

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.05.005

# 立方形钨破片穿甲效应的数值模拟与试验\*

彭军 袁宝慧 孙兴昀 程淑杰  
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

**[摘要]** 为探寻立方形钨破片着靶姿态对其穿甲效应的影响规律,采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件和战斗部地面静爆试验相结合的方法,研究了破片以不同姿态正、斜撞击靶板时,破片的剩余速度、剩余动能和靶板损伤面积的变化规律。结果表明:正撞击时,不同姿态下破片剩余速度和靶板损伤面积相差较小,破片剩余动能变化稍大;斜撞击时,不同姿态下的3种参数与着角 $\theta$ 变化规律基本一致,面着靶靶板损伤面积最小,尖角着靶破片剩余速度和剩余动能最高,跳飞角度更大。研究结果对破片式杀伤战斗部设计和毁伤威力评估具有重要的参考意义。

**[关键词]** 立方形钨破片;穿甲效应;着靶姿态;着角

**[分类号]** TJ413.2

## Numerical Simulation and Experiment for Penetrating Performance of Cubic Tungsten Fragment

PENG Jun, YUAN Baohui, SUN Xingyun, CHENG Shujie  
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

**[ABSTRACT]** In order to examine the effect of yaw angle of cubic tungsten fragment on its penetrating performance, basing on ANSYS/LS-DYNA numerical simulation and warhead static explosion test, residual velocity, residual kinetic energy and target damage area of fragment were researched, in condition of different fragment yaw angle and target angle. Results shows that, under vertical impact condition, at different fragment yaw angle, the residual velocity of the fragment and the damage area of the target change slightly, while the residual kinetic energy varies significantly; under crossed impact condition, at different fragment yaw angle, the three kinds of parameters follow almost the same trend. The target damage area is minimum under face impact; the residual velocity, residual kinetic energy, and the ricochet angle are maximum under tip impact. The research results will have an important reference to fragmentation warhead design and damage evaluation.

**[KEYWORDS]** cubic tungsten fragment; penetrating performance; fragment yaw angle; target angle

## 引言

破片式战斗部是当前防空反导战斗部的主要类型。在战斗部质量和尺寸约束条件下,主要通过以下两种途径提高其毁伤威力:1)采用更高能量的炸药,提高破片初速;2)采用新型式战斗部,如采用对炸药能量利用率更高的战斗部结构,或采用威力性能更高的破片。破片的弹道极限速度、剩余速度、剩余动能、靶板的穿孔形状和损伤面积等是破片威力性能设计的重要参数,也是各类杀伤战斗部设计的重要依据,一直受到学者的高度关注。对破片侵彻

靶板问题的研究,有比较经典的 THOR 经验计算方法和基于守恒定律建立的分析模型,但由于侵彻问题的多样性和影响因素的复杂性,难以统一起来,经验公式参数的获取也需要大量的试验数据支撑。因此,目前研究方法主要以试验和数值仿真为主。随着钨合金技术的发展,球形、立方形等多种钨破片被广泛应用于各类杀伤战斗部,多位学者也开展了该方面的研究。午新民等<sup>[1]</sup>利用试验开展了钨合金球侵彻多层等间隔硬铝靶研究,得到了钨合金球贯穿靶板层数与撞击速度的关系;徐豫新等<sup>[2]</sup>利用数值仿真和穿甲试验研究了钨合金球形破片对低碳钢板的穿甲极限,分析了靶损伤和破片损伤的特点,

\* 收稿日期:2017-04-28

基金项目:装备发展部 XX 专项资助项目

作者简介:彭军(1985-),男,博士,工程师,主要从事杀伤战斗部技术研究。E-mail:285649306@qq.com

通信作者:袁宝慧(1952-),男,博导,研究员,主要从事战斗部设计及爆轰物理研究。E-mail:phbit@126.com

获得了破片直径和极限穿透厚度的关系;毛亮等<sup>[3]</sup>利用试验方法开展了钨合金球形破片侵彻 DFRP 靶板研究,结合量纲分析得到了弹道极限速度的经验关系;袁新波<sup>[4]</sup>利用数值仿真,对比分析不同入射角度对破片穿甲速度的影响趋势;王祝波等<sup>[5]</sup>利用数值仿真,对比分析球形、立方形、圆柱形钨破片穿甲速度、动能衰减曲线;彭军等<sup>[6]</sup>利用弹道枪试验和数值仿真开展了钨合金破片侵彻钢板研究,得到了不同质量破片对两种厚度钢靶的穿甲规律,分析了不同弹靶条件下影响侵彻效果的主要因素。然而在实际应用中,受爆轰产物驱动力、空气阻力及弹靶交会条件等多重因素影响,立方形破片的终点着靶姿态和撞靶角度会有较大的差异,对目标的穿甲效果也将不同。目前,尚没有文献开展该方面的研究。

