文章编号：1000-5773(2013)04-0561-06

高速弹体非正侵彻混凝土靶的弹道偏转实验研究*

王可慧[1,2]，宁建国[1]，李志康[2]，耿宝刚[2]，周 刚[2]

(1. 北京理工大学，北京 100081；
2. 西北核技术研究所，陕西西安 710024)

摘要：利用二级轻气炮，进行了 980～1 870 m/s 速度范围内小尺寸弹体非正侵彻半无限混凝土靶实验，详细测绘了弹道轨迹及特征参数，重点研究了高速非正侵彻的弹道特性，并根据侵彻机理进行了侵彻过程分区。研究结果表明：与中、低速条件下的弹道不同，高速弹体非正侵彻半无限混凝土靶的侵彻弹道偏转更为明显，表现为典型的“J”形弹道，弹体终点姿态变化很大，弹道末端的偏转角可达 130°。

关键词：高速；非正侵彻；混凝土靶；弹道

中图分类号：O385；O347.1 **文献标识码**：A

1 引 言

目前，对于混凝土类硬目标的侵彻效应研究主要集中在速度低于 800 m/s 的刚性弹侵彻，高速及超高速侵彻研究文献资料极为有限。美国在混凝土靶的高速侵彻研究方面起步较早，陆续有相关文献发表，但大多为理论分析及数值仿真方法的探讨，有参考价值的实验数据不多。Gold 等人[1]曾进行了 1.5～1.9 km/s 速度下铜和钽长杆弹侵彻混凝土靶的实验研究和简化理论分析。Lampert 等人[2]进行了钨合金长杆弹侵彻混凝土多层靶的实验研究，弹体速度约为 1.0 和 1.6 km/s。Forrestal 等人[3]进行了弹体在 0.4～1.4 km/s 速度下侵彻混凝土靶的实验，对高速侵彻条件下的弹体侵蚀进行了分析。我国关于高速弹体侵彻混凝土的研究起步较晚。梁斌等人[4]进行了 1.2 km/s 速度下弹体侵彻混凝土靶的实验研究，对弹体的头部侵蚀现象进行了讨论。武海军等人[5]进行了 1.5 kg 弹体在 0.8～1.1 km/s 速度下侵彻钢筋混凝土靶的实验。2010 年，何翔等人[6]利用∅35 mm 高速弹道炮进行了实心弹丸在 0.80～1.47 km/s 速度下侵彻混凝土靶的实验，对弹体侵彻深度及弹体变形情况进行了分析。现有研究结果表明，在高速或超高速条件下，弹体在侵彻过程中会发生侵蚀变形，此时不能再被视为刚体，与中低速侵彻靶体情况相比，弹道特征和演变规律截然不同。但是由于实验技术或弹体结构设计的原因，当弹体以超过 1.2 km/s 的速度非正撞靶体时，因弹道偏转弹体往往从靶板侧面穿出或破碎在靶板中，从而无法完整描述侵彻弹道特征。为了掌握高速弹体非正侵彻半无限混凝土靶的弹道特性，本研究开展了小尺寸弹丸高速侵彻半无限混凝土靶的实验研究。

2 实验方案

2.1 实验发射装置

二级轻气炮是高速撞击研究中较为常用的发射工具，可将小尺寸弹丸加速到较高的速度。本研究

* **收稿日期**：2011-07-18；**修回日期**：2011-07-27

作者简介：王可慧(1975－)，女，博士，副研究员，主要从事爆炸与冲击动力学研究. E-mail：wang_ke_hui@163.com

采用二级轻气炮作为实验发射装置。

2.2 实验弹和实验靶

根据二级轻气炮的发射能力，设计了实验弹丸，弹径为 5 mm，弹长 24 mm，质量 2.4 g。弹体材料采用超高强度钢 30CrMnSiNi2MoVe，弹体内部填充由砂和石蜡配制而成的模拟装药，实验弹实物见图 1。



