DOI: 10.11883/1001-1455(2017)03-0536-08

弹体斜侵彻混凝土靶的实验研究及其数值模拟*

薛建锋,沈培辉,王晓鸣
(南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室,江苏 南京 210094)

摘要: 以弹体斜侵彻混凝土的弹道特性为研究内容,通过侵彻实验与数值模拟得到了不同速度下的侵彻深度、开坑尺寸、偏转角等参数,实验结果与模拟结果吻合较好。研究结果表明:倾角对开坑深度和开坑形状影响很大;倾角越大,对侵彻深度和偏转角的影响越明显,弹体偏转角随着速度的增大呈现减小的趋势;当倾角增至一定角度后发生跳弹现象,据此得到跳弹极限角与倾角、侵彻速度的关系。

关键词: 弹体;斜侵彻;混凝土靶;弹道特性;偏转角
中图分类号: O385 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

长期以来,各国武器研发人员一直着力于混凝土类硬目标的侵彻效应研究。美国在混凝土靶的侵彻研究方面起步较早,陆续有相关文献发表[1-7]。中国学者对弹体斜侵彻混凝土的研究也进行了大量的探讨[8-10]。武海军等[11]、马爱娥等[12]、吕中杰等[13]和王可慧等[14]进行了弹体斜侵彻混凝土靶的实验,得到了弹体对混凝土靶的斜侵彻破坏效应及弹道特性等参数。从斜侵彻实验中发现弹体发生一定程度的偏转甚至跳弹,因此研究弹体斜侵彻混凝土时弹道偏转是有必要的。在斜侵彻研究中弹道偏转的概念已基本明确,但相关的实验研究仍有待深入。本文就倾角和速度两方面对弹道偏转的影响进行研究。首先利用 25 mm 滑膛炮对半无限混凝土靶进行不同倾角的侵彻实验,得到不同工况弹体的弹道轨迹和混凝土靶的破坏效应,结合数值模拟结果对斜侵彻弹道轨迹进行定量分析,最后得到速度和倾角对弹道偏转的影响规律。

1 斜侵彻混凝土实验

1.1 实验方法及材料

以滑膛炮作为发射设备进行斜侵彻混凝土实验,炮口到混凝土靶距离为 10 m,实验现场布置如图 1 所示。



图 1 实验现场示意图
Fig. 1 Schematic diagram of experiment set



图 2 弹体和混凝土靶
Fig. 2 Projectiles and concrete

实验弹体直径为 10 mm,弹长为 70 mm,CRH(弹体头部曲率半径与弹体直径之比)为 4,质量为 80 g。弹体材料采用高强度钢35CrMnsiA,淬火后硬度 HRC 为 45,弹体实物见图 2。实验用的混凝土靶为 C40 混凝土靶,整个混凝土靶为圆柱形,参照钻地弹侵彻混凝土靶实验研究中采用的靶板设计标

* **收稿日期**: 2015-11-05; **修回日期**: 2016-01-20
基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(61314302)
第一作者: 薛建锋(1987—),男,讲师;**通信作者**: 沈培辉,sphjy8@mail.njust.edu.cn。

准：靶板直径取弹径的 30 倍以上，此时可忽略靶板的边界效应。考虑射击精度弹着点与边界最小距离满足上述要求，将实验靶体的直径扩大为 800 mm。为了方便浇注混凝土靶且保证侵彻后靶体的完整性，靶板外围采用 3 mm 厚的钢圈加固。养护后的靶体经过静态力学性能测试，混凝土靶的平均抗压强度为 37.2 MPa，混凝土实物如图 2 所示。

