

文章编号:1007-9629(2021)02-0276-07

钢纤维对 UHPC 拉伸性能及其拔出行为的影响

赵一鹤^{1,2}, 孙振平^{1,2}, 穆帆远^{1,2}, 庞敏^{1,2}, 李飞^{1,2,3}

(1. 同济大学材料科学与工程学院, 上海 201804; 2. 同济大学先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804; 3. 上海城建物资有限公司, 上海 200063)

摘要: 采用单轴拉伸试验和单丝拉拔试验探究了钢纤维形状、长度与直径对超高性能混凝土(UHPC)拉伸性能及钢纤维拔出行为的影响,并结合部分单丝拉拔试验样品的钢纤维表面形貌和钢纤维-基体界面的扫描电子显微镜(SEM)观察结果,对前述影响进行了合理解释。结果表明:掺有端钩型钢纤维的UHPC拉伸性能和钢纤维单丝拉拔性能普遍优于同直径同长度的平直型钢纤维,端钩型钢纤维的锚固力是导致其拉伸全应力-应变曲线出现“屈服段”和拉拔载荷-位移曲线出现平台期的原因;无论平直型还是端钩型钢纤维,当钢纤维直径相同时,UHPC的初裂强度随钢纤维长度增加而呈先增大后减小趋势,当钢纤维长度为16 mm时获得最优UHPC拉伸性能与钢纤维单丝拉拔性能;随着钢纤维直径的增加,掺有相同长度端钩型钢纤维的UHPC拉伸性能与钢纤维单丝拉拔性能逐渐变差,原因在于随着钢纤维直径的增加,钢纤维-基体界面出现泌水,导致混凝土局部孔隙增多,结构疏松。

关键词: 超高性能混凝土(UHPC); 钢纤维; 拉伸性能; 拔出行为; 界面

中图分类号: TU528.572

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.02.007

Effect of Steel Fibers on Tensile Properties of Ultra-high Performance Concrete and Its Pullout Behavior

ZHAO Yihe^{1,2}, SUN Zhenping^{1,2}, MU Fanyuan^{1,2}, PANG Min^{1,2}, LI Fei^{1,2,3}

(1. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Shanghai Urban Construction Engineering(Group) Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

Abstract: Effect of type, length and diameter of steel fibers on the tensile properties of ultra-high performance concrete(UHPC) and its pullout behavior were investigated through the uni-axial tensile test and single fiber pullout test. It can be explained by scanning electron microscope(SEM) results of fiber surface and interfacial transition zone(ITZ). The results show that the tensile properties and pullout behavior of UHPC with end-hooked fiber are better than that of UHPC with straight fiber. Compared to straight fiber, better bonding properties of ITZ between end-hooked fiber and matrix contributes to the “yield period” in tensile stress-strain curve and platform period of pullout curve. For both type of steel fiber of the same diameter, the elastic tensile strength increases at first and then decreases as fiber length increases. The optimum tensile property and pullout behavior are gained at the length of 16 mm. For UHPC with end-hooked fibers at the same length, the tensile property and pullout behavior declines, due to increasing

收稿日期:2019-10-09; 修订日期:2020-02-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1534207,51678441);上海市经信委专项资金项目(沪CXY-2016-012);上海市建委专项课题(住建管2017-001-009);上海市2019年度“联盟计划”资助项目(LM201947)

第一作者:赵一鹤(1996—),女,浙江杭州人,同济大学硕士生. E-mail:1830648@tongji.edu.cn

通讯作者:孙振平(1969—),男,新疆奇台人,同济大学教授,博士生导师,博士. E-mail:szhp@tongji.edu.cn

parosity and bleeding in ITZ at a large diameter.

Key words: ultra-high performance concrete(UHPC); steel fiber; tensile property; pullout behavior; interfacial transition zone

超高性能混凝土(UHPC)中胶凝材料用量较高,水胶比极低,且常掺加随机分布的短纤维以提高其强度和韧性^[1-3].2002 年法国颁布了 UHPC 设计指南^[4],根据拉伸全应力-应变曲线,将 UHPC 分为高应变强化、低应变强化和应变软化 3 类,这是当前世界普遍认同的 UHPC 分类方法.对于高应变强化与低应变强化类型的 UHPC,其曲线分为应力随应变呈线性增长的弹性段,应力非线性增长至极限拉伸强度的强化段,和应力逐渐下降的软化段,极限拉伸强度所对应的极限拉伸应变越大,则其应变强化程度越高.对于应变软化类型的 UHPC,其曲线只存在弹性段和软化段,不存在强化段^[5].

