

DOI:10.13475/j.fzxb.20200303507

# 纤维对水泥基复合材料性能影响研究进展

陆振乾<sup>1</sup>, 杨雅茹<sup>2</sup>, 荀 勇<sup>3</sup>

(1. 盐城工学院 纺织服装学院, 江苏 盐城 224051; 2. 嘉兴学院 材料与纺织工程学院,  
浙江 嘉兴 314001; 3. 盐城工学院 土木工程学院, 江苏 盐城 224051)

**摘 要** 为拓宽纤维材料在水泥基复合材料上的应用,促进超高韧性纤维增强水泥基复合材料的发展,对目前国内外纤维性能对水泥基复合材料性能影响的研究进展进行综述。首先,介绍了纤维增强混凝土的种类及增强增韧机制,认为纤维桥接作用可阻止裂纹产生和扩展,显著提高混凝土的拉伸强度和延展性能。其次,分析了混凝土领域常用有机纤维和无机纤维的性能特征;然后对影响纤维增强混凝土性能的因素进行归纳与总结,从混杂纤维、纤维形态、体积分数、纤维排列方向以及纤维粘结性能对复合材料性能的影响关系进行分析。最后,指出纤维增强混凝土研究中亟待解决的问题,并展望了未来纤维增强混凝土的发展趋势。

**关键词** 纤维增强混凝土;水泥基复合材料;超高韧性;力学性能;增强增韧机制

**中图分类号**:TB 332 **文献标志码**:A

## Research review of fiber effect on properties of cement-based composite

LU Zhenqian<sup>1</sup>, YANG Yaru<sup>2</sup>, XUN Yong<sup>3</sup>

(1. College of Textiles and Clothing, Yancheng Institute of Technology, Yancheng, Jiangsu 224051, China;  
2. College of Material and Textile Engineering, Jiaxing University, Jiaxing, Zhejiang 314001, China;  
3. College of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng, Jiangsu 224051, China)

**Abstract** In order to broaden the application of fiber materials in cement-based composites and to promote the development of ultra high toughness cement-based composite, the research progress on the effect of fiber properties on cement-based composite properties in China and abroad was reviewed. Firstly, the types of fiber reinforced concrete and the mechanism of strengthening and toughening were introduced. It is noted that fiber bridging can prevent the crack generation and expansion, and significantly improve the tensile strength and ductility of concrete. Secondly, the performance characteristics of organic fiber and inorganic fiber used in concrete field were analyzed. Then, the factors affecting the performance of fiber-reinforced concrete were summarized, and the influences of hybrid fibers, fiber morphology, volume fraction, fiber arrangement direction and fiber bonding property on the performance of composite materials were analyzed and summarized. Finally, the problems needing to be solved in the research of fiber reinforced concrete were highlighted and the development trend of fiber reinforced concrete in the future was forecasted.

**Keywords** fiber reinforced concrete; cement-based composite; ultra high toughness; mechanical property; strengthening and toughening mechanism

混凝土材料具有良好的力学性能和低廉的价格,是世界上应用最为广泛的一种建筑材料,但混凝土

是脆性材料,其拉伸性能差,伸长率极低,使用过程中在各种应力及外界环境的作用下会产生裂纹,

收稿日期:2020-03-13 修回日期:2021-01-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51478408)

第一作者:陆振乾(1980—),男,副教授,博士。主要研究方向为纺织复合材料。

通信作者:荀勇(1964—),男,教授,博士。主要研究方向为织物增强混凝土复合材料。E-mail:yongxun@ycit.cn。

且裂纹不断扩展,造成钢筋锈蚀,严重影响其强度和耐久性,因此,纤维增强混凝土材料(FRC)应运而生。

纤维增强混凝土材料是以非连续短纤维或连续长纤维为增强材料,以水泥净浆、砂浆或混凝土为基体制成的水泥基复合材料<sup>[1-2]</sup>。加入纤维材料后可大大提高混凝土材料的抗拉强度、延展性,具有以下优点:纤维材料可阻止混凝土基体裂纹的扩展,并延缓新裂纹的出现,提高混凝土的抗裂性能 and 耐久性<sup>[3]</sup>;改善混凝土材料的脆性,起到增强增韧的作用;提高混凝土基体的能量吸收能力。

近年来,纤维增强混凝土及其新型水泥基复合材料的发展迅猛,在大型水利工程、土木建筑、道路隧道、桥梁、高架桥、地铁等基础设施工程中得到了广泛运用。本文首先介绍了纤维增强混凝土材料的种类,并从纤维的特性出发,分析了用于增强增韧混凝土材料的纤维种类及其性能,综述了纤维形态、体积分数和纤维排列方向等对混凝土性能的影响,以期研究开发高性能纤维增强混凝土材料提供参考。

