

聚合物纤维与水泥基材料界面性能研究进展

李格格^{1,2,3}, 姜琳琳⁴, 马东⁵, 谢小元^{1,2,3}, 冷发光^{1,2,3}

(1. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013; 2. 建筑安全与环境国家重点实验室, 北京 100013;
3. 国家建筑工程技术研究中心, 北京 100013; 4. 青岛理工大学工程质量检测鉴定中心, 山东 青岛 266033;
5. 青岛地铁运营有限公司, 山东 青岛 266033)

摘要: 聚合物纤维与水泥基材料界面粘结性能是影响纤维增强水泥基复合材料延性的关键因素。传统混凝土具有脆性较大韧性较差等缺点, 为满足高强高韧性工程需要, 国内外学者将聚合物纤维加入水泥基材料中从而制备出具有良好性能的纤维增强水泥基复合材料。为了分析国内外近年来在相关领域的研究成果, 总结聚合物纤维与水泥基材料界面性能参数及脱粘机理, 纤维物理性质(埋深, 直径, 种类, 改性)、水泥基材料组分、加载速率、温度和服役环境对聚合物纤维与水泥基材料界面粘结性能的影响规律, 以及纤维与水泥基材料界面过渡区特点。结果表明: 聚合物纤维具有稳定的化学性质, 纤维发挥桥接作用主要依靠纤维与水泥基材料界面粘结性能。通过对聚合物纤维进行物理和化学处理, 调整纤维长径比、埋深, 改变水泥基材料水灰比、砂灰比及砂子类型等水泥基体组分可有效改善纤维与水泥基材料界面粘结性能。同时温度、服役条件和加载速率对其界面粘结性能也影响明显。

关键词: 聚合物纤维; 水泥基材料; 界面粘结性能; 研究进展

中图分类号: TU528.58

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)02-0072-08

Research Progress on Interfacial Properties Between Polymer Fiber and Cementitious Materials

LI Gege^{1,2,3}, JIANG Linlin⁴, MA Dong⁵, XIE Xiaoyuan^{1,2,3}, LENG Faguang^{1,2,3}

(1. China Academy of Building Research Co., Ltd., Beijing 100013, China;

2. State Key Laboratory of Building Safety and Environment, Beijing 100013, China;

3. National Engineering Research Center of Building Technology, Beijing 100013;

4. Engineering Quality Test and Appraisal Center of Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266033, China;

5. Qingdao Metro Operation Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266033, China)

Abstract: The interfacial bonding performance between polymer fibers and cementitious materials is a key factor affecting the ductility of fiber-reinforced cementitious composites. Traditional concrete has drawbacks such as high brittleness and poor toughness. In order to meet the needs of high strength and high toughness engineering, domestic and foreign researchers have added polymer fibers to cementitious materials to prepare fiber-reinforced cementitious composites with good performance. In order to analyze the research achievements in related fields both domestically and internationally in recent years. This paper outlines the interface performance parameters and debonding mechanism of polymer fibers and cementitious materials, as well as the physical properties of fibers (burial depth, diameter, type, modification), cementitious material components, loading rate, temperature and service environment. The characteristics of the interfacial transition zone between fibers and cementitious materials are also discussed. The results indicate that polymer fibers have stable chemical properties, and the bridging effect of fibers mainly relies on the interfacial bonding performance between fiber-reinforced cementitious composites. By physically and chemically treating polymer fibers, adjusting the fiber length to diameter ratio, burial depth, and changing the water cement ratio, sand cement ratio, and the type of sand as well as cement matrix components, the bonding performance between fibers and cementitious materials can be effectively improved. At the same time, temperature, service conditions, and loading rate also have a significant impact on its interface bonding performance.

Keywords: polymer fiber; cementitious composite materials; interface adhesion performance; research progress

混凝土作为土木工程中应用最广泛的建筑材料,具有原料丰富、价格低廉、生产工艺简单、抗压强度高、耐久性好、强度等级范围宽等特点^[1-2]。但随着大型基础设施建设与现代工程结构的快速发展,传统混凝土已经不能满足超长跨距、超大体积、超高层等典型特征结构的需求,对混凝土材料特性提出了更高的要求^[3]。为了降低传统混凝土的开裂风险,研究学者将纤维加入混凝土中,实现了混凝土裂缝减少的情境,使得纤维混凝土得到了快速发展^[4-6]。

虽然纤维混凝土相比于传统混凝土具有良好的力学性能和耐久性^[7-9],但当纤维混凝土承受外部荷载后,混凝土基体开裂,纤维与混凝土粘结性能较差,随后出现应变软化现象^[10-12]。因此,与普通混凝土相比易开裂、韧性差的问题并未得到根本解决。

1992年Li V C^[13-14]以桥连法则为理论基础,发明了应变硬化水泥基复合材料(ECC,国内研究人员还称之为可弯曲的混凝土,高延性混凝土等),研究发现ECC具有应变硬化和多缝开裂特点,在单向拉伸荷载作用下其拉伸应变可以达到3%~7%,是普通混凝土的300~700倍^[15-16]。研究学者发现,外荷载作用产生的应力在水泥基材料与纤维之间界面处传递,当纤维与水泥基材料界面粘结性能过弱时,纤维很轻易被拔出,无法充分发挥桥接作用;而粘结性能过强时,纤维容易被拉断^[17]。因此,纤维与水泥基材料界面粘结性能过强或过弱均不利于增强增韧材料的设计,纤维与水泥基材料界面粘结性能是高延性水泥基材料设计的重要参数^[18-20],对材料的宏观力学性能有着重要影响,对纤维混凝土的理论研究和工程应用都具有重要意义。

