

弹丸侵彻高强度混凝土的高速摄影试验研究

吝曼卿¹, 夏元友¹, 肖正学², 王智德¹, 陈少炎¹, 李复庭³

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070; 2. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010;

3. 武汉建工股份有限公司, 武汉 430023)

摘要: 采用高速摄影仪, 拍摄轻气炮中弹丸对侵彻面不同侵角的高强度混凝土靶体的侵彻过程, 分析靶体侵角、弹丸着靶速度对弹丸侵彻靶体的运动特征。研究表明, 弹丸以 200 m/s 左右的低速侵彻靶体时, 弹丸在侵彻角度为 0°的靶体中作水平运动, 靶体侵角大于 0°时, 弹丸均在着靶后 150~200 μ s 发生偏转; 弹丸在靶体中的水平侵彻速度、偏转角度与其侵彻时间有很好的相关性, 靶体侵角一定时, 弹丸着靶速度越小, 弹丸水平侵彻时所需时间越短, 靶体飞溅物的速度越小; 靶体侵彻面角度对靶体飞溅物速度和弹丸水平侵彻时间的影响作用相对比弹丸着靶速度的大, 说明靶体侵角的大小是安全防护工事中不可忽视的重要问题。

关键词: 弹丸; 着靶速度; 侵彻; 高速摄影; 运动特征

中国分类号: TU45

文献标识码: A

Experimental investigation of projectile penetrating high strength concrete target with high-speed photography

LIN Man-qing¹, XIA Yuan-you¹, XIAO Zheng-xue², WANG Zhi-de¹, CHEN Shao-yan¹, LI Fu-ting³

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, China; 3. Wuhan Construction Engineering (Group) Co., Ltd, Wuhan 430023, China)

Abstract: Penetration process of projectile penetrating high strength concrete target with different penetrating angles is captured in the light gas gun by using the high-speed photography. And the motion feature of projectile affected by the penetrating angle and penetrating velocity is analyzed. The result shows that projectile has a horizontal movement as the striking angle is 0 degree, while it deflected after 150-200 μ s as the striking angle of target more than 0 degree and the projectile in a lower penetration velocity around 200 m/s. There is a positive correlation between the level penetrating velocity, deflection angle and its time. The penetrating time of projectile in horizontal movement and the spatter velocity decreased mainly affected by the decrease of penetrating velocity of projectile at a certain penetrating angle. The influence of penetrating angle on spatter velocity and projectile horizontal penetration time is relatively larger than that of the penetrating velocity of projectile. It is proved that the size of penetrating angle is important and unavoidable in security protection fornications.

Key words: projectile; penetrating velocity; penetration; high-speed photography; motion feature

1 引言

受现代战争的影响, 大多数具有战略价值的目标均修筑有坚固的高强度混凝土的防护工事^[1], 如何提高混凝土防护工事中在钻地武器侵彻作用下的抗侵彻能力, 是安全防护工程领域中重点研究的方向^[2]。目前, 国内外已对弹丸侵彻混凝土靶体方面的研究作了很多工作^[3-5], 但都着重对弹丸侵彻深度和靶体破坏程度进行研究, 而对弹丸侵彻靶体的

运动特征研究甚少, 尤其是弹丸在空中飞行过程中, 因受到重力、空气阻力或靶体不稳定等现象, 不可避免地会形成斜着靶状态。因此, 清楚地了解弹丸在不同侵彻角度下的侵彻运动过程, 对合理设计防护工事有着重要的参考价值。

在侵彻试验过程中, 各个观测对象的运动速度是十分重要的参数。高速摄影是研究高速运动过程的一种行之有效的办法, 它与一般摄影最根本的区别在于具有很高的时间分辨本领, 能跟踪快速变化

过程的发生和发展,并记录下来,从而为高速动态实验提供丰富的试验信息^[6-7],不仅能测量出弹丸着靶前的飞行速度,还能测量出弹丸在侵彻过程中的速度变化、弹丸在侵彻过程中发生的偏转角度和靶体飞溅物速度的变化过程。马爱娥等^[8]利用轻气炮进行弹丸斜侵彻钢筋混凝土的实验时,通过高速摄影系统及靶前镜面反射装置记录弹丸着靶前飞行姿态,得到了弹丸对钢筋混凝土靶体的斜侵彻破坏效应、弹道轨迹、弹丸侵彻深度、开坑直径等参数。

