

文章编号:1007-9629(2021)06-1139-07

高性能水泥基复合材料断裂性能

徐文磊¹, 宣卫红², 陈育志², 陈徐东¹, 程熙媛¹

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏南京 210098;

2. 金陵科技学院建筑工程学院, 江苏南京 211169)

摘要:对钢纤维体积分数为0%、1%和2%的高性能水泥基复合材料(HPCC)带预制裂缝梁试件进行了三点弯曲测试,通过荷载-裂缝嘴张开位移(F - $CMOD$)曲线系统分析了试件的弯曲强度、残余强度以及起裂韧度、失稳韧度、断裂能、脆性指数等,并对其断裂面形态进行了扫描电镜测试.结果表明:钢纤维体积分数对HPCC弯曲强度、残余强度影响显著,而对起裂韧度没有影响;掺钢纤维后HPCC失稳韧度增幅可达8倍以上,但钢纤维体积分数对HPCC失稳韧度提升具有一定的限值,约为1%;掺钢纤维后HPCC断裂能大幅提升,且随着钢纤维体积分数的增加而增加;掺钢纤维能有效降低HPCC脆性,但更高的钢纤维体积分数对HPCC脆性的降幅不显著;HPCC加载初期微裂纹的形成与扩展主要由基体自身性能决定,钢纤维失效经历了纤维与基体脱黏和剥离的过程,失效模式为钢纤维拔出,钢纤维并未发生断裂.

关键词:高性能水泥基复合材料;钢纤维;断裂;扫描电镜

中图分类号:TU528.572

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.06.003

Fracture Performance of High-Performance Cement-Based Composites

XU Wenlei¹, XUAN Weihong², CHEN Yuzhi², CHEN Xudong¹, CHENG Xiuyan¹

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. School of Architectural Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract: Three-point bending tests were carried out on high-performance cement-based composites(HPCC) using notched beams with different fiber contents (0%, 1%, 2%). Bending strength, residual strength, initial fracture toughness, unstable fracture toughness, fracture energy, and brittleness were analyzed from the obtained F - $CMOD$ curves, and the fracture surface was tested by scanning electron microscope (SEM). The results show that steel fiber content has a significant effect on bending strength and residual strength, but the initial fracture toughness is not affected by steel fiber content. The unstable fracture toughness of HPCC with steel fibers can increase over 8 times, but the steel fiber content has a certain limit about 1% on the unstable fracture toughness improvement of HPCC. The fracture energy of HPCC with steel fibers is greatly improved, and increases gradually with the increase of steel fiber content. Steel fiber can effectively reduce the brittleness of HPCC, but higher steel fiber content has no significant effect on the brittleness of HPCC. Formation and propagation of microcracks in HPCC at the initial stage of loading are mainly determined by the property of the cement matrix. The failure of steel fibers has undergone a process of debonding and peeling between fiber and matrix. The failure mode is that the steel fiber is pulled out without breaking.

Key words: high-performance cement-based composite; steel fiber; fracture; scanning electron microscope

收稿日期:2020-07-17; 修订日期:2020-09-19

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK20181114)

第一作者:徐文磊(1996—),男,江苏如皋人,河海大学硕士生.E-mail:hhuxuwenlei@163.com

通讯作者:宣卫红(1963—),女,浙江诸暨人,金陵科技学院教授,硕士生导师,博士.E-mail:xwh@jit.edu.cn

高性能水泥基复合材料(HPCC)通常由水泥、水、高效减水剂、高强度钢纤维以及细骨料组成,并且具有极低的水灰比.钢纤维在HPCC中通过桥接裂纹面阻止裂纹的发展,使后裂区中发生基体和钢纤维之间的荷载重分布^[1],进而改善高强基体的脆性.已有的研究表明,钢纤维掺量是影响HPCC力学行为的重要因素,拉伸强度、拉伸应变^[2]等性能指标对钢纤维掺量具有很大依赖性,但是也有研究发现,钢纤维掺量对弹性模量、第一裂纹对应的抗折强度等无明显影响^[3],钢纤维掺量对HPCC的影响需要进一步的研究.

