

端勾钢纤维与水泥基材料粘结性能变参数试验研究

傅振洋

深圳大学 土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060

DOI: 10.61369/SSSD.2026070025

摘 要 : 为研究端勾钢纤维与水泥基材料界面粘结性能的变化规律, 本文开展了不同纤维倾斜角度 (0° 、 30° 、 45°) 单纤维静态拉拔试验。通过分析荷载-位移曲线及多指标评价体系, 系统探讨了参数变化对界面破坏机理和能量耗散特征的影响。结果表明: 纤维倾斜角度的增大可显著提升峰值荷载、极限粘结强度与拉拔能, 45° 倾斜时分别较 0° 提高 41.72%、59.29% 和 54.26%; 本文结果可为端勾钢纤维水泥基材料中界面设计与性能优化提供试验依据。

关 键 词 : 端勾钢纤维; 水泥基材料; 粘结性能; 倾斜角度

Experimental Study on the Bonding Performance of End-Hooked Steel Fibers with Cement-Based Materials under Variable Parameters

Fu Zhenyang

College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060

Abstract : To investigate the variation patterns in the interfacial bond strength between end-hooked steel fibres and cementitious matrices, this study conducted single-fibre static pull-out tests under different fibre inclination angles (0° , 30° , 45°). By analysing load-displacement curves and employing a multi-indicator evaluation system, the influence of parameter variations on interfacial failure mechanisms and energy dissipation characteristics was systematically examined. Results indicate that increasing the fibre inclination angle significantly enhances peak load, ultimate bond strength, and pull-out energy. At 45° , these values increased by 41.72%, 59.29%, and 54.26%. The findings of this study provide experimental evidence for interface design and performance optimisation in end-hooked steel fibre cement-based materials.

Keywords : end-hooked steel fibres; cementitious materials; bonding properties; inclination angle

引言

钢纤维增强水泥基复合材料因其优异的抗裂性、韧性和耐久性, 在现代土木工程中得到广泛应用。钢纤维通过桥接裂缝、延缓裂缝扩展, 显著提升混凝土结构的力学性能与服役寿命^[1]。其中, 钢纤维与水泥基材料之间的界面粘结性能是决定复合材料整体行为的关键因素, 直接影响荷载传递效率、裂缝控制能力以及破坏模式^[2, 3]。

端勾钢纤维因其端部特有的弯曲设计, 能在界面中形成机械锚固效应, 较平直纤维具有更高的拔出荷载和能量耗散能力。目前, 已有诸多学者围绕纤维类型、几何参数、基体性能等因素对界面粘结的影响开展了研究, 并建立了多种理论模型与评价指标^[4-7]。然而, 在实际工程中, 钢纤维在混凝土基体内呈三维随机分布, 其取向往往与受力方向形成一定夹角, 导致界面受力机制复杂化^[8]。因此, 系统开展变参数条件下端勾钢纤维-水泥基材料界面粘结性能试验研究, 揭示其多阶段脱粘机制与能量演化规律, 对完善纤维混凝土细观力学理论、指导其配合比设计与工程应用具有重要价值。

为此, 本文以端勾钢纤维-水泥砂浆界面体系为研究对象, 设计并开展了变参数拉拔试验, 系统探究纤维倾斜角度 (0° 、 30° 、 45°) 对粘结性能的影响。通过单纤维静态拉拔试验, 获取荷载-位移全过程曲线, 结合最大拉拔应力、极限粘结强度、拉拔能、等效粘结强度及平均粘结强度等多指标评价体系, 定量分析各参数的影响规律, 并从界面脱粘机制、破坏形态、能量吸收等方面阐释其微观力学行为。本研究旨在为端勾钢纤维增强水泥基材料的设计与应用提供试验依据与理论参考, 推动其在高层建筑、地下工程、抗爆结构等领域的优化与推广。

一、实验材料及方法

(一) 实验材料

本研究所用原材料为深圳市守信水泥投资有限公司生产的普

通硅酸盐水泥 P.O 42.5; 细骨料为符合 GB/T 14684-2022《建设用砂》的标准砂; 水为深圳市自来水。采用上述试验材料制备强度等级为 C40 的水泥砂浆, 砂浆强度的配合比如表 1 所示。制作流程为将砂、水泥和水分别依次倒入搅拌锅中, 并进行搅拌, 搅

