

doi: 10.7690/bgzdh.2016.02.019

不同头部形状弹体侵彻混凝土的试验研究

薛建锋, 沈培辉, 王晓鸣

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为研究弹体头部形状对侵彻性能的影响, 对不同弹体头部形状的弹体侵彻混凝土进行试验研究。设计平头型和卵形型 2 种不同类型的头部结构, 基于 DOP (depth of penetration) 方法进行试验对比分析。结果表明: 卵形结构弹体具有更好的侵彻性能, 其稳定侵彻弹洞平直、弹道稳定、弹体结构抗弯刚度良好, 卵形弹体头部越尖, 侵彻性能越好。该研究可为弹体结构设计提供一定帮助。

关键词: 爆炸力学; 弹体; 头部形状; 混凝土靶

中图分类号: TJ410.6 **文献标志码:** A

An Experimental Study on Projectiles Penetrating into Concrete Targets with Different Nose Shapes

Xue Jianfeng, Shen Peihui, Wang Xiaoming

(School of Mechanics Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: For research influence of projectile head shape on penetration performance, research penetration of different projectile head shape on concrete. Design flat projectiles and ogive-nose projectiles, based on DOP to carry out test comparison analysis. The results show that the ogive-nose projectiles have better penetration performance. The hole of stability penetration is straight, the structure of projectiles are good. The head of the ogive-nose projectile is more pointed, the penetration performance is better. This study can provide some help for the structure design of projectile.

Keywords: explosion mechanics; projectile; head shape; concrete target

0 引言

近年来, 地下工事大量出现(如地下指挥所、地下核武器设施等)。这些重要目标均加强了自身防卫, 有坚固的防护层, 而且有的还深入地下, 毁伤这些目标十分困难。然而这些目标均为高价值, 极有必要对其进行打击。为了有效地打击这些目标, 对侵彻体侵彻硬目标的侵彻能力提出了更高要求; 因此, 国内外学者对侵彻体侵彻混凝土等硬目标的研究成为热门^[1-10]。基于此背景, 笔者对不同弹体头部形状的弹体侵彻混凝土作了初步的试验研究, 通过试验研究头部形状对弹体侵彻性能的影响, 为攻击坚硬目标的钻地弹设计提供参考。

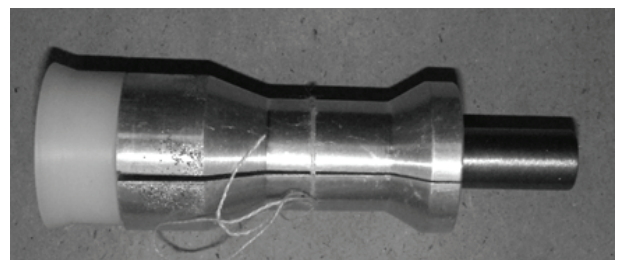
1 试验方案

DOP (depth of penetration) 试验方法用于获取弹体侵彻某一特定材料和结构靶板的侵彻深度。为比较不同头部形状弹体的侵彻性能, 笔者基于 DOP 试验方法进行了弹体侵彻混凝土靶的对比试验。

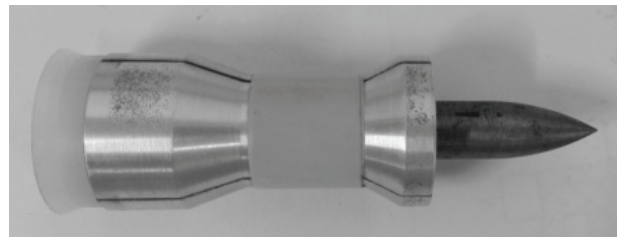
1.1 试验弹

影响侵彻性能的因素很多, 如弹体头部形状、

速度和材料, 而头部形状大体可分为卵形、锥形、钝头形、半球形和平头形。笔者设计的试验弹体为平头型和卵形 2 种结构类型, 其中卵形弹的长径比分别为 3 和 4, 在保证弹体质量不变的情况下, 3 种弹体结构如图 1 所示, 弹体直径为 10 mm, 质量约为 50 g。弹体材料为高强度钢 35CrMnSiA, 淬火后其屈服强度为 1 500 MPa, 硬度值 HRC 为 45。



