文章编号：1000-8608(2011)04-0561-06

混杂钢纤维高强混凝土断裂特性研究

高淑玲*[1,2]，徐世烺[3]，袁　全[1]，陈　培[1]

（1.河北工业大学 土木工程学院，天津　300401；
2.河北省土木工程技术研究中心，天津　300401；
3.浙江大学 建筑工程学院，浙江 杭州　310058）

摘要： 采用楔入劈拉试验方法，利用标准紧凑拉伸公式与楔入劈拉经验公式分别计算高强混凝土及混杂钢纤维高强混凝土的双 K 断裂韧度和断裂能，经比较发现用紧凑拉伸公式计算的失稳断裂韧度值是经验公式的0.85～0.87倍，因此建议采用尺寸符合标准紧凑拉伸要求的试件进行试验确定断裂韧度.分析了纤维混杂后纤维类型、纤维长度、纤维掺量对混凝土增强、增韧的影响，试验结果表明随着混凝土强度增加，断裂韧度、断裂能增大.最后建议高强混凝土采用双 K 断裂韧度作为韧性评价指标，高强钢纤维混凝土采用断裂能作为韧性评价指标.

关键词： 混杂钢纤维高强混凝土；起裂断裂韧度；紧凑拉伸；楔入劈拉；失稳断裂韧度

中图分类号： TU528.31　　**文献标志码：** A

0　引　言

高强混凝土属于脆性材料，高强后其固有的脆性问题更为突出，一经开裂承载力迅速下降，因此高强混凝土的脆性性能在一定程度上影响了其推广应用，而且还有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乱向分布的钢纤维，裂纹在扩展过程中遇到钢纤维时，由于钢纤维在拔出过程中可以传递相当大的应力，在裂纹尖端形成一个纤维跨接区，极大地提高了钢纤维高强混凝土的断裂能、断裂韧度.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缝扩展区，并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，有效避免了无征兆脆性破坏的发生[1].近几年混杂钢纤维对混凝土或砂浆所起的作用越来越受到人们的重视[2,3]，人们结合其各自的优点，以较低的造价使材料发挥最好的性能，但对于长短钢纤维混杂掺入高强混凝土后断裂韧性的研究较少.本文配制50～90 MPa高强混凝土，把不同尺寸、形状的异形钢纤维混合使用，利用楔入劈拉试验研究长、短钢纤维对起裂断裂韧度、失稳断裂韧度和断裂能的影响及其复合作用机理.

1　试验概况

1.1　试件设计

裂缝高比0.51，浇注5个试件，试件形状及尺寸见图1.应变片标距均为10 mm，图2中测点

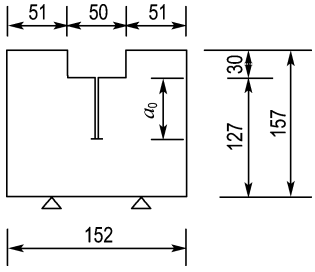


图1　楔入劈拉试件形状、尺寸（a_0=65 mm）

Fig. 1　Shape and size of wedge splitting specimen (a_0=65 mm)

收稿日期： 2009-08-17；　**修回日期：** 2011-05-16.
基金项目： “九七三”国家重点基础研究发展计划资助项目(2009CB623203)；中国博士后科学基金资助项目(20100470046)；国家自然科学基金资助项目(重点项目 50438010)；江苏省土木工程材料重点实验室开放基金资助项目；河北省建设科技资助项目(2009-258).
作者简介： 高淑玲*(1977-)，女，大连理工大学2006届博士，讲师，E-mail：gsl200001@yahoo.com.cn.

