

文章编号: 1001-4888(2011)02-0216-05

杆弹侵彻钢纤维混凝土实验研究^{*}

赵晓宁¹, 何勇¹, 张先锋¹, 张年松¹, 王英维²

(1. 南京理工大学 智能弹药技术国防重点学科实验室, 江苏 210094; 2. 哈尔滨龙江特种装备有限公司, 黑龙江 150050)

摘要: 采用 DOP 实验方法, 进行了 35CrMnSiA 杆弹对不同钢纤维体积分含量的钢纤维混凝土的侵彻实验。分别研究了杆弹着速和钢纤维体积分含量对钢纤维混凝土抗侵彻性能的影响。实验表明, 随着弹速增加, 不同钢纤维体积分含量的钢纤维混凝土侵彻深度都会增加, 但钢纤维混凝土中弹体侵深增加较素混凝土缓慢; 而钢纤维能增强混凝土的抗侵彻性能, 且随钢纤维体积分含量的增加, 开坑直径显著减小, 侵彻行程也会降低。研究成果可用于指导防护工程及战斗部工程的设计。

关键词: 冲击动力学; 钢纤维混凝土; 杆弹; 正侵彻

中图分类号: O39 **文献标识码:** A

0 引言

高强度混凝土以其良好的抗侵彻性能, 一直在军事防护工程中有重要的作用, 其抗侵彻性能一直是学者们研究的重点^[1-3]。然而, 随着高强混凝土和超高强混凝土的迅速发展, 混凝土的脆性问题越来越突出。而钢纤维混凝土中的钢纤维对混凝土有明显的增强、增韧和阻裂效应, 可以从本质上改善混凝土的物理、力学性能^[1,4]。

国内外学者对钢纤维混凝土力学性能的影响参数做了很多研究。这多集中在钢纤维含量、钢纤维的外形^[5]、钢纤维长径比^[6]等对钢纤维基本力学性能及抗侵彻性能的影响研究上。在实验中, 无论是简单的准静态实验^[7], 还是 SHPB 动态实验^[8,9], 都证明钢纤维对混凝土强度、韧性的提高有积极作用, 但也发现对较低强度混凝土的强度提高作用不大。过去的一些抗杆弹侵彻实验^[5-7,10,11], 也证明相对于混凝土而言, 钢纤维混凝土对杆弹侵彻有更好的增强作用, 这要归功于材料的抗压强度及抗冲击韧性大幅提高。同时王斌^[12,13]在对钢纤维混凝土侵彻深度经验公式中引入了吸能因子, 共同考虑靶体强度和韧性的影响。但这些侵彻分析大多着靶速度较低, 随着随行装药、次口径发射、液体发射药、爆轰驱动等技术的成熟, 特别是电热炮、电磁炮等新概念火炮的发展, 使高速、甚至超高速侵彻成为可能^[14], 这就要求对高速和超高速下杆式弹对钢纤维混凝土的侵彻现象及机理进行系统的研究。而钢纤维混凝土在高速杆式弹的作用下的抗侵彻性能的表现如何, 也是大家所关心的。

本文通过穿深实验(DOP), 进行了 35CrMnSiA 钢截锥形头部杆弹对不同钢纤维体积分含量(V_f)的钢纤维混凝土的侵彻实验。研究了钢纤维体积分含量为 0、3% 和 6% 的钢纤维混凝土, 在杆弹不同着速下的抗侵彻性能, 研究了穿深随钢纤维含量、穿深随杆弹着速的变化关系。

^{*} 收稿日期: 2010-12-03; 修订日期: 2011-01-29

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(613143)资助

通讯作者: 何勇(1964—), 男, 博士, 研究员。主要研究领域: 弹头与战斗部技术。E-mail: yhe1964@mail.njust.edu.cn

1 钢纤维混凝土靶体的制备与静态测试

1.1 靶体的制备

钢纤维混凝土靶体基体强度为 40MPa,钢纤维体积含量分别为 0、3%和 6%,具体配合比如表 1 所示。钢纤维混凝土靶体中钢纤维直径为 0.5mm,长径比为 50~55,材料为 Q195,抗拉强度为 315MPa~430MPa。实验用靶采用直径为 250mm 圆柱体,而为了减少侧面稀疏波对靶体终点效应的影响,靶体周围用 2mm 的 A3 钢箍加固,其浇注和养护均按照标准规范执行。