## 1 纤维增强混凝土的分类及增强机制

纤维增强混凝土材料根据性能特点可分为普通和高性能 FRC 两大类。根据其拉伸和弯曲力学性能特征,又可分为应变软化、应变硬化以及挠度软化、挠度硬化材料<sup>[4]</sup>。其中,普通 FRC 可提高混凝土的抗拉强度和韧性,但一般会出现应变软化现象,是以较宽的裂纹来获得高韧性,因此,各种类型的高性能纤维增强水泥基复合材料(HPFRCC)应运而生<sup>[5]</sup>,成为混凝土材料领域的国际前沿课题。该复合材料所用材料不尽相同,在名称上有所差异,美国、欧洲和日本分别称为工程水泥基复合材料(ECC)<sup>[6]</sup>、应变硬化水泥基复合材料(SHCC)<sup>[7]</sup>、高延性水泥基复合材料(DFRCC)<sup>[8]</sup>,我国将其称为超高韧性水泥基复合材料(UHTCC)<sup>[9]</sup>。

ECC 具有高延性、高韧性和应变硬化特征。在单轴拉伸下具有极好的拉伸应变能力,应变量达到 3%~6%。纯混凝土的拉伸应变仅为 0.01%,ECC 的拉伸应变是纯混凝土的 300~600 倍。在进行拉伸时,当初始裂纹出现后,ECC 材料开始进入塑性变形阶段,表现出明显的应变硬化特性;在开裂方式上,ECC 表现出多缝开裂,随着应变的增大,不断有新的微裂纹产生和发展,但裂缝的宽度始终保持在 100  $\mu\text{m}$  以下<sup>[10]</sup>。

对于 FRC 的增强增韧机制,主要有 2 种解释:纤维间距理论<sup>[11]</sup>和复合材料机制<sup>[12]</sup>。纤维间距理论认为纤维的增强效果与纤维间距有关:当微裂纹被包围在纤维间距之间,纤维界面将产生与裂纹尖端扩展应力反向的应力场,从而降低裂纹尖端的应力集中程度,限制裂纹发展,达到增强效果。复合材料机制是根据混合原理,以纤维为增强体一维单向配制于混凝土基体中,当裂缝发展到纤维附近时,纤维起到阻裂、增强作用;当应力继续增大时,裂缝继续发展,宽度持续增大,纤维逐渐拔出或者拉断,纤维增强混凝土被破坏。这 2 种机制为纤维增强混凝土的进一步研究奠定了理论基础。

## 2 纤维的种类及性能

用于增强混凝土的纤维材料类型较多,按照来源和习惯分为天然纤维和化学纤维,其中化学纤维又分为再生纤维和合成纤维。按照组成为有机和无机纤维两大类。目前常用的增强混凝土的纤维种类及性能总结如表 1 所示。

表 1 常用于增强混凝土的纤维的性能

Tab. 1 Properties of fibers used to reinforced concrete

纤维名称	拉伸强度/ MPa	拉伸模量/ GPa	断裂伸长 率/%	密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
聚乙烯醇	900~1 900	25~42	6~10	1.30
聚丙烯	240~690	3~5	25~50	0.91
对位芳纶	3 000	60~130	2.1~4.0	1.40
超高分子量聚乙烯纤维	2 000~3 500	50~125	3~6	0.97
剑麻	600~700	20~38	2~3	1.33
抗碱玻璃纤维	2 500	70	3.6	2.78
碳纤维	3 500~6 000	230~600	1.5~2.0	1.60~1.95
玄武岩纤维	3 000~4 840	79~93	3.1	2.70
陶瓷纤维	800~3 600	360~480	0.8	2.40~2.60
钢纤维	500~2 000	200	3~4	7.84

### 2.1 有机纤维

#### 2.1.1 聚乙烯醇纤维

聚乙烯醇(PVA)纤维具有较好的力学性能和优良的耐碱性能,在水中易分散,与水泥的亲性好,粘结强度高,成为混凝土领域应用最为广泛的纤维之一<sup>[13]</sup>。目前,以日本可乐丽公司生产的 PVA 纤维性能最为优异,该公司在原来的 PVA 纤维的基础上,推出了高强韧性 KURALON™ K-II 新型 PVA 纤维,其强度可达 15 cN/dtex,断裂伸长率为 6%。采用 PVA 纤维增韧 ECC 时,当掺杂纤维体积分数为 2%时,可使混凝土的极限拉伸应变显著提高,高达 6%,且出现应变硬化<sup>[14]</sup>。高强高弹 PVA 纤维成为高延性混凝土材料的首选材料。