本次采用高速摄影仪拍摄在一级轻气炮中弹丸对侵彻面不同侵角的高强度混凝土靶体的侵彻过程,通过捕捉弹丸在侵彻过程中的速度变化、姿态变化和靶体的飞溅物情况,结合靶体在侵彻后的破坏状态,对比分析靶体侵彻面的侵角、弹丸着靶速度不同情况下弹丸在靶体中的运动特征规律,对研究弹丸侵彻高强度混凝土有很大的现实和军事意义。

2 试验装置与方法

2.1 试验装置

弹丸头部呈卵形(弹形系数 $CRH = 3$),弹长 120 mm,直径 $\phi 20$ mm,其材料选用 45#钢,热处理后屈服强度不小于 355 MPa,重约 0.250 kg。为保证弹丸在轻气炮内射弹定心和闭气效果,将弹丸安放在弹托上。弹托为高压聚乙烯材料制成的圆柱体,弹托长 70 mm,外径 $\phi 57$ mm。弹托中心有一深度 50 mm,内径约 $\phi 22$ mm 的圆形孔洞,如图 1 所示。

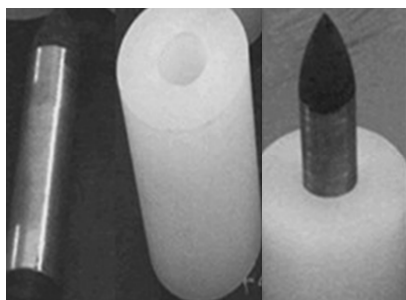


图 1 弹丸与弹托

Fig.1 Projectile and sabot

靶体选用混凝土材料,原材料配合比表 1,试件在实验室经标准养护 28 d 后,测试平均单轴抗压强度为 76.6 MPa。由于弹丸在轻气炮中的加载运动轨迹恒定,试验通过改变靶体侵彻面的不同倾角以达到弹丸对靶体进行斜侵彻的效果。靶体侵彻面有 0° 、 10° 和 20° 三种不同倾角,具体尺寸见表 2。

表 1 混凝土试件配合比

Table 1 Mix proportion of concrete specimen (kg/m³)

水泥	水	砂	卵石	减水剂	硅粉
550	137.5	575	1120	2.375	45

表 2 6 次侵彻试验相关参数

Table 2 Parameters of the six penetration experiments

序号	靶体			着靶速度/(m/s)	成坑/mm		残孔深度/mm	侵彻深度/mm
	高度/mm	直径/mm	侵角/ $^\circ$		直径	深度		
试验 I	600	590	0	224	243	35	24	59
试验 II	584	600	0	216	213	22	31	53
试验 III	482~582	590	10	231	234	41	14	55
试验 IV	429~536	600	10	213	201	41	11	52
试验 V	355~572	600	20	242	194	41	7	48
试验 VI	430~641	590	20	181	152	42		42

采用 Ultima APX—RS 型数字式高速彩色摄影机拍摄弹丸的侵彻过程。该机运用 Photron 领先的 CMOS 传感器技术,感光度、分辨率高^[9],且具有“重点关注区域”的功能;采用电子快门,最快可达 1 μ s,有利于消除动态像移,获得清晰的图像,且该机具有适应性强的同步装置,能方便地与轻气炮的电测系统同步,在常用幅频条件下有 2~6 s 的时间记录范围,适应于冲击实验需要记录时间较长的特点,能方便地观测弹丸着靶前的飞行姿态、着靶后的侵彻过程以及靶体的飞溅情况^[10]。

