

文章编号:1671-6833(2004)01-0001-05

钢纤维高强混凝土断裂性能的试验研究

高丹盈, 王占桥, 朱海堂

(郑州大学环境与水利学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 通过 18 个尺寸为 200 mm×170 mm×100 mm 的钢纤维高强混凝土和素高强混凝土楔劈试件拉伸试验, 研究了钢纤维类型、体积率对高强混凝土断裂初度(K_{IC})、断裂能(G_F)、临界裂缝嘴张开位移($CMOD_C$) 和裂缝尖端张开位移($CTOD_C$) 的影响. 试验结果表明, 钢纤维体积率对高强混凝土的断裂性能有显著影响; 与铣削型和剪切波纹型相比, 切断弓型钢纤维对钢纤维高强混凝土断裂性能的提高更为显著, 断裂初度增益比分别提高了 19.9%, 25.2%, 断裂能增益比分别提高了 355.4%, 148.0%, 临界裂缝嘴张开位移增益比分别提高了 163.3%, 148.4%, 临界裂缝尖端张开位移增益比分别提高了 225.9%, 935.8%.

关键词: 高强混凝土; 钢纤维; 断裂初度; 断裂能; $CMOD_C$; $CTOD_C$

中图分类号: TM 714 文献标识码: A

0 引言

混凝土本质上属脆性材料, 高强度后其固有的脆性问题更为突出. 高强混凝土(HSC) 的脆性性能在一定程度上影响其推广应用, 而且还可能引发灾难性工程事故. 为了改善高强混凝土的力学性能及其断裂特性, 通常在其基体中加入一定数量的钢纤维. 钢纤维在 高强混凝土基体开裂后的桥联作用, 使 高强钢纤维混凝土在破坏之前有较大的缓慢裂纹扩展以及在裂缝扩展区存在纤维跨接区, 从而阻碍混凝土内部裂纹的扩展, 显著提高混凝土的韧性和延性, 有效避免无征兆脆性破坏的发生. 通常把钢纤维能起到阻裂作用的区域称为“假塑性区”^[1]. 普通强度的钢纤维混凝土, 钢纤维与混凝土基体间的界面粘结强度较小, 不利于钢纤维强度的发挥, 提高混凝土基体强度是解决这一问题的有效举措. 钢纤维高强混凝土力学性能优异, 可应用于大跨度、高耸、重载和薄壁结构, 对于承受动荷载的结构效果更为显著^[2].

楔劈试验方法最早由 Hillemeier 等人提出, 它利用物理学上的楔劈原理, 即在较小的纵向力作用下, 在试件的预制裂缝切口处产生两个较大的水平分力, 并在切口尖端处产生应力集中, 当其主

拉应力达到混凝土抗拉强度时, 在切口尖端处将产生宏观裂缝. 这种试验的优点在于, 在很小的试件自重条件下能得到很大的混凝土断裂面, 可以忽略试件自重对断裂参数的影响, 对试验机刚度要求较低, 易于测得荷载一位移全过程曲线等^[3].

目前, 市场上钢纤维的品种繁杂, 形状各异, 它们对混凝土的增强、增韧效果各不相同. 为了探讨不同类型钢纤维对高强混凝土断裂性能的改善效果, 本文利用楔劈拉伸试件, 测定了三种不同类型钢纤维的钢纤维高强混凝土的断裂参数, 并与同强度等级的高强混凝土断裂性能进行了比较.

1 试验概述

1.1 试件制备

采用楔劈拉伸试验方法进行钢纤维高强混凝土楔劈拉伸试验, 试件形状及尺寸如图 1 所示. 试件尺寸 $L \times h \times t = 200 \text{ mm} \times 170 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 相对裂缝切口深度 $a_0/h = 0.4$. 试件混凝土采用强制式搅拌机拌和, 台式振动器振动成型, 24h 后拆模, 室内塑料薄膜覆盖, 洒水养护 28d.

为消除基体混凝土变异对试验结果的影响, 浇筑钢纤维混凝土的同时, 浇筑同强度等级的素高强混凝土作为对比试件.