图 1 实验弹

Fig. 1 Projectiles used in the experiment

实验靶采用圆柱形混凝土靶，实测单轴抗压强度为 35.4 MPa。参照钻地弹侵彻混凝土实验研究中采用的靶板设计标准，靶板直径取弹径的 30 倍以上，此时可忽略靶板的横向边界效应。考虑到高速侵彻条件下弹道的偏转及实验安全性，实验靶板的直径为 360 mm（大于弹径的 50 倍），靶厚为 200 mm。为进一步减小横向边界效应，靶板外围采用 3 mm 厚的钢圈加固。

2.3 测试技术

采用激光测速法测量弹体撞靶速度，并由高速摄像系统记录弹体着靶姿态及撞靶过程。为了保证拍摄图像的清晰度，实验时将弹体喷涂白漆。

3 实验结果

实验中，测得的弹丸速度为 1 280～1 870 m/s。高速摄像系统拍摄的弹丸出炮口后的飞行过程和入靶过程见图 2。图 3 给出了实验后弹体的变形情况，可见，弹体结构的变形特点为头部侵蚀、弹身弯曲。

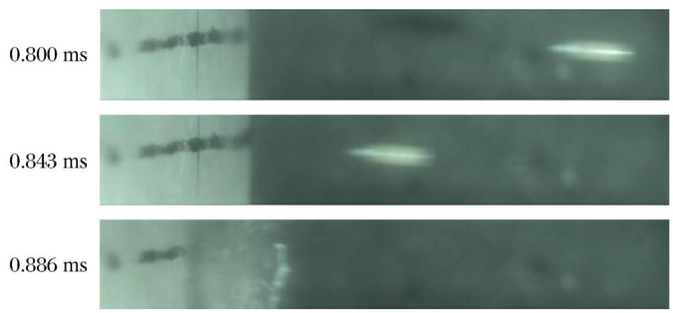


图 2 弹丸飞行撞靶过程

Fig. 2 Penetration process of the projectile

图 4 为实验后的靶板图像。将靶板剖开，测量侵彻弹道。为了使弹道形状更为直观，将软焊丝紧贴弹丸侵彻轨迹。图 5 为实验侵彻弹道及其测绘图。可以看出，整个侵彻弹洞表面较为光滑，壁面有白色混凝土粉末，显示出明显的压实痕迹。表 1 列出了侵彻弹道参数，其中 v 为弹速，θ 为攻角，s 为弹道横向偏转距离，γ 为弹道末端偏转角。