2.2 试验方法

试验采用某炮管直径为 57 mm 的一级轻气炮作为弹丸侵彻靶体的加载装置,将靶室的观测窗之一安装防弹玻璃作为高速摄影窗,为防止弹丸侵彻靶体所产生的混凝土飞溅物或弹丸对靶室造成破坏,甚至威胁到实验人员和高速摄影机的安全,将靶室内的靶体侵彻面向下,用弧形钢板紧箍靶体侧面。同时,高速摄影机通过实验室自制潜望镜进行拍摄,潜望镜由一段直径 $\phi 110$ mm,长 700 mm 的 PVC-U 管和安装镜片的 2 段弯头装配制成。由于摄影机镜头距靶体中心线的垂直距离仅 1 m,观测范围较小,摄影机配置直径为 70 mm 的微距镜头,进光量调为最大;根据弹丸速度、光源强度、记录时长等条件,设置拍摄速度为 $3\,000\text{ s}^{-1}$ (每秒传输 3 000 帧),每幅时间间隔 33 μ s,分辨率为 256×256 像素,预拍摄时长为拍摄时长的 $1/3$ ^[11-12]。

试验光路采用后照明技术,即将 1 000 W 无频卤钨灯紧靠在靶体表面,照射方向与靶体侵彻面平行,光路由光源经碰靶位置、摄影窗、潜望镜至摄影机镜头。实验时,轻气炮气室中的高压气体突然

释放,推动弹托及装配在弹托上的弹丸在真空炮管内高速运动,直至弹丸侵彻靶体并完成侵彻过程。为提高试验的精确性,试验中使用同步设备进行控制,以保证弹丸侵彻靶体瞬间,高速摄影仪正常启动并拍摄到试验所需的全过程,并用笔记本电脑记录和显示拍摄图像信息。试验系统如图 2 所示。

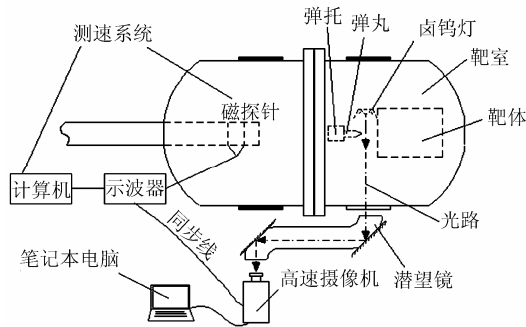


图 2 试验系统示意图

Fig.2 Sketch of experimental system

3 试验结果

3.1 宏观观测结果

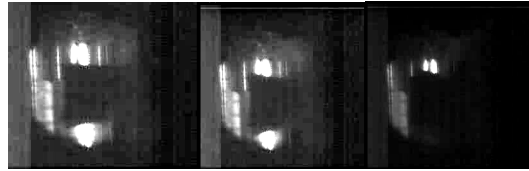
试验通过不同的弹丸着靶速度,对侵彻角度分别为 0° 、 10° 和 20° 的靶体进行侵彻,对试验后的弹丸和靶体进行宏观观测并发现,弹丸仅对靶体侵彻面形成宏观破坏,破坏呈漏斗状,靶体侵彻背面和侧面无任何变化。弹丸头部仅呈现少许摩擦痕迹,弹体未变形。用轻气炮磁探针测速系统测出试验中的着靶速度,相关参数见表 2,由表可见,当靶体侵彻角度一定时,弹丸着靶速度越大,靶体上形成的成坑直径和侵彻深度相对越大^[13]。

3.2 高速摄影结果

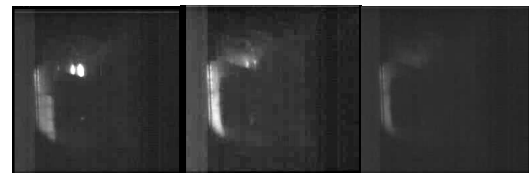
经过 6 次弹丸侵彻靶体的高速摄影试验,均取得较好的高速摄影效果。根据试验分析的需要,截取了拍摄范围内弹丸在靶体中侵彻过程的部分照片,且拟定弹丸着靶瞬间的 1 幅照片作为弹丸侵彻靶体的 0 时刻。照片中的两条明亮的光线均为卤钨灯丝的亮光。由于轻气炮的炮管口距靶体侵彻面距离很短,仅 1 m,使得弹丸在着靶前的初始航偏角极小,可忽略不计,故高速摄影拍摄出弹丸在着靶前的弹姿为水平状态。试验 I 和试验 VI 的部分高速摄影照片,如图 3 所示。由图 3(1)可见,弹丸对侵彻面侵角为 0° 的靶体进行侵彻时,弹姿均保持水平状态。图 3(2)中,弹丸对侵彻面角度为 20° 的靶体进行侵彻时,弹姿在侵彻初期保持水平状态,而在着靶后 $600 \mu\text{s}$ 出现明显的偏转。这是因为靶体侵



