

文章编号: 1001- 2486(2009) 06- 0139- 05

30mm 半穿甲弹斜侵彻陶瓷/钢复合装甲的弹着角效应研究*

陈斌^{1,2}, 于起峰², 杨跃能², 曾首义¹

(1. 国防科技大学 指挥军官基础教育学院, 湖南 长沙 410072;

2. 国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 设计了 30mm 半穿甲弹斜侵彻陶瓷/钢复合靶的弹道试验, 采用高速摄像记录了弹靶作用过程, 研究了弹着角、弹丸位移以及背板变形挠度的图像测量方法, 通过仿真验证了该方法的可行性与准确性。基于高速摄像序列图像对弹靶作用过程进行了测量分析, 结合试验数据研究了弹着角对半穿甲弹侵彻效能的影响。结果表明: 弹着角导致弹丸受靶板的不对称阻力作用, 侧向力及侧向力矩使得弹丸在侵彻过程中不断偏转, 表现为侵彻路径呈曲线; 在相同速度条件下, 随着弹着角的增大, 侵彻时间延长, 背板变形挠度减小, 侵彻效能降低。

关键词: 陶瓷复合装甲; 斜侵彻; 弹着角; 图像处理

中图分类号: TU511 文献标识码: A

Effect of Impact Angle of 30mm Semi-AP Projectile Obliquely Penetrating Ceramic/Steel Targets

CHEN Bin^{1,2}, YU Qi-feng², YANG Yue-neng², ZENG Shou-yi¹

(1. College of Military Basic Education, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410072, China;

2. College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410072, China)

Abstract: The ballistic experiment of 30mm semi-AP obliquely penetrating ceramic/steel target is designed, and the image measurement method of impact angle, displacement and back plate deformation is proposed. The high-speed photography image sequences is measured based on digital image processing, and the effect of impact angle of oblique penetration is analyzed. The study shows that the impact angle will induce asymmetric effect in the projectile's penetration process, and the angle of yaw will gradually increase; under the same velocity condition, when the impact angle increases, the time of penetration will prolong, and the penetration performance will be reduced.

Key words: ceramic composite armor; oblique penetration; impact angle; image processing

抗弹陶瓷具有高强度、高硬度、高耐磨性等特点, 与韧性金属材料组合构成抗弹性能高的复合装甲, 能有效抵抗穿甲子弹和爆炸破片的打击, 在装甲防护中有着广泛的应用^[1]。射弹侵彻陶瓷/金属复合装甲的理论实验研究一直是防护工程领域的研究热点。斜侵彻是弹丸侵彻目标时常见的一种状态, 着靶后弹丸受不对称阻力, 在侵彻过程中不断偏转, 侵彻效能降低。研究半穿甲弹斜入射陶瓷/金属复合装甲的弹着角效应, 对陶瓷/金属复合装甲抗斜侵彻机理研究及优化设计具有重要意义。

本文针对半穿甲斜侵彻陶瓷/钢复合装甲的问题进行了弹道试验, 采用高速摄像记录弹靶作用过程, 利用数字图像处理技术对半穿甲弹侵彻靶板的特征参数进行了测量, 分析了弹着角对侵彻效能的影响, 得到了半穿甲弹斜侵彻陶瓷/钢复合装甲的一些基本规律。

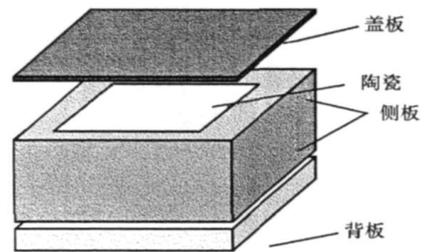


图 1 陶瓷复合装甲结构简图

Fig. 1 Structure of ceramic composite armor

* 收稿日期: 2009- 05- 12

作者简介: 陈斌(1964—), 男, 教授, 博士生。

1 试验设计

试验弹丸采用 30mm 口径半穿甲模拟弹, 弹长为 165mm, 卵形弹头部分长 90mm, 圆柱形弹身和弹尾部分长 75mm, 硬度为 RC50, 质量为 0.529kg。陶瓷/钢复合面板的三维约束采用焊接箱体结构, 由背板、4 块侧向约束板和盖板焊接而成, 如图 1 所示。表 1 给出了陶瓷复合装甲材料的性能参数。

