

超高性能纤维增强混凝土中钢纤维拔出行为研究

龚明子¹, 潘阿馨^{1,2}, 张子龙³, 王涛¹, 饶先鹏¹, 陈晨¹, 黄伟^{2,3}

(1. 中交绿建(厦门)科技有限公司, 厦门 361000; 2. 福州大学土木工程学院, 福州 350116;
3. 福州大学先进制造学院, 晋江 362200)

摘要:自行研发的纤维定位装置可较为精准地控制钢纤维的空间位置, 基于此, 研究了钢纤维埋置深度、直径和埋置角度对超高性能纤维增强混凝土(UHPFRC)中钢纤维拔出行为的影响。结果表明:随着钢纤维埋置深度增加, 钢纤维最大拔出力、拔出功、最大拔出应力及钢纤维强度利用率均呈不断提高的趋势, 而最大平均黏结强度却呈减小的趋势;随着钢纤维直径增加, 钢纤维最大拔出力、拔出功和最大平均黏结强度相应增加, 而钢纤维强度利用率和最大拔出应力均减小;随着钢纤维埋置角度增大, 钢纤维最大拔出力和拔出功呈先上升后下降的趋势, 分别在埋置角度为45°和30°时达到最大, 而埋置角度为75°时, 试件破坏模式表现为钢纤维拉断失效。

关键词:超高性能纤维增强混凝土; 钢纤维; 拉拔; 埋置参数; 界面性能

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1001-1625(2023)08-2764-09

Pull-Out Behaviour of Steel Fiber in Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete

GONG Mingzi¹, PAN Axin^{1,2}, ZHANG Zilong³, WANG Tao¹,
RAO Xianpeng¹, CHEN Chen¹, HUANG Wei^{2,3}

(1. CCCC Green Construction (Xiamen) Technology Co., Ltd., Xiamen 361000, China; 2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 3. Institute of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Jinjiang 362200, China)

Abstract: Based on the self-developed steel fiber position device that can accurately control the spatial position of steel fiber, the effects of steel fiber embedded depth, diameter and embedded angle on the pull-out behavior of steel fiber in ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) were studied. The results indicate that the maximum pull-out force, pull-out work, maximum pull-out stress and strength utilization rate of steel fiber increase with the increase of steel fiber embedded depth. However, the maximum average bond strength decreases with the increase of steel fiber embedded depth. With the increase of steel fiber diameter, the maximum pull-out force, pull-out work and maximum average bond strength of steel fiber increase correspondingly, while the strength utilization rate and maximum pull-out stress of steel fiber decrease. With the increase of steel fiber embedded angle, the maximum pull-out force and pull-out work of steel fiber increase first and then decrease. The maximum pull-out force and pull-out work reach the maximum value at 45° and 30° of embedded angle, respectively. When the embedded angle is 75°, the failure mode of specimen is that the steel fiber is broken.

Key words: ultra-high performance fiber reinforced concrete; steel fiber; pull-out; embedded parameter; interface performance

0 引言

超高性能纤维增强混凝土(ultra-high performance fiber reinforced concrete, UHPFRC)是一种新型水泥基

收稿日期:2023-04-28;修订日期:2023-05-29

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2018YFC0705403);福建省自然科学基金(2021J05124);福建省中科院 STS 计划配套项目(2022T3032);泉州市科技计划项目(2021N176S);厦门市建设局建设科技项目(XJK2022-1-20)

作者简介:龚明子(1986—),女,高级工程师。主要从事高性能土木工程材料的研究。E-mail:573212643@qq.com

通信作者:黄伟,博士,助理研究员。E-mail:WeiHuang@fzu.edu.cn

复合材料,具有超高强度、超高韧性和优良耐久性等优点^[1-2]。其中,钢纤维对 UHPFRC 起增强、增韧和阻裂作用。宏观上,钢纤维能够桥联 UHPFRC 基体中的微裂缝,阻止裂缝进一步扩展,极大地提升 UHPFRC 的韧性;微观上,钢纤维与 UHPFRC 基体间的界面力学性能改善了界面薄弱区,进而提高 UHPFRC 整体的宏观力学性能,并改变其破坏模式。大量研究^[3-5]表明,UHPFRC 发生破坏时,往往表现出纤维被拔出破坏而非纤维拉断破坏。因此,探究 UHPFRC 中钢纤维的拔出行为可在细观层次上了解 UHPFRC 中钢纤维的增强、增韧机理^[6-7]。