UHPC 基体和纤维之间良好的协同作用使 UHPC 拥有优越的拉伸性能.与平直型纤维相比,在 UHPC 中掺加异型纤维能获得更好的极限拉伸强度^[6],掺加较高长径比的纤维亦可提升其应变强化程度,但建议纤维的长径比不超过 80 或长度不超过 30 mm^[7].由于纤维-基体间的黏结力和纤维桥接作用承担基体开裂后的主要载荷,故纤维的拔出行为成了国内外的研究重点.然而部分文献仅关注了纤维单因素对 UHPC 宏观拉伸性能的影响,并未从微观角度探讨纤维各因素对其拔出行为的影响机理^[8-13].为弥补现有研究的不足,考虑到钢纤维常用于 UHPC 增强增韧,且效果优于其他材质纤维,故本文选用长度不超过 20 mm 的钢纤维,研究其形状、长度与直径等对 UHPC 拉伸性能的影响,以及在受拉情况下钢纤维从基体中的拔出行为,以期为 UHPC 中钢纤维的选择和应用提供参考数据.

1 试验

1.1 UHPC 基体原材料及配合比

UHPC 基体的原材料包括:52.5 级普通硅酸盐水泥;颗粒平均直径为 1.5 μm 的粉煤灰;S95 矿渣粉;920 硅灰;粒径范围分别为直径 270~550 μm 和 150~212 μm 的石英砂,试验时以最紧密堆积方案配合;聚羧酸系减水剂 PC200(粉状),减水率(质量分数)>25%;符合 JGJ 63—2006《混凝土用水标准》的混凝土拌和用水.UHPC 基体的配合比(质量比)见表 1.

表 1 UHPC 基体配合比
Table 1 Mix proportion of UHPC matrix

						ω/%
Cement	Fly ash	Slag	Silica fume	Sand	Water	PC200
1.00	0.13	0.13	0.07	1.00	0.27	0.01

1.2 钢纤维

采用平直型和端钩型 2 种形状的市售钢纤维,分为 3 组:P 组为同直径不同长度的平直型钢纤维,DA 组为同直径不同长度的端钩型钢纤维,DB 为同长度不同直径的端钩型钢纤维.其规格如表 2 所示.本试验中钢纤维的体积分数均为 2.5%.

表 2 钢纤维规格
Table 2 Geometries of steel fibers

Fiber type	Appearance	Group	No.	Diameter/ mm	Length/ mm
Straight		P	P2213	0.22	13
			P2216	0.22	16
			P2218	0.22	18
End-hooked		DA	D2213	0.22	13
			D2216	0.22	16
			D2218	0.22	18
		DB	D3020	0.30	20
			D3520	0.35	20
			D5020	0.50	20

1.3 试验方法

1.3.1 单轴拉伸试验

按表 1 称取 UHPC 基体的原材料,将原材料(不包括水)置于搅拌锅中,干混 90 s 后将水缓慢倒入搅拌锅中,继续搅拌 5 min 直至充分拌和.再投入钢纤维,继续搅拌 6 min 后停机出料,每组成型 3 根“骨头型”试件,靠拌和物自重填充模具,1 d 后拆模并置于(20±1)℃水中养护至规定龄期.试件编号形式为“钢纤维编号-UHPC”.

UHPC 的单轴拉伸试验在 30 t 电子伺服万能试验机上进行,采用王俊颜等^[14]设计的一套特殊夹具.试件由上下 2 个夹具固定,中部拉伸段固定有 2 个矩形金属架,这 2 个金属架之间距离即为试件的测试标距 L(本试验取 150 mm).金属架四角置 4 个精度为 0.000 1 mm 的线性可变位移计(LVDT),LVDT 所测位移的平均值与 L 的比值即为试件轴拉应变,与计算机自动采集的轴拉应力绘成拉伸全应力-应变曲线.

