图 9 给出了弹体以 800 m/s 垂直入射时不同弹着点对应的弹体速度时程曲线。可以看出,不同弹着点对应的弹体速度变化规律相似,即随着  $s/d$  的增加,剩余速度不断下降。这是由于随着  $s/d$  的增加,弹靶接触面积增大,靶板对弹体的阻碍作用增加。需要注意的是,过大的  $s/d$  会显著增加靶板质量,其轻量化优势将会下降。

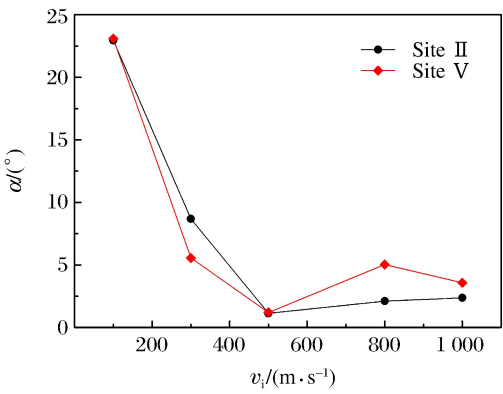


图 8 弹体在侵彻弹着点 II 和 V 处的偏转角度  
Fig. 8 Yaw angles of projectiles at hitting positions II and V

表 2 不同孔洞尺寸的孔结构装甲板  
Table 2 Perforated plates with different hole sizes

| Target    | Hole size     |               |       | Target    | Hole size     |               |       |
|-----------|---------------|---------------|-------|-----------|---------------|---------------|-------|
|           | $d/\text{mm}$ | $s/\text{mm}$ | $s/d$ |           | $d/\text{mm}$ | $s/\text{mm}$ | $s/d$ |
| s/d1.25-1 | 10.80         | 13.50         | 1.25  | s/d2.00-1 | 6.75          | 13.50         | 2.00  |
| s/d1.25-2 | 9.00          | 11.25         | 1.25  | s/d2.00-2 | 9.00          | 18.00         | 2.00  |
| s/d1.50-1 | 9.00          | 13.50         | 1.50  | s/d2.50-1 | 5.40          | 13.50         | 2.50  |
| s/d1.50-2 | 7.00          | 10.50         | 1.50  | s/d2.50-2 | 9.00          | 22.50         | 2.50  |