### 2.1.2 聚丙烯纤维

聚丙烯(PP)纤维具有质轻价廉的优点,其耐化学性能好,可承受大部分酸碱腐蚀。缺点是PP为疏水性纤维,其与混凝土材料的粘结性能差,通常可通过化学改性和表面粗糙化处理来提高其粘结性能<sup>[15]</sup>。Yang等<sup>[16]</sup>采用微观力学来设计PP-ECC,其在拉伸强度为2.0~2.5 MPa时,应变可达到4%。与PVA-ECC相比,PP-ECC的拉伸强度略低。在混凝土中掺入PP纤维可改善高强混凝土的耐高温性能,这是因为PP在高温下融化形成孔隙,可有效减少高强混凝土在高温时爆裂<sup>[17]</sup>。近年来开始出现聚丙烯粗纤维的研究,如日本Hagihara公司生产的Barchip系列纤维和宁波大成新材料有限公司的DC系列增韧纤维。该纤维直径大,具有波浪形扭曲结构,可明显改善混凝土的韧性,提高混凝土材料的抗冲击性。

### 2.1.3 聚乙烯纤维

聚乙烯(PE)纤维分为普通聚乙烯纤维和超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维。PE纤维具有稳定性好、耐低温和耐紫外光等优点,对大多数的化学品具有较好的抵抗性能,其缺点为与水泥基体的粘结性能差。YU等<sup>[18]</sup>采用PE制备高延性的PE-ECC,可使复合材料的拉伸强度达到20 MPa,应变达到8.7%。但PE纤维对混凝土的裂纹宽度控制上不如PVA纤维。以冻胶纺丝-超拉伸技术制备的UHMWPE纤维具有极高的比强度和比模量,加入UHMWPE纤维可显著地提高水泥基复合材料的抗冲击性能,但价格较高<sup>[19]</sup>。

### 2.1.4 芳香族聚酰胺纤维

芳香族聚酰胺(aramid)纤维又称为芳纶纤维,分为对位芳纶(PPTA)和间位芳纶(MPIA)。其中,PPTA具有拉伸强度高和抗冲击性能优异的特点,如杜邦公司生产的Kevlar纤维被广泛应用于防护领域。对位芳纶的耐化学性能优异,但在日光下会老化,使其强度降低。Curosu等<sup>[20]</sup>研究发现,芳纶与水泥的粘结性能优于PE纤维,使混凝土具有更高的拉伸性能。

### 2.1.5 纤维素纤维

纤维素纤维是采用植物韧皮或种子为原料加工而成的纤维,其种类较多,根据来源不同其性能差异较大,主要有剑麻、苧麻、黄麻、椰壳纤维等。这些纤维具有来源广、价廉、可再生、可降解等特点。Silva等<sup>[21]</sup>采用剑麻短纤维来增强混凝土,在短纤维体积分数为10%时,混凝土的拉伸强度达到了10.56 MPa,应变为1.15%。与化学纤维相比,天然纤维的强度较低,吸水率高,因此,在使用中应注意

其吸水性能和天然降解造成的耐久性问题。

## 2.2 无机纤维

### 2.2.1 玻璃纤维

玻璃纤维的主要成分为 $\text{SiO}_2$ 和其他金属氧化物,具有高强度、高模量和低延伸率的特点。普通玻璃纤维的耐碱性差,不适用于水泥基体的高碱环境,因此,研究人员开发了一种抗碱(AR)玻璃纤维,即在其组分中加入约15%的 $\text{ZrO}_2$ ,可显著提高玻璃纤维的抗碱能力<sup>[22]</sup>。Barluenga等<sup>[23]</sup>采用低体积分数( $<0.26\%$ )的AR玻璃纤维增强混凝土发现,AR玻璃纤维可减少混凝土早期的收缩和裂缝产生。而采用高体积分数的玻璃纤维可提高混凝土的拉伸强度和延性。

### 2.2.2 碳纤维

碳纤维是一种碳元素占总质量90%以上的无机纤维,具有很高的比强度和比模量,化学性质稳定,对一般的有机溶剂、酸、碱都具有良好的耐腐蚀性。Wang等<sup>[24]</sup>采用体积分数为1%~3%的碳纤维增强混凝土发现,混凝土的拉伸强度随着碳纤维体积分数的增加而增大。但碳纤维的拉伸应变较小,对复合材料的延性增加不大。近年来,新型纳米碳材料如碳纳米管、石墨烯也开始应用于水泥基复合材料,碳材料具有良好的导电性能和吸波特性,可作为传感原件和电磁屏蔽材料<sup>[25]</sup>,将其加入水泥中可开发出具有自诊断和监控功能的多功能水泥基复合材料。