另外,凭借突出的抗压强度^[4]和抗拉强度^[5]、高韧性^[6]以及高耐久性^[7],HPCC已经成为了重要工程建设中最具前景的建筑材料,例如公路桥梁、高层建筑以及防爆和抗震结构等,这些重要工程对材料抗起裂及裂缝开展后的稳定性和安全性提出了更高的要求.而目前关于HPCC的研究主要集中在机械性能、耐久性能及抗冲击性能等方面,涉及HPCC断裂性能的研究还不多.

Yoo等^[8]探究了钢纤维掺量对HPCC弯曲行为的影响,结果表明随着钢纤维掺量的增加,HPCC在峰值载荷下的抗弯强度、挠度和裂缝嘴张开位移(CMOD)呈伪线性增加.卿龙邦等^[9]基于线性相关系数陡降法计算了HPCC的起裂韧度,发现当钢纤维体积分数达到0.9%时,定向分布的钢纤维混凝土起裂韧度趋于稳定.邓宗才^[10]采用等效断裂韧度方法来评价混杂纤维增强超高性能混凝土的增韧效果.这些研究重点关注了HPCC的一项或者几项断裂性能指标.

本文对钢纤维体积分数为0%、1%和2%的带预制裂缝HPCC矩形梁进行了三点弯曲测试,通过荷载-裂缝嘴张开位移(F -CMOD)曲线分析弯曲强度、残余强度、起裂韧度、失稳韧度、断裂能、脆性指数等随钢纤维体积分数的变化特征.通过扫描电镜(SEM)观察HPCC的断裂面形态,从微观角度进一步分析HPCC的断裂机理.

1 试验

1.1 试验材料和配合比

水泥采用P·II 52.5硅酸盐水泥,性能符合GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》;河砂的最大直径为2.45 mm,细度模数为2.8;聚羧酸盐高效减水剂,固含量为50%(质量分数);江苏博特新材料有限公司生产的SBT-HDC超细矿物掺和料,其物理性能符合

GB/T 18736—2017《高强高性能混凝土用矿物外加剂》;微直钢纤维,长度13 mm,直径0.2 mm,抗拉强度2 800 MPa,以体积分数(φ_{SF})0%、1%和2%添加到HPCC基体中,对应的试件编号为HPCC0、HPCC1和HPCC2.

HPCC的配合比见表1.将搅拌均匀的混合料浇筑在400 mm×100 mm×100 mm的模具中,在(20±2)℃且相对湿度RH>90%的条件下养护24 h后脱模,于室内自然环境下养护60 d,试验前在试件非成型面中间位置切割深30 mm、宽2 mm的预制裂缝.另外,HPCC0、HPCC1和HPCC2各浇筑3个尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的立方体试件,标准养护28 d后进行抗压试验,测得其平均抗压强度分别为64.8、89.8、108.8 MPa.

表1 HPCC的配合比
Table 1 Mix proportion of HPCC

Specimen	Cement	Water	Superplasticizer	SBT-HDC	Sand	kg/m ³
HPCC0	770	176	17	330	1 100	
HPCC1	770	176	17	330	1 100	
HPCC2	770	176	17	330	1 100	

1.2 三点弯曲测试

采用MTS 322闭环伺服控制系统对试件进行三点弯曲测试.加载方式及试件几何尺寸如图1所示.在预制裂缝两侧各粘贴1个带坡口的铁片安装夹式引伸计,用来测量裂缝嘴张开位移CMOD.试验在CMOD控制方式进行加载,加载速率为0.001 mm/s,能够稳定获得包括下降段的 F -CMOD曲线.每组测试3个试件,编号分别为S1、S2、S3.

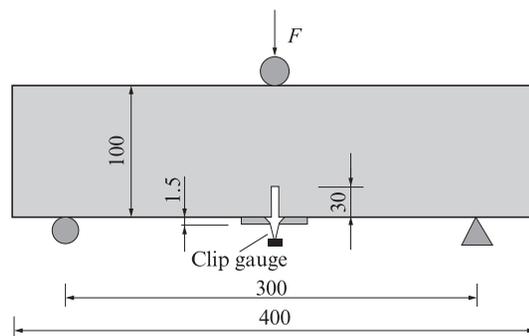


图1 加载方式及试件几何尺寸
Fig. 1 Loading mode and geometry of specimen
(size:mm)

1.3 断裂面微观形态分析

通过Hitachi SU8100型扫描电镜来观察试件断

裂面形态,以进一步揭示 HPCC 的破坏机理.试件弯曲破坏后从断裂面取样,并用无水乙醇浸泡以消除基体水化存在的影响,在进行 SEM 测试前,将样品置于真空烘箱中干燥 24 h.