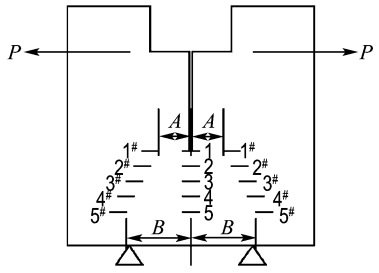


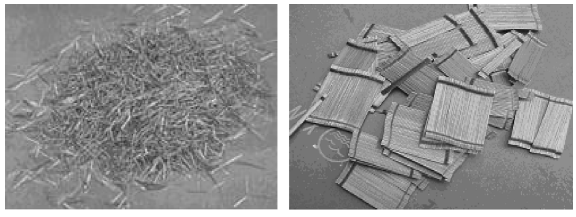
图 2 试件测点布置(A=20 mm, B=40 mm)

Fig. 2 Measuring point distribution of specimen (A = 20 mm, B = 40 mm)

1#～5# 采用全桥连接成对布置,缝端应变片 1# 测得的起裂荷载即为整个试件的起裂荷载 P^{*}_{ini}.

1.2 原材料和配合比

采用 52.5R 普通硅酸盐水泥;大连产中砂,细度模数约 2.7;石灰石矿生产的碎石,最大粒径 10 mm;Ⅰ级粉煤灰;Sika-Ⅱ高效减水剂;自来水.采用上海贝卡尔特有限公司产佳密克丝钢纤维,长纤维类型为 RC-65/35-BN,直径 0.65 mm,长度 35 mm,长径比 64,抗拉强度 1 145～1 545 MPa.短纤维采用高强度 OL6/.25 系列钢纤维,表面镀铜,中等直径 0.25 mm,长度 6 mm,长径比 24,抗拉强度≥2 000 MPa,纤维形状见图 3.高强混凝土及混杂钢纤维高强混凝土配合比见表 1.



(a) OL6/.25系列 (b) RC-65/35-BN系列

图 3 试验过程中使用的纤维几何形状

Fig. 3 Fiber geometry shape used in the test

表 1 高强混凝土及混杂钢纤维高强混凝土配合比及 28 d 立方体抗压强度

Tab. 1 Mix proportions and 28 d cube compressive strength of high strength concrete and hybrid-steel fiber reinforced high-strength concrete

试件编号	ρ/(kg·m^{-3})									28 d 立方体抗压强度/MPa
	水泥	水	砂	石子	减水剂	粉煤灰	硅灰	RC-65/35-BN	OL6/.25	
HSC1-65	505.0	195	630.0	1 030.0	8.475	60				54.14
HSCF1-65	505.0	195	630.0	1 030.0	8.475	60		78		67.89
HSCF2-65	505.0	195	630.0	1 030.0	8.475	60		78	39	69.55
HSC2-65	423.0	150	670.0	1 070.0	10.580	68	38.0			92.16
HSCF2-2-65	423.0	150	670.0	1 070.0	10.580	68	38.0	78		80.51
HSC3-65	552.4	140	443.3	1 166.7	21.000	84	63.6			86.63
HSCF3-65	552.4	140	443.3	1 166.7	21.000	84	63.6	78		101.79

1.3 试件制作

采用强制式搅拌机搅拌,先将水泥、石子和砂干拌 2 min,然后加入水与减水剂湿拌 2 min,随后掺入钢纤维搅拌均匀为止.试件采用木模浇注成型,用 2 mm 厚钢板预制裂缝,钢板两侧涂有润滑油(隔离剂),将料装入木模后,在振动台上振动 30 s,待混凝土初凝 3 h 后,松动钢板.试件浇注 24 h 后拆模,放入水箱中,在常温下养护 28 d.

1.4 加载和测量系统

试验在 1 000 kN 微机控制液压伺服试验机上进行.加载采用等速位移控制,高强混凝土为 0.01 mm/min,混杂钢纤维高强混凝土为 2 mm/min.采用 BLR-1/5000 拉压式荷载传感器,测量范围为 0～50 kN;裂缝张开位移采用 YYJ 系列电子引伸计,最大变形量为 4 mm;荷载、裂缝张开位移和应变片电压值经 YE3817 动态应变放大器放大,采用自行编制的程序用计算机对数据进行实时采集,计算机数据采集系统自始至终记录全过程的试验数据.图 4 为加载装置图.