(a) $0 \mu\text{s}$ (b) $133 \mu\text{s}$ (c) $200 \mu\text{s}$



(d) $333 \mu\text{s}$ (e) $400 \mu\text{s}$ (f) $533 \mu\text{s}$



(g) $600 \mu\text{s}$ (h) $733 \mu\text{s}$ (i) $800 \mu\text{s}$

(1) 试验 I 的高速摄影照片



(a) $0 \mu\text{s}$ (b) $66 \mu\text{s}$ (c) $133 \mu\text{s}$



(d) $200 \mu\text{s}$ (e) $266 \mu\text{s}$ (f) $333 \mu\text{s}$



(g) $400 \mu\text{s}$ (h) $466 \mu\text{s}$ (i) $533 \mu\text{s}$



(j) $600 \mu\text{s}$ (k) $666 \mu\text{s}$ (l) $733 \mu\text{s}$

(2) 试验 VI 的高速摄影照片

图 3 不同时刻的高速摄影照片

Fig.3 High-speed photography in different times

面侵角为 0° 时,弹丸在侵彻过程中受到靶体均匀的阻力作用,不会影响弹丸在侵彻运动中发生偏转。

而靶体侵彻角度大于 0° 时, 由于弹丸着靶速度大, 弹丸在着靶瞬间的动能大, 使得弹头在着靶初期受到不均匀阻力产生的偏转现象不明显, 进而表现出水平侵彻状态。当弹丸侵彻速度减小到一定值时, 弹丸因受到靶体的不均匀阻力影响而出现明显的偏转现象。

图 3(1)中, 弹托在着靶后 $200\ \mu\text{s}$ 有明显的分离现象, 图 3(2)中, 弹托在着靶后 $333\ \mu\text{s}$ 也有明显地弹托分离现象, 且随着弹丸侵彻时间的增加, 弹托分离现象越明显。从图 3 可见, 弹丸从着靶到完成侵彻的整个过程中, 弹丸着靶处会随着弹丸的侵彻不断喷射出粉状的飞溅物, 最终飞溅物弥漫整个靶室, 使靶室变暗, 其中, 当靶体侵彻角大于 0° 时, 靶体飞溅物主要集中在弹丸下方。此外, 由图可见, 弹丸均在靶体侵彻面附近进行侵彻运动, 这与靶体的宏观观测结果中弹丸成坑深度较浅的测试结果相吻合。产生该现象的原因可能与靶体强度过高, 而弹丸的着靶速度相对较低有关。

综上, 高速摄影能较清晰地捕捉到弹丸侵彻混凝土靶体的全部过程, 包括靶体飞溅物的喷射情况, 弹丸在侵彻靶体过程中的位移变化和姿态变化过程。

4 试验结果分析

4.1 分析方法

由前分析可知, 靶体侵彻倾角为 0° 时, 弹丸在靶体中作水平运动; 靶体侵彻倾角大于 0° 时, 弹丸在靶体中逐渐产生偏转运动。为分析着靶速度和靶体侵角对弹丸侵彻过程的影响, 很有必要对弹丸在侵彻过程中的水平运动速度变化和偏转角度变化进行分析。

