

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202205182024101980

文章编号:1674-599X(2024)05-0045-08

引用格式:袁明,朱海乐,颜东煌,等.硅灰和纤维直径对UHPC黏结性能的影响研究[J].交通科学与工程,2024,40(5):45-52.

Citation: YUAN Ming, ZHU Haile, YAN Donghuang, et al. Influence of silica fume and fiber diameter on bonding performance of UHPC [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2024, 40(5): 45-52.

## 硅灰和纤维直径对UHPC黏结性能的影响研究

袁明,朱海乐,颜东煌,朱楠萱,袁晟

(长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘要:**为探究钢纤维类型对超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)基体黏结性能的影响规律,以直圆型钢纤维直径(0.2、0.3 mm)和硅灰掺量为变量,开展了10组双丝拉拔试验。结果表明:随着硅灰掺量的增加,0.3 mm的直圆型钢纤维的拉拔荷载、拉拔功及黏结强度均呈现先增大后减小的趋势。在硅灰掺量为20%时,钢纤维的利用率达到峰值43%;在进一步分析硅灰掺量对直径为0.2 mm的直圆型钢纤维的影响时,其评价参数(如拉拔荷载、拉拔功及黏结强度)的变化规律与0.3 mm钢纤维的截然相反。虽然两种不同直径钢纤维的荷载-滑移曲线在趋势上呈现一定的相似性,但0.3 mm的直圆型钢纤维曲线较为饱满,并且存在较多波峰波谷。综上可得,钢纤维直径和硅灰掺量对UHPC基体的黏结性能均有较大影响,这一发现不仅深化了UHPC复合材料内部作用机制的研究,也为后续进一步优化UHPC基体的整体性能、探索其更广泛的应用领域提供了宝贵的参考依据。

**关键词:**桥梁工程;超高性能混凝土;双丝拉拔试验;黏结性能;钢纤维类型

中图分类号:U444

文献标志码:A

## Influence of silica fume and fiber diameter on bonding performance of UHPC

YUAN Ming, ZHU Haile, YAN Donghuang, ZHU Nanxuan, YUAN Sheng

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** In order to reveal the influence of steel fiber type on the bonding performance of ultra-high performance concrete (UHPC) matrix, 10 groups of double fibers pull-out tests were carried out with different straight circular fiber diameters (0.2 mm and 0.3 mm) and mixing amounts of silica fume as variables. The results show that with the increase in the mixing amount of silica fume, the pull-out load, pull-out work, and bond strength of the straight circular fiber with a diameter of 0.3 mm follow a trend of first increasing and then decreasing. When the mixing amount of silica fume is 20%, the utilization rate of steel fiber reaches its peak of 43%. A further analysis was made on the effect of the mixing amount of silica fume on straight circular fibers with a diameter of 0.2 mm, and it is found that the variation of evaluation parameters (such as pull-out load, pull-out work, and bond strength) is completely opposite to that of 0.3 mm fibers. Although the load-slip curves of the two kinds of steel fibers show some similarity in trend, the curves of the straight circular fibers with a diameter of 0.3

收稿日期:2022-05-18

基金项目:国家自然科学基金项目(52078054、51878073);湖南省交通科技项目(201932);湖南省自然科学基金项目(2021JJ30730);湖南省研究生科研创新项目(CX20200832、CX20190650)

通信作者:颜东煌(1961—),男,教授,主要从事大跨度桥梁的施工控制理论与应用、斜拉桥设计理论与合理设计状态方面的研究工作。E-mail:yandonghuang@126.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

mm are relatively full, and there are many peaks and troughs. To sum up, both the steel fiber diameter and the mixing amount of silica fume largely influence the bonding performance of UHPC. This finding not only deepens the study of the internal mechanism of UHPC composites but also provides valuable reference for further optimizing the overall performance of UHPC and exploring its wider applications.

**Key words:** bridge engineering; ultra-high performance concrete; double fibers pull-out test; bonding performance; steel fiber type

超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 是一种新型的水泥基材料<sup>[1-2]</sup>, 作为一种前沿水泥基复合材料, 近年来备受国内外学者的关注。其卓越的力学性能、出色的耐久性以及优异的韧性, 均成为了研究领域的热点话题。将钢纤维应用到混凝土中, 可加强界面间的黏结应力, 提升混凝土的综合性能<sup>[3]</sup>, 为工程应用开辟了更为广阔的前景。相较于传统混凝土, 未掺入钢纤维的 UHPC 虽在力学性能上已有所提升, 但在面对较大荷载作用时, 仍存在易产生脆性断裂的局限性。而在 UHPC 中掺入适量钢纤维后, 将会显著提升其强度、韧性以及抗弯拉性能。这是因为钢纤维在基体内部能传递荷载, 起到“桥接”作用, 显著抑制并延缓了基体内部微裂纹的产生与发展, 从而大幅度提高了 UHPC 的延性及耐久性。因此, UHPC 因其优异的力学性能, 被不断应用于桥梁、建筑及水利等领域。其中, 探究及改善钢纤维与 UHPC 基体的界面黏结性能, 以进一步提升 UHPC 的整体性能, 更是成为了研究的焦点和热点。

在研究钢纤维与 UHPC 基体的界面黏结性能时, 常采用纤维拉拔试验, 其中单丝拉拔试验因其简便性而被广泛应用<sup>[4]</sup>。然而, 单丝拉拔试验难以对 UHPC 中钢纤维的作用机理进行客观全面的表征。因此, 也有部分学者采用多丝拉拔试验进行研究<sup>[5]</sup>。双丝拉拔试验作为多丝拉拔试验的前提能较好地反映两根钢纤维的拔出行为和钢纤维-UHPC 基体界面的黏结特性。本文采用双丝拉拔试验作为研究方法。