收稿日期: 2002-11-10; 修订日期: 2004-01-06

基金项目: 河南省自然科学基金资助项目(0311052800)

作者简介: 高丹盈(1962-), 男, 河南省三门峡市人, 郑州大学教授, 博士生导师, 主要从事新型建筑复合材料及其结构性能方面的研究.

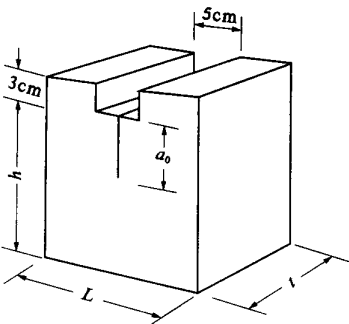


图 1 试件形式及尺寸

Fig. 1 Specimen shape and size

根据试验目的,共设计 3 组,每组各 3 个纤维混凝土试件和 3 个同强度等级的素高强混凝土试件,共 18 个楔劈拉伸试件,并预留 36 个 150 mm×150 mm×150 mm 的立方体试块,进行抗压、劈裂抗拉强度测试.采用的钢纤维品种为铣削型钢纤维、切断弓型钢纤维、剪切波纹型钢纤维,钢纤维体积率 ρ_f 为 0%,1.5%.3 种类型钢纤维的特征参数见表 1.试验中采用的混凝土配合比为:水灰比 0.3,砂率 40%,粗骨料为最大粒径 20 mm 的石灰石碎石,细骨料为中粗河砂,细度模数 3.41;水泥采用郑州市金龙股份有限公司生产的龙源牌 42.5 级普通硅酸盐水泥,28 d 平均抗压强度为 53.7 MPa;FDN-1 高效减水剂,掺量为水泥用量的 1.5%.裂缝由埋入 2 mm 厚的钢片预制而成,钢片端部磨成刀刃状.试验龄期 70 d.

表 1 钢纤维特征参数

Tab. 1 Material properties of steel fiber			
钢纤维类型	平均长度	等效直径	长径比
	l_f/mm	d_f/mm	l_f/d_f
铣削型(MF)	32.312	0.9436	34.24
切断弓型(BF)	32.426	0.5648	57.40
剪切波纹型(SF)	30.529	0.5592	54.60

1.2 试验过程

所有试验均在 3 000 kN 电液式压力试验机上

表 2 钢纤维高强混凝土试件力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of steel fiber reinforced HSC					
试件编号	纤维体积率 $\rho_f/\%$	相对切口深度 a/h_0	立方体抗压强度 f_{cu}/MPa	劈裂抗拉强度 f_{ts}/MPa	弹性模量* E/GPa
MF W15	1.5	0.4	80.40	5.61	44 268
MF W15-0	0	0.4	75.35	2.82	44 379
BF W15	1.5	0.4	83.26	7.36	47 576
BF W15-0	0	0.4	82.99	3.10	47 292
SF W15	1.5	0.4	82.64	5.24	40 761
SF W15-0	0	0.4	72.13	5.05	40 432

说明:前两个字母表示纤维类型,其中 MF、BF、SF 分别表示铣削型、切断弓型、剪切波纹型钢纤维;第三个字母表示试件为楔劈拉伸试件.前两个数字表示 10 倍纤维体积率,-0 表示与相应钢纤维高强混凝土配合比相同的高强混凝土对比试件(下同).

进行,荷载传感器的量测范围为 0~30 kN,试验加载与量测见图 2.加载过程采用连续稳定的加载方式,接近破坏时降低加载速度.采用自制的夹式引伸量测裂缝嘴张开位移 $CMOD$ (Crack Mouth Opening Displacement) 和裂缝尖端张开位移 $CTOD$ (Crack Tip Opening Displacement),通过动态应变仪和 $X\sim Y$ 函数记录仪同时测得竖向荷载-裂缝嘴张开位移曲线 (P_v-CMOD) 与竖向荷载-裂缝尖端张开位移曲线 (P_v-CTOD),经过 Adobe Photoshop 7.0 等计算机图形处理软件处理,得到系列钢纤维高强混凝土试件的 P_v-CMOD 、 P_v-CTOD 曲线.图 3~图 8 为本文实测的典型钢纤维高强混凝土试件的 P_v-CMOD 和 P_v-CTOD 曲线.根据这些曲线并结合试验过程中对试验现象的观察,可以对钢纤维高强混凝土的断裂性能进行定性和定量分析.