纤维拉拔试验是研究钢纤维-混凝土基体界面力学性能常用的方法^[8-11]。林晓深^[9]采用自行设计的半狗骨试验装置进行单根纤维的拔出试验,研究了 UHPFRC 基体与钢纤维对钢纤维拔出过程中界面力学行为的影响,结果表明,该装置试验成功率较高,平直型钢纤维表现出的综合性能最优,平均黏结强度和拔出功最大,分别达到了 14 MPa 和 160 N·mm。Abu-Lebdeh 等^[10]采用“8”字形纤维拔出装置,比较了不同形貌的钢纤维与 UHPFRC 基体界面之间黏结性能,结果表明,端钩型钢纤维与基体之间的界面黏结强度最大,是圆直型钢纤维的 5~6 倍,同时揭示了异型钢纤维黏结强度提高的机理在于纤维拔出过程中拐点处所产生的机械锚固作用。梁恩^[11]研究了不同钢纤维规格、类型和埋置深度对钢纤维和 UHPFRC 基体界面黏结性能的影响规律,试验发现,增大直径和埋置深度可明显提高钢纤维的黏结性能,特别是端钩型钢纤维。Beglarigale 等^[12]研究表明:随着圆直型钢纤维嵌入长度增加,纤维-基体的拉拔特性有所改善;随着水灰比下降,钢纤维在 UHPFRC 中的黏结性能增加。综上可知,针对纤维拉拔试验,目前大多数研究均只考虑垂直方向上的纤维拉拔,而忽略了其他影响因素,如纤维在空间的埋置角度、埋置深度和纤维直径等,这与实际工程并不完全符合。

为此,本文利用自行设计的钢纤维定位装置,系统研究了钢纤维埋置深度、直径及埋置角度对 UHPFRC 中钢纤维拔出行为的影响,研究结果将为 UHPFRC 的制备与应用提供一定的理论基础。

1 实验

1.1 原材料

UHPFRC 基体配合比如表 1 所示,水胶比为 0.16。其中:水泥采用 42.5 级普通硅酸盐水泥;硅灰的密度为 2.0 g/cm³,粒径为 0.1~0.2 μm,SiO₂ 质量分数为 97.57%;集料经过级配设计,由 3 种粒径(分别为 10~<20 μm、20~<40 μm、40~70 μm)的石英砂与 400 μm 的石英粉组成;减水剂采用 CX-8 型高效减水剂,减水率约为 30%。UHPFRC 基体 28 d 的抗压强度为 126.7 MPa。

表 1 UHPFRC 基体配合比(质量比)

Table 1 Formulation of UHPFRC matrix (mass ratio)

Cement	Silica fume	Silica powder	Quartz sand			Superplasticizer
			40~70 μm	20~<40 μm	10~<20 μm	
1	0.3	0.09	0.14	0.41	0.53	0.025

钢纤维是由赣州大业金属纤维有限公司生产的圆直型镀铜钢纤维原丝,抗拉强度为 2 850 MPa,直径分别为 0.2、0.3、0.5 mm,待测钢纤维长度可根据试验需求进行裁剪。分别研究钢纤维直径、埋置深度、埋置角度对界面力学性能的影响,钢纤维拉拔试验参数如表 2 所示。其中,采用“钢纤维直径-钢纤维埋置深度的 2 倍-钢纤维埋置角度”方式对试件进行编号,如“031300”表示钢纤维直径为 0.3 mm,埋置深度为 6.5 mm,埋置角度为 0°。

表 2 钢纤维拉拔试验参数

Table 2 Investigated parameters of steel fiber pull-out test

Specimen No.	Fiber diameter/mm	Embedded depth/mm	Embedded angle/(°)
031300	0.3	6.5	0
032000	0.3	10.0	0
032600	0.3	13.0	0
033000	0.3	15.0	0
021300	0.2	6.5	0

续表

Specimen No.	Fiber diameter/mm	Embedded depth/mm	Embedded angle/(°)
051300	0.5	6.5	0
031315	0.3	6.5	15
031330	0.3	6.5	30
031345	0.3	6.5	45
031360	0.3	6.5	60
031375	0.3	6.5	75

1.2 制备与试验

本文设计了一套钢纤维拔出定位装置,如图1所示,主要由含定位孔的框架模板与隔板组成。通过调节定位隔板的位置可调节钢纤维的埋置深度,如图1(a)所示。通过穿插不同的定位孔可调节钢纤维的埋置角度,如图1(b)所示。浇注 UHPFRC 基体前,将预先裁剪好的钢纤维穿过对应的定位孔,拉紧钢纤维的两端使其保持直线,使用热熔胶枪对接口处涂抹上适量的热熔胶,保证钢纤维与模具装置处于固结状态,随后浇注 UHPFRC 基体,如图1(c)所示。待标准养护 24 h 后进行拆模,首先对热熔胶位置进行加热使其融化,再依次小心拆除框架模板与隔板。随后,将试件放在标准养护室养护至 28 d。