已有研究<sup>[6-9]</sup>表明, 钢纤维-UHPC 基体界面黏结特性的影响因素包括钢纤维类型、基体强度、加载速率、养护条件、龄期和钢纤维间距等。其中, 基体强度的影响因素 (水胶比、胶凝材料掺量、外加剂等) 也会直接或间接地影响界面黏结性能。ABU-LEBDEH<sup>[6]</sup>以基体强度和加载速率为变量, 对超高性能混凝土中四种钢纤维的黏结滑移机理和四种钢纤维对加载速率的敏感性进行研究。结果表明:

相较于光滑纤维, 变形纤维对加载速率更为敏感。KIM 等<sup>[7]</sup>通过多丝拉拔试验探究了钢纤维形状、间距及加载速率对 UHPC 中钢纤维拔出行为的影响; YOO 等<sup>[8]</sup>研究了钢纤维间距和加载速率对 UHPC 单丝拉拔和多丝拉拔试验的影响, 发现可通过增加加载速率来提高钢纤维的拉拔力, 且嵌入单根纤维的试件比嵌入多根纤维的试件有着更大的拉拔力。对于嵌入多根钢纤维的试件, 钢纤维拉拔力对加载速率的敏感程度随钢纤维间距的减小而增大。LEE 等<sup>[9]</sup>用纤维拉拔试验研究了多根倾斜钢纤维的拉拔性能, 并推导出适用倾斜纤维拔出行为的理论模型; 刘军等<sup>[10]</sup>探究了纤维角度及类型对钢纤维-UHPC 拉拔性能的影响, 结果表明, 拉拔荷载随纤维夹角的增大呈先增大后减小的趋势。当钢纤维夹角为  $45^\circ$  时, 拉拔荷载达到最大。同时, 相对于直圆型和端钩型钢纤维, 波纹型钢纤维更易发生脱黏。

在开展钢纤维-UHPC 基体界面黏结性能定性研究的同时, 部分学者也对其进行了深入的数值模拟。如张亚芳等<sup>[11-13]</sup>为研究材料细观非均匀程度对拉拔性能的影响, 对不同钢丝直径、埋深、基体强度及界面模量下的单丝和双丝拉拔数值模型展开了分析, 并对拉拔过程进行声发射测试。为研究螺旋钢纤维提升 UHPC 强度的机理, 叶居东等<sup>[14]</sup>对嵌入 UHPC 中不同长度的钢纤维进行单丝拉拔试验, 并用 X 射线断层扫描 (X-ray computed tomography, XCT) 技术观察拉拔前后的基体, 得到螺旋钢纤维的拉拔荷载-滑移曲线近似呈三折线分布 (线性脱黏段、塑性解螺旋段和骤降段) 的结论。拉拔后的钢纤维发生塑性变形, 且经 XCT 检测后发现拉拔前后的基体纤维隧洞无明显破坏, 钢纤维被旋转拔出。

由以上研究可知, 提升钢纤维与基体的黏结性能可以改善 UHPC 材料的整体强度和韧性, 但目前的大多数研究仅聚焦于单丝拉拔物理试验和双丝拉拔的数值模拟过程, 忽视了对双丝拉拔物理试验的研究。为了解钢纤维-UHPC 基体界面黏结特性及钢纤维的拔出行为, 本文将钢纤维类型设置为变

量,采用双丝拉拔试验开展了钢纤维-UHPC基体界面黏结特性的研究,以期后续多丝拉拔试验提供一定的理论依据。

## 1 试验方案

### 1.1 试验材料

试验所用材料包括细度为80 μm的南方P·O 52.5普通硅酸盐水泥(实测3 d抗压强度和28 d抗压强度分别为33.9和67.3 MPa);平均粒径为0.1 μm、烧失量为1.8%的超细硅灰;减水效率大于30%的聚羧酸高性能减水剂;平均粒径小于600 μm的精致水洗石英砂;SiO<sub>2</sub>质量分数大于99.6%的高强度微细钢纤维,其主要性能参数见表1,具体形状如图1所示。本试验采用埋深为6.5 mm、长度为13 mm的直圆型钢纤维。

表1 钢纤维性能参数和编号

Table 1 Performance parameters and numbering of steel fibers

钢纤维编号	等效截面直径/mm	等效截面面积/mm <sup>2</sup>	长度/mm	最低抗拉强度/MPa
S0.2-13	0.2	0.031 4	13	2 200
S0.3-13	0.3	0.070 7	13	3 000

注:表中“S”指直圆型钢纤维。

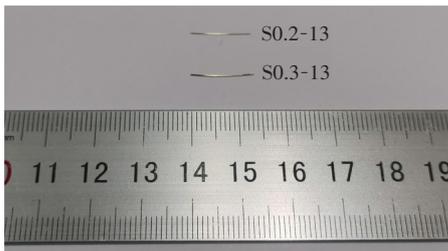


图1 钢纤维形状

Fig. 1 Steel fiber shapes

### 1.2 试验设计

本文将高强微细钢纤维嵌入未掺入钢纤维的UHPC基体中,并进行纤维拉拔试验,以评估钢纤维与基体之间的界面黏结性能及纤维增强效果。UHPC基准配合比如表2所示。双丝拉拔试验的加载速率设置为1 mm/min,两根钢纤维之间的间距设置为6.0 mm。试验共设计了10组试件,试件编号如表3所示,为降低偶然误差,每组采用5个试样,共计采用50个试样。

