

RTP-PVA 混杂纤维的工程水泥基复合材料 干缩性能试验研究

陈猛, 洪宇

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 为研究回收轮胎聚合物(recycled tyre polymer, RTP)和聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)混杂纤维对工程水泥基复合材料(engineered cementitious composites, ECC)干缩性能的影响,对 RTP-PVA 混杂纤维总体积分数为 2.0% 的 ECC 进行流动性、直接拉伸和干缩试验,并分析混杂纤维作用机理和干缩计算模型。结果表明:RTP 纤维替代率为 12.5%~50% 对 ECC 流动性影响不大,比单掺 PVA 纤维的 ECC 流动性降低 1.09%~3.69%。ECC 的抗拉强度随 RTP 纤维替代率的增加而降低,不同比例的混杂纤维比单掺 PVA 纤维的 ECC 抗拉强度降低了 23.6%~56.6%。不同比例混杂纤维 ECC 干缩率曲线趋势相近,7 d 时干缩率为 28 d 时的 80.92%~82.77%。ECC 的干缩率随 RTP 纤维替代率的增加而降低,28 d 时不同 RTP 纤维替代率的混杂纤维比单掺 PVA 纤维的 ECC 干缩率降低了 0.80%~2.09%。RTP-PVA 混杂纤维可在 ECC 中协同发挥作用抑制基体干缩,结合试验结果得到适合 RTP-PVA 混杂纤维 ECC 的指数型干缩预测模型。

关键词: 回收轮胎聚合物纤维;聚乙烯醇纤维;工程水泥基复合材料;干缩;预测模型

中图分类号: TU 528.572 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)03-0407-08

Test Study on Drying Shrinkage Properties of Engineered Cementitious Composites with RTP-PVA Hybrid Fibre

CHEN Meng, HONG Yu

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: CHEN Meng, E-mail: cmwhut@163.com)

Abstract: In order to study the effect of recycled tyre polymer (RTP) and polyvinyl alcohol (PVA) hybrid fibres on the dry - shrinkage properties of engineered cementitious composite (ECC), the fluidity, direct tension and dry-shrinkage tests of RTP-PVA hybrid fibre reinforced ECC with a total volume fraction of 2.0% were carried out, and the mechanism and dry - shrinkage calculation model of hybrid fibres were analyzed. The results show that RTP fibres replacement ratio of 12.5%~50% has minimal effect on the ECC fluidity, which is 1.09%~3.69% lower than that of single doped PVA fibres. The tensile strength of ECC decreases with the increase of RTP fibres replacement ratio to PVA fibres, the tensile strength of ECC with different proportions of hybrid fibres is 23.6% to 56.6% lower compared with that of single PVA fibres. The drying shrinkage rate curves of ECC with different proportions of hybrid fibres exhibit similar trends, and the drying shrinkage rate at 7 d is 80.92%~82.77% of that at 28 d. The drying shrinkage rate of ECC decreased with the increase of RTP fibres replacement ratio to PVA fibres, and the drying shrinkage rate of ECC with different proportions of hybrid fibres decreased by 0.80% to 2.09% compared with that of single PVA fibres at 28 d. RTP - PVA hybrid fibres can play a synergistic role in inhibiting drying shrinkage of ECC. Combined with the experimental results, an index drying shrinkage prediction model suitable for RTP-PVA hybrid fibre ECC is proposed.

Key words: recycled tyre polymer (RTP) fibre; polyvinyl alcohol (PVA) fibre; engineered cementitious composites(ECC); drying shrinkage; prediction model

收稿日期: 2022-07-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178382);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2201023);辽宁省自然科学基金资助项目(2020-MS-089)。

作者简介: 陈猛(1981-),男,辽宁开原人,东北大学副教授。

工程水泥基复合材料 (engineered cementitious composites, ECC) 极限拉伸应变高达 2%~8%^[1], 具有较高的韧性、耐久性和抗冲击性, 广泛应用于桥面铺装、高层建筑和结构加固等工程领域^[2-4], 但 ECC 成本较高. 由于 ECC 中水泥掺量高, 造成干缩应变较大. 相关研究表明在外部环境温度为 20 °C 和相对湿度为 60% 的条件下, 普通混凝土干缩应变为 0.04%~0.06%, 而 ECC 干缩应变为 0.12%~0.18%^[5], 因此低成本的 ECC 干缩性能及作用机理研究对工程应用具有重要意义.

