

袁明,吴晓娟,颜东煌,等.加载速率对钢纤维与超高性能混凝土黏结性能的影响[J].长安大学学报(自然科学版),2022,42(5):62-72.  
YUAN Ming,WU Xiao-juan,YAN Dong-huang,et al. Effect of loading rate on bond properties of steel fiber and ultra-high performance concrete[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition),2022,42(5):62-72.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2022.05.007

## 加载速率对钢纤维与超高性能 混凝土黏结性能的影响

袁明<sup>1</sup>,吴晓娟<sup>1</sup>,颜东煌<sup>1</sup>,刘 昀<sup>1,2</sup>,黄 练<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114; 2. 湖南交通职业技术学院 路桥工程学院,湖南 长沙 410132)

**摘 要:**为深入了解超高性能混凝土(UHPC)的黏结性能,进一步明确钢纤维与 UHPC 基体黏结界面在不同加载速率下的破坏方式,以及影响纤维速率敏感性的因素,分析不同加载速率下 UHPC 基体中嵌入高强度钢纤维的单纤维拉拔性能,以更深入地了解 UHPC 的黏结性能。试验变量为纤维类型(直圆形、端钩形、波纹形)、加载速率(0.5~5 mm/min)和基体强度(77.10、90.50、111.33 MPa),共制作 27 组试件。在不同加载速率下,对纤维的最大拉应力、拉拔能、等效黏结强度和平均黏结强度等参数进行表征和分析,并在扫描电子显微镜(SEM)下对纤维拔出后的表观形态以及基体隧洞形貌进行观察和探讨。试验结果表明:不同纤维的拉拔性能从大到小依次为直圆形纤维、端钩形纤维、波纹形纤维;在 SEM 中观察到所有拔出纤维的表面上有不同程度的刮伤,附着微小的基体颗粒,基体隧洞产生了不同程度的微裂纹,端钩形纤维的拔出会造成拔出口附近的基体剥落;纤维的速率敏感性与基体强度有关,随着基体强度增加,直圆形纤维的速率敏感性先减小后增大,最大拔出荷载、拉拔功、等效黏结强度、材料的强度利用率分别提升了 42.9%、160.7%、160.8%、21%;端钩形纤维的速率敏感性减小,但最大拔出荷载达到了 226.71 MPa,材料的强度利用率高达 134%;波纹形纤维的速率敏感性增大,最大断裂荷载增加了 8.9%,最大材料强度利用率达到 68%;纤维的速率敏感性还与纤维种类有关,其速率敏感性从大到小依次为波纹形纤维、端钩形纤维、直圆形纤维。此外,UHPC 基体具有速率敏感性,其速率敏感性与直圆形纤维和端钩形纤维呈正相关,与波纹形纤维呈负相关。该研究可为深入了解钢纤维增强超高性能混凝土的力学性能提供参考。

**关键词:**桥梁工程;超高性能混凝土;钢纤维;黏结性能;加载速率;基体强度

中图分类号:U446

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2022)05-0062-11

## Effect of loading rate on bond properties of steel fiber and ultra-high performance concrete

YUAN Ming<sup>1</sup>, WU Xiao-juan<sup>1</sup>, YAN Dong-huang<sup>1</sup>, LIU Yun<sup>1,2</sup>, HUANG Lian<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan, China; 2. School of Road and Bridge Engineering, Hunan Communication Polytechnic, Changsha 410132, Hunan, China)

收稿日期:2022-04-10

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2015CB057706);国家自然科学基金项目(52078054,51878074);

湖南省教育厅科学研究项目(18B140);湖南省交通科技项目(201932);湖南省研究生科研创新项目(CX20190650)

作者简介:袁明(1980-),男,湖南醴陵人,副教授,工学博士,E-mail:mingyuan@caust.edu.cn。

**Abstract:** In order to gain a deeper understanding of the bonding properties of UHPC, further define the failure mode of the bonding interface between the steel fiber and the UHPC matrix under different loading rates, and the factors effecting the fiber rate sensitivity. Single-fiber drawing performance of ultra-high performance concrete (UHPC) matrix embedded with high-strength steel fibers under different loading rates were studied. The test variables were fiber type (straight round, end-hooked, corrugated), loading rate (from 0.5 to 5 mm/min) and matrix strength (77.10, 90.50, 111.33 MPa). A total of 27 sets of samples were made. Under different loading rates, the maximum tensile stress, pull-out energy, equivalent bond strength and average bond strength of the fiber were characterized and analyzed. The apparent morphology of the fiber and the morphology of the matrix tunnel after fiber being pulled out were observed and discussed with the aid of the scanning electron microscope (SEM). The results show that the drawing performance of different fiber types is sorted from large to small as follows, straight round fiber, end-hooked fiber, corrugated fiber. And it is observed in SEM that all the pulled-out fibers have different degrees of scratches on the surface, and tiny matrix particles are attached. The matrix tunnels appear different degrees of micro-cracks, and the pull-out of the end-hooked fibers also cause matrix spalling near the pull-out exit. The speed sensitivity of the fiber is found to be related to matrix strength. With the increase of matrix strength, the speed sensitivity of the straight round fiber first decreases and then increases, the maximum pull-out load, pull-out work, the equivalent bond strength and strength utilization rate increase by 42.9%, 160.7%, 160.8% and 21%, respectively. The rate sensitivity of the end-hooked fiber reduces but the maximum pull-out load reaches 226.71 MPa, and the strength utilization rate of the material is as high as 134%. The rate sensitivity of the corrugated fiber increases, the maximum breaking load increases by 8.9%, and the maximum material strength utilization rate reaches 68%. The speed sensitivity of the fiber is also related to the type of fiber, the order from large to small of rate sensitivity of fibers is corrugated fiber, end-hooked fiber, straight round fiber. In addition, the UHPC matrix itself is rate-sensitive, and has a positive correlation with straight round and end-hooked fibers, and a negative correlation with corrugated fibers. A reference for further understanding the mechanical properties of steel fiber reinforced ultra-high performance concrete can be provided. 5 tabs, 13 figs, 25 refs.