表2 UHPC基准配合比设计

Table 2 UHPC benchmark mixture ratio design

水泥掺量/%	硅灰掺量/%	水胶比	砂胶比	减水剂/%
80	20	0.17	1.1	1

表3 钢纤维拉拔试验试样组编号

Table 3 Sample group numbering of fiber pull-out test

拉拔方法	纤维间距/mm	硅灰掺量/%	钢纤维试样组编号	
			直圆型(0.2 mm)	直圆型(0.3 mm)
双丝拉拔	6.0	10	10-S0.2-6	10-S0.3-6
		15	15-S0.2-6	15-S0.3-6
		20	20-S0.2-6	20-S0.3-6
		25	25-S0.2-6	25-S0.3-6
		30	30-S0.2-6	30-S0.3-6

注:表中10-S0.2-6指硅灰掺量为10%,直径为0.2 mm,双丝间距为6.0 mm的直圆型钢纤维,其余以此类推。

### 1.3 试件制备及拉拔试验

本文依据《纤维混凝土试验方法标准》(CECS 13—2009)中有关试件尺寸的要求,进行了针对性的调整,并专门设计了一套模具,以确保钢纤维能够按照预定的埋深和间距嵌入UHPC基体中。采用该模具制备的试件呈圆柱状,其半径为9.5 mm,钢纤维埋深为6.5 mm,间距为6.0 mm。试件制备步骤如下:1) 将称量好的石英砂、硅酸盐水泥、超细硅灰混合倒入JJ-5型搅拌机干拌3 min;2) 将已拌合5 min的水和高效减水剂混合物倒入搅拌机内,而后继续搅拌5 min;3) 搅拌完成后,将拌合物浇筑在定制的模具中,并将两根钢纤维呈中心对称地嵌入模具中;4) 将试件放在温度为(20±2) °C、湿度为50%以上的环境中,静置24~48 h后拆模;5) 采用蒸汽养护箱将脱模后的试件养护48 h。养护结束后,进行双丝拉拔试验,成型后的试件样品如图2所示。双丝拉拔试验采用的设备应包含加载装置和数据采集系统。在此装置中,一端设计有夹持设备,用于稳固夹持钢纤维并施加拉拔力。另一端则牢固地固定试件,确保试验过程中的试件稳定性。数据采集系统通过控制拉伸台,采集拉拔试验数据。试验完成后,采用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)对拉拔后的钢纤维表面及基体中形成的隧洞结构的微观形貌进行细致观测。

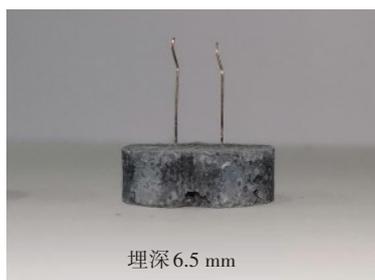


图2 试件样品

Fig. 2 Specimens

### 1.4 性能评价参数

纤维拉拔试验通常以拉拔荷载-滑移曲线来表征钢纤维在UHPC基体中的滑移与变形行为。WILLE等<sup>[15]</sup>采用拉拔应力、拉拔功、平均黏结强度、等效黏结强度等参数来评价钢纤维与基体的界面黏结特性。公式如下：

$$\sigma_f(s) = \frac{P(s)}{A_f} = \frac{4P(s)}{n\pi d_f^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{f,max} = \frac{P_{max}}{A_f} \quad (2)$$

$$W_p = \int_{s=0}^{s=L_f} P(s) ds \quad (3)$$

$$\tau_{eq} = \frac{2W_p}{n\pi d_f L_f^2} \quad (4)$$

$$\tau_{av} = \frac{P_{max}}{n\pi d_f L_f} \quad (5)$$

式中： $\sigma_f(s)$ 为拉拔应力与纤维滑移的函数； $P(s)$ 为荷载-滑移曲线， $P_{max}$ 为最大拉拔荷载， $s$ 为纤维滑移量； $d_f$ 、 $A_f$ 分别为直圆钢纤维直径或相同横截面下非直圆钢纤维的等效直径及等效面积； $L_f$ 为钢纤维嵌入基体中的长度； $\sigma_{f,max}$ 为钢纤维最大拉拔应力，是衡量钢纤维材料利用率的指标； $W_p$ 为拉拔功，用来评价钢纤维与基体界面黏结韧性； $\tau_{eq}$ 为等效黏结强度； $\tau_{av}$ 为平均黏结强度； $n$ 为一个试件内埋置的钢纤维数量。

## 2 试验分析

分别对直径为0.2和0.3 mm的镀铜直圆型钢纤维进行双丝拉拔试验，试验数据见表4。为更加直观地呈现钢纤维-UHPC拉拔性能的规律，将表4中的部分数据绘制成图像，如图3所示。

表4 双丝拉拔试验结果

Table 4 Results of double fibers pull-out tests

钢纤维编号	直径/mm	埋深/mm	硅灰掺量/%	极限拉拔荷载/N	拉拔功/(N·m)	纤维最大拉应力/MPa	平均黏结强度/MPa	等效黏结强度/MPa	材料强度利用率/%
10-S0.3-6	0.3	6.5	10	151.64	726.95	1 072.63	12.38	18.26	36
15-S0.3-6			15	157.49	774.73	1 114.01	12.85	19.46	37
20-S0.3-6			20	184.36	909.27	1 304.08	15.05	22.83	43
25-S0.3-6			25	166.78	829.89	1 179.73	13.61	20.84	39
30-S0.3-6			30	158.61	570.80	1 121.94	12.95	14.33	37
10-S0.2-6	0.2	6.5	10	104.62	465.16	1 665.08	12.81	17.52	83
15-S0.2-6			15	84.28	326.95	1 341.36	10.32	12.32	67
20-S0.2-6			20	80.33	256.34	1 278.49	9.83	9.66	64
25-S0.2-6			25	94.94	357.34	1 511.02	11.62	13.46	76
30-S0.2-6			30	118.52	468.85	1 886.30	14.51	17.66	94