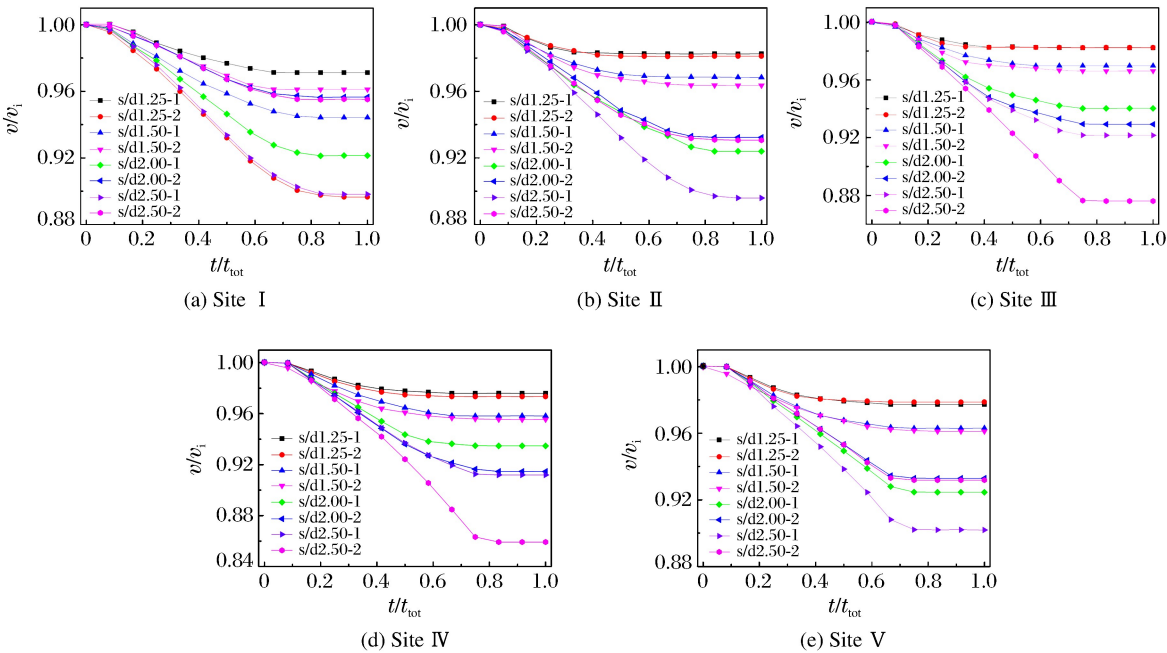


图 9 不同孔洞尺寸及弹着点条件下弹体的速度时程曲线

Fig. 9 Velocity-time curves of projectiles under different hole sizes and hitting positions conditions

图 10 给出了弹体对不同基板的侵彻深度随孔尺寸的变化规律。图 10(a)显示保持孔径不变、 $s/d$  不断增大时侵彻深度的变化情况。对于弹着点 III 和 IV,随着  $s/d$  的增加,侵彻深度不断降低,在  $s/d=2.50$  时取得最小值;对于弹着点 I、II 和 V,侵彻深度则出现上下波动,总体上在  $s/d=2.00$  时取最小值。图 10(b)显示保持孔间距不变、 $s/d$  不断增大时侵彻深度的变化情况,可以发现基板侵彻深度随

$s/d$  的变化规律与图 10(a) 类似。

图 11 给出了孔径或孔间距保持不变时, 弹体冲击不对称弹着点 II 和 V 时的偏转情况。可见, 在  $s/d=1.50$  时, 弹体偏转角度的最大值可达  $5^\circ$  左右, 说明较大或较小的  $s/d$  均不利于弹体偏转, 经过进一步合理优化可实现较佳的弹体偏转。