表 1 陶瓷复合装甲材料性能参数

Tab. 1 Ceramic composite armor material capability

试件	材料	厚度(mm)	密度(kg/m^3)	硬度	强度极限(MPa)	屈服极限(MPa)
面板	AD95 陶瓷	45	3750	HRA85		
背板	16MnR 钢	2.6	7800		510~660	345

2 弹道试验图像测量方法

2.1 弹着角测量^[2]

如图 2 所示, 建立直角坐标系 $OXYZ$ 。其中 XOY 平面与弹道平面重合, X 轴方向水平向右, Y 轴方向垂直向上。定义弹轴线与水平方向(X 轴)的夹角为弹着角 θ , 规定逆时针方向为正。采用边界直线法求解弹着角, 其基本思想: 首先对图像进行边缘检测, 得到弹丸的边缘点集; 然后对弹丸的上下边缘进行直线拟合, 高精度地提取出弹丸上下边缘的两条直线方程, 计算出这两条直线的中心线方程, 即为弹轴线方程; 再由弹轴线方程确定弹轴矢量, 计算弹丸的姿态角。直线提取实际上是直线方程的确定, 在图像坐标系中直线可以用下面的直线方程来描述:

$$ax + by + c = 0 \quad (1)$$

当弹丸上下边缘点提取出来后, 用最小二乘拟合的方法将这些边缘点拟合成式(1)所描述的直线方程。设有边缘点 (x_i, y_i) ($i = 0, 1, 2, \dots, n$), 直线拟合就是将这些边缘点拟合成 $f(x, y) = 0$ 的形式, 使得

$$\sum_{i=0}^n D_i^2 = 0 \quad (2)$$

其中, D_i 是边缘点 i 离拟合曲线的距离。最小二乘直线拟合就是求待定系数组 a, b, c , 使得距离平方和最小:

$$\sum_{i=0}^n (ax_i + by_i + c)^2 \quad (3)$$

由求最小值的解析条件可得直线方程。边界直线法对于弹丸已侵入靶板的情况具有较好的适应性, 图 3 给出了边界直线法的测量实例。

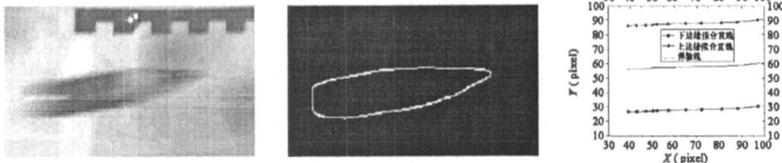


图 3 弹着角测量实例

Fig. 3 Example of measuring impact angle

2.2 弹丸运动位移测量

在高速摄像序列图像中, 弹丸的运动对应其空间位置的变化。如图 4 所示, $OXYZ$ 为弹丸心点 P 的空间位置坐标系, oxy 为图像坐标系, 即像平面。 O 与 o 之间的距离为摄像机的焦距 f , $OXYZ$ 与 oxy 互相平行。假设弹丸心点 P 在 t_1 时刻的三维空间坐标为 (X, Y, Z) , t_2 时刻的坐标为 (X', Y', Z') , t_1, t_2

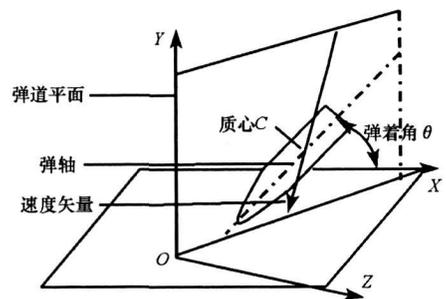


图 2 弹丸斜入射姿态示意图

Fig. 2 Pose of obliquely penetrating projectile

时刻在图像空间的坐标分别为 (x, y) 和 (x', y') , Δx 、 Δy 为 P 点在图像平面上位移量, 即

$$\Delta x = x - x', \quad \Delta y = y - y' \quad (4)$$

弹丸形心 P 从 (X, Y, Z) 运动到 $P'(X', Y', Z')$, 相应地, 其在像平面上从 $p(x, y)$ 移动到 $p'(x', y')$ 。

