

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2023.02.001

纤维与混凝土细观界面粘结行为研究进展

李黎,陶佳诚

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌 712100)

摘要: 混凝土是工程中应用最广泛的建筑材料,但脆性大易开裂,而纤维混凝土(Fibre Reinforced Concrete, FRC)具有高强度、高韧性、高耐久性、抗疲劳性能良好等优点。纤维与混凝土细观界面是 FRC 极为重要的微结构,决定了 FRC 的宏观性能和损伤机理。本文综述了纤维与混凝土细观界面粘结性能的文献,分析了纤维(种类、形状、排列方式、直径、表面改性)、基体(组成、强度)、服役环境(龄期、加载速率、海水、高温)等对细观界面粘结性能的影响,介绍了纤维-基体细观界面粘结行为研究的物理实验和数值模拟方法,展望了 FRC 的纤维-基体细观界面性能领域未来的主要研究方向。

关键词: 纤维混凝土;细观界面;纤维拔出试验;数值模拟

中图分类号: TB332

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)02-0001-07

Research Progress of Meso-interface Bonding Behavior Between Fiber and Concrete

LI Li, TAO Jiacheng

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Concrete is one of the most widely used building materials in engineering, but it is brittle and easy to crack. Fiber Reinforced Concrete (FRC) has the advantages of high strength, high toughness, high durability and good fatigue resistance. The meso-interface between fiber and concrete is a very important microstructure of FRC, which determines the macroscopic properties and damage mechanism of FRC. This paper reviews the literature on the meso-interface bond properties of fiber and concrete, and analyzes the influences of fiber (type, shape, arrangement, diameter, surface modification), matrix (composition, strength), service environment (age, loading rate, seawater, high temperature) on meso-interface bond properties. The physical experiment and numerical simulation methods for the study of fiber-matrix meso-interface bonding behavior are also introduced, finally future research directions in fiber-matrix meso-interface properties of FRC is prospected.

Keywords: fiber reinforced concrete; mesoscopic interface; fiber pull-out test; numerical simulation

混凝土是目前用途最广、用量最大的一种建筑材料,近年来全世界混凝土年产量都在 50 亿吨以上^[1],其具有来源广、生产工艺简单、生产成本低、应用方便等优点。但混凝土因抗拉强度低、脆性大、抗冲击性能差等缺点,限制了其在某些工程领域的应用。在混凝土中掺入纤维可以很好地克服其脆性大、韧性差等问题,有效的改善混凝土的物理性能和力学性能,所以自纤维混凝土(FRC)问世以来一直

受到国内外研究机构和学者的重视。

纤维-基体相互作用的界面区域是 FRC 极为重要的微结构,它是纤维与基体连接的纽带,也是应力及其他信息传递的桥梁^[2],同时也是材料构件首先产生破坏的区域,大部分情况下,FRC 的破坏首先表现为细观界面粘结性失效,由此可见,细观界面性能很大程度上影响着材料的宏观物理力学性能和损伤机理。在工程应用中,越来越多 FRC 的使用使界

面问题成为设计和研究的主要关注点^[3]。纤维和基体之间的细观界面如图 1 所示。为改善 FRC 的细观界面粘结性能,学者们从纤维自身的类型及表面特性、基体的材料组成以及纤维混凝土的服役环境等方面对 FRC 细观界面粘结性能的影响因素、研究方式以及改善方法进行了系统的探讨。本文将从以上几个方面进行文献综述,并对其应用前景及发展进行展望。

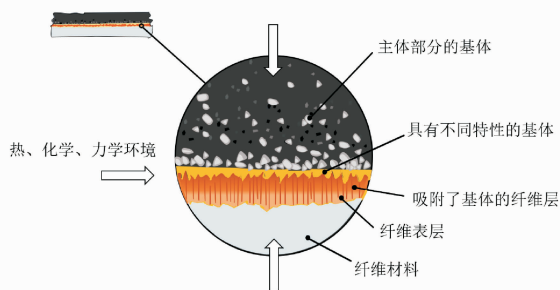


图 1 纤维和基体之间的细观界面简图^[4]