图 3 回收弹体

Fig. 3 Recovered projectiles



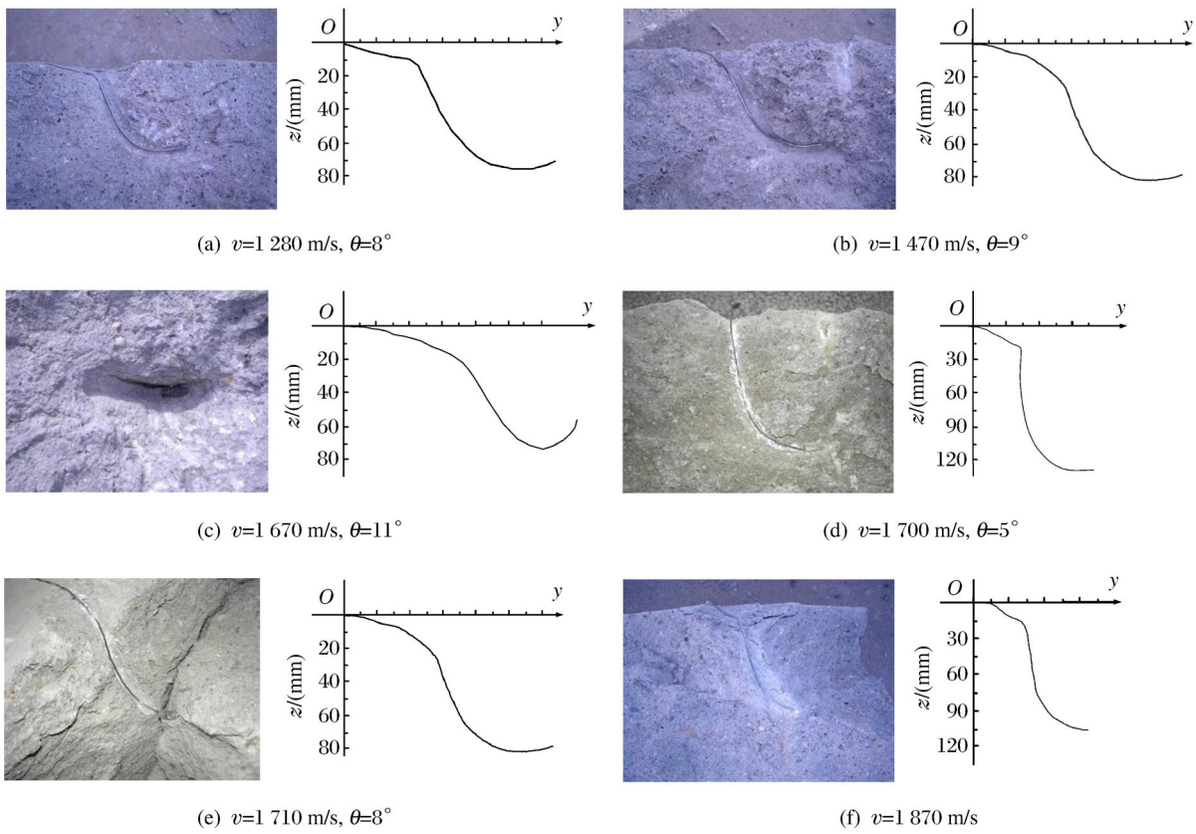
图 4 回收靶板

Fig. 4 Recovered targets

表 1　侵彻及弹道参数

Table 1　Parameters of the penetration and ballistic trajectory

v/(m/s)	θ/(°)	s/(mm)	γ/(°)	v/(m/s)	θ/(°)	s/(mm)	γ/(°)
1 280	8	70	96	1 700	5	75	90
1 470	9	70	100	1 710	8	60	120
1 670	11	60	130	1 870	—	55	135



(a) v=1 280 m/s, θ=8°　(b) v=1 470 m/s, θ=9°

(c) v=1 670 m/s, θ=11°　(d) v=1 700 m/s, θ=5°

(e) v=1 710 m/s, θ=8°　(f) v=1 870 m/s

图 5　不同侵彻速度、不同攻角条件下的侵彻弹道

Fig. 5　Cavity trajectories of projectiles with different velocities and attack angles

4　弹道特征及侵彻过程分析

4.1　弹道特征描述

由实验结果可见:弹体以 1 280～1 870 m/s 的撞靶速度非正侵彻混凝土靶时,弹道发生了明显偏转,弹道形状呈典型的"J"形;前半段侵彻弹道较直,后半程弹道开始发生较大偏转,弹体姿态变化很大,弹丸的最终姿态基本呈水平或向上翻转。为了更直观地描述弹道偏转程度,引入相关弹道参数,如图 6 所示。设过 y 轴且垂直与 z 轴的平面为靶面,O 点为着靶点,弹道轨迹切线与 z 轴的夹角为弹道偏转角 γ,γ 是衡量弹道偏转程度的主要依据。实验中,随着攻角的增大,弹道末端的偏转角增大,弹道的弯

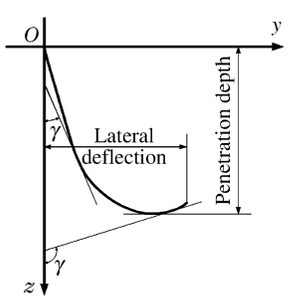


图 6　非正侵彻弹道示意图

Fig. 6　Trajectory of non-normal penetration

曲程度加剧，当攻角为 11°时，弹道末端的偏转角达 130°。

初哲[7]曾进行数十发 700 m/s 以下弹体非正侵彻(攻角范围为 0°～17°)混凝土靶实验，研究结果表明，该速度段形成的侵彻弹道轨迹基本为斜弧线，弹道曲率较小。图 7 为中低速下典型的非正侵彻弹道。本研究进行了速度为 980 m/s、攻角为 9°时实验弹侵彻混凝土靶实验，得到的侵彻弹道如图 8 所示。由图 8 可知，弹道轨迹的弯曲程度很小，并逐渐趋于直线，符合中低速非正侵彻弹道特征，显著不同于同种弹丸在攻角相当、1 280 m/s 速度下的“J”形侵彻弹道。这是由于：弹体非正侵彻混凝土靶板时，作用于弹体的非对称力及混凝土介质的非均匀性会引起弹道偏转；在高速或超高速条件下，弹体头部的侵蚀及弹身的弯曲变形加剧了弹体受力的非对称性，从而使高速或超高速条件下弹道的偏转效应较中低速条件下更为明显。