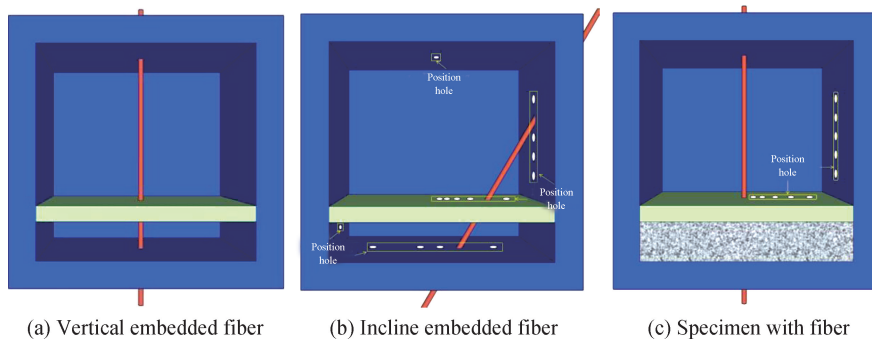


图1 钢纤维拉拔试验定位装置

Fig. 1 Steel fiber pull-out test position device

采用 WDW-30 微机控制电子万能试验机进行钢纤维拉拔试验,采用位移加载控制,位移精度为 0.01 mm,量程为 2 ~ 500 N,加载速率为 1.08 mm/min。测试时,将试件放置于特制的凹字形夹具中,调节试件高度,使钢纤维自由端与楔形夹具处于同一高度,同时微调试件位置,确保钢纤维自由端受拉时处于竖直方向,如图2所示。试验获得钢纤维拔出荷载-位移(P - S)曲线,每组 6 个试件,取平均值作为试验代表值。

1.3 分析方法

钢纤维拔出性能特征值包括最大拔出力、最大平均黏结强度、拔出功、单位面积拔出功、最大拔出应力及钢纤维强度利用率^[13-14]。其中,前二者均反映了钢纤维与 UHPFRC 基体之间界面的力学性能,最大拔出力为拔出过程中钢纤维与基体间的最大作用力,即 P - S 曲线的峰值点荷载;最大平均黏结强度是最大拔出力作用下,钢纤维与基体接触面上单位面积受到的黏结力,由式(1)计算^[15]。

$$\tau_{\max} = \frac{P_{\max}}{A_{f,s}} = \frac{P_{\max}}{\pi d_f l_A} \quad (1)$$

式中: τ_{\max} 为钢纤维的最大平均黏结强度,MPa; P_{\max} 为钢纤维的最大拔出力,N; $A_{f,s}$ 为钢纤维与基体接触面积,即埋置部分的侧面积, mm^2 ; d_f 为钢纤维的直径,mm; l_A 为钢纤维的埋置深度,mm。



图2 钢纤维拉拔试验图

Fig. 2 Diagram of steel fiber pull-out test

拔出功与单位面积拔出功是衡量钢纤维拔出过程耗能的指标。其中,拔出功指的是钢纤维拔出过程的总耗能,即 P - S 曲线与坐标轴的包络面积^[16],由式(2)计算。单位面积拔出功指的是单位接触面积的拔出耗能,反映钢纤维与基体的黏结状况,由式(3)计算。

$$W_p = \int_0^{l_A} p(x) dx \quad (2)$$

$$\bar{W}_p = \frac{W_p}{\pi d_f l_A} \quad (3)$$

式中: W_p 为钢纤维的拔出功, $N \cdot mm$; $p(x)$ 是位移为 x 时的拔出力; \bar{W}_p 为单位面积拔出功, N/mm 。

钢纤维的最大拔出应力和强度利用率是表征钢纤维自身受力特征的指标。其中,最大拔出应力反映了钢纤维在拔出过程受到的最大拉应力,由式(4)计算。钢纤维强度利用率表征了钢纤维拔出过程中自身的强度储备,通过式(5)进行计算,当钢纤维强度利用率为 100% 时,试件失效形态表现为钢纤维被拔断破坏。

$$\sigma_{f,max} = \frac{P_{max}}{A_f} = \frac{4P_{max}}{\pi d_f^2} \quad (4)$$

$$\rho_f = \frac{\sigma_{f,max}}{f_{tf}} \quad (5)$$

式中: $\sigma_{f,max}$ 为钢纤维的最大拔出应力, MPa ; A_f 为钢纤维横截面积, mm^2 ; f_{tf} 为钢纤维抗拉强度, MPa ; ρ_f 为钢纤维强度利用率。

2 结果与讨论

2.1 钢纤维埋置深度的影响

图 3 为不同埋置深度钢纤维的荷载-位移(P - S)曲线。由图 3 可知,随着埋置深度的增加,钢纤维在外力作用下产生的 P - S 曲线与坐标轴之间的包络面积逐渐变大。整体上, P - S 曲线大致可分为上升和下降两个阶段,其中,上升段曲线接近于一条直线,此时钢纤维与 UHPFRC 基体处于脱黏阶段,主要受到钢纤维与基体之间化学黏结的作用^[17]。达到最大拔出力后,荷载开始逐渐下降,直至钢纤维完全拔出,此时钢纤维处于滑移阶段,主要受到钢纤维与基体之间摩擦力的作用^[8],因此下降段的曲线波动较大。