1.2　实验结果

实验中弹体速度为 805～1 222 m/s。实验后的弹体保持完整，弹体没有明显的变形。图 3 为实验后的混凝土靶典型破坏情况，在倾角较小时混凝土靶面开坑区近似圆形，形成了相对于着靶点近似对称的开坑区，混凝土靶正面无明显径向裂纹延伸到靶板边缘，说明边界效应可以忽略且符合半无限靶条件，实验数据真实可信。实验结果见表 1，表 1 中参量意义如图 3 所示，v 为速度，β 为倾角，S 为弹道长度，X_d 为弹坑横向最大长度，Y_d 为弹坑纵向最大长度，h 为开坑深度，X_p 为相对弹着点的横向偏移量，Y_p 为最大有效侵彻深度，δ 为偏转角，姿态角为 $\zeta(\zeta=\beta+\delta)$，见图 3(d)。

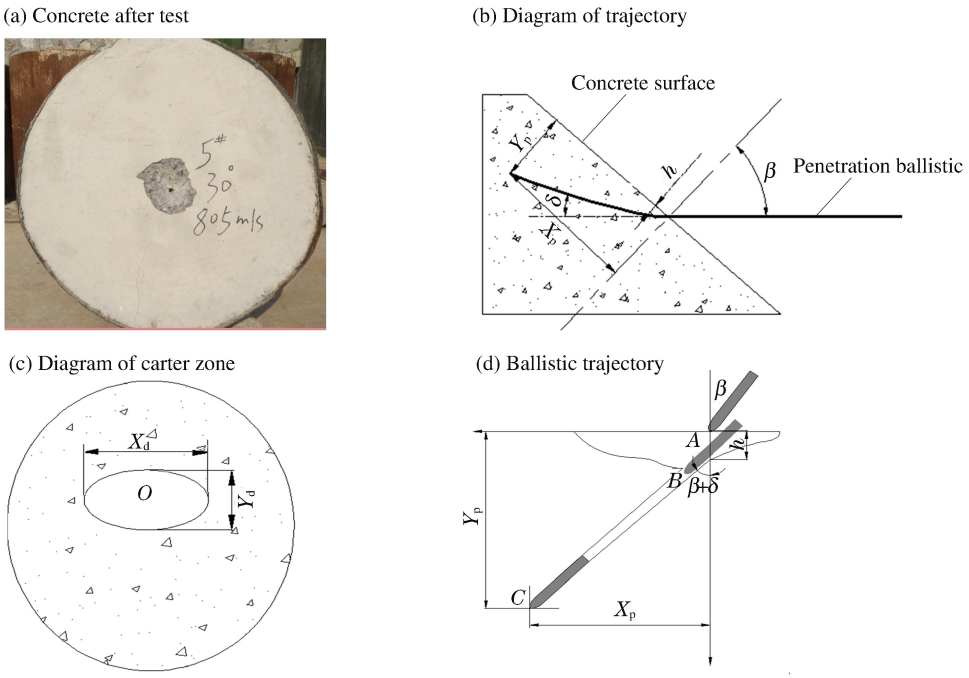

图 3　倾角侵彻靶面及弹道轨迹

Fig. 3　Obliquely penetrated target surface and ballistic trajectory

表 1　倾角侵彻混凝土实验结果

Table 1　Experimental results of oblique penetration into concrete

v/(m·s^{-1})	β/(°)	实验现象	S/cm	Y_d/cm	X_d/cm	X_p/cm	Y_p/cm	h/cm	δ/(°)
1 018	20	侵入	19.7	22.0	28.0	16.8	23.6	5.6	4.6
920	20	侵入	18.5	15.5	18.0	10.2	18.0	4.0	9.6
853	20	侵入	16.5	25.0	28.0	14.6	14.2	3.6	14.1
1 051	30	侵入	26.0	15.0	18.0	17.5	22.5	5.2	7.6
805	30	侵入	17.5	11.5	14.5	8.7	12.3	3.1	11.2
925	30	侵入	18.1	13.4	16.7	10.3	14.5	3.6	13.4
923	40	侵入	16.3	12.5	15.2	11.2	5.6	2.2	17.5
922	51	跳弹	15.0	10.0	21.0	12.4	2.5	2.5	25.0
1 222	65	跳弹	19.0	21.0	25.0	16.3	5.4	5.4	31.0