汽车工业的飞速发展, 产生大量的废旧轮胎. 为减轻废旧轮胎对环境的影响, 国内外学者开展了 RTP 纤维混凝土的研究. Chen 等^[6-8] 研究了不同掺量的 RTP 纤维 (附着橡胶颗粒) 混凝土静动态压缩性能、劈裂抗拉性能和弯曲疲劳性能, 得到体积分数为 0.2% 的 RTP 纤维为最优掺量, 并通过与聚丙烯纤维 (polypropylene fibre, PPF) 混凝土的相关性能进行对比, 证明了 RTP 纤维对 PPF 的可替代性, 体积分数为 0.2% 的 RTP 纤维可以替代 0.1% 的 PPF. Zhong 等^[9] 研究了 RTP-PVA 混杂纤维 (PVA 纤维体积分数为 0~2%, RTP 纤维体积分数为 0~1%) 制备的工程地质聚合物复合材料 (engineered geopolymer composites, EGC) 的抗拉性能, 结果表明 RTP-PVA 混杂纤维 EGC 比素混凝土抗拉强度提高 129.44%~196.09%. Serdar 等^[10] 研究了 RTP 纤维混凝土 (掺量分别为 5, 10 和 15 kg/m³) 和 PPF 混凝土 (掺量为 1 kg/m³) 的自收缩性能, 研究结果表明添加 5 kg/m³ 的 RTP 纤维与 1 kg/m³ PPF 对混凝土收缩性能影响相近. Baricevic 等^[11] 研究了 RTP 纤维混凝土的早期收缩性能, 研究结果表明 RTP 纤维掺量为 1.8 kg/m³ 的混凝土早期变形达到 0.009%, 比素混凝土降低了 0.003%. Zhong 等^[12] 研究表明在应变硬化地质聚合物复合材料基体中用 RTP 纤维可替代一定掺量 PVA 纤维, 替代率为 12.5%~50% 的试件干缩率比不掺纤维的 ECC 基体 (P0R0) 降低了 11.29%~22.22%, 探索 RTP 纤维在 ECC 中的应用研究可为 RTP 纤维制备高性能混凝土奠定理论基础.

国内外学者针对混杂纤维 ECC 的力学性能开展了较多研究, 如聚丙烯-聚乙烯纤维 (polypropylene fibre - polyethylene fibre, PPF-PEF)、钢-PVA 纤维和玄武岩-PVA 纤维混杂等. Feng 等^[13] 研究了 PPF 替代 PEF 制备 ECC, 试验结

果表明 ECC 的拉伸应变随 PPF 掺量的增加而降低, 但 PPF 替代率为 50% 时极限应变仍能达到 5%. Wang 等^[14] 研究钢-PVA 混杂纤维 ECC, 结果表明混杂纤维 ECC 的断裂强度和抗拉强度随着钢纤维掺量的增加而增加, 当钢纤维体积分数为 1.0% 时, 抗拉强度比单掺 PVA 纤维提高了 44.4%. Wang 等^[15] 用体积分数为 0.5% 的钢和玄武岩纤维替代 PVA 纤维, 结果表明钢-PVA 和玄武岩-PVA 混杂纤维 ECC 拉伸应变比单掺 PVA 纤维的 ECC 降低了 74.25% 和 88.08%. RTP-PVA 混杂纤维 ECC 的力学性能和干缩性能需要通过试验进行系统研究.