1 纤维与水泥基材料界面性能参数及脱粘机理

纤维增强水泥基材料试件受到外力作用后会产生裂缝,裂缝处的应力主要依靠桥联纤维的拔出和断裂来承担,变为应变硬化行为^[21-22]。纤维在裂缝中桥接及失效过程^[23]如图1所示。单纤维拉拔试验是研究纤维与水泥基材料界面性能的有效方法之一^[24]。图2为常用单纤维拉拔试验过程^[25-26]。首先,将一定长度的纤维埋入水泥基材料中,达到养护龄期之后,利用夹具夹住纤维,保证其从水泥基材料中完全拔出。典型的单根纤维拔出荷载-位移关系^[26]如图3所示。可以看出,纤维在拔出过程中首先经历弹性变形,此时拔出荷载和位移呈线性关系。

亲水性聚乙烯醇纤维(PVA)表面存在大量的羟基基团使其可以与周围的水泥水化物产生化学键作用,从而形成化学粘结力,如下式所示^[27-28]:

$$G_d = 2(P_a - P_b)/\pi^2 E_f d_f \quad (1)$$

式中: G_d 为化学粘结能, J/m^2 ; P_a 为纤维脱粘滑移前最大拔出荷载, N ; P_b 为纤维脱粘后摩擦滑移开始时的荷载, N ; E_f 为纤维弹性模量, GPa ; d_f 为纤维直径, mm 。

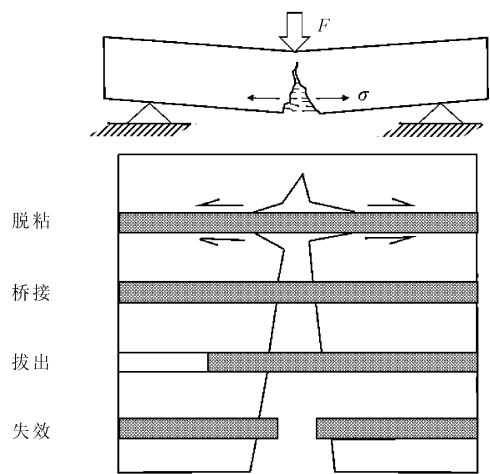


图1 纤维在基体中失效机理

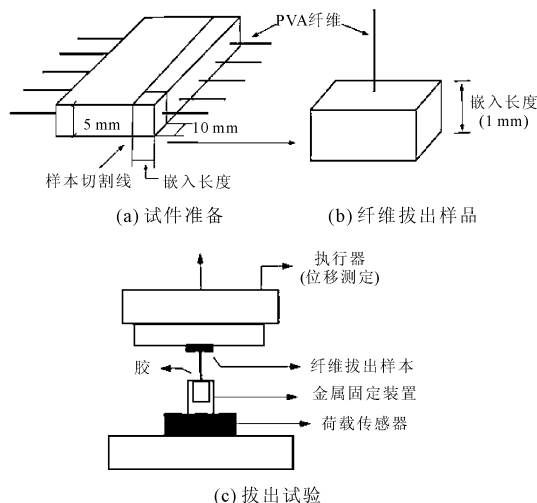


图2 单纤维拉拔试验过程

随着拔出力的增大,PVA纤维开始在水泥基材料中脱粘,纤维拔出力到达 P_a ,由于条状裂缝发生失稳扩展,纤维拔出力下降至 P_b ,此时化学粘结力消失,随后纤维在脱粘过程中只受摩擦应力的作用,如下式所示^[29]:

$$\tau_0 = P_b/\pi d_f l_e \quad (2)$$

式中: τ_0 为纤维-基体界面摩擦应力; l_e 为纤维埋入长度, mm 。

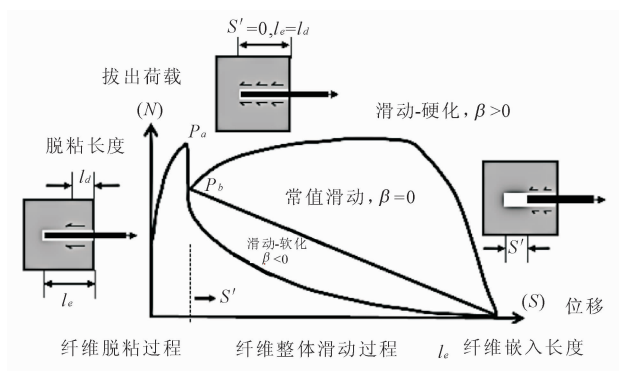


图3 单根纤维拔出过程中的荷载-位移关系

Lin 等^[30]认为,纤维滑移阶段的界面摩擦应力 τ 与相对滑移位移是以滑移硬化系数 β 的线性关系,如下式所示:

$$\tau = \tau_0(1 + \beta \frac{S'}{d_f}) \quad (3)$$

式中: τ 为修正后的纤维-基体界面摩擦应力; β 为纤维在滑移过程中的滑移硬化系数; S' 为纤维拔出位移,mm。

PVA 纤维在拔出过程中受到水泥基材料的刮削作用从而产生损伤,纤维通道可能被刮削掉的纤维碎屑阻塞,导致纤维进一步滑移受到阻碍,使得纤维拔出力持续增加,荷载-位移曲线在滑移段呈现凸状($\beta > 0$),从而出现明显的滑移硬化效应现象^[31]。而聚乙烯纤维(PE)、聚丙烯纤维(PP)等表面光滑且不存在亲水基团,滑移硬化系数为 0 甚至为负数,因此不存在化学粘结力,滑移过程则显示出应变软化($\beta < 0$)行为或恒定的界面摩擦应力($\beta = 0$)^[32-34]。