设定试验加载速率为 0.2 mm/min,持续加载直至试件拉应力小于峰值应力的 2/3。

1.3.2 单丝拉拔试验

参照 CECS13:2009《纤维混凝土试验方法标准》中钢纤维与水泥砂浆黏结强度试验方法,进行 28 d 单丝拉拔试验。试验所用“8”字形金属模具符合 GB/T 16777—2008《建筑防水涂料试验方法》中的规定,在试件中部最小截面处放置厚度为 1.0 mm 的塑料隔板,隔板上开有 5 个等距一字排开的孔用于放置钢纤维。单丝拉拔试验结果在无钢纤维断裂的情况下取 5 根钢纤维的平均值,每组 3 个试件。拉拔载荷与位移均由 30 t 电子伺服万能试验机实时测量得出,试验加载速率为 0.2 mm/min,持续加载直至试件拉应力为零,此时钢纤维完全拔出或拉断。

黏结强度 τ_f 按式(1)计算:

$$\tau_f = \frac{P_m}{5\pi d_f l_f} \quad (1)$$

式中: P_m 为钢纤维拔出时最大载荷,N; d_f 为钢纤维直径,mm; l_f 为埋入深度,mm。

拔出能 W 按式(2)计算:

$$W = \int P dx \quad (2)$$

式中: P 为载荷,N; x 为拔出位移,mm。

拔出能用单丝拉拔试验得到的拉拔载荷-位移曲线面积进行计算。

1.3.3 扫描电子显微镜(SEM)观察

利用扫描电子显微镜(SEM)观察单丝拉拔试验中各样品钢纤维表面形貌与钢纤维-基体界面。由于钢纤维长度对单丝拉拔性能的影响机制难以用微观形貌表征,故只选取了同长度不同直径的 3 种端钩型钢纤维(DB 组)的单丝拉拔试验样品,观察拔出的钢纤维表面。另选取了 D5020 钢纤维的单丝拉拔试验样品,对钢纤维-基体界面进行喷金处理后观察。

2 结果与讨论

2.1 拉伸性能

2.1.1 钢纤维形状对 UHPC 拉伸性能的影响

掺有同直径不同长度平直型和端钩型钢纤维的 UHPC 拉伸全应力-应变曲线如图 1 所示。由图 1 可见:所有曲线弹性段、强化段和软化段区别明显;掺 DA 组钢纤维的 UHPC 在弹性段和强化段之间存在类似钢筋拉伸时的“屈服段”,表现为拉伸强度基本保持不变而拉伸应变持续增长;而掺 P 组钢纤维的 UHPC 在弹性段结束后直接进入强化段。这是因为弹性段 UHPC 基体破坏后,P 组钢纤维拔出过程中仅需克服钢纤维本身与基体的摩擦阻力以及化学胶结力,而 DA 组钢纤维还需要克服端钩部分与基体间的锚固力,使其拥有更高的极限拉伸强度和极限拉伸应变,同时也是其“屈服段”的来源。

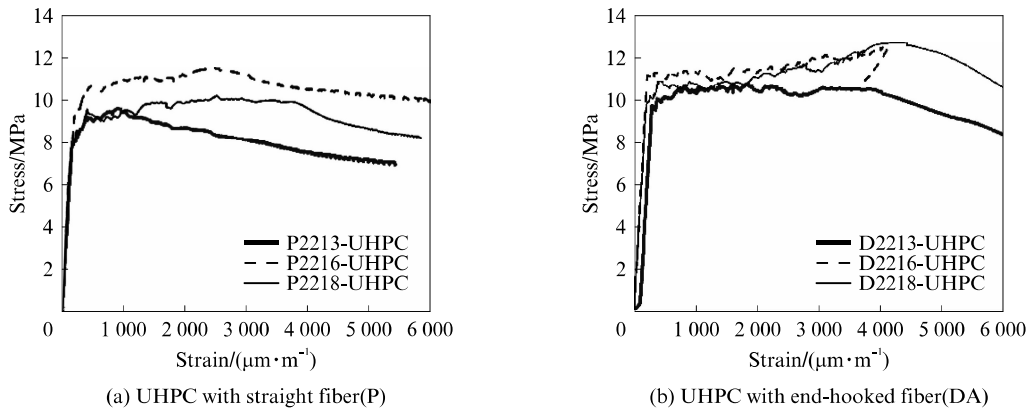


图1 掺有同直径不同长度平直型和端钩型钢纤维的 UHPC 拉伸全应力-应变曲线

Fig. 1 Tensile stress-strain curves of UHPC with steel fibers of the same diameter and different lengths(P and DA)