**Key words:** bridge engineering; ultra-high performance concrete; steel fiber; bonding performance; loading rate; matrix strength

## 0 引言

超高性能混凝土(UHPC)是近几十年来最具创新性的水泥基工程材料,具有超高的耐久性和力学性能,实现了工程材料性能的大跨越<sup>[1]</sup>。当在UHPC中加入钢纤维时,UHPC会出现应变硬化行为和良好的后开裂行为,通过基体与纤维之间的复合作用来抵抗拉力,一旦基体出现裂纹,纤维就会阻止裂纹的进一步扩展和延伸<sup>[2]</sup>。而UHPC的拉伸性能取决于纤维拔出过程中纤维与基

体间的相互作用,因此纤维与基体之间的黏结性能是影响超高性能混凝土强度的重要因素<sup>[3-4]</sup>。单纤维拉伸试验是研究纤维与基体黏结性能的理想试验方法。目前,国内外的许多学者利用单纤维拉拔试验对界面黏结性能进行了大量的研究<sup>[5-12]</sup>。朱平等对嵌入混杂钢纤维超高性能混凝土中的平直形和端钩形钢纤维进行了单丝拉拔试验,以研究其黏结性能<sup>[5]</sup>。赵一鹤等从钢纤维形状、长度与直径3个因素进行单丝拉拔试验,研究了钢纤维的拉拔行为以及其对纤维与UHPC基体

黏结性能的影响<sup>[6]</sup>。Abu-Lebdeh 等在超高强混凝土基体中嵌入变形和光滑钢纤维进行单纤维拉拔试验,研究基体强度对钢纤维增强超高性能混凝土复合材料拉拔性能的影响,纤维的拉拔行为与基体强度和纤维端部条件有关<sup>[7-8]</sup>。Wille 等对嵌入高强度混凝土基体中的直圆、端钩和扭曲纤维进行了单纤维拉拔试验,并对其拔出机制进行了探讨<sup>[9-11]</sup>。Cunha 等在自密实混凝土介质中进行直圆形和端钩形钢纤维单拉拔试验,研究了纤维嵌入长度和取向对其拔出行为的影响<sup>[12]</sup>。但由于试验设备以及试样制作的局限,这些研究还停留在配合比设计或基于准静态的单纤维拉拔试验上。混凝土是速率敏感性材料,冲击荷载作用下的材料力学性能与静载作用下的力学性能有所区别,对加载速率影响钢纤维与 UHPC 基体的黏结性能这一因素尚需进一步试验研究。

已有研究表明,单纤维拉拔行为具有速率敏感性,且不同形状的纤维对速率敏感性的强弱不同,其影响因素也不一样<sup>[8,13-14]</sup>。Abu-Lebdeh 等在不同加载速率下,以基体强度和纤维类型为主要变量,进行单纤维拔出试验,分析加载速率对钢纤维拔出行为的影响,发现所有变形纤维的峰值载荷和总拔出功随加载速率的增加而增加,但对光滑纤维没有影响,变形纤维的拉拔行为受嵌入长度和基体强度的影响<sup>[8]</sup>。Dong 等发现:当加载速率从静态到地震水平下进行单纤维拔出试验时,扭曲钢纤维的拔出行为具有速率敏感性,且与基体的抗压强度有关;而高强度端钩形纤维在拔出时对不同基体没有速率敏感性,且随着基体抗压强度的增加,扭曲纤维的拉拔功增加,可达钩状纤维的 5 倍,此外,所有未断裂的变形纤维和光滑纤维的拉拔功与峰值载荷均随基体强度的增加而增加<sup>[13]</sup>。可见,基体强度、纤维形状与速率敏感性相关,但具体的相关性有待进一步研究。Xu 等指出,纤维隧道中微劈裂裂纹的形成和钢纤维与水泥基基体之间的摩擦是单纤维加载具有速率敏感性的主要原因之一<sup>[14]</sup>。在加载前 UHPC 基体骨料与 C-S-H 凝胶之间的结合面上存在许多微裂缝,随着加载的进行,微裂缝会不断扩展、延伸至贯通,导致基体开裂。且光滑纤维的黏结强度主要是沿纤维表面的黏附和摩擦,端钩形纤维和扭曲形纤维的黏结强度主要是沿纤维末端和纤维长度方向的机械黏结<sup>[7]</sup>。由于潜在的基体开裂,以

及纤维与基体之间的摩擦,扭曲形纤维和端钩形纤维会表现出速率敏感性,而光滑纤维几乎对加载速度不敏感<sup>[8,13]</sup>。

在纤维拔出的过程中,除了存在纤维基体脱黏和摩擦滑动 2 种最重要的阻力机制外,还存在机械锚固,机械锚固效应也是纤维拉拔行为具有速率敏感性的主要原因之一<sup>[8,10,15-18]</sup>。Sujivorakul 等对直纤维拔出模型进行了扩展,在纤维端部增加一个非线性弹簧来模拟机械锚固效应,其端部效应等于端钩形纤维减去直纤维的荷载滑移曲线<sup>[15]</sup>。Laranjeira 等设计了一个可以预测端钩形纤维拔出行为的模型<sup>[16]</sup>。Naaman 等从扭曲形纤维的横截面形状、扭曲间距、基体和纤维的力学性能以及嵌入长度等方面,开展扭曲形纤维黏结特性的研究<sup>[17-18]</sup>。Dong 等对不同端部条件(光滑端部 S、扭曲形端部 T 和钩形端部 H)的纤维进行单纤维拉拔试验,研究表明,单根 S 形纤维的典型拉拔行为表现为纤维应力快速增加,纤维完全脱黏时,拉应力随着拉拔滑移的增加而减小,其抗拉性能主要由基体与纤维表面物理化学结合性能控制<sup>[13-14,19]</sup>。相较之下,H 形纤维在拉拔过程中,末端机械阻力对水泥基基体产生压力,增加摩擦,提高拉拔阻力。但这一部分机械黏结力会随着滑移的增加而减小,且只有在端钩被拉直时才有效。T 形纤维沿纤维提供机械黏结力,产生扭矩阻力,并沿纤维长度方向在水泥基基体上施加递增的滑移压力,从而增加抗拉强度和拉拔功,直至达到非常高的滑移。机械锚固效应使得纤维的拉拔行为变得复杂,不同类型的纤维的加载速率呈现出明显差异性。在动态加载下具有较高的拉拔阻力,扭曲形纤维的拉出能量和等效结合强度对加载速率依赖性最强,其次是端钩形纤维和光滑纤维<sup>[8]</sup>。

