

长杆射弹侵彻三种混凝土靶的实验研究*

张若棋, 汤文辉, 赵国民, 石志勇, 孙岩, 龚昌超

(国防科技大学理学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 为了研究钻地武器的侵彻性能, 在 57mm 口径的气炮上发射长杆射弹对三种靶体进行模拟侵彻实验。靶体为水泥砂浆石靶、钢纤维混凝土靶和含单层密排刚玉球的钢纤维混凝土靶。实验结果表明, 弹头形状对侵彻深度有明显影响, 当长杆射弹和撞击速度都相同时, 与侵彻钢纤维混凝土靶相比, 含单层密排刚玉球的钢纤维混凝土靶中的侵彻深度大约降低了 11%, 而水泥砂浆石靶中的侵彻深度增加了 12%。

关键词: 长杆射弹; 侵彻; 钢纤维混凝土靶; 刚玉球

中图分类号: O385 **文献标识码:** A

Experimental Study of the Long Rod Projectile Penetrating Three Kinds of Concrete Targets

ZHANG Rou-qi, TANG Wen-hui, ZHAO Guo-min, SHI Zhi-yong, SUN Yan, GONG Chang-chao

(College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to investigate the penetrating characteristics of earth penetrating weapons, a series of simulation experiments have been performed on 57mm diameter gas gun by launching long rod projectiles penetrating three kinds of concrete targets. These concrete targets are cement mortar, steel fiber reinforced concrete (SFRC) and the SFRC with a board made by tightly arranged corundum spheres inside. The experimental results indicate that the nose shape has important influence on the penetration depth, while targets are impacted by the same projectiles at the same velocity. The penetration depth into SFRC with the board is decreased about 11%, but the penetration depth into cement mortar is increased about 12% as compared with that into the SFRC.

Key words: long rod projectile; penetration; steel fiber reinforced concrete; corundum sphere

钻地弹是一种能够钻入目标深层引爆的弹药。地下爆炸对深层地下坚固工事的冲击波破坏效应比相同当量触地爆炸要大几倍甚至几十倍。因此, 钻地弹技术是提高武器威力的重要技术之一, 在国内外受到了广泛重视, 特别是美国在海湾战争和科索沃战争中已将它付诸于应用。

在发展钻地弹及其防护技术的过程中, 研究钻地弹的侵彻效应主要是以试验研究为主。但进行原型试验, 不仅规模大, 周期长, 而且耗资也大。因此, 利用小尺寸的长杆射弹进行模拟实验是一种行之有效的研究方法, 它已被广泛采用。我们自 2000 年起开展了钻地弹的侵彻效应及其防护技术研究, 取得了一些进展^[1-4]。

1 对水泥砂浆石靶的侵彻实验

侵彻实验是在国防科技大学理学院武器效应实验室的 57mm 口径压剪炮上进行的。压剪炮发射的长杆射弹是直径 $d = 10\text{mm}$ 的实心弹, 长径比 $L/d = 14$, 安装在尼龙制成的弹托上。发射时高压气体推动弹托和射弹一起运动, 并保证其与气炮的发射管同心。弹托飞出炮口后与射弹分离, 以保证只有射弹撞击靶体, 在分离之前利用刷子探针测出弹托的速度作为射弹击靶速度。射弹的材料是 Cr12 模具钢, 热处理后的洛氏硬度达到 HRC35 ~ 40。三种射弹的弹头分别为半锥角 $\alpha = 22.5^\circ$ 、 $\alpha = 45^\circ$ 的锥形弹头和 CRH = 4 正切卵形弹头。

实验中使用的靶体为浇灌在 $\phi 27 \times 30\text{mm}$ 软钢筒中的无配筋水泥砂浆石。水泥砂浆石用 525 号硅酸

* 收稿日期 2004 - 03 - 30
作者简介 张若棋(1935—), 男, 教授。

盐水泥、粒度不大于 1mm 的细砂和水,以 1:2:0.5 的配比按 GBJ80—85 要求制作。水泥砂浆石试样的平均密度 $\rho_0 = 2200\text{kg/m}^3$, 无约束抗压强度为 44MPa。

用长径比为 14、但弹头形状不同的三种长杆射弹进行了 12 发正侵彻试验。由于受到压剪炮靶室空间的限制,水泥砂浆石靶的尺寸不能太大,撞击速度控制在 200 ~ 400m/s 范围内。实验结果表明,在相同撞击速度下,半锥角 $\alpha = 22.5^\circ$ 的锥形弹头长杆射弹的侵彻深度明显比 $\alpha = 45^\circ$ 的锥形弹头长杆射弹的侵彻深度要大,而 CRH = 4 的卵形弹头长杆射弹的侵彻深度最大。