2 纤维与水泥基材料界面粘结性能影响因素

2.1 纤维埋深和直径对界面粘结性能影响

纤维增强水泥基复合材料受到外部荷载作用时,纤维的脱粘或断裂行为取决于其极限拉应力和界面摩擦应力的大小^[35]。当纤维拔出力大于界面摩擦应力且小于纤维极限拉应力时,纤维会从水泥基材料中脱粘,当纤维拔出力大于纤维的极限拉应力且小于界面摩擦应力时,纤维会断裂。研究表明增大纤维埋深和直径可增大界面粘结强度^[36-41]。苏安双等^[42]研究发现,聚丙烯纤维混凝土的抗压、抗拉、抗折强度及弯曲韧性均随纤维长径比的增大而呈现出先增加后降低的趋势,而且长径比为 50 时增强增韧效果最明显。可见,适当增加纤维长度可

以改善纤维与水泥基材料界面粘结性能,但纤维长度过长,材料的流动性变差,从而影响材料韧性^[43-45]。张献民等^[39]发现 PVA 纤维与水泥基材料界面粘结强度随着纤维直径的增大而增大。张君等^[46]研究发现采用直径较大的 PVA 纤维时,水泥基复合材料出现了较好的应变硬化与多点开裂模式,而采用直径较小的 PVA 纤维时,水泥基复合材料表现出明显的应变软化与单点开裂模式,且极限抗拉应变较低。纤维的粗细会影响纤维的桥接应力,致使纤维被拉断而不是被拔出,从而影响了材料的韧性。所以,应根据具体工程材料和易性、力学性能等需求,选择适宜的纤维长度和直径。

2.2 纤维种类和改性对界面粘结性能影响

不同种类聚合物纤维与水泥基材料界面粘结性能存在差异。例如,Pakravan H R 等^[47]将聚丙烯纤维、尼龙 66 纤维、腈纶进行单纤维拉拔试验,发现由于尼龙 66 纤维的高韧性,只有尼龙 66 纤维从水泥基材料中完全拔出而不断裂,而腈纶与水泥基材料的粘结过好,导致在持续荷载下腈纶被拉断。亲水类纤维表面具有的极性基团(例如羟基、羧基、酯羰基等)会与界面过渡区的水化硅酸钙结合,从而表现出更高的粘结性能^[48-49]。而将一些表面光滑且未带有极性官能团的纤维(例如 PP,PE 等)引入极性基团可以来增强纤维与水泥基材料的结合^[50]。所以,部分学者将纤维通过物理或化学方法进行改性,来充分发挥纤维的抗拉性能,以改善其与水泥基材料界面粘结性能,如图 4 所示。Benzerzour 等^[51]研究发现,改性聚酯纤维的拔出能是未处理纤维的 10 倍,而粘结强度大约是未处理纤维的 3 倍。

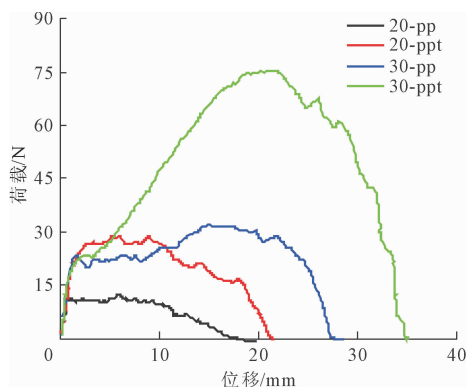


图4 聚丙烯纤维处理前后荷载-位移曲线^[35]

聚合物纤维常用改性方法包括偶联剂表面处理^[52-53]、低温等离子体表面处理^[54-55]、化学氧化改性法处理^[56]等。通过化学方法可以使纤维表面附

着极性基团,从而改善纤维与水泥基材料界面粘结性能,然而改性过程中使用的强氧化剂可能会使纤维表面产生损伤,降低纤维弹性模量和抗拉强度^[57-58],不利于纤维桥联作用的充分发挥。

2.3 基体强度对界面粘结性能的影响

赖建中等^[59]发现,基体强度增加,纤维与基体的界面粘结强度显著提高。而曹炜^[36]通过制作不同抗压强度基体对合成粗纤维进行单纤维拔出试验得知,当纤维埋深相同时,提高基体强度会增大纤维粘结强度,同时随着基体强度的增大,纤维粘结强度会出现降低的趋势^[36],如图5所示。材料养护龄期的不同也会使得基体的强度不同,随着养护龄期的增加,水泥基材料内部逐渐水化从而使强度增长,界面脱粘强度也会增大^[60-61]。研究者发现了纤维与水泥基材料界面粘结性能随养护龄期变化的规律,Singh S等^[62]研究发现,在养护初期纤维最大拔出荷载随养护时间的增加而增大,在养护后期随养护时间的增加,聚丙烯纤维最大拔出荷载变化并不明显,刘卫东^[63]研究发现,随着混凝土养护龄期的增加,聚丙烯纤维拔出强度逐渐增大,7 d 之内的增大趋势较快,7 d 之后趋势有所减缓,这主要是因为养护过程中水泥颗粒逐渐水化,从而使得水泥基材料密实度增加^[64],纤维与水泥基材料粘结性能随龄期的变化趋势与水泥基材料强度发展趋势一致。由此可见,随着水泥基材料强度的提高,纤维与水泥基材料界面粘结性能就越好,基体强度是影响纤维与水泥基材料界面粘结性能的关键因素。

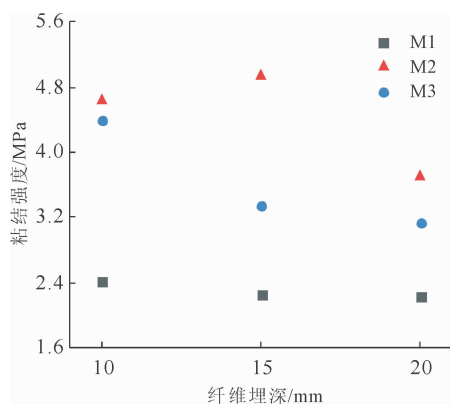


图5 基体强度对界面最大粘结强度影响

2.4 基体材料组成对界面粘结性能的影响

基体材料配比决定着材料的各项力学性能,因此基体材料配比影响着纤维与水泥基材料界面粘结性能。有研究者发现随着水灰比的增加,纤维与水泥基材料界面粘结性能呈下降趋势^[63-66]。而马一