2 结果与分析

2.1 破坏形态

HPCC 试件的破坏形态如图 2 所示.由图 2 可见:对于不含钢纤维的试件 HPCC0,裂纹一旦萌生很快就会扩展形成宏观裂缝,裂缝从缺口尖端近乎沿直线扩展直达梁顶部,试件完全断裂,断口表面光滑,表现出明显的脆性;在含钢纤维试件的断裂面上可以观察到钢纤维的拔出现象,当裂纹萌生后,裂纹两侧不仅存在基体间的黏聚力,还存在钢纤维的桥接作用,即使达到峰值荷载,试件依旧保持变形和承载能力,裂缝的扩展过程较为缓慢,表现出明显的塑性;相比钢纤维体积分数为 1% 的试件 HPCC1,钢纤维体积分数 2% 的试件 HPCC2 裂纹表面粗糙度更大,这是因为在钢纤维体积分数更高的情况下,裂纹表面附近随机分布的钢纤维更多,这些倾斜的钢纤维形成的桥接作用更强,导致基体开裂路径变得更加复杂.

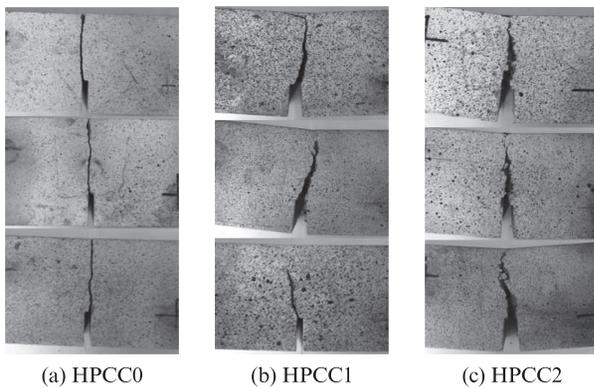


图 2 HPCC 试件的破坏形态
Fig. 2 Failure modes of HPCC specimens

2.2 F-CMOD 曲线

HPCC 试件的 F -CMOD 曲线见图 3.从图 3 可以看出:加载初期不同钢纤维体积分数下试件的 F -CMOD 曲线基本重合;但是在峰值荷载前后曲线形态大有不同,不掺钢纤维试件 HPCC0 的加载曲线峰前部分几乎呈线性,峰后段荷载随着 CMOD 的增大迅速减小,表现出典型的脆性特征;而掺钢纤维试件的峰前存在明显的挠曲硬化行为,峰后段荷载随 CMOD 增大逐渐减小,展现了突出的韧性.

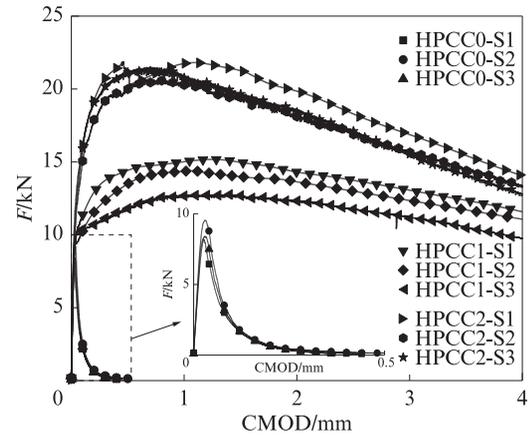


图 3 HPCC 试件的 F -CMOD 曲线
Fig. 3 F -CMOD curves of HPCC specimens

由图 3 还可以看出,随着钢纤维体积分数的增加,峰值荷载相应增大.带预制裂缝 HPCC 梁的三点弯曲强度 f 由下式得出^[11]:

$$f = \frac{3F_{\max}S}{2L(D - a_0)^2} \quad (1)$$

式中: F_{\max} 为峰值荷载; S 为跨度; D 、 L 分别为试件的高度和宽度; a_0 为预制裂缝深度.