基于此,本文从纤维类型和不同 UHPC 基体强度 2 个方面对纤维拉拔行为的速率敏感性进行研究,主要考虑基体强度、纤维与基体之间的黏结力以及纤维的机械锚固效应等因素,并从微观层面对不同加载速率下不同纤维的拉拔过程,及其与基体界面的脱黏过程进行详细描述与分析。对单纤维拉拔试件进行缩放,采用扫描电子显微镜(SEM)对其拉拔孔道以及钢纤维基体界面进行观察并分析其微观机理,以探讨加载速率对钢纤维与 UHPC 黏结性能的影响,为深入了解钢纤维增强超高性能混凝土的力学性能提供参考。

# 1 试验方案

## 1.1 试验材料

本试验采用南方 P·O52.5 普通硅酸盐水泥,实测抗压强度为 33.9 MPa(3 d)和 67.3 MPa(28 d),主要材料性能如表 1 所示。采用超细硅灰,主要材料性能如表 2 所示。采用平均粒径小于 600 μm 的精致水洗石英砂,SiO<sub>2</sub> 含量 99.6%以上,实测表观密度为 2 650 kg/m<sup>3</sup>,堆积密度为 1 620 kg/m<sup>3</sup>;减水剂采用聚羧酸高性能减水剂,其减水效率大于 30%;所用钢纤维性能如表 3 所示,具体纤维形状如图 1 所示。

表 1 南方 P·O52.5 水泥材料性能

Tab. 1 Material properties of South P·O52.5 cement

参数	细度/μm	比表面积/(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	烧失量/%	初凝时间/min	终凝时间/min
指标	80	341	2.18	155	207

表 2 硅灰材料性能

Tab. 2 Material properties of silica fume

参数	平均粒径/μm	比表面积/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	烧失量/%	原态密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	高加密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
指标	0.1	18.5	1.8	150~200	500~600

表 3 钢纤维力学性能

Tab. 3 Mechanical properties of steel fibers

纤维类型	等效截面直径/mm	等效截面面积/mm <sup>2</sup>	长度/mm	长径比	最低抗拉强度/MPa
直圆形	0.2	0.031 4	13	65	2 200
端钩形	0.3	0.070 7	20	67	3 000
波纹形	0.2	0.031 4	13	65	2 200



图 1 纤维形状

Fig. 1 Fiber shapes

## 1.2 试验设计

本试验将 3 种不同高强度纤维嵌入 3 种不同强度的超高性能混凝土基体中,得到 9 个系列的

拉拔试验如表 4 所示;每个系列按加载速率分为 3 组,共 27 组试件,每组制作 5 个试样,共 135 个试样。所用基体均在前期研究基础上,遵循最大堆积密度的原则,以硅灰掺量(质量分数,下同)0%、10%、20%为变量进行配制,其基体抗压强度分别为 77.1、90.50、111.33 MPa。其中,US0 基体的流动性最差,US10 基体的流动性最好,US20 基体的流动性较好<sup>[20]</sup>。分别采用 0.5、1、5 mm/min 三种加载速率,0.5 mm/min 为中国规范要求的加载速率,代表准静态加载速率;1mm/min 为法国规范采用的加载速率(0.000 7 in/s 换算得到);5 mm/min 代表动态加载速率,是准静态加载速率的 10 倍,对应实际工程中的冲击荷载,进行试验数据的对比分析<sup>[21-22]</sup>。

表 4 钢纤维拉拔试件编号

Tab. 4 Number of steel fiber drawing samples

基体编号	3 种纤维类型试件编号			加载速率/(mm·min <sup>-1</sup> )
	直圆形纤维	端钩形纤维	波纹形纤维	
US0	S0-0.5	H0-0.5	C0-0.5	0.5
	S0-1	H0-1	C0-1	1.0
	S0-5	H0-5	C0-5	5.0
US10	S10-0.5	H10-0.5	C10-0.5	0.5
	S10-1	H10-1	C10-1	1.0
	S10-5	H10-5	C10-5	5.0
US20	S20-0.5	H20-0.5	C20-0.5	0.5
	S20-1	H20-1	C20-1	1.0
	S20-5	H20-5	C20-5	5.0

## 1.3 试件制备和试验方法

本试验所用试样在中国规范《纤维混凝土试验方法标准》(CECS 13—2009)所规定的试件尺寸的基础上做出调整,为满足单丝拉拔试验的设计要求,均采用半径为 9.5 mm 的圆柱体试件,纤维埋深为 6.5 mm,如图 2 所示<sup>[21]</sup>。制备试件时,采用 JJ-5 型小搅拌机,根据《水泥胶砂强度检验方法(ISO)法》(GB/T 17671—1999)进行搅拌,首先将称好的水和减水剂一起拌和 5 min,然后把水泥、硅灰、石英砂等材料混合干拌 3 min,再加入水和减水剂的均匀拌和物搅拌 6 min,搅拌完成后,采用定制的模具进行试件浇筑并在模具中心置入钢纤维,再将初成形的试件静置在温度为 20℃±2℃、湿度为 50%以上的室内,24 h 后脱模进行蒸汽养护,升温速度小于 12℃/h,升温至 70℃后,保持恒温(70℃±5℃),蒸养龄期为 2 d<sup>[23]</sup>。蒸养之后以不超过 15℃/h 的降温速度将试件表面温度

降至与环境温度之差不大于  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内,再进行纤维拉拔试验。先将试件装入固定装置,再置入加载装置中,让纤维的被夹持端的自由长度最小,以模拟典型的纤维拉伸过程,如图 3 所示。采用原位拉伸台和材料试验系统 MTESTQuattro 等进行加载并采集数据。单纤维拉伸试验结束后,对试件基体以及被拉出的纤维进行特殊处理,采用 SEM 对纤维表面、纤维脱黏孔道以及基体隧洞、表面特征等进行微观观察和分析。



图 2 试件样品

Fig. 2 Specimens

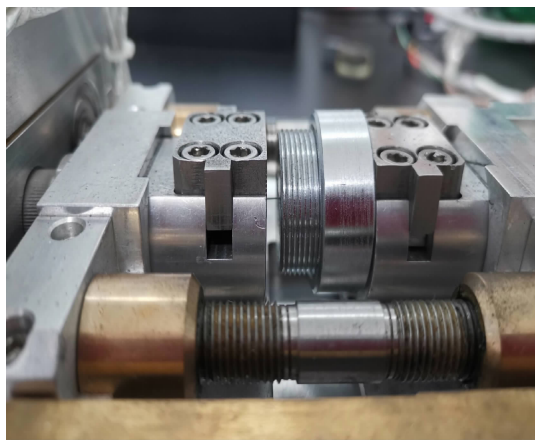


图 3 试件加载照片

Fig. 3 Specimen loading photo

## 2 试验结果与分析

### 2.1 黏结性能评价指标

钢纤维与 UHPC 基体界面的黏结特性与界面效应是发挥钢纤维增韧、阻裂能力的关键所在,而单纤维拉拔试验可以直观反映钢纤维与 UHPC 基体界面的黏结性能,由纤维拉拔试验的荷载滑移曲线可以得到纤维在基体中的滑移变形函数。本文参照文献中的公式进行数据分析<sup>[9]</sup>。以拉拔载荷在纤维拉拔过程中引起的拉应力  $\sigma_f$  作为滑移函数,即