2 斜侵彻混凝土靶的数值模拟

2.1 有限元模型

模型中弹体直径为 10 mm,弹体长度为70 mm,CRH 为 4(头部圆弧半径为 40 mm),为了减小边界约束对侵彻效果的影响,混凝土靶尺寸大小为 50 mm×250 mm×250 mm。利用弹靶结构和受力载荷的对称性,取实体模型的 1/2 进行建模和求解。网格采用智能网格,靶板中间 20 mm 区域的网格划分密集,其他区域网格划分稀疏。为了消除靶板背面反射应力波的影响,靶板背面设定了无反射边界条件,对弹体和混凝土靶对称面上的节点设置了对称约束,对混凝土侧面施加边界条件用以模拟靶体被固定的情况,有限元模型如图 4 所示。

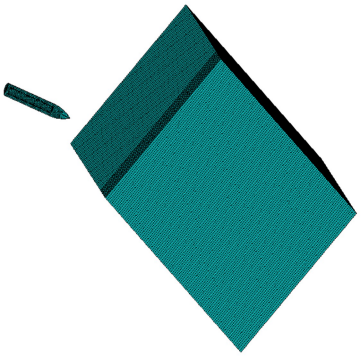

图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

2.2 材料模型和状态方程

观察实验回收的弹体发现,在侵彻过程中弹体基本不变形,基本保持刚性。因此数值模拟中,弹体选用刚性材料模型描述,弹体密度为 7.83 g/cm^3。弹体与混凝土靶之间的接触算法选择了 LS-DYNA 软件自带的 Surface-to-Surface 面面接触算法。混凝土靶的强度模型采用了 HJC 累积损伤材料模型,状态方程为 Grüneisen 状态方程,混凝土材料参数如表 2 所示,其中:ρ 为混凝土密度;量纲为一的内聚力强度 A 为给定静水压力下完全断裂强度与无损强度的比值;B 为量纲一压力强化系数;N 为量纲一压力硬化;C 为应变率敏感系数;S_{max} 为混凝土所能够达到的最大强度;G 为剪切模量;D_1 和 D_2 为混凝土的损伤常数;ε_{fmin} 为混凝土破碎的最小塑性应变;p_c 为压垮的静水压力;μ_c 为压垮的体积应变;K_1、K_2、K_3 为压力常数;μ_l 为压实体积应变;T 为混凝土的最大拉伸强度。

表 2 混凝土材料模型参数

Table 2 Parameters of concrete material model

ρ/(g·cm^{-3})	A	B	N	C	f_c/GPa	S_{max}	G/GPa	D_1	D_2
2.4	0.79	1.6	0.61	0.007	0.048	7	14.86	0.04	1
$\varepsilon_{f,min}$	p_c/GPa	μ_c/GPa	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa	p_c/GPa	μ_l	T/GPa	
0.01	0.016	0.001 1	85	−171	208	0.8	0.1	0.004	

3 实验结果与模拟结果对比

采用电割方法将混凝土靶割开,测量侵彻弹道及跳弹参数。图 5 为速度 805 m/s、倾角为 30°的侵彻实验结果,混凝土表面的弹坑形状近似圆形,横纵向尺寸分别为 14.5 和 11.5 cm,弹坑深度为 3.1 cm。根据表 1 的实验数据得到的弹坑深度随速度的增加而增加,靶面破坏面积随倾角的增加而增加。由于侵彻过程中的高温高压作用,整个侵彻弹道表面较为光滑,弹道周围布满白色混凝土粉末和明显压实痕迹。根据图 3(d)中的弹道特征和文献[13],斜侵彻过程分为弹坑区、滑移区和隧洞。弹体撞击混凝土靶时,表面混凝土松动并脱落,此时头部受到的阻力较小,因此弹体运动姿态基本不变。伴随着侵彻的继续,头部上下表面所受的阻力严重不对称产生偏转力矩,使得弹体侧向滑移。随着侵彻深度的继续增大,头部所受的混凝土阻力近似一致,隧洞形成。进入隧洞后,周围混凝土介质的约束相等,弹体的偏转过程结束,弹体以 ζ 的角度继续挤压混凝土靶,此时所受阻力集中于弹体头部区域。实验发现,倾角对滑移区长度有明显影响。倾角增加,滑移区长度增大,弹坑区与隧洞长度相应缩短。当隧洞长度降为零时,发生跳弹现象。