图 4 展示了 HPCC 试件弯曲强度与钢纤维体积分数的关系.由图 4 可见:HPCC 试件弯曲强度随钢纤维体积分数增加呈近似线性增长,这是因为当微裂纹形成后,钢纤维对裂纹两侧基体起到了桥接作用,并且随着钢纤维体积分数的增加,钢纤维与基体之间的应力减小,从而延缓了裂纹的形成与扩展,弯曲强度随之提高.与不掺钢纤维试件相比,试件 HPCC1 和 HPCC2 的弯曲强度增幅分别为 62%、145%.

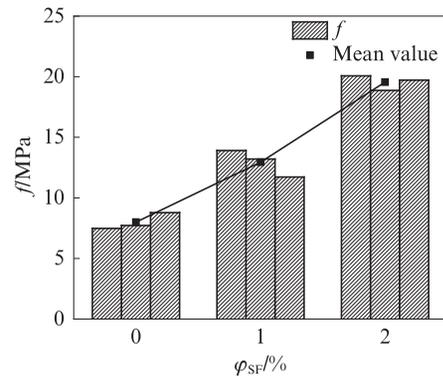


图 4 HPCC 试件弯曲强度与钢纤维体积分数的关系
Fig. 4 Relationship between bending strength and steel fiber content of HPCC specimens

除了更高的弯曲强度,掺钢纤维试件较不掺钢纤维试件还具有出色的延性,这在 F -CMOD 曲线上表现为多峰和宽峰.由图 3 可见,HPCC 试件虽然宽

峰现象很显著,但是多峰现象并不显著,仅在 HPCC2-S1中表现明显.对此,文献[12]指出,当纤维掺量低于临界纤维掺量时,复合材料不存在应变硬化和多重裂纹.

2.3 残余强度

为进一步了解钢纤维对试件 F -CMOD 曲线峰后行为的贡献,采用 EN 14651(2007)《Test method for metallic fibre concrete-measuring the flexural tensile strength(limit of proportionality(LOP), residual)》和 Fib Model Code 2010《Principles, models and test validation》推荐的方法对试件残余强度 $f_{R,i}$ 进行了评价.当 CMOD 值为 0.5、1.5、2.5、3.5 mm 时,分别计算残余强度 $f_{R,1}$ 、 $f_{R,2}$ 、 $f_{R,3}$ 和 $f_{R,4}$, $f_{R,i}$ 计算公式为:

$$f_{R,i} = \frac{3F_{R,i}S}{2L(D-a_0)^2} \quad (2)$$

式中: $F_{R,i}$ 为 CMOD 值为 0.5、1.5、2.5、3.5 mm 时对应的荷载.

不含钢纤维试件由于峰后软化迅速,无法根据推荐方法对残余强度进行分析.

表 2 列出了试件 HPCC1、HPCC2 的残余强度.由表 2 可见:与试件 HPCC1 相比,试件 HPCC2 的残余强度 $f_{R,1}$ 、 $f_{R,2}$ 、 $f_{R,3}$ 和 $f_{R,4}$ 均有所提高,增幅都在 27% 以上,说明较高的钢纤维体积分数会显著提高 HPCC 残余强度;但值得注意的是,随着 $f_{R,1}$ 变化到 $f_{R,4}$,残余强度的增幅从 56.5% 逐渐衰减到 27.3%.残余强度增幅的逐渐减小说明钢纤维体积分数为 2% 的试件峰后荷载衰减更快,其峰后延展性更差,通过对比图 3 中峰后软化段的斜率也能直观看出这点.文献[13]对 4 种钢纤维体积分数(1%、2%、3%、4%)下超高性能钢纤维增强混凝土的弯曲行为进行了研究,同样发现微直钢纤维体积分数越高,软化区峰值荷载越大,峰后延展性越低.需要指出的是该现象并不适用于所有类型的钢纤维,文献[14]中采用端勾型钢纤维混凝土进行三点弯曲试验,其峰后延展性的表现就截然相反.