平等^[61]发现水灰比在 0.3~0.4 的范围内时,纤维与基体界面黏结强度随水灰比增大而增强。这主要是因为水胶比的变化会导致水泥基材料强度发生改变,在水胶比过低的情况下,基体强度过大造成纤维部分韧性未充分发挥,进而降低了 PVA 纤维与水泥基材料界面粘结性能。赵颖等^[67]研究发现,随着砂灰比的增加,PVA 纤维增强水泥基材料的四点弯曲应变也随之增加。郭丽萍等^[68]研究发现,与河砂相比,采用金刚砂的纤维增强水泥基复合材料韧性更差,单轴拉伸强度更低,纤维表面受金刚砂刮削程度更大。

骨料对纤维与水泥基材料界面粘结性能影响机理主要有两个方面:从物理填充角度,砂灰比的优化可以使得水泥基材料的孔隙率降低^[69];其次,骨料会使纤维脱粘时受到刮削作用从而影响其粘结性能。Chan Yinwen 等^[70]研究发现,硅灰的掺入能有效提高纤维与水泥基材料界面粘结性能。吴泽媚^[71]和梅迎军等^[72]研究发现,合理的矿物掺合料掺量可以提高纤维与水泥基材料界面粘结性能。这主要是因为矿物掺合料在水泥基材料中可以发挥微集料填充作用^[73]与火山灰效应^[74],从而增加了水泥基材料的密实度,从而提高了纤维与水泥基材料界面粘结性能。

综上所述,通过调整水泥基材料组分可以改善纤维与水泥基材料界面粘结性能,其机理主要是改善水泥基材料孔隙结构,增加其密实度,界面性能参数也会因为水泥基材料组分的不同而发生变化。

2.5 加载速率对界面粘结性能的影响

陈强^[75]研究发现,随着加载速率的增大 PVA 纤维增强水泥基复合材料的抗压强度增大,但材料的韧性变差。Boshoff 等^[76]研究发现,加载速率越高,PVA 纤维断裂的概率越高。Wang 等^[77]通过分子动力学模拟了不同加载速度下的聚合物纤维从托贝莫来石基体拔出的过程,提出了界面粘结强度可以通过纤维的动能变化来计算,发现加载速度加大可以增强聚合物纤维与水泥基材料界面的结合,合理解释了纤维与水泥基材料界面粘结性能随加载速率的变化而变化的现象。

综上所述,加载速率可以对纤维与水泥基材料界面粘结性能造成明显影响,通过设置不同加载速率,可以模拟实际不同等级地震,以此来检验材料的韧性和抗震性能。

2.6 温度对界面粘结性能的影响

研究表明,环境温度会使聚合物纤维的性能发

生变化^[78-81]。环境温度变化也会使聚合物纤维促进水泥基材料的力学性能发生改变。杨亚男等^[82]研究发现,低温会使 PVA 纤维与水泥基材料界面化学粘结力减小而使摩擦粘结力增加。林建辉等^[83]通过对 PVA - ECC 进行适当的热处理 (50℃, 100℃, 200℃) 后发现,热处理显著提高了 PVA 纤维与水泥基材料界面粘结性能。这是因为水泥基材料经过适当的高温处理后,粉煤灰效应得到激发,进而产生更多的水化硅酸钙,填充了材料孔隙,提高了材料的密实度^[84]。而王振波等^[85]研究发现,暴露于 400℃ 的 ECC 其内部 PVA 纤维出现了分解现象,高温导致 ECC 延性变差。水泥基材料在高温下出现有害裂缝,导致基体强度下降,纤维在高温下抗拉强度降低,因此纤维与水泥基材料粘结性能下降。

综上所述,高温和低温均会使得纤维与水泥基材料界面粘结性能改变,但低温环境下界面粘结性能变化的原因尚不明确。

2.7 侵蚀性离子对界面粘结性能的影响

水泥基材料会与侵蚀性环境中的 Cl^- 和 SO_4^{2-} 发生一系列物理、化学反应,从而使水泥基材料内部孔隙率及其微结构发生改变,进而影响纤维与水泥基材料界面性能^[86-91]。Sehaj Singh 等^[62,92]研究发现,相比在清水中浸泡的聚丙烯纤维,浸泡在盐水和海水中的聚丙烯纤维拔出荷载峰值和拉拔能更大,其中暴露在海水中的聚丙烯纤维荷载峰值最大,且滑移应变现象最明显。徐程勇^[93]研究发现,随着硫酸盐浓度的增加,聚丙烯粗纤维与水泥基材料界面粘结性能劣化速度加快。这是因为,在浸泡初期,膨胀性产物主要发挥堵孔作用,使得材料密实度增加,因此纤维与水泥基材料界面粘结性能变好^[94-95]。胡晨光等^[96]研究发现,水泥基材料在氯盐和硫酸盐长期浸泡条件下, SO_4^{2-} 和 Cl^- 会使粉煤灰水泥浆体中的水化产物脱铝脱钙,从而导致纤维与水泥基材

料界面粘结性能变差。许多研究学者提出在长期服役环境中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 与水泥基材料生成的膨胀性产物会使其产生膨胀开裂^[91,97-99],从而使得水泥基材料强度降低,这也是粘结性能变差的因素之一。