利用 ANSYS/LS-DYNA 非线性动力有限元分析软件和战斗部地面静爆试验相结合的方法,研究了立方形钨破片不同着靶姿态及不同着靶角度条件下的穿甲效应,从破片的剩余速度、剩余动能和靶板穿孔损伤面积等表征破片穿甲效应的重要参数的变化方面,深入研究了立方形钨破片着靶姿态和着角对穿甲效应的影响规律。

## 1 破片穿甲模型

预制破片杀伤战斗部主要用于打击各类飞机、轻型装甲车辆及部分来袭导弹结构件。文章中,结合实际需求,选取的立方形钨破片尺寸为  $5.6 \text{ mm} \times 5.6 \text{ mm} \times 5.6 \text{ mm}$ ,理论质量为  $3.09 \text{ g}$ ;目标靶板材料为 Q235 钢板,尺寸为  $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 。破片撞击靶板的速度为  $2000 \text{ m/s}$ 。

定义破片着靶姿态为破片在撞击靶板前的状态,如图1所示,可用破片3个相互垂直的面  $A_1$ 、 $A_2$  和  $A_3$  与靶平面的夹角  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  表示破片状态。立方形破片典型的着靶姿态为面着靶、棱着靶和尖角着靶。定义破片着靶角度(简称“着角”)为破片速度

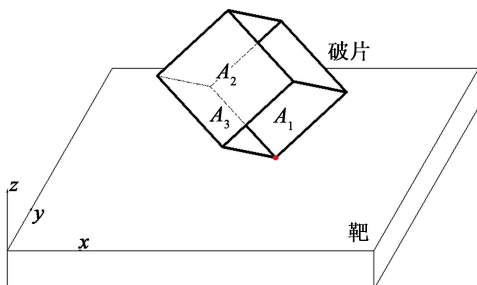


图 1 破片着靶姿态的定义

Fig. 1 Definition of the fragment yaw angle

方向与靶板法线的夹角,如图 2 所示,用  $\theta$  表示,正撞击靶板时,着角  $\theta$  为  $0^\circ$ 。

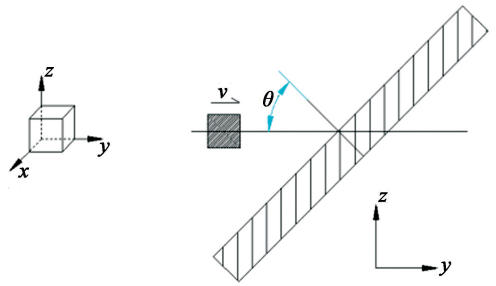


图 2 破片着靶角度的定义

Fig. 2 Definition of the target angle

## 2 数值模拟

### 2.1 有限元模型及计算工况

利用 ANSYS/LS-DYNA 3D 建立数值计算模型,见图 3。破片和靶板均采用 Lagrange 算法,六面体网格划分,破片网格尺寸为  $0.5 \text{ mm}$ ,靶板为  $1.0 \text{ mm}$ 。考虑弹靶在侵彻过程中相互挤刮发生破坏,定义破片和靶板之间的接触类型为面面冲蚀接触 (CESTS)。相对于破片而言,可以认为靶板是无限区域;因此,对靶板施加非反射边界条件。建模完成后,首先计算立方形钨破片面着靶、棱着靶和尖角着靶 3 种典型的姿态正撞击(着角为  $0^\circ$ )靶板的工况。随后计算立方形钨破片在典型姿态下分别以  $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $75^\circ$  着角斜撞击靶板的工况。