设 s 为弹丸在像平面的位移变化, 即

$$s = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad (5)$$

由光学几何知识可得弹丸在弹道平面内的运动位移:

$$S = \eta \times s \quad (6)$$

式中, S 为弹丸实际位移, s 为像平面内位移, 即移动的像素

数, η 为成像比例系数。由式 (6) 可知, 视场中弹道平面内任意两点间的物理距离可以通过像素坐标判读和成像比例系数 η 计算得出, 由此可得弹丸的运动位移。数字图像相关方法^[4]利用运动前后数字图像的灰度变化来测量被测目标像平面内像素位移。在运动前的图像中, 取以所求位移点 (x, y) 为中心 $(2M+1) \times (2M+1)$ 的矩形区域作为模板, 在运动后的目标图像中移动, 并按某一相关函数来进行计算, 文中选用标准化协方差相关函数, 寻找与模板的相关系数 $c(s, t)$ 为最大值以 (x', y') 为中心的 $(2M+1) \times (2M+1)$ 矩形区域以确定目标的整像素位移。图 5 给出了基于 Visual C++ 6.0 的图像灰度相关模板匹配的算法实现。

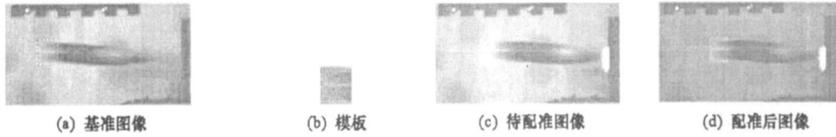


图 5 弹尾灰度相关模板匹配

Fig. 5 Projectile image template matching

2.3 背板变形测量

陶瓷复合靶板的塑性变形对射弹的侵彻效能评估具有重要意义。将过变形后背板最大挠度值点的纵向截面的外边缘曲线定义为最大挠度曲线。对背板进行变形测量, 首先对图像进行边缘检测, 再由边缘点的拟合得到背板侧边曲线。射弹作用前背板侧边边缘为一直线, 边缘点集 $S(X_i, Y_i) (i = 1, 2, \dots, n)$, 各像素点的最佳拟合直线方程为:

$$y = a + bx \quad (7)$$

射弹冲击侵彻后, 背板发生变形, 侧边边缘变为曲线。同样可由边缘检测所得的像素点拟合变形后背板的侧边边缘曲线。设曲线 C 的参数方程为 $x = \phi(t)$, $y = \varphi(t)$, $\alpha \leq t \leq \beta$, 其中 $\phi(t)$ 、 $\varphi(t)$ 具有连续导数。对于任意曲线 C , 没有既定的曲线方程, 这里采用边缘点集和抛物线样条函数来拟合任意曲线的方程。抛物线的表达式写成如下的一般形式:

$$P(t) = a_1 + a_2 t + a_3 t^2 \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (8)$$

采用 Canny 边缘检测^[5]提取背板侧边边缘, 见图

6, 然后由边缘像素点集拟合得到边缘曲线, 再计算背板的变形挠度。

3 仿真验证及误差分析

利用 LS-DYNA3D 大型非线性有限元程序进行了仿真试验。图 7 为弹着角测量仿真试验图像, 图 8 为半穿甲弹侵彻陶瓷/钢复合装甲仿真试验截图。分别对弹着角、弹尾位移、背板变形挠度进行了图像测量。测量结果与 LS-DYNA3D 中已知真值进行对比, 以验证图像测量方法的可行性与准确性。

表 2 给出了弹着角测量值 θ 与仿真值 θ_0 的对比结果。弹着角仿真验证共测量了 10 帧图像, 并对测量误差进行了统计分析, 角度误差平均值为 0.0292° , 均方差为 0.0384° 。

