

防火水泥基复合材料的制备及其与钢构件协同工作性能

林建辉¹, 余江滔², 商兴艳³

(1. 厦门大学嘉庚学院土木工程学院, 福建 漳州 363105; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092;
3. 山东建筑大学土木工程学院, 济南 250101)

摘 要: 使用国产原材料, 制备轻质高延性水泥基复合材料作为防火涂料(FR-ECC), 论证了 FR-ECC 作为防火涂料的可行性。通过轴拉试验和轴压试验研究不同配合比 FR-ECC 的力学性能, 并利用四点弯曲梁试验研究 FR-ECC 与钢构件协同工作性能。结果表明: 3 种配方的 FR-ECC 均具有多裂缝开裂和应变强化的特征, 平均抗拉强度 1.30 MPa, 平均极限应变 1.93%。轴压试验显示: 材料具有良好的受压变形能力, 平均抗压强度 3.99 MPa; 适当增加纤维掺量可以提升其拉、压力学性能。四点弯曲梁试验表明: 涂层越薄越能适应较大的弯曲变形; 在涂层厚度不大于 10 mm 时, FR-ECC 随钢梁变形会产生细小裂缝, 而不会起层或剥落。FR-ECC 在复杂应力下具备与钢构件协同变形的能力。

关键词: 防火水泥基复合材料; 应变强化; 协同变形; 界面剥离

中图分类号: TU502+6 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)05-1355-08
网络出版时间: 2022-11-28



Preparation of Fire-Resistive Engineered Cementitious Composites and Its Cooperative Deformation Performance with Steel Member

LIN Jianhui¹, YU Jiangtao², SHANG Xingyan³

(1. College of Civil Engineering, Xiamen University Tan Kah Kee College, Zhangzhou 363105, Fujian, China;
2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. College of Civil Engineering,
Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: Lightweight and high ductility cementitious composite was developed as a fire-resistive coating (FR-ECC) with domestic raw materials. The feasibility of FR-ECC as fire-resistive coating was demonstrated. The mechanical properties of FR-ECC with different proportions were investigated via axial tensile test and compressive test. The cooperative deformation performance of FR-ECC and steel member was determined via four-point bending beam test. The results indicate that FR-ECC with three proportions has the characteristics of multi-cracking and strain-hardening with an average tensile strength of 1.30 MPa and an average strain capacity of 1.93%. The results of compressive test show a high compressive deformation capacity of FR-ECC with an average strength of 3.99 MPa. The tensile and compressive properties can be enhanced by increasing the fiber content. According to the results of the four-point bending beam test, FR-ECC can adapt to a larger bending deformation as the coating thickness decreases. When the coating thickness is no more than 10 mm, FR-ECC can produce some fine cracks with the deformation of the steel beam instead of delaminating or falling off. FR-ECC has a capability of cooperative deformation with steel member under a complex stress.

Keywords: fire-resistive engineered cementitious composite; strain-hardening; cooperative deformation; interface debonding

建筑钢材因其强度高、延性好而广泛应用于建筑结构中。然而, 由于钢材耐火性较差, 火灾造成钢结构房屋倒塌的事件屡见不鲜, 因此钢结构在设

计时不仅要求安全可靠、经济耐用, 还应具有较强的抗火性能。普通厚型防火涂料因其质量轻、耐火等级高、性能稳定、施工方便以及经济性好等优点

收稿日期: 2022-04-18。 修订日期: 2022-05-27。

基金项目: 福建省中青年教育科研项目(JAT191083); 国家自然科学基金项目(51478362); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51908339)。

第一作者: 林建辉(1989—), 男, 硕士, 讲师。

通信作者: 余江滔(1975—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2022-04-18. Revised date: 2022-05-27.

First author: LIN Jianhui (1989—), male, Master, Lecturer.

E-mail: jianhui@xujc.com

Correspondent author: YU Jiangtao (1975—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: yujiantao@tongji.edu.cn

被广泛应用于钢结构防火。然而, 由于普通厚型防火材料呈脆性, 延性较低, 抗拉、抗压强度也非常有限, 当钢结构遭受环境侵蚀、冲击荷载、地震作用以及火灾作用时会产生较大的变形, 防火保护层会出现大裂缝甚至分层或剥落, 导致防火功能弱化甚至丧失。例如, 9.11 中世界贸易中心双塔大厦坍塌的一部分原因就在于冲击导致防火涂料失效^[1-2]。

为了克服传统厚型防火涂料的不足, 现引入一种具有超高延性的防火保护材料(ECC)。ECC 是一种基于微观力学原理设计的纤维增强水泥基复合材料。普通的 ECC 由纤维、水泥、粉煤灰、砂、水和减水剂等组成。品质合格的 ECC 具有拉伸应变强化和多裂缝开裂等力学性能, 极限拉伸状态下裂缝宽度控制在 100 μm 以下^[3-5]。防火水泥基复合材料(FR-ECC)是在其基础上开发的新型品种, 既具有绝热性, 又具有 ECC 材料超高极限拉应变、应变强化和多缝开裂的共性。当钢结构受到严重冲击或火灾作用发生较大变形时, FR-ECC 可以与钢结构协同工作, 而不会出现大裂缝、起层或是脱落。即使产生裂缝, 其平均宽度不超过 100 μm , 仍能避免火焰直接作用于钢材, 从而能在后续的火灾中继续发挥保护作用。