表 1 C40 钢纤维混凝土靶配合比

Tab. 1 Mixture of C40 SFRC target

$V_f(\%)$	每立方米混凝土材料用量(kg)							
	钢纤维	水泥	粗骨料	砂	水	粉灰	矿粉	减水剂
0	0	280	1050	741	170	70	70	5.0
3	235.5	300	900	800	170	65	65	5.3
6	471	340	850	754	170	55	55	6.3

1.2 靶体准静态力学性能测试

抗压试件尺寸为 150×150×150(mm),其浇注和养护均按照标准规范执行。抗压测试机为无锡市锡东建材设备厂出产的压力试验机,其最大试验力为 2000kN。测试分别进行了三组,钢纤维混凝土准静态平均力学性能如表 2 所示。随钢纤维体积含量的增加,其抗压强度基本不变;但体积含量为 3%和 6%的钢纤维混凝土的抗折强度比素混凝土分别增加 33.3%和 56.3%。而且从完成测试的试件破坏形态来看(如图 1),添加钢纤维之后混凝土具有明显的阻裂效果。

表 2 钢纤维混凝土准静态力学性能

Tab. 2 Quasi-static mechanical properties of SFRC

钢纤维体积含量(%)	抗压强度(MPa)	抗折强度(MPa)
0	42.3	4.8
3	42.4	6.4
6	42.6	7.5



图 1 抗压试件测试完成后的破坏形态

Fig. 1 Failure deformation of the compression cubes

2 实验弹体及实验方法

2.1 弹体材料及结构

为了尽可能地提高弹体着靶速度,实验用弹直径为 7mm,长径比分别是 13.2,头部为截锥形,质量为 22.8g(如图 2 所示)。材料采用 35CrMnSiA,其密度为 8.0g/cm³,屈服强度为 1280MPa,伸长率为 0.09,断面收缩率为 0.40,硬度 HRC 为 28~32。实验用弹体着速为 0.9km/s~1.2km/s。

2.2 DOP 实验方法

弹体由 Φ14.5mm 弹道枪进行发射,通过改变火药装药量来改变弹丸出枪口速度。弹丸着靶速度,

采用锡箔断靶和双通道测时仪进行测试。枪口距第一测速靶 4.75m,距第二测速靶 5.71m,距靶体 6.75m,测速靶距为 0.96m。实验布置图如图 3 所示。



图 2 直径为 7mm,长径比为 13.2 弹体

Fig. 2 The projectiles of $\Phi=7\text{mm}$ and $L/D=13.2$

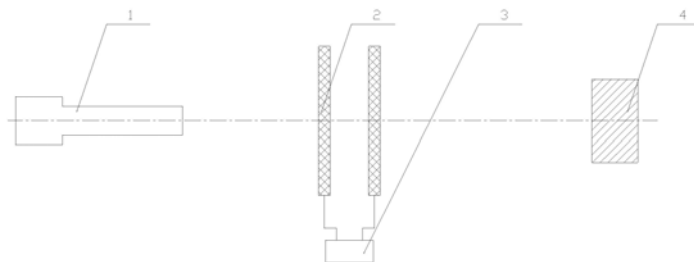


图 3 穿深(DOP)实验布局示意图

(1—弹道枪;2—测速锡箔靶;3—双通道测速仪;4—靶体)

Fig. 3 The layout of DOP experiment

3 实验结果及讨论

3.1 实验结果

侵彻试验中,弹丸侵彻速度范围为 $0.9\text{km/s}\sim 1.2\text{km/s}$ 。由于高速状态下弹丸飞行稳定性的影响,试验有效数据为 8 组,如表 3 所示。其中,N 为有效数据组编号,V 为侵彻速度, V_f 为钢纤维体积含量,H 为侵彻深度,L 为侵彻行程, D_h 为侵彻孔径, D_c 为开坑直径。

表 3 杆弹侵彻钢纤维混凝土结果

Tab. 3 Results of penetrating SFRC by long-rod projectiles

N	$M_p(\text{g})$	$V(\text{m/s})$	$V_f(\%)$	$H(\text{mm})$	$L(\text{mm})$	$D_h(\text{mm})$	$D_c(\text{mm})$
1	33	/	6	136	/	15	57
2	33	1089	6	>200	/	13	45
3	35	1259	6	/	/	15	75
4	31	1011	6	250	285	12	35
5	31	950	3	/	/	13	80
6	31	967	0	200	207	11.5	110
7	30	920	6	170	197	13	55
8	31	1023	0	220	220	13	80