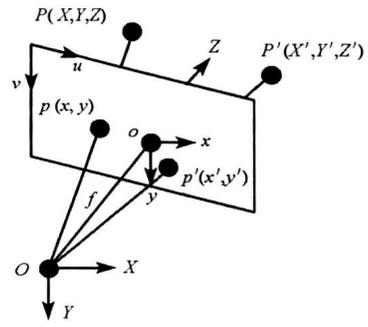


图 4 弹丸位移测量原理图

Fig. 4 Projectile displacement measurement principle

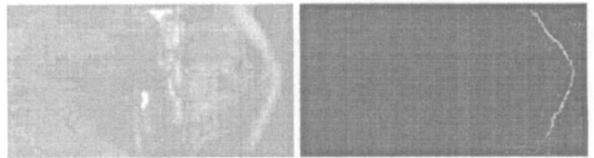


图 6 边缘检测提取背板侧边曲线

Fig. 6 Edge detection of backplate curve

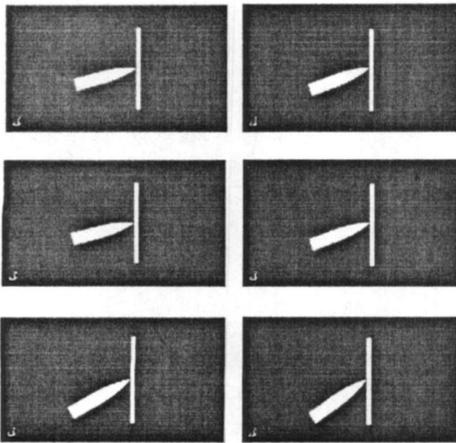


图7 弹着角测量仿真试验截图图
Fig.7 Simulation experiment images

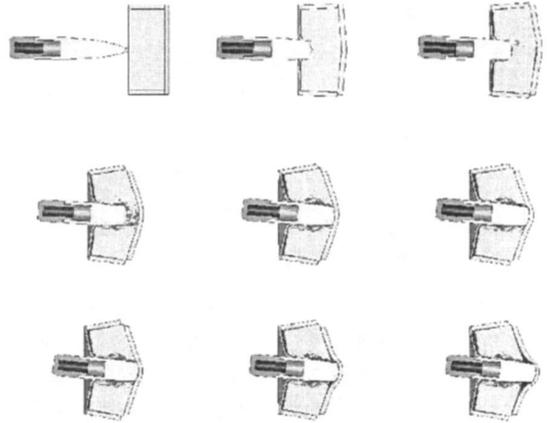


图8 半穿甲弹侵彻陶瓷复合靶仿真试验截图图
Fig.8 Simulation experiment of semi-AP penetration

表2 弹着角测量结果精度对比

Tab.2 Measurement results precision

单位: (°)

序号	仿真值	测量值	误差
1	5.125	5.152	0.027
2	10.352	10.338	-0.014
3	15.460	15.486	0.026
4	25.726	25.731	0.005
5	30.308	30.289	-0.019
6	32.384	32.485	0.101
7	35.549	35.565	0.016
8	38.221	38.292	0.071
9	40.754	40.769	0.015
10	42.457	42.521	0.064

图9、图10分别给出了弹尾位移、背板变形挠度测量结果与仿真值的对比。

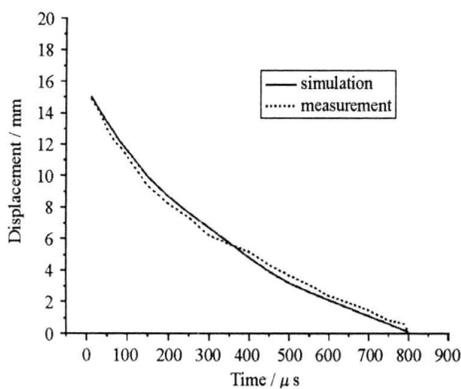


图9 位移测量值与仿真值拟合曲线
Fig.9 Displacement measurement results and simulation fitting curve

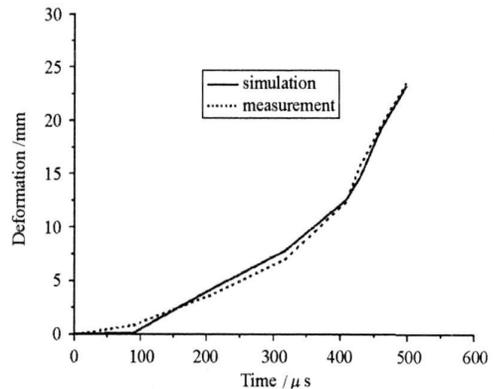


图10 背板变形测量值与仿真值拟合曲线
Fig.10 Backplate deformation measurement results and simulation fitting curve

由图可得, 弹尾位移及背板变形挠度测量结果都与仿真标准值吻合较好。误差主要来源于两个方面: 一是图像预处理并不能完全消除噪声等干扰因素, 影响弹丸目标检测及边缘提取效果; 二是图像测量算法存在一定的精度误差。

4 弹道试验结果及分析

4.1 试验结果

采用 Motion Central HG-100K 高速摄像机进行拍摄记录, 帧频为 10^5 fps, 图像分辨率为 $252\text{pixel} \times 144\text{pixel}$ 。利用图像处理对高速摄像序列图像进行了测量分析, 试验结果见表 3, V_0 、 θ 、 T 、 W 分别为入射速度、弹着角、侵靶时间、背板侧边变形挠度。