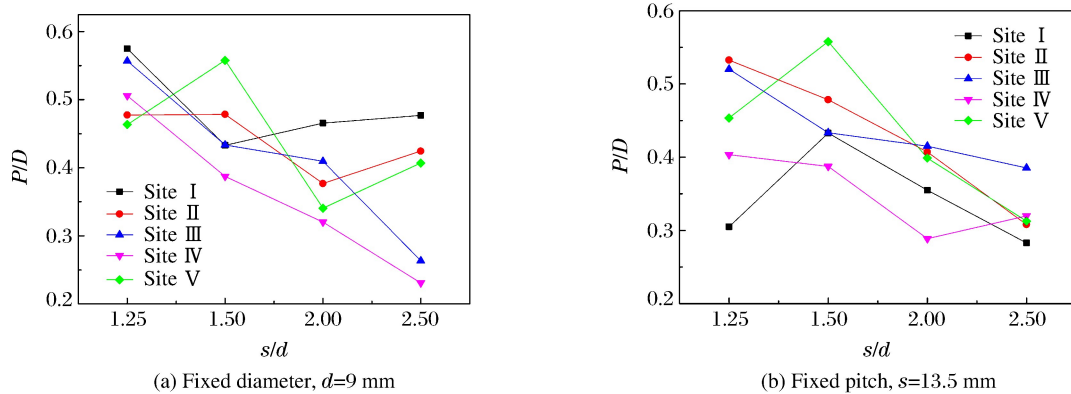


图 10 弹体在不同孔洞尺寸基板上的侵彻深度

Fig. 10 Penetration depth of basic plates with different hole sizes

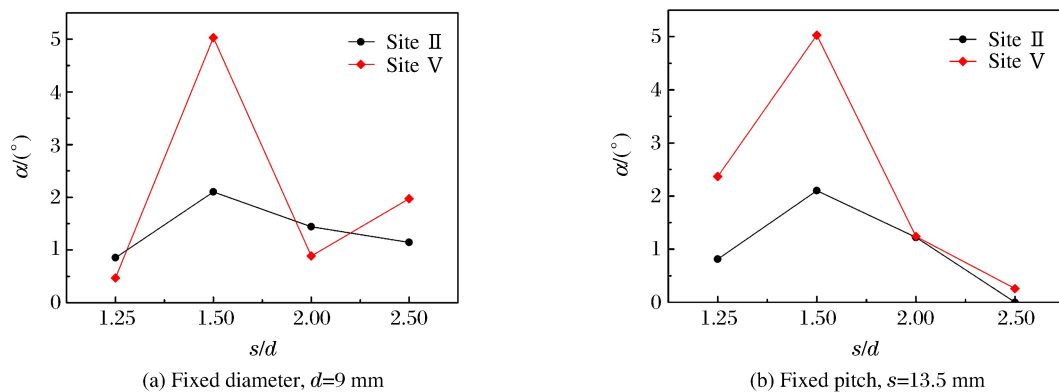


图 11 不同尺寸配置下弹体的偏转角度

Fig. 11 Yaw angles of projectiles under different hole sizes conditions

### 2.3 倾角效应

为研究弹体入射角度  $\theta$  对孔结构装甲板抗弹能力的影响, 选择  $v_i=800$  m/s、 $\theta$  为  $0^\circ\sim 75^\circ$  的工况进行数值模拟。

图 12(a) 显示弹体速度随  $\theta$  的变化规律。随着  $\theta$  的增加, 弹体速度降幅也不断增加。 $\theta < 45^\circ$  时, 各弹着点对应的速度降幅呈缓慢上升趋势;  $\theta > 45^\circ$  时, 上升趋势加快, 不同弹着点之间的差异也更明显。弹着点 IV 对应的速度降幅全程保持着最低水平 (即弹体剩余速度最大), 与垂直入射时的情况不同。

图 12(b) 给出了弹体偏转角度  $\alpha$  随  $\theta$  的变化规律。当  $\theta < 45^\circ$  时, 弹体偏转角度整体上呈现缓慢上升趋势, 不同弹着点之间的差异较小; 当  $\theta > 45^\circ$  时, 弹体偏转角度出现剧烈波动, 最高可达  $30^\circ$ , 不同弹着点之间的差异明显变大, 说明  $\theta > 45^\circ$  时弹着点效应对弹体偏转角度的影响较大。

基板侵彻深度  $P$  随  $\theta$  的变化规律则有所不同, 如图 12(c) 所示, 不同弹着点对应的侵彻深度均保持着不断下降趋势。当  $\theta < 45^\circ$  时, 弹着点 IV 对应的侵彻深度最小, 弹着点 III 和弹着点 I 次之, 弹着点 II、弹着点 V 对应的侵彻深度最大, 与垂直入射模拟结果相同。当  $\theta > 45^\circ$  时, 侵彻深度显著降低, 并且不同弹着点之间的侵彻深度差异明显减小。说明对侵彻深度而言, 弹着点效应在  $\theta < 45^\circ$  时更为有效。 $\theta > 65^\circ$  时, 出现跳弹现象, 弹体没有击中基板。