本文对 RTP-PVA 混杂纤维总体积分数为 2.0% (RTP 纤维体积分数分别为 0%, 0.25%, 0.5%, 0.75% 和 1.0%) 的 ECC 进行流动性、直接拉伸和干缩试验, 分析不同 RTP 纤维替代率 (0%, 12.5%, 25%, 37.5% 和 50%) 对 ECC 干缩性能的影响规律. 揭示 RTP-PVA 混杂纤维 ECC 的干缩作用机理, 根据试验结果得到适合 RTP-PVA 混杂纤维 ECC 的干缩预测模型.

1 试验概况

1.1 原材料及配合比

原材料包括 P·I 42.5 硅酸盐水泥, I 级粉煤灰, 细骨料为最大粒径 250 μm、平均粒径 130 μm 的硅砂, 减水率为 38% 的聚羧酸高效减水剂, RTP 纤维以及日本 Kuraray 公司生产的 PVA 纤维见图 1. RTP 纤维的筛分方法见文献 [12], 但筛分后仍有少部分橡胶颗粒附着在 RTP 纤维上, 统计了筛分后 RTP 纤维上附着橡胶颗粒的质量分数, 随机抽取 100 g 筛分后的 RTP 纤维, 并分离纤维和橡胶颗粒, 得到橡胶颗粒的质量分数为 4.35%. RTP 纤维的直径由上海新纤仪器有限公司生产的纤维直径分析仪 (SGD-1A) 测量, 强度和弹性模量由工程纤维强伸度仪 (XG-1A) 检验. ECC 基体中硅酸盐水泥、粉煤灰和硅砂的粒径分布见图 2, RTP 纤维长度及直径分布见图 3, RTP 纤维和 PVA 纤维性能见表 1, 不同纤维混杂比例 (总体积分数为 2.0%) 的 ECC 配合比见表 2.

1.2 试件制备及试验方法

首先按照表 2 配合比将硅砂、粉煤灰和水泥依次加入搅拌机中干搅拌 2 min. 然后向混合物中加入水和减水剂, 搅拌 3 min 后, 向混合物中缓慢加入 RTP 纤维和 PVA 纤维. 当纤维均匀分布在混合物中时, 停止搅拌, 总时间约为 9 min. 将不同类

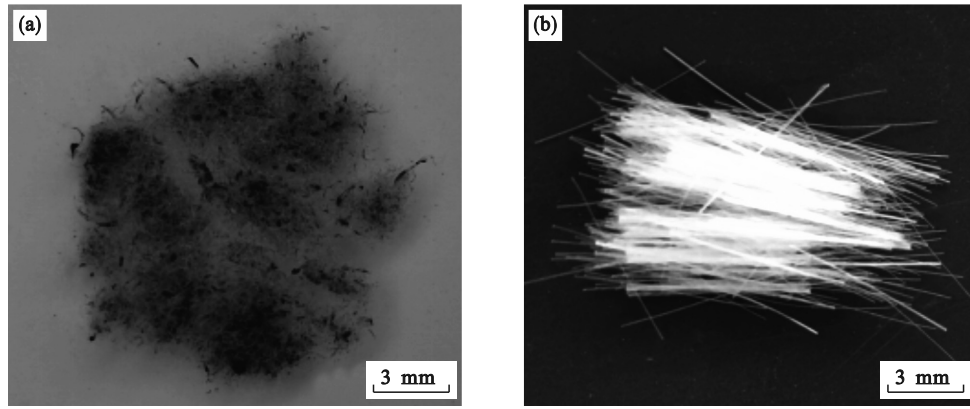


图 1 纤维形貌

Fig. 1 Topography of fibre
(a)—RTP 纤维; (b)—PVA 纤维.