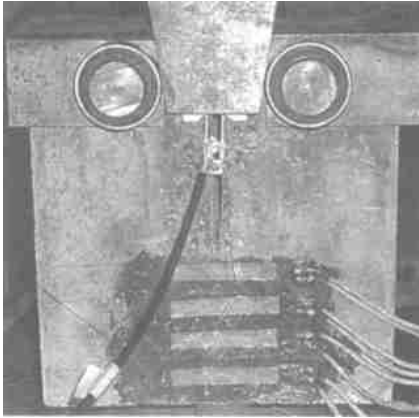


图 2 试验加载与量测图

Fig. 2 Loading device of wedge splitting test

2 试验结果与分析

与楔劈拉伸试件对应的钢纤维高强混凝土立方体试块的力学性能指标的测试结果见表 2 (*为文献[9]试验数据,配合比及试件制备方法与本次试验相同).

从表 2 可以看出,切断弓型钢纤维高强混凝土抗压强度较其它类型的钢纤维高强混凝土稍有提高,但是提高有限,劈裂抗拉强度有较大提高.这从一个侧面反映了切断弓型钢纤维对高强混凝土性能改善的优越性.

根据试验测得的钢纤维高强混凝土试件的竖向极限荷载 P_v 、 $P_v - CMOD$ 和 $P_v - CTOD$ 曲线(见图 3~图 8),再分别将竖向荷载换算为横向荷载 P_h ,分别计算钢纤维高强混凝土的断裂韧度、断裂能、初裂荷载 P_{cra} 、临界裂缝嘴张开位移($CMOD_c$)、临界裂缝尖端张开位移($CTOD_c$)。