### 2.1 直圆型钢纤维试验结果分析

从表4和图3可以看出，对于直径为0.3 mm的镀铜直圆型钢纤维，当其在UHPC基体中埋深为6.5 mm时，试件极限拉拔荷载、拉拔功、平均黏结强度、等效黏结强度和材料强度利用率等评价指标均随着硅灰掺量的增加呈先增加后减小的趋势。当硅灰掺量达到20%时，以上指标均达到峰值，其中极限拉拔荷载为184.36 N，拉拔功为909.27 N·m，

平均黏结强度和等效黏结强度则分别为15.05和22.83 MPa。当硅灰掺量由10%增加至20%时，试件平均黏结强度和等效黏结强度分别增加了21.6%和25.0%，此时材料强度利用率达43%；当硅灰掺量由20%增加至30%时，试件极限拉拔荷载和等效黏结强度分别减小了14.0%和37.2%。这是因为合理的硅灰掺量能使UHPC基体达到最大填充密度，增加了基体的强度，进而影响了钢纤

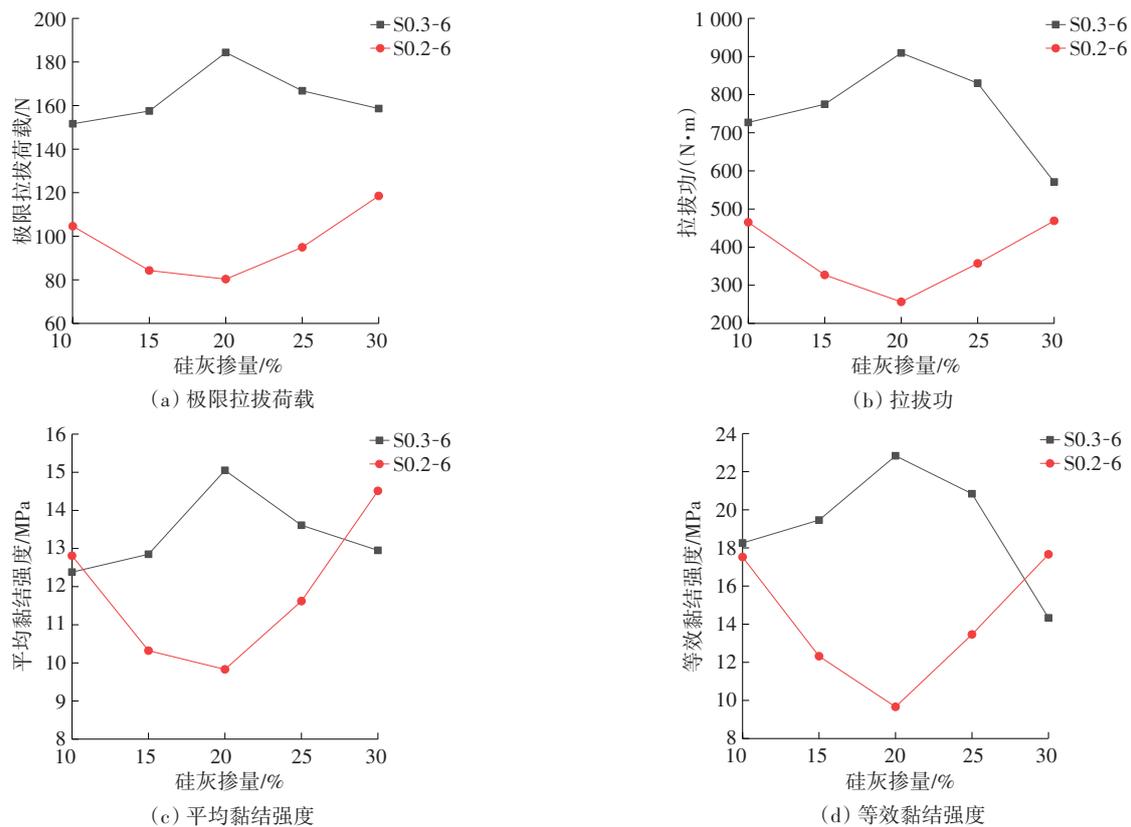


图3 不同硅灰掺量下各项黏结性能评价参数

Fig. 3 Evaluation parameters of bonding performance under different mixing amounts of silica fume

维-UHPC基体界面黏结性能。而对于直径为0.2 mm的镀铜直圆型钢纤维,试件各项性能参数均随硅灰掺量的增加呈先减小后增加的趋势。当硅灰掺量达到20%时,这些指标均达到最小值。当硅灰掺量由10%增加至20%时,试件极限拉拔荷载和等效黏结强度分别减小了23.2%和44.9%;当硅灰掺量由20%增加至30%时,试件极限拉拔荷载和等效黏结强度分别增加了47.5%和82.8%,此时材料强度利用率达94%。

由以上数据可知,直径为0.2和0.3 mm的钢纤维与基体黏结性能在不同硅灰掺量下呈现出相反的趋势,这可能是S0.2钢纤维的直径比S0.3钢纤维的小,导致钢纤维与UHPC基体间的接触面积较小,尽管钢纤维与基体间的界面黏结剪应力分布均匀,但S0.2钢纤维与基体间的黏结作用较弱,从而导致直径较小的直圆型钢纤维黏结力较小。