拌时间为2 min。

表1 水泥砂浆基体配合比（质量比）

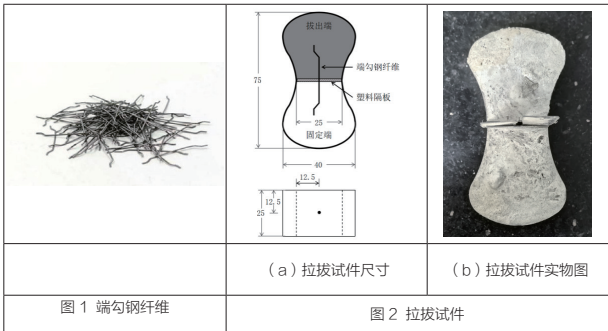
砂浆强度	配合比		
	水 /kg · m ⁻³	水泥 /kg · m ⁻³	砂 /kg · m ⁻³
C40	343	700	1113

所用钢纤维为赣州大业金属纤维有限公司生产的端勾钢纤维，如图1所示；钢纤维具体参数如表2所示。

表2 钢纤维参数

材料	长度 /mm	直径 /mm	密度 / kg · m ⁻³	长径比	抗拉强度 /MPa
端勾钢纤维	35	0.75	7850	47	≥1200

将制作完成的砂浆依次倒入定制的“8”字型金属模具中，并制作成狗骨形试件，具体尺寸如图2所示



（二）实验方法

试件夹具为定制的狗骨试件夹具，如图3（a）所示；试验采用深圳万测试验设备有限公司生产的微机控制电子万能试验机（TSE503B-F）对狗骨形试件进行单纤维拉拔试验，如图3（b）所示。



（三）纤维拉拔粘结性能评价指标

(1) 最大拉拔应力 $\sigma_{f,max}$ 和抗拉强度利用率 R

纤维拉拔试验中最大拉拔应力 $\sigma_{f,max}$ 和抗拉强度利用率 R 是评价钢纤维自身受力性能的参数指标：

$$\sigma_{f,max} = \frac{F_{max}}{A_f} = \frac{4F_{max}}{\pi d_f^2} \quad (1)$$

$$R = \frac{\sigma_{f,max}}{f_t} \times 100\% \quad (2)$$

式中， F_{max} —— 钢纤维最大拔出荷载（N）；

A_f 、 d_f —— 钢纤维横截面积（mm²）、钢纤维等效直径（mm）；

f_t —— 钢纤维抗拉强度（MPa）；

(2) 极限粘结强度 τ_{max}

极限粘结强度 τ_{max} 为拉拔过程中达到的最大荷载对应的平均粘结应力：

$$\tau_{max} = \frac{F_{max}}{\pi d_f (l_f - s)} \quad (3)$$

式中， l_f —— 钢纤维埋置长度（mm）；

s —— 峰值荷载对应位移（mm）；

(3) 拉拔能 W_p

拉拔能 W_p 为钢纤维从基体中完全拔出（或达到最大滑移量）所需的总能量，即力 - 位移曲线的围合面积：

$$W_p = \int_0^{l_f} F(s) ds \quad (4)$$

式中， $F(s)$ —— 钢纤维拉拔力 - 位移曲线；

(4) 等效粘结强度 τ_{eq}

等效粘结强度 τ_{eq} 为钢纤维拉拔过程中所消耗能量的平均粘结强度：

$$\tau_{eq} = \frac{2W_p}{\pi d_f l_f^2} \quad (5)$$

(5) 平均粘结强度 τ_{av}

平均粘结强度 τ_{av} 为从开始加载到纤维被完全拔出（或达到最大滑移量）整个过程中，荷载平均值对应的粘结应力，也指特定滑移量前的平均粘结应力：

$$\tau_{av} = \frac{F_{max}}{\pi d_f l_f} \quad (6)$$

二、实验结果分析

（一）单纤维静态拉拔实验

本节按照第1.2节所述方法，对无倾斜角钢纤维进行静态拉拔实验，力 - 位移曲线如图4所示，试验结果所示。

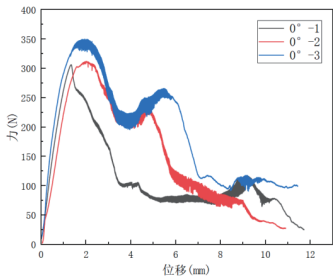


图4 无倾斜角钢纤维静态拉拔力 - 位移曲线图

表3 无倾斜角单根纤维拉拔试验结果

编号	荷载峰值 F_{max}/N	平均荷载峰值 p_{max}/N	峰值位移 s/mm
0° -1	306.4	322.9	1.33
0° -2	312.1		2.01
0° -3	350.2		1.94

