

文章编号: 1001-1455(2013)01-0098-05

大质量高速动能弹侵彻钢筋混凝土的实验研究^{*}

汪 斌,曹仁义,谭多望

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理重点实验室,四川 绵阳 621900)

摘要: 设计了弹头形状和弹体结构合理的金属侵彻弹体,利用口径为 320 mm 的平衡炮,采用次口径加载技术,将直径为 136 mm、长度为 680 mm、质量为 52 kg 的金属侵彻体加速到 1 300 m/s,去侵彻尺寸为 3 m×3 m×6 m 的钢筋混凝土靶。实验结果表明:次口径弹托与弹丸完全分离,弹体飞行姿态稳定,飞行攻角小于 2°,弹体侵彻 6 m 厚的钢筋混凝土后剩余速度约为 260 m/s。实验后回收的金属弹体结构完整,仅弹体头部存在一定塑性变形,弹体质量损失约 1.2%,长度缩短约 0.7%,弹靶作用过程的侵蚀现象不明显。

关键词: 爆炸力学;金属侵彻体;次口径发射技术;钢筋混凝土

中图分类号: O385

国标学科代码: 1303530

文献标志码: A

高速侵彻战斗部凭借高速度的优势能够对地下深埋、加固的重要军事目标进行毁伤打击。随着高超声速飞行器的迅速发展,高速侵彻战斗部已经成为重要的发展方向^[1]。由于高速飞行器的飞行速度很高,战斗部对混凝土等典型地质材料进行侵彻时,弹靶之间的碰靶压力很高,已经超出了目前常用金属材料的强度极限,弹头部分会发生失效、磨蚀现象。另一方面,由于混凝土的失效压力很低,相对金属失效压力的吉帕量级,混凝土的失效压力为几十兆帕,因此需深入研究弹靶相互作用过程。开展高速侵彻实验,利用实验结果来综合判定弹体和混凝土之间的相互作用过程,是研究金属弹体侵彻混凝土的侵彻能力以及侵彻体可能产生的头部磨蚀甚至弹体折断、失效等高速侵彻现象最直接和有效的方法。

对高速弹体侵彻混凝土的机理,已开展了一定的实验研究,M. J. Forrestal 等^[2-3]开展了弹头形状因子为 3.00 和 4.25 的 2 种头部为卵形的弹体以 1 300~1 700 m/s 的速度侵彻强度为 19.5 MPa 的混凝土的实验。梁斌等^[4]开展了先进钻地弹概念弹的高速深侵彻缩比实验,最高撞击速度接近 1 200 m/s。武海军等^[5]开展了高速非正侵彻混凝土实验,撞击速度为 800~1 100 m/s,获得了一些高速侵彻的实验数据。何翔等^[6]开展了不同速度下,不同弹体结构高速侵彻混凝土实验,探讨了高速撞击条件下弹体的侵彻能力、弹体侵彻稳定性、弹体变形和破坏等问题,揭示了混凝土中半流体侵彻阶段的典型特征。

目前高速侵彻实验的加载设备主要是高速火炮,采用次口径加载技术,能够将千克级弹丸加速到约 1 500 m/s。由于缩比实验存在尺度效应,通过缩比实验只能发现和解决高速侵彻过程中的部分问题,特别是千克级弹丸的侵彻实验,与实际战斗部数百千克甚至上千千克质量相比,尺寸缩比达到 1/10 量级。Sandia 国家实验室在对数百次全尺寸战斗部侵彻实验和缩比侵彻实验的结果进行分析的基础上,提出侵彻类战斗部的缩比实验尺寸必须大于真实尺寸的 1/3~1/4,才能得到较可信的实验结果^[7]。

本文中利用口径为 320 mm 的平衡炮,采用次口径加载技术,将直径为 136 mm、长度为 680 mm、质量为 52 kg 的金属弹体,加速到 1 300 m/s,实现正常高速侵彻,回收弹体,分析其结构变形情况。

1 实验

1.1 弹体设计

高速侵彻弹主要由壳体、炸药模拟件和后端盖构成。实验件长度为 680 mm,中段直径为 136 mm,

* 收稿日期: 2011-08-19; 修回日期: 2012-02-27

基金项目: 中国工程物理研究院重点基金项目(2009A0201009)

作者简介: 汪 斌(1980—),男,硕士,助理研究员。

弹体长径比为 5,距尾部端面 50 mm 长度内的直径为 144 mm,头部曲径比为 3,弹体装填比为 0.1。实验件总质量约为 52 kg,质心距头部端面约 350 mm,加工后的弹体实物见图 1。

1.2 靶 标

实验靶标由 6 块尺寸为 3.0 m×3.0 m×1.0 m 的 C35 钢筋混凝土组合而成,钢筋混凝土的截面配筋率为 0.5%。在 1 300 m/s 的侵彻速度条件下,根据 C. W. Young 公式^[7]计算得到的侵彻深度为 5.8 m,实验靶标如图 2 所示。