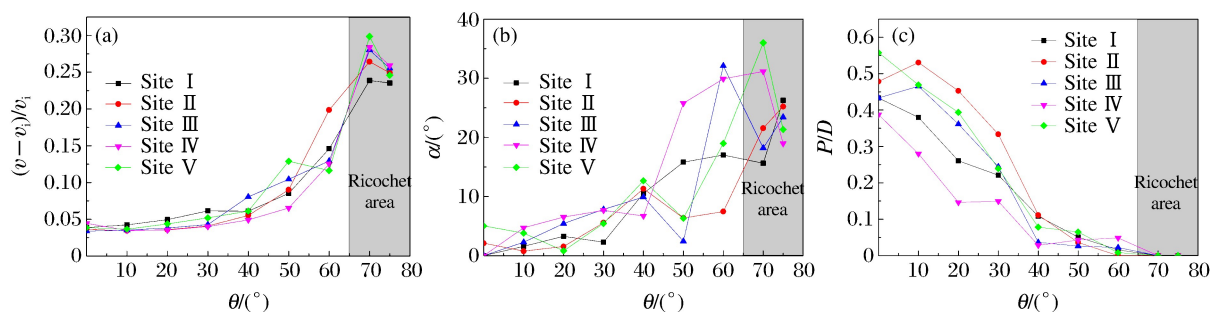
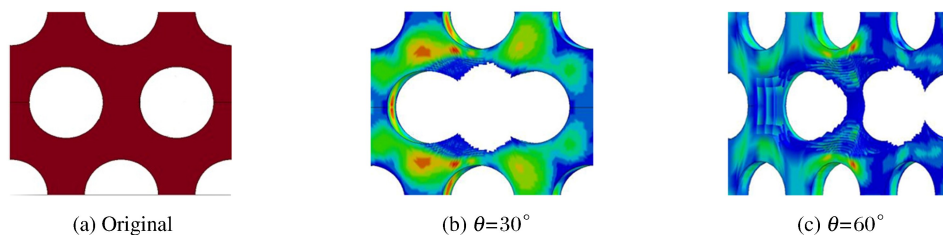
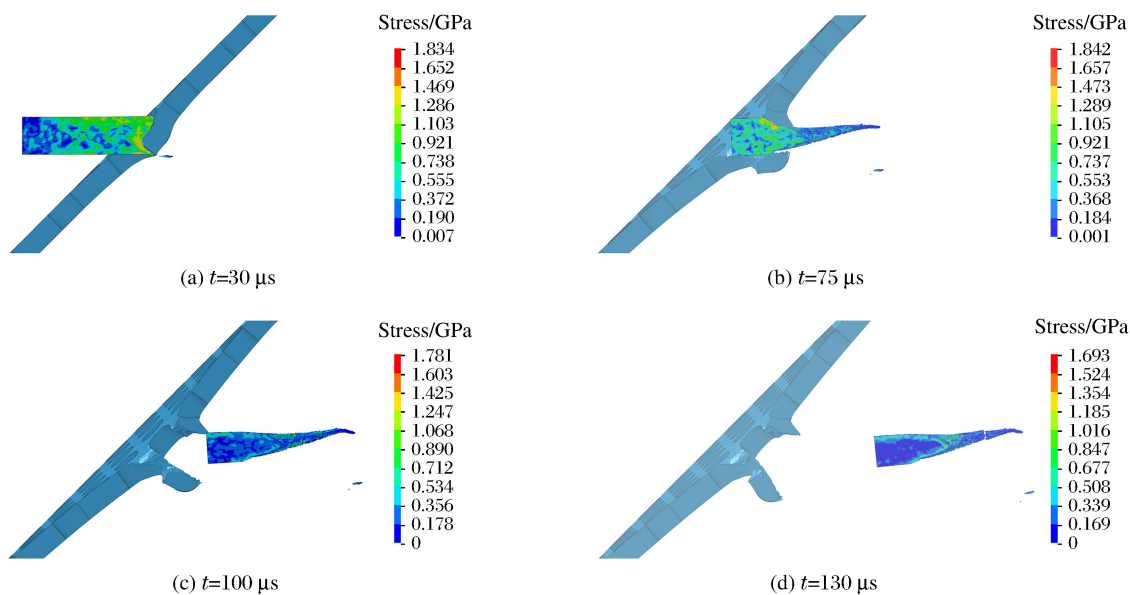