表 3 30mm 半穿甲弹斜侵彻陶瓷/钢复合装甲试验结果

Tab. 3 Experiment results of penetration

序号	V_0 (m/s)	θ ($^\circ$)	T (μ s)	W (mm)
1	343	8.213	754	4.36
2	346	0.978	649	5.89
3	346	1.892	675	5.35
4	449	1.231	521	47.88
5	449	5.192	594	24.81
6	449	2.877	562	33.49
7	452	3.634	570	47.53

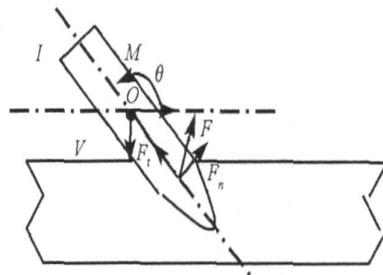


图 11 半穿甲弹斜侵彻受力示意图

Fig. 11 Sem-AP obliquely penetrating force

4.2 弹着角效应分析

弹丸斜入射陶瓷/金属复合靶板时, 其受力可分解为垂直弹丸初始轴线和沿弹丸初始轴线方向的力, 见图 11。30mm 半穿甲弹以弹着角 θ 碰撞靶板后, 质心速度方向发生改变, 速度方向与轴线不重合导致弹丸在侵彻过程中受不对称阻力。轴向力 F_n 使弹丸减速, 其中侧向力 F_t 及力矩 M 使弹丸不断偏转。图 12、13 分别给出了 30mm 半穿甲弹在相同入射速度条件下 ($V_0 = 449\text{m/s}$), 侵靶时间、侵彻路径与弹着角的关系曲线。

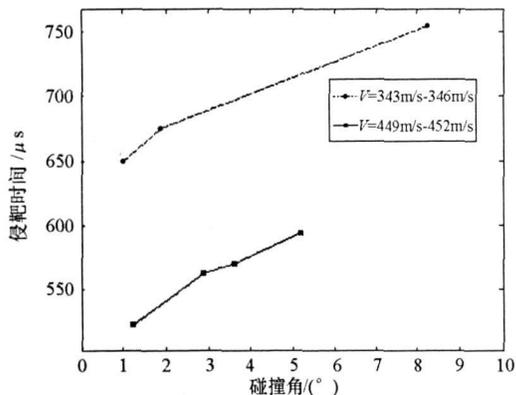


图 12 侵靶时间与弹着角关系曲线

Fig. 12 Penetrating time and impact angle

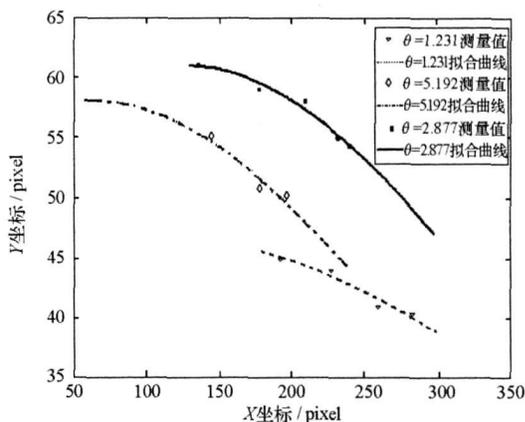


图 13 弹尾运动轨迹拟合曲线

Fig. 13 Projectile movement track fitting curve

5 结论

(1) 弹着角对半穿甲弹的侵彻效能有较明显的影响。同一速度条件下(背板未击穿), 背板的变形挠度随着弹着角的增大而减小, 半穿甲弹侵彻效能降低。(2) 同一速度条件下, 侵靶时间随着弹着角的增大而延长。(3) 半穿甲弹斜侵彻靶板时受不对称力作用, 在侵彻过程中不断偏转, 反映在弹丸侵彻路径上, 表现为弹尾运动轨迹呈曲线, 且弹着角越大, 弹丸偏转剧增, 弹尾轨迹曲率增大。

参考文献:

- [1] Goldsmith W. Non-ideal Projectile Impact on Targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 1999, 22(2): 95-395.
- [2] 于起峰, 孙祥一. 用光测图像确定空间目标俯仰角和偏航角的中轴线法[J]. 国防科技大学学报, 2000, 22(2): 15-19.
- [3] 王建军, 苏增立. 火箭弹离轨参数测量中图像处理[J]. 光学精密工程, 2004, 12(4): 212-214.
- [4] 于起峰. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [5] Bao P, Zhang L, Wu X. Canny Edge Detection Enhancement by Scale Multiplication[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(9): 1485-1490.