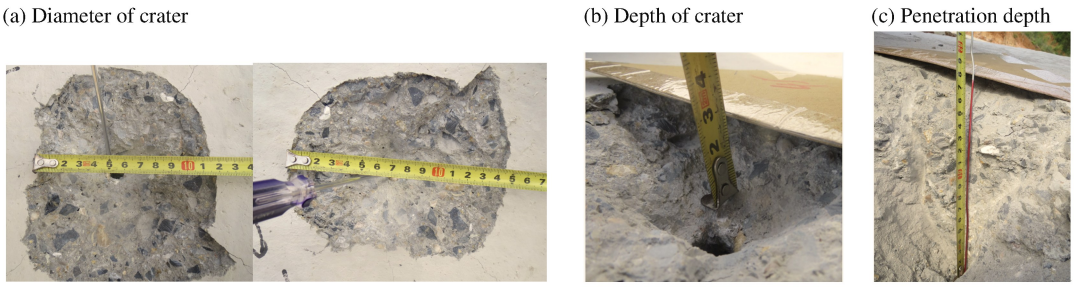

图 5　侵彻效果

Fig. 5　Penetration effect

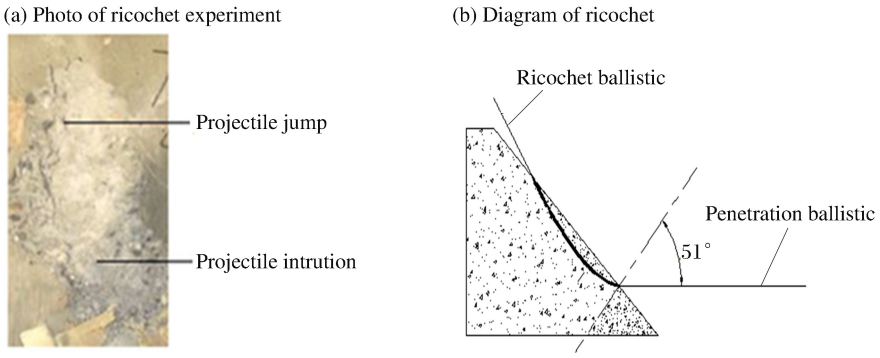

图 6　跳弹

Fig. 6　Ricochet

斜侵彻过程中弹体受到阻力的不对称。由于侵彻阻力与运动方向不一致，弹体的运动方向不断发生改变。当运动方向偏离混凝土靶方向时，弹体就会飞出靶面发生跳弹。弹体在倾角为 51°、速度达到 922 m/s，发生跳弹现象，如图 6 所示。侵入弹道发生偏转并从混凝土靶表面飞出，跳飞弹道与靶面法线夹角为 80°左右，侵彻深度为 2.5 cm。在弹靶交界区域内，弹道上方混凝土材料也会由于应力波作用而全部脱落，最终形成椭圆形弹坑。

采用建立的有限元模型，用实测到的速度进行数值模拟计算，得到不同工况下的垂直侵彻深度 Y_p，图 7 和表 3 为实验结果和数值模拟结果的对比，两者吻合较好。图 8～9 为弹体最大侵彻深度和偏转角与倾角之间的关系。跳弹发生前，偏转角与倾角近似成线性关系，倾角增大，弹道弯曲曲率增大，横向偏移量也随之增大，最终导致侵彻深度急剧降低。倾角超过 40°后偏转角急剧增大。当倾角大于 51°时发生跳弹现象。跳弹区的弹坑深度明显减小。