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

式中: $P$  为钢纤维拉拔荷载; $s$  为纤维滑移; $P(s)$  为

荷载滑移曲线上,滑移为  $s$  时对应的拉拔荷载; $\sigma_f(s)$  为滑移为  $s$  时对应的拉应力; $d_f$  为圆形纤维的直径、非圆形纤维的等效直径(基于相同的截面)。

纤维的黏结强度  $\tau(s)$  可以由任意滑移  $s$  处的拉拔荷载  $P(s)$  除以纤维嵌入部分的表面面积得到,即

$$\tau(s) = \frac{P(s)}{\pi d_f (L_E - s)} \quad (2)$$

式中: $L_E$  为钢纤维的初始嵌入长度。

对拉拔荷载滑移曲线进行积分可以得到拉拔功  $W_p$ ,它是评价黏结韧性的重要指标,其表达式为

$$W_p = \int_0^{L_E} P(s) ds \quad (3)$$

等效黏结强度  $\tau_{eq}$  为基于整个纤维拔出过程中耗散能量  $W_p$  的平均黏结强度,其表达式为

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

$\tau_{av}$  为基于最大拉拔载荷和初始嵌入长度的平均黏结强度,其表达式为

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

式中: $P_{max}$  为纤维的最大拉拔荷载。

### 2.2 试验结果与分析

本次拉拔试验结果见表 5,包括纤维拉伸试验的极限荷载、荷载峰值差离值(DIF)、拉拔功、纤维的最大拉应力、平均黏结应力、等效黏结应力、等效黏结应力 DIF 以及纤维的材料强度利用率等。其中,拉断的端钩形纤维和波纹形纤维的极限荷载用其拉断峰值表示。

由拉拔试验结果发现,纤维破坏主要分为两大类:纤维断裂和纤维完全拔出,本节将从这两点出发对不同加载速率下不同纤维类型的拉拔荷载滑移曲线进行分析,并通过 SEM 扫描电镜对纤维拔出状态和基体隧洞形貌作出详细描述。

#### 2.2.1 纤维断裂破坏

在进行单纤维拉拔试验时,发现纤维断裂常发生在高加载速率下的端钩形纤维和波纹形纤维中,断裂位置在拔出口附近,直圆形纤维基本不发生断裂,故在该部分对直圆形纤维不进行分析。图 4 和图 5 分别为加载速率为  $5\text{ mm/min}$  时拉拔过程中波纹形纤维和端钩形纤维断裂的典型拔出力与滑移关系,每组试件的曲线至少包含 3 个样本。

表 5 拉拔试验结果

Tab. 5 Results of pull-out test data

试件编号	极限荷 载/N	荷载峰值 DIF 值	拉拔功/ (N·mm)	纤维最大拉 应力/MPa	平均黏结应力 $\tau_{av}$ /MPa	等效黏结应力 $\tau_{eq}$ /MPa	等效黏结应力 DIF 值	材料强度利 用率/%
S0-0.5	34.46	1.00	69.19	1 096.90	8.44	5.21	1.00	50
S0-1	34.77	1.01	70.18	1 106.76	8.51	5.29	1.01	50
S0-5	37.13	1.08	96.76	1 181.88	9.09	7.29	1.40	54
H0-0.5	151.04	1.00	416.71	2 136.78	24.66	20.93	1.00	97
H0-1	170.33	1.13	539.23	2 409.68	27.80	27.08	1.29	110
H0-5	183.96	1.22		2 602.50	30.03			118
C0-0.5	97.51	1.00		1 379.48	15.92			63
C0-1	100.61	1.03		1 423.34	16.42			65
C0-5	101.73	1.04		1 439.19	16.61			65
S10-0.5	38.91	1.00	127.05	1 238.54	9.53	9.57	1.00	56
S10-1	39.37	1.01	178.89	1 253.19	9.64	13.48	1.41	57
S10-5	39.83	1.02	168.20	1 267.83	9.75	12.67	1.32	58
H10-0.5	175.80	1.00	501.34	2 487.06	28.70	20.93	1.00	113
H10-1	193.84	1.10	616.23	2 742.28	31.64	27.08	1.29	125
H10-5	208.19	1.18		2 945.29	33.98			134
C10-0.5	98.44	1.00		1 392.64	16.07			63
C10-1	98.44	1.00		1 392.64	16.07			63
C10-5	105.54	1.07		1 493.09	17.23			63
S20-0.5	44.12	1.00	155.35	1 404.28	10.80	11.70	1.00	64
S20-1	48.53	1.10	168.72	1 544.65	11.88	12.71	1.09	70
S20-5	49.25	1.12	180.37	1 567.57	12.06	13.59	1.16	71
H20-0.5	204.44	1.00	525.13	2 892.23	33.37	26.38	1.00	96
H20-1	205.36	1.00	576.71	2 905.25	33.52	28.97	1.10	97
H20-5	226.71	1.11		3 207.33	37.01			107
C20-0.5	90.40	1.00		1 278.90	14.76			58
C20-1	95.27	1.05		1 347.79	15.55			61
C20-5	106.27	1.18		1 503.41	17.35			68

注:表中空白无数据,表示该组纤维均被拉断,其极限荷载为最大拉断荷载,无拉拔功、等效黏结应力和等效黏结应力 DIF 值。

(1)端钩形纤维断裂

由表 5 可知,端钩形纤维在 5 mm/s 的加载速率下被拉断,随着基体强度的增加,端钩形纤维的断裂荷载峰值增加了 23.24%,相应的断裂荷载 DIF 值减小,材料的强度利用率最大达到 134%。显然,纤维与基体之间的黏结强度会随着基体强度的增加而提高,但端钩形纤维对速率的敏感性随着基体强度的增加而减小。