试件断裂韧度(K_{Ic}) 计算采用如下公式^[4]：

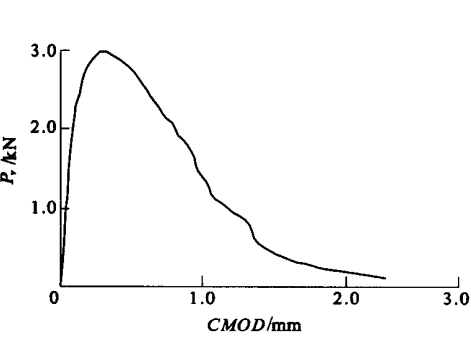


图 3 典型 MF W15 荷载—裂缝嘴张开位移曲线

Fig. 3 Typical load - CMOD curve for MF W15

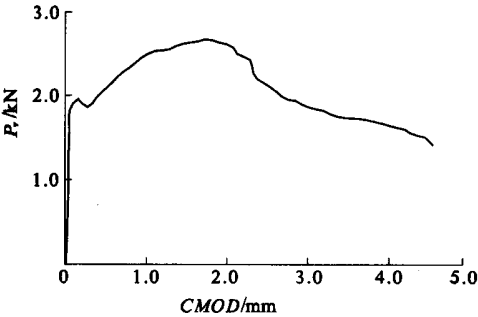


图 5 典型 BF W15 荷载—裂缝嘴张开位移曲线

Fig. 5 Typical load - CMOD curve for BF W15

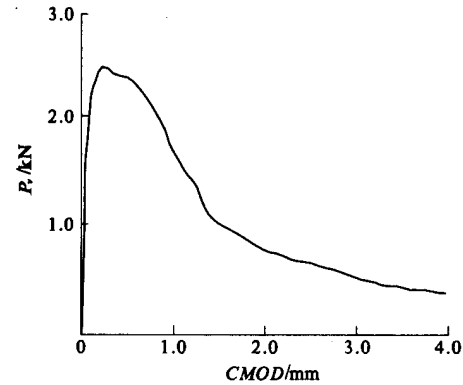


图 7 典型 SF W15 荷载—裂缝嘴张开位移曲线

Fig. 7 Typical load - CMOD curve for SF W15

$$K_I = \frac{3.675(1 - a_0/h)^{-3/2} P_h}{t \sqrt{h}} \tag{1}$$

式中： P_h 为最大横向荷载，N； h 为试件高度，mm； t 为试件厚度，mm； a_0 为初始裂缝长度，mm。

试件断裂能按以下公式计算^[4]：

$$G_F = \frac{W_0}{A_{lig}} \tag{2}$$

式中： W_0 为 $P_h - CMOD$ 曲线下的面积，N·m； A_{lig} 为试件韧带面积，m²。

不同纤维型钢纤维高强混凝土断裂韧度 K_{Ic} 、初裂荷载 P_{cra} 、断裂能 G_F 及 $CMOD_c$ 和 $CTOD_c$ 试验结果见表 3。

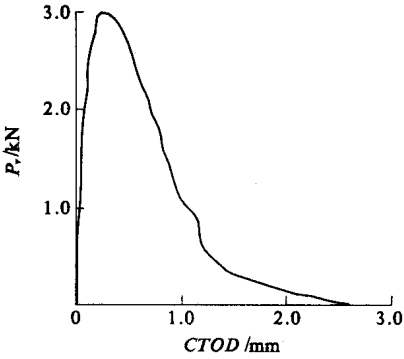


图 4 典型 MF W15 荷载—裂缝尖端张开位移曲线

Fig. 4 Typical load - CTOD curve for MF W15

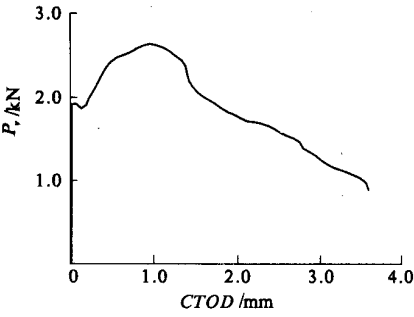


图 6 典型 BF W15 荷载—裂缝尖端张开位移曲线

Fig. 6 Typical load - CTOD curve for BF W15

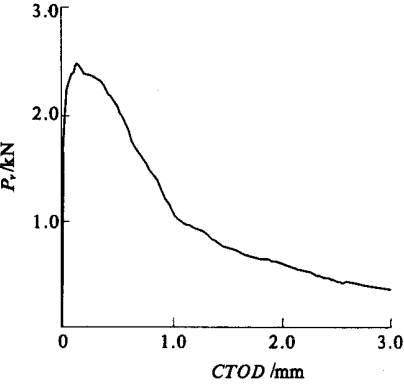


图 8 典型 SF W15 荷载—裂缝尖端张开位移曲线

Fig. 8 Typical load - CTOD curve for SF W15

表 3 钢纤维高强混凝土断裂参数试验结果
Tab.3 Fracture property results of sted fiber reinforced HSC

试件 编号	钢纤维 体积率 $\rho_f/\%$	最大荷载 P_{max}/kN	初裂荷载 P_{cr}/kN	断裂韧度 $K_{IC}/(MPa \cdot m^{1/2})$	断裂能 $G_F/(N \cdot m^{-1})$	临界裂缝嘴 张开位移 $CMOD_c/mm$	临界裂缝尖 端张开位移 $CTOD_c/mm$
MF W15	1.5	8.27	4.155 9	1.586 17	962.59	0.278 3	0.216 7
MF W15-0	0	4.90	3.577 7	0.940 68	97.96	0.068 5	0.037 7
BF W15	1.5	9.99	5.065 4	1.915 76	4 276.69	0.887 3	1.097 2
BF W15-0	0	4.94	3.965 6	0.947 58	95.58	0.084 3	0.059 7
SF W15	1.5	9.26	5.210 0	1.774 97	1771.54	0.311 0	0.140 0
SF W15-0	0	5.73	4.427 0	1.098 99	98.17	0.073 4	0.078 9