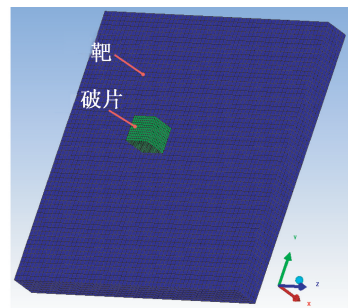


图 3 破片撞击靶板的有限元模型

Fig. 3 Numerical simulation modeling of fragment impacting target

### 2.2 材料模型与状态方程

破片与靶板相互作用过程具有大变形、高应变率和高热的特点;因此,采用综合考虑应变率、温度对屈服强度影响的 Johnson-Cook 本构模型和 Mie-Gruneisen 状态方程进行描述<sup>[7]</sup>。

Johnson-Cook 强度本构模型表示为

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

Mie-Gruneisen 状态方程表达式为

$$p = p_H + \frac{\gamma}{V}(E - E_H) \quad (2)$$

冲击波粒子速度和粒子速度的关系为

$$u_s = C_0 + Su_p \quad (3)$$

式(1)~式(3)中各参数的意义见文献[7]。

计算中所采用的主要参数值见表1<sup>[7-8]</sup>。

表1 数值模拟主要参数值

Tab.1 The main numerical simulate parameters

参数	破片	靶板	参数	破片	靶板
$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	17.6	7.85	$m$	0.91	1.03
$G/\text{GPa}$	160	77	$T_m/\text{K}$	2 760	1 793
$\nu$	0.29	0.31	$C_0 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	4 040	4 569
$A/\text{MPa}$	1 700	235	$S$	1.23	1.49
$B/\text{MPa}$	432	400	$\gamma$	1.54	2.17
$n$	0.43	0.26	$E_0$	1.0	1.0
$c$	0.039	0.014	$V$	1.0	1.0

### 2.3 计算结果与分析

#### 2.3.1 正撞击穿甲效应

图4是立方形钨破片在3种典型着靶姿态下的变形和穿孔。弹靶作用过程约在15 μs内完成,整个侵彻穿孔过程可分为着靶、侵彻和贯穿3个阶段。由于破片侵彻速度较高,弹靶作用过程中,靶板表现出较强的流动性,发生冲蚀和塑性变形,形成明显大于破片尺寸的穿孔;破片也发生冲蚀和塑性变形。面着靶时,破片的塑性变形最小,受冲蚀最严重;尖角着靶时,塑性变形最为严重,但受冲蚀最小。靶板损伤形态均为近圆孔,损伤面积显著大于破片着靶时的投影面积,3种着靶姿态下靶板孔的形状和损伤面积基本相同。