利用高速摄影的速度 v 计算式^[7]对所拍摄的 6 组试验高速摄影照片进行进一步分析。

$$v = Sf / n \quad (1)$$

式中: n 为与运动距离相对应的照片幅数; f 为高速摄影拍摄频率; S 为照片拍摄时间内弹丸或飞溅物运动距离。

图 4 为相邻照片的弹丸裁剪到一张图片上的效果, 利用靶室内无频卤钨灯的灯丝位置和弹丸上的标尺作为参考点, 可以计算出弹丸在一定时间内水平运动的距离 ΔS 。

4.2 弹丸侵彻过程中水平运动的影响分析

表 3 为弹丸水平运动速度随侵彻时间的测量结果, 侵彻时间为 $0\ \mu\text{s}$ 时对应的速度为弹丸着靶速度。结合表 1 中的着靶速度可知, 对于同一侵彻试

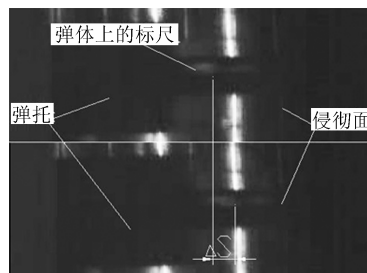


图 4 弹丸水平运动距离的判断示意图
Fig.4 Judging sketch of projectile horizontal displacement distance

验, 通过高速摄影所测得的弹丸着靶速度与磁探针测速系统所测得的速度值存在差异, 其中相差最大的是试验 I 的着靶速度, 表 2 中磁探针测出速度为 $224\ \text{m/s}$, 而高速摄影测出速度为 $240\ \text{m/s}$, 相差 $16\ \text{m/s}$, 存在 6.67% 的相对误差, 经分析, 引起该误差的原因可能是试验读数时不可避免的人为误差造成。

表 3 弹丸水平运动速度测量结果
Table 3 Measured results of level velocities of projectile in penetration process

T $/\mu\text{s}$	不同试验运动速度水平/(m/s)					
	I	II	III	IV	V	VI
0	240	220	231	220	250	181
33	240	160	231	220	199	140
66	220	120	200	160	180	60
99	200	80	154	154	160	15
132	120	0	121	66	64	
165	90		80	22		
198	60					
231	20					
264	0					

表 3 显见, 弹丸在靶体中的侵彻速度随侵彻时间的增加不断降低。靶体侵彻角度为 0° 时, 弹丸着靶速度从 $220\ \text{m/s}$ 增加到 $240\ \text{m/s}$ 时, 弹丸水平运动所需时间由 $132\ \mu\text{s}$ 增加到 $264\ \mu\text{s}$, 可知靶体侵角为 0° 时, 每增加单位着靶速度, 弹丸在靶体中水平侵彻所需时间增加 $6.6\ \mu\text{s}$ 。同理, 靶体侵彻角度为 10° 和 20° 时, 每增加单位着靶速度, 弹丸在靶体中水平侵彻所需时间增加 $0.9\ \mu\text{s}$ 和 $0.47\ \mu\text{s}$, 说明弹丸以 $200\ \text{m/s}$ 左右的低速侵彻靶体时, 随着靶体侵彻角度的增加, 弹丸着靶速度对其在靶体中水平运动所需时间的影响逐渐减小, 即靶体侵彻角度对弹丸在侵彻过程中水平运动的影响作用越来越大。

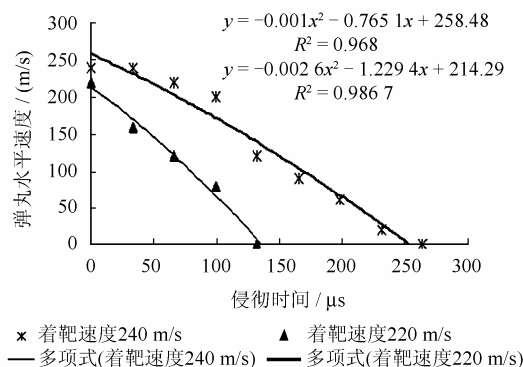
将表 3 中的弹丸水平速度与侵彻时间作回归分析, 如图 5 所示。从图可见, 弹丸水平侵彻速度与其侵彻时间有很好的相关性, 相关性系数均在 0.93