(a) 平头型结构

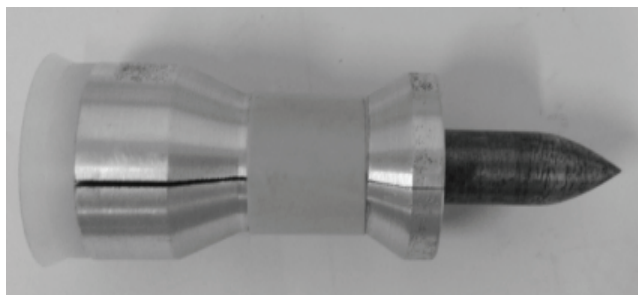


(b) 卵形结构 (CRH=4)

收稿日期: 2015-09-28; 修回日期: 2015-11-03

基金项目: 国家 973 计划 (6131430203)

作者简介: 薛建锋(1987—), 男, 江西人, 博士, 从事战斗部设计、终点效应与目标毁伤研究。



(c) 卵形结构(CRH=3)

图 1 弹体实物



图 2 试验靶体

1.2 混凝土靶体

采用强度为 C40 混凝土作为靶体，粗骨料为石灰石骨料，骨料平均粒径为 5 mm，水泥采用 PO42.5 级普通硅酸盐水泥，细骨料为粗砂，水泥、砂、石灰石骨料和水的质量按 1:1.2:2.2:0.4 配比。为了消除靶体侧面边界效应的影响，靶体直径取 500 mm，即弹体直径的 50 倍。为了近似半无限厚靶处理，靶体厚度需要够大，厚度取 300 mm。为了方便浇注混凝土靶及侵彻后靶体的完整性，靶板外围采用 3

mm 厚的钢圈加固。在浇注混凝土靶时加工了 3 个抗压试验样品，尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm，其浇注和养护均按照标准规范执行。养护后的靶体经过静态力学性能测试，经检验后达到 C40 要求，试验靶体如图 2 所示。

1.3 试验布局及方法

以小口径滑膛炮作为发射平台进行弹体侵彻混凝土靶试验，试验现场布置如图 3 所示，采用××火药作为发射药，通过装药量控制弹体着靶速度，用锡箔靶和双通道测试仪测量速度。利用高过载传感器对侵彻条件下的过载进行测试。



图 3 试验布置图

2 试验结果及分析

弹体侵彻混凝土试验共进行了 11 发，分 3 个速度段进行，第 4、11 发因飞行不稳，未完全进入靶体，数据不准。对着靶速度、侵彻深度、开坑深度和开坑直径都进行了测量，试验达到了研究所需的终点效应、侵彻能力、弹道稳定性、结构强度和过载测试等试验目的和要求，试验结果如表 1 所示。

表 1 试验结果

序号	头部形状	速度/(m/s)	开坑直径/mm	开坑深度/mm	侵彻深度/mm
1	卵形(CRH=4)	805	125	35.6	172
2	卵形(CRH=4)	920	142	40.4	186
3	卵形(CRH=4)	1 051	159	45.4	201
4	卵形(CRH=3)	802	113	32.6	132
5	卵形(CRH=3)	803	118	33.1	170
6	卵形(CRH=3)	924	134	37.2	176
7	卵形(CRH=3)	1 048	146	41.7	193
8	平头	806	102	30.1	159
9	平头	923	119	35.2	168
10	平头	1 045	132	35.3	162
11	平头	1 053	137	36.5	187

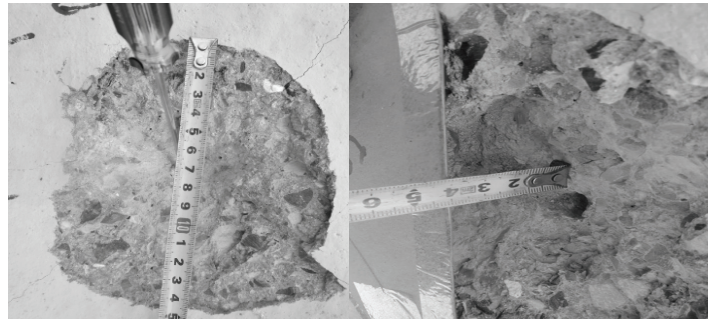
2.1 靶体破坏

图 4 为卵形弹侵彻试验后的靶体破坏情况，可以观察到弹体的着靶点和靶面破坏范围。观察侵彻后混凝土靶的正表面是漏斗形的开坑区，接着是隧道区。通过观察可以看出，开坑区的形状不是很规则，但是基本上是端面断面较大，都以弹着点的位