从侵彻试验回收的靶体中发现,在侵彻深度约几倍弹径范围内,弹体周围的靶体沿径向开裂成 6 ~ 8 块。靶体表面形成粉碎性漏斗形弹坑,弹坑表面的周界并不规则,若以圆周近似,其直径大约是弹径的 10 倍左右。漏斗坑以下的弹坑直径近似等于弹径,撞击速度低时靶体没有明显的破碎现象。

分别将 12 发实验的弹重、撞击速度、弹头形状参数、靶体强度和靶体密度等参数代入三个侵彻深度经验公式中可以算出侵彻深度的预估值,图 1 ~ 3 给出了预估值与实验结果之间的比较。由图可见,实验结果介于三种经验公式估计结果之间, $\alpha = 45^\circ$ 锥形弹的实测结果与 Forrestal^[5]公式结果比较接近。用 Bernard^[6]公式和郝保田公式^[7]预估 $\alpha = 22.5^\circ$ 和 CRH = 4 的长杆弹侵彻水泥砂浆石靶的侵彻深度时,预估值高于实验值,而用 Forrestal 公式计算的预估值则低于实际值,这表明上述经验公式都有其局限性。

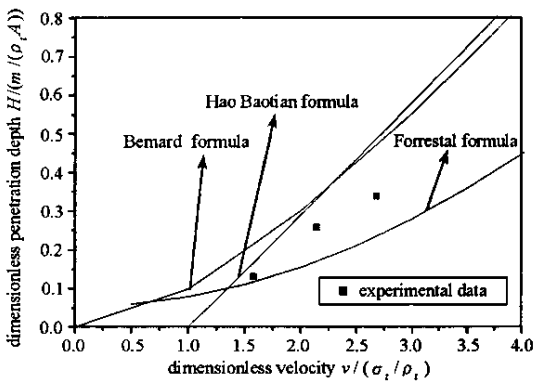


图 1 CRH = 4 卵形弹的无量纲侵彻深度
Fig.1 The dimensionless penetration depth of CRH = 4 ogival nose projectile

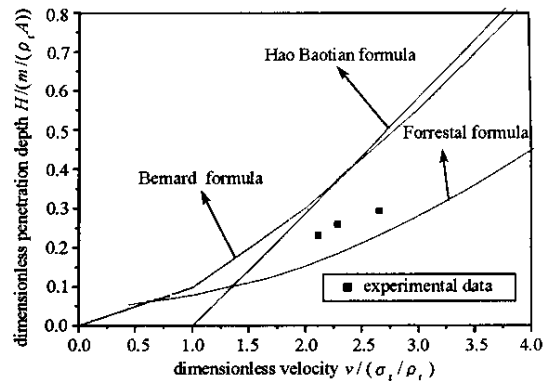


图 2 $\alpha = 22.5^\circ$ 的锥形弹的无量纲侵彻深度
Fig.2 The dimensionless penetration depth of the $\alpha = 22.5^\circ$ conical nose projectile

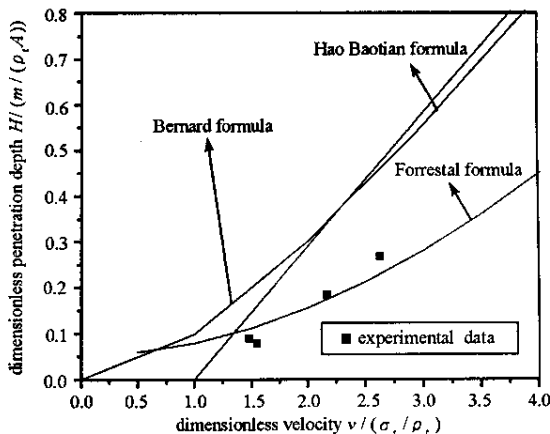


图 3 $\alpha = 45^\circ$ 锥形弹的无量纲侵彻深度

Fig.3 The dimensionless penetration depth of $\alpha = 45^\circ$ conical nose projectile

2 对钢纤维混凝土靶的侵彻实验

钢纤维混凝土已被广泛应用于交通路面、桥面、机场跑道和国防防护工程中。钢纤维混凝土是在混

凝土中掺入适量的不连续钢纤维而形成的一种新型混凝土。混凝土中加入钢纤维后可使力学性能得到改善,特别是提高混凝土的强度和延性,使原来呈脆性的混凝土成为具有一定塑性性质的复合材料。增强机理是混凝土中乱向分布的短纤维阻碍了内部裂缝的发生和扩张。与普通混凝土相比,当钢纤维的体积率在1.0%~2.0%时,抗拉强度提高25%~50%,抗弯强度提高40%~80%,抗压强度提高幅度较小,约15%。本实验用的靶体是浇灌在 $\phi 27 \times 30\text{cm}$ 软钢筒中的钢纤维混凝土,混凝土按C80标准进行配比,钢纤维的体积率为2%,靶体的密度为 $2560\text{kg}/\text{m}^3$,无约束抗压强度为 99MPa 。