以上,即弹丸水平侵彻速度与其侵彻时间相关的基本方程关系式为

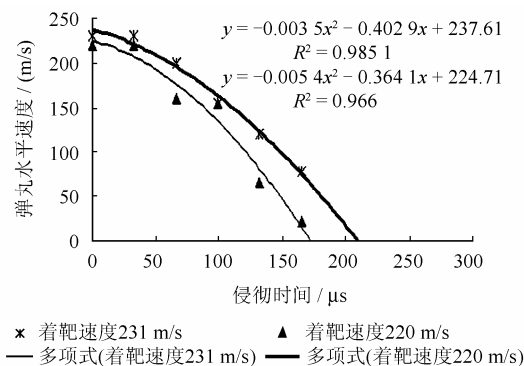
$$y = ax^2 + bx + c \quad (2)$$

式中: y 为弹丸水平侵彻速度(m/s); x 为弹丸在靶体中的侵彻时间(μs); a 、 b 分别为与靶体侵彻角及靶体强度参数相关的系数; c 为弹丸着靶速度(m/s)。

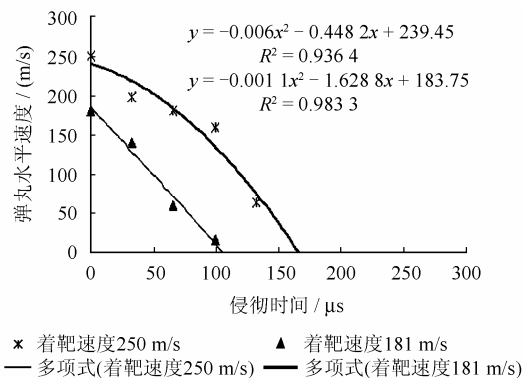
从图 5 亦见,当靶体侵角一定时,弹丸着靶速度越小,弹丸在靶体中的侵彻速度降低的越快,弹丸水平侵彻时所需时间越短。弹丸着靶速度一定时,靶体侵彻角度越大,弹丸水平侵彻所需时间相对越短。



(a) 侵彻角为 0°



(b) 侵彻角为 10°



(c) 侵彻角为 20°

图 5 弹丸着靶速度与侵彻时间关系曲线

Fig.5 Relation curves of projectile between penetration speed and time

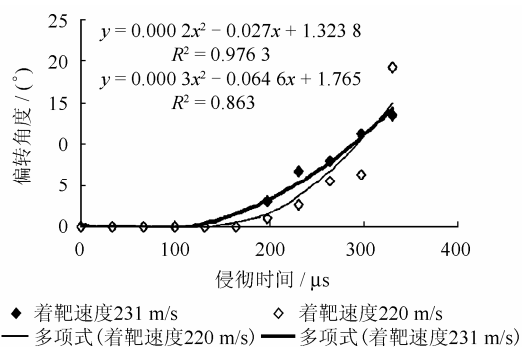
4.3 弹丸侵彻过程中偏转运动过程的影响分析

表 4 为弹丸偏转角度随侵彻时间的测量结果,根据表 4 绘制出弹丸偏转角度与侵彻时间的关系曲线,如图 6 所示。

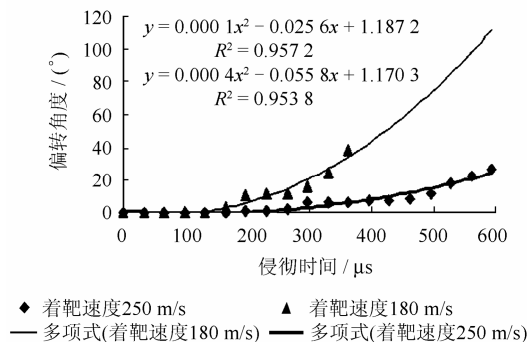
表 4 弹丸在侵彻过程中的偏转角度测量结果

Table 4 Measured results of deflection angles of projectile in penetration process