端钩形纤维的拉拔过程可分为 3 个阶段:弹性黏结阶段、碳纤维调直变形阶段以及纤维脱黏拔出阶段<sup>[24]</sup>。对于被拉断的端钩形纤维来说,其完全弹性黏结阶段非常短暂,在曲线上第 1 个荷载转折点处进入调直变形阶段(图 4),端部产生变形,随着荷载的不断增加,纤维的调直变形会刮伤基体,造成孔道内壁基体的剥落,形成细微的裂缝,且随着加载的继续,裂缝慢慢地扩展和延伸,纤维末端的机械咬合力持续增加,直到纤维被拉断,并完全失效。相较于完全拉出的端钩形纤维,拉断的端钩形纤维末端变形提供了更强的机械贡献,高加载速率下对纤维强度有更高要求,以至于纤维在拉拔过程中失效。

(2)波纹形纤维断裂

整个拉拔试验中,所有波纹形纤维在被完全拉出前,发生断裂,纤维完全失效。由表 5 可知,随着基体强度的增加,波纹形纤维的断裂荷载只在 5.0 mm/s 的速率下增加,0.5 和 1.0 mm/s 加载速率下对应的纤维断裂荷载减小,最大断裂荷载增加了 8.9%,最大材料强度利用率达到 68%,相应的 DIF 值波动不大,可见基体强度对波纹形纤维的速率敏感性影响不大。但在同基体强度中,波纹形纤维呈现出弱速率敏感性,且随加载速率的变大,其最大

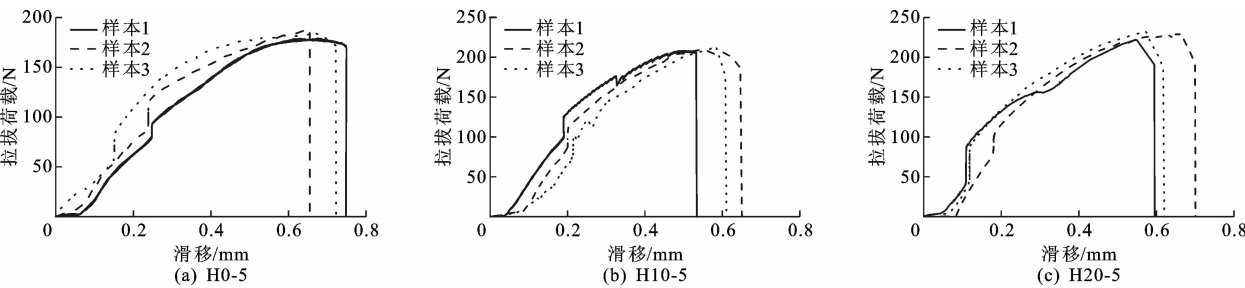


图 4 不同基体强度下端钩形钢纤维拉拔荷载滑移曲线  
Fig. 4 Pulling load slip curves of end-hooked steel fibers under different matrix strengths

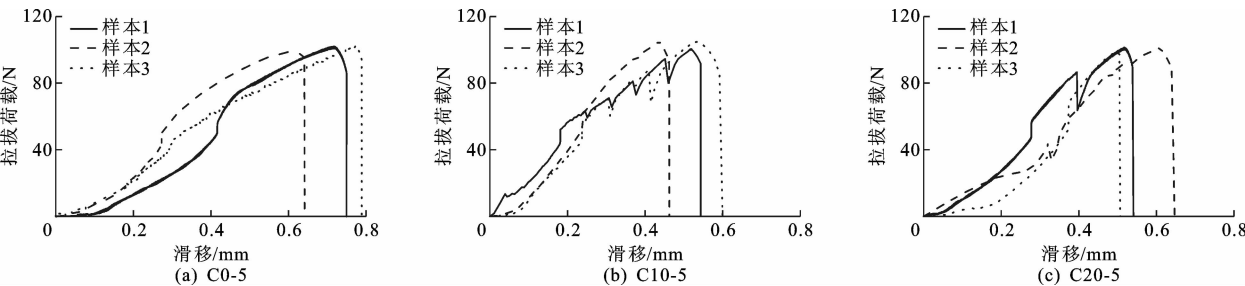


图 5 不同基体强度下波纹形钢纤维拉拔荷载滑移曲线  
Fig. 5 Pulling load slip curves of corrugated steel fibers under different matrix strengths

拉断荷载有所增加。

由图 5 可见:从形状上来看,与断裂端钩形纤维的荷载滑移曲线极为相似,在拉拔过程中出现多个荷载转折点,纤维产生不同程度的拉伤;且波纹形纤维的拉拔过程也分为弹性黏结阶段、钢纤维调直变形阶段以及纤维脱黏拔出阶段,但断裂的波纹形纤维在第 2 阶段被拉断,端部的机械锚固效应失效。从纤维的形态上来说,波纹形纤维存在着比端钩形纤维更强的机械锚固,使得其调直变形阶段更长,拉出路径更加曲折,拔出行为也变得更加复杂。从受力上来说,随着荷载的不断增大,波纹形纤维与基体之间界面的磨损持续增加,其机械锚固效应不断发挥作用,机械贡献持续增加,直至其受力和变形在第 2 阶段终止,纤维完全失效。

根据试验结果可知,端钩形纤维和波纹形纤维在拉拔作用下,埋入基体内部的纤维末端会随荷载

的增加而产生调直变形,并对水泥基体产生压力,从而增加摩擦力和拉拔阻力,发挥其末端的机械黏结作用。对于被拉断的纤维来说,这一机械贡献在纤维被完全拉伸之前失效,这是因为除了在拔出点处夹住纤维需要高应力外,在纤维调直到位的过程中也需要使其被牢牢夹住<sup>[24]</sup>。同基体强度下,纤维的最大拉断荷载值随加载速率的增大而增大,但端钩形纤维对速率的敏感性随着基体强度的增加而减小,波纹形纤维的速率敏感性随着基体强度的增加而提高。

2.2.2 纤维完全拔出破坏

直圆形纤维和端钩形纤维的典型拔出荷载与滑移的关系如图 6、图 7 所示,每组试件曲线包含 3 个样本,并展示了 3 种加载速率下不同基体强度对直圆形纤维、端钩形纤维与 UHPC 基体之间的黏结性能的影响。测试结果的关键参数见表 5。