Li 等^[6-7]利用 PVA 纤维、蛭石、水泥等原材料研发的 ECC 防火保护材料具有普通厚型轻质防火材料的特点, 其密度在 560~860 kg/m^3 , 比热容约 930 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, 热传导系数与普通水泥基防火材料相近, ECC 防火材料的抗拉强度可超过 2.0 MPa, 极限应变可达 2%, 表现出良好的抗拉能力和延性。Li 等^[7]通过落锤冲击试验研究 ECC 防火涂料的抗冲击性能, 结果表明: ECC 防火涂料在连续 12 次冲击下, 除表面出现微裂纹外, 材料完整性较好, 而不会出现像传统防火涂料的破裂、分解和起层现象。Zhang 等^[6]通过 I 型断裂试验和轴拉试验表明: 丙烯酸乳胶作为外加剂掺入 FR-ECC 后, 其基体与钢板界面黏结能提高 54%, 但会显著降低 FR-ECC 的拉伸强度和延性; 同时通过单悬臂钢片的剥离试验测得 FR-ECC 基体与钢板界面断裂能是传统中密度防火涂料与钢板界面的 3 倍, 与传统防火涂料比 FR-ECC 基体的断裂韧性较高, 在拉应力作用下破坏模式偏向于界面黏结破坏, 而不是涂层基体破坏。关于轻质高延性的 ECC, 其他国内外学者也做了相关研究, Wang 等^[8]通过引入气泡, 掺入聚合物微珠、轻质珍珠岩和玻璃微珠等 4 种方法减轻 ECC 的自重。掺入玻璃微珠的 ECC 的力学性能较为突出, 纤维掺量 2% 的轻质 ECC 拉伸应变可达 4%, 抗

拉强度为 4 MPa, 密度为 1 450 kg/m^3 。黄振宇等^[9]用聚乙烯(PE)纤维、空心微珠制得超轻质高延性水泥基材料(ULHDCC), 其密度在 850~920 kg/m^3 。1% 纤维掺量的 ULHDCC 平均拉伸应变 6%, 抗拉强度在 2.9 MPa, 导热系数仅为 0.152 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。丁聪等^[10]用发泡的方式制得轻质保温高延性 ECC, 干密度约 1 150 kg/m^3 , 拉伸延性约 0.8%, 抗压强度等级达 C20, 导热系数在 0.08~0.10 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

Li 等^[6-7]在拉伸性能、热工性能以及抗冲击性等方面的研究初步论证了 FR-ECC 作为防火涂料的可行性。在目前的研究中, 多数学者们对于轻质 ECC 的研究集中在结构材料和墙体材料的应用上, 少有关对轻质高延 ECC 用于钢结构抗火保护进行研究。关于 FR-ECC 在静载下与钢构件的协同工作性能的研究也非常少。因此, 本工作基于微观力学原理^[11], 制备国产化的 FR-ECC, 并研究 FR-ECC/钢梁体系在复杂应力状态下界面破坏情况, 检验 FR-ECC 与钢构件协同工作的有效性。

1 理论分析

Li 等提出, ECC 要实现多裂缝开裂, 需满足的稳态开裂能量准则和初裂强度准则^[12-14]。稳态开裂准则认为, 为了实现裂纹的稳定扩展, 基体断裂能(J_{tip})必须小于裂缝张开位移关系 $\sigma(\delta)$ (图 1, σ_{ss} 为稳态开裂应力; δ_{ss} 为 σ_{ss} 对应开裂宽度)中计算的最大余能(J'_b)^[14], 即

$$J_{\text{tip}} < \sigma_{\text{oc}} \delta_{\text{oc}} - \int_0^{\delta_{\text{oc}}} \sigma(\delta) d\delta \equiv J'_b \quad (1)$$

$$J_{\text{tip}} = \frac{K_m^2}{E_c} \quad (2)$$

式中: σ_{oc} 为最大桥接应力; δ_{oc} 为 σ_{oc} 对应开裂宽度; K_m 为基体的断裂韧性; E_c 为材料的弹性模量。由式 (1) 可知, J'_b/J_{tip} 比值越大, ECC 越容易实现裂纹的稳定扩展。

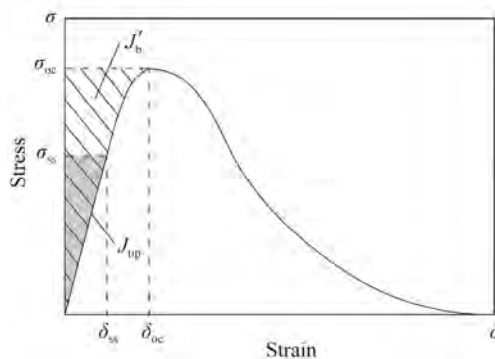


图 1 典型的拉伸应变强化 σ - δ 曲线^[13]

Fig. 1 Typical tensile strain-hardening σ - δ curve^[13]