表 2 试件 HPCC1、HPCC2 的残余强度
Table 2 Residual strength of specimen HPCC1 and HPCC2

$f_{R,i}$	$f_{R,i}$ of HPCC1/MPa				$f_{R,i}$ of HPCC2/MPa				Increment/%
	S1	S2	S3	Mean	S1	S2	S3	Mean	
$f_{R,1}$	13.2	12.4	10.9	12.2	19.4	19.3	18.3	19.0	56.5
$f_{R,2}$	13.8	12.8	11.7	12.8	19.5	17.7	18.0	18.4	44.4
$f_{R,3}$	12.6	11.9	10.8	11.8	16.8	15.4	15.7	16.0	35.5
$f_{R,4}$	11.4	10.8	9.6	10.6	14.2	13.3	13.0	13.5	27.3

2.4 断裂特征参数

2.4.1 起裂韧度和失稳韧度

大量试验结果表明混凝土材料的断裂破坏特征呈准脆性,即混凝土裂缝的发展经历起裂、稳定扩展和失稳扩展 3 个过程.在混凝土裂缝扩展过程中,裂缝前端会萌生微裂纹并形成断裂过程区,且断裂过程区的发展造成混凝土 F -CMOD 曲线呈现非线性特征.考虑断裂过程区对钢纤维混凝土断裂韧性的影响,基于 Xu 等^[15]提出的双 K 断裂准则,采用 DL/T 5332—2005《水工混凝土断裂试验规程》推荐的计算公式,计算 HPCC 试件的起裂韧度 K_{IC}^0 和失稳韧度 K_{IC}^S ,结果见图 5.由图 5 可见:HPCC 起裂韧度 K_{IC}^0 几乎不受钢纤维体积分数的影响,变化范围在 0.62~0.68 MPa·m^{1/2} 之间,这是因为在基体开裂之前的线弹性承载阶段,基体间的黏聚力发挥主要作用,而钢纤维的锚固和黏结作用尚未被激活;与不掺钢纤维试件相比,掺钢纤维试件的失稳韧度 K_{IC}^S 有很大提高,增幅达 8 倍以上,失稳韧度的提高可能是由于钢纤维发生了脱黏,相对于基体产生滑动,并通过在裂纹表面施加闭合牵引力而使基体裂纹稳定扩展;试件 HPCC1、HPCC2 的失稳韧度大致处于同一水平. Ren 等^[16]对 6 种微直钢纤维体积分数(0%~2.5%)下的混凝土梁进行了三点弯曲试验,得到的失稳韧度一同列于图 5 中.结合 Ren 等^[16]的试验结果,可以认为钢纤维体积分数对 HPCC 失稳韧度提升具有一定的限值,在 1% 左右,当钢纤维体积分数继续增加时,其对失稳韧度的提升效果不明显.

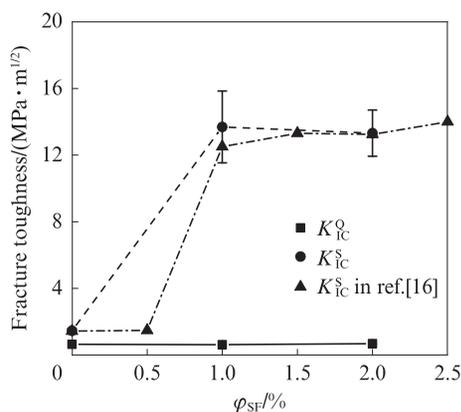


图 5 HPCC 试件的起裂韧度和失稳韧度
Fig. 5 Initial fracture toughness and unstable fracture toughness of HPCC specimens

2.4.2 断裂能

断裂能定义为产生单位断裂表面积所需的能量,通常被认为是一种材料特性.本文基于 F -CMOD 曲

线来计算断裂能 G_F ,采用的公式由 JCI-S-001—2003《Method of test for fracture energy of concrete by use of notched beam》提供:

$$G_F = \frac{0.75W_0 + W_1}{A_{lig}} \quad (3)$$

$$W_1 = 0.75 \times \left(\frac{S}{L} m_1 + 2m_2 \right) g \times \text{CMODc} \quad (4)$$

式中: W_0 为 F -CMOD 曲线下的面积; W_1 为试件自重和加载夹具所做的功; A_{lig} 为试件断裂面的面积; m_1 为试件的质量; m_2 为未附着在液压夹具上的弯曲压头质量; g 为重力加速度; CMODc 为试件破坏时的裂缝嘴张开位移.

需要说明的是, 试验过程中含钢纤维的试件不会出现贯穿至梁顶的完全断裂现象, 并且夹式引伸计量程有限, 因此取 CMODc=4 mm 用于断裂能的计算. HPCC 试件断裂能与钢纤维体积分数的关系如图 6 所示. 由图 6 可见, HPCC 试件断裂能随着钢纤维体积分数的增加而增加, 试件 HPCC2 的断裂能较试件 HPCC1 提高 40%, 而不掺钢纤维试件的断裂能 (0.08 N/mm) 和 Fib Model Code 2010 提出的 C100 普通混凝土断裂能 (0.17 N/mm) 都远远小于掺钢纤维试件. 需要指出的是, 若试验条件允许荷载持续降为 0, 则钢纤维混凝土梁的断裂能会进一步增加.