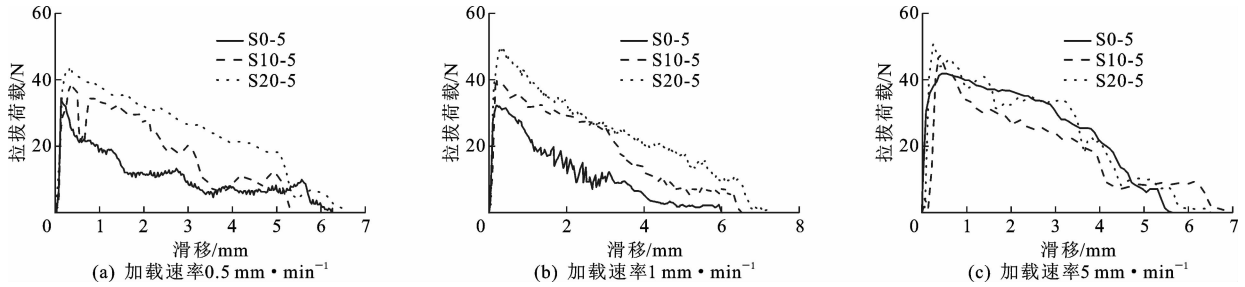


图 6 不同加载速率下直圆形钢纤维拉拔荷载滑移曲线  
Fig. 6 Pulling load slip curves of straight round steel fibers under different loading rates



### (1)直圆形纤维

所有的直圆形纤维表现出较好的拉拔性能,拉拔过程中无断裂情况,最终完全拔出,试验得到的参数见表5。图8为不同类型试件在不同加载速率下的极限荷载变化规律。由表5和图8可知:随着基体强度增加,直圆形纤维的最大拔出荷载提升了42.9%,拉拔功和等效黏结强度分别提高了160.7%和160.8%,荷载峰值的DIF值和等效黏结强度的DIF值均先增大后减小;材料的强度利用率增加,纤维的速率敏感性随基体强度的增加先减小后提高。

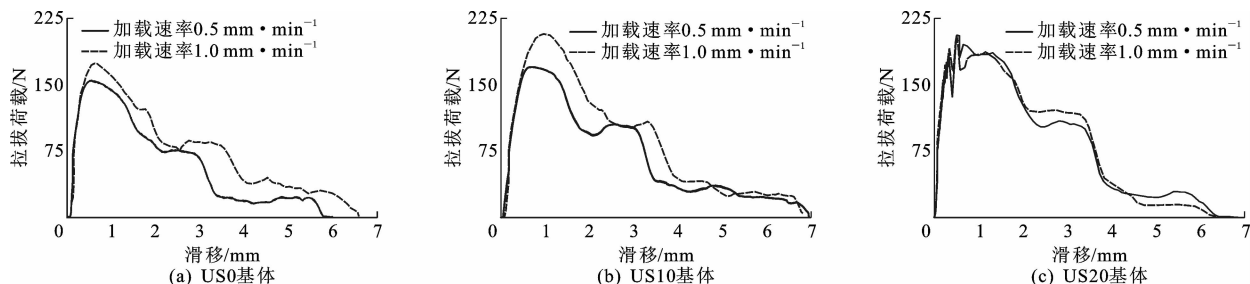


图7 不同基体中端钩形纤维的荷载滑移曲线

Fig. 7 Load slip curves of end-hooked fibers from different matrixes

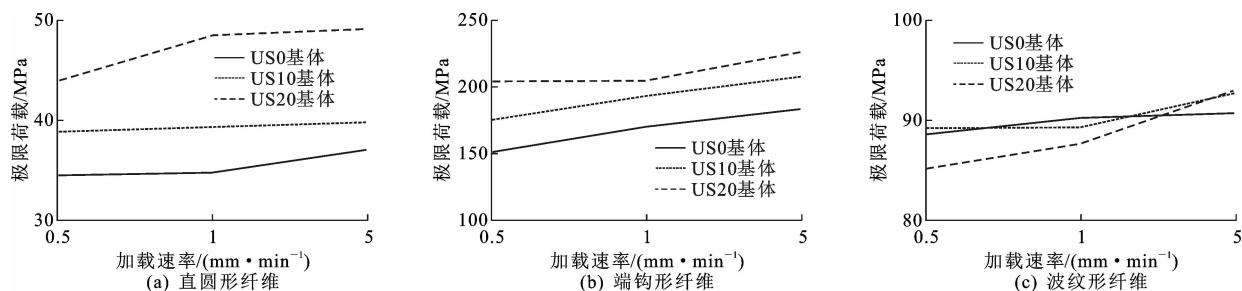


图8 不同纤维类型的峰值荷载随加载速率的变化

Fig. 8 Variations of peak load with loading rate for different fiber types

研究发现,直圆形纤维的拉拔过程可以分为完全黏结阶段、部分脱黏阶段和完全脱黏阶段<sup>[25]</sup>。由图6可知:当纤维处于完全黏结阶段时,荷载呈线性增加,纤维应力快速增加,对应的荷载滑移曲线处于线弹性阶段,该部分C-S-H凝胶体与纤维表面的化学黏着力和静摩擦力在纤维与基体发生相对滑动时丧失;随着荷载的继续增加,纤维与基体发生部分脱黏,进入第2阶段,纤维应力急剧增加,达到峰值荷载,大部分拉拔功来源于纤维与基体碎屑之间的滑动摩擦力的贡献;此时大部分纤维留在基体中,随着加载继续,纤维应力逐渐减小,直至纤维完全拔出,滑动摩擦力丧失。

与此同时,在试验过程中以及采用SEM观察到,直纤维在拔出的过程中,基体颗粒会附着在纤维表面,拔出口附近的基体有剥落现象,纤维表面产生

在同一基体中,高速率下的拉拔行为与低速率下的拉拔行为基本相似,随着加载速率的增加,纤维的拉拔峰值变化很小,其拉拔功和等效黏结强度有所增加,因此直圆形纤维是具有弱速率敏感性的。且纤维的拉拔峰值随着基体强度的增加而小幅度地增加,等效黏结强度和材料的强度利用率也相应地提高,但峰值荷载的DIF值只在US20基体中变化明显,在其他2种不同强度基体中无明显变化,而等效黏结强度的DIF值变化较大,因此直圆形纤维的速率敏感性与基体强度有关。