### 2.2 直圆型钢纤维拉拔荷载-滑移曲线

拉拔荷载-滑移曲线能直观地表征钢纤维的拔出行为,通过双丝拉拔试验,可得到直径为0.2和0.3 mm的镀铜直圆型钢纤维的拉拔荷载-滑移曲线,如图4所示。

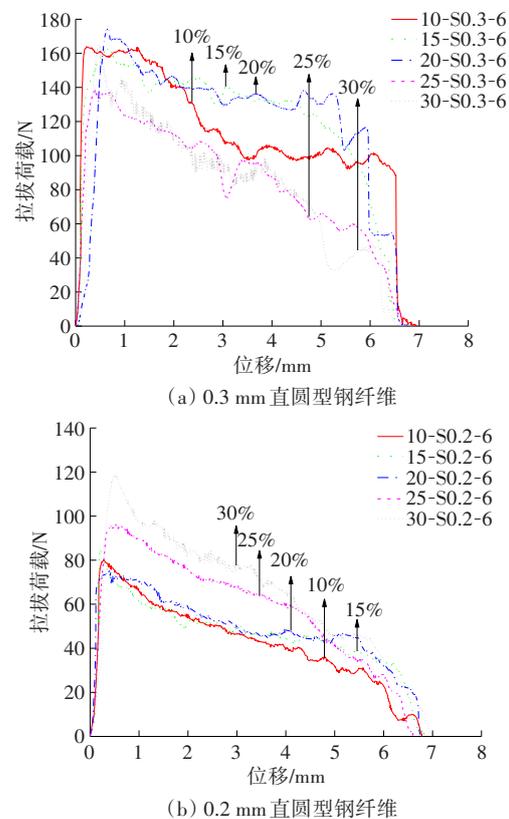


图4 不同硅灰掺量下直圆型钢纤维的拉拔荷载-滑移曲线  
Fig. 4 Load-slip curves of straight circular steel fibers under different mixing amounts of silica fume

由图4中的拉拔荷载-滑移曲线可知,对于S0.3钢纤维,在纤维拉拔初期,荷载虽然增长较快,但由于纤维不仅受到沿其轴向的拉拔力,还受到UHPC基体的黏结力和静摩擦力,基体与纤维间不存在滑移,处于弹性黏结阶段;随着拉拔荷载继续增大,纤维与基体间的黏结作用逐渐失效,此时钢纤维与基体处于部分脱黏阶段;直至荷载达到峰值,钢纤维与基体间的黏结作用彻底失效,钢纤维与基体完全脱黏,静摩擦力最大,处于完全脱黏阶段;而后拉拔荷载开始减小,钢纤维与基体间的静摩擦力开始转变为滑动摩擦力,钢纤维开始发生滑移,此时,拉拔荷载主要由滑动摩擦力提供,当拉拔荷载下降到某一较低值时急剧减小,直至钢纤维被完全拔出。

由图4(a)可知,当S0.3钢纤维嵌入UHPC基体内6.5 mm时,弹性黏结阶段的拉拔荷载增长极快,且能看出最大拉拔荷载对应的位移在硅灰掺量为20%时达到最大,这可能是由于此硅灰掺量能显著改善基体的致密程度,达到最大填充密度,使得UHPC基体较为密实,内部孔隙率降低,且钢纤维与基体间的黏结作用增强,最终导致拉拔钢纤维时,产生了较大的极限滑移。

由图4(a)可知,在拉拔荷载-滑移曲线下降段,曲线存在较为明显的波峰波谷。这是因为在拉拔过程中,钢纤维在滑移至基体内部存在的空洞处时,荷载会急剧下降;而当钢纤维越过这个空洞后,荷载会继续增大。另外,基体内部的细骨料与钢纤维之间的相互刚蹭,也会增大两者间的摩擦力,从而使荷载有所增加。因此在曲线上会出现波峰和波谷。

鉴于S0.2钢纤维和S0.3钢纤维的拉拔荷载-滑移曲线特征阶段相似,故仅对两者的不同之处进行分析。由图4可知,与S0.3钢纤维相比,S0.2钢纤维的拉拔荷载-滑移曲线不够饱满,且其极限荷载比S0.3钢纤维的低,曲线下降速率较快,导致其拉拔功较小。产生此差异的原因主要是S0.2钢纤维的直径比S0.3钢纤维的小,因此在同一纤维埋深下,S0.2钢纤维与基体的接触面积较小,导致S0.2钢纤维的极限荷载和拉拔功比S0.3钢纤维的小,这与XU等<sup>[16]</sup>得到的结论较为一致。同时,相较于S0.3钢纤维,S0.2钢纤维的曲线下降段中出现的波峰和波谷数量较少,这表明嵌入S0.2钢纤维的UHPC基体中空洞较少。

### 3 SEM分析

钢纤维的掺入,使UHPC基体的强度、阻裂性能、韧性及耐久性得到了一定程度的提升。这是因为钢纤维具有极高的强度,能够在UHPC基体中有效传递荷载,起到“桥接”作用,从而增强了纤维与基体间的黏结性能。这一点在UHPC基体轴拉构件中得到了充分的验证。钢纤维与基体间的黏结力一般由C-S-H凝胶体与钢纤维表面的化学黏附力、C-S-H凝胶体与钢纤维间的静摩擦力、钢纤维与基体间的机械咬合力,以及钢纤维与基体碎屑间的滑动摩擦力共同构成。本文选取了试件的典型拉拔荷载-滑移曲线,并采用SEM对拔出后的镀铜直圆型钢纤维的表面形貌,以及钢纤维拔出后留下的隧洞、孔洞形貌特征进行了观察,旨在从微观层面分析钢纤维与UHPC基体间的界面黏结作用,以及钢纤维对UHPC的增强机理<sup>[17-18]</sup>。