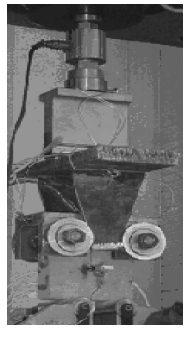


图 4 楔入劈拉加载装置图

Fig. 4 Sketch of wedge splitting loading device

2　荷载-裂缝口张开位移(简称 *P-CMOD*)曲线

图 5(a)、(c)分别为单独掺加长纤维和长、短纤维共同掺加时 *P-CMOD* 曲线，结果表明长、短纤维混杂掺加的系列(HSCF2)下降段平缓，曲线形状更饱满，峰值荷载略有增加.

相同 *CMOD* 对应的荷载，掺加短纤维后比不掺要高很多，这说明复合掺加短纤维开裂后，由于短纤维的桥接作用，承受的荷载增大，大约是峰值荷载的 80%左右，后峰值强度也提高，断裂能自然提高，荷载为零时 *CMOD* 的值增大很多，也预示着构件可以承受更大的裂缝张开，拔出纤维所需要耗散的能量较大. 大部分曲线没有明显的后峰值现象，下降段中有段曲线接近水平.

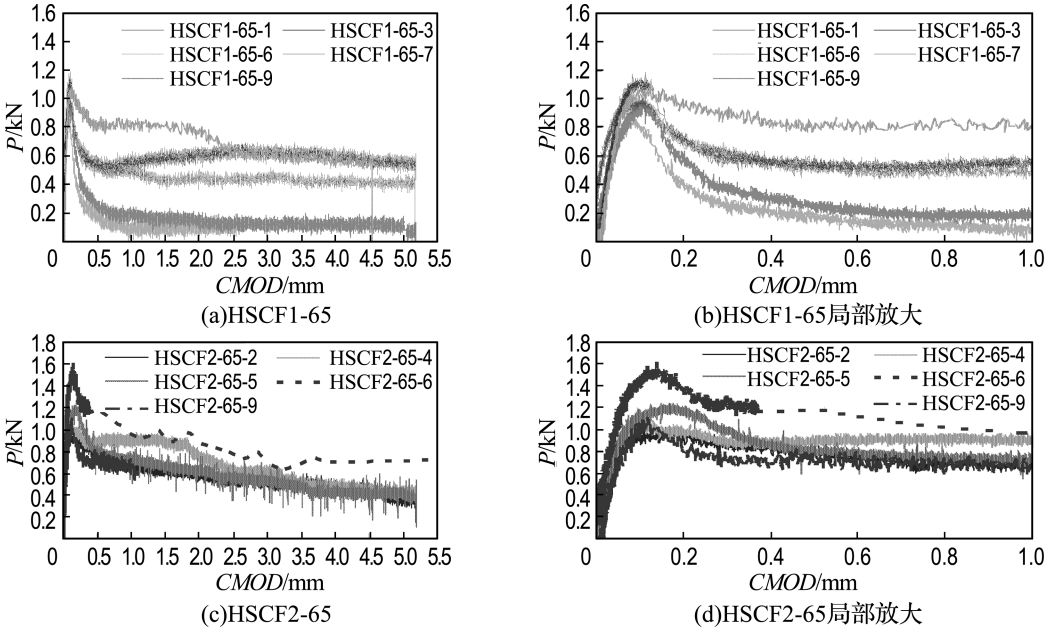


图 5　*P-CMOD* 曲线

Fig. 5　*P-CMOD* curves

3　双 *K* 断裂参数计算

3.1　起裂断裂韧度实测值 K_{Ic}^{ini*}

紧凑拉伸试件的加载方向与试件自重方向垂直，自重对裂缝扩展不起作用，但其现场制作没有楔入劈拉试件容易，而且楔入劈拉法通过选取合适的楔形角，可使竖向荷载低于水平荷载，这样人为地提高了试验机的刚度，降低了对试验机本身刚度的要求. 与紧凑拉伸试验相比，楔入劈拉试验辅助加载装置造价较低，但其所采用的试件尺寸一般是非标准紧凑拉伸试件的尺寸，因此一般采用根据普通混凝土拟合出来的经验公式计算断裂韧度；而本文采用的试件形状和尺寸与紧凑拉伸试件形式类似，采用 ASTM E399—72 给出的标准紧凑拉伸试件的应力强度因子表达式计算断裂韧度，利用电测法可精确测得试件的起裂荷载，利用下列公式可准确计算得到试件的起裂断裂韧度：