2.1.2 钢纤维长度对 UHPC 拉伸性能的影响

由图 1 还可见:无论平直型还是端钩型钢纤维,当其直径相同时,UHPC 均在钢纤维长度为 16 mm 时获得了最大的初裂强度。P2218-UHPC 极限拉伸应变为 2 534 $\mu\text{m}/\text{m}$,分别为 P2213-UHPC(954 $\mu\text{m}/\text{m}$) 的 2.6 倍和 P2216-UHPC(2 365 $\mu\text{m}/\text{m}$) 的 1.1 倍,D2218-UHPC 获得了最大极限拉伸强度(12.7 MPa)

与极限拉伸应变(4 232 $\mu\text{m}/\text{m}$),可见相同直径下钢纤维越长,对 UHPC 的应变强化效果越明显。根据曲线形态,P2213-UHPC 为低应变强化 UHPC,P2216-UHPC 和 P2218-UHPC 为高应变强化 UHPC,掺 DA 组钢纤维的 UHPC 则全部为高应变强化 UHPC。其中 D2216-UHPC 的曲线在强化段出现回转,主要是因为单轴拉伸试验过程中,主裂缝出现

在标距外,导致应力松弛,标距内的试件应变减小。

2.1.3 钢纤维直径对 UHPC 拉伸性能的影响

图 2 是掺有同长度不同直径端钩型钢纤维的 UHPC 拉伸全应力-应变曲线。由图 2 可见:当钢纤维直径在 0.30 mm 以上时,端钩型钢纤维的应变强化作用明显减弱,仅 D3020-UHPC 可以实现一定程度的应变强化,D3520-UHPC 表现为应变软化,而 D5020-UHPC 表现为脆性断裂。钢纤维直径越大,掺 DB 组钢纤维的 UHPC 初裂强度与初裂应变越小。当掺入 D5020 时,UHPC 单位体积内的钢纤维根数降低,减弱了钢纤维在 UHPC 拉伸过程中的增韧效果。观察 D5020-UHPC 断面可见,大量钢纤维沉积在试件底部,试件中部和上部仅有少数钢纤维分布,因此若选用直径较大的钢纤维,应调整 UHPC 基体的黏聚性,避免钢纤维沉积。

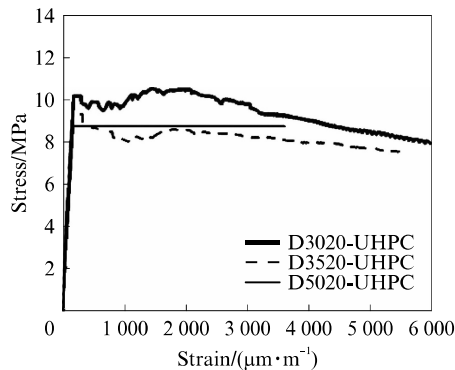


图 2 掺有同长度不同直径端钩型钢纤维的 UHPC 拉伸全应力-应变曲线

Fig. 2 Tensile stress-strain curves of UHPC with end-hooked steel fibers of the same length and different diameters

2.2 拔出行为及其机理

2.2.1 钢纤维形状对 UHPC 中钢纤维拔出行为的影响

根据式(1)、(2)计算得到 3 组钢纤维的黏结强度及拔出能,结果如表 3 所示。由表 3 可见:当钢纤维直径相同时,DA 组的整体表现优于 P 组;钢纤维长度为 16 mm 时,P 组和 DA 组的黏结强度和拔出能均为最优,D2216 的黏结强度和拔出能分别是 P2216 组的 4.2 倍和 2.3 倍;当钢纤维长度相同时,随着纤维直径的增加,DB 组钢纤维的黏结强度和拔出能均下降,从而影响对应 UHPC 的拉伸性能。

图 3 为同直径不同长度的平直型和端钩型钢纤维的拉拔载荷-位移曲线。由图 3 可见,由于平直型钢纤维无弯曲,故不存在锚固力对拉拔载荷的贡献^[15],因此导致了 P 组与 DA 组拉拔载荷-位移曲