当纤维与基体界面黏结强度不足时, 纤维过早被拔出, 会使 σ_{oc} 降低。当纤维与基体界面黏结强度过大时, 纤维易拉伸断裂, 导致裂缝宽度变小。以上 2 种情况, 都会降低 J'_0 。Li 等^[11]研究认为: 当余能过小时, 易形成控制裂缝, 产生应变软化现象; 当余能较大时, 裂纹稳定向前发展, 易产生多裂缝开裂。因此, FR-ECC 配合比设计时, 应处理好纤维强度和纤维与基体界面黏结性能的关系, 以获得较大的余能。

要保证 ECC 稳定的多裂缝开裂, 需要满足强度准则: 基体产生的初始开裂强度(σ_{cr})应小于纤维的 σ_{oc} ^[14], 即

$$\sigma_{cr} < \sigma_{oc} \quad (3)$$

FR-ECC 作为防火涂料, 掺入较多的轻质骨料, σ_{cr} 较低, 这对于满足初裂强度准则是有利的。相对较低的 σ_{cr} 和较高的 σ_{oc} 能使 FR-ECC 更容易产生裂缝。对于 FR-ECC, 为满足初裂强度准则可以从提高 σ_{oc} 入手。因此, 可通过适当地增加纤维掺量, 改善纤维与基体的界面性能, 合理搅拌使纤维在基体均匀分布等方法提高纤维的 σ_{oc} ^[11,15], 使强度准则更容易满足。

2 实验

2.1 FR-ECC 配合比设计

FR-ECC 的制备, 需实现以下性能目标: 轻质、低导热性、高拉伸延性。为实现轻质、低导热性, 可通过掺入轻质、多孔的骨料实现。研究表明, 选用粒径较小的粉末状原材料(粒径小于 75 μm), 有利于提高 ECC 的黏稠度, 促使纤维在拌合物中的分散^[16], 而且, 根据微观力学原理, 粒径较小、形状光滑的骨料会降低基体的断裂韧度, 有利于实现多缝开裂和应变强化^[11-12]。故选用上海向岚化工有限公司的空心玻璃微珠(粒径为 20~120 μm)作为轻质骨料, 玻璃微珠是空心、薄壁、坚硬的硅酸盐类球体, 不溶于水, 密度 200 kg/m^3 , 软化温度 600 $^{\circ}\text{C}$, 抗压强度 3.5 MPa, 轻质、耐高温、热传导系数低, 具有良好的隔热作用。FR-ECC 掺入较多的轻质骨料, 基体强度较低, 而聚乙烯醇(PVA)纤维具有亲水性, 在纤维与基体界面不仅有摩擦黏结, 还具有很强的化学黏结, 可避免纤维被过早拔出, 有利于充分发挥纤维的桥接作用^[17], 故选用 PVA 纤维作为增强材料。PVA 纤维由福建宝华林公司生产, 长度 12 mm, 直径 30~40 μm , 拉伸强度 1 250 MPa, 断裂伸长率 6.9%。FR-ECC 的胶凝材料体积占比较小,

拌合物稠度较低, 采用粉末状羟丙甲纤维素增稠剂增加拌合物的稠度, 促使纤维均匀分散, 可提高 FR-ECC 的最大桥接应力和余能。

经多次试拌, 反复调整水灰比、轻质骨料和外加剂的掺入量, 得到纤维均匀分散、和易性较好的拌合物, 配合比如表 1 所示。制备 3 种配合比的 FR-ECC, 纤维体积占比分别为 1.0%、1.5%和 2.0%。FR-ECC 的原材料除上述的空心玻璃微珠、PVA 纤维和增稠剂外, 还包括水泥、粉煤灰、水和减水剂。水泥采用由南京小野田水泥厂提供的 PII.42.5 硅酸盐水泥。粉煤灰由南京华能电厂提供。减水剂采用上海市三瑞公司提供的聚羧酸类减水剂。

表 1 FR-ECC 的配合比
Table 1 Mix proportion of FR-ECC

Sample No.	Mix proportion/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)						
	Cement	FA	PVA	GB	Water	ADVA	Thickener
FR-ECC-1.0	330	108	13.0	140	417	7	0.7
FR-ECC-1.5	330	108	19.5	140	417	7	0.7
FR-ECC-2.0	330	108	26.0	140	417	7	0.7

FA: Fly ash; PVA: Polyvinyl alcohol; GB: Glass bead; ADVA: Superplasticizer (ADVA-152).

2.2 加载试验

本研究包括哑铃型试件拉伸试验、立方体试块轴压试验和双材料四点弯曲梁试验。轴拉试验和轴压试验有 3 种工况(纤维掺量 1.0%、1.5%和 2.0%), 每种工况有 5 个哑铃型试件和 4 个立方体试块; 哑铃型试件参考 JSCE 的规范设计而成^[18], 其测试段是 80 mm×30 mm×15 mm 的长方体; 轴压试件采用边长为 50 mm 的立方体试块。在钢板表面涂抹 1 层界面剂, 选用纤维掺量 2%的 FR-ECC 浇筑于钢板表面, 制成 FR-ECC/钢梁双材料四点弯曲梁试件; FR-ECC 涂层尺寸为 170 mm×50 mm× t mm, 厚度 t 分为 5 种工况(5、10、15、20 mm 和 30 mm), 每种工况 3 个试件; 钢板采用热轧 Q235 钢材, 尺寸为 410 mm×50 mm×6 mm。试件浇筑好标准养护 28 d 后进行力学试验。