最大拔出力和最大平均黏结强度随着钢纤维埋置深度的变化如图 4 所示。由图 4 可知,最大拔出力随着埋置深度的增加而增大,当埋置深度为 15.0 mm 时,最大拔出力达到 93.31 N,是埋置深度为 6.5 mm 时的 1.78 倍,这是由于钢纤维与基体的接触面积不同,最大拔出力随着钢纤维与基体接触面积的增大而增大。然而,最大平均黏结强度随着埋置深度增加而减小,埋置深度 6.5 mm 组别的最大平均黏结强度最大,为 8.56 MPa,是埋置深度 15.0 mm 组别的 1.30 倍。这是由于最大平均黏结强度和钢纤维的埋置深度成反比,随着埋置深度的增大,最大平均黏结强度反而减小。

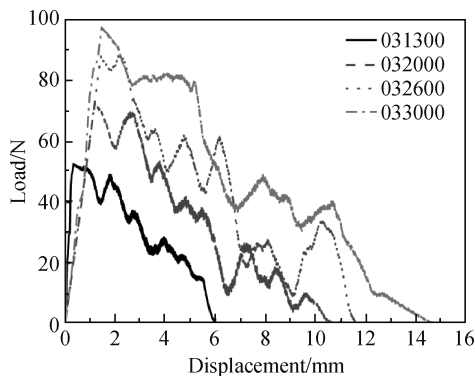


图 3 不同埋置深度钢纤维的荷载-位移曲线
Fig. 3 Load-displacement curves of steel fiber with different embedded depths

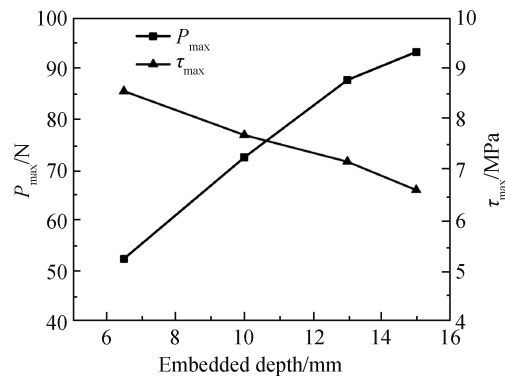


图 4 钢纤维-基体界面力学性能随钢纤维埋置深度的变化
Fig. 4 Evolution of mechanical properties of steel fiber-matrix interface with steel fiber embedded depth

2.1.1 钢纤维埋置深度对拔出过程耗能的影响

图5为钢纤维拔出功和单位面积拔出功随钢纤维埋置深度的变化。由图5可知,钢纤维的拔出功随着埋置深度的增加而增加,当埋置深度为6.5 mm时,拔出功最小,拔出功在埋置深度为15.0 mm时达到最大,为677.63 N·mm,是前者的3.64倍。单位面积拔出功同样随埋置深度的增加而增大,且埋置深度对单位面积拔出功的影响显著,埋置深度为15.0 mm时的单位面积拔出功是埋置深度为6.5 mm时的1.58倍。因此,埋置深度越大,钢纤维的单位面积耗能越大。Naaman等^[18]研究表明,钢纤维在拔出过程中,基体界面脱落的颗粒会在内部产生楔形效应,增强钢纤维与基体的机械咬合力,显著提升钢纤维拔出过程的耗能,埋置深度越大,楔形效应越显著。

2.1.2 钢纤维埋置深度对钢纤维受力性能的影响

钢纤维受力性能随钢纤维埋置深度的变化如图6所示。由图6可知,钢纤维受力性能变化与最大拔出力的变化规律一致,均随着埋置深度的增加而增大。当埋置深度为15.0 mm时,钢纤维的最大拔出应力和强度利用率分别达到了1320.06 MPa和46.32%,均是埋置深度6.5 mm组别的1.78倍。值得注意的是,试验测得的钢纤维强度利用率均小于100%,试件破坏模式均表现为纤维拔出失效。

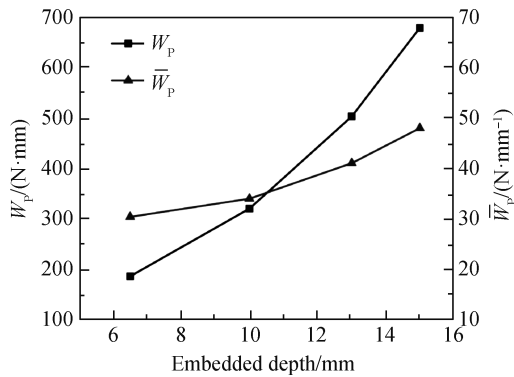


图5 钢纤维拔出过程耗能随钢纤维埋置深度的变化

Fig. 5 Evolution of energy dissipation of steel fiber pull-out with steel fiber embedded depth