#### 3.1 钢纤维微观形貌

通过SEM分别得到S0.2和S0.3钢纤维的微观形貌,如图5、图6所示。从图5(a)可以观察到,S0.3钢纤维的端部附着有大面积的块状颗粒。这可能是由于S0.3钢纤维的端部在后期加工中呈现扁平状,当钢纤维从基体中拔出并产生滑移时,大量细小颗粒附着在其表面。同时,受到钢纤维磨损的基体颗粒会向钢纤维的拔出端聚集,这可能会产生楔形效应。这种效应使得钢纤维承受了更大的压应力和更高的摩擦强度。而且,在钢纤维被完全拔出时,其端部还会带出块状的基体黏着物。由图5(b)可以观察到,钢纤维表面附着着大面积的基体颗粒且有轻微划痕存在,这可能导致钢纤维表面镀铜遭到破坏,增大UHPC基体的强度。由图5(c)可以观察到,在钢纤维拉拔过程中,由于UHPC基体具有较高的密度及强度,钢纤维与基体中的精细石英砂之间产生了滑动摩擦。这种摩擦导致钢纤维表面产生凹槽。同时,由于基体内胶凝材料的存在,钢纤维表面产生大面积擦伤。这种相互作用增大了钢纤维的粗糙度,进而改善了UHPC基体的黏结性能。图5(d)展示了S0.3钢纤维表面附着的颗粒在放大600倍后的微观形态。从这些黏着物中,可以观察到丝状或絮状的颗粒,这些颗粒很可能是由胶凝材料形成的C-S-H凝胶。

由图6(a)可以观察到,S0.2钢纤维的末端呈直

圆型,其表面虽然有颗粒黏着物存在,但并未像S0.3钢纤维那样在端部聚集大量黏着物,这是因为S0.2钢纤维的端部较为规则;图6(b)展示了S0.2钢纤维的表面在放大1400倍后的微观形态,可看到其表面附着有基体颗粒物,这些颗粒为球形硅灰;从图6(c)可以观察到,钢纤维表面存在块状的黏着物聚集;从图6(d)可以观察到,钢纤维表面存在多条浅而细的划痕。与S0.3钢纤维相比,这些划痕较浅,这表明S0.2钢纤维在沿基体隧洞拔出时较为平顺,同时说明S0.2钢纤维与基体之间的黏结作用较弱。

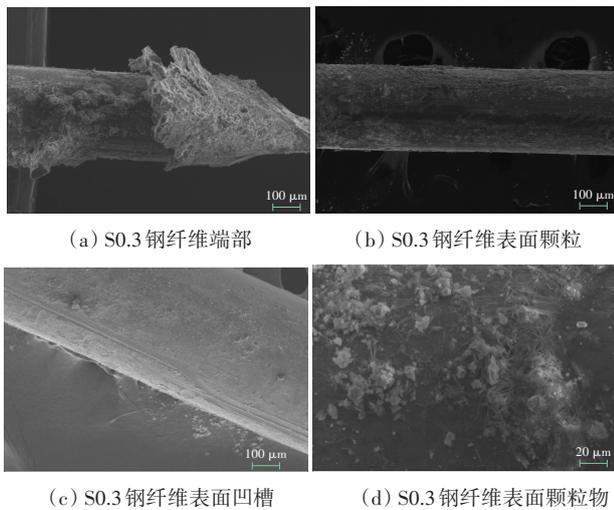


图5 S0.3钢纤维微观形貌

Fig. 5 Microstructure of S0.3 steel fiber

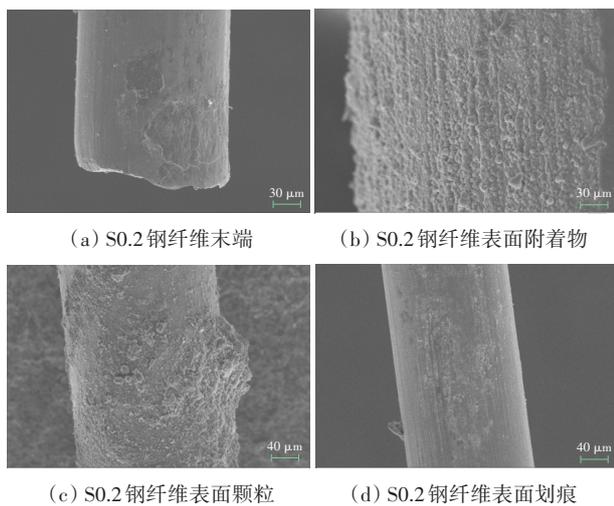


图6 S0.2钢纤维微观形貌

Fig. 6 Microstructure of S0.2 steel fiber

### 3.2 UHPC 基体微观形貌

两种直圆型钢纤维的隧洞形貌如图7所示。由图7可知,直圆型钢纤维拔出后形成的隧洞也呈直线状。在钢纤维拉拔过程中,基体会因钢纤维的拔出而产生微裂纹,导致隧洞周围的基体较为破碎。

在图7(c)中,可以观察到小面积的球状颗粒,这进一步证实了图6(b)中钢纤维表面存在硅灰颗粒的情况。从图7(d)和7(e)中可以看到,S0.3钢纤维基体的隧洞较为破碎,这可能是由于钢纤维与基体间的物理化学黏结作用较强,导致在拉拔过程中基体被钢纤维刮蹭而破碎。而在图7(f)中,基体隧洞呈现出光滑的条纹状,这可能是由于钢纤维表面附着的石英砂与基体相互摩擦,使得基体受到破坏,这种摩擦作用也使得拉拔荷载得到了一定程度的增大。