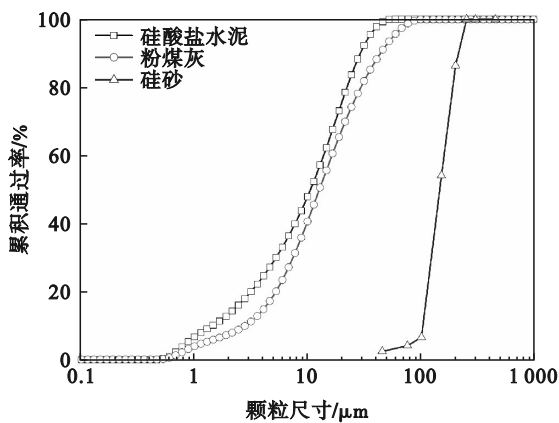


图 2 ECC 基体材料粒径分布

Fig. 2 Particle size distribution of ECC matrix material

型 ECC 拌和物注入 25 mm×25 mm×280 mm 的棱柱体模具中,振动后在试件表面用塑料薄膜密

封以避免水分流失.24 h 后脱模,放置在温度为 (20±2)°C 和相对湿度为 (50±5)% 的干缩养护室中.

按照 ASTM C1437-15^[16] 测试拌和物的流动性.直接拉伸试验装置和试件尺寸如图 4 所示,试验前在试件两端各安装一个位移传感器,测量试件在中间 80 mm 区域的拉伸变形,试验加载速率为 0.5 mm/min.按照 ASTM C490-17^[17] 进行干缩试验.干缩试件放入干缩室前测试初始长度(含测头),在放入干缩室后 1~7 d 每天测量一次干缩值,7 d 后每间隔 2 d 或 3 d 测量一次干缩值(测试龄期分别为 9, 11, 14, 16, 18, 21, 23, 25, 28 d),并根据式(1)计算混凝土的干缩率.

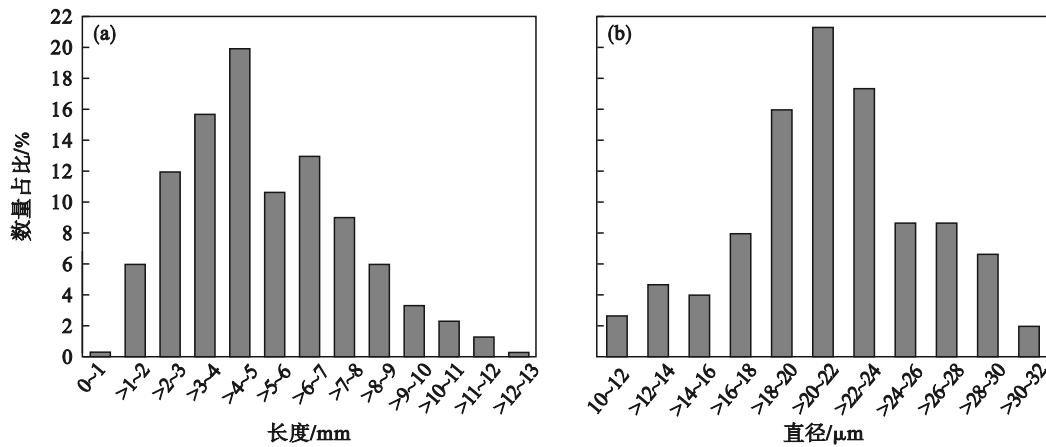


图 3 RTP 纤维长度与直径分布图

Fig. 3 Distribution of length and diameter of RTP fibre
(a)—长度; (b)—直径.