表 3 钢纤维的黏结强度及拔出能
Table 3 Bond strength and pullout energy of steel fibers

Group	No.	τ_t /MPa	$W/(N \cdot mm)$
P	P2213	0.23	3.41
	P2216	0.71	17.85
	P2218	0.32	9.20
DA	D2213	2.23	20.50
	D2216	2.98	41.36
	D2218	1.86	37.13
DB	D3020	3.31	152.16
	D3520	2.49	113.02
	D5020	1.69	101.56

线形态的不同,且使 P 组获得了更小的拉拔载荷,从而降低了掺 P 组钢纤维 UHPC 的极限拉伸强度和应力强化程度。

2.2.2 钢纤维长度对 UHPC 中钢纤维拔出行为的影响

由图 3 可见:P2216 具有最大的拉拔载荷,其纤维脱黏阶段可见 3 个能量耗散峰,对应 5 根纤维中的 3 根陆续达到完全脱黏。3 种纤维的黏结强度和拔出能也与其对应的 P2216-UHPC 极限拉伸强度大小关系保持一致,证明对于平直型钢纤维,钢纤维-基体界面的化学胶结力在 UHPC 发生初裂后起到了主要的抗拉作用^[16],且导致 UHPC 产生了不同程度的应力强化。

D2213、D2216 与 D2218 均在位移为 1.3 mm 左右时达到最大拉拔载荷,分别为 50.1、82.3、57.7 N,分别为同直径同长度平直型钢纤维的 9.6、4.2、5.8 倍。达到最大拉拔载荷后端钩型钢纤维发生形变,其端钩逐渐被拉开,曲线“平台期”(位移在 2.0~3.0 mm 之间)钢纤维不再形变^[17],而是在化学胶结力和锚固力的共同作用下屈服,载荷由未被完全拉直的端钩锚固力提供^[18-19],是 UHPC 拉伸全应力-应变曲线中“屈服段”的来源。

2.2.3 钢纤维直径对 UHPC 中钢纤维拔出行为的影响

图 4 为同长度不同直径 DB 组端钩型钢纤维的拉拔载荷-位移曲线。由图 4 可见:D3020、D3520 和 D5020 的最大拉拔载荷分别为 155.8、136.7、132.3 N;其中 D3520 在平台期后出现第 2 个峰,这是因为其端钩与基体咬合较紧密,锚固力使得拉拔载荷再次上升,出现多个峰段^[6],因此在对应的 D3520-UHPC 拉伸全应力-应变曲线“屈服段”后会有明显的拉伸强度增长而非直接进入软化段(见图 2);D5020 的

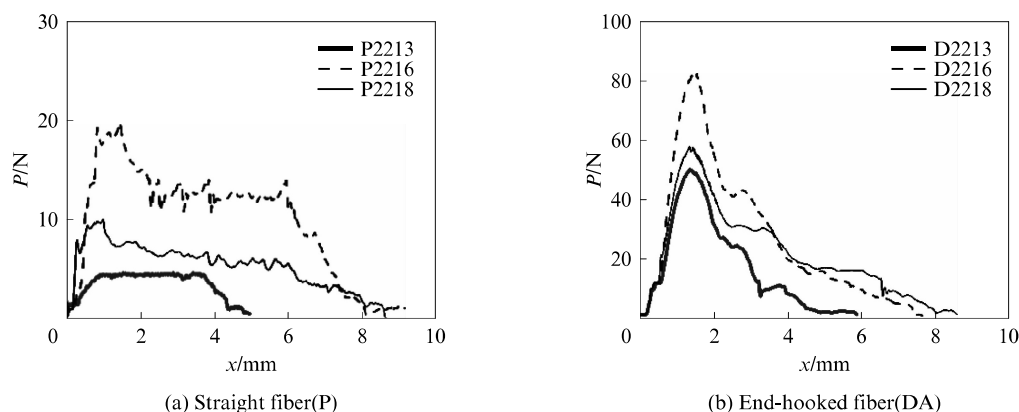


图3 同直径不同长度平直型和端钩型钢纤维的拉拔载荷-位移曲线
Fig. 3 Pullout curves of steel fibers of the same diameter and different lengths (P and DA)