3.2 靶面破坏特征分析

图 4 是靶面破坏情况图,由于靶体的自由表面效应,在弹丸入射方向会形成一个漏斗坑;随后进入弹丸稳定侵彻阶段,形成一个直径大于弹丸直径的穿孔。而围绕漏斗坑,会出现若干条径向裂纹。随着靶中钢纤维含量的增加,漏斗坑直径明显变小,漏斗坑容积明显减小;素混凝土中开裂最明显,当 $V_f=3\%$ 时,开裂程度减小,当 $V_f=6\%$ 时,几乎没有径向裂纹产生;在不同钢纤维含量的靶中,弹丸侵彻孔径相差不大,都约为弹丸直径的两倍。

3.3 钢纤维含量的影响分析

对第 6 组和第 7 组数据的比较中可以发现,在侵彻速度相当的情况下,当钢纤维含量由 0 变化到 6% 时,开坑直径明显减小,减小约 50%;弹丸侵彻行程也会减小,减小约 5%。说明钢纤维能明显增强混凝土的抗侵彻性能,更好地抑制靶体的开坑破坏,而对弹体稳定侵彻阶段也有一定抑制作用。

3.4 弹体着速的影响分析

从第 4 组和第 7 组数据的比较中可以发现,在钢纤维含量为 6% 时,随侵彻速度增加约 9.9%,弹丸



图4 靶面破坏特征

Fig. 4 Failure deformation of targets after penetration

侵彻行程增加4.5%。从第6组和第8组数据的比较中可以发现,在素混凝土靶中($V_f=0$),随侵彻速度的增加约5.8%,弹丸侵彻行程增加6.3%。这说明随着弹丸着速增加,两种靶体的弹丸侵彻行程都会增加,但对钢纤维混凝土侵彻行程的增加较素混凝土缓慢。

4 结论

虽然试验样本数较少,但通过钢纤维混凝土抗杆弹高速侵彻实验,仍可以得出下列结论:

(1) 靶体进行了准静态力学性能测试,通过抗压测试,得到了靶体随钢纤维体积分量的增加,其抗压强度基本不变,但体积分量为3%和6%的钢纤维混凝土的抗折强度比素混凝土分别增加33.3%和56.3%,添加钢纤维之后混凝土具有明显的阻裂效果的结论;

(2) 钢纤维能明显增强混凝土的抗侵彻性能,且随着钢纤维体积分量从0增加到6%,侵彻行程减小约5%,开坑直径减小约50%;

(3) 通过弹体穿靶实验表明,随着弹速增加,对不同钢纤维含量的钢纤维混凝土的侵彻深度都会增加,但钢纤维混凝土中弹体侵深增加较素混凝土缓慢;而钢纤维能增强混凝土的抗侵彻性能,且随钢纤维体积分量的增加,开坑直径显著减小,侵彻深度相应降低。这一结果可应用于防护工程及战斗部工程设计与指导。

钢纤维无疑会增加混凝土的抗侵彻性能,但如何定量地表达它的作用,尤其是弹丸速度进一步增加后,对弹、靶系统会产生什么影响,这将是下一步要进行的工作。

参考文献:

- [1] Dancygier A N, Yankelevsky D Z. High strength concrete response to hard projectile impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 1996, 18(6): 583—599.
- [2] 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.
- [3] Dawson A, Bless S, Levinson S, et al. Hypervelocity penetration of concrete[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(12): 1484—1489.
- [4] 林小松,杨果林. 钢纤维高强与超高强混凝土[M]. 北京:科学出版社,2002:2—9 (Lin Xiaosong, Yang Guolin. High-strength and super high-strength steel fiber concrete[M]. Beijing: Science Press, 2002: 2—9 (in Chinese))
- [5] 纪冲,龙源,万文乾等. 钢纤维混凝土抗侵彻与贯穿特性的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(2): 178—185 (Ji Chong, Long Yuan, Wan Wengan, et al. On anti-penetration and anti-perforation characteristics of high-strength steel fiber-reinforced concrete[J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(2): 178—185 (in Chinese))
- [6] 胡秀章,刘永胜,王肖钧等. 超短钢纤维混凝土抗侵彻性能的实验研究[J]. 弹道学报, 2008, 20(2): 5—8 (Hu Xiuzhang, Liu Yongsheng, Wang Xiaojun, et al. Experimental study on penetration resistance of ultra-short steel fiber reinforced concrete[J]. Journal of Ballistics, 2008, 20(2): 5—8 (in Chinese))
- [7] 刘瑞朝,吴飏,张晓忠等. 高强高含量钢纤维混凝土抗侵彻性能试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(4): 368—372 (Liu Ruizhao, Wu Biao, Zhang Xiaozhong, et al. Tests on Resisting Projectiles Penetration of High Strength