2.1 钢纤维类型对钢纤维高强混凝土断裂韧度的影响

图 9 给出了在相同钢纤维体积率、相同混凝土基体条件下,不同钢纤维类型的钢纤维高强混凝土断裂韧度增益比(纤维高强混凝土的断裂韧度与该体积率对应的混凝土配合比浇筑的高强混凝土对比试件断裂韧度的比值)的比较结果.从图中可以看出,不论钢纤维型式如何,纤维的加入提高了混凝土的断裂韧度,与同配合比的高强混凝土相比,铣削型、切断弓型、剪切波纹型钢纤维高强混凝土断裂韧度分别提高 0.686、1.022、0.615 倍.切断弓型钢纤维的增益作用最为显著,断裂韧度增益比较铣削型和剪切波纹型分别提高 19.9%、25.2%.切断弓型纤维对断裂韧度提高的主要原因是由于纤维端部的变形弯钩.纤维形状的突变阻碍纤维的滑移,在纤维拔出过程中存在纤维的变形抗力和摩擦阻力,而这种综合作用极大地提高了纤维与基体中粘结锚固作用,从而提高了纤维从混凝土基体中的拔出力.切断弓型钢纤维的拔出过程可近似地理解为相当长度的直线形纤维的粘结力、变形抗力以及摩擦阻力等综合作用的逐渐失效.从荷载-COD(Grack opening displacement)曲线(图 5~6)可以看出,切断弓型钢纤维高强混凝土存在应力强化现象,在某种程度上表现出钢材的应力应变曲线特性.

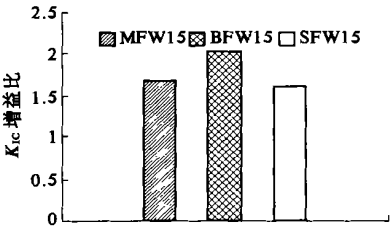


图 9 不同钢纤维类型 K_{IC} 增益比

Fig.9 The increment ratio of K_{IC} of HSC reinforced with different tps of steel fibers

2.2 钢纤维类型对钢纤维高强混凝土断裂能的影响

图 10 给出了在相同钢纤维体积率、相同混凝土基体条件下,不同钢纤维类型对钢纤维高强混凝土断裂能增益比(纤维高强混凝土的断裂能与该体积率对应的混凝土配合比浇筑的高强混凝土对比试件断裂能的比值)的对比关系.从图中可以看出,纤维的加入可以极大地提高高强混凝土的断裂能,与同配比的高强混凝土相比,铣削型、切断弓型、剪切波纹型钢纤维高强混凝土断裂能分别提高了 8.826、43.745、17.046 倍.与其它两种钢纤维相比,切断弓型钢纤维对断裂能的增益作用更为明显,断裂能增益比分别比铣削型钢纤维和剪切波纹型钢纤维提高 355.4% 和 148.0%.与断裂韧度增益关系相比,这种增益作用表现得更为突出.从钢纤维高强混凝土荷载-COD 曲线(图 3~8)也可以看出,切断弓型钢纤维高强混凝土的试验曲线较其它两种钢纤维高强混凝土试验曲线更趋饱满,曲线下降段趋于平缓.

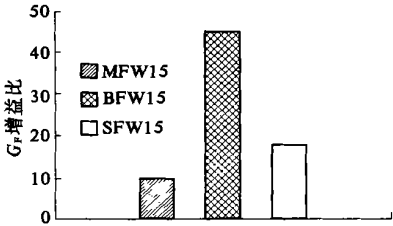


图 10 不同钢纤维类型断裂能增益比

Fig.10 The G_F increment ratio of HSC reinforced with fiddrent types of sted fibers

2.3 不同钢纤维类型对钢纤维高强混凝土裂缝张开位移的影响

图 11、图 12 比较了不同纤维类型钢纤维高强混凝土的临界裂缝张开位移(COD_c)增益比(纤维高强混凝土的 COD_c 与该体积率对应的混凝土配合比浇筑的高强混凝土对比试件 COD_c 的比值).从图中不难看出,钢纤维可以有效提高高强混凝土