置为中心，逐渐缩小，最终为漏斗形。靶体正面无明显径向裂纹延伸到靶板边缘，其背面基本上无裂纹，说明边界效应很小且符合半无限靶条件，试验数据真实可靠。图 5 为平头弹的侵彻效果图，对比 2 种靶体破坏图可以发现，弹坑外形近似椭圆形，开坑区成漏斗状，且开坑深度为弹体直径的 3~4 倍。图 6 中的弹体因飞行不稳，未完全侵入靶体。



(a) 靶体正面



(b) 开坑区

图 4 卵形弹侵彻后的靶体破坏情况

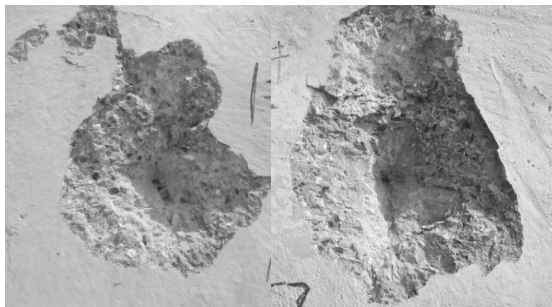


图 5 平头弹侵彻后的靶体破坏情况

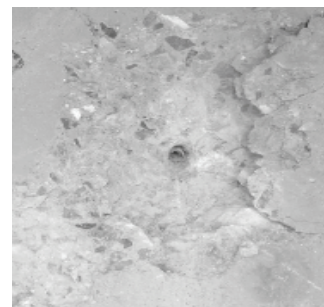


图 6 未完全进入靶体



(a) 剖开的弹道



(b) 弹体最终位置

图 7 靶体剖开后隧道形态

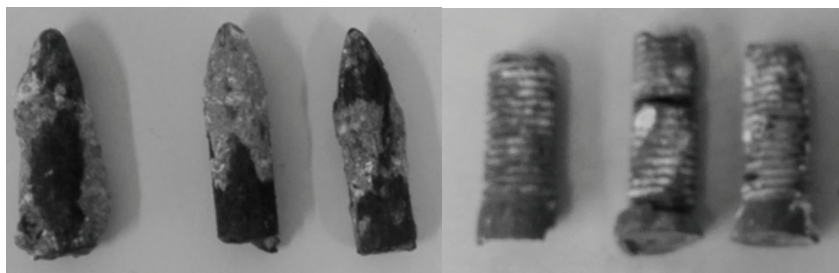


图 8 试验回收弹体

图 7 为卵形弹侵彻混凝土靶后形成的隧道，经 过测量后发现隧洞的直径略大于弹径(2 倍左右)，

形状并不是理论意义上的圆柱形，而是稍微有点弯曲，这与弹体在侵彻过程中存在一定的攻角有关，属于正常现象。

2.2 弹体破坏

图 8 为解剖靶体后回收到的部分弹体，由于在侵彻过程中弹靶接触面上剧烈的相互作用，产生很大的惯性力和强烈的摩擦效应，弹体表面的温度升高，高温使弹道周围粉碎的混凝土粉末在弹体表面形成包裹层。进一步观察到卵形弹体头部的磨损造成头部尖端轻微的变钝，平头弹头部变化不大。