表 1 纤维的物理及力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of fibres

纤维类型	长度/mm	直径/μm	密度/(g·cm ⁻³)	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
RTP	5.2±2.4	21.4±4.4	1.476±0.003	761±115	3.8±0.7
PVA	12	40	1.3	1 560	41

表 2 材料 ECC 配合比
Table 2 Mixture proportions of materials ECC

材料类型	m/ kg					体积分数/%		RTP 纤维替代率/%
	水泥	粉煤灰	硅砂	水	减水剂	RTP 纤维	PVA 纤维	
P2.0R0	42.5	676	451	335	4.96	0	2.0	0
P1.75R0.25	42.5	676	451	335	4.96	0.25	1.75	12.5
P1.5R0.5	42.5	676	451	335	4.96	0.5	1.5	25
P1.25R0.75	42.5	676	451	335	4.96	0.75	1.25	37.5
P1.0R1.0	42.5	676	451	335	4.96	1.0	1.0	50

注:P2.0R0 表示 PVA 纤维体积分数为 2.0%, RTP 纤维体积分数为 0% 的 ECC。

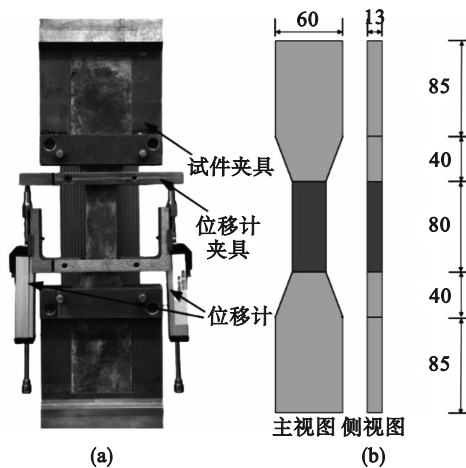


图 4 直接拉伸试验装置及试件尺寸(单位:mm)

Fig. 4 Testing equipment and specimen size of direct tension test (unit: mm)

(a)—试验装置; (b)—试件尺寸.

$$S_d = \frac{X_0 - X_t}{L_0} \times 100\% . \quad (1)$$

式中: S_d 为龄期 d 天时的混凝土干缩率, %; L_0 为试件的测量标距, 等于混凝土试件的长度(不计测头凸出部分)减去 2 倍测头埋入深度, mm; X_0 为试件的初始长度(含测头), mm; X_t 为龄期 t 天时干缩长度(含测头), mm.

对断裂试件进行扫描电子显微镜(scanning electron microscopy, SEM)测试, 试验前对使用的断裂试件表面进行喷金处理, 加速电压为 15 kV.

2 试验结果及讨论

2.1 流动性

不同 RTP 纤维替代率的 ECC 流动度如图 5 所示, ECC 流动度随 RTP 纤维替代率增加而降低. P2.0R0 流动度为 193.83 mm, RTP 纤维替代率为 12.5%, 25%, 37.5%, 50% 的 ECC 流动度分别比 P2.0R0 降低 1.09%, 2.26%, 3.35%, 3.69%. 这是由

于 RTP 纤维的直径小于 PVA 纤维, 在纤维总体积分数为 2.0% 时, 纤维比表面积随 RTP 纤维替代率增大而增大, 需要更多水泥砂浆包裹, 导致 ECC 黏度增大, 流动性降低^[18]. 同时 RTP 纤维比 PVA 纤维的抗弯刚度小, 在搅拌过程中 RTP 纤维容易缠绕 PVA 纤维, RTP-PVA 混杂纤维更容易形成纤维网络阻碍拌和物流动. RTP 纤维替代率达到 50% 时的 ECC 流动度相比于 P2.0R0 降低幅度不大.