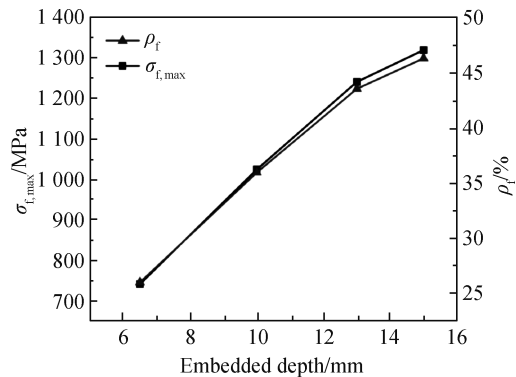


图6 钢纤维受力性能随钢纤维埋置深度的变化

Fig. 6 Evolution of mechanical properties of steel fiber with steel fiber embedded depth

2.2 钢纤维直径的影响

图7为不同直径钢纤维的荷载-位移(P - S)曲线。从图7中可以看出,钢纤维直径对UHPFRC基体中钢纤维的拔出行为具有较大的影响,钢纤维直径为0.2 mm时的 P - S 曲线与钢纤维直径为0.3 mm时的较为接近,而钢纤维直径为0.5 mm时的 P - S 曲线所包围的面积远大于前两者。

钢纤维的最大拔出力和最大平均黏结强度随钢纤维直径的变化如图8所示。由图8可知,从整体上看,钢纤维的最大拔出力和最大平均黏结强度均随着钢纤维直径的增加而增加。直径0.2 mm组别的最大拔出力最小,直径0.3、0.5 mm组别的最大拔出力分别是前者的1.53倍和3.85倍,直径0.5 mm组别的最大拔出力为131.62 N。同样,当钢纤维直径为0.2 mm时,最大平均黏结强度最小,仅为8.36 MPa,钢纤维直径0.3、0.5 mm组别的最大平均黏结强度分别是前者的1.02倍和1.54倍。与埋置深度组别类似,直径较大的钢纤维与基体的接触面积较大,因此钢纤维所需的最大拔出力也相应较大。

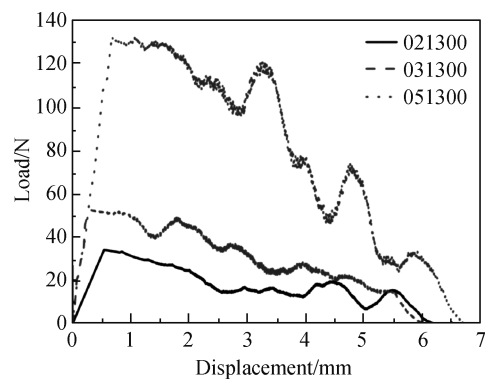


图7 不同直径钢纤维的荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of steel fiber with different diameters

2.2.1 钢纤维直径对拔出过程耗能的影响

钢纤维拔出功和单位面积拔出功随钢纤维直径的变化如图9所示。由图9可知,从整体趋势上看,钢纤维单位面积拔出功随着钢纤维直径的增大而增大,且直径越大其增长率越大。当钢纤维直径为0.2 mm时,钢纤维的拔出功最小,仅为110.94 N·mm,当钢纤维直径为0.5 mm时,钢纤维的拔出功最大,为524.91 N·mm,是前者的4.73倍。同样,直径大的钢纤维单位面积拔出功也大,当钢纤维直径为0.5 mm时,单位面积拔出功是最小组别的1.89倍。其原因在于,拔出功受钢纤维与基体的接触面积影响,随接触面积的增大而增加。

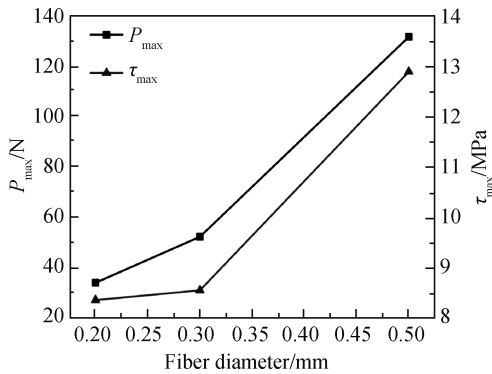


图8 钢纤维-基体界面力学性能随钢纤维直径的变化

Fig. 8 Evolution of mechanical properties of steel fiber-matrix interface with steel fiber diameter

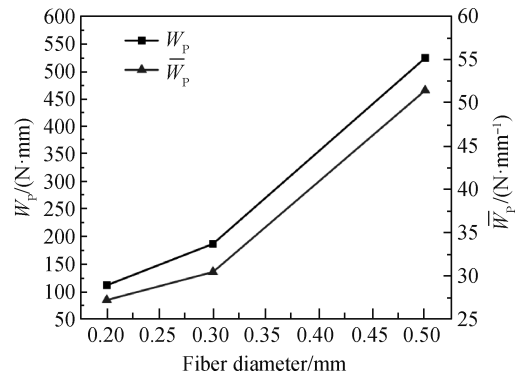


图9 钢纤维拔出过程耗能随钢纤维直径的变化

Fig. 9 Evolution of energy dissipation of steel fiber pull-out with steel fiber diameter