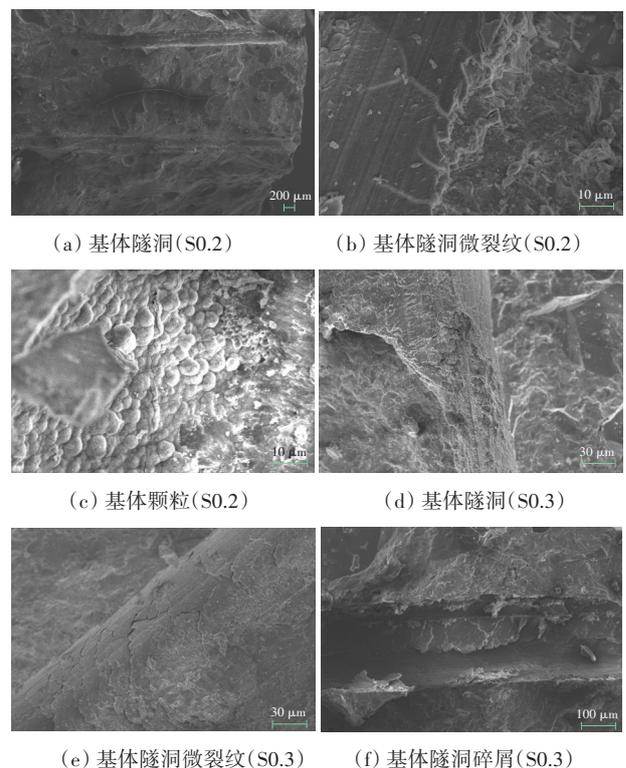


图7 UHPC基体隧洞形貌

Fig. 7 Tunnel morphology of UHPC matrix

## 4 结论

通过开展双丝拉拔试验,并利用SEM观测拉拔后钢纤维表面和基体隧洞的微观形态,可得到以下结论:

- 1) 随着硅灰掺量的增加,S0.2钢纤维的极限荷载、拉拔功、等效黏结强度和平均黏结强度呈先减小后增大的趋势,S0.3钢纤维则相反。当硅灰掺量为20%时,S0.2钢纤维极限拉拔荷载和平均黏结强度达到最小值,分别为80.33 N和9.83 MPa;S0.3钢纤维的极限拉拔荷载和平均黏结强度达到最大值,分别为184.36 N和15.05 MPa。

2) 钢纤维直径能影响钢纤维-UHPC基体黏结特性,与S0.2钢纤维相比,S0.3钢纤维的拉拔荷载-滑移曲线比较饱满,并且有较多的上升下降段。

3) 通过SEM试验可观测到,S0.3钢纤维因端部呈扁平状,其端部及表面有大量基体黏着物存在,并且其基体隧洞破碎较多;S0.2钢纤维表面的黏着物较少,基体隧洞存在着微裂纹和硅灰颗粒。

### 参考文献(References):

- [1] 肖亚鑫,鲁乃唯,陈方怀.钢-超高性能混凝土组合板连接件的抗剪性能[J].交通科学与工程,2020,36(1):44-49. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.008. XIAO Yaxin, LU Naiwei, CHEN Fanghuai. The shear capacity of steel-ultra-high performance concrete composite board connectors [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(1): 44-49. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.008.
- [2] 陈瑜,黄湘宁,周文芳.自密实混凝土工作性试验方法评述[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2011,8(4):29-33,76. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2011.04.006. CHEN Yu, HUANG Xiangning, ZHOU Wenfang. Commentary on workability test methods for self-consolidating concrete [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2011, 8(4): 29-33, 76. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2011.04.006.
- [3] 梁志成.钢纤维增强砼力学及耐久性能研究[J].公路与汽运,2020(3):81-85,96. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2020.03.019. LIANG Zhicheng. Study on mechanics and durability of steel fiber reinforced concrete [J]. Highways & Automotive Applications, 2020(3): 81-85, 96. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2020.03.019.
- [4] 王术飞.钢纤维在水泥基复合材料中黏结性能的研究进展[J].公路工程,2019,44(4):279-284. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2019.04.050. WANG Shufei. Research progress on bonding properties of steel fiber in cement-based composites [J]. Highway Engineering, 2019, 44(4): 279-284. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2019.04.050.
- [5] 张亚芳,曾向荣,刘浩,等.界面控制下间距对双丝拉拔实验影响的数值模拟研究[J].武汉理工大学学报,2015,37(9):78-83. DOI: 10.3963/j.issn.1671-4431.2015.09.014. ZHANG Yafang, ZENG Xiangrong, LIU Hao, et al. Numerical simulation on twin fibers pull-out test under interfacial control with effect of spacing [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2015, 37(9): 78-83. DOI: 10.3963/j.issn.1671-4431.2015.09.014.
- [6] ABU-LEBDEH. Rate effect on pullout behavior of steel fibers embedded in very-high strength concrete [J]. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 2010, 3(2): 454-463. DOI: 10.3844/ajeassp.2010.454.463.
- [7] KIM J J, YOO D Y. Spacing and bundling effects on rate-dependent pullout behavior of various steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2020, 20(2): 46. DOI: 10.1007/s43452-020-00048-8.
- [8] YOO D Y, KIM J J, PARK J J. Effect of fiber spacing on dynamic pullout behavior of multiple straight steel fibers in ultra-high-performance concrete [J]. Construction and Building Materials, 2019, 210: 461-472. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.171.
- [9] LEE Y, KANG S T, KIM J K. Pullout behavior of inclined steel fiber in an ultra-high strength cementitious matrix [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(10):2030-2041. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.03.009.
- [10] 刘军,张宝东,赵冰洁,等.纤维类型及取向对纤维-UHPC基体拔出性能影响研究[J].材料科学与工艺,2022,30(3):36-43. DOI: 10.11951/j.issn.1005-0299.20210242. LIU Jun, ZHANG Baodong, ZHAO Bingjie, et al. Study of effects of fiber types and orientations on pull-out properties of fiber-UHPC matrix [J]. Materials Science and Technology, 2022, 30(3): 36-43. DOI: 10.11951/j.issn.1005-0299.20210242.
- [11] 张亚芳,刘浩,高照.钢丝直径对双丝拉拔混凝土力学性能影响的三维数值模拟研究[J].武汉理工大学学报,2018,40(3):42-47. DOI: 10.3724/SP.J.1249.2017.05476. ZHANG Yafang, LIU Hao, GAO Zhao. 3D numerical modeling of fiber diameter effect on performance of twin fibers pullout test [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2018, 40(3): 42-47. DOI: 10.3724/SP.J.1249.2017.05476.
- [12] 张亚芳,郭中祥,刘浩,等.埋深对双丝拉拔试件动态破裂性能的影响[J].深圳大学学报(理工版),2020,37(4):381-388. DOI: 10.3724/SP.J.1249.2020.04381. ZHANG Yafang, GUO Zhongxiang, LIU Hao, et al. Influence of embedment depth on dynamic failure property of twin fibers pull-out test [J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2020, 37(4): 381-388. DOI: 10.3724/SP.J.1249.2020.04381.
- [13] 张亚芳,罗斐化,刘浩,等.动荷载下基体强度对双丝拉拔混凝土试件影响的数值模拟研究[J].武汉大学学报(工学版),2022,55(10):1019-1026. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2022-10-006. ZHANG Yafang, LUO Feihua, LIU Hao, et al. Numerical simulation of influence of matrix strength on twin fiber pullout concrete specimen under dynamic load [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55(10): 1019-1026. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2022-10-006.
- [14] 叶居东,杨贞军,刘国华,等.超高性能混凝土-螺旋钢纤维拉拔力的解析解及实验验证[J].浙江大学学报(工