表 3　弹体实验与数值模拟结果对比

Table 3　Comparison of experimental with simulated results

编号	v/(m·s^{-1})	β/(°)	Y_p/cm		误差/%	δ/(°)		误差/%
			实验	数值模拟		实验	数值模拟	
1	1018	20	23.6	22.1	6.3	4.6	4.9	6.5
2	920	20	18.0	16.8	6.6	9.6	10.5	9.4
3	853	20	14.2	13.4	5.9	14.1	15.3	8.5
4	1051	30	22.5	20.9	7.7	7.6	8.2	7.9
5	805	30	12.3	11.5	6.9	11.2	12.1	8.1
6	925	30	14.5	13.8	5.4	13.4	14.6	10.3
7	923	40	5.6	5.2	3.6	17.5	19.4	8.2
8	922	51	2.5	2.3	8.6	80.0	84.2	6.7

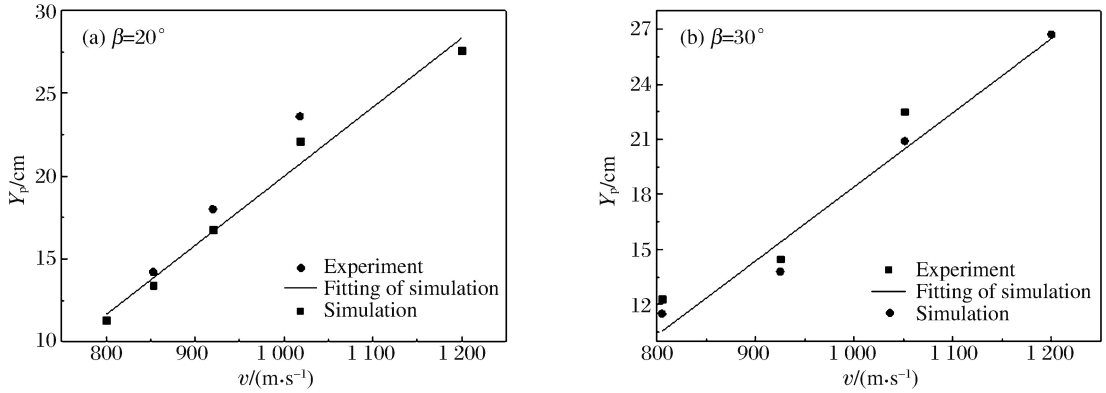

图 7 实验和数值模拟结果对比

Fig. 7 Comparison of the experimental with the simulated results

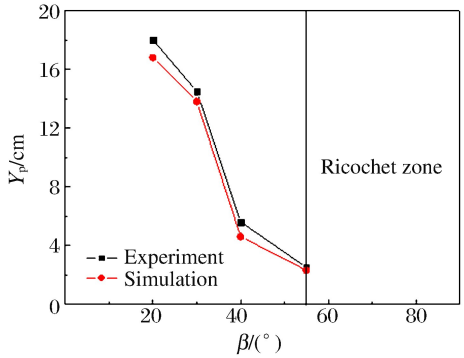

图 8 侵彻深度与倾角的关系

Fig. 8 Ralation between penetration depth and oblique angle

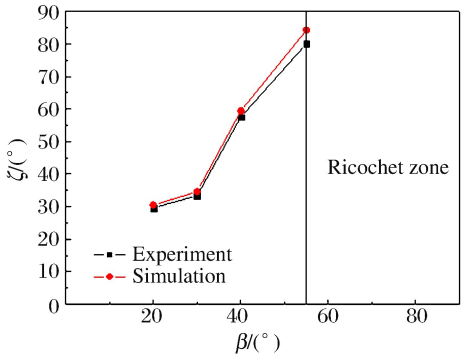

图 9 姿态角与倾角的关系