### 2.2.3 玄武岩纤维

玄武岩纤维由天然的玄武岩石料熔融拉丝制成,是一种环保绿色材料,具有优异的耐高温和耐腐蚀性能,其硬度高,抗磨损性能好,强度高于玻璃纤维。Kabay<sup>[26]</sup>研究发现,采用低体积分数的玄武岩纤维增强混凝土可提高混凝土的弯曲强度、断裂性能和抗磨损性能;但可使混凝土压缩性能降低明显,在1%的掺杂量下,压缩性能降低26.4%。

### 2.2.4 陶瓷纤维

陶瓷纤维包括氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、硅酸铝( $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ )、碳化硅( $\text{SiC}$ )、碳化硼( $\text{B}_4\text{C}$ )纤维等,具有优异的耐高温性能,可在900℃高温下使用。纤维的组分不同,其力学性能也有一定差异。Bernal等<sup>[27]</sup>研究表明,采用陶瓷纤维可显著提高复合材料的高温性能,可减缓复合材料在高温中的形变。但陶瓷纤维为脆性纤维,不耐折不耐磨,且价格较高。

### 2.2.5 钢纤维

钢纤维为采用切断细钢丝法、冷轧带钢剪切、钢锭铣削或钢水快速冷凝法制成长径比为30~100的



金属纤维。与普通纤维相比,钢纤维的直径较粗,抗碱性能好,纤维价格低。根据制备方法不同,其性能差异较大。Bernal 等<sup>[28]</sup>采用 1.5% 的钢纤维来增强碱矿渣混凝土,使其拉伸强度和弯曲强度分别增加了 24% 和 38%,而压缩强度随着纤维含量增加而降低。钢纤维可提高混凝土的抗拉强度并出现多缝开裂行为,同时采用异型截面的钢纤维可提高其与混凝土的粘结性能。

### 3 纤维性能对混凝土复合材料的影响

纤维增强混凝土的性能包括基本力学性能(拉伸、压缩、弯曲、剪切、冲击等)和耐久性(抗渗透、抗疲劳、抗冻融循环、耐腐蚀等),纤维的类型、形态、掺杂含量、排列方向和表面性能等因素均会影响混凝土的性能。

#### 3.1 纤维类型的影响

不同纤维的性能差异较大,对混凝土的作用有所不同。如高强高模纤维可显著提高混凝土的拉伸强度,但对延性增加不大;低模量的柔性纤维可增加 FRC 延性,阻止裂纹的扩展。加入单一纤维可在某一方面有限地提高混凝土的性能,因此,为获得高性能水泥基复合材料,可采用混杂纤维。

混杂纤维增强混凝土是将 2 种或 2 种以上纤维复合掺入混凝土中,既能发挥各自纤维优点,又能体现纤维之间协同效应的新型复合材料<sup>[29]</sup>。不同尺度的杂化纤维增强混凝土在拉伸下的破坏形式如图 1 所示。在混凝土中加入不同粗细的 2 种纤维,在拉伸加载的第 1 阶段,较细的纤维通过桥接作用对混凝土微裂纹的产生和扩展起到抑制作用。拉伸加载的第 2 阶段,长的粗纤维对宏观裂纹起到桥接作用,抑制宏观裂纹的扩展。这种协同作用既提高了复合材料的强度,又增加了复合材料的断裂韧性<sup>[30]</sup>。

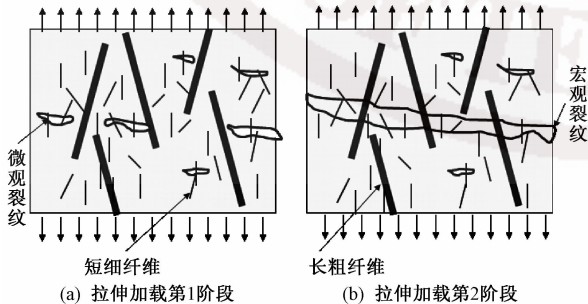


图 1 不同尺度的杂化纤维增强混凝土在拉伸下破坏形式  
Fig. 1 Tensile failure of hybrid fiber reinforced concrete with different size under tension. (a) First stage of tensile loading; (b) Second stage of tensile loading