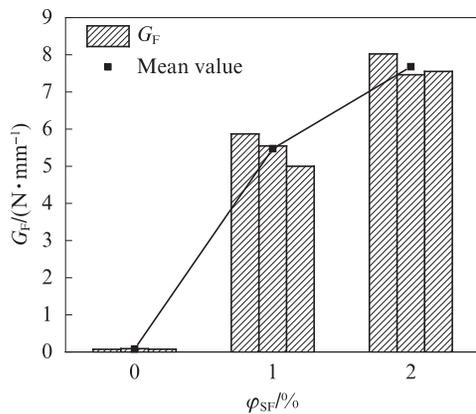


图6 HPCC 试件断裂能与钢纤维体积分数的关系
Fig. 6 Relationship between fracture energy and steel fiber content of HPCC specimens

2.4.3 脆性指数

通常认为脆性是材料在发生重大不可逆变形之前突然断裂的倾向, Hillerborg 等^[17]综合考虑材料和结构尺寸的影响, 提出了脆性指数 B 的计算公式:

$$B = \frac{D}{l_{ch}} \quad (5)$$

$$l_{ch} = \frac{EG_F}{f_t^2} \quad (6)$$

式中: l_{ch} 为特征长度; E 为弹性模量; f_t 为极限拉伸强度, 由狗骨头形状的试件经轴拉试验测得.

表 3 给出了 HPCC 试件的脆性指数. 脆性指数越高, 材料脆性越高. 由表 3 可见: 掺钢纤维能有效降低 HPCC 的脆性; 但进一步比较钢纤维体积分数为 1% 和 2% 的 HPCC 试件, 发现较高钢纤维体积分数对 HPCC 脆性的降幅很微小.

表3 HPCC 试件的脆性指数
Table 3 Brittleness of HPCC specimens

Specimen	E/GPa	$G_F/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	f_t/MPa	l_{ch}/mm	B
HPCC0	52.1	0.08	5.8	123.9	0.807
HPCC1	47.3	5.50	6.4	6351.3	0.016
HPCC2	50.4	7.70	7.2	7486.1	0.013

2.5 断裂面微观形态

图 7 给出了 HPCC 试件断裂面微观形态. 图 7(a) 为 HPCC 基体 SEM 图, 可以清楚地观察到区域 A 是充分水化后形成的致密层, 而区域 B 结构较疏松, 属于典型的尚未完全水化的基质. 1 条微裂纹在区域 A、B 的交界面形成, 并由此诱发了周边多条细小的裂纹. 图 7(b) 是基质致密层与疏松层交界面 SEM 图, 可以看到裂纹沿着薄弱面扩展的迹象. 加载初期微裂纹的形成与扩展主要由基体本身的性能决定, 因此 HPCC 起裂韧度不受钢纤维体积分数的影响. 图 7(c) 显示了钢纤维与基体的脱黏过程, 这个过程中钢纤维的桥接作用被激活, 钢纤维与基体间发生的相对滑移不仅迫使部分附着在钢纤维表面的薄弱基质被携带出来, 而且钢纤维周围包裹的基质也会产生大量裂纹, 从而引起 F -CMOD 曲线表现出典型的挠曲硬化特征. 图 7(d) 显示了钢纤维与基体的剥离, 此时钢纤维由于桥接应力的增大被明显拉长, 大量的能量被消耗, HPCC 断裂能因此大幅提升. 同时泊松效应引起钢纤维横向收缩导致其与基体进一步脱黏, 直至发生剥离, 此时钢纤维与基体间依靠滑动摩擦来抵抗外荷载, 黏聚力消失, 对应 F -CMOD 曲线的软化区. 图 7(e) 显示了钢纤维剥离后留下的滑动轨迹, 可以看到残留的薄弱基质. 值得一提的是, 在 SEM 图中并没有观察到钢纤维断裂的现象, 钢纤维失效的形式都是从基体中被拔出.