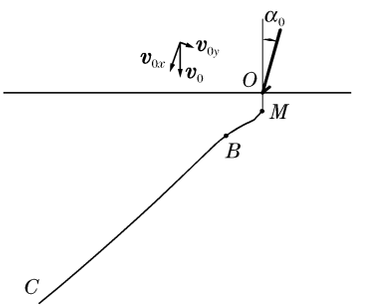


图 7 中、低速下典型的侵彻弹道

Fig. 7 Typical trajectory at middle-low speed

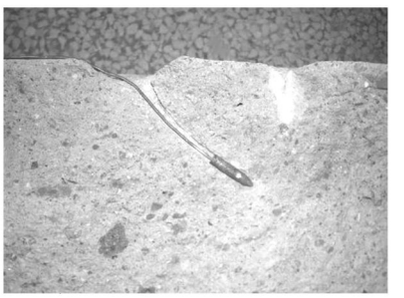


图 8 速度为 980 m/s 时的侵彻弹道

Fig. 8 Trajectory at the velocity of 980 m/s

4.2 侵彻过程分析

根据高速非正侵彻过程中不同阶段的弹道特征，可将整个侵彻过程分为弹坑段、滑移段、准直线弹道段和弯曲弹道段。图 9 为入射面上的弹道示意图，其中 A 点和 B 点为弹坑边缘点，O 点为弹体着靶点，C 点、D 点、E 点为弹道上的特征点，F 点为弹道终点。

(1) 弹坑段。如图 9 所示，OC 段为弹坑段，对应于弹体撞靶成坑阶段。弹体撞靶时，靶面混凝土迅速剥离，使该弹道区间的弹体不受横向弯矩作用，因此弹体姿态基本不变，弹道方向近似为初始速度方向。该段弹体运动距离极短，可近似为直线。

(2) 滑移段。随着弹体的继续侵彻，弹体上表面和下表面阻力严重不对称，且上表面混凝土较容易剥落，弹体偏转加剧，攻角增大，弹体产生侧向滑移，弹道为上凸的弧线。滑移段的侵彻距离很短，对应于图 9 中的 CD 段。

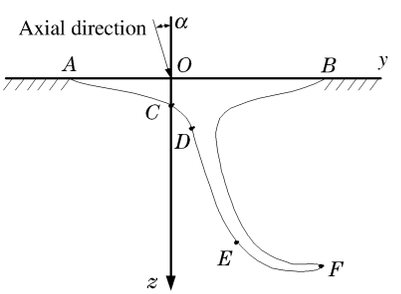


图 9 “J”形弹道示意图

Fig. 9 Sketch of a J-shaped trajectory

(3) 准直线弹道段。随着弹体侵彻深度的不断增大，弹体上表面的混凝土不再剥落，开始形成侵彻弹洞。进入弹洞区后，由于受到周围混凝土介质的约束，实验弹攻角逐渐减小，反映在弹洞特征上，则表现为弹道呈喇叭口形状，随深度增加弹洞逐渐变细。在侵彻弹洞的前半段，由于弹速很高，弹体惯性很大，尽管弹体姿态存在攻角，但其质心运动路线近似为直线，因此该阶段弹道为准直线弹道段，对应于图 9 中的 DE 段。以侵彻深度为判断依据，准直线弹道段约占整个侵彻弹道的 1/3。在整个准直线弹道段，弹洞直径略大于弹径，表明该阶段结束时仍存在攻角。

(4) 弯曲弹道段。高速侵彻过程中，弹靶相互作用产生的高压及表面摩擦引起的温升软化，使弹体头部发生侵蚀。随着侵彻深度的继续增加，头部侵蚀增大，加剧了因攻角及混凝土介质的非均匀性而引