Fig. 9 Ralation between attitude angle and oblique angle

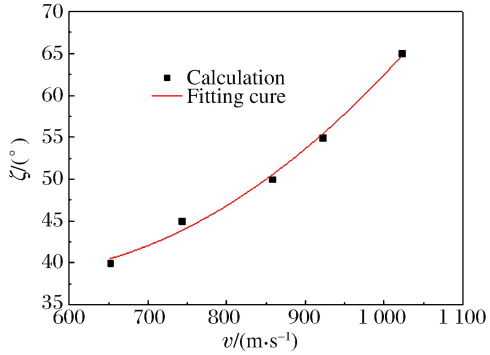

图 10 跳弹极限角与速度的关系

Fig. 10 Relation between ricochet angle and velocity

对跳弹极限角进行计算，得到：当入射速度 v 为 652、743、858、922、1 022 m/s 时，跳弹极限角 η 分别为 40°、45°、50°、55°、65°。对该结果进行二次多项式拟合，拟合曲线如图 10 所示，跳弹极限角 η(°)与速度 v(m/s)的函数关系式为：

$$\eta = 65.3 - 0.1v + 0.02v^2 \tag{1}$$

可见弹体入射速度越高，抗跳飞能力越高，跳弹极限角越大。

4 倾角和速度对弹道偏转的影响分析

为了进一步研究侵彻过程中弹道特性，对弹体侵彻混凝土的过程进行数值模拟。不同倾角下弹道轨迹、最大侵彻深度与倾角变化关系如图 11 和 12 所示。从图中可以看出，随着倾角的增大，侵彻深度逐渐减小，当倾角达到 40°时，混凝土自由表面对侵彻弹道影响严重，弹体头部上下表面受力不对称，弹道轨迹向上偏转。当倾角增加到 57°时，发生跳弹现象。

图 13 给出了倾角和入射速度对侵彻轨迹的影响。从图 13 中可知，速度一定、不同倾角的弹道都发生了一定程度的弯曲。初期弹道弯曲程度随侵彻深度的增加逐渐变小，最终弹体基本沿着直线运动。同一倾角、不同速度弹体的运动轨迹几乎是重合的，随着时间增加，轨迹逐渐分离，发生了不同程度的偏转，最终弹体弹道沿直线发展，直到速度降为零，侵彻结束。