- Volume Steel Fiber Concrete[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002, 22(4): 368—372 (in Chinese))
- [8] 刘永胜, 王肖钧, 金挺 等. 钢纤维混凝土力学性能和本构关系研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2008, 37(7): 717—723 (Liu Yongsheng, Wang Xiaojun, Jin Ting, et al. Study on the mechanical properties and constitutive relation of steel fiber reinforced concrete[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2008, 37(7): 717—723 (in Chinese))
- [9] 巫绪涛, 胡时胜, 陈德兴 等. 钢纤维高强混凝土冲击压缩的试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(2): 125—131 (Wu Xutao, Hu Shisheng, Chen Dexing, et al. Impact compression experiment of steel fiber reinforced high strength concrete[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(2): 125—131 (in Chinese))
- [10] 石志勇, 汤文辉, 赵国民 等. 混凝土靶中侵彻深度的相似性研究[J]. 弹道学报, 2007, 17(1): 62—66 (Shi Zhiyong, Tang Wenhui, Zhao Guomin, et al. Similarity study of the penetration depth for the concrete targets[J]. *Journal of Ballistics*, 2007, 17(1): 62—66 (in Chinese))
- [11] Teng T L, Chu Y A, Chang F A, et al. Development and validation of numerical model of steel fiber reinforced concrete for high-velocity impact[J]. *Computational Materials Science*, 2008, 42(1): 90—99.
- [12] 王斌, 金丰年, 徐迎 等. 吸能因子在计算弹体侵彻钢纤维混凝土深度中的应用[J]. 兵工学报, 2005, 26(4): 477—480 (Wang Bin, Jin Fengnian, Xu Yin, et al. Energy absorption factor in calculation of projectile penetration depth for steel fiber concrete[J]. *Acta Armamentarii*, 2005, 26(4): 477—480 (in Chinese))
- [13] 王斌, 金丰年, 徐汉中. 武器侵彻钢纤维混凝土深度的实用计算方法[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(4): 376—381 (Wang Bin, Jin Fengnian, Xu Hanzhong. The engineering method for calculating the depth of penetrating steel fiber concrete[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004, 24(4): 376—381 (in Chinese))
- [14] 周彦煌, 陆欣, 刘东尧. 几种超高速射弹发射技术可行性的探索研究[J]. 弹道学报, 1996, 8(4): 8—12 (Zhou Yanhuang, Lu Xin, Liu Dongyao. On the feasibility of several launching technology about hyper-velocity projectile [J]. *Journal of Ballistics*, 1996, 8(4): 8—12 (in Chinese))

Experimental Study of Long-rod Projectile Penetration into Steel Fiber Reinforced Concrete

ZHAO Xiao-ning¹, HE Yong¹, CHEN Hui-wu¹, WANG Yingwei²

(1. Ministerial Key Laboratory of ZNDY, Nanjing University of Science & Technology, Jiangsu 210094, China;

2. Harbin Longjiang special equipment Ltd., Heilongjiang 150050, China)

Abstract: Penetration experiments of 35CrMnSiA long-rod projectile were performed for steel fibre reinforced concrete (SFRC) with different steel fiber volume fraction based on DOP methods. The effect of long-rod projectile's striking velocity and steel fiber volume fraction on SFRC's anti-penetration performance was investigated, respectively. Experimental results show that as the striking velocity increasing, the penetration depth increases for all SFRC with different steel fiber volumes. But the increase of SFRC penetration depth is slower than that of plain concrete, which indicates that the steel fiber can considerably enhance the penetration resistance of concrete. As the steel fiber volume fraction increasing, the penetration distance decreases remarkably and penetration depth decreases accordingly. Above results be used for the design of defence project and warhead project.

Keywords: mechanics of impact; steel fibre reinforced concrete (SFRC); long-rod projectile; normal penetration; experimental study