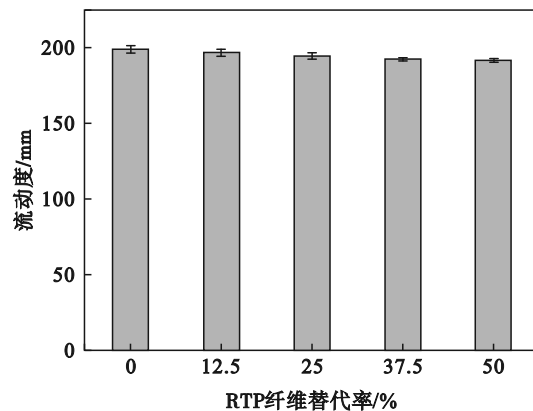


图 5 不同 RTP 纤维替代率的 ECC 流动度

Fig. 5 Slump of ECC with different replacement ratio of RTP fibre

2.2 直接拉伸性能

RTP-PVA 混杂纤维 ECC 应力-应变曲线如图 6 所示. 在弹性阶段, 拉应力快速增加, 应变为 0.003%~0.121%; 进入应变硬化阶段后, ECC 的应力随应变增加而缓慢增加, ECC 的平均极限应变随 RTP 纤维替代 PVA 纤维比例增大而减小, 当替代率为 12.5%~50% 时 ECC 平均极限应变分别比 P2.0R0 降低 15.75%~85.63%, 当 ECC 达到极限应变后, 试件出现主裂纹而发生断裂. ECC 的抗拉强度随 RTP 纤维替代率增加而降低, P2.0R0 抗拉强度为 4.24 MPa, RTP 纤维替代率为 12.5%,

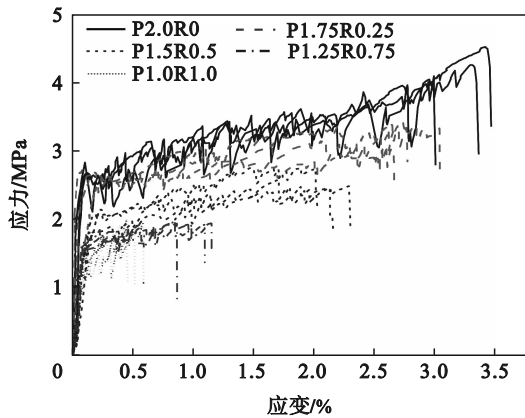


图6 RTP-PVA 混杂纤维ECC 应力-应变曲线
Fig. 6 Stress-strain curves of RTP-PVA hybrid fibre reinforced ECC

25%, 37.5% 和 50% 的 ECC 抗拉强度分别比 P2.0R0 降低 23.6%, 39.2%, 55.0% 和 56.6%。这是因为 RTP 纤维长度分布范围较大,长径比过大导致纤维无法发挥桥连作用,长径比过小导致纤维桥连裂缝能力减弱^[19],当 RTP 纤维替代率增加时,长径比过大和过小的 RTP 纤维数量均增加,削弱了 ECC 的多缝开裂及应变硬化能力.同时 RTP 纤维弹性模量比 PVA 纤维低(见表 1),基体开裂后 RTP 纤维变形较大,裂纹迅速扩展,导致基体被拉断.

2.3 干缩性能

RTP-PVA 混杂纤维 ECC 在 28 d 内的干缩率随龄期变化如图 7 所示,不同 RTP 纤维替代率 ECC 干缩率曲线趋势相近,0~7 d 的增长速率较快且 7 d 时的干缩率较大.7 d 后干缩率曲线逐渐变得平缓,干缩率增长幅度较小.RTP 纤维替代率为 0%, 12.5%, 25%, 37.5% 和 50% 的 ECC 在 7 d 时干缩率分别为 28 d 时的 80.92%, 82.77%, 81.02%, 81.00% 和 81.94%。这是因为干缩的实测

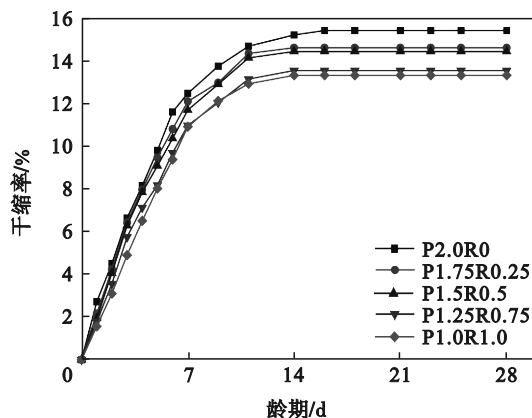


图7 RTP-PVA 混杂纤维ECC 干缩率
Fig. 7 Drying shrinkage rate of RTP-PVA hybrid fibre reinforced ECC

值包括混凝土的自收缩值,混凝土的自收缩在早期增长较快^[20].当试件置入干缩室后,试件内部与外部环境的湿度差较大,产生较大干缩应力且干缩应变快速变化^[21].