$$K_{Ic}t\sqrt{h}/F = 29.6\left(\frac{a}{h}\right)^{1/2} - 185.5\left(\frac{a}{h}\right)^{3/2} + 655.7\left(\frac{a}{h}\right)^{5/2} - 1\,017.0\left(\frac{a}{h}\right)^{7/2} + 638.8\left(\frac{a}{h}\right)^{9/2} \tag{1}$$

标准紧凑拉伸试件尺寸满足下列要求：$l/h = 1.2$，$f/l = 0.27$，$h_0 = 1.25h$. 文献[4]根据尺寸 $l/h = 1.0$，$f/l = 0.25$，$h_0 = 1.20h$ 的非标准紧凑拉伸试件提出下列计算公式：

$$K_{Ic} = \frac{3.675(1-a/h)^{-3/2}\cdot F}{t\sqrt{h}};\quad 0.2 \leqslant a/h \leqslant 0.8 \tag{2}$$

$$F = \frac{P+mg}{2}\cdot\frac{1}{\tan\theta+\mu} \tag{3}$$

式中：K_{Ic} 为试件的断裂韧度(MPam$^{1/2}$)；a 为实测预制裂缝深度(m)；h、t 分别为实测试件高度、厚度(m)；F 为水平荷载(kN)；P 为竖向极限荷载(kN)；mg 为楔形加载架的重力(kN)，本试验 mg = 0.227 5 kN；θ 为楔形加载架的楔面与纵轴的夹角(15°). 计算结果见表 2.

表 2 高强混凝土及混杂钢纤维高强混凝土断裂参数比较

Tab. 2 Fracture parameters comparisons for high strength concrete and hybrid-steel fiber reinforced high-strength concrete

编号	P^*_{ini}/kN	P_{max}/kN	P^*_{ini}/P_{max}	a_c/mm	$CMOD_c$/mm	$K^{ini}_{Ic}(2)$/MPam$^{1/2}$	$K^{ini}_{Ic}(1)$/MPam$^{1/2}$	$K^{un}_{Ic}(2)$/MPam$^{1/2}$	$K^{un}_{Ic}(1)$/MPam$^{1/2}$	$\frac{K^{un}_{Ic}(1)}{K^{un}_{Ic}(2)}$	G_f/(N·m^{-1})
HSC1-65-1		0.833		93.54	0.073			3.020	2.634		(102.290)
HSC1-65-2	0.846	1.086	0.779	92.55	0.095	1.212	0.902	3.580	3.115		350.557
HSC1-65-3		0.646		101.70	0.107			3.785	3.218		411.300
平均值								3.462	2.989	0.863	380.930
HSCF1-65-6	0.976	0.976	0.999	95.28	0.097	1.360	1.011	3.712	3.245		1 456.530
HSCF1-65-7	1.104	1.104	1.000	94.37	0.103	1.503	1.119	3.937	3.440		1 881.990
HSCF1-65-9		1.081		97.02	0.122			4.393	3.840		1 935.210
平均值								3.655	3.193	0.874	1 296.630
HSCF2-65-2		0.948		103.31	0.181			5.618	4.684		1 434.833
HSCF2-65-4		1.026		94.86	0.099			3.791	3.313		1 690.444
HSCF2-65-5	1.078	1.180	0.913	99.37	0.160	1.474	1.097	5.343	4.626		1 486.203
平均值								4.917	4.208	0.856	1 537.160
HSC2-65-2	0.836	0.923	0.905	94.22	0.083	1.200	0.893	3.378	2.951		(297.710)
HSC2-65-3		0.926		95.43	0.080			3.583	3.132		117.907
HSC2-65-5		0.615		99.74	0.074			3.263	2.819		129.777
平均值								3.573	3.114	0.872	123.840
HSCF2-2-65-4		1.088		101.12	0.143			5.505	4.706		1 394.614
HSCF2-2-65-3		1.063		94.31	0.083			3.806	3.324		1 321.348
HSCF2-2-65-9		1.225		97.39	0.119			4.967	4.334		1 283.156
平均值								4.713	4.049	0.859	1 333.040
HSC3-65-1		0.582		94.60	0.046			2.419	2.113		619.637
HSC3-65-2	0.862	1.209	0.712	97.58	0.137	1.230	0.915	4.961	4.327		457.349
HSC3-65-4		1.030		94.82	0.083			3.795	3.317		525.800
平均值								3.542	3.093	0.873	534.260
HSCF3-65-2		1.067		94.70	0.083			3.886	3.396		1 018.155
HSCF3-65-3		0.964		102.37	0.137			5.373	4.534		1 872.150
HSCF3-65-4		1.183		95.58	0.098			4.415	3.860		1 129.236
平均值								4.829	4.122	0.854	1 339.850