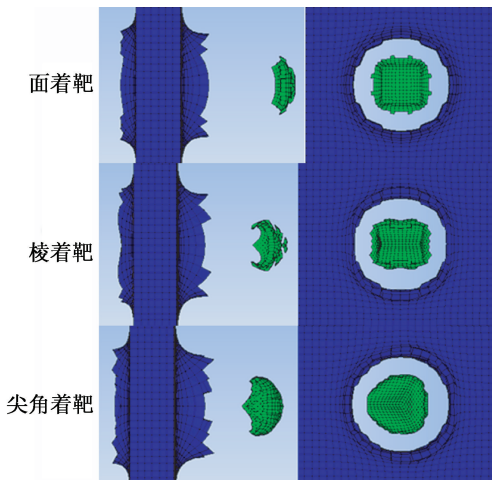


图4 破片在典型着靶姿态条件下的穿孔

Fig.4 Perforation hole in some typical fragment yaw angle

图5和图6分别是破片在3种典型着靶姿态下穿靶过程的速度变化和动能变化。

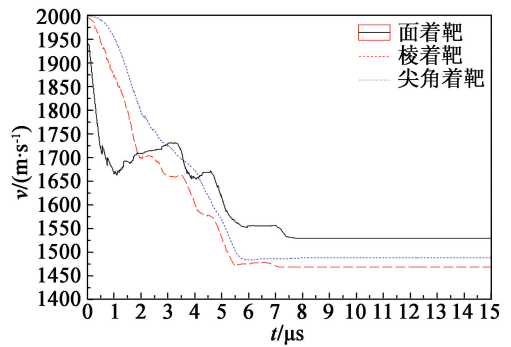


图5 破片在典型着靶姿态下穿靶过程的速度

Fig.5 Fragment velocity variation trend in some typical fragment yaw angle

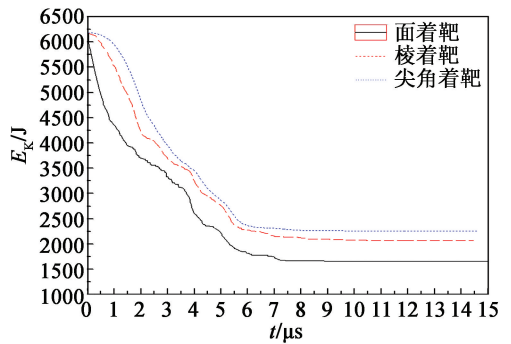


图6 破片在典型着靶姿态下穿靶过程的动能

Fig.6 Kinetic energy variation trend in some typical fragment yaw angle

从图5可知,3种姿态下,破片速度变化趋势基本相同,有3个不同的梯度阶段。第一阶段,速度降梯度最大,历时约1~3 μs;第二阶段为振荡变化阶段,平均速度降梯度明显小于第一阶段;随后,以趋于稳定的速度贯穿靶板。这与侵彻过程的三阶段理论相符合。从图6可知,虽然不同着靶姿态下,破片速度衰减和冲蚀情况不同,但其穿靶过程中动能变化的趋势基本相同。

表2为经统计获得的弹靶作用后的数据。从表2中可见,正撞击条件下,着靶姿态对破片剩余速度的影响较小,而对破片剩余动能的影响稍大。

表2 破片在典型着靶姿态下的威力参数

Tab.2 Damage properties parameters in some typical fragment yaw angle

着靶姿态	剩余速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	剩余质量/ /g	剩余动能/ /J	损伤面积/ /mm <sup>2</sup>
面着靶	1 530	1.62	1 663	185
棱着靶	1 469	2.00	2 064	192
尖角着靶	1 488	2.07	2 255	196

预制破片剩余速度的计算通常采用基于大量试验数据的 THOR 经验公式<sup>[9]</sup>, 表达式为

$$v_r = v_0 - k_1 (hA)^{\alpha_1} m^{\beta_1} \sec^{\gamma_1} \theta \quad (4)$$

式中:  $v_r$ 、 $v_0$  分别为破片的经验极限穿透速度和破片的初始撞击速度, m/s;  $h$  为靶厚, cm;  $A$  为破片的平均着靶面积,  $\text{cm}^2$ ;  $m$  为破片质量, g;  $\theta$  为着靶角度, °; 其他参数为与弹靶材料有关的常数。

在本文中, 立方形破片平均着靶面积取正撞击时投影面积值的均值, 即  $(\sqrt{3} + 1)a/2$ ,  $a$  为边长。代入文献[9]中低碳钢靶板参数, 计算得到正撞击时, 破片剩余速度  $v_r = 1\,429$  m/s, 与数值仿真中 3 种姿态下破片剩余速度的平均值  $v_r'$  (1 496 m/s) 的误差为 4.7%, 说明仿真计算模型的计算结果可信度较高。

### 2.3.2 斜撞击穿甲效应

进一步计算了破片在 3 种典型着靶姿态及 15°、30°、45°、60° 和 75° 着角下对靶板的穿甲效应, 统计了包含正撞击(0° 着角)在内共计 18 种工况下破片的剩余速度、剩余动能和靶板的损伤面积。

图 7 给出了破片在尖角着靶姿态下, 0°、15°、30°、45°、60° 和 75° 着角情况下对靶板的穿孔情况。

图 8 是经统计绘制而成的各种工况下靶板的穿孔形状及变化情况。可见, 3 种姿态下, 随着着角的增大, 靶板穿孔由圆孔转为椭圆孔, 且着角越大, 椭圆孔的长短轴比值越大。棱着靶时, 椭圆孔的长短轴比值均大于其他两种姿态。靶板破坏模式表现为圆孔贯穿、椭圆孔贯穿、跳飞 3 种。

图 9 ~ 图 11 分别是靶板的穿孔面积(也称损伤面积)、破片的剩余速度和剩余动能随着角的变化曲线。

由图 9 可知, 面着靶时, 靶板的损伤面积最小, 当着角  $\theta \leq 30^\circ$ , 靶板穿孔面积基本相同; 当着角  $\theta >$

