

长杆射弹对钢纤维混凝土靶开坑特性的实验研究*

石志勇 汤文辉 赵国民 张若棋

(国防科技大学理学院 湖南 长沙 410073)

摘要 :为考察射弹对钢纤维混凝土靶的侵彻特性 ,采用 $\phi 57\text{mm}$ 轻气炮 ,进行了小尺寸模拟射弹对钢纤维混凝土靶 (钢纤维的体积分数为 2%) 的侵彻实验。实验中观察了钢纤维混凝土靶的开坑形状 ,测量了射弹的击靶速度 ,并且采用注沙法测出靶体的开坑体积 ,计算出射弹对靶体的侵彻体积 ,得到了长杆射弹的动能与侵彻体积的关系。引入射弹单位面积的冲击动能和靶体单位侵彻体积的冲击动能 ,结合钢纤维混凝土靶的实验数据 ,考察了两者之间的关系。

关键词 :侵彻 轻气炮实验 钢纤维混凝土

中图分类号 :O385 文献标识码 :A

Experimental Study of the Crater Performance about the Long Rod Projectile Penetrating Steel Fiber Reinforced Concrete Target

SHI Zhi-yong , TANG Wen-hui , ZHAO Guo-min , ZHANG Rou-qi

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

Abstract :The experiments of small scale projectiles penetrating SFRC targets are performed on the 57mm diameter light gas gun. They are intended to investigate the performance of the projectile penetrating into the steel fiber reinforced concrete (SFRC) targets (volume percentage of 5). The impacted crater shapes of SFRC targets are observed , and the velocities of projectiles impacting the targets are measured. The crater volume of the targets is measured by the pouring sand-filling method , and the penetration volume is calculated. The relation between the kinetic energy of the projectile and the penetration volume is obtained. The kinetic energy of per unit penetration volume and the impact kinetic energy per unit cross section are introduced to review their relation by dealing with the experimental data.

Key words :penetration ; light gas gun experiment ; steel fiber reinforced concrete

高性能混凝土不仅在建筑领域得到了广泛应用 ,而且在防护工程领域也受到了极大的重视。在水泥基材中掺入钢纤维可以有效地改善混凝土脆性 ,尤其是裂后韧性。近年来 ,国内外纷纷对高强度混凝土和钢纤维混凝土进行了抗常规武器的侵彻试验研究^[1]。

长杆射弹侵彻混凝土靶是一个复杂的动力学问题 ,侵彻过程涉及到射弹和靶体的许多因素 ,因而侵彻现象具有多样性。美国的 Forrester 等做了一系列卵形弹头射弹侵彻土壤、岩石和普通混凝土靶的实验 ,通过对实验结果的分析并结合空腔膨胀理论 ,得到了侵彻深度的 Forrester 经验公式^[2,3]。国内的某核技术研究所做了小尺寸卵形弹头射弹侵彻普通混凝土靶的实验 ,考察了侵彻深度和弹的初速、直径和质量以及靶的密度和强度的关系。洛阳的某研究所则做了不同钢纤维掺量的混凝土抗侵彻特性研究 ,并认为钢纤维体积百分数越高 ,抗侵彻能力越强。

作者对钢纤维体积分数为 2% 的混凝土靶进行了侵彻实验 ,研究了长杆射弹对钢纤维混凝土靶的侵彻效应 ,介绍了实验装置和实验方法 ,考察了射弹的开坑特性 ,分析了射弹的侵彻动能与对靶体的侵彻体积之间的关系。

* 收稿日期 2004 - 04 - 10
作者简介 :石志勇(1978—)男 ,博士生。

1 实验装置

实验长杆射弹用 $\phi 57\text{mm}$ 轻气炮发射,通过对注气压力的控制,可以调整弹丸速度。弹体击靶速度通过触发电探针利用示波器进行测量。弹丸的击靶状态通过在轻气炮的靶室内放置支架,确保靶体表面垂直,保证弹丸垂直撞击靶体。弹托应在满足强度要求的情况下尽可能减小质量,所以用尼龙制成。为保证射弹侵彻靶体时不受弹托的影响,在射弹击靶前用弹托分离盘将长杆射弹与弹托分离。为防止弹托分离盘对靶面及射弹的二次碰撞,在靶面前还安装有防护盘。轻气炮发射长杆射弹时,高压气体通过弹托推动长杆弹运动并保证其与气炮的发射管同心。

2 实验方法

实验用长杆射弹的名义质量 $M_0 = 65\text{g}$,名义长径比 $\xi = 8$ 和 12 。名义质量的计算没有考虑长杆射弹尾部的倒角,比实际质量略大。长杆射弹的弹径在 $9 \sim 12\text{mm}$,弹长在 $87 \sim 120\text{mm}$ 之间。长杆射弹的材料是 Cr12 模具钢。由于弹体侵彻时,主要是弹头部分承受阻力载荷,弹身部分承受载荷较小。为了防止淬火后弹体弯曲,弹头部分采用局部淬火。热处理后的洛氏硬度达到 HRC55。实验中正切卵形弹头的形状系数 ψ (卵形头部弧形半径与弹体直径之比)值分取 $0.5, 2.5, 4.0, 5.5, 7.0, 10.0$ 。