2.2.2 钢纤维直径对钢纤维受力性能的影响

钢纤维自身受力性能随钢纤维直径的变化如图10所示。由图10可知,钢纤维最大拔出应力和强度利用率均随着钢纤维直径的增大而减小,与钢纤维拔出过程的耗能变化相反。当钢纤维直径为0.2 mm时,钢纤维获得最大的拔出应力和强度利用率,分别为1 087.35 MPa和38.15%,当钢纤维直径为0.5 mm时,钢纤维的最大拔出应力和强度利用率均仅为前者的61.6%,分别为670.34 MPa和23.52%。这是因为圆直型钢纤维直径越大,钢纤维的横截面积就越大,钢纤维的最大拔出应力随着横截面积的增大而减小,导致钢纤维强度利用率也随之减小。与此同时,在三组直径钢纤维拔出试验中,钢纤维的强度利用率仍然全部小于100%,因此,试验破坏模式仍旧表现为纤维拔出失效。

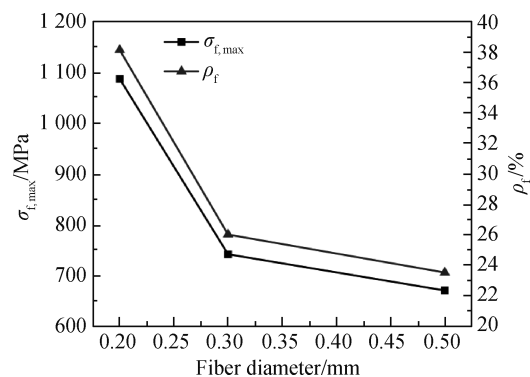


图10 钢纤维受力性能随钢纤维直径的变化

Fig. 10 Evolution of mechanical properties of steel fiber with steel fiber diameter

2.3 钢纤维埋置角度的影响

图11为不同埋置角度钢纤维的荷载-位移($P-S$)曲线。由图11可知,随着钢纤维埋置角度的增大, $P-S$ 曲线逐渐向右移动,当埋置角度为 45° 时峰值荷载达到最大值。这是因为改变钢纤维的空间埋置角度,影响了钢纤维与受拉方向的一致性,钢纤维在拉拔过程中,受到了基体的物理锚固作用,增加了钢纤维的抗拉拔性能,特别是在拔出路径的转折处,钢纤维一定程度上发生了变形^[19]。值得注意的是,当埋置角度为 75° 时,试件的破坏模式表现为钢纤维拉断失效,当埋置角度为 60° 时,仅有两个试件发生纤维拉断失效,其余组别试验的破坏模式则均表现为纤维拔出失效,这表明钢纤维的埋置角度越大,试件发生纤维拉断失效的概率越高。

钢纤维的最大拔出力和最大平均黏结强度随钢纤维埋置角度的变化如图12所示。其中,埋置角度为 75° 的试件以其钢纤维拉断时的荷载作为最大拔出力。从图12中可知,随着埋置角度的增加,最大拔出力和

最大平均黏结强度均呈先上升后下降的趋势,当埋置角度为 45°时,钢纤维的最大拔出力 and 最大平均黏结强度达到最大,分别为 72.56 N 和 5.13 MPa。这是因为当埋置角度为 45°时,钢纤维受到上夹具的拉力在轴线方向上的投影最大,即钢纤维受到的有效拉力最大,因此,钢纤维与 UHPFRC 基体之间产生最大的应力集中。Laranjeira 等^[20]研究也认为,当钢纤维埋置的轴线方向与拔出力方向存在夹角时,在钢纤维拔出过程中,钢纤维将发生拔出方向的转变,此时钢纤维将与基体之间产生相对滑动,这种相对滑动产生的摩擦力将使钢纤维的拔出阻力增大。由此可知,当埋置角度较大时,钢纤维的弯折角度也会相应增大,这将导致埋入端附近产生应力集中现象,使该区域的界面损伤演化速度加快,导致界面整体的承载力降低。

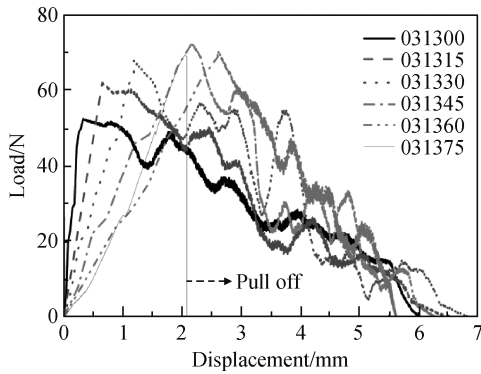


图 11 不同埋置角度钢纤维的荷载-位移曲线
Fig. 11 Load-displacement curves of steel fiber with different embedded angles