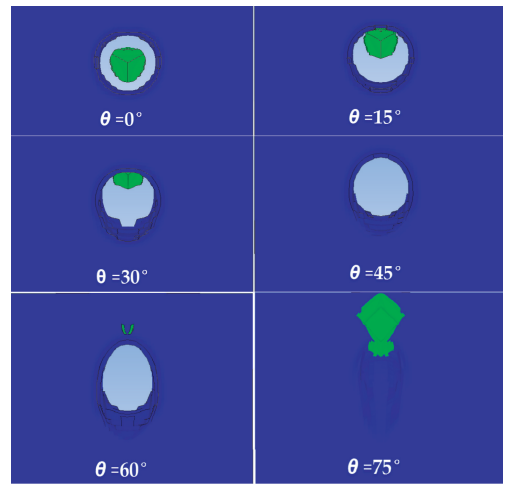


图 7 尖角着靶姿态斜撞击靶板计算结果  
Fig. 7 The result of tip fragment yaw angle to oblique impact to target

30°, 靶板穿孔面积开始随着角增大而显著增大。当着角  $\theta \leq 45^\circ$ , 棱着靶和尖角着靶穿孔面积及变化趋势基本相同; 但当  $\theta > 45^\circ$ , 棱着靶穿孔面积增大梯度大于尖角着靶。当  $\theta = 70^\circ$ , 破片均出现沿靶板平面方向跳飞现象, 不能形成穿孔。

由图 10 可知, 当  $\theta \leq 45^\circ$ , 3 种姿态破片剩余速度变化趋势基本相同, 且与 THOR 公式曲线趋势吻合。当  $\theta > 45^\circ$ , 剩余速度降梯度均显著增大。其中, 尖角着靶速度降幅稍小, 当  $\theta = 60^\circ$  时, 剩余速度约为其他姿态的 2 倍。当  $\theta = 75^\circ$  时, 破片跳飞。

由图 11 可知, 当着角  $\theta < 60^\circ$  时, 3 种姿态破片剩余动能变化趋势及平均变化梯度基本相同;  $\theta = 60^\circ$ , 面着靶和棱着靶剩余动能基本相等, 尖角着靶破片剩余动能最高, 约为其他两种姿态的 3 倍。