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 C80,每立方米钢纤维混凝土的用料质量组分为:水泥:硅粉:矿渣:砂:石:水:钢纤维:减水剂 = $350:50:100:750:1100:145:160:8.5$ 。按照混凝土养护的国家标准,在实验室养护 28 天。钢纤维混凝土靶体的密度通过三个试样来测定。试样为立方体,边长 15cm ,测出靶体的密度为 $2.56\text{g}/\text{cm}^3$,无约束抗压强度为 99MPa 。

3 实验结果及分析

3.1 钢纤维混凝土的开坑特性

图 1 是长杆射弹侵彻混凝土靶的开坑形状。与普通混凝土靶相比^[4],它的开坑体积较小,并且径向裂纹较细。弹坑内可以清晰地见到石子和钢纤维,弹坑呈漏斗形。弹速较低时,弹坑边缘径向裂纹很少,弹速较高时,存在较宽的径向裂纹贯穿靶面。开坑的形状基本上可看作椭圆,有的很接近圆形,坑深在 $1.5 \sim 4.0\text{cm}$ 的范围内。

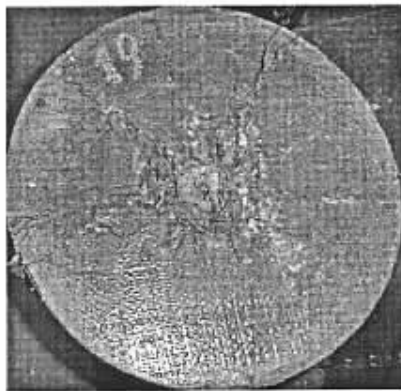


图 1 钢纤维混凝土靶的开坑形状

Fig.1 The crater shape of steel fiber reinforced concrete

3.2 钢纤维混凝土靶的侵彻体积

由于钢纤维混凝土靶破坏时,弹坑内残留有钢纤维,因此测量其开坑体积有一定的难度。这里参考文献[5]的方法,用注沙法测量了开坑体积。开坑体积与长杆弹侵入靶中的体积之和就是侵彻体积,计算公式如下:

$$V = V_0 + \frac{1}{4}\pi d^3\beta + \frac{1}{4}\pi d^3(h - l_0) \quad (1)$$

其中, V_0 是注沙的体积, d 是弹的直径, h 是弹嵌入靶体的深度, l_0 是弹头长, $l_0 = \sqrt{\Psi - 0.25d}$, β 是与弹头形状系数相关的常数^[6], 表达式为:

$$\beta = \frac{1}{2} \left\{ \left(4\Psi^2 - \frac{4}{3}\Psi + \frac{1}{3} \right) (4\Psi - 1)^{\frac{1}{2}} - 4\Psi^2(2\Psi - 1) \arcsin \left[\frac{(4\Psi - 1)^{\frac{1}{2}}}{2\Psi} \right] \right\}$$

采用不同形状的弹共进行了 19 发实验, 其中 14 发长杆射弹未从靶体脱落, 对这些实验数据进行分析, 得到动能和相应的侵彻体积如表 1 所示。

表 1 射弹的动能与侵彻体积

Tab.1 The kinetic energy and penetration volume of the projectiles

长径比	Ψ	直径 (mm)	质量 (g)	速度 (m/s)	长杆弹动能 (10^3J)	侵彻体积 (cm^3)	坑深 (cm)
8.0	0.5	11.06	61.21	415	5.26	61.4	2.28
	0.5	11.04	61.26	498	7.60	86.2	3.01
	2.5	11.18	61.43	491	7.39	96.2	3.57
	5.5	11.58	63.05	317	3.21	46.0	2.41
	7.0	11.48	60.81	409	5.09	47.0	2.07
12.0	0.5	9.54	61.14	313	2.99	47.3	2.57
	0.5	9.54	61.27	374	4.29	52.4	3.10
	0.5	9.56	61.43	506	7.86	87.2	3.72
	2.5	9.78	61.79	400	4.96	41.2	2.26
	4.0	9.86	61.66	309	2.93	49.5	2.13
	5.5	9.90	62.53	389	4.73	40.7	2.28
	7.0	9.88	62.17	319	3.16	39.6	2.46
	7.0	9.88	61.74	506	7.90	100.3	3.74
	10.0	10.0	61.38	400	5.12	52.0	2.58