T / μs	不同试验的偏转角 / ($^\circ$)					
	I	II	III	IV	V	VI
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
33	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
66	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
99	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
132	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
165	0.0		0.0	0.0	0.0	2.7
198	0.0		3.0	1.0	1.4	10.2
231	0.0		6.8	2.7	1.5	11.8
264			7.9	5.5	2.0	12.1
297			11.3	6.4	5.9	16.2
330			13.6	19.2	6.0	24.4
363					6.5	39.0
396					7.0	
429					7.8	
462					8.7	
495					12.3	
528					18.4	
561					22.5	
594					26.6	



(a) 侵彻角为 10°



(b) 侵彻角为 20°

图 6 弹丸偏转角度与侵彻时间的关系曲线

Fig.6 Relation curves of projectile between deflection angles and penetrating time

从图 6 可见, 弹丸均在着靶后 $150 \sim 200 \mu\text{s}$ 发生偏转。弹丸偏转与其侵彻时间均有很好的相关性, 弹丸偏转角度与其侵彻时间也满足二次多项式的基本方程关系。

对比图 6(a)和图 6(b)可知, 在相同侵彻角度下, 弹丸着靶速度越高, 弹丸在靶体中偏转所需的时间越长, 弹丸着靶速度越低, 弹丸在靶体中偏转的越快。由图 6(b)可见, 弹丸对侵彻面为 20° 的靶体以着靶速度为 180 m/s 进行侵彻时, 弹丸在靶体中进行极速偏转, 当侵彻时间为 $330 \mu\text{s}$ 时, 弹丸偏转角已达 24.4° 。结合表 2 可知, 试验 VI 中弹丸未在靶体侵彻面上留下残孔, 仅出现一浅坑, 此时弹丸已跳弹, 说明当靶体侵彻角度增加到一定程度时, 弹丸着靶速度越低, 其在靶体中偏转的越快, 发生跳弹的可能越大。

4.4 弹丸侵彻过程的飞溅物速度分析

弹丸着靶时, 会在靶体着靶点附件产生一定的飞溅物, 图 7 为 6 组实验条件下产生飞溅物的最大速度 (简称飞溅物速度) 与对应着靶速度的关系曲线图。

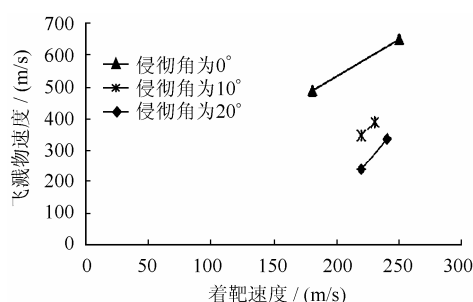


图 7 飞溅物速度与侵彻速度的关系曲线
Fig.7 Relation curves between spatter velocity and penetration velocity

从图 7 可见, 当靶体侵彻角一定时, 随着弹丸着靶速度的增加, 弹丸着靶产生飞溅物速度越大。当靶体侵角为 20° , 弹丸以 180 m/s 侵彻靶体所产生的飞溅物速度为 486 m/s , 大于靶体侵角为 0° 和 10° 时产生的飞溅物速度, 说明靶体侵彻角对飞溅物速度的影响因子相对比弹丸着靶速度的大, 亦进一步说明在弹丸侵彻靶体的过程中, 靶体侵彻角的大小是安全防护工事中不可忽视的重点问题。

5 结 论

(1) 高速摄影能清晰地捕捉弹丸侵彻靶体的全部过程, 包括靶体飞溅物的喷射情况, 弹丸的位

移变化和姿态变化过程。通过高速摄影所测得的弹丸着靶速度, 与磁探针测速系统所测得速度值的相对误差不超过 6.67% 。

(2) 弹丸以 200 m/s 左右的低速侵彻靶体时, 弹丸在着靶后 $150 \sim 200 \mu\text{s}$ 发生偏转, 靶体侵彻角越大, 对弹丸水平运动的影响作用越大。靶体侵彻角一定时, 弹丸着靶速度越小, 弹丸在靶体中的侵彻速度降低越快, 此时靶体的飞溅物速度随弹丸着靶速度的降低而减小。靶体侵彻角对飞溅速度的影响作用相对比弹丸着靶速度的大。