用12种不同形状的长杆射弹,进行了撞击速度为 $300 \sim 500\text{m}/\text{s}$ 的20发正侵彻实验。实验结果表明,与水泥砂浆石靶相比,长杆射弹在钢纤维混凝土靶中的开坑体积和侵彻深度都明显减小,弹坑表面的周界比较规则,近似为圆形。造成这种差别的原因是混凝土中掺入适量的钢纤维能减少微裂纹的萌生和发展,降低裂纹的扩展速度,并且使靶体破损时消耗更多的撞击能量。

钢纤维混凝土靶中侵彻深度的实验值比较接近 Bernard 公式的计算值。实验结果表明,相同撞击速度下的侵彻深度随弹头的 CRH 值增加而增大,但这种增长趋势在 CRH 值大于4后逐渐缓慢,如图4所示。图4给出了三种撞击速度下,长径比为12的长杆射弹的侵彻深度随 CRH 值的变化。图5给出了六种 CRH 值、长径比均为12的长杆射弹的侵彻深度随撞击速度的变化,由图可以看出,不同弹头形状的长杆射弹的侵彻深度随撞击速度增加而增加,其增长率接近相同。

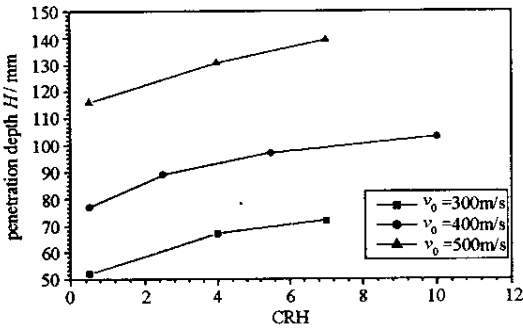


图4 侵彻深度随 CRH 值的变化

Fig.4 The penetration depth with the change of the CRH value

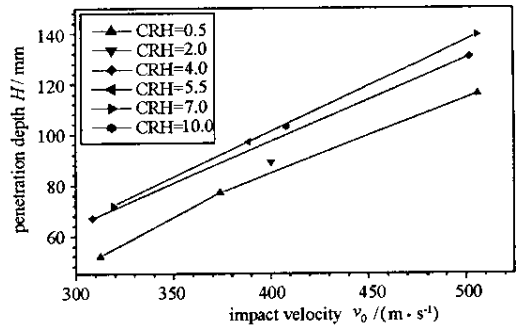


图5 侵彻深度随撞击速度的变化

Fig.5 The penetration depth with the change of the impact velocity

3 对含密排刚玉球层的钢纤维混凝土靶的侵彻实验

实验用的靶体为含刚玉球的钢纤维混凝土,混凝土按C80标准进行配比,钢纤维的体积率为2%。刚玉球材料的密度为 $3650\text{kg}/\text{m}^3$,洛氏硬度HRC大于82,无约束抗压强度大于 1700MPa 。靶体尺寸为直径27cm、高30cm的圆柱体。在靶体迎弹面的不同深度处放置单层或双层密排的刚玉球(见图6),以增加靶体的抗侵彻能力。

用长径比为12、CRH值分别为4.0和5.5的两种卵形弹头长杆射弹进行了28发正侵彻实验,撞击速度在 $360\text{m}/\text{s}$ 至 $500\text{m}/\text{s}$ 之间。实验结果表明刚玉球层的埋设深度、埋设方式、刚玉球直径的大小以及单位面积上的刚玉球质量等因素对侵彻深度都有一定的影响。加入单层密排直径为8mm刚玉球的靶体,其抗侵彻性能比无球的钢纤维混凝土靶体提高2%~11%。其效果基本上是随着刚玉球层埋深的增加而有所减弱。例如,对于CRH=4.0的长杆弹,在 $380 \sim 500\text{m}/\text{s}$ 的撞击速度范围内的侵彻情况,刚玉球层埋深40mm的靶体的抗侵彻性能提高约11%,但埋深55mm的靶体的抗侵彻性能只提高3%左右;当刚玉球层的埋深为70mm时,靶体的抗侵彻性基本上没有提高。