不同程度的刮伤,同时,基体内部孔道产生不同程度的微裂缝,如图9、图10所示。研究表明,直圆形纤维的抗拉性能主要由基体与纤维表面物理化学结合性能控制,细小基体黏附颗粒的磨损和基体隧道与纤维表面挤压产生的楔形效应,会适当提高纤维与基体界面的黏结强度<sup>[7-9]</sup>。而纤维表面黄铜涂层的划伤增加了其粗糙度,增大摩擦因数<sup>[7]</sup>,提高了直圆形纤维的速率敏感性。

### (2)端钩形纤维

低加载速率下的端钩形纤维表现出良好的拉拔性能,拔出的端钩形纤维通常呈弯月形,见图11。由图8(b)可知:纤维的最大拉拔荷载随着基体抗压强度的增加而增加,最大拔出荷载达到205.36 MPa;最大材料强度利用率达到125%;拉拔功和等效黏结强度分别提高了47.9%和



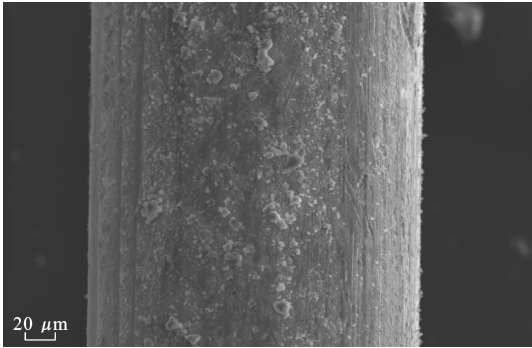


图 9 S20-1 纤维微观形貌(放大 300 倍)

Fig. 9 Microscopic morphology of S20-1 fiber (magnification 300 times)

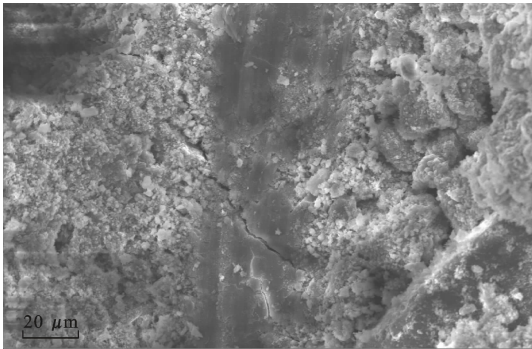


图 10 US20 基体孔道裂缝微观形貌(放大 600 倍)

Fig. 10 Microscopic morphology of cracks in US20 matrix tunnel (magnification 600 times)



图 11 端钩形纤维拉拔前和拉拔后

Fig. 11 End-hooked fiber before and after drawing

29.4%，荷载峰值的 DIF 值和等效黏结强度的 DIF 值均逐渐减小。同一基体中，随着加载速率的增大，其峰值荷载、拉拔功、黏结强度随之提高，材料的强度利用率提高，荷载峰值的 DIF 值和等效黏结强度的 DIF 值增大，对加载速率呈现出敏感性。通过与直圆形纤维的荷载滑移曲线进行对比，发现端钩形纤维的受力变形更为复杂，其荷载滑移曲线在下降段会出现较明显的转折以及波峰起伏。这是由于其端部条件的不同，使其在被拉拔

的过程中进行调直，界面黏结和机械锚固在纤维拔出过程中同时发生。也就是说，相较于 S 形纤维，端钩形纤维的末端变形提供了很好的机械咬合力贡献，从而提高了端钩形纤维对速率的敏感性。

钢纤维与 UHPC 基体的黏结力由 C-S-H 凝胶体与纤维表面的化学黏着力，C-S-H 凝胶体与纤维之间的静摩擦力，纤维与基体之间的机械咬合力，纤维与基体碎屑之间的滑动摩擦力组成<sup>[24]</sup>。完全拉出的端钩形纤维的弹性变形阶段非常短暂，主要变形发生在纤维末端的调直变形阶段，受机械咬合力和滑动摩擦力的作用。在该阶段可观察到，纤维表面的黄铜层被破坏，拔出口附近的基体剥落，部分基体碎屑跟着纤维一起被拉出，峰值荷载达到最大。同时，结合后期 SEM 可以观察到，纤维孔道内壁也存在基体剥落现象，并伴随着微裂缝，如图 12 所示。造成这种现象的原因是：①因为纤维末端的调直变形，纤维与基体之间的摩擦使得基体孔道被刮伤，增加了局部摩擦力，并提供了沿纤维长度方向分布的机械黏结贡献，使其机械咬合力和滑动摩擦力在该阶段达到最大，纤维与基体的黏结强度增加，达到峰值荷载；②因为 H 形纤维与基质界面发生脱黏时，端钩形纤维埋入端的机械锚固开始工作，增加了额外的拉拔阻力，且与直纤维相比，机械锚固增大了纤维的峰值荷载，其端部条件改善了纤维的抗拔性能，2 种纤维在高加载速率下进行加载，端钩形纤维对出口处的基体强度有更大的要求，如图 13 所示。

因此，端钩形纤维在高加载速率下的峰值荷载比准静态加载速率下的大，端钩形纤维末端的机械贡献随着强度的增加而增加，对速率表现出敏感性，且导致胶凝基质损伤的机制也可能是速率敏感的，如图 8(b)所示。



图 12 端钩形纤维拔出隧洞裂缝(放大 200 倍)

Fig. 12 Tunnel cracks after end-hooked fiber pulled out (magnification 200 times)

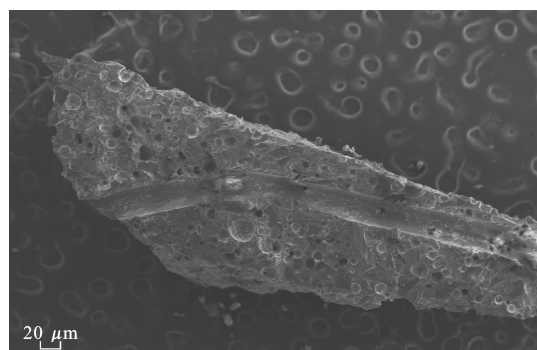


图13 端钩形纤维拔出隧洞(放大20倍)

Fig. 13 Tunnel after end-hooked fiber pulled out  
(magnification 20 times)

### 3 结 语

(1)纤维失效可以分为纤维断裂破坏和纤维完全拔出破坏2种失效模式,其中,任意加载速率下的波纹形纤维和高加载速率下的端钩形纤维发生断裂破坏,任意加载速率下的直圆形纤维和其他加载速率下的端钩形纤维发生完全拔出破坏。