纤维的混杂方式可按纤维的本构关系、尺寸及功能进行混杂,可分为以下 3 种:相同种类不同尺度和几何特征的纤维混合;尺度相近的不同种类纤维混合;不同尺度与不同种类的纤维混合。按纤维种类可分为:钢-钢纤维混杂、钢-化学纤维混杂、化学-化学纤维混杂、化学-天然纤维混杂混凝土。Park 等<sup>[31]</sup>采用 4 种粗的钢纤维(直径为 0.3~0.77 mm)和 1 种直径小的钢纤维进行混杂增强混凝土,结果表明:粗纤维的性能决定着复合材料拉伸曲线的形状,细纤维影响应变硬化和多缝开裂性能。Libre 等<sup>[32]</sup>对钢纤维与 PP 纤维混杂增强轻型混凝土复合材料的研究发现,复合材料的压缩和弯曲性能改善明显,0.2% 和 0.4% 的 PP 纤维对以上性能影响不大,但 PP 纤维增加了混凝土的韧性和能量吸收性能。Yun 等<sup>[33]</sup>研究了 PVA、UHMWPE 混杂纤维增强 SHCC 的力学和抗冻耐久性能,结果表明 PVA 纤维含量增加对 SHCC 压缩性能和耐久性的提升优于 PE 纤维。

#### 3.2 纤维形态的影响

纤维的形态特征包括:纤维的直径、长度、长径比、截面形状等。纤维根据长度可分为短纤和长丝 2 种,化学纤维一般为长丝,经切割制备短切纤维。长丝有单丝(单纤维)和复丝(束纤维)2 种,其形貌如图 2 所示。其中,单丝是由 1 根较粗的纤维构成,直径一般大于 100 μm。复丝是由 1 束细长的平行纤维组成,纤维的根数有几百至几千根,直径较小,一般为 7~27 μm。钢纤维的制备工艺与其他纤维不同,其直径一般为 0.3~1.2 mm,长度为 15~60 mm。

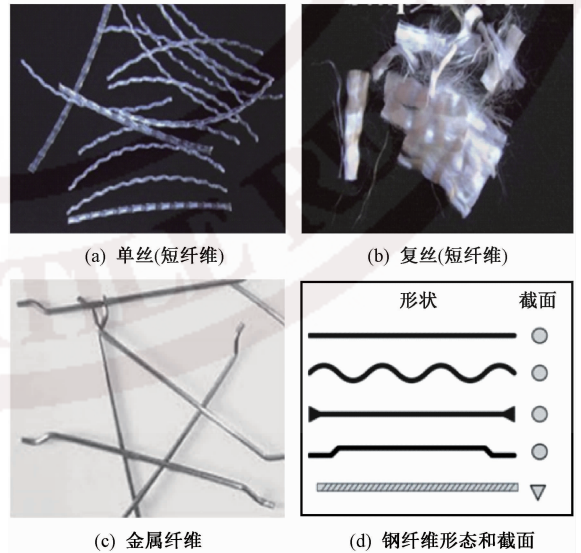


图 2 增强混凝土纤维的类型及形状特征  
Fig. 2 Types and shapes feature of fibers used to reinforced concrete. (a) Short mono-fiber; (b) Short multi-fiber; (c) Steel fiber; (d) Shape and cross-section of steel fiber

纤维的长度与直径会影响 FRC 的力学性能及混凝土的可操作性能。在相同掺量下,直径越小、长度越短的纤维对混凝土的裂前抗弯韧性改善效果越好;长度越大,纤维的分散越困难,易成球造成分散不匀,采用较长纤维增强时,混凝土在断裂时可形成较宽的裂缝<sup>[34]</sup>。可用长径比来表征纤维的几何特征,Dinh 等<sup>[35]</sup>研究表明,当纤维长径比从 55 增加到 80 时,剪切强度可提高 32%。

同时,纤维的形状和截面也会影响其与混凝土的粘结性能。以钢纤维为例,有直线型、波浪型、狗骨头型、钩端型和波纹形状的纤维,截面形状有圆形、三角形等,如图 2(d)所示。Wille 等<sup>[36]</sup>研究表明,当钢纤维掺入体积分数为 1.5% 时,波纹形钢纤维 FRC 的拉伸强度和应变分别是平直型 FRC 的 1.6 和 3.0 倍。Park 等<sup>[31]</sup>研究了杂化钢纤维增强 FRC 的拉伸性能,结果表明采用扭转型钢纤维增强 FRC 的拉伸性能最好。