注：$K^{ini}_{Ic}(1)$、$K^{ini}_{Ic}(2)$分别为利用式(1)、(2)计算得到的起裂断裂韧度值，$K^{un}_{Ic}(1)$、$K^{un}_{Ic}(2)$分别为利用式(1)、(2)计算得到的失稳断裂韧度值；括号内的数值不计算在平均值内

3.2 失稳断裂韧度 K^{un}_{Ic} 计算值

根据线性叠加假定计算失稳临界状态裂缝长度 a_c[4]，将 $(P_{max}+mg)/2\tan\theta$、$CMOD_c$、相对缝长 $\alpha_c = a_c/h$ 代入式(3)[5,6]，用 Matlab 解关于 a_c 的方程，其值见表 2.

$$CMOD = PV(\alpha)/tE;$$

$$V(\alpha) = \left(\frac{1+\alpha}{1-\alpha}\right)^2(2.163+12.219\alpha-20.065\alpha^2-0.992\,5\alpha^3+20.609\alpha^4-9.931\,4\alpha^5) \quad (4)$$

式中：E 为材料的弹性模量，参考文献[7]掺加钢纤维后弹性模量基本跟基体的相同，可通过式(5)计算[8]：

$$E_c = 1.000\,2f_{cu}^{0.330\,4}\times 10^4 \quad (5)$$

把最大荷载 P_{max} 与 a_c 代入式(1)、(2)即可求得 $K^{un}_{Ic}(1)$ 和 $K^{un}_{Ic}(2)$，计算结果见表 2.

3.3 断裂能 G_f 计算

高强混凝土及混杂钢纤维高强混凝土仍属于半脆性材料，断裂能可根据发生单缝破坏的软化材料的计算公式进行计算[9]：

$$G_f = \frac{W + mgCMOD_0}{A \cdot 2\tan\alpha} \tag{6}$$

式中：G_f 为试件断裂能（$N \cdot m^{-1}$）；W 为 *P-CMOD* 全曲线与横坐标包围的面积（N·m），用 Origin 求得；$CMOD_0$ 为峰值荷载对应裂缝口张开位移（m）；A 为韧带面积（m^2），$A = t(h-a)$，a 为预制裂缝深度（m）；断裂能的计算结果见表 2.

由表 2 可知：

（1）掺加 1% RC-65/35-BN 钢纤维后，缝高 65 mm 系列中 HSC1-65 断裂能由原来的380.930 N/m 提高到 1 296.630 N/m（HSCF1-65 系列），增加 2.4 倍；HSC2-65 断裂能由原来的 123.840 N/m 提高到 1 333.040 N/m（HSCF2-2-65 系列），增加 9.76 倍；HSC3-65 断裂能由原来的 534.260 N/m 提高到 1 339.850 N/m（HSCF3-65 系列），增加 1.5 倍.