1 纤维的影响

1.1 纤维种类

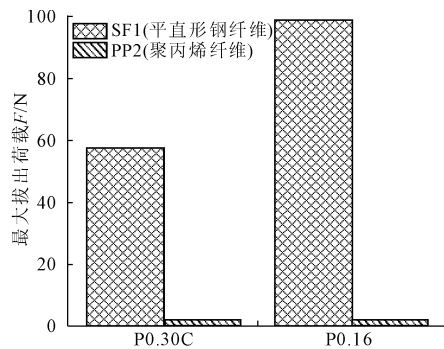
FRC 中纤维种类的不同会使得纤维-基体的界面粘结效果存在较大差异。根据纤维的组成不同可分为:金属纤维,如钢纤维、不锈钢纤维;无机纤维,主要有天然矿物纤维(温石棉、青石棉、铁石棉等)和人造矿物纤维(抗碱玻璃纤维及抗碱矿棉等碳纤维);有机纤维,主要有合成纤维(聚乙烯、聚丙烯、聚乙烯醇、尼龙、芳族聚酰亚胺等)和植物纤维(西沙尔麻、龙舌兰等)。不同种类纤维由于其自身结构和性能的不同,应用于 FRC 中表现出相应的优缺点(见表 1)。

表 1 常见纤维的优缺点

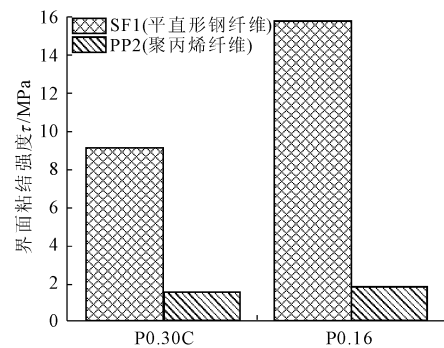
纤维种类	优点	缺点
钢纤维	阻裂、优异的弯出性能	易腐蚀
玻璃纤维	增强抗拉强度及裂后延性	易老化
碳纤维	阻裂、优异的弯曲性能及耐久性	成本高
聚丙烯纤维	化学稳定性好,具有表面疏水性	粘结性差
聚乙烯醇纤维	优异的力学性能及化学稳定性	成本高

然而大量研究表明^[5],当基体组成一致时,由于钢纤维尺寸大、表面粗糙,提高了纤维与基体之间的机械咬合力和摩擦力,因此其与基体之间的界面粘结强度较其他种类纤维更大,纤维种类对界面性能的影响如图 2 所示。此外,扫描电镜(SEM)微观

测试中可以观察到附着在聚乙烯醇纤维(PVA)表面的基体较多,而在聚乙烯纤维(PE)纤维上附着的较少,即在基体成分相同的情况下 PVA 纤维与基体更易产生粘结,而 PE 纤维的粘结较弱,究其原因,是因为 PVA 是亲水性的材料,而 PE 纤维是憎水性的材料,在水化反应过程中 PVA 更易与基体粘结结合,其界面粘结更好。



(a) 纤维种类对最大拔出荷载的影响



(b) 纤维种类对界面粘结强度的影响

图 2 纤维种类对界面性能的影响^[6]

1.2 纤维形状

经过变形处理的纤维材料可以提供额外的变形能并起到机械咬合作用,提高纤维的材料使用率。赵晓聪^[7]通过对钢纤维进行不同的变形处理得到平直钢纤维、钩端钢纤维、加捻钢纤维等。探讨纤维形状对粘结性能的影响,结果表明:在基体相同的情况下,钩端钢纤维的最大拔出荷载和界面粘结强度都远大于平直形钢纤维,其原因在于端钩形钢纤维端部的弯钩大大增强了基体与纤维的机械咬合力,从而增加了纤维端部的锚固能力。杨光耀^[6]的研究也得到了类似的结果,当水泥基体水胶比为 0.30 时,平直形钢纤维与基体的粘结强度仅为 9.1 MPa,而端钩形钢纤维则能使粘结强度提高 69%,达到了 15.5 MPa。当水泥浆体基体水胶比为 0.16 时,端钩形钢纤维与基体的粘结强度达到 27.1 MPa,约为平直型钢纤维粘结强度的 1.72 倍。