综上所述,侵蚀性离子对纤维与水泥基材料界面粘结性能的影响主要取决于材料的服役龄期,所处服役环境以及抗侵蚀性能的强弱。

3 纤维与水泥基材料界面过渡区

在纤维增强水泥基复合材料中,应力通过纤维和水泥基材料之间的界面过渡区进行传递,因此界面过渡区组成结构与性能是影响纤维增强水泥基复合材料整体性能的关键因素。通常探究聚合物纤维与水泥基材料界面过渡区微观结构性能常采用显微硬度^[100]和纳米压痕^[16,101]试验方法。研究表明,与水泥基材料相比,纤维与水泥基材料界面过渡区的氢氧化钙含量较高,且会定向分布^[102-103],弹性模量较小,界面过渡区孔隙率较高,结构疏松,如图 6 所示。这是因为材料在水化过程中纤维表面会附着水膜产生边壁效应,而纤维水膜中的离子浓度较低,钙离子传输速度相对硅离子和铝离子较快,因此纤维周围会形成定向分布的氢氧化钙。其次,水泥基材料的不断水化致使基体孔隙率会不断减小。然而,由于边壁效应,纤维周围的孔隙只受到水泥浆一侧的影响导致界面过渡区水化速率较慢,因此界面过渡区具有较高的孔隙率。这是界面过渡区薄弱的两个主要原因。

界面过渡区水化产物与水泥基材料水化产物的不同,导致了两者性能存在明显差异,使得聚合物纤维脱粘时界面过渡区与水泥基体变形不一致,因此纤维拔出时容易出现较大的剪切应力。界面过渡区的薄弱特点和与水泥基体的差异性会对纤维与水泥基材料界面粘结性能产生不利影响。

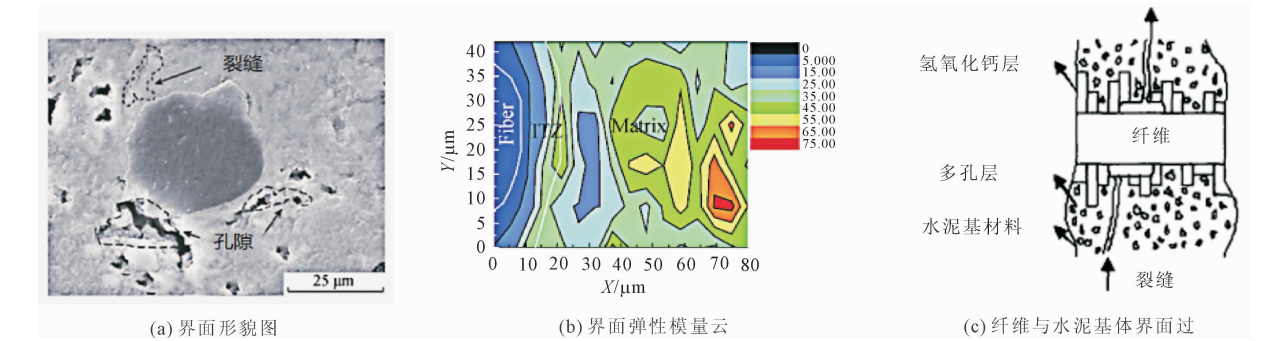


图 6 界面过渡区结构模型、界面处形貌图和弹性模量云图^[101,104]

4 结 论

(1) 聚合物纤维具有稳定的化学性质,其加入水泥基材料中作为修复类材料具有良好的应用前景,纤维发挥桥接作用主要依靠于纤维与水泥基材料界面粘结性能,在单纤维拉拔试验和界面微观力学参数的指导下,可以实现高延性水泥基材料设计。

(2) 界面粘结性能主要受纤维物理性质(埋深、直径、改性、种类)以及水泥基材料密度的影响,通过对聚合物纤维进行物理和化学处理,调整纤维长径比、埋深,改变水泥基材料水灰比、砂灰比及砂子类型等水泥基体组分可以有效改善纤维与水泥基材料界面粘结性能,同时环境温度、服役条件和加载速率对纤维与水泥基材料界面粘结性能有明显影响。

(3) 目前关于纤维与水泥基材料界面粘结性能主要以宏观层面研究为主,而基于微观化学层面的纤维脱粘机理尚不明确,因此需要进一步探究纤维脱粘时化学键断裂情况。

(4) 显微硬度和纳米压痕试验在操作时人为影响较大,而有机纤维直径较细,与水泥基材料产生的界面过渡区厚度较小,因此这两种试验方法对于界面过渡区厚度定量分析已不再适用,界面过渡区对纤维与水泥基材料界面粘结性能的影响及其影响程度需要进一步探究。

参考文献:

- [1] 王 宾. 概论建筑施工中大体积混凝土的浇筑技术[J]. 城市建设理论研究(电子版),2013(13):1-5.
- [2] 杨 菲. 探讨混凝土原材料对混凝土性能的影响与检测控制[J]. 佛山陶瓷,2022,32(12):86-88.
- [3] 祝 瑜. PVA纤维增强水泥基复合材料力学性能及自愈合特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [4] 杨建国. 纤维混凝土在工程中的应用与发展[J]. 山西建筑,2009,35(6):193-194.
- [5] 郭志超,田 焜,李儒光. 聚丙烯纤维在混凝土中的应用研究[J]. 建材世界,2016,37(6):10-13.
- [6] 银英姿,仇 贝. 聚乙烯醇纤维混凝土力学性能及早期开裂试验研究[J]. 硅酸盐通报,2019,38(2):454-458.
- [7] 同月苹,王 艳,张少辉. 隧道衬砌纤维混凝土力学性能与耐久性能的研究进展[J]. 材料科学与工程学报,2022,40(3):528-536.
- [8] 戎泽斌,王 成,李曦彤,等. 浅谈PVA纤维对混凝土力学性能及耐久性能的影响[J]. 土木工程,2022,11(4):499-505.
- [9] 李 智. 混杂纤维混凝土动态压缩性能研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2011.
- [10] 李庆华,徐世烺. 超高韧性水泥基复合材料基本性能和结构应用研究进展[J]. 工程力学,2009,26(S2):23-67.
- [11] 高淑玲,王文昌. 应变硬化水泥基复合材料性能与应用研究进展[J]. 材料导报,2019,33(21):3620-3629.
- [12] 李永鹏,何 锐,嵇绍华,等. 界面处理对混杂纤维混凝土弯曲性能的影响[J]. 武汉理工大学学报,2013,35(4):27-31,36.
- [13] Li V C, Leung C. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992,118(11):2246-2264.
- [14] Li V C. Integrated structures and materials Design[J]. Materials Structures, 2007,40(4):387-396.
- [15] Kyokai N, Li V C. On engineered cementitious composites(ECC)[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2003,1(3):215-230.
- [16] 雷东移. 生态纳米超高强超高延性水泥基复合材料设计与关键性能[D]. 南京:东南大学,2019.
- [17] 高 照. 界面物理力学性质对混凝土双丝拉拔性能的影响[D]. 广州:广州大学,2017.
- [18] 黄艳竹. 纤维增韧水泥基复合材料的纤维界面处理及直拉性能的研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.
- [19] Lepech M, Li V C, Keoleian G A. Sustainable infrastructure material design[J]. Advances in Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems, 2005:83-90.
- [20] Yang E H, Wang S, Yang Y, et al. Fiber-bridging constitutive law of engineered cementitious composites[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2008,6(1):181-193.
- [21] 刘龙龙. ECC复合材料疲劳断裂性能试验研究[D]. 青岛:山东科技大学,2015.
- [22] 曹明莉,许 玲,张 聪. 高延性纤维增强水泥基复合材料的微观力学设计、性能及发展趋势[J]. 硅酸盐学报,2015,43(5):632-642.
- [23] Claus W. The single-fibre pull-out test. 1: review and interpretation[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1996,27(8):597-612.
- [24] 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.
- [25] 郭向阳,米 力,牛恒茂,等. PVA纤维增强水泥基材料中纤维-基体界面性能研究述评[J]. 混凝土,2015(12):84-88.
- [26] Redon Carl, Li Victor C, Wu Cynthia, et al. Measuring and modifying interface properties PF PVA fibers in ECC

- matrix [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2001, 13(6): 399-472.
- [27] 薛会青, 邓宗才, 李建辉. PVA 纤维水泥基复合材料的抗拉性能及韧性研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2009, 30(1): 92-95.
- [28] 黄艳竹. 纤维增韧水泥基复合材料的纤维界面处理及直拉性能的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [29] 湛正凯. 国产化绿色高延性水泥基复合材料优化设计与关键性能[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [30] Lin Z, Li V C. Crack bridging in fiber reinforced cementitious composites with slip-hardening interfaces[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1997, 45(5): 763-787.
- [31] 王明学. 国产聚乙烯醇纤维增韧水泥基复合材料的界面调控及性能研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2019.
- [32] 高尚兵. 超高分子量聚乙烯纤维的表面接枝及其与橡胶粘合性能的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
- [33] 张 坤. 聚羧酸减水剂对掺纤维水泥净浆流动性影响及作用机理研究[D]. 海口: 海南大学, 2017.
- [34] 刘鹏飞, 郑津洋, 陶伟明, 等. 伴随纤维断裂的界面分离能的研究[J]. 自然科学进展, 2006, 16(9): 1087-1092.
- [35] 文 莺. 纤维增强型水泥基复合材料中纤维拉拔特性对基体的阻裂作用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2003.
- [36] 火兴斐. 黄麻纤维束的力学性能及其与水泥基体的粘结性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [37] 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.
- [38] 曹 炜. 合成粗纤维与砂浆基体粘结性能试验[J]. 中外企业家, 2014(11): 205-206.
- [39] 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.
- [40] 朱德举, 张伟明, 刘 赛. 玻纺织物增强混凝土界面黏结性能的试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(3): 122-130.
- [41] 宣卫红, 刘建忠, 李骁春, 等. 聚丙烯纤维与水泥砂浆粘结性能试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2010, 31(6): 726-730.
- [42] 苏安双, 曾雄辉, 丁建彤, 等. 粗合成纤维长径比对喷射混凝土性能的影响[J]. 混凝土, 2013(4): 67-72, 76.
- [43] 余保英, 周建伟, 孔亚宁, 等. PVA 纤维长度对超高韧性水泥基复合材料力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2020(11): 3425-3431.
- [44] 嵇绍华, 李永鹏, 何 锐, 等. 纤维长度对聚乙烯纤维增强水泥基复合材料强度和韧性的影响[J]. 混凝土, 2014(1): 46-48.
- [45] 侯永强, 尹升华, 赵国亮, 等. 聚丙烯纤维增强尾砂胶结充填体力学及流动性能研究[J]. 材料导报, 2021, 35(19): 19030-19035.
- [46] 张 君, 居贤春, 郭自力. PVA 纤维直径对水泥基复合材料抗拉性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(6): 706-710.
- [47] Pakravan H R, Jamshidi M, Latifi M, et al. Cementitious composites reinforced with polypropylene, nylon and polyacrylonitrile fibres [C]//Materials Science Forum, 2013: 271-276.
- [48] 何 焯. 碳纤维表面结构与复合材料界面性能的相关性研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
- [49] 金 军, 张慧萍, 晏 雄. 超高分子量聚乙烯纤维的表面改性研究[J]. 产业用纺织品, 2010, 28(2): 36-40, 43.
- [50] 郑逢时. UHMWPE 纤维表面处理及其水泥砂浆性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [51] Benzerzour M, Sebaibi N, Abriak N E, et al. Waste fibre-cement matrix bond characteristics improved by using silane-treated fibres[J]. Construction Building Materials, 2012, 37: 1-6.
- [52] 杨燕宁, 孟家光, 程燕婷, 等. 硅烷偶联剂改性超强聚乙烯纤维的性能表征[J]. 合成纤维, 2018, 47(4): 37-40.
- [53] 罗 玲, 彭家惠, 瞿金东. 硅烷偶联剂改性对聚丙烯纤维抗裂效果的影响[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(4): 118-120.
- [54] 袁超廷, 高尚林, 牟其伍. 低温等离子体表面处理对超高分子量聚乙烯纤维-环氧树脂粘接性能的影响及机理[J]. 复合材料学报, 1993, 10(3): 9-17.
- [55] 陈光良, 张广秋, 葛袁静, 等. 等离子体改性聚丙烯纤维对混凝土抗压性能的影响[J]. 北京印刷学院学报, 2003, 11(3): 24-26.
- [56] Kharitonov A P, Simbirtseva G V, Bouznik V M, et al. Modification of ultra-high-molecular weight polyethylene by various fluorinating routes [J]. Journal of Polymer Science Part A Polymer Chemistry, 2011, 49(16): 3559-3573.
- [57] 孟 碧, 谢光银. 用硅烷偶联剂改性芳纶及高强聚乙烯纤维研究[J]. 纺织科技进展, 2015(7): 17-18.
- [58] 张春燕, 于俊荣, 刘兆峰. 超高相对分子质量聚乙烯纤维的表面粘结性能研究[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2006, 32(1): 7-10.
- [59] 赖建中, 孙 伟, 董贺祥. 粗合成纤维混凝土力学性