采用式（1）进行比较发现，HSC1-65 失稳断裂韧度由原来的 2.989 $MPam^{1/2}$ 提高到 3.193 $MPam^{1/2}$（HSCF1-65 系列），增加 6.83%；HSC2-65 断裂韧度由原来的 3.114 $MPam^{1/2}$ 提高到 4.049 $MPam^{1/2}$（HSCF2-2-65 系列），增加 30.02%；HSC3-65 断裂韧度由原来的 3.093 $MPam^{1/2}$ 提高到 4.122 $MPam^{1/2}$（HSCF3-65 系列），增加 33.27%.

（2）在掺加 1% RC-65/35-BN 长纤维的基础上再掺加 0.5% 的 OL6/.25 短纤维后，HSCF1-65 系列断裂能由 1 296.630 N/m 提高到 1 537.160 N/m（HSCF2-65 系列），增加18.59%；可知掺加短纤维后，断裂能有一定程度的提高.

随着混凝土强度和混杂钢纤维混凝土强度的增加，断裂能增加不是很明显，有的甚至降低.

采用式（1）进行比较发现，HSCF1-65 系列失稳断裂韧度由 3.193 $MPam^{1/2}$ 提高到 4.208 $MPam^{1/2}$（HSCF2-65 系列），增加 31.79%.

用标准紧凑拉伸式（1）计算的断裂韧度是用经验式（2）得出的 0.85～0.87 倍. 由于本文楔入劈拉试件形状非立方体，建议计算时采用式（1）.

作者认为若想利用式（1）计算高强混凝土的断裂能，需要得到比较平滑的下降段曲线，由于大部分实验室的试验机刚度不够，测得的高强混凝土的下降段不是很理想，掺加纤维裂缝开裂之后钢纤维的桥接作用使得下降段很容易得到，因此其断裂能计算比较精确，建议混杂钢纤维高强混凝土采用断裂能作为断裂参数，高强混凝土用断裂韧度作为断裂参数.

由表 2 知，高强混凝土的起裂荷载是峰值荷载的 70%左右；而掺加钢纤维后，起裂荷载增大，甚至达到峰值荷载的 90%还要多，说明混杂钢纤维可阻止结构过早开裂.

将长、短纤维混杂使用，可充分利用不同几何尺寸纤维的混杂效应，几何尺寸较小的短纤维在混凝土中乱向分布，在裂缝开裂前桥接混凝土内部分布的微裂缝，可以阻碍混凝土内部微裂缝的扩展，控制这些微裂缝扩展成宏观裂缝，阻滞宏观裂缝的发生和发展[10]，见图 6，因此可以增加起裂断裂韧度；而几何尺寸较大的长纤维的作用主要发生在裂缝开裂后，能阻止宏观裂缝的扩展，因此可以增加失稳断裂韧度，见图 6.

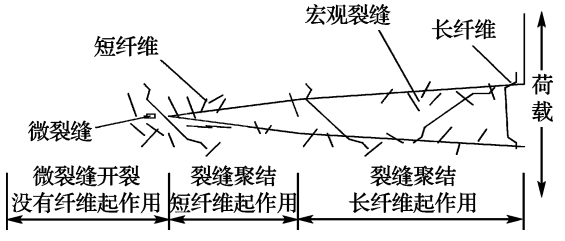


图 6　长、短纤维共同作用时裂缝开裂状态

Fig. 6　Combined action of macrofiber and chopped fiber on crack opening

4　结　论

（1）长纤维可使失稳断裂韧度增加，抑制宏观裂缝开展；短纤维可以抑制微裂缝开展，并能使起裂断裂韧度增加. 长、短纤维混杂掺加后，得到的 *P-CMOD* 曲线的下降段平缓，曲线饱满，断裂能增加. 因此长、短钢纤维混杂掺加既可以延迟裂缝的起裂，还可以使得开裂后的裂缝发展缓慢，耗散的总能量大大增加.