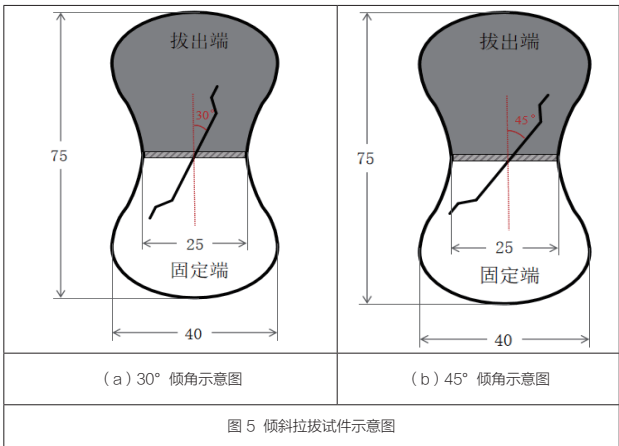
将表 3 所得数据代入第 1.3 节中的公式 (1)、(2)、(3)、(4)、(5)、(6) 计算, 得到无倾斜角端钩钢纤维的粘结性能评价指标, 计算结果如表 4 所示。

表 4 无倾斜角单根纤维粘结性能评价指标

编号	最大拉拔应力 $\sigma_{f,max}/N$	抗拉强度 利用率 R	极限粘结 强度 τ_{max}/MPa	拉拔能 $W_p/N \cdot mm$	等效粘结 强度 τ_{eq} /MPa	平均粘结强 度 τ_{av} / MPa
0° -1	693.55	57.80%	8.86	1138.28	3.77	8.13
0° -2	706.45	58.87%	9.47	1460.02	4.84	8.28
0° -3	792.69	66.06%	10.57	1551.35	5.14	9.29
平均	730.90	60.91%	9.63	1383.22	4.59	8.57

(二) 倾斜单纤维静态拉拔实验

为进一步研究倾斜角度对拉拔粘结强度的影响, 论文设置了两组试验: 纤维分别以 30° 和 45° 的角度倾斜于砂浆水平面, 如图 5 所示。



按照第 1.2 节所述方法, 对无倾斜角钢纤维进行静态拉拔实验, 力-位移曲线如图 6 所示, 试验结果如表 5 所示。

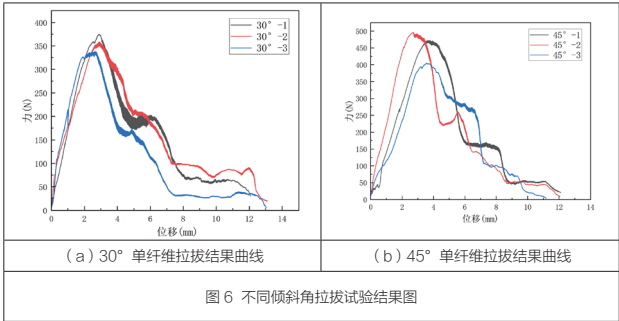


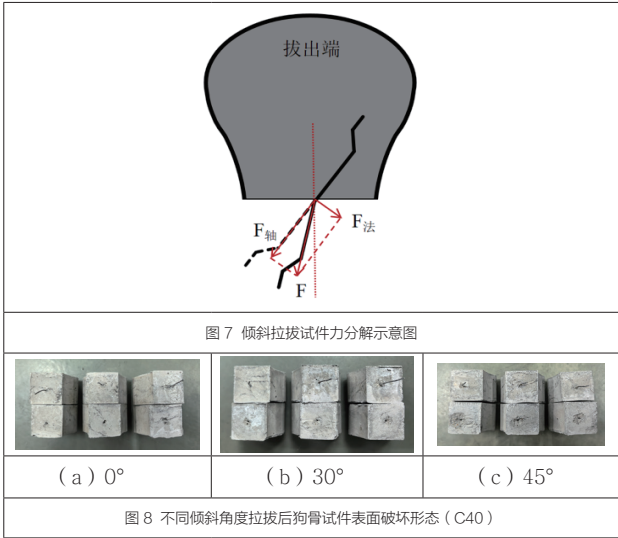
表 5 倾斜单根纤维拉拔试验结果

编号	荷载峰值 F_{max}/N	平均荷载峰值 P_{max}/N	峰值位移 S/mm
30° -1	374.6	356.9	2.90
30° -2	358.2		2.92
30° -3	337.8		2.66

45° -1	471.8	457.6	3.76
45° -2	496.0		2.70
45° -3	405.1		3.58

由表 5 可知, 倾斜拉拔试件的峰值荷载明显高于无倾斜试件, 但拉拔曲线基本失去二次峰值特征, 如图 6 所示。其机理在于: 纤维倾斜后, 外力分解为轴向分力和法向分力^[9], 如图 7 所示。轴向分力产生界面剪切应力, 使纤维有拔出趋势; 法向分力则将纤维压向孔壁, 根据库仑摩擦定律增大摩擦力, 这是峰值荷载提升的主因。同时结合图 8 可得, 在纤维拉拔端出口处, 法向应力还会导致应力集中并破坏周围基体^[10, 11], 倾角越大, 需破坏的基体越多, 峰值荷载进一步升高, 与表 5 中 45° 结果高于 30° 相符。