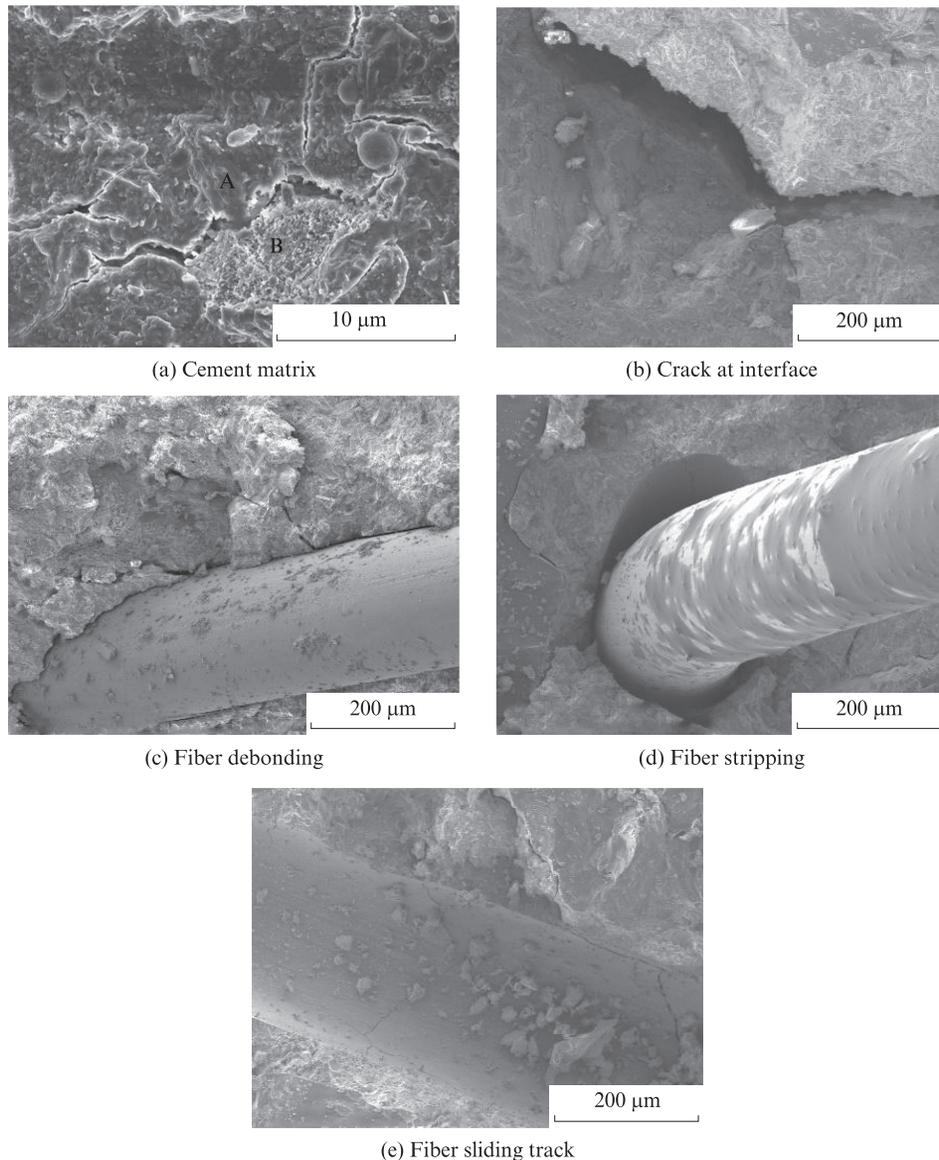


图7 HPCC试件断裂面微观形态

Fig. 7 Micro morphology of HPCC specimen fracture surface

3 结论

(1)HPCC 弯曲强度随钢纤维体积分数增加呈近似线性增长,更高的钢纤维体积分数会明显提高 HPCC 的残余强度, F -CMOD 曲线峰后延展性会随钢纤维体积分数增加而有所降低.

(2)HPCC 起裂韧度几乎不受钢纤维体积分数的影响.掺钢纤维后其失稳韧度增幅可达8倍以上.钢纤维体积分数对失稳韧度的提升存在限值,约为1%.

(3)HPCC 断裂能随着钢纤维体积分数的增加而增加,掺钢纤维能显著降低 HPCC 材料的脆性,但钢纤维体积分数进一步增加时,脆性的降幅很微小.