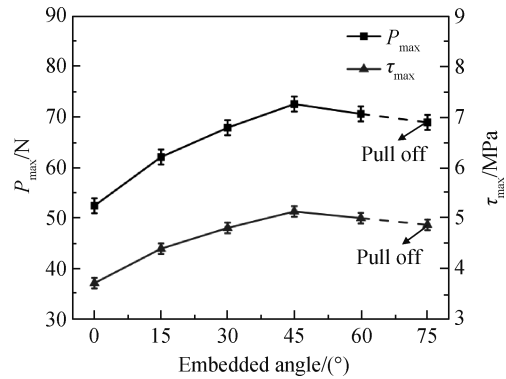


图 12 钢纤维-基体界面力学性能随钢纤维埋置角度的变化

Fig. 12 Evolution of mechanical properties of steel fiber-matrix interface with steel fiber embedded angle

2.3.1 钢纤维埋置角度对拔出过程耗能的影响

钢纤维拔出功和单位面积拔出功随钢纤维埋置角度的变化如图 13 所示。由图 13 可知,两条曲线变化规律基本一致,随着埋置角度的增加,钢纤维拔出功与单位面积拔出功均呈先上升后下降的趋势,埋置角度为 30°时最大,埋置角度为 0°时最小,最大拔出功为 214.44 N·mm。

2.3.2 钢纤维埋置角度对钢纤维受力性能的影响

钢纤维受力性能随钢纤维埋置角度的变化如图 14 所示。由图 14 可知,钢纤维最大拔出应力和钢纤维强度利用率随着钢纤维埋置角度的增加先上升后下降,在埋置角度为 45°时,达到最大,分别为 1 025.67 MPa 和 35.99%。需要说明的是,在埋置角度为 60°与 75°的试验中,均出现了钢纤维拉断失效的破坏模式,但这并不意味着其钢纤维的强度利用率达到 100%,由前述钢纤维埋置角度产生的有效强度可知,当钢纤维的埋置方向与受力方向存在夹角时,将会使钢纤维在埋入端发生弯折,从而导致钢纤维提供的有效强度产生损失,弯折的角度越大,强度损失越大,致使钢纤维的有效强度利用率在开始施加荷载时就大幅降低。

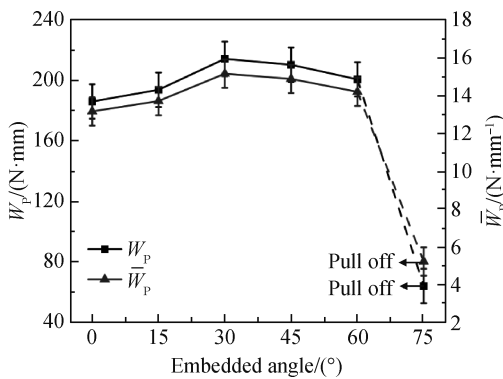


图 13 钢纤维拔出过程耗能随钢纤维埋置角度的变化
Fig. 13 Evolution of energy dissipation of steel fiber pull-out with steel fiber embedded angle

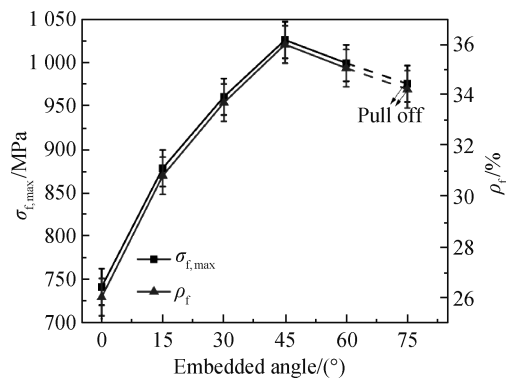


图 14 钢纤维受力性能随钢纤维埋置角度的变化
Fig. 14 Evolution of mechanical properties of steel fiber with steel fiber embedded angle

3 结 论

1) 设计出用于纤维拉拔试验的钢纤维定位装置,可较精准地控制钢纤维的空间位置,包括埋置深度和埋置角度。

2) 随着钢纤维埋置深度的增加,钢纤维最大拔出力、拔出功以及强度利用率均呈不断提高的趋势,在钢纤维埋置深度为 15.0 mm 时,分别达到 93.31 N、677.63 N·mm 和 46.32%,而最大平均黏结强度却随着钢纤维埋置深度的增加而减小,最小为 8.56 MPa。

3) 钢纤维最大拔出力和拔出功均随着钢纤维直径的增加而提高,在钢纤维直径为 0.5 mm 时,分别为 131.62 N 和 524.91 N·mm,钢纤维强度利用率和最大拔出应力随着钢纤维直径的增大而减小,在钢纤维直径为 0.5 mm 时,分别为 23.52% 和 670.34 MPa。