（2）掺加钢纤维后，混凝土的失稳断裂韧度提高幅度远远不及断裂能提高的幅度大，这是由于纤维的桥接作用发生在试件开裂以后，因此反映为下降段消耗的能量大大增加，而开裂前乃至峰值荷载前，钢纤维起到的阻裂作用非常小.

（3）掺加钢纤维后，钢纤维在裂缝开裂之后的桥接作用使得下降段很容易得到，因此其断裂能

计算比较精确，建议钢纤维混凝土或者混杂钢纤维混凝土采用断裂能作为断裂参数对结构的断裂性能进行评价.

(4)高强混凝土脆性较大，一般的试验机刚度不够，很难得到 *P-CMOD* 曲线的下降段，因此建议高强混凝土不采用断裂能作为评价指标，而采用失稳断裂韧度作为断裂参数评价结构的断裂性能.

参考文献：

[1] 曾志兴. 基于断裂力学的钢纤维混凝土裂缝的研究[J]. 工业建筑，2005，**35**(3)：53-55

[2] 许贤敏. 国外混合钢纤维的应用[J]. 国外建材——建材发展导向，2003(1)：77-78

[3] 吴科如，李淑进. 不同尺寸钢纤维混杂增强水泥砂浆的力学性能[J]. 建筑材料学报，2005，**8**(6)：599-604

[4] 徐世烺，赵国藩. 混凝土断裂力学研究[M]. 大连：大连理工大学出版社，1991

[5] XU Shi-lang，HANS W R. Crack extension resistance and fracture properties of quasi-brittle softening materials like concrete based on the complete process of fracture [J]. **International Journal of Fracture**，1998，**92**(1)：71-99

[6] 吴智敏，徐世烺，王金来. 基于虚拟裂缝模型的混凝土双 *K* 断裂参数[J]. 水利学报，1999(7)：12-16

[7] 高丹盈，汤寄予，赵 军. 纤维高强混凝土弹性模量的试验研究[J]. 工业建筑，2004，**134**(11)：47-49

[8] 李家康，王 巍. 高强混凝土的几个基本力学指标[J]. 工业建筑，1997，**27**(8)：50-54

[9] 徐世烺. 混凝土双 *K* 断裂参数计算理论及规范化测试方法[J]. 三峡大学学报(自然科学版)，2002，**24**(1)：1-8

[10] WANG Y. Toughness characteristics of synthetic fiber reinforced cementitious composites [J]. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**，1998，**21**：521-532

Study of fracture properties of hybrid-steel fiber reinforced high-strength concrete

GAO Shu-ling[*1,2]，XU Shi-lang[3]，YUAN Quan[1]，CHEN Pei[1]

(1. College of Civil Engineering，Hebei University of Technology，Tianjin 300401，China；
2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province，Tianjin 300401，China；
3. College of Civil Engineering and Architecture，Zhejiang University，Hangzhou 310058，China)

Abstract：The double-*K* fracture toughness and fracture energy of high-strength concrete and hybrid-steel fiber reinforced high-strength concrete were calculated employing standard compacted tension (CT) formula and wedge splitting (WS) formula by wedge splitting test. By comparing two formulas，it is found that the unstable fracture toughness calculated by CT formula is 0.85 to 0.87 times of that calculated by WS formula，and adopting standard CT specimen can gain the exact test results by WS test with the specimen satisfying the size requirement for CT. The influences of fiber type，fiber length and fiber volume ratio on reinforced effect to concrete were analyzed. With the strength increasing，the fracture toughness and fracture energy both increase. In addition，it is proposed that the double-*K* fracture toughness is better to be used as the ductility evaluation criterion of high-strength concrete and fracture energy is better to be used as the ductility evaluation criterion of hybrid-steel fiber reinforced high-strength concrete.

Key words：hybrid-steel fiber reinforced high-strength concrete；initial fracture toughness；compacted tension；wedge splitting；unstable fracture toughness