1.3 加载技术

对大质量弹丸的加载可采用口径为 320 mm 的平衡炮,该炮具有无后坐力、加载能力强的优点。利用平衡炮采用次口径加载技术,可以将质量为 50 kg 级的弹丸加速到 1 300 m/s,弹体飞行姿态稳定,无明显攻角。

1.4 实验布局

高速弹体侵彻混凝土靶标的布局示意图如图 4 所示,混凝土靶标距离平衡炮弹体出口为 15.2 m。在距离炮口 11 m 的位置安装 4 个断丝靶网,用于测量弹体碰靶过程的速度。2 台数字式高速相机位于平衡炮侧面,分别记录弹体的飞行全过程图像和弹体着靶过程图像。



图 1 高速侵彻弹体

Fig. 1 High-velocity penetrator



图 2 钢筋混凝土靶

Fig. 2 Reinforced concrete target



图 3 口径为 320 mm 的平衡炮

Fig. 3 The 320-mm-caliber Davis gun

2 实验结果及分析

2.1 弹体飞行参数

实验中断丝靶网测试系统测得的实验弹飞行速度为 1 305 m/s,从高速摄影上判读得到的实验弹飞行速度为 1 310 m/s,与预估弹速 1 300 m/s 基本一致。高速侵彻实验弹着靶状态为正碰,由于次口径技术采用的部分材料在弹体飞行过程中破碎雾化,不能对弹体的着靶状态进行精确判读,从高速录像上分析,着靶攻角小于 2°。

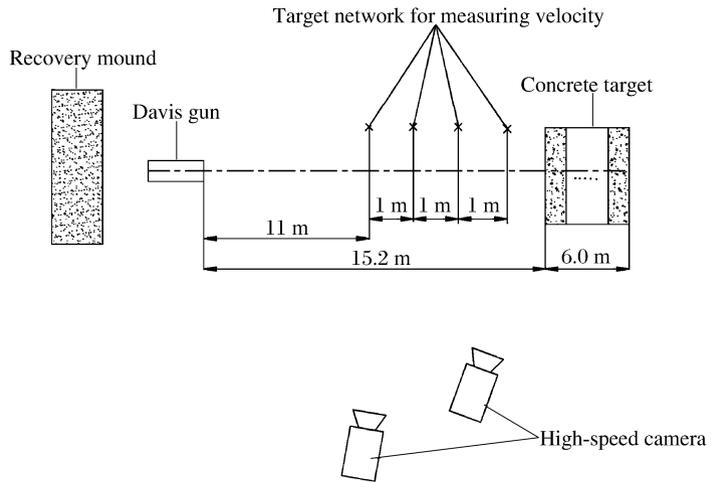


图 4 侵彻实验布局

Fig. 4 Layout of penetration experiment



图 5 弹体飞行过程图像

Fig. 5 Pictures of the penetrator in the process of the flight

2.2 弹体的侵彻能力

高速弹体侵彻 6 层混凝土靶标后,混凝土结构未发生明显破坏,如图 6 所示。在靶板正面,受到次口径推板的撞击影响,靶板正面产生一个较大凹坑。弹体在穿靶过程中,其穿靶位置发生明显变化,弹体从靶板正中心进入,从后靶板较低的位置处穿出,如图 6(b)所示。高速录像判读的弹体穿出后飞行速度在 260 m/s 左右,说明弹体的实际侵彻能力比用 C. W. Young 公式预估的更强。

(a) Target front



(b) Target back



图 6 混凝土靶标的破坏情况

Fig. 6 Damage of target

2.3 弹体的状态

实验后回收的弹体如图 7 所示,从图中可以看出,弹体结构保持完整,头部存在墩粗现象。初步判断,在 1 300 m/s 的侵彻速度条件下,钢筋混凝土对弹体头部的侵蚀现象不明显。设计的弹体结构基本能够在 1 300 m/s 的侵彻速度下保持完整。



图 7 回收实验弹

Fig. 7 Recovered penetrator

实验前后弹体的状态参数分别为:侵彻速度,1 300 m/s;实验前弹体质量,47.05 kg;实验后弹体质量,46.14 kg;质量损失,1.1%;实验前弹体长度,680 mm;实验后弹体长度,675 mm;长度变化,0.73%。由此可知,弹体存在一定的质量损失,但质量损失不明显,说明高速侵彻过程中弹体的侵蚀现象不明显。弹体长度发生一定变化主要是由弹体头部的墩粗现象造成的。总地说来,在1 300 m/s的侵彻速度条件下,设计的弹体结构合理,经受住了高速侵彻过程的考验。

2.4 实验结果讨论

C. W. Young^[7]给出的侵彻深度经验公式为

$$D = kSN (W/A)^{0.7} (v - 30.5) \quad (1)$$

式中: k 为侵彻系数,在钢筋混凝土条件下为 1.8×10^{-5} ; S 是靶的可侵彻性,钢筋混凝土条件下为0.9; N 为头部形状系数, W/A 为截面密度, v 为碰靶速度,m/s。