4) 随着钢纤维埋置角度的增大,钢纤维最大拔出力与拔出功均先上升后下降,分别在 45° 和 30° 时达到最大,为 72.56 N 和 214.44 N·mm。在埋置角度为 75° 时,试件破坏模式表现为钢纤维拉断失效。

参 考 文 献

- [1] 陈宝春,季 韬,黄卿维,等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3): 1-24.
CHEN B C, JI T, HUANG Q W, et al. Review of research on ultra-high performance concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(3): 1-24 (in Chinese).
- [2] 陈宝春,林毅焱,杨 简,等. 超高性能纤维增强混凝土中纤维作用综述[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 58-68.
CHEN B C, LIN Y J, YANG J, et al. Review on fiber function in ultra-high performance fiber reinforced concrete[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2020, 48(1): 58-68 (in Chinese).
- [3] 陈从春,冯 毅,陈晓冬. 钢纤维体积掺量对超高性能混凝土力学性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2016, 43(5): 54-56.
CHEN C C, FENG Y, CHEN X D. Influence of volume ratios of steel fiber on mechanical properties of ultra-high performance concrete[J]. New Building Materials, 2016, 43(5): 54-56 (in Chinese).
- [4] WU Z M, SHI C J, HE W, et al. Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 103: 8-14.
- [5] WU Z M, SHI C J, KHAYAT K H. Investigation of mechanical properties and shrinkage of ultra-high performance concrete; influence of steel fiber content and shape[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 174: 107021.
- [6] 吴永魁,姚一鸣. 超高性能混凝土(UHPC)动态损伤机理综述[J]. 混凝土与水泥制品, 2021(4): 1-5 + 16.
WU Y K, YAO Y M. Review of dynamic damage mechanism of ultra-high performance concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2021(4): 1-5 + 16 (in Chinese).
- [7] 苟鸿翔,朱洪波,周海云,等. 定向分布钢纤维对超高性能混凝土的增强作用[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(11): 1756-1764.
GOU H X, ZHU H B, ZHOU H Y, et al. Reinforcement of directionally distributed steel fibers on ultra-high performance concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(11): 1756-1764 (in Chinese).
- [8] 张献民,陈雪芳,李长辉,等. 纤维与水泥砂浆界面黏结性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(12): 3927-3937.
ZHANG X M, CHEN X F, LI C H, et al. Research on bonding properties of fiber and cement mortar interface[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(12): 3927-3937 (in Chinese).
- [9] 林晓深. 掺花岗岩石粉 UHPC 单根钢纤维拉拔性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2017.
LIN X Y. Research on single steel fiber pullout behavior in UHPC mixed with granite stone powder[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2017 (in Chinese).
- [10] 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.
- [11] 梁 恩. 钢纤维与超高性能混凝土基体界面粘结性能单丝拉拔试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2021.
LIANG E. Experimental study on interfacial adhesion between steel fiber and ultra-high performance concrete matrix by monofilament drawing[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2021 (in Chinese).
- [12] 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.
- [13] 沈荣熹,史小兴. 聚烯烃纤维在混凝土中应用的进展[C]//第十二届全国纤维混凝土学术会议论文集. 北京, 2008: 5-13.
SHEN R X, SHI X X. Progress in the application of polyolefin fiber in concrete[C]//Proceedings of the 12th National Fiber Concrete Academic Conference. Beijing, 2008: 5-13 (in Chinese).
- [14] 李向阳. 圆锥头钢纤维的单根拔出试验和理论分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.

- LI X Y. Single pullout test and theoretical analysis of tapered steel fiber[D]. Changsha: Hunan University, 2016 (in Chinese).
- [15] 赵楠, 卿龙邦, 杨卓凡, 等. 不同龄期钢纤维增强水泥砂浆纤维拉拔试验与模拟研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(7): 2165-2173.
ZHAO N, QING L B, YANG Z F, et al. Experimental and numerical studies on fiber pull-out of steel fiber reinforced cement mortar at different ages[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(7): 2165-2173 (in Chinese).
- [16] 季韬, 林晓滢, 梁咏宁, 等. 钢纤维对掺花岗岩石粉 UHPC 的增强增韧: 磷酸锌改性和纤维形状的影响及机理[J]. 材料导报, 2017, 31(23): 66-72.
JI T, LIN X Y, LIANG Y N, et al. Strengthening and toughening granite-powder-contained UHPC by steel fibers: influences of zinc phosphate treatment and fiber shape, and mechanisms[J]. Materials Review, 2017, 31(23): 66-72 (in Chinese).
- [17] 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 J, LIU J P, ZHANG L H. Test and mechanical analysis on fiber-matrix bonding properties of ultra-high performance concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2016(5): 62-66 (in Chinese).
- [18] NAAMAN A E, SHAH S P. Pull-out mechanism in steel fiber-reinforced concrete[J]. Journal of the Structural Division, 1976, 102(8): 1537-1548.
- [19] 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.
LIU J, ZHANG B D, ZHAO B J, 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 (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.