- 能及纤维-混凝土界面粘结行为研究[J]. 工业建筑, 2006(11):94-97.
- [60] 温钰泉. 混凝土养护及混凝土强度[J]. 建筑技术, 1986(7):36-38,34.
- [61] 马一平,谈慕华. 聚丙烯单丝与水泥石界面脱粘强度及其影响因素[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2001,29(4):406-409.
- [62] Singh S, Shukla A, Brown R. Pullout behavior of polypropylene fibers from cementitious matrix[J]. Cement Concrete Research, 2004,34(10):1919-1925.
- [63] 刘卫东. 改性聚丙烯纤维混凝土的工程性能研究[D]. 上海:东华大学,2010.
- [64] 牛荻涛,王家滨,丁莎. 水化龄期对喷射混凝土微观结构和力学性能影响研究[J]. 混凝土, 2015(6):58-62,65.
- [65] Kim J K, Kim J S, Ha G J, et al. Tensile and fiber dispersion performance of ECC (engineered cementitious composites) produced with ground granulated blast furnace slag[J]. Cement Concrete Research, 2007, 37(7):1096-1105.
- [66] 牛恒茂,武文红,邢永明,等. 水灰比对 PVA 纤维增强水泥基复合材料性能和显微结构的影响[J]. 复合材料学报,2015,32(4):1067-1074.
- [67] 赵颖,王悦. 基体组成对 PVA 纤维增强水泥砂浆弯曲性能的影响[J]. 北方交通,2015(7):93-96,99.
- [68] 郭丽萍,陈波,孙伟,等. 骨料类型及纤维对高延性水泥基复合材料性能的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版),2017,47(6):1221-1226.
- [69] 畅祥祥,刘松辉,张程,等. 胶砂比对低钙固碳胶凝材料砂浆碳化硬化性能的影响[J]. 功能材料,2022,53(4):4142-4149.
- [70] Chan Y W, Chu S H. Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete[J]. Cement Concrete Research, 2004,34(7):1167-1172.
- [71] 吴泽媚. 超高性能混凝土中纤维与基体界面粘结性能多尺度研究[D]. 长沙:湖南大学,2017.
- [72] 梅迎军,王召兵,代超. 硅灰对钢纤维-水泥石界面黏结强度影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2017,36(1):24-29,116.
- [73] 马鹏. 复合型掺合料高性能混凝土抗碳化性能的研究[D]. 南京:南京林业大学,2012.
- [74] 丑凯. 超高性能混凝土堆积密实度和火山灰效应量化研究[D]. 长沙:湖南大学,2010.
- [75] 陈强. 加载速率对超高韧性水泥基复合材料基本力学性能的影响[D]. 大连:大连理工大学,2014.
- [76] Boshoff W P, Mechtcherine V, Zijl G. Characterising the time-dependant behaviour on the single fibre level of SHCC: Part 2: The rate effects on fibre pull-out tests [J]. Cement and Concrete Research, 2009,39(9):787-797.
- [77] Wang Pan, Qiao Gang, Zhang Yue, et al. Molecular dynamics simulation study on interfacial shear strength between calcium-silicate-hydrate and polymer fibers[J]. Construction and Building Materials, 2020, 257:119557.
- [78] 王锐,杨春雷,杨曦,等. 芳纶纶水洗丝在不同热拉伸温度下的结构性能变化[J]. 合成纤维,2012,41(10):5-11.
- [79] 李丹,何锐,王帅,等. PVA 纤维增强水泥基复合材料高温性能研究[J]. 硅酸盐通报,2015,34(6):1604-1610.
- [80] 朱德举,欧云福. 应变速率和温度对玄武岩纤维束力学性能的影响[J]. 建筑材料学报,2016,19(4):742-745.
- [81] 秦卫兵. 聚乳酸纤维在不同温度下的力学性能研究[J]. 上海纺织科技,2006,34(12):60-61.
- [82] 杨亚男. 变温条件下生态型高延性水泥基复合材料多尺度本构关系与设计理论[D]. 南京:东南大学,2017.
- [83] 林建辉,余江滔,LI Victor C. PVA 纤维增强水泥基复合材料热处理后的力学性能[J]. 复合材料学报,2016,33(1):116-122.
- [84] 王珊珊. 高温养护对水泥-超细粉煤灰复合胶凝材料微观结构及宏观性能的影响研究[D]. 泰安:山东农业大学,2016.
- [85] 王振波,韩硕,孙鹏,等. 混杂纤维 ECC 高温后力学特性与微观结构变化[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2021,49(5):74-79.
- [86] 邓嘉骏. 化学-力学耦合作用下海工混凝土劣化规律与机理研究[D]. 南京:东南大学,2015.
- [87] 张晓佳,张高展,孙道胜,等. 水泥基材料硫酸盐侵蚀机理的研究进展[J]. 材料导报,2018,32(7):1174-1180.
- [88] 王小刚. 氯离子在水泥基材料传输过程中的结合及微观结构研究[D]. 长沙:湖南大学,2013.
- [89] 韦建刚,陈荣,黄伟,等. 海砂 UHPC 水化微结构演变及其固氯作用[J]. 东南大学学报(自然科学版),2022,52(1):90-99.
- [90] 罗云烽,李阳,肇研,等. 国产 T800 级碳纤维表面特性及其复合材料微观界面性能[J]. 材料工程,2014(9):83-88.
- [91] 张璇. 硫酸盐侵蚀环境下混凝土断裂性能试验研究[D]. 大连:大连理工大学,2019.
- [92] Sehaj Singh, Arun S, Richard B, et al. Pullout behavior of polypropylene fibers from cementitious matrix[J]. Cement Concrete Research, 2004,24(10):1919-1925.