### 3.3 纤维体积分数的影响

纤维体积分数会直接影响 FRC 的力学性能。根据纤维体积分数的不同可以分为 3 类:低体积分数 (<1%)、中体积分数 (1%~2%) 和高体积分数 (>2%)。Song 等<sup>[37]</sup>研究了 0.5、1.0、1.5 和 2.0% 体积分数的钢纤维增强混凝土的力学性能发现,纤维体积分数为 1.5% 时,混凝土的压缩强度最大,比纯混凝土提高了 15.3%。Tanyildizi 等<sup>[38]</sup>研究表明,当加入 0.5%、1% 和 2% 体积分数的碳纤维时,混凝土复合材料的弯曲强度分别增加了 13%、32% 和 7%。Kayali 等<sup>[39]</sup>在水泥基体中加入 0.285%、0.56% 和 1% 体积分数的 PP 纤维时,复合材料的劈裂抗拉强度分别增加了 59%、94% 和 71%。由以上研究可以看出,纤维的体积分数并不是越多越好,应根据每种纤维的性能特点和表面粘结性能等因素进行特定设计,选取最优的纤维加入量。

### 3.4 纤维排列方向的影响

纤维排列方向对复合材料力学性能有重要影响,当纤维的方向与受力方向一致(与裂缝的方向垂直)时,其增强增韧的效果最好。纤维的排列方向可通过纤维的排列方向系数来表示<sup>[40]</sup>:

$$\eta_{\varphi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos \varphi_i$$

式中: $N$  为截面上纤维的根数; $\varphi_i$  为第  $i$  根纤维方向与给定方向的夹角, ( $^{\circ}$ )。 $\eta_{\varphi}$  值在 0 到 1 之间,数值越大,排列方向越一致,即平行于给定方向;反之,数值越大越垂直于给定方向。

纤维的排列方向可通过图像分析、电子计算机断层(CT)扫描等方式进行测量。Hambach 等<sup>[41]</sup>采

用针头注射的方式来控制纤维的排列方向,将 3 mm 的碳纤维沿着混凝土的受力方向进行排列,使得复合材料的弯曲强度提高到 100 MPa,并出现明显的扰度硬化行为。Pansuk 等<sup>[40]</sup>研究发现,混凝土中纤维的排列倾向平行于流动方向时,流动方向上的纤维排列方向系数大。纤维混凝土在流动方向上的拉伸强度高于其垂直方向,这是因为纤维平行排列时,与裂缝的扩展方向垂直,可有效地阻止裂纹扩展。Barnett 等<sup>[42]</sup>研究表明,当从中间部位泵入纤维混凝土时,制备的薄板的弯曲强度高于其他的泵入方式。

### 3.5 纤维表面粘结性能的影响

纤维与水泥基体间的界面性能对复合材料的性能具有重要影响,当纤维-基体界面结合强度过低时,纤维传递和承担应力的能力被大大降低;当界面结合强度过高时,纤维易被拉断,致使最大裂缝开口宽度较小。而纤维的表面粘结性能直接决定了其界面结合强度,因此,纤维的表面性能是影响复合材料性能的又一重要因素。

Li<sup>[43]</sup>对纤维、基体和纤维-基体界面间的协同效应进行了系统的研究,建立了应变硬化多裂缝稳态开裂模型,提出了强度和能量准则,并提出了将宏观拉伸力学性能与单根纤维拔出微观力学性能连接起来的桥联法则。根据以上准则,众多学者采用离子体处理、臭氧处理、上浆、纳米粒子处理和覆盖油膜等多种方式来进行纤维表面处理。Li 等<sup>[44]</sup>采用等离子体处理来改变 PE 纤维的表面性能,增加纤维和基体的粘结力。Liu 等<sup>[45]</sup>将纳米  $\text{SiO}_2$  与水性环氧树脂和聚氨酯乳液配成复合上浆液,来提高碳纤维和玻璃纤维的浸润性能,改善与基体的粘结性能。近年来,Peled 团队<sup>[46]</sup>开发的新型挤压工艺将纳米  $\text{SiO}_2$  和水泥浆浸润到纤维束中,从而提高了纤维与水泥基体的粘结性能和复合材料板的拉伸强度。

## 4 结束语

高性能纤维增强水泥基复合材料具有广阔的应用前景,其中,纤维的性质、形态、体积分数、排列方向及粘结性能均会对复合材料的性能产生影响,应该根据特定的要求进行复合材料的设计。综合近年来纤维增强混凝土的研究,在未来的研究应从以下几个方面进行。

1) 目前研究主要关注纤维增强混凝土的宏观力学性能,在纤维基本性能对混凝土增强、抗裂作用的微观机制和基础理论方面的研究还不够完善,缺乏从微观到宏观的多尺度裂缝形成与扩展机制、多