通过纤维表面的粗糙处理、加捻、卷曲、增大端钩形状等方式,也可以增强纤维/基体的粘结性能。Naaman^[8]开发的新一代加捻钢纤维,称为“Torex”,可增强纤维-基体界面粘合。此外,将聚丙烯纤维进行机械压痕处理,用两块粗糙的钢板在纤维表面施加不同的压力使之产生不同的压痕,可以通过提高纤维表面粗糙程度显著提高纤维与基体的摩擦力;进而增强纤维与基体之间的粘结^[9]。

1.3 纤维排列方式

纤维在基体中排列方向可以在一定程度上影响到界面的粘结强度,并且对 FRC 的界面粘接性能的影响有正面效应和负面效应两个方向。

通过对于纤维排列方向对混凝土强度和断裂性能影响的研究,发现纤维的排列与受力方向的关系对 FRC 的强度影响不大,但对断裂性能有明显的影^[10]。纤维不同的排列方向如图 3 所示,当纤维排列方向与基体受力方向平行时,纤维主要表现出阻裂增韧作用;当纤维排列方向与基体受力方向垂直时,纤维更多的表现出裂缝诱导作用。Naama^[11]的研究证明,增加纤维沿加载方向的排列会加强纤维拉出载荷和极限载荷。数量多、随机乱向排列且均匀分布的纤维表现出阻裂增韧效果。因此,应当根据 FRC 用途及受力情况适当增加纤维沿加载方向的排列,而当纤维方向难以控制时,应尽量使纤维分散均匀,更好地发挥纤维的正面效应,削弱其负面效应,进而改善纤维与基体之间的界面粘结性能。

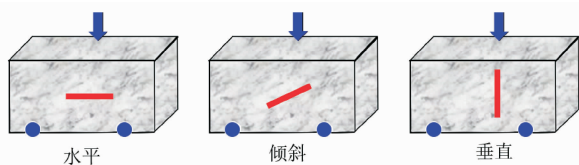


图 3 纤维不同的排列方向示意图^[10]

1.4 纤维直径

纤维直径是 FRC 界面力学性能的重要影响因素之一,然而单从纤维的直径的大小分析其对界面粘结性能的影响较为不妥,实际上,纤维直径产生的影响与基体等 FRC 其它成分的搭配有直接影响,还应以实际情况进行分析。张亚芳等^[12]以纤维直径为变量,分析研究不同纤维直径对单丝拉拔性能的影响,研究结果表明:纤维直径越大,单丝拉拔试件的峰值荷载越大,但拉拔韧度和界面最大粘结强度则越小;纤维直径的变化对单丝拉拔损伤破坏现象影响甚微。从中可以看出较大的纤维直径降低了纤

维基体间的界面粘结,不同纤维直径时单丝拉拔的荷载位移曲线如图 4 所示。

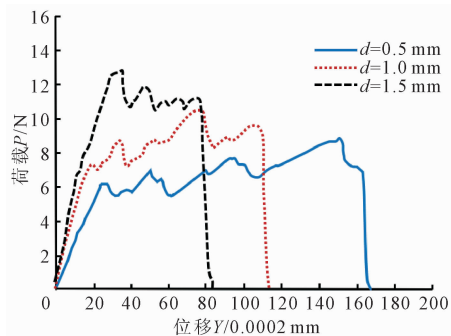


图 4 不同纤维直径时单丝拉拔的荷载位移曲线图^[10]