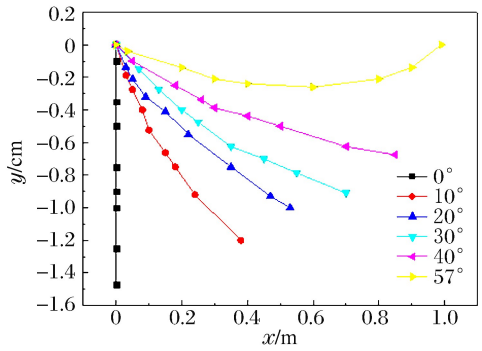

图 11　不同倾角下的弹道轨迹

Fig. 11　Ballistic trajectory due to different oblique angle

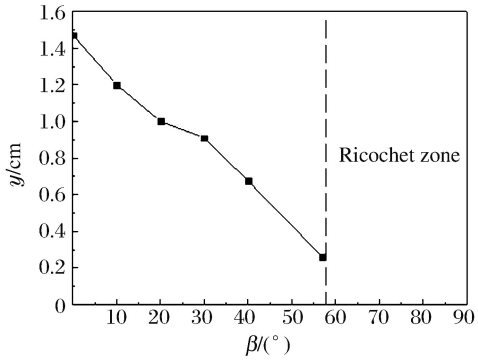

图 12　侵彻深度随倾角变化关系

Fig. 12　Penetration depth vs. oblique angle

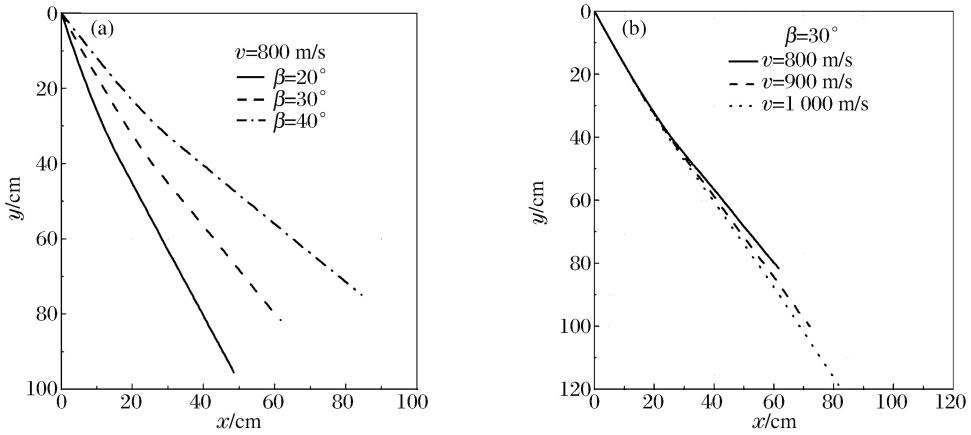

图 13　斜侵彻下的弹道轨迹变化

Fig. 13　Ballistic trajectory under oblique penetration

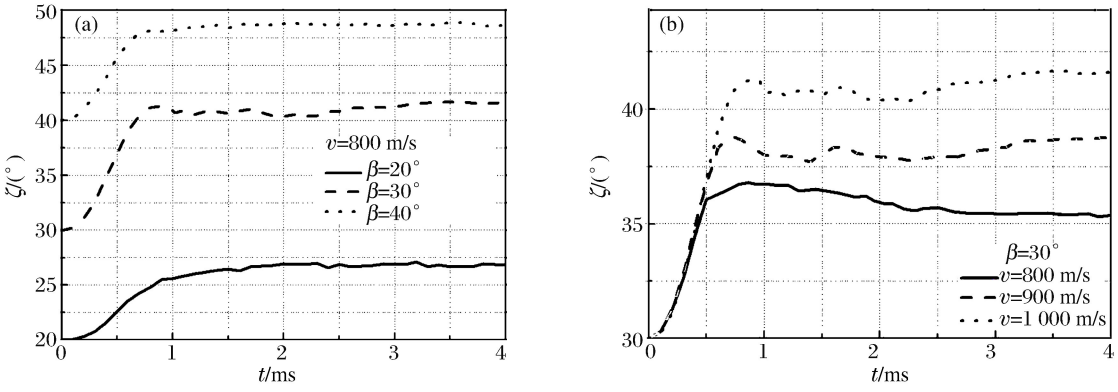

图 14　斜侵彻下的偏转角变化

Fig. 14　Deflection angle under oblique penetration

图 14 为偏转角与速度和倾角的关系。在侵彻初期弹体的姿态角逐渐增大，侵彻中期姿态角的变化略有波动，最后趋于一个稳定值。初始速度增大，姿态角变化曲线在某一时间段内的斜率随着速度的增加而呈减小的趋势，表明速度越大，姿态角变化程度越小。

5　结　论

本文中开展了弹体斜侵彻混凝土靶实验，按照实验条件进行数值模拟，得到了以下结论：

(1) 计算得到跳弹极限角与速度的关系式,并得到两者之间的规律:速度越高,抗跳飞能力越高,跳弹极限角越大。

(2) 弹体垂直侵彻深度随倾角的增大而减小,滑移量随着倾角的增大而增大。偏转角随倾角的增加而增大。

参考文献:

[1] Gold V M, Vradis G C, Pearson J C. Concrete penetration by eroding projectiles: Experiments and analysis[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1996,122(2):145-152.

[2] Forrestal M J, Frew D J, Hanchak S J, et al. Penetation of grount and concrete targets with ogive-nose steel projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 1996,18(5):465-476.