性能层次损伤及断裂机制的研究。

2) 纤维增强混凝土材料的需求量巨大, 高性能的纤维原料大多采用国外产品, 国内纤维生产企业应加快研制工作, 开发出适应混凝土材料的特种纤维材料, 满足日益增长的市场需求。

3) 未来纤维增强混凝土材料的研究将更加注重复合材料的功能化, 制备出具有多重功能的纤维混凝土复合材料。如采用导电等功能性纳米纤维制备具有感知性能的机敏材料和具备结构健康监测功能的材料等。

FZXB

#### 参考文献:

- [ 1 ] BENTUR A, MINDESS S. Fibre reinforced cementitious composites [M]. Florida: CRC Press, 2006: 1-10.
- [ 2 ] PELED A, BENTUR A, MOBASHER B. Textile reinforced concrete [M]. Florida: CRC Press, 2017: 5-34.
- [ 3 ] LE H V, KIM D J. Detecting crack and damage location in self-sensing fiber reinforced cementitious composites [J]. Construction and Building Materials, 2020, 240: 117973.
- [ 4 ] KHAN M, ABBAS Y, FARES G. Review of high and ultrahigh performance cementitious composites incorporating various combinations of fibers and ultrafines [J]. Journal of King Saud University: Engineering Sciences, 2017, 29(4): 339-347.
- [ 5 ] KUNIEDA M, ROKUGO K. Recent progress on HPRCC in Japan [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2006, 4(1): 19-33.
- [ 6 ] LI V C. Engineered cementitious composites (ECC) material, structural, and durability performance [M]. Florida: CRC Press, 2007: 3-6.
- [ 7 ] ZHANG Y, BAI S, ZHANG Q, et al. Failure behavior of strain hardening cementitious composites for shear strengthening RC member [J]. Construction & Building Materials, 2015, 78: 470-473.
- [ 8 ] COMMITTEE J D. DFRCC terminology and application concepts [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2003, 1(3): 335-340.
- [ 9 ] 徐世焱, 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用 [J]. 土木工程学报, 2008, 41(6): 45-60.
- XU Shilang, LI Hedong. A review on the development of research and application of ultra high toughness cementitious composites [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(6): 45-60.
- [ 10 ] WEIMANN M, LI V. Hygral behavior of engineered cementitious composites (ECC)/vergleich der hygri-schen eigenschaften von ECC mit beton [J]. Restoration of Buildings and Monuments, 2003, 9(5): 513-534.
- [ 11 ] ROMAULDI J P, BATSON G B. Behaviour of reinforced concrete beams with closely spaced reinforcement [J]. ACI Structural Journal, 1963, 60(6): 775-789.
- [ 12 ] 高丹盈, 刘建秀. 钢纤维混凝土基本理论 [M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994: 25-28.
- GAO Danying, LIU Jianxiu. Basic theory of steel fiber reinforced concrete [M]. Beijing: Science and Technology Literature Press, 1994: 25-28.
- [ 13 ] SI W, CAO M, LI L. Establishment of fiber factor for rheological and mechanical performance of polyvinyl alcohol (PVA) fiber reinforced mortar [J]. Construction and Building Materials, 2020, 265: 120347.
- [ 14 ] LI V C. Tailoring ECC for special attributes: a review [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2012, 6(3): 135-144.
- [ 15 ] WANG W, WANG L, SHI Q, et al. Progress of the surface modification of PP fiber used in concrete [J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2006, 45(1): 29-34.
- [ 16 ] YANG E H, LI V C. Strain-hardening fiber cement optimization and component tailoring by means of a micromechanical model [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(2): 130-139.
- [ 17 ] 高丹盈, 李晗, 杨帆. 聚丙烯-钢纤维增强高强混凝土高温性能 [J]. 复合材料学报, 2013, 30(1): 187-193.
- GAO Danying, LI Han, YANG Fan. Performance of polypropylene-steel hybrid fiber reinforced concrete after being exposed to high temperature [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(1): 187-193.
- [ 18 ] YU K Q, YU J T, DAI J G, et al. Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers [J]. Construction and Building Materials, 2018, 158: 217-227.
- [ 19 ] CUROSU I, MECHTCHERINE V, MILLON O. Effect of fiber properties and matrix composition on the tensile behavior of strain-hardening cement-based composites (SHCCs) subject to impact loading [J]. Cement and Concrete Research, 2016, 82: 23-35.
- [ 20 ] CUROSU I, LIEBSCHER M, MECHTCHERINE V, et al. Tensile behavior of high-strength strain-hardening cement-based composites (HS-SHCC) made with high-performance polyethylene, aramid and PBO fibers [J]. Cement and Concrete Research, 2017, 98: 71-81.
- [ 21 ] SILVA F D A, MOBASHER B, FILHO R D T. Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites [J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31(10): 721-730.
- [ 22 ] SCHEFFLER C, GAO S, PLONKA R, et al. Interphase modification of alkali-resistant glass fibres and carbon fibres for textile reinforced concrete I: fibre