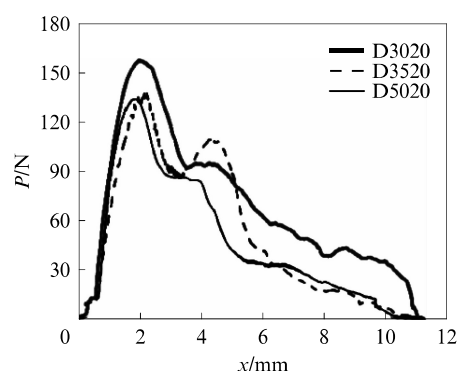


图4 同长度不同直径DB组端钩型钢纤维的拉拔载荷-位移曲线
Fig. 4 Pullout curves of DB group end-hooked steel fibers of the same length and different diameters

拉拔载荷-位移曲线在 2.7 mm 进入平台期, 早于 D3520 (3.3 mm) 和 D3020 (3.6 mm), 即钢纤维直径越大, 拉拔载荷-位移曲线越早进入平台期, 反映在单轴拉伸试验中则越早结束弹性段, 初裂强度也越

小, 这与 Laranjeira 等^[20]得出的结论一致.

2.2.4 微观形貌分析

为进一步解释钢纤维直径对其拔出行为的影响, 观察单丝拉拔试验后 DB 组钢纤维的表面形貌, 其 SEM 图见图 5. 由图 5 可见: D3020 钢纤维表面有大量呈团簇状的 UHPC 水化产物残留, 且基体在纤维拔出过程中留下了明显的竖向划痕, 钢纤维表面由于基体胶结, 表层大量呈条状剥落, 这表明钢纤维和基体结合紧密; D3520 钢纤维表面可见少量颗粒状水化产物残留和竖向拔出划痕, 部分表层呈鳞片状剥落; D5020 钢纤维表面水化产物残留极少, 有明显竖向拔出划痕, 但表层未见剥落, 证明纤维和基体结合不够紧密, 化学胶结力在纤维拔出过程中贡献不大. 在一定范围内, 随着端钩型钢纤维的直径增大, 纤维与基体的胶结逐渐由紧密变疏松, 因此造成了 UHPC 单丝拉拔和拉伸性能的逐级递减.

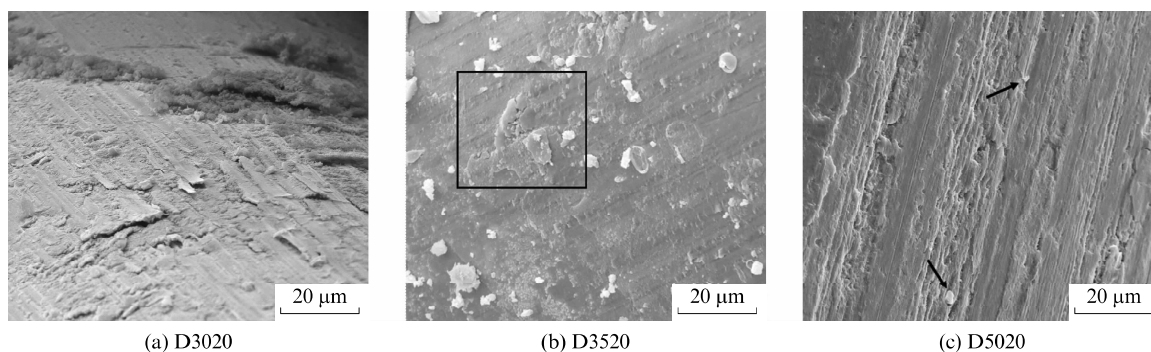


图5 单丝拉拔试验后 DB 组钢纤维表面形貌 SEM 图
Fig. 5 SEM micrographs of DB group fiber surface after pullout test

图 6 给出了埋有 D5020 纤维和拔出 D5020 纤维后的 UHPC 基体 SEM 图. 由图 6(a) 可见, D5020 钢纤维下缘与基体结合情况良好, 有絮状水化产物

紧紧攀附在钢纤维表面, 而钢纤维上缘则与基体脱离, 可见较宽的空隙. 为探明原因, 将拔出钢纤维后的基体再次进行 SEM 分析, 放大后的基体表面形

貌如图 6(b)所示.由 6(b)可见,基体表面亦有竖向划痕,钢纤维下缘对应的基体表面有少量絮状和颗粒状的水化产物残留,并且无可见孔隙,而上表面仅有极少水化产物残留,同时孔隙率较大,与基体下半

部分有较为明显的分界线.根据 Uygunoglu^[21]的理论,应当是钢纤维的掺入导致了钢纤维-基体界面出现泌水,多余的自由水停留在钢纤维上表面,造成基体和钢纤维结合不够紧密.