2.3 DOP 结果

弹体对混凝土靶进行侵彻时，随着速度的增加，初始弹坑的开坑面积逐步增大，而开坑深度并没有显著的变化，为弹体直径的 3~4 倍。图 9 为弹体侵彻混凝土靶侵彻深度的对比，侵彻深度随速度呈线性关系。着靶速度在 800~1 100 m/s 内，卵形弹体的侵深高于平头弹体的侵彻深度，侵彻深度提高了 8%。CRH 为 4 的弹体侵彻深度比 CRH 为 3 的提高了 5%。弹体头部的 CRH 越大，使弹体在侵彻过程中保持更大的比动能，更有利于粉碎混凝土，减小弹体侵彻过程的阻力；因此，起到增加侵深的作用。

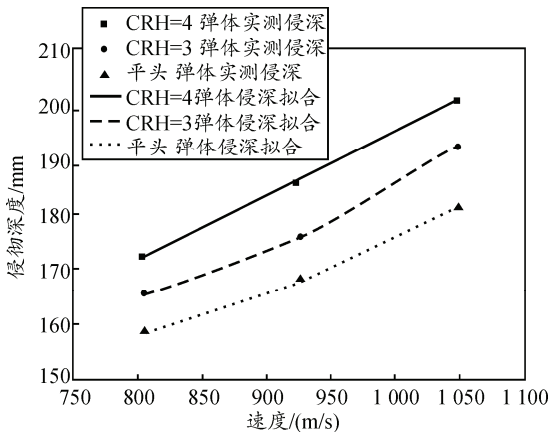


图 9 不同头部形状弹体侵深与速度的关系

通过不同头部形状的弹体侵彻混凝土试验可以得出如下结论：

- 1) 在着速、弹量和口径相同的情况下，卵形弹比平头弹有更大的侵彻深度；
- 2) 对于用一种头部形状的弹体，质量相同，口径相同，但弹头 CRH 不同，弹头部越尖，侵彻的深度越大。

卵形弹在 803 m/s 速度侵彻混凝土的过载曲线如图 10。从过载曲线可以看出：弹体侵彻过程中发生跳跃式升高，这是由于在开坑区弹体头部所受的

阻力最大，接着通过隧洞段后弹体所受的阻力来自周围混凝土。加速度逐渐减小直到为零，侵彻结束。

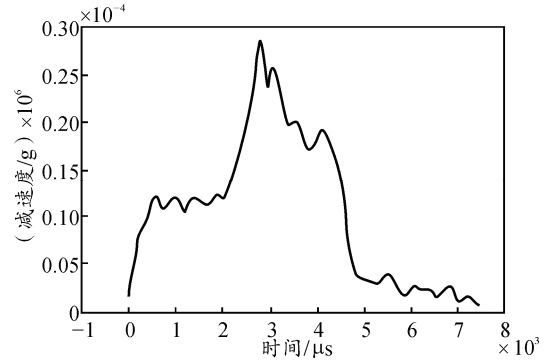


图 10 侵彻过载-时间曲线

3 结论

笔者基于 DOP 试验方法开展了不同头部形状的弹体侵彻混凝土靶研究，结果表明：卵形结构比平头结构有更大的侵深，可用于钻地弹的设计；弹体头部越尖，对侵彻越有利，但弹头部越长，对装药量有影响，从而影响到终点效应。弹头部长度与装药量必须根据目标特性及毁伤要求来进行协调。

参考文献：

- [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] Forrestal M J, Frew D J, Hanchak S J, et al. Penetration of ground and concrete targets with ogive-nose steel projectiles[J]. Int J Impact Eng, 1996, 18(5): 465-476.
- [3] 武海军, 黄凤雷, 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, 北京: 北京理工大学, 2007: 488-494.
- [4] 马爱娥, 黄凤雷. 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.
- [5] 吕中杰, 徐钰巍, 黄凤雷. 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.
- [6] 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.
- [7] 陈小伟, 高海鹰, 梁斌. 高侵彻能力的先进钻地弹结构分析[J]. 防护工程, 2007, 27(4): 6-9.
- [8] 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.
- [9] 吴昊, 方秦, 龚自明, 等. 考虑刚性弹弹头形状的混凝土(岩石)靶体侵彻深度半理论分析[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(6): 573-580.
- [10] 彭永, 方秦, 吴昊, 等. 不同头部形状弹体侵彻混凝土靶体的终点弹道参数分析[J]. 兵工学报, 2014, 35(2): 128-134.