- [4] 杨 勇, 聂建国, 杜明珠, 等. 闭口型压型钢板-混凝土组合板疲劳性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(12):35-41.
- [5] 贺细坤, 吴健花. 钢-混凝土组合桥面板疲劳性能分析[J]. 广东建材, 2006(7):10-12.
- [6] Hyeong-Yeol Kim, Youn-Ju Jeong. Ultimate strength of a steel-concrete composite bridge deck slab with profiled sheeting[J]. Engineering Structures, 2010, 32(2):534-546.
- [7] 杨 勇, 周现伟, 薛建阳, 等. 带钢板-混凝土组合桥面板的组合梁疲劳性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(6):123-131.
- [8] 周现伟, 杨 勇, 霍旭东, 等. 带组合桥面板的组合梁受弯承载能力试验[J]. 广西大学学报:自然科学版, 2011, 36(4):547-555.
- [9] Carbonari S, Gara F, A. Dall'Asta, et al. Shear connection local problems in the seismic design of steel-concrete composite decks [C]//Proceedings of Italian Concrete Days 2016, Italy: Università Politecnica delle Marche, 2016:341-354.
- [10] 董自亮. 车辆荷载作用下压型钢板-混凝土组合桥面板受力特性和疲劳性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.
- [11] 杨 勇, 周丕健, 聂建国, 等. 钢板-混凝土组合桥面板静力与疲劳性能试验[J]. 中国公路学报, 2009, 22(4):78-83, 107.
- [12] Hyeong-Yeol Kim, Youn-Ju Jeong, et al. Steel-concrete composite deck for PSC girder bridge[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2005, 9(5):385-390.
- [13] Youn-Ju Jeong, Hyeong-Yeol Kim, Hyun-Bon Koo. Longitudinal shear resistance of steel-concrete composite slabs with perfbond shear connectors[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(1):81-88.
- [14] 聂建国, 赵 洁. 钢板-混凝土组合简支梁的试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(12):28-34.
- [15] 杨 勇, 祝 刚, 周丕健, 等. 钢板-混凝土组合桥面板受力性能与设计方法研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(12):135-141.
- [16] Redzuan Abdullah, Easterling W S. New evaluation and modeling procedure for horizontal shear bond in composite slabs[J]. Journal Constructional Steel Research, 2009, 65(4):891-899.
- [17] 单玉麟, 宗周红, 李佳奇, 等. 正交异性钢板-混凝土连续组合桥面板抗弯性能分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023, 53(2):229-241.
- [18] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- [19] 过镇海. 混凝土的强度和本构关系原理与应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2004.
- [20] 刘劲松, 刘红军. ABAQUS 钢筋混凝土有限元分析[J]. 装备制造技术, 2009(6):69-70, 107.

(上接第 79 页)

- [93] 徐程勇. 硫酸盐侵蚀下聚丙烯粗纤维与水泥基体粘结机理研究[D]. 西安:西安理工大学, 2021.
- [94] 李 华. 硫酸盐侵蚀下水泥基材料微结构演变的测试与分析研究[D]. 南京:东南大学, 2012.
- [95] 张晓佳. 弱碱环境下硫酸盐侵蚀水泥石中 C-S-H 凝胶结构的形成与演变[D]. 合肥:安徽建筑大学, 2019.
- [96] 胡晨光. 温度和硫酸盐侵蚀对粉煤灰水泥浆体 C-S-H 微结构的影响研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2014.
- [97] 王佳林. 硫酸盐-氯盐耦合作用下混凝土耐久性试验分析及数值模拟[D]. 南京:南京理工大学, 2018.
- [98] 黄 谦. 电场与硫酸盐共存环境中水泥基材料的劣化及其机理研究[D]. 重庆:重庆大学, 2017.
- [99] 胡晨光, 王 娟, 白瑞英, 等. 氯离子侵蚀下水泥浆体中铝离子配位分布机理[J]. 功能材料, 2018, 49(6):6206-6212.
- [100] Chan Y W, Li V C. Effects of transition zone densification on fiber/cement bond strength improvement[J]. Advanced Cement Based Materials, 1997, 5(1):8-17.
- [101] 胡 杰, 徐礼华, 邓方茜, 等. 聚丙烯纤维增强水泥基复合材料界面过渡区的纳米力学性能[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(2):268-278.
- [102] Sun Wei, Mandel J A, Said S. Study of the interface strength in steel fiber-reinforced cement-based composites[J]. Journal of the American Concrete Institute, 1986, 83(4):597-605.
- [103] Igarashi S, Bentur A, Mindess S. The effect of processing on the bond and interfaces in steel fiber reinforced cement composites[J]. Cement Concrete Composites, 1996, 18(5):313-322.
- [104] 黄 新, 陈志源. 聚丙烯纤维水泥复合材料的界面研究[J]. 上海建材, 2006(6):14-15.