(4)HPCC 加载初期微裂纹的形成与扩展主要

由基体自身性能决定,钢纤维失效经历了纤维与基体脱黏和剥离的过程,失效模式为钢纤维拔出,钢纤维并未发生断裂.

参考文献:

- [1] BANTHIA N, MAJZADEH F, WU J, et al. Fiber synergy in hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC) in flexure and direct shear[J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 48: 91-97.
- [2] WILLE K, EL-TAWIL S, NAAMAN A E. Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete(UHP-FRC) under direct tensile loading[J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 48:53-66.
- [3] YOO D Y, SHIN H O, YANG J M, et al. Material and bond properties of ultra high performance fiber reinforced concrete

- with micro steel fibers [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 58:122-133.
- [4] 赵秋山, 徐慎春, 刘中宪. 钢纤维增强超高性能混凝土抗压性能的细观数值模拟[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(6): 1661-1673.
ZHAO Qiushan, XU Shenchun, LIU Zhongxian. Microscopic numerical simulation of the uniaxial compression of steel fiber reinforced ultra-high performance concrete [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(6):1661-1673.(in Chinese)
- [5] 管品武, 涂雅箏, 张普, 等. 超高性能混凝土单轴拉压本构关系研究[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(5):239-249.
GUAN Pinwu, TU Yazheng, ZHANG Pu, et al. A review on constitutive relationship of ultra-high-performance concrete under uniaxial compression and tension [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(5):239-249.(in Chinese)
- [6] 卿龙邦, 程兰婷, 慕儒, 等. 钢纤维水泥基复合材料断裂的 *K-R* 曲线研究[J]. *建筑材料学报*, 2016, 19(5):816-820.
QIN Longbang, CHENG Lanting, MU Ru, et al. *K-R* curves of steel fiber reinforced cement-based composites [J]. *Journal of Building Materials*, 2016, 19(5):816-820.(in Chinese)
- [7] 牛建刚, 左付亮, 王佳雷, 等. 塑钢纤维轻骨料混凝土的冻融损伤模型[J]. *建筑材料学报*, 2018, 21(2):235-240.
NIU Jiangang, ZUO Fuliang, WANG Jialei, et al. Freeze-thaw damage model of plastic-steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2018, 21(2):235-240.(in Chinese)
- [8] YOO D Y, LEE J H, YOON Y S. Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites [J]. *Composite Structures*, 2013, 106(12):742-753.
- [9] 卿龙邦, 聂雅彤, 慕儒. 钢纤维对水泥基复合材料抗起裂特性的影响[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(8):1862-1869.
QING Longbang, NIE Yatong, MU Ru. Influence of steel fibers on the resistance to crack initiation of cementitious composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(8): 1862-1869.(in Chinese)
- [10] 邓宗才. 混杂纤维增强超高性能混凝土弯曲韧性与评价方法 [J]. *复合材料学报*, 2016, 33(6):1274-1280.
DENG Zongcai. Flexural toughness and characterization method of hybrid fibers reinforced ultra-high performance concrete [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(6):1274-1280.(in Chinese)
- [11] ARSLAN M E. Effects of basalt and glass chopped fibers addition on fracture energy and mechanical properties of ordinary concrete: CMOD measurement [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 114:383-391.
- [12] AHMED S F U, MIHASHI H. Strain hardening behavior of lightweight hybrid poly vinyl alcohol(PVA) fiber reinforced cement composites [J]. *Materials and Structures*, 2011, 44(6): 1179-1191.
- [13] YOO D Y, SHIN H O, YANG J M, et al. Material and bond properties of ultra high performance fiber reinforced concrete with micro steel fibers [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 58:122-133.
- [14] BENCARDINO F, RIZZUTI L, SPADEA G, et al. Implications of test methodology on post-cracking and fracture behaviour of steel fibre reinforced concrete [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 46:31-38.
- [15] XU S L, REINHARDT H W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part I: Experimental investigation of crack propagation [J]. *International Journal of Fracture*, 1999, 98(2):111-149.
- [16] REN G M, WU H, FANG Q, et al. Effects of steel fiber content and type on static mechanical properties of UHPCC [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 163:826-839.
- [17] HILLERBORG A, MODÉER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements [J]. *Cement and Concrete Research*, 1976, 6(6):773-781.