在力学试验前, 随机抽取若干试件, 测出质量和体积, 得到 FR-ECC 的表观密度仅有 566.4 kg/m^3 , 小于 GB 14907—2018《钢结构防火涂料》规范中室外钢结构防火涂料的密度限值(650 kg/m^3)^[19]。

哑铃型试件轴拉试验在 LDS-5 拉力机上进行, 位移加载速率为 0.2 mm/min; 在试件两侧安装 2 个杆式位移计测量标距 80 mm 范围内的拉伸变形, 计

算时取两者平均值。使用 MTS 公司的双立柱万能试验机对立方体试块施加轴向压力，位移加载速率为 0.5 mm/s。四点弯曲梁试验在 MTS 公司的双立柱万能试验机上进行，支座间距 360 mm，加载点到支座的距离 80 mm，位移加载速率为 1.2 mm/min。采用数字图像相关技术(DIC)记录 FR-ECC 涂层的破坏模式和界面剥离的过程。加载前，在试件表面先后喷涂白色和黑色的油漆，形成黑白相间的散斑点；加载时，设置相机每 10 s 自动采集 1 张照片，直至 FR-ECC 涂层完全剥离或每分钟剥离长度小于 1 mm 时结束；采用 VIC-2D 软件进行图像处理获得试件的应变和位移。

3 结果与讨论

3.1 哑铃型试件拉伸试验

拉伸过程中，可以观察到 FR-ECC 表面多裂缝的产生和发展。不同的是 FR-ECC-2.0 裂缝最多，FR-ECC-1.5 的次之，FR-ECC-1.0 的最少。卸载后，试件表面难以观察到裂缝的存在，用水润湿后可以清楚观察到裂缝的分布(图 2)。试件拉伸应力-应变曲线如图 3 所示。

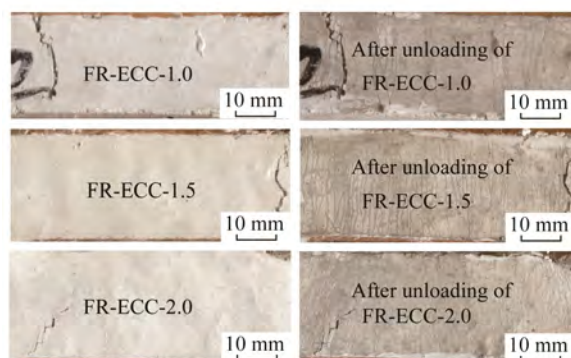


图 2 哑铃型试件拉伸后的裂缝分布

Fig. 2 Crack distribution of dumbbell specimen after tension

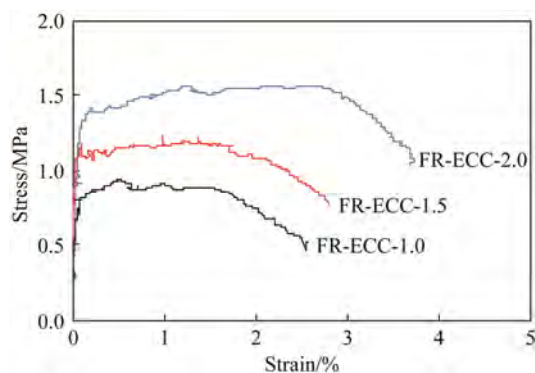


图 3 典型的 FR-ECC 应力-应变曲线

Fig. 3 Typical stress-strain curves of FR-ECC

起初 FR-ECC 处于弹性阶段，应力-应变呈线性关系；接着 FR-ECC 进入应变强化阶段，试件表面裂缝稳定发展；加载后期控制裂缝产生，拉伸试件进入应变软化阶段，最终试件被拉断。图 4 和图 5 比较了不同纤维掺量的 FR-ECC 的力学性能指标。对于 FR-ECC-1.0、FR-ECC-1.5 和 FR-ECC-2.0，极限应力分别为 0.99、1.28 MPa 和 1.77 MPa；极限应变分别为 1.03%、2.48% 和 2.73%；开裂应力分别为 0.70、0.96 MPa 和 1.41 MPa；开裂应变分别为 0.90%、1.01% 和 1.27%。可见，当纤维掺量不超过 2% 时，试件的极限应力、极限应变、开裂应力和开裂应变均随着纤维掺量的增加而提高。总体上，3 种配合比的 FR-ECC 均具有良好的拉伸力学性能，特别是具有良好的拉伸变形能力，意味着 FR-ECC 具备与钢构件协同变形的潜质。

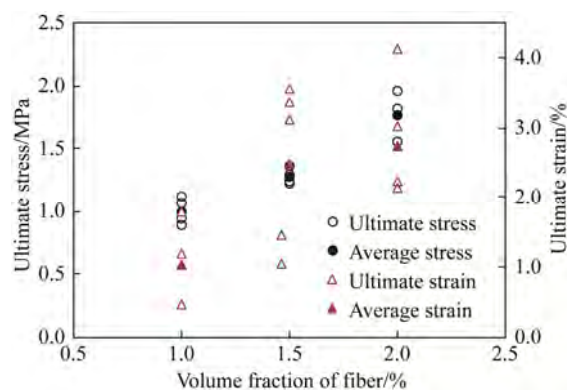


图 4 极限应力、极限应变及平均值与纤维掺量的关系曲线

Fig. 4 Ultimate stress, ultimate strain and corresponding average value vs. fiber content