(2)纤维的速率敏感性与基体强度有关。随着基体强度的增加,纤维在不同加载速率下的峰值荷载和拉拔功适当的提升,纤维与基体之间的黏结强度提高,但各种纤维对基体强度呈现出的速率敏感性不一致。

纤维的速率敏感性与其种类有关,直圆形纤维的抗拉性能主要由基体与纤维表面的物理化学结合性能控制,速率敏感性较弱;端钩形纤维和波纹形纤维的端部变形在纤维拉拔过程中发挥机械锚固效应,速率敏感性较强,且波纹形纤维具有比端钩形纤维更强的机械锚固作用,其拉拔行为更为复杂。

(3)高加载速率下与低加载速率下纤维的拉拔行为相似,大部分纤维表现出速率敏感性,拔出的过程伴随着纤维表面刮伤、基体剥落以及基体孔道内壁产生微裂缝等现象,并随着加载速率的增大,峰值荷载和拉拔功也增大,纤维与基体之间的黏结强度提高。

(4)胶凝基质具有速率敏感性。直圆形纤维基体速率敏感性从大到小依次为US0基体、US20基体、US10基体。端钩形纤维从大到小依次为US10基体/US0基体、US20基体。波纹形纤维从大到小依次为US20基体、US10基体、US0基体。

(5)本文仅从基体强度和纤维类型2个方面考虑加载速率对纤维与超高性能混凝土基体黏结性能的影响,后续将从基体配比等方面对不同加载速率

下钢纤维与超高性能混凝土的黏结性能展开研究。

### 参考文献:

#### References:

- [1] 刘娟红,宋少民. 活性粉末混凝土:配制、性能与微结构[M]. 北京:化学工业出版社,2013.  
LIU Juan-hong, SONG Shao-min. Reactive powder concrete: Formulation, performance and microstructure[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.
- [2] TAI Y S, EL-TAWIL S. High loading-rate pullout behavior of inclined deformed steel fibers embedded in ultra-high performance concrete[J]. Construction and Building Materials, 2017, 148: 204-218.
- [3] KIM M J, YOO D Y. Analysis on enhanced pullout resistance of steel fibers in ultra-high performance concrete under cryogenic condition[J]. Construction and Building Materials, 2020, 251: 118953.
- [4] 程俊,刘加平,张丽辉. 超高性能混凝土纤维-基体黏结性能测试与机理分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2016(5): 62-66.  
CHENG Jun, LIU Jia-ping, ZHANG Li-hui. Test and mechanical analysis on fiber-matrix bonding properties of ultra-high performance concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2016(5): 62-66.
- [5] 朱平,池颜海,易笃韬,等. 混杂钢纤维对钢纤维-超高性能混凝土界面黏结性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(10): 1669-1681.  
ZHU Ping, CHI Yan-hai, YI Du-tao, et al. Influence of hybrid steel fibers on interfacial bond performance between steel fiber and ultrahigh-performance concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(10): 1669-1681.
- [6] 赵一鹤,孙振平,穆帆远,等. 钢纤维对UHPC拉伸性能及其拔出行为的影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(2): 276-282.  
ZHAO Yi-he, SUN Zhen-ping, MU Fan-yuan, et al. Effect of steel fibers on tensile properties of ultra-high performance concrete and its pullout behavior [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(2): 276-282.
- [7] ABU-LEBDEH T, HAMOUSH S, HEARD W, et al. Effect of matrix strength on pullout behavior of steel fiber reinforced very-high strength concrete composites[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(1): 39-46.
- [8] ABU-LEBDEH T, HAMOUSH S, ZORNIG B. 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.
- [9] 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.
- [10] ROBINS P, AUSTIN S, JONES P. Pull-out behaviour of hooked steel fibers[J]. Materials and Structures, 2002, 35(7): 434-442.
- [11] NAAMAN A E, NAJM H. Bond-slip mechanisms of steel fibers in concrete[J]. ACI Materials Journal, 1991, 88(2): 135-145.
- [12] CUNHA V M C F, BARROS J A O, SENA-CRUZ J M. Pullout behavior of steel fibers in self-compacting concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(1): 1-9.
- [13] DONG J K, EL-TAWIL S, NAAMAN A E. Loading rate effect on pullout behavior of deformed steel fibers[J]. ACI Materials Journal, 2008, 105(6): 576-584.
- [14] 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.
- [15] SUJIVORAKUL C, WAAS A M, NAAMAN A E. Pullout response of a smooth fiber with an end anchorage[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(9): 986-993.
- [16] 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.
- [17] NAAMAN A E, SUJIVORAKUL C. Pull-out mechanisms of twisted steel fibers embedded in concrete [M]//BERNARD E S. Shotcrete; Engineering Developments. London: CRC Press, 2020: 197-203.
- [18] SUJIVORAKUL C, NAAMAN A E. Evaluation of bond-slip behavior of twisted wire strand steel fibers embedded in cement matrix[J]. Special Publication, 2002, 206: 271-292.
- [19] TAI Y S, EL-TAWIL S, CHUNG T H. Performance of deformed steel fibers embedded in ultra-high performance concrete subjected to various pullout rates [J]. Cement and Concrete Research, 2016, 89: 1-13.
- [20] 袁明, 梁恩, 颜东煌, 等. 配合比参数影响钢纤维-基体界面黏结性能的试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2020, 40(6): 57-66.
- YUAN Ming, LIANG En, YAN Dong-huang, et al. Investigation on effect of mixture ratio on interfacial bonding properties of steel fiber-matrix[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2020, 40(6): 57-66.
- [21] CECS 13—2009, 纤维混凝土试验方法标准[S]. CECS 13—2009, Standard for test methods of fiber reinforced concrete[S].
- [22] NF P1810, National Addition to Eurocode 2 — Design of concrete structures: Specific rules for ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) [S].
- [23] GB/T 17671—1999, 水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法)[S]. GB/T 17671—1999, Cement mortar strength inspection method (ISO method)[S].
- [24] 刘红彬, 陈健, 贾玉丹, 等. 活性粉末混凝土的制备技术与力学性能研究[J]. 工业建筑, 2008, 38(6): 74-78.
- LIU Hong-bin, CHEN Jian, JIA Yu-dan, et al. Preparation technology and mechanical properties of reactive powder concrete [J]. Industrial Construction, 2008, 38(6): 74-78.
- [25] 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.