式(1)的适用范围为:弹体质量大于2 kg,侵彻速度为61~1 330 m/s。本文中按照经验公式,对弹体的侵彻能力进行了预估,计算结果为5.8 m。实验时发现,弹体侵彻6 m厚的钢筋混凝土后剩余速度为260 m/s。按式(1)计算,在260 m/s的侵彻速度条件下,弹体还能侵彻1 m厚的钢筋混凝土,即在1 300 m/s的侵彻速度条件下,设计的动能钻地弹能够侵彻7 m厚的钢筋混凝土。

根据量纲分析理论^[7],公式(1)中的参数除 W/A 不能按照尺寸结构进行缩比外,其他均可以进行缩比。C. W. Young^[7]指出,截面密度 W/A 没有缩比性,如按几何缩比, W/A 比原值大,过载改变;如按 W/A 缩比,壳体应力改变,不能真实反映壳体强度、炸药安定性,可能掩盖长脉冲作用下的一些现象。另外,混凝土属于脆性材料,冲击响应特性复杂,混凝土材料本身存在损伤、空化、界面等现象,难以缩比。因此,C. W. Young^[7]建议弹体的缩比不能够超过设计尺寸的1/3~1/4。

本文中利用梁斌等^[4]的高速侵彻实验结果和本文的实验结果进行量纲分析和缩比理论验证。2种实验的战斗部结构尺寸基本相同,侵彻体的几何缩比 L 为3.2,截面密度 W/A 缩比为3.8,按照式(1)对侵彻深度 D 的预估,在1 300 m/s的速度条件下,

$$D_i/D_s = L(W/A)^{0.7} \quad (2)$$

式中: D_i 为实际侵彻深度, D_s 为缩比侵彻深度。

对梁斌等^[4]在1 200 m/s的侵彻速度条件下,质量为1.5 kg的弹体按1.5 m的侵彻深度进行外推得到质量为50 kg的弹体在1 200 m/s的侵彻速度条件下的侵彻深度应为12 m。本文中实验弹体在1 300 m/s的速度条件下,侵彻深度约为7 m,远低于按照缩比理论给出的侵彻深度。因此,从较小尺度的缩比实验结果,采用量纲分析原理进行外推,存在一定的不确定性,同时验证了C. W. Young^[7]提出的缩比尺寸不能过大的理论。

3 结 论

(1)采用合适的次口径发射技术,利用口径为320 mm的平衡炮能够将质量为50 kg级的侵彻体发射速度提高到1 300 m/s,侵彻弹体姿态稳定,无明显攻角。

(2)实验回收的弹体无明显变形和破坏,说明本文中设计的弹体结构能够承受1 300 m/s的正侵彻过载。

(3)弹体在侵彻过程中无明显的质量损失,在1 300 m/s的侵彻条件下,弹体的侵蚀现象不明显。

(4)弹体头部有一定的墩粗现象,需要进一步分析弹体头部变形对其侵彻能力的影响。

参考文献:

- [1] Kroshl W M, Pandolfini P P. Affordability analysis for DARPA programs[J]. Johns Hopkins APL Technical Digest, 2000,21(3):438-447.
- [2] Forrestal M J, Altman B S, Cargile J D, et al. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 1994,15(4):395-405.

- [3] Forrestal M J, Frew D J, Hanchak S J, et al. Penetration of grout and concrete targets with ogive-nose steel projectiles[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1996,18(5):465-476.
- [4] 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.
Liang Bin, Chen Xiao-wei, Ji Yong-qiang, et al. Experimental study on deep penetration of reduced-scale advanced earth penetrating weapon [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008,28(1):1-9.
- [5] 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. 2007: 488-494.
- [6] 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.
He Xiang, Xu Xiang-yun, Sun Gui-juan, et al. Experimental investigation on projectiles' high-velocity penetration into concrete targets[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010,30(1):1-6.
- [7] Young C W. Penetration equations[R]. SAND97-2426, 1997.

Experimental study on penetration of reinforced concrete by a high-speed penetrator with large mass *

Wang Bin, Cao Ren-yi, Tan Duo-wang

(National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics,
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: A metallic penetrator with the mass of 52 kg was designed by considering reasonably its structure and head shape. Based on the sub-caliber launch technology, the designed penetrator was accelerated to 1 300 m/s by a Davis gun to experimentally penetrate a six-layer reinforced concrete target with the size of 3.0 m×3.0 m×6.0 m. The penetration experiment displays that the sub-caliber penetrator departed distinctly from the Davis gun, its flight attitude was stable, the attack angle was less than 2°, and the residual velocity was about 260 m/s after the penetration of the penetrator into the reinforced concrete of 6 m thickness. After the penetration experiment, the recovered penetrator was intact and only a little plastic deformation on the penetrator head. And the penetrator mass lost around 1.2 percent, its length shortened 0.7 percent, and the erosion phenomenon was un conspicuous.

Key words: mechanics of explosion; metallic penetrator; sub-caliber launch technology; reinforced concrete

* Received 19 August 2011; Revised 27 February 2012

Corresponding author: Wang Bin, wbin98221@163.com