- properties and durability [J]. *Composites Science and Technology*, 2009, 69(3/4): 531-538.
- [23] BARLUENGA G, HERNÁNDEZ-OLIVARES F. Cracking control of concretes modified with short AR-glass fibers at early age. Experimental results on standard concrete and SCC [J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(12): 1624-1638.
- [24] WANG C, LI K Z, LI H J, et al. Effect of carbon fiber dispersion on the mechanical properties of carbon fiber-reinforced cement-based composites [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 487(1/2): 52-57.
- [25] WANG Z J, LI K Z, WANG C. Freezing-thawing effects on electromagnetic wave reflectivity of carbon fiber cement based composites [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 64:288-292.
- [26] KABAY N. Abrasion resistance and fracture energy of concretes with basalt fiber [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 50: 95-101.
- [27] BERNAL S A, BEJARANO J, GARZ N C, et al. Performance of refractory aluminosilicate particle/fiber-reinforced geopolymer composites [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(4): 1919-1928.
- [28] BERNAL S, GUTIERREZ R D, DELVASTO S, et al. Performance of an alkali-activated slag concrete reinforced with steel fibers [J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(2): 208-214.
- [29] PAKRAVAN H, LATIFI M, JAMSHIDI M. Hybrid short fiber reinforcement system in concrete; a review [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 142:280-294.
- [30] MARKOVIC I. High-performance hybrid-fibre concrete-development and utilisation. Technische Universiteit Delft [M]. Amsterdam:IOS Press, 2006:7-8.
- [31] PARK S H, KIM D J, RYU G S, et al. Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2012, 34(2): 172-184.
- [32] LIBRE N A, SHEKARCHI M, MAHOUTIAN M, et al. Mechanical properties of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete made with natural pumice [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(5): 2458-2464.
- [33] YUN H D. Effect of accelerated freeze-thaw cycling on mechanical properties of hybrid PVA and PE fiber-reinforced strain-hardening cement-based composites (SHCCs) [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 52:11-20.
- [34] DINH H H, PARRA-MONTESINOS G J, WIGHT J K. Shear behavior of steel fiber-reinforced concrete beams without stirrup reinforcement [J]. *Structural Journal*, 2010, 107(5): 597-606.
- [35] DINH H H. Shear behavior of steel fiber reinforced concrete beams without stirrup reinforcement [D]. Michigan:The University of Michigan, 2009:54-60.
- [36] WILLE K, NAAMAN A E, EL-TAWIL S, et al. Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: achieving strength and ductility without heat curing [J]. *Materials and Structures*, 2012, 45(3): 309-324.
- [37] SONG P, HWANG S. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2004, 18(9): 669-673.
- [38] TANYILDIZI H. Effect of temperature, carbon fibers, and silica fume on the mechanical properties of lightweight concretes [J]. *New Carbon Materials*, 2008, 23(4): 339-344.
- [39] KAYALI O, HAQUE M, ZHU B. Some characteristics of high strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2003, 25(2): 207-213.
- [40] PANSUK W, SATO H, SATO Y, et al. Tensile behaviors and fiber orientation of UHPC [C]// *Proceedings of Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*. Kassel: Kassel University Press, 2008: 161-168.
- [41] HAMBACH M, MILLER H, NEUMANN T, et al. Portland cement paste with aligned carbon fibers exhibiting exceptionally high flexural strength (>100 MPa) [J]. *Cement and Concrete Research*, 2016, 89:80-86.
- [42] BARNETT S J, LATASTE J F, PARRY T, et al. Assessment of fibre orientation in ultra high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength [J]. *Materials and Structures*, 2010, 43(7): 1009-1023.
- [43] LI V C. Integrated structures and materials design [J]. *Materials and Structures*, 2007, 40(4): 387-396.
- [44] LI V C, WU H C, CHAN Y W. Effect of plasma treatment of polyethylene fibers on interface and ementitious composite properties [J]. *Journal of The American Ceramic Society*, 2005, 79(3): 700-704.
- [45] LIU F, SHI Z, DONG Y. Improved wettability and interfacial adhesion in carbon fibre/epoxy composites via an aqueous epoxy sizing agent [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 112:337-345.
- [46] COHEN Z, PELED A. Effect of nanofillers and production methods to control the interfacial characteristics of glass bundles in textile fabric cement-based composites [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, 43(6): 962-972.