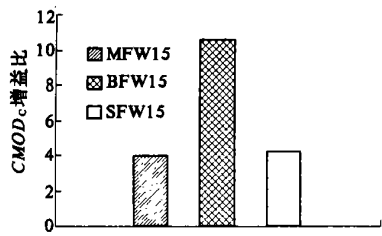


图 11 不同钢纤维类型 $CMOD_c$ 增益比

Fig. 11 The increment ratio of $CMOD_c$ of HSC reinforced

with different types of steel fibers

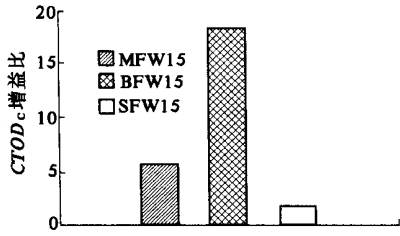


图 12 不同钢纤维类型 $CTOD_c$ 增益比

Fig. 12 The increment ratio of $CTOD_c$ of HSC reinforced

with different types of steel fibers

土的裂缝张开位移,与同配比的高强混凝土相比,铣削型、切断弓型、剪切波纹型钢纤维高强混凝土 $CMOD_c$ 分别提高了 2.997、9.526、3.237 倍, $CTOD_c$ 分别提高了 4.639、17.379、0.774 倍.与断裂能和断裂韧度对比关系相同,切断弓型钢纤维增益效果优于其它两种钢纤维,与铣削型和剪切波纹型钢纤维高强混凝土相比,切断弓型钢纤维高强混凝土的 $CMOD_c$ 增益比分别提高 163.3%、148.4%; $CTOD_c$ 增益比分别提高 225.9%、935.8%.这种增益作用可以从试验曲线得到反映.从试验过程也可以看出,切断弓型钢纤维混凝

土极限裂缝尖端张开位移可以达到 10.5 mm,其它钢纤维高强混凝土一般在 3~5 mm 之间.

3 结论

(1) 钢纤维显著提高钢纤维高强混凝土的断裂韧度、断裂能、裂缝张开位移,与同配合比浇筑的高强混凝土对比试件相比,断裂韧度 (K_{Ic}) 增益比提高幅度在 0.615 和 1.022 倍之间,断裂能 (G_F) 增益比提高幅度在 8.826 和 43.745 倍之间, $CMOD_c$ 增益比提高幅度在 2.997 和 9.526 倍之间, $CTOD_c$ 增益比提高幅度在 0.774 和 17.379 倍之间.

(2) 在相同试验条件下,切断弓型钢纤维对高强混凝土断裂韧度、断裂能、裂缝张开位移 ($CTOD_c$) 的改善较铣削型和剪切波纹型钢纤维更为明显.

参考文献:

[1] 高丹盈,刘建秀.钢纤维混凝土基本理论[M].北京:科学技术文献出版社,1994.
[2] 邓宗才.混凝土的断裂能及其测试方法[J].山东建材,1996,(2):17~19.
[3] 缪群,朱晓峰.利用楔劈拉伸试验研究混凝土的断裂特性[J].建筑材料学报,1999,2(3):212~217.
[4] 刘佳毅.混凝土双K断裂参数及其尺寸效应[D].大连:大连理工大学,2000.
[5] 谢丽.钢纤维高强混凝土弯曲与粘结性能的试验研究[D].郑州:郑州大学,2002.
[6] 汤寄予.纤维高强混凝土基本力学性能的试验研究[D].郑州:郑州大学,2002.

Testing Research on the Fracture Property of High-strength Concrete Reinforced with Different Types of Steel Fibers

GAO Dan-ying, WANG Zhan-qiao, ZHU Hai-tang

(College of Environmental & Hydraulic Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract : By the wedge splitting tensile test on eighteen specimens of steel fiber reinforced high-strength concrete (HSC) and plain high-strength concrete with the size of 200 mm×170 mm×100 mm, this paper investigates the impacts of the type of steel fiber and fiber volume ratio upon the stress intensity factor (K_{Ic}), fracture energy (G_F), critical crack mouth opening displacement ($CMOD_c$), as well as critical crack tip opening displacement ($CTOD_c$) of HSC. The test results indicate that the influence of fiber volume ratio on the fracture property of HSC is more obvious. In comparison with the milled steel fiber and waved steel fiber, the addition of bowed steel fiber to HSC increases its fracture properties more notably: the increment ratio of K_{Ic} is increased by 19.9% and 25.2%, G_F 355.4% and 148.0%, $CMOD_c$ 163.3% and 148.4%, and $CTOD_c$ 225.9% and 935.8%, respectively.

Key words : high-strength concrete; steel fiber; stress intensity factor; fracture energy; $CMOD_c$; $CTOD_c$