图 12 孔结构装甲板抗弹能力随入射角的变化

Fig. 12 Changes of ballistic resistance of perforated plates with different impact angles

进一步研究发现,弹体在基板上的侵彻深度由剩余速度  $v_r$  和入射角度  $\theta$  共同决定,并且  $\theta$  的影响较大。例如,弹体冲击弹着点Ⅳ时,尽管弹体的  $v_r$  较高,但因其  $\theta$  很大,所以对基板的侵彻深度较小。

图 13 为弹体以  $30^\circ$  和  $60^\circ$  入射角侵彻孔结构装甲板弹着点Ⅱ后的失效模式。弹体以  $30^\circ$  入射时,孔结构装甲板的破坏面积覆盖了 2 个孔洞;以  $60^\circ$  入射时,则增加到 3 个孔洞。说明  $\theta$  越大,孔结构装甲板的破坏面积越大。当  $\theta$  达到一定程度时,会发生跳弹现象,无法对孔结构装甲板形成完全贯穿的穿孔。此外,弹体以较大角度入射时,会发生较严重的侵蚀破坏。如图 14 所示,弹体以  $45^\circ$  入射角侵彻孔结构装甲板时,发生较显著的侵蚀破坏,弹体头部发生折断。

图 13 弹体以  $30^\circ$  和  $60^\circ$  侵彻孔结构装甲板后的失效模式Fig. 13 Failure modes of targets penetrated by projectile with impact angles of  $30^\circ$  and  $60^\circ$ 图 14 弹体以  $45^\circ$  侵彻弹着点Ⅴ的失效模式Fig. 14 Failure modes of target penetrated by projectile at hitting position Ⅴ with impact angles of  $45^\circ$

### 3 结 论

针对孔结构装甲板弹道侵彻破坏行为进行了有限元数值模拟研究,讨论了弹体入射速度、弹着点、入射角以及孔洞尺寸对抗弹能力的影响,得到以下主要结论。

(1) 弹体垂直入射时,弹着点效应在入射速度接近弹道极限速度时最明显;三孔之间和两孔之间部位的抗弹能力最强,对应较低的剩余速度和侵彻深度;孔边缘对应较高的剩余速度和侵彻深度,但是弹体冲击孔边缘(弹着点Ⅱ、Ⅴ)时,会发生明显偏转,降低了弹体正射到靶板后防护目标的几率。

(2) 在一定范围内,孔间距与孔径的比值( $s/d$ )越大,弹体剩余速度和后效板侵彻深度越低; $s/d=1.50$ 时,弹体偏转效果最好。综合考虑孔结构尺寸设计和质量优化设计,可以得到符合具体工程要求的孔结构装甲板。

(3) 弹体斜入射时,随着入射角的增加,弹体偏转角度逐渐升高,侵彻深度逐渐下降,同时靶板的破坏面积不断增加,弹体侵蚀程度不断加深,说明倾角越大,靶板的抗弹能力越强。入射角小于 $45^\circ$ 时,各弹着点的抗弹能力与垂直入射情况相同;入射角大于 $45^\circ$ 时,不同弹着点对应的侵彻深度差距不大,弹着点效应对弹体剩余速度和偏转角度的影响较大;入射角超过 $65^\circ$ 后,会出现跳弹现象,弹体无法贯穿靶板。