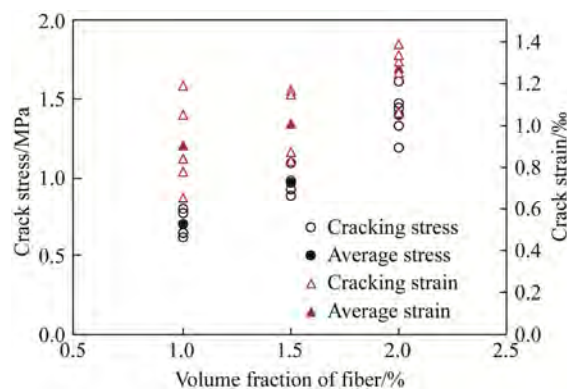


图 5 开裂应力、开裂应变及平均值与纤维掺量的关系曲线

Fig. 5 Cracking stress, cracking strain and corresponding average value vs. fiber content

3.2 立方体试块轴压试验

受压过程中，FR-ECC 保持较为完整(图 6)，峰

值应力后不会出现像混凝土压溃或崩离的现象, 随着变形增加仍能承受较大荷载, 表现出良好的受压变形能力。抗压强度、抗压强度对应的应变随纤维掺量的关系曲线如图 7 所示。由图 7 可知, FR-ECC-1.0、FR-ECC-1.5 和 FR-ECC-2.0 的极限抗压强度分别为 2.48、4.37 MPa 和 5.13 MPa; 极限强度对应的应变分别为 1.83%、2.02%和 2.35%。制备的 FR-ECC 具有良好的抗压变形能力, 纤维掺量的增加可以提升其抗压强度和抗压变形能力。



图 6 FR-ECC 立方体受压破坏形态

Fig. 6 Failure mode of FR-ECC cube specimen

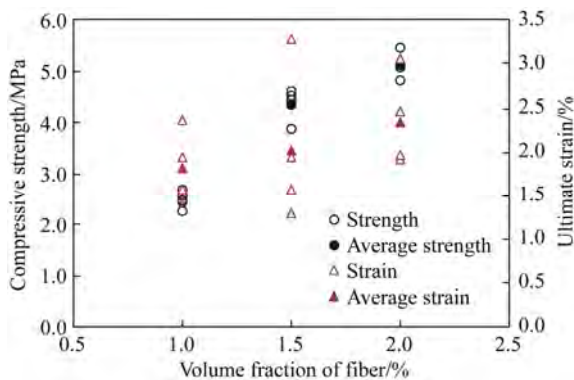


图 7 抗压强度、抗压强度对应的应变及平均值与纤维掺量的关系曲线

Fig. 7 Compressive strength, ultimate strain and corresponding average value vs. fiber contents

3.3 双材料四点弯曲梁试验

3.3.1 界面剥离的判断 观察试验现象可知, FR-ECC/钢梁界面剥离从左右两端开始, 并逐渐向中间扩展。在 DIC 处理的图像中, 选取 AB 段进行分析, 如图 8 所示。当界面完好时, 输出的位移值是连续的; 如果界面剥离, 输出的位移值会发生突变。据此原理, 就可以有效地判断出界面剥离的时刻, 避免直接肉眼观察的主观性。提取界面剥离时

刻钢梁的跨中挠度和界面剥离的开口距离(即 A、B 2 点的位移之差), 如表 2 所示。由表 2 可知, 对大部分试件, FR-ECC-钢梁界面左右两端发生剥离

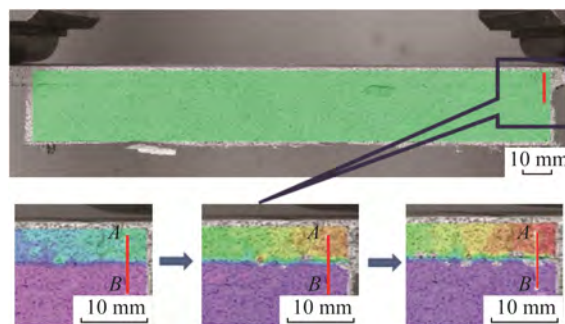


图 8 界面剥离过程中的位移云图

Fig. 8 Nephogram of displacement during interface debonding

表 2 各个试件发生剥离时的跨中挠度和开口位移

Table 2 Mid-span deflection and opening displacement of each specimen during peeling

Sample No.	Deflection/mm	Displacement/mm	Average deflection/mm	Average displacement/mm
05-01L	25.73	0.17	27.75	0.11
05-01R	18.63	0.09		
05-02L	30.53	0.05		
05-02R	43.12	0.14		
05-03L	18.96	0.07		
05-03R	29.52	0.13		
10-01L	4.42	0.16	7.09	0.15
10-01R	4.74	0.10		
10-02L	14.00	0.15		
10-02R	5.50	0.19		
10-03L	4.89	0.17		
10-03R	9.00	0.11		
15-01L	2.63	0.13	1.71	0.18
15-01R	0.58	0.25		
15-02L	1.65	0.21		
15-02R	2.25	0.16		
15-03L	1.43	0.17		
15-03R	1.72	0.15		
20-01L	0.31	0.10	1.62	0.14
20-01R	4.75	0.16		
20-02L	0.58	0.15		
20-02R	1.16	0.22		
20-03L	2.68	0.13		
20-03R	0.22	0.09		
30-01L	0.77	0.16	1.27	0.17
30-01R	0.77	0.18		
30-02L	3.54	0.14		
30-02R	0.38	0.19		
30-03L	1.51	0.21		
30-03R	0.67	0.18		

In 05-01L/R: 05 means Coating thickness; 01 means No. of specimen; L means left; R means right.