起的弹体受力不对称,在横向弯矩的作用下,弹体逐渐开始塑性弯曲。通过 E 点后,弹体的塑性弯曲导致弹道开始弯曲,因此称该阶段为弯曲弹道段,为上凹的弧线,对应于图 9 中的 EF 段。该阶段,弹洞壁与弹体的横向挤压使攻角慢慢变小,最后消失,末端弹道趋向直线,弹洞直径接近弹径。在弯曲弹道段,若弹体刚度不足,弹道曲率很大,在侵彻终点弹体会发生弯曲或被挤扁,如图 10 所示。



图 10　弹道曲率过大导致的弹体弯曲

Fig. 10　Bend projectile caused by steep curvature of trajectory

5　结　论

以二级轻气炮为发射工具,实验研究了小尺寸弹体高速非正侵彻半无限混凝土靶的弹道特征,得到如下主要结论:

(1) 高速非正侵彻的弹道特征与中低速侵彻明显不同,弹道的偏转效应更为明显,"J"形弯曲弹道是高速非正侵彻的特有现象;

(2) 侵彻弹洞直径接近弹径,侵彻前半段弹道较直,侵彻后半程弹道开始发生较大偏转,弹体姿态变化很大,弹丸的最终姿态基本呈水平或向上翻转,弹道末端的偏转角可达 130°;

(3) 根据不同阶段的弹道特征,整个侵彻过程可分为弹坑段、滑移段、准直线弹道段和弯曲弹道段 4 个分区。

由于研究结果是基于小尺寸弹丸得到的,属于机理性研究范畴,为了进一步定量掌握高速弹体非正侵彻半无限混凝土靶的规律,还需进一步开展大尺寸高速弹体非正侵彻半无限混凝土靶的实验研究。

References:

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

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

[3] Forrestal M J, Frew D J, Hanchak S J, et al. Penetration of grout and concrete targets with ogive-nose steel projectiles [J]. Int J Impact Eng, 1996, 18(5): 465-476.

[4] Liang B, Chen X W, Ji Y Q, et al. Experimental study on deep penetration of reduced-scale advanced earth penetrating weapon [J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(1): 1-9. (in Chinese)
梁　斌,陈小伟,姬永强,等. 先进钻地弹概念弹的次口径高速深侵彻实验研究 [J]. 爆炸与冲击,2008,28(1):1-9.

[5] Wu H J, Huang F L, Wang Y N. Experimental research on high-velocity penetration into concrete targets [C]// Proceedings of the 8th Chinese Conference on Explosion Mechanics. Ji'an, 2007: 488-494. (in Chinese)
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论文集. 吉安,2007:488-494.

[6] He X, Xu X Y, Sun G J, et al. Experimental investigation on projectiles' high-velocity penetration into concrete targets [J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(1): 1-6. (in Chinese)
何　翔,徐翔云,孙桂娟,等. 弹体高速侵彻混凝土的效应实验 [J]. 爆炸与冲击,2010,30(1):1-6.

[7] Chu Z. Study of non-normal penetration into concrete [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
初　哲. 弹体非正侵彻混凝土靶研究 [D]. 北京:北京理工大学,2006.

Ballistic Trajectory of High-Velocity Projectile Obliquely Penetrating Concrete Target

WANG Ke-Hui[1,2], NING Jian-Guo[1], LI Zhi-Kang[2],
GENG Bao-Gang[2], ZHOU Gang[2]

(1. *Beijing Institute of Technology*, *Beijing* 100081, *China*;
2. *Northwest Institute of Nuclear Technology*, *Xi'an* 710024, *China*)

Abstract: The experiments of small scale projectile obliquely penetrating a semi-infinite concrete target with a velocity from 980 to 1 870 m/s are performed by a two-stage light gas gun. The ballistic trajectory and characteristic parameters are tested and painted. The results show that the trajectory deflection of the penetrator obliquely penetrating a semi-infinite concrete target with high velocity is more obvious than that with intermediate and low velocities, and presents a shape of "J". The penetration process can be divided into four phases according to the penetration mechanism. In addition, it is found that the terminal gesture of the projectile changes greatly, and the deflection angle at endpoint can reach up to 130°.

Key words: high velocity; oblique penetration; concrete target; ballistic trajectory