### 参考文献:

- [1] BEN-MOSHE D, TARSI Y, ROSENBERG G. An armor assembly for armored vehicles; EP 0209221 [P]. 1986.
- [2] CHOCRON S, ANDERSON C E JR, GROSCHE D J, et al. Impact of the 7.62 mm APM2 projectile against the edge of a metallic target [J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25(5): 423-437.
- [3] BALOS S, GRABULOV V, SIDJANIN L, et al. Geometry, mechanical properties and mounting of perforated plates for ballistic application [J]. Materials & Design, 2010, 31(6): 2916-2924.
- [4] MISHRA B, RAMAKRISHNA B, JENA P K, et al. Experimental studies on the effect of size and shape of holes on damage and microstructure of high hardness armour steel plates under ballistic impact [J]. Materials & Design, 2013, 43: 17-24.
- [5] RADISAVLJEVIC I, BALOS S, NIKACEVIC M, et al. Optimization of geometrical characteristics of perforated plates [J]. Materials & Design, 2013, 49: 81-89.
- [6] KILIC N, BEDIR S, ERDIK A, et al. Ballistic behavior of high hardness perforated armor plates against 7.62 mm armor piercing projectile [J]. Materials & Design, 2014, 63: 427-438.
- [7] 胡丽萍, 王智慧, 满红, 等. 孔结构间隙复合装甲位置效应研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(1): 89-90.  
HU L P, WANG Z H, MAN H, et al. Study on the spot effect of spaced composite armor with multi-holes [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2010, 33(1): 89-90.
- [8] 肖红亮, 李晓源, 时捷, 等. 倾角效应对高强度钢板抗弹性能的影响 [J]. 兵器材料科学与工程, 2011, 34(6): 36-40.  
XIAO H L, LI X Y, SHI J, et al. Influence of obliquity effect on the ballistic performance of high strength steel plate [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2011, 34(6): 36-40.
- [9] 李换芝. 倾角穿孔装甲对 14.5 mm 穿燃弹防护性能的影响 [J]. 科技创新与生产力, 2016(2): 90-91.  
LI H Z. Influence of oblique perforated armor on the protective performance of the 14.5 mm armor-piercing incendiary [J]. Technology Innovation and Productivity, 2016(2): 90-91.
- [10] 王建波, 闫慧敏, 范秉源, 等. 弹着点对多孔钢板抗弹性能影响的数值模拟 [J]. 兵器材料科学与工程, 2011, 33(6): 73-75.  
WANG J B, YAN H M, FAN B Y, et al. Numerical simulation analysis about the influence of the hitting position on the ballistic performance of the multi-hole steel plate [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2011, 33(6): 73-75.

- [11] BØRVIK T, HOPPERSTAD O S, BERSTAD T, et al. A computational model of viscoplasticity and ductile damage for impact and penetration [J]. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2001, 20(5): 685-712.
- [12] LIDÉN E, MOUSAVI S, HELTE A, et al. Deformation and fracture of a long-rod projectile induced by an oblique moving plate: numerical simulations [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 40: 35-45.
- [13] 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.

## Numerical Study on Ballistic Resistance of Metal Perforated Armor to Projectile Impact

QIN Qinghua<sup>1,2</sup>, CUI Tianning<sup>1</sup>, SHI Qian<sup>1</sup>, JIN Yongxi<sup>2</sup>, ZHANG Jianxun<sup>1</sup>

(1. *State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures ,  
Shaanxi Engineering Laboratory for Vibration Control of Aerospace Structures ,  
School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China ;*

2. *Science and Technology on Transient Impact Laboratory, No. 208 Research Institute of  
China Ordnance Industries, Beijing 102202, China)*

**Abstract:** In this paper, we numerically studied the ballistic resistance of the metal perforated armor to the high-velocity projectile, and analyzed in detail the effects of various factors on its ballistic resistance, including the impact velocity, the oblique angle, the hitting location and the size of holes. The results showed that the effect of hitting position decreases with the increase of the impact velocity near the ballistic limit. Both the normal impact at the asymmetric hitting position and the oblique impact at the symmetric hitting position result in the projectile yaw. The residual velocity of the projectile and the penetration depth decrease dramatically as the oblique angle is larger than  $45^\circ$ , and furthermore, the ricochet appears as the oblique angle is larger than  $65^\circ$ .

**Keywords:** metallic perforated armor; high-velocity impact; penetration; perforation; ballistic limit