1.5 纤维的表面改性

大量研究表明,通过机械或化学处理等方法对纤维表面进行改性可以显著的提高纤维-基体的界面粘结强度。如对钢纤维表面进行黄铜涂层^[13]、对碳纤维进行表面氧化^[14]、对聚丙烯纤维进行等离子体处理^[15]、对大麻纤维进行碱处理^[16]、对椰子纤维进行煮沸处理^[17]等。但到目前为止,关于组合增强技术的效果的信息很少,还有待进一步的研究。

对碳纤维进行表面氧化后,通过 SEM 可以观察到碳纤维的表面出现了许多竖向的凹槽(见图 5),这使得碳纤维的表面积增大,从而增大了接触面。同时,表面处理后的碳纤维上产生的大量含氧官能团,有助于 FRC 纤维基体界面处的化学结合,从而提高了整个界面的粘结强度。

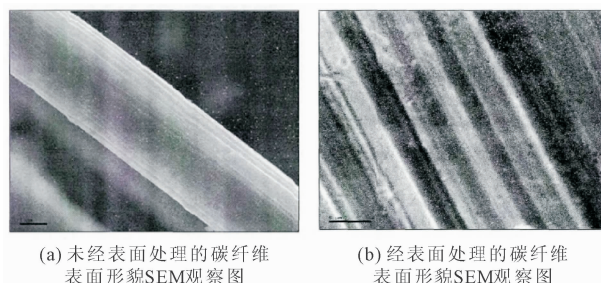


图 5 纤维表面处理前后对比图^[14]

2 基体的影响

2.1 基体的组成

基体的组成会影响 FRC 的纤维基体界面粘结。研究表明,随着水胶比的增加,纤维在基体内的黏结强度逐渐减弱^[18]。这是由于配合比中水胶比的改变使 FRC 的基体的结构和力学性能发生变化,水胶比的增加会使基体的紧密度降低,减小基体的结构

强度,一方面基体本身更容易破坏,另一方面高水胶比导致的较为松散的基体结构使得界面粘结更弱,纤维也更易从基体中拔出。

在基体中加入微纤维可以有效地对基体进行显微增强,Markovich 等^[19]研究了在水泥基体中加入 4%~6% (按体积计) 的微纤维,以控制在纤维拉拔试验期间出现在大纤维周围的微裂纹。基体中微纤维的加入提高了高达 40% 的纤维-基体的粘合,对于具有较低水胶比的基体增强作用更为显著。此外,通过加入适量的纳米材料和水玻璃能够增强 FRC 的粘结水稳定性,进而在一定程度上改善界面的粘结性能。

2.2 基体的强度

通常情况下,纤维-基体间的粘结强度大体上随着基体强度的增加而增强,但只增加基体的强度同样也会提高纤维拉伸失效和基体剥落的可能性。有研究表明^[20]:除非纤维-基体的界面粘合强度大于或等于基体的抗拉强度,否则无法得到具有优异力学性能的 FRC。即界面粘结性能的强弱取决于纤维和基体的相互作用,所以基体强度并非越大越好,而纤维和基体强度的相对大小关系决定了界面性能的好坏,即基体强度的增加不可以达到使纤维先拉伸失效的程度^[11]。

3 服役环境的影响

3.1 服役龄期

有研究指出,FRC 在经过 2 d 养护后达到最大程度的纤维-基体界面粘合。超过两天的标准水蒸汽养护仅仅增强了基体的强度,并未提高纤维与基体的界面粘合^[21]。然而,Maryam M 等^[22]的研究指出随着水泥基体固化龄期的增加,所有纤维类型的纤维基体界面拉拔性能均有所改善。界面粘结性能的改善,是因为随着固化龄期的增加,其水化过程促进了 ITZ 微观结构的发展,早期的快速水化速率使微观结构更快的得到改善,进而形成更为致密的 ITZ,纤维基体粘结性能的提高的也更迅速。可见现有对于固化龄期对 FRC 的界面粘结性能影响研究还未得到统一的结论。