时钢梁跨中挠度比较接近, 可以认为, 界面起始剥离左右对称, 这与瓮文芳^[20]的有限元分析结果一致; 涂层厚度由大到小, FR-ECC/钢梁界面发生剥离时钢梁跨中挠度的平均值分别为 1.27、1.62、1.71、7.09 mm 和 27.75 mm, 说明涂层越薄, 界面越不容易发生剥离; 对于不同涂层厚度的试件, 界面发生剥离时的开口位移相差较小, 维持在 0.15 mm 左右。因此, 可用开口位移为 0.15 mm 作为判断的依据, 定量地判断界面是否发生剥离。

3.3.2 界面剥离度分析 现引入参数 β 表示界面的剥离程度, 表达式如下:

$$\beta = (l_1 + l_2) / L \quad (4)$$

其中: L 表示界面初始黏结长度, 即 FR-ECC 的长度; l_1 、 l_2 分别表示界面左右 2 端的剥离长度。绘制各试件剥离度 β 与钢梁跨中挠度的关系图(图 9)。

观察可知, 各个试件界面发生剥离之后, 剥离度 β 逐渐增大, 但增加的速度逐渐减缓; 对涂层厚度为 5、10 mm 的试件, 加载到后期, 剥离度基本不变, 当钢梁挠度分别达到 55.4 mm 和 67.1 mm 时 (分别为梁跨度的 1/6.5, 1/5.4), 剥离度分别维持在 0.27、0.75, 涂层不会完全剥离钢梁, 仍与钢梁保持较好的黏结(图 10); 而对厚度为 15、20、30 mm 的