[3] Macek R W, Duffey T. Finite cavity expansion method for near-surface effects and layering during earth penetration [J]. Modeling and simulation based engineering, 1998,10(2):1138-1143.

[4] Longcope D B, Tabbara M R, Jung J. Modeling of oblique penetration into geologic targets using cavity expansion penetrator loading with target free-surface effects: SAND99-1104C[R]. Albuquerque, New Mexico, USA: Sandia Nation Laboratories, 1999.

[5] 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, 2001,25:993-1022.

[6] Forrestal M J, Frew D J, Hicheron J P, et al. Penetration of concrete targets with deceleration time measurement [J]. International Journal of Impact Engineering, 2003,28(5):479-497.

[7] Lampert S, Jeanquartier R. Perforation of concrete targets by an eroding tungsten-alloy rod[C]// Proceedings of the 22th International Symposium on Billistics. Vancouver, Canada, 2005:838-843.

[8] 刘小虎,刘吉,王乘,等.弹丸低速垂直侵彻无钢筋混凝土的实验研究[J].爆炸与冲击,1999,19(4):323-328.
Liu Xiaohui, Liu Ji, Wang Cheng, et al. Experimental study on the projectile penetration normally into a plain concrete[J]. Explosion and Shock Waves, 1999,19(4):323-328.

[9] 王明洋,郑大亮,钱七虎.弹体对混凝土介质侵彻、贯穿的比例换算关系[J].爆炸与冲击,2004,24(2):108-114.
Wang Mingyang, Zheng Daliang, Qian Qihu. The scaling problems of penetration and perforation for projectile into concrete media[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(2):108-114.

[10] 王浩,陶如意.截卵形弹头对混凝土靶侵彻性能的试验研究[J].爆炸与冲击,2005,25(2):171-175.
Wang Hao, Tao Ruyi. Experimental study on the penetration performance of truncated-ogive nose projectile[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(2):171-175.

[11] 武海军,黄风雷,王一楠.高速弹体非正侵彻混凝土试验研究[C]// 第八届全国爆炸力学学术会议文集.吉安,2007:488-494.

[12] 马爱娥,黄风雷.弹体斜侵彻钢筋混凝土的试验研究[J].北京理工大学学报,2007,27(6):482-486.
Ma Ai'e, Huang Fenglei. Experimental research on oblique penetration into reinforced concrete[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2007,27(6):482-486.

[13] 吕中杰,徐钰巍,黄风雷.弹体斜侵彻混凝土过程中的方向偏转[J].兵工学报,2009,30(2):301-304.
Lü Zhongjie, Xu Yuwei, Huang Fenglei. Transverse deflection of projectile obliquely penetrating into concrete [J]. Acta Armamentarii, 2009,30(2):301-305.

[14] 王可慧,宁建国,李志康,等.高速弹体非正侵彻混凝土靶的弹道偏转试验研究[J].高压物理学报,2013,27(4):561-566.
Wang Kehui, Ning Jianguo, Li Zhikang, et al. Ballistic trajectory of high-velocity projectile obliquely penetrating concrete target[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013,27(4):561-566.

Experimental study and numerical simulation of projectile obliquely penetrating into concrete target

Xue Jianfeng, Shen Peihui, Wang Xiaoming

(*ZNDY Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*)

Abstract: The ballistic characteristics of the projectile obliquely penetrating into the concrete target were investigated, with such data as the penetration depth, crater depth and diameter, deflection angle obtained via the experiments and simulation calculation. The results from simulation agree well with those from the experiments. The results show that the oblique angle has great influence on the crater zone. The greater the oblique angle, the greater the projectile's deflection; the greater the impact velocity, the less the influence of the ballistic deflection angle; and the ricochet occurs when the oblique angle increases to a certain degree. Thus the relationship was identified between the ricochet angle and the oblique angle and the penetration velocity.

Keywords: projectile; oblique penetration; concrete targets; ballistic characteristic; transverse deflection angle

(责任编辑　王小飞)