3.2 加载速率

袁明等^[23]采用单丝拉拔实验方法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,结果表明: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,纤维与基体之间的界面黏结强度提高。Boshoff 等^[24]对利用不同速率下的拉拔试验的纤维-基体界面粘合进行了比较研究,发现纤维-基体的界面粘合强度取决于加载速率,并且随着加载速率的加快而增加。然而,需要注意的是在高负载率下,纤维拉伸失效的可能性也很高。

3.3 海盐环境

Singh 等^[9]研究了海水和盐环境对纤维-基体界面粘合的影响,研究发现,在盐水和海水中保存 6 个月的混凝土比在清水中保存的混凝土具有更好的纤维-基体粘合效果,这是由于存在于海水中的大量的盐,对 FRC 起到了促凝剂的作用,加快了水泥的水化产物的形成,提高了水化产物的生成量,进而改善了 FRC 界面的微观结构。

3.4 高温环境

高温会导致水泥基体的热收缩,水泥基体的热收缩会增大 FRC 中纤维表面的法向应力,从而增强嵌在水泥基体中直纤维的粘结性能^[25]。但进一步提高温度,会对水泥基材料和纤维造成不可逆的高温损伤,因而导致界面粘结性能退化。

4 界面性能的研究方法

4.1 实验研究

物理试验是国内外学者对界面力学性能研究的主要手段之一^[26-29],目前比较通用的试验测量方法有纤维的拉拔、压头顶出、单根纤维碎断以及微黏结试验等^[18,30](见图 6)。相比于其他试验方法,纤维拉拔试验方法简单、操作易行且经济,是目前研究 FRC 界面力学性能最常见的一种测试方法。

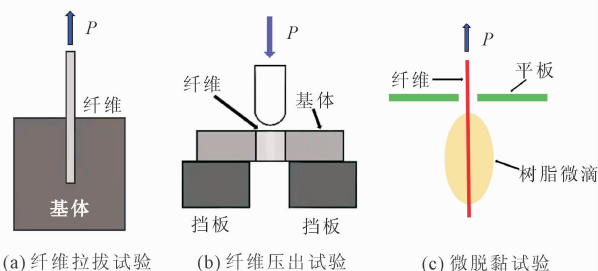


图 6 几种测试界面力学性能的试验方法^[5]

学者们已经建立了直接和间接的试验方法来量化 FRC 的纤维-基体粘结作用。在直接方法中,纤维-基体的粘结作用是通过测量单轴拉伸拉拔载荷和纤维从水泥基体中拉出过程中相应的滑移来评估

的,典型的纤维拉拔-滑移关系(见图 7)。在间接方法中,纤维-基体的粘合强度是根据 FRC 的力学性能(主要是弯曲强度)来评估的。

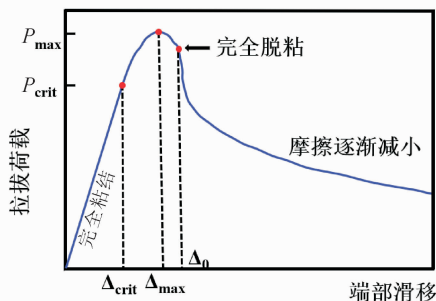


图 7 典型的纤维拉拔-滑移关系^[20]

4.2 数值模拟研究

通过试验测定复合材料界面的力学特性,由于其在试验和分析过程中有较高的时间和经济成本,再加上试验中试件的力学性能会受到试样的尺寸、质量、养护条件、加载设备的量程与精度等多种因素的影响,试验结果往往并不精确,并且由于界面层尺度较小,以目前试验手段难以有效直观测定和观察纤维拔出过程中界面层的各力学参数及材料内部裂纹演化。借助计算机工具模拟考虑界面影响的 FRC 的整个破裂过程,来研究界面微观性能对材料宏观性能的影响具有重要的意义^[31],不少学者通过通用有限元软件对单丝拉拔过程进行数值模拟计算,并获得了一些有意义的结果^[31-33]。