图 2 给出了长杆射弹的动能与侵彻体积的关系。可以看出, 弹形对侵彻体积的影响不很明显, 而速度对侵彻体积的影响则很显著。当长杆射弹的侵彻动能在 3000 ~ 5000J 时, 侵彻体积基本相同, 但当侵彻动能大于 5000J 时, 侵彻体积随能量迅速增大。在速度小于 400m/s 即动能约小于 5000J 时, 长杆射弹只有部分侵入靶中, 弹头部碰撞所产生的冲击波对靶体的破坏区域基本不变, 因而侵彻体积改变不大。当速度超过 400m/s 时, 长杆射弹完全钻进靶中, 除了弹头部碰撞产生冲击波的破坏作用之外, 弹尾部和靶体的摩擦使靶体的破坏区域增大, 从而使侵彻体积增大。从实验结果可以观察到, 若弹体完全侵入靶体(此时侵彻深度大于弹长)靶体开坑的直径都较大。

用 E_s 表示弹体单位横截面积的冲击动能, 它等于长杆射弹的动能除以射弹的横截面积; 用 E_v 表示靶体单位侵彻体积的冲击动能, 它等于长杆射弹的动能除以弹对靶的侵彻体积。从 E_s 和 E_v 的定义可以看出, 上述两个参量实际上是在射弹击靶动能一定的情况下, 衡量射弹的横截面积与其对靶体的侵彻体积之间的关系。将 19 发实验数据处理后, 得到了 E_v 与 E_s 的关系如图 3 所示, 图中射弹的横截面积与冲击动能都不同。从图中看出, 产生单位侵彻体积所需的动能与弹体单位横截面积的冲击动能近似成正比。这说明在冲击动能一定的情况下, 射弹的横截面积越大, 射弹对靶的侵彻体积越大。射弹的横截面积近似相等的条件下, 冲击动能越大, 射弹对靶的侵彻体积越大。

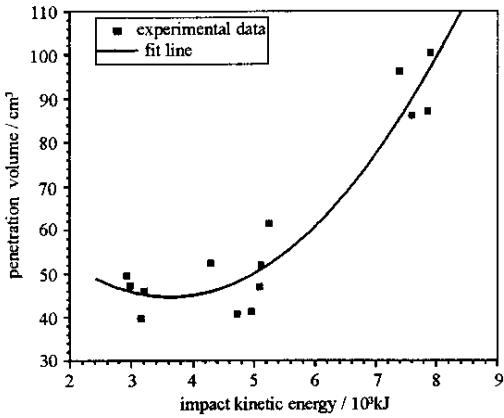


图2 射弹的动能与侵彻体积的关系

Fig.2 The relation between the kinetic energy of the projectile and the penetration volume to the target

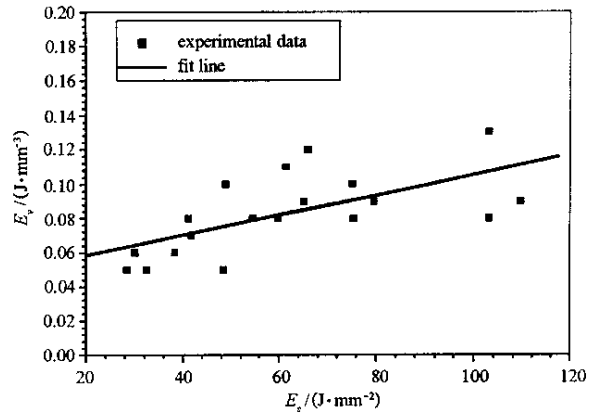
图3 E_s 与 E_p 的关系

Fig.3 The relation between E_s and E_p

4 结论

长杆射弹侵彻钢纤维混凝土靶的开坑基本成漏斗形,与普通混凝土相比,开坑体积与靶体的裂纹明显减小,这说明钢纤维混凝土的抗侵彻特性比普通混凝土要高。长杆射弹在钢纤维混凝土靶中的侵彻体积在速度小于 400m/s 时基本不变,在速度大于 400m/s 时,侵彻体积随速度明显增大,射弹对靶体单位侵彻体积所需要的动能与弹体单位横截面积的冲击动能近似成正比。

参考文献:

- [1] Dancygier A N, Yankelevsky D Z. High Strength Concrete Response to Hard Projectile Impact[J]. Int. J. of Impact Eng. 1996, 18(6) 583 - 589.
- [2] Forrestal M J, Luk V K. Penetration into Soil Targets[J]. Int. J. Impact Eng. 1992, 12 427 - 444.
- [3] Forrestal M J, Frew D J, et al. Penetration of Grout and Concrete Targets with Ogive-Nose Steel Projectiles[J]. Int. J. Impact Eng. 1996, 18 465 - 476.
- [4] 石志勇. 长杆射弹侵彻两种混凝土靶的特性研究[D]. 国防科技大学学位论文, 2002.
- [5] Jason T G, Shukla A. Multiple Impact Penetration of Semi-infinite Concrete[J]. Int. J. Impact Eng. 2001, 25 965 - 979.
- [6] 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.