(下转第61页)

- and limestone powder [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2010, 31 (1): 54-57. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4602.2010.01.010.
- [12] 魏婷婷, 顾坤, 李文凯. 城市生活垃圾焚烧底渣沥青混合料路用性能研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(2): 61-69. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.02.006.  
WEI Tingting, GU Kun, LI Wenkai. Study on road performance of asphalt mixture with municipal solid waste incineration bottom slag [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19 (2): 61-69. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.02.006.
- [13] ASI I, ASSA'AD A. Effect of Jordanian oil shale fly ash on asphalt mixes [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17 (5): 553-559. DOI: 10.1061/(asce)0899-1561(2005)17: 5(553).
- [14] WU S P, ZHU J Q, ZHONG J J, et al. Experimental investigation on related properties of asphalt mastic containing recycled red brick powder [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(6): 2883-2887. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.12.040.
- [15] MODARRES A, RAHMANZADEH M. Application of coal waste powder as filler in hot mix asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2014, 66: 476-483. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.002.
- [16] CHOUDHARY J, KUMAR B, GUPTA A. Application of waste materials as fillers in bituminous mixes [J]. Waste Management, 2018, 78: 417-425. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.06.009.
- [17] 包惠明, 牟卡莉. 赤泥改性沥青黏度及微观特性[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2017, 38(5): 47-50, 6. DOI: 10.15926/j.cnki.issn1672-6871.2017.05.010.  
BAO Huiming, MU Kali. Viscosity and microscopic characteristics of red mud modified asphalt [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2017, 38 (5): 47-50, 6. DOI: 10.15926/j.cnki.issn1672-6871.2017.05.010.
- [18] ZHANG H J, LI H, ZHANG Y, et al. Performance enhancement of porous asphalt pavement using red mud as alternative filler [J]. Construction and Building Materials, 2018, 160: 707-713. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.105.
- [19] ZHANG J Z, LI P Z, LIANG M, et al. Utilization of red mud as an alternative mineral filler in asphalt mastics to replace natural limestone powder [J]. Construction and Building Materials, 2020, 237: 117821. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117821.
- [20] 万淼, 吴少鹏, 王子鹏, 等. 基于组分挥发与基团变化的沥青老化机制研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2017, 41(4): 673-677. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2017.04.028.  
WAN Miao, WU Shaopeng, WANG Zipeng, et al. Investigation on bitumen ageing mechanism by components volatilization and functional group changes [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2017, 41(4): 673-677. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2017.04.028.
- [21] 周志刚, 王岩, 李刚, 等. 酸雨对透水沥青路面抗滑耐久性的影响[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(5): 53-63. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021122323101966.  
ZHOU Zhigang, WANG Yan, LI Gang, et al. Effect of acid rain on anti-sliding durability of porous asphalt pavement [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39 (5): 53-63. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021122323101966.

(责任编辑:薛仪)

(上接第52页)

- 学版), 2018, 52 (10): 1911-1918. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2018.10.010.  
YE Judong, YANG Zhenjun, LIU Guohua, et al. Analytical solution and experimental verification of pullout force of twisted steel fibers in ultra-high performance concrete [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52 (10): 1911-1918. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2018.10.010.
- [15] WILLE K, NAAMAN A E. Pullout behavior of high-strength steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete [J]. ACI Materials Journal, 2012, 109(4): 479-488. DOI: 10.14359/51683923.
- [16] XU M, HALLINAN B, WILLE K. Effect of loading rates on pullout behavior of high strength steel fibers embedded in ultra-high performance concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 70: 98-109. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.03.014.
- [17] 叶群山, 羊治宇, 周剑波. 生物油再生沥青-集料界面分子模拟研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(4): 39-46. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022012923081978.  
YE Qunshan, YANG Zhiyu, ZHOU Jianbo. Molecular simulation on interface between bio-oil recycled asphalt and aggregate [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39 (4): 39-46. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022012923081978.
- [18] 张志彪, 郭蒙蒙, 朱茹琳, 等. 钢纤维掺量对混凝土抗拉疲劳性能影响的试验研究[J]. 中外公路, 2021, 41 (2): 291-295. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2021.02.058.  
ZHANG Zhibiao, GUO Mengmeng, ZHU Rulin, et al. Experimental study on influence of amount of steel fiber on tensile fatigue performance of concrete [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41 (2): 291-295. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2021.02.058.

(责任编辑:薛仪)