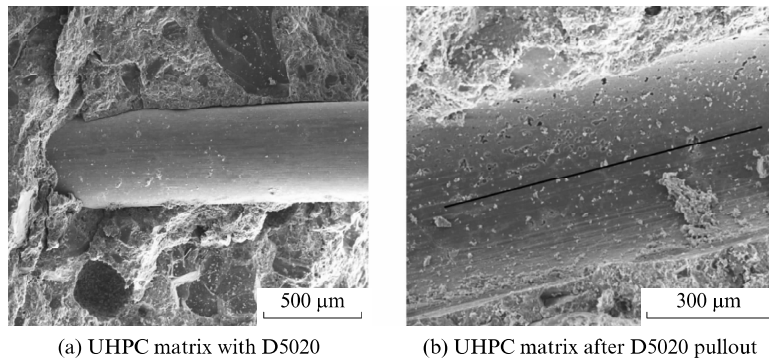


图 6 埋有 D5020 纤维和拔出 D5020 纤维后的 UHPC 基体 SEM 图
Fig. 6 SEM micrographs of UHPC matrix with D5020 and after D5020 pullout

3 结论

(1)UHPC 的拉伸性能与钢纤维本身的单丝拉拔性能有关.钢纤维直径为 0.22 mm,长度为 13~18 mm 时,端钩型钢纤维在拔出过程中提供了同直径同长度平直型钢纤维不具备的锚固力,导致前者的单丝拉拔性能优于后者,掺有端钩型钢纤维的 UHPC 也因此具有更高的极限拉伸强度和极限拉伸应变.无论平直型还是端钩型钢纤维,均在钢纤维长度为 16 mm 时取得最佳的纤维-基体界面黏结强度,而 UHPC 的应变强化程度随钢纤维长度增加而增强.

(2)当钢纤维长度为 20 mm,直径为 0.30~0.50 mm 时,随着钢纤维直径的增加,钢纤维本身的单丝拉拔性能和 UHPC 的拉伸性能均变差,这与钢纤维-基体界面泌水所致结构疏松有关.钢纤维直径过大时导致的沉降也是影响 UHPC 拉伸性能的原因.

参考文献:

- [1] 刘建忠,韩方玉,周华新,等.超高性能混凝土拉伸力学行为的研究进展[J].材料导报,2017,31(23):24-32.
LIU Jianzhong, HAN Fangyu, ZHOU Huaxin, et al. An overview on tensile behaviour of ultra-high performance concrete [J]. Materials Review, 2017, 31(23): 24-32. (in Chinese)
- [2] PARK S H, KIM D J, RYU G S, et al. Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(2): 172-184.
- [3] RICHARD P C M. Reactive powder concretes with high ductility and 200~800 MPa compressive strength[J]. ACI Mate-

- rials Journal, 1994, 144(3): 507-518.
- [4] DE GÉNIE CIVIL AFGC A F. Ultra high performance fibre-reinforced concrete recommendations: SETRA F2011-2002[S].
- [5] 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.
- [6] CHANVILLARD G, AITCIN P C. Pull-out behavior of corrugated steel fibers: Qualitative and statistical analysis[J]. Advanced Cement Based Materials, 1996, 4(1): 28-41.
- [7] YOO D Y, KANG S T, YOON Y S. Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC[J]. Construction and Building Materials, 2014, 64: 67-81.
- [8] BEGLARIGALE A, YAZICI H. Pull-out behavior of steel fiber embedded in flowable RPC and ordinary mortar[J]. Construction and Building Materials, 2015, 75: 255-265.
- [9] WU Z M, KHAYAT K H, SHI C J. How do fiber shape and matrix composition affect fiber pullout behavior and flexural properties of UHPC? [J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 90: 193-201.
- [10] CAO Y Y Y, YU Q L, BROUWERS H J H. Effects of inclination angle on pullout performance of hooked end fiber embedded in UHPC[J]. Key Engineering Materials, 2019, 812: 60-65.
- [11] 孙伟, 高建明, 秦鸿根. 钢纤维混凝土界面粘结强度的研究[J]. 硅酸盐学报, 1985, 13(3): 292-300.
SUN Wei, GAO Jianming, QIN Honggen. Studies on bond strength of interface between fiber and matrix in steel fiber reinforced concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1985, 13(3): 292-300. (in Chinese)
- [12] 高绪明. 钢纤维对超高性能混凝土性能影响的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
GAO Xuming. Research on the performance of UHPC with