研究人员提出了模拟纤维-基体相互作用的理论模型。通常要遵循以下程序:

- (1) 假设弹性纤维-基体粘合,直到第一个裂纹出现。
- (2) 假设一个非常简单的开裂后模型。
- (3) 使用半经验方法估计沿纤维基体的应力分布。

最为简单的数值模型即单丝拉拔过程的模拟,曾向荣等^[31]通过建立混凝土单丝拉拔数值模拟模型(见图 8),研究了界面均质度变化对单丝拉拔构件力学性能的影响,获得了拉拔构件荷载-位移曲线、声发射累计曲线及界面剪应力分布曲线等。

目前,大多数可用的模型都假定纤维-基体界面粘合是均匀不变的,Beaumont 和 Aleszka^[34]的研究假设沿纤维-基体界面的应力分布是可变的,这显然更接近真实的纤维基体相互作用模式。为了解决同样的问题,Naaman 等^[21]提出了一种具有摩擦

剪切作用的均匀弹性剪切。然而,由于收缩和泊松效应以及重复加载的影响,很少有模型包含径向变形。似乎还没有理论模型考虑预裂阶段沿纤维的非线性应力分布。

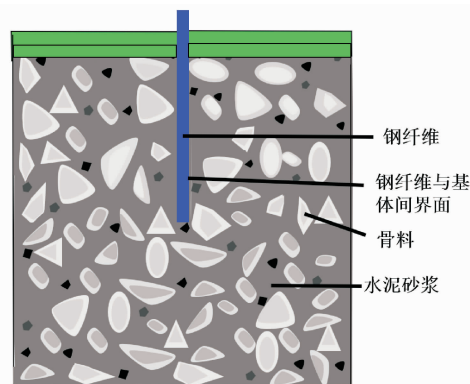


图 8 单丝拉拔数值模拟示意图^[31]

除了传统的有限元模型外,Bolander 等^[35]还开发了一种晶格模型,其中纤维由跨越基体细胞边界的弹簧元件建模。弹簧硬度降低,以间接解释界面脱粘。Kang Jingu 等^[36]进一步发展了一种改进的晶格模型,通过沿穿过裂纹的所有纤维的嵌入长度均匀分布拔出力,这是不现实的。基于单元划分^[37]和浸入式边界法^[38]的有限元模型也适用于多纤维 FRC,因此纤维网格不需要符合矩阵网格。尽管这些模型计算效率高,或易于生成和实现,但它们无法直接模拟微观/中观尺度的失效机制,如倾斜纤维的离散界面剥离,纤维弯曲,屈服和缓冲效应等。

对于具有复杂界面的混凝土进行三维分析是纤维混凝土界面研究的趋势,近期 Chen Tao 等^[39]使用基于渐近均匀化的三维(3D)数值模型,开发了一种新的网格划分方法,以离散具有任意厚度界面过渡区(ITZ)的混凝土中尺度模型,以较低的计算成本提供了精确的 ITZ 评估,提出一种利用 ABAQUS 实现渐近均匀化的实用方法。研究表明三维和二维数值模拟的结果有显著差异,三维数值模型提供了更准确和可靠的混凝土界面性能的预测。

5 结语和展望

混凝土材料正向着具有更高应用价值的新型 FRC 发展,而新型 FRC 具有更为复杂的材料组成、结构特性和内在作用机理,补充和完善 FRC 细观界面性能的研究工作是建立新型 FRC 显微结构与界面粘结性能关联性的重要步骤。本文总体上分别从纤维、基体和服役环境的角度入手,分析了影响

FRC 细观界面粘结性能的主要因素,阐明了各个影响因素对 FRC 界面粘结性能的影响机理,也系统阐述了增强纤维-基体粘结作用的方法和进展,并总结了 FRC 细观界面粘结性能方面存在的不足和问题:

(1) 对于研究纤维界面间的相互作用的试验方法,尽管为开发理想的拉拔测试方法付出了巨大的努力,但所使用的测试装置仍很难满足在实际 FRC 结构中完美物理模拟纤维-基体相互作用的技术要求。目前,所使用的拉拔测试方法仍表现出高度可变性(20%~55%的变异系数),尚需进一步改进。

(2) 纤维-基体的界面粘结强度对 FRC 整体性能的影响关系仍需进一步研究。从理论上讲,结合纤维的方向,间距和长宽比等数据可以建立纤维-基体的相互作用的模型,然而,想要精确地模拟纤维-基体相互作用,必须建立一个包含大多数可能的控制参数的理论模型。这些参数应包括由于收缩和泊松效应而引起的径向变形,重复载荷效应以及预开裂阶段沿纤维的非线性应力分布等。此外,现阶段研究人员应着力将数值建模方法扩展到 3D 和动态问题上,以得到更好的模拟效果。

(3) 文献中关于不同环境条件下纤维-基体粘结耐久性的信息很少。未来的研究应关注环境对纤维-混凝土界面粘结长期性能的影响,重点是不同服役环境下的微观结构研究。

参考文献:

- [1] Khushpreet S. Experimental study on metakolin and baggashe ash based geopolymer concrete[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021,37:3289-3295.
- [2] 涂小青. 界面力学性质对纤维增强混凝土拉拔力学性能影响的数值模拟初探[D]. 广州:广州大学,2012.
- [3] Fatiha Teklal, Arezki Djebbar, Samir Allaoui, et al. A review of analytical models to describe pull-out behavior - Fiber/matrix adhesion [J]. *Composite Structures*, 2018,201:791-815.
- [4] Mtealfe A G. *Interfaces in Metal Matrix Composites*[M]. New York:Academic Press, 1974.
- [5] Kim J J, Yoo D Y. Effects of fiber shape and distance on the pullout behavior of steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2019,103:213-223.
- [6] 杨光耀. 超高性能混凝土中纤维的界面效应及其与水泥基材的匹配性研究[D]. 广州:华南理工大学,2020.
- [7] 赵晓聪. 磷酸镁水泥砂浆与纤维粘结及其水稳定性试验研究[D]. 郑州:郑州大学,2019.
- [8] Naaman A E. Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2003,1(3):241-252.
- [9] Singh S, Shukla A, Brown R. Pullout behavior of polypropylene fibers from cementitious matrix [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004,34(10):1919-1925.
- [10] Tai Yuhshiou S, El-Tawil S, Chung Tahsiang. 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.
- [11] Naaman A E. A statistical theory of strength for fiber reinforced concrete[D]. Massachusetts Institute of Technology, 1972.
- [12] 张亚芳,陈沛然,刘浩,等. 纤维直径对聚丙烯纤维混凝土单丝拉拔性能的影响[J]. *武汉理工大学学报*,2014,36(7):80-85.
- [13] Pi Zhenyu, Xiao Huigang, Liu Rui, et al. Effects of brass coating and nano-SiO₂ coating on steel fiber-matrix interfacial properties of cement-based composite [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020,189:107904.
- [14] 赵燕茹,邢永明,雷振坤,等. 力、热载荷作用下纤维在复合材料中的界面应力传递行为[J]. *复合材料学报*,2008(4):187-192.
- [15] Tang Huaping, Shi Wuping, Ding Yudong, et al. Experimental investigation and molecular dynamics simulations of plasma treatment on the interface strength of overmolded hybrid fiber reinforced polypropylene composites [J]. *Polymer Composites*, 2022,43(3):1799-1808.
- [16] Soni Priyanka, Sinha Shishir. Synergistic effect of alkali and silane treatment on mechanical, flammability, and thermal degradation of hemp fiber/epoxy composite [J]. *Polymer Composites*, 2022,43(9):6204-6215.
- [17] Istiroyah, Ragil S M B, Ghufuron M. Effect of sonification in the alkalization process of coconut fiber to improve fiber strength [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021,743(1):012041.
- [18] 杨庆生. *复合材料细观结构力学与设计* [M]. 北京:中国铁道出版社,2000.
- [19] Markovich I, van Mier J G M, Walraven J C. Single fiber pullout from hybrid fiber reinforced concrete [J]. *Heron*, 2001,46(3):191-200.
- [20] Grünwald S. *Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete* [M]. Delft, The Netherlands: Delft University Press, 2004.
- [21] Naaman A E, Najm H. Bond-slip mechanisms of steel fibers in concrete [J]. *Materials Journal*, 1991,88(2):135-145.