分析出现差异的原因, 主要是尖角着靶破片在非侵彻方向的速度分量较小, 即保持侵彻弹道稳定性的能力较高; 因此, 其剩余速度和动能均较高, 跳

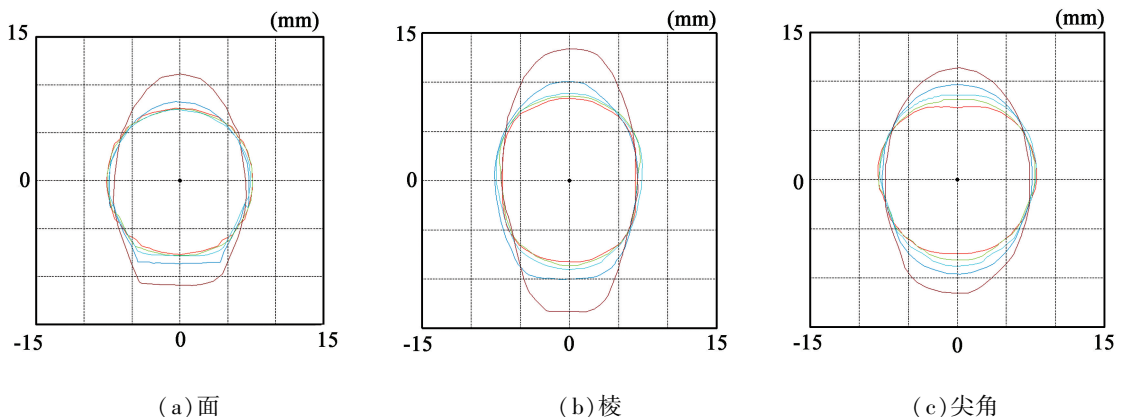


图 8 不同着角下靶板的穿孔

Fig. 8 Hole in target of different target angle

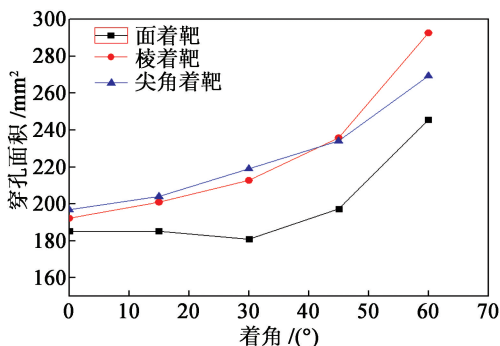


图9 不同着角下靶板的穿孔面积

Fig. 9 Variation trend of target damage size at different target angles

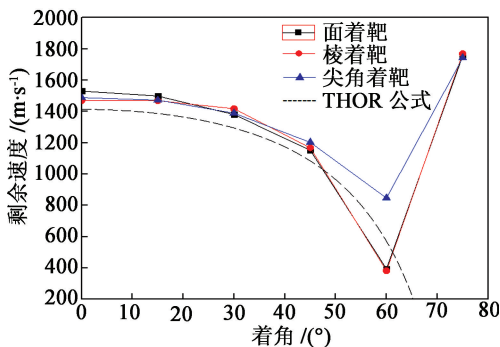


图10 不同着角下破片的剩余速度

Fig. 10 Variation trend of fragment residual velocity at different target angles

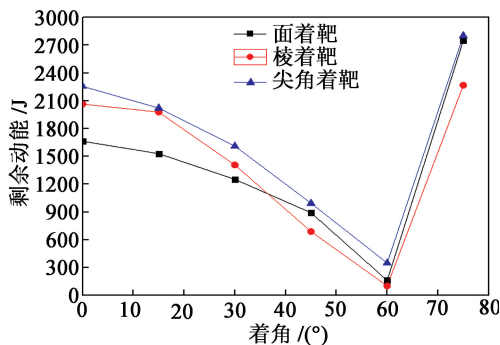


图11 不同着角下破片的剩余动能

Fig. 11 Variation trend of fragment residual kinetic energy at different target angles

飞角度更大。

### 3 试验验证

#### 3.1 试验设计与原理

设计破片参数与数值仿真相同的杀伤战斗部,利用战斗部地面静爆打靶试验方法,获取靶板损伤形状、尺寸和破片跳飞角度等参数,与数值模拟计算对比,验证数值模拟结果的正确性。

试验现场见图12,试验系统由战斗部、钢靶板

和钢靶筒组成。靶板高度2.5 m,厚度6.0 mm,位于距战斗部轴心7.0 m的弧面上,竖向中线位于战斗部赤道平面内;钢靶筒尺寸为 $\varnothing 400\text{ mm} \times 800\text{ mm}$ ,壁厚6.0 mm,位于距战斗部轴心7.0 m处,竖向中线位于战斗部赤道平面内,轴向与战斗部轴线夹角 $45^\circ$ 。由于战斗部爆炸后,破片发生翻滚,飞至靶板时姿态变化较大,假设不考虑破片飞散角的影响,破片将以不同姿态正撞击靶板,钢靶筒表面具有一定的弧度且斜置,破片将以不同姿态斜撞击钢靶筒。因此,试验系统和数值仿真计算模型基本相互等效。利用靶网测得破片着靶速度约为2 000 m/s。



图12 战斗部静爆试验现场

Fig. 12 Picture of warhead explosion test

#### 3.2 试验结果与分析

试验后靶板穿孔照片如图13所示,靶筒穿孔照片如图14所示。靶板穿孔基本均为圆孔,靶筒穿孔均为椭圆孔,穿孔尺寸由中心向两侧逐渐增大。统计靶板穿孔直径、靶筒最小和最大损伤尺寸。靶板穿孔直径为13~16 mm,平均穿孔直径为14.4 mm;靶筒最小穿孔尺寸为19 mm,最大穿孔尺寸为24 mm,1枚破片跳飞,测量其跳飞角度为 $70^\circ$ ,未跳飞

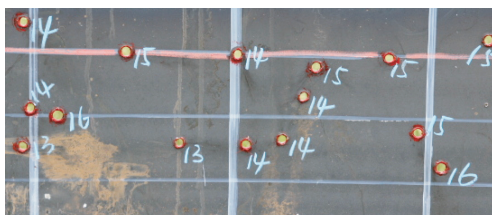


图13 破片对靶板的穿孔

Fig. 13 Perforation of fragment on target plate



图14 破片对靶筒的穿孔

Fig. 14 Perforation of fragment on target tube

破片的最大着角为 60°。

试验结果与数值模拟结果的对比见表 3。数值模拟数据中,平均穿孔尺寸偏差约 8.3%,主要因为测量误差本身较大(6.9%)引起的,其他数据与试验数据的统计值相吻合,验证了仿真结果有较高的可信度。