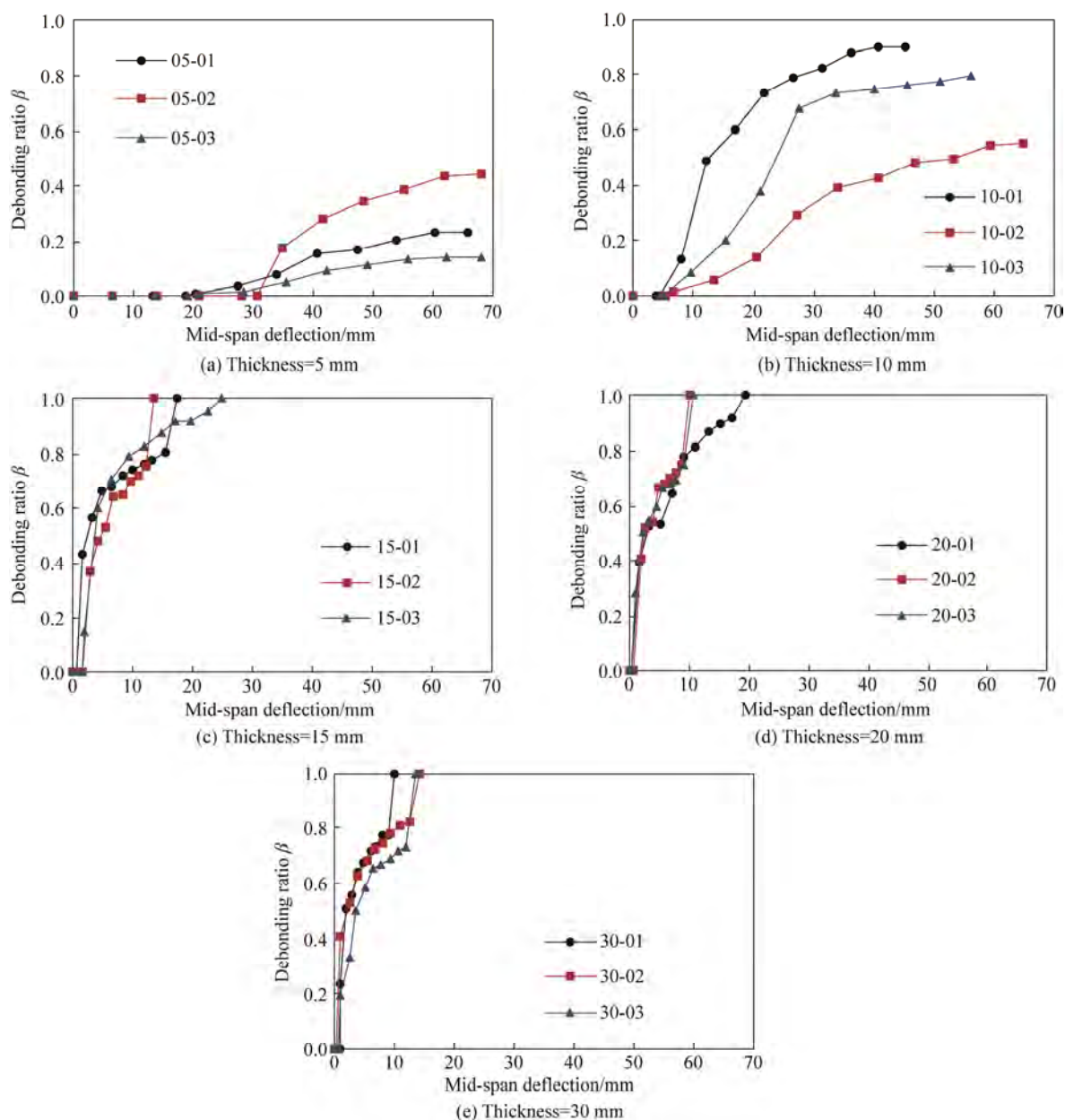


图 9 FR-ECC/钢梁体系的剥离度 β 与钢梁跨中挠度的关系曲线

Fig. 9 Debonding ratio β of FR-ECC/steel system vs. mid-span deflection of steel beam



图 10 卸载后 FR-ECC 涂层破坏形态

Fig. 10 Failure mode of FR-ECC coating after test

试件, 加载到最后时刻, 剥离度迅速增加到 1, 涂层完全剥离。观察加载结束后 FR-ECC 表面(图 10), 涂层 5 mm 的试件 FR-ECC 表面可以看见大量的细小裂缝, 10 mm 厚的试件也出现多缝开裂, 但裂缝数量较少, 涂层厚为 15 mm 及以上的试件并未观察到横向裂缝; 而且所有厚度的涂层均未发生起层或破碎, 说明 FR-ECC 防火涂层在较大变形时仍能保持其完整性。结果表明, 在涂层厚度为 5~10 mm, FR-ECC 能与钢梁协同变形而不发生剥落或起层; 涂层越薄, FR-ECC 越能承受较大变形。

3.4 讨论与分析

在拉伸力学试验中, 纤维掺量提高, 拉伸力学性能提升。这种现象可解释如下: 在 FR-ECC 基体开裂之前, 假设纤维与基体之间没有相对滑动, 两者协同变形, 即纤维与基体应变相等。相同截面上的应力由纤维和基体按刚度比例分担。此时, 拉伸荷载 F 表示为:

$$F = A_f \sigma_f + A_m \sigma_m = A_f E_f \varepsilon_f + A_m E_m \varepsilon_m \quad (5)$$

式中: A_f 、 σ_f 、 E_f 、 ε_f 分别表示某截面处纤维的等效面积、应力、弹性模量及应变; A_m 、 σ_m 、 E_m 、 ε_m 分别表示基体的面积、应力、弹性模量及应变。由式(5)可知, 基体开裂前, 在基体相同的情况下, 即 A_m 、 E_m 和开裂应变 ε_{mc} 相同时, 开裂时的荷载 F_c 与开裂处纤维的有效面积 A_f 成正比。基体中的纤维是随机乱象分布的, 纤维掺量提高, 同一横截面处的纤维的有效面积 A_f 变大。故而纤维掺量增加, FR-ECC 开裂应力、开裂应变均有所提高。当 FR-ECC 的变形达到一定程度时, 基体会在最薄弱的部位产生裂缝, 之后该截面的基体退出工作, 荷载由纤维承担。随后, FR-ECC 的拉伸性能由纤维控制。研究表明^[21-22] ECC 的拉伸力学性能与纤维在基体中的桥连作用有关, 主要由纤维的拉伸强度和纤维与基体的界面性能(化学黏结力和滑移摩擦力)控制。纤维

的强度和纤维与基体界面性能相同, 当纤维的掺量增加时, 会提高开裂处纤维最大桥接力 σ_{oc} 和余能 J'_0 , FR-ECC 的极限应力和极限应变也随之提高。FR-ECC 立方体试块在受压过程中会产生横向变形, 但纤维的桥接力对其横向变形起到约束作用, 纤维掺量增加提升了其抗压强度和变形能力。FR-ECC 掺入较多的玻璃微珠, 其强度低于传统 ECC 的骨料(细砂), 而且水泥掺入量相对较少, 因此 FR-ECC 抗压强度远低于常规 ECC。

FR-ECC 防火涂料附着于钢材表面, 钢材通过界面黏结作用将拉、压应力传递给防火涂料, 使其协同受力。材性试验表明, FR-ECC 具有良好的延性和多缝开裂的特征, 使 FR-ECC 涂层在界面黏结良好时能与钢梁一起弯曲变形。5 mm 和 10 mm 的 FR-ECC 涂层较薄, 更容易在弯曲过程中产生裂缝, 使 FR-ECC/钢梁界面不易产生应力集中。涂层在剥离前能承受较大的弯曲变形, 界面剥离后剥离度发展较慢, 而且不易完全剥离。对于涂层厚度 15~30 mm 的试件, 在钢梁弯曲变形时, 因涂层较厚不易开裂; 而且涂层越厚, 其弯曲刚度越大, 黏结界面越容易产生应力集中。试验过程中涂层越厚的试件界面剥离越早, 剥离速度越快, 涂层越容易完全剥离。