- [22] Maryam M, Rishi G. Effect of curing age on pull-out response of carbon, steel, and synthetic fiber embedded in cementitious mortar matrix[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2022, 34(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004426](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004426).
- [23] 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.
- [24] Boshoff W, Mechtcherine V, van Zijl G. Characterising the time-dependant behaviour on the single fiber level of SHCC-Part 2: the rate effects on fiber pull-out tests[J]. *Cement Concrete Research*, 2009, 39(9):787-797.
- [25] Zhang Yao, Woody Ju J, Chen Qing, et al. Characterizing and analyzing the residual interfacial behavior of steel fibers embedded into cement-based matrices after exposure to high temperatures[J]. *Composites Part B, Engineering*, 2020, 191:107933.
- [26] 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.
- [27] Laranjeira F, Molins C, Aguado A. Predicting the pullout response of inclined straight steel fibers[J]. *Materials and Structures*, 2010, 43(6):875 - 895.
- [28] Robins P, Austin S, Jones P. Pull-out behavior of hooked steel fibers[J]. *Materials and Structures*, 2002, 35(7):434 - 442
- [29] 赵燕茹. 钢纤维混凝土界面应力传递及脱粘过程的细观力学研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2008.
- [30] 洗杏娟. 纤维增强复合材料界面的力学行为[J]. *力学进展*, 1992, 22(4):464-478.
- [31] 曾向荣,张亚芳,刘 浩,等. 界面均质度对混凝土单丝拉拔性能影响的数值模拟研究[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2015, 54(5):56-61.
- [32] 周明杰,袁 敬,王晓伟,等. 钢纤维与混凝土的界面粘结有限元分析[C]//第十二届全国纤维混凝土学术会议论文集, 2008.
- [33] Georgiadi S K, Mistakidis E, Pantousa D, et al. Numerical modeling of the pull-out of hooked steel fibres from high-strength cementitious matrix, supplemented by experimental results[J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(12):2489-2506.
- [34] Beaumont P, Aleszka J. Cracking and toughening of concrete and polymer-concrete dispersed with short steel wires[J]. *Journal of Materials Science*, 1978, 13(8):1749-1760.
- [35] Bolander J E, Saito S. Fracture analyses using spring networks with random geometry[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1998, 61(5):569-591.
- [36] Kang Jingu, Kim Kunhwi, Lim Yun Mook, et al. Modeling of fiber-reinforced cement composites: Discrete representation of fiber pullout[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2014, 51(10):1970-1979.
- [37] Pros A, Diez P, Molins C. Modeling steel fiber reinforced concrete: numerical immersed boundary approach and a phenomenological mesomodel for concrete fiber interaction[J]. *International Journal for Numerical Methods Engineering*, 2012, 90(1):65-86.
- [38] Tea Rukavina, Adnan Ibrahimbegovic, Ivica Kozar. Fiber-reinforced brittle material fracture models capable of capturing a complete set of failure modes including fiber pull-out[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2019, 355:157-192.
- [39] Chen Tao, Xiao Shiyun. Three-dimensional numerical prediction of elastic modulus of concrete as a three-phase composite with asymptotic homogenization[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 348:128640.