表 3 试验结果及比较

Tab.3 Comparison of test results and simulated results

统计参量	正碰撞	斜碰撞	数值模拟	偏差/%
平均穿孔直径/mm	14.4	—	15.6	8.3
最小穿孔尺寸/mm	—	19	16.84	范围内
最大穿孔尺寸/mm	—	25	26.69	范围内
跳飞角度/(°)	—	60~70	60~75	范围内

### 4 结论

1) 立方形钨破片在正撞击钢板时,不同姿态下破片的剩余速度和靶板的损伤面积相差较小,极差分别为破片初速的 3.1% 和最小穿孔面积的 5.6%,破片剩余动能变化稍大,极差为初值的 9.6%。

2) 斜撞击时,不同姿态下的 3 种参数与着角  $\theta$  的变化规律基本一致。当着角  $\theta > 45^\circ$  时,破片的剩余速度和靶板穿孔面积的变化梯度显著增大;当着角  $\theta = 60^\circ$  左右,靶板穿孔面积均趋于极大值,破片剩余速度和剩余动能趋于对靶板有效穿孔毁伤时的极小值。

3) 尖角着靶时,破片在非侵彻方向的速度分量较小,剩余速度和动能均较高,跳飞角度更大。

### 参 考 文 献

[1] 午新民,翟晓丽,蒋浩征. 钨合金球侵彻多层等间隔硬铝靶实验研究[J]. 北京理工大学学报, 1997, 17(1):111-116.  
WU X M, ZHAI X L, JIANG H Z. An investigation on the penetration of multi-layered space plates of aluminum alloy by a tungsten sphere[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1997, 17(1):111-116.

[2] 徐豫新,王树山,伯雪飞,等. 钨合金球形破片对低碳钢的穿甲极限[J]. 振动与冲击, 2011, 30(5):192-195.

XU Y X, WANG S S, BO X F, et al. Armor-piercing ultimate of tungsten alloy spherical fragment against low-carbon steel[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(5):192-195.

[3] 毛亮,王华,姜春兰,等. 钨合金球形破片侵彻 DFRP 靶板的试验研究[J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(4):348-353.  
MAO L, WANG H, JIANG C L, et al. Ballistic limit velocity of tungsten alloy spherical fragment penetrating ceramic/DFRP composite target plates [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2016, 36(4):348-353.

[4] 袁新波. 入射角度对破片穿甲威力影响[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(2):37-40.  
YUAN X B. Numerical simulation on effect of incident angle on fragments penetrating power [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015, 36(2):37-40.

[5] 王祝波,赵锋,谢金,等. 钨破片形状对穿甲速度影响的数值模拟研究[J]. 兵工自动化, 2015(2):53-55.  
WANG Z B, ZHAO F, XIE J, et al. Numerical simulation on effect of velocity of different shape tungsten fragments penetrating armor plate [J]. Ordnance Industry Automation, 2015(2):53-55.

[6] 彭军,袁宝慧,程淑杰,等. 立方形破片对钢靶的穿甲威力研究[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(29):7092-7096.  
PENG J, YUAN B H, CHEN S J, et al. Study on armor-piercing power of steel target under the impact of cube-shaped fragment [J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(29):7092-7096.

[7] 郑春晓,范景莲,龚星,等. 细晶 93W-4.9Ni-2.1Fe 合金动态本构关系的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(10):2043-2047.  
ZHENG C X, FAN J L, GONG X, et al. Dynamic constitutive relationship of fine-grained 93W-4.9Ni-2.1Fe Alloys[J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2013, 42(10):2043-2047.

[8] 林莉,支旭东,范锋,等. Q235 B 钢 Johnson-Cook 模型参数的确定[J]. 振动与冲击, 2014, 33(9):153-158, 172.  
LIN L, ZHI X D, FAN F, et al. Determination of parameters of Johnson-Cook models of Q235B steel[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(9):153-158, 172.

[9] 隋树元,王树山. 终点效应学[M]. 北京:国防工业出版社, 2000.  
SUI S Y, WANG S S. Terminal effects[M]. Beijing:National Defend Industry Press, 2000.