4 结论

1) 使用国产 PVA 纤维和空心玻璃微珠制备的 FR-ECC 表观密度仅为 566.4 kg/m^3 , 具有多缝开裂和拉伸应变强化的特征。抗拉强度在 0.99~1.77 MPa, 拉伸极限应变在 1.03%~2.73%, 平均抗压强度为 3.99 MPa, 极限强度对应的平均应变为 2.07%, 具有较好的受压变形能力。在纤维掺量不超过 2% 时, 纤维掺量的增加可显著地提升 FR-ECC 的拉、压力学性能。

2) FR-ECC/钢梁界面剥离对涂层厚度比较敏感。涂层越厚, 越容易发生剥离, 剥离发展越快。涂层厚度是决定 FR-ECC 涂层剥离和剥离程度的关键因素之一。对于不同涂层厚度的试件, 界面发生剥离时的开口位移相差较小。

3) 涂层厚度为 5 mm 和 10 mm 的试件, 钢梁跨中挠度分别达 27.75 mm 和 7.09 mm (分别为梁跨度的 1/13 和 1/51) 时, FR-ECC/钢梁界面才开始剥离, 而且 FR-ECC 在与钢梁弯曲变形过程中能产生均匀、细密裂缝, 承受较大变形而不起层或剥落。利用国产原材料制备的 FR-ECC 在复杂应力状态下具备与钢构件协同工作的特性。

参考文献:

- [1] GU L, KODUR V. Role of insulation effectiveness on fire resistance of steel structures under extreme loading events[J]. *J Perform Constr Facil*, 2011, 25(4): 277–286.
- [2] DWAIKAT M, KODUR V. Modeling fracture and delamination of spray-applied fire-resisting materials under static and impact loads[J]. *J Eng Mech*, 2011, 137(12): 901–910.
- [3] LI V C. Engineered Cementitious Composites (ECC)[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2019.
- [4] ZHU B R, PAN J L, NEMATOLLAHI B, et al. Development of 3D printable engineered cementitious composites with ultra-high tensile ductility for digital construction[J]. *Mater Des*, 2019, 181: 108088.
- [5] 朱彬荣, 潘金龙, 周震鑫, 等. 3D 打印高延性水泥基复合材料的单轴受拉和受压行为[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(5): 844–854.
ZHU Binrong, PAN Jinlong, ZHOU Zhenxin, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2021, 49(5): 844–854.
- [6] ZHANG Q, LI V C. Adhesive bonding of fire-resistive engineered cementitious composites (ECC) to steel[J]. *Constr Build Mater*, 2014, 64(12): 431–439.
- [7] ZHANG Q, RAVI R, LI V C. Feasibility study on fire-resistive engineered cementitious composites[J]. *ACI Struct J*, 2014, 111(6): 651–660.
- [8] WANG S, LI V C. Lightweight FR-ECC[C]/HPFRCC-4. Michigan. USA. 2003: 379–390.
- [9] 黄振宇, 隋莉莉, 王芳. 超轻质高延性水泥基材料力学性能研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 51(2): 223–229.
HUANG Zhengyu, SUI Lili, WANG Fang. *J Xi'an Univ Arch Tech (in Chinese)*, 2019, 51(2): 223–229.
- [10] 丁聪, 郭丽萍, 雷东移, 等. 轻质保温高延性水泥基复合材料的拉伸性能与耐久性能[J]. *材料导报*, 2019, 33(5): 1652–1658.
DING Cong, GUO Liping, LEI Dongyi, et al. *Mater Rep (in Chinese)*, 2019, 33(5): 1652–1658.
- [11] LI V C, LEUNG C K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites[J]. *J Eng Mech*, 1992, 118(11): 2246–2264.
- [12] LI V C, WANG S, WU C. Tensile strain-hardening behavior of PVA-ECC[J]. *ACI Mater J*, 2001, 98(6): 483–492.
- [13] YANG E H, LI V C. Strain-rate effects on the tensile behavior of strain-hardening cementitious composites[J]. *Constr Build Mater*, 2014, 52(52): 96–104.
- [14] LI V C. Tailoring ECC for special attributes: A review[J]. *Int J Concr Struct Mater*, 2013, 7(3): 251.
- [15] FUKUYAMA H, MATSUZAKI Y, NAKANO K, et al. Structural performance of beam elements with PVA-ECC[C]/HPFRCC-3. New York. USA. 1999: 531–541.
- [16] 李伟. 超高韧性水泥基复合材料的搅拌方法研究[D]. 大连理工大学, 2009.
LI Wei. The study of mixing methods of engineered cementitious composites (in Chinese, dissertation). Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [17] WU C. Micromechanical tailoring of PVA-ECC for structural applications[D]. Michigan: University of Michigan, 2001.
- [18] JSCE. Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks[S]. Japan. 2008.
- [19] 中国国家标准化管理委员会. GB 14907—2018 钢结构防火涂料[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [20] 瓮文芳. FR-ECC/钢结构界面断裂试验与理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2015.
WENG Wenfang. Experimental and theoretical study on interfacial delamination of FR-ECC/steel system (in Chinese, dissertation). Shanghai: Tongji University, 2015.
- [21] 林建辉, 余江滔, LI V 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.
LIN Jianhui, YU Jiangtao, LI V C. *Acta Mater Compos Sin (in Chinese)*, 2016, 33(1): 116–122.
- [22] BHAT P S, CHANG V, LI M. Effect of elevated temperature on strain-hardening engineered cementitious composites[J]. *Constr Build Mater*, 2014, 69: 370–380.