- steel fiber [D]. Changsha: Hunan University, 2013. (in Chinese)
- [13] 徐蒙. 多种钢纤维对超高性能混凝土力学性能影响的比较研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- XU Meng. Comparative study on influences of various steel fibers on mechanical properties of ultra-high performance concrete (UHPC) [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [14] 王俊颜, 耿莉萍, 郭君渊, 等. UHPC 的轴拉性能与裂缝宽度控制能力研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49 (12): 165-169.
- WANG Junyan, GENG Liping, GUO Junyuan, et al. Experimental study on crack width control ability of ultra-high performance concrete [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(12): 165-169. (in Chinese)
- [15] NAAMAN A E, NAJM H. Bond-slip mechanisms of steel fibers in concrete [J]. ACI Materials Journal, 1991, 88 (2): 135-145.
- [16] PAVLOVIC M N. Fracture mechanics of concrete: Applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle material [J]. Engineering Structures, 1996, 18 (11): 887-888.
- [17] POMPO A, STUPAK P R, NICOLAIS L, et al. Analysis of steel fibre pull-out from a cement matrix using video photography [J]. Cement and Concrete Composites, 1996, 18 (1): 3-8.
- [18] KHABAZ A. Monitoring of impact of hooked ends on mechanical behavior of steel fiber in concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 113: 857-863.
- [19] 吴泽媚. 超高性能混凝土中纤维与基体界面粘结性能多尺度研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- WU Zemei. Multi-scale investigation of microstructure, fiber-matrix bond, and mechanical properties of ultra-high performance concrete [D]. Changsha: Hunan University, 2017. (in Chinese)
- [20] LARANJEIRA F, MOLINS C, AGUADO A. Predicting the pullout response of inclined hooked steel fibers [J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(10): 1471-1487.
- [21] UYGUNOĞLU T. Effect of fiber type and content on bleeding of steel fiber reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(2): 766-772.

~~~~~

(上接第 267 页)

- [40] YERMAK N. Influence of steel and/or polypropylene fibres on the behavior of concrete at high temperature: Spalling, transfer and mechanical properties [J]. Construction and Building Materials, 2017, 132: 240-250.
- [41] TAN T, NG L. Predicting non-evaporable water loss of cement paste at elevated temperature [J]. Advances in Cement Research, 2006, 18(2): 83-89.
- [42] ZEIML M. How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(5): 929-942.
- [43] JU Y, LIU H B, TIAN K P. An investigation on micro pore structures and the vapor pressure mechanism of explosive spalling of RPC exposed to high temperature [J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(2): 458-470.
- [44] WASIM K, KODUR V. Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(11): 1112-1122.

~~~~~

(上接第 275 页)

- [16] METHA P K, MONTEIRO P J M. Concrete: Microstructure, properties and materials [M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2006: 55-60.
- [17] LI J J, NIU J G, WAN C J, et al. Investigation on mechanical properties and microstructure of high performance polypropylene fiber reinforced lightweight aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 118: 27-35.
- [18] LERCH J O, BESTER H L, ROOYEN A S V, et al. The effect of mixing on the performance of macro synthetic fiber reinforced concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2018, 103: 130-139.
- [19] LI Y, HU S G. The microstructure of the interfacial transition zone between steel and cement paste [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(3): 385-388.
- [20] 董祥. 纤维增强高强轻骨料混凝土物理力学性能、抗冻性及微观结构研究 [D]. 南京: 东南大学, 2005.
- DONG Xiang. Study on physical and mechanical properties, frost resistance and microstructure of fiber reinforced high performance lightweight aggregate concrete [D]. Nanjing: Southeast University, 2005. (in Chinese)