(3) 弹丸水平侵彻速度、偏转角度与其侵彻时间有很好的相关性, 其相关方程均满足二次多行式。

以上结论是在本次室内试验条件下得出的, 对弹丸侵彻高强度混凝土的防护工程有一定的参考价值, 为弹丸着靶速度和靶体侵角对弹丸在侵彻过程中的运动特征规律的研究提供了基础数据。

参 考 文 献

- [1] 梁斌. 弹丸对有界混凝土靶的侵彻研究[硕士论文 D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2004.
- [2] 栾广博, 葛修润, 李春光, 等. 基于 Forrestal 侵彻试验的数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊): 271—275.
LUAN Guang-bo, GE Xiu-run, LI Chun-guang, et al. Study of numerical simulation based on penetration experiments of Forrestal[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(Supp.): 271—275.
- [3] IQM, REI S R, WEN H M, et al. Local impact effects of hard missiles on concrete targets[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 32(1-4): 224—284.
- [4] 徐建波, 林俊德, 唐润棣, 等. 长杆射弹侵彻钢筋混凝土实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2002, 4(2): 174—178.
XU Jian-bo, LIN Jun-de, TANG Run-di, et al. The penetration of steel bar projectiles into concrete targets[J]. *Chinese Journal of Explosion and Shock Waves*, 2002, 22(2): 174—178.
- [5] WESLEY D B. Taylor impact test and penetration of

- reinforced-concrete targets by cylindrical composite rods[D]. Blacksby: The Faculty of the Virginia Polytechnic Institute, 2004.
- [6] 唐孝容, 高宁 郝建中, 等. 高速摄影技术在常规战斗部实验中的应用[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(3): 105—107.
- TANG Xiao-rong, GAO Ning, HAO Jian-zhong, et al. Application of high-speed photography to experiment of warhead[J]. **Chinese Journal of Projectile, Rockets, Missiles and Guidance**, 2010, 30(3): 105—107.
- [7] 高航, 张继春, 肖正学, 等. 利用轻气炮进行侵彻试验的高速摄影法探索[J]. 弹道学报, 2011, 23(1): 75—79.
- GAO Hang, ZHANG Ji-chun, XIAO Zheng-xue, et al. Research on projectile impacting target by means of light-gas gun with- speed photography[J]. **Chinese Journal of Ballistics**, 2011, 23(1): 75—79.
- [8] 马爱娥, 黄风雷. 弹丸斜侵彻钢筋混凝土的实验研究[J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(6): 482—486.
- MA Ai-e, HUANG Feng-lei. Experimental research on oblique penetration into reinforced concrete[J]. **Transaction of Being Institute of Technology**, 2007, 27(6): 482—486.
- [9] 肖定军, 郭学彬, 刘凯德, 等. 爆破作用下岩体层间充填土运动的高速摄影试验[J]. 西南科技大学, 2008, 27(3): 33—37.
- XIAO Ding-jun, GUO Xue-bin, LIU Kai-de, et al. High-speed photography test on the motion of interlayer fill soil of rock mass under the action of blasting[J]. **Chinese Journal of Southwest University of Science and Technology**, 2008, 27(3): 33—37.
- [10] 赵继波, 文尚刚, 谭多望, 等. APX-RS 相机在高速摄影中的应用[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(1): 90—94.
- ZHAO Ji-bo, WEN Sang-gang, TAN Duo-wang, et al. Application of APX-RS digital camera to high-speed photography[J]. **Chinese Journal of Explosion and Shock Waves**, 2009, 29(1): 90—94.
- [11] 谭显详, 韩立石. 高速摄影技术[M]. 北京: 原子能出版社, 1990: 2—5.
- [12] PHOTRON. FASTCAM-APX RS hardware manual[M]. San Diego, USA: Photons, 2004.
- [13] LIN M Q, XIA Y Y, XIAO Z Z, et al. Damage experiment of projectile penetration into high- strength concrete[C]// Proceedings of the 2nd ISRM International Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics. Beijing: [s. n.], 2012.