但是在埋深相同时,增大刚玉球直径,靶体的抗侵彻能力明显提高。例如,将放于55mm深度的单层密排刚玉球的直径由8mm换成15mm,靶体抗CRH=4.0长杆射弹的侵彻能力提高约9%。实验后将靶体剖开发现,卡在靶体中的长杆射弹发生了偏转和弯曲(见图6),弹头部产生明显的大变形而且有小部分剥落(见图7)。

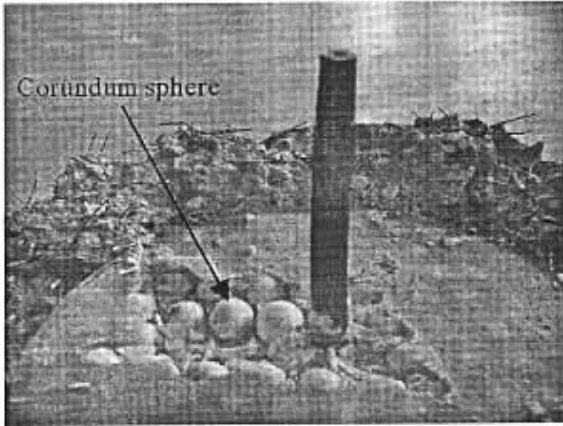


图6 侵彻后弹体弯曲

Fig.6 The bent projectile after penetration

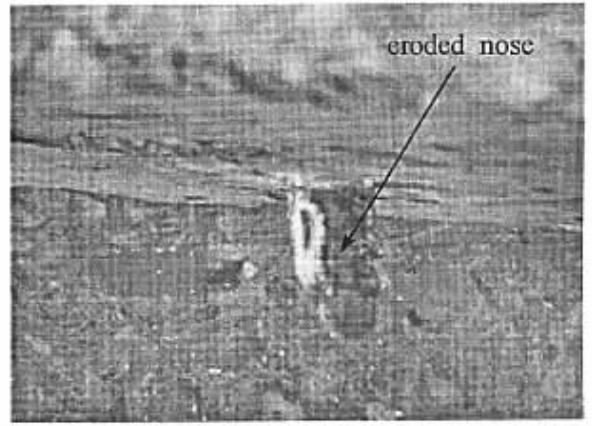


图7 弹头侵蚀脱落

Fig.7 The eroded nose

4 结论

(1)在相同撞击速度下,弹头形状对侵彻深度有重要影响。对于正切卵形弹头,侵彻深度随 CRH 值的增加而增大,但在侵彻钢纤维混凝土的实验条件下,这种增长趋势当 $CRH > 4$ 后逐渐缓慢。

(2)钢纤维混凝土靶中由于钢纤维的增强作用,使得在相同撞击条件下的侵彻深度和开坑体积都比水泥砂浆石靶中的小得多,而且弹坑表面的周界比较规则,近似为圆形。当长杆射弹和撞击速度都相同时,钢纤维混凝土中的侵彻深度与水泥砂浆石中的侵彻深度相比,大约降低了 12%。

(3)在钢纤维混凝土中加入单层密排的刚玉球层可以进一步减小侵彻深度,当长杆射弹和撞击速度都相同时,它比钢纤维混凝土中的侵彻深度降低了 2% ~ 11%。下降的程度与撞击条件、刚玉球的直径、刚玉球所处位置等因素有密切关系。

感谢王志兵和田保林老师在气体炮实验中的支持与帮助。

参考文献:

- [1] 张若棋,赵国民,汤文辉,等.侵彻战斗部外形设计的理论研究[R].国防科技研究报告,国防科技大学理学院,2002.
- [2] 张若棋,赵国民,石志勇.射弹弹形侵深系数的实验研究[J].船舶力学,2002年增刊,268-274.
- [3] 孙岩,汤文辉,等.长杆弹侵彻含刚玉球钢纤维砼的数值模拟研究[J].强度与环境,2004,31(2):8-11.
- [4] 石志勇,汤文辉,赵国民,张若棋.长杆射弹对钢纤维混凝土靶开坑特性的实验研究[J].国防科技大学学报,2004,26(5).
- [5] Forrestal M J, Altman B S, Cargile J D. An Empirical Equation for Penetration Depth of Ogive-Nose Projectiles into Concrete Targets[J]. Int. J. Impact Eng., 1994, 15: 395-405.
- [6] Bernard R S, Creighton D. Projectile Penetration in Soil and Rock: Analysis for Non-normal Impact[R]. U. S. Army Water-ways Experiment Station, Vicksburg, Technical Report SL-79-15, 1979.
- [7] 郝保田,陈亚娟,田宙,等.钻地武器侵彻深度的近似计算[A].中国土木工程防护学会第四届理事会暨第七次学术年会论文集,2000,186-190.