上述结论对于理解钢纤维水泥基材料的力学行为具有重要意义。在实际的钢纤维水泥基材料中, 纤维呈三维随机分布, 各种角度的纤维同时存在^[12], 倾斜纤维主要贡献初裂强度与峰值抗力, 而直向或小角度纤维则通过界面摩擦、桥联及端钩再锚固等多阶段耗能, 提供开裂后延性与韧性。



将表 5 所得数据代入第 1.3 节中的公式 (1)、(2)、(3)、(4)、(5)、(6) 计算, 得到无倾斜角端钩钢纤维的粘结性能评价指标, 计算结果如表 6 所示。

表 6 不同倾斜角单根纤维粘结性能评价指标

编号	最大拉拔应力 $\sigma_{f,max}/N$	抗拉强度 利用率 R	极限 粘结 强度 τ_{max}/MPa	拉拔 能 $W_p/$ $N \cdot mm$	等效 粘结 强度 τ_{eq}/MPa	平均粘 结强 度 τ_{av}/MPa
30° -1	847.92	70.66%	12.14	1735.35	5.75	9.94
30° -2	810.80	67.57%	11.62	1907.54	6.32	9.50
30° -3	764.62	63.72%	10.75	1445.51	4.79	8.96
平均	807.78	67.32%	11.50	1696.13	5.62	9.47
45° -1	1067.94	88.99%	16.36	2165.91	7.18	12.51

45° -2	1122.71	93.56%	15.83	2206.14	7.31	13.16
45° -3	916.96	76.41%	13.84	2027.83	6.72	10.75
平 均	1035.87	86.32%	15.34	2133.29	7.07	12.14

综合分析表 5 和表 6 的数据可得，纤维倾斜角度对拉拔性能影响显著。与 0° 相比，30° 和 45° 倾角的峰值荷载分别提高 10.53% 和 41.72%，极限粘结强度分别提高 19.42% 和 59.29%，拉拔能分别提高 22.62% 和 54.26%。

三、结论

本文通过端勾钢纤维与水泥砂浆基体的单纤维拉拔试验，分别研究了纤维倾斜角度与基体强度对界面粘结性能的影响，得出以下主要结论：

纤维倾斜角度显著影响界面粘结性能。随着倾斜角度从 0° 增大至 45°，峰值荷载、极限粘结强度与拉拔能分别提升 41.72%、59.29% 和 54.26%，主要归因于法向分力增强的摩擦力及出口处基体压碎耗能；但倾斜角度增大会削弱端钩的二次锚固效应，导致荷载－位移曲线失去双峰值特征，延性有所降低。

参考文献

[1]BARROS J A. Steel fibre reinforced concrete: Material properties and structural applications [M]. Fibrous and composite materials for civil engineering applications. Elsevier, 2011: 95–155.

[2] 赵楠，卿龙邦，杨卓凡，et al. 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): 9.

[3] 沈荣熹，王璋水，崔玉忠. 纤维增强水泥与纤维增强混凝土 [M]. 纤维增强水泥与纤维增强混凝土，2006.

[4]CHEN J, LI F, HU P, et al. The effect of steel fiber on the mechanical properties of high-performance steel fiber reinforced concrete [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2025, 3080(000): 012140.

[5]MARCALIKOVA Z, CAJKA R, BILEK V, et al. Determination of Mechanical Characteristics for Fiber-Reinforced Concrete with Straight and Hooked Fibers [J]. Crystals, 2020, 10(6): 545.

[6]ABDALLAH S, FAN M. Anchorage mechanisms of novel geometrical hooked-end steel fibres [J]. Materials & Structures, 2017.

[7]KHABAZ A. Impact of fiber shape on mechanical behavior of steel fiber in fiber reinforced concrete FRC [J]. 2015.

[8]NAJARI A, BLANCO A, FUENTE A D L, et al. Discrete Element Simulation of the Fresh State Steel Fiber Reinforced Self-compacting Concrete [J]. RILEM Bookseries, 2021: 610–20.

[9]LARANJEIRA F, AGUADO A, MOLINS C. Predicting the pullout response of inclined straight steel fibers [J]. Materials and structures, 2010, 43(6): 875–95.

[10]POVEDA E, YU R C, TARIFA M, et al. Rate effect in inclined fibre pull-out for smooth and hooked-end fibres: a numerical study [J]. International Journal of Fracture, 2020, 223(1): 135–49.

[11]ZHANG H, YU R C. Inclined fiber pullout from a cementitious matrix: a numerical study [J]. Materials, 2016, 9(10): 800.

[12] 鞠杨，刘红彬，陈健，et al. 超高强度活性粉末混凝土的韧性表征方法 [J]. 中国科学：E 辑，2009，(4): 793–808.