不同 RTP 纤维替代率 ECC 在 7 d 和 28 d 时干缩率见图 8. ECC 的干缩率随 RTP 纤维对 PVA 纤维替代率的增加而降低.7 d 时 RTP 纤维替代率为 12.5%, 25%, 37.5% 和 50% 的 ECC 干缩率分别比 P2.0R0 降低了 0.38%, 0.78%, 1.50%, 1.56%. 28 d 时 RTP 纤维替代率为 12.5%, 25%, 37.5% 和 50% 的 ECC 干缩率分别比 P2.0R0 降低了 0.80%, 0.98%, 1.87%, 2.09%。这是由于 RTP 纤维直径和长度均小于 PVA 纤维,在相同体积分数下, RTP 纤维数量多,与 ECC 基体有效黏结后有利于抑制干缩^[18].

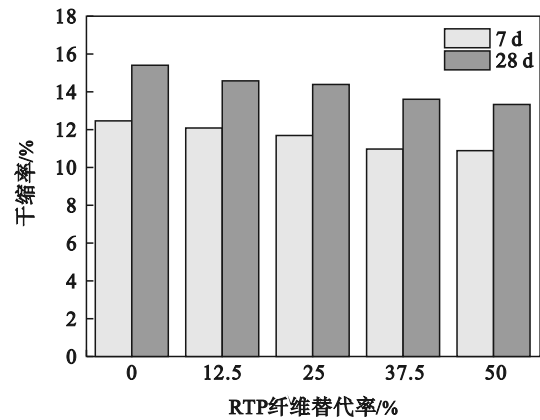


图8 不同 RTP 纤维替代率 ECC 在 7 d 和 28 d 时的干缩率

Fig. 8 Drying shrinkage rate of ECC under different replacement ratio of RTP fibre at 7 d and 28 d

2.4 混杂纤维 ECC 干缩机理分析

ECC 干缩与外部环境湿度、内部湿度以及毛细管张力等因素有关^[22].环境相对湿度低时,覆盖在胶凝材料颗粒表面的物理吸附水膜减少,导致表面张力增加,从而产生拉伸应变,这种拉伸应变会在水泥凝胶颗粒内产生压缩应力,导致体积变化^[23].加入纤维会在混合过程中夹带更多空气,从而导致纤维周围的孔隙率更高.因此 ECC 内的水分更容易通过形成的孔隙网络移动,从而减小干缩^[12].

水泥水化初期, RTP-PVA 混杂纤维 ECC 基体内部湿度高于外部环境湿度,试件产生干缩应力,由于 PVA 纤维的弹性模量较大(见表 1),在相同收缩应变时, PVA 纤维承担的应力比较多. RTP 纤维在搅拌过程中可以吸收水分^[7],并在水化过程中释放,增大 RTP 纤维周围的湿度,缓解干缩

变形,同时 RTP 纤维可以分担部分干缩应力,见图 9a 与图 9b 阶段 1.随着水化程度增大,RTP 纤维周围湿度降低,纤维与基体黏结作用增强,分担的收缩应力增大,见图 9a 与图 9b 的阶段 2.RTP 纤维、PVA 纤维与 ECC 基体有效黏结见图 10,使 ECC 中的应力均匀传到纤维上^[18].由于纤维的掺

入增加了基体中的薄弱界面,收缩应力下容易在纤维周围产生应力集中,导致基体出现微裂纹,RTP-PVA 混杂纤维与基体黏结作用减弱,纤维逐渐拔出 ECC 基体,发挥桥连作用,减小试件干缩变形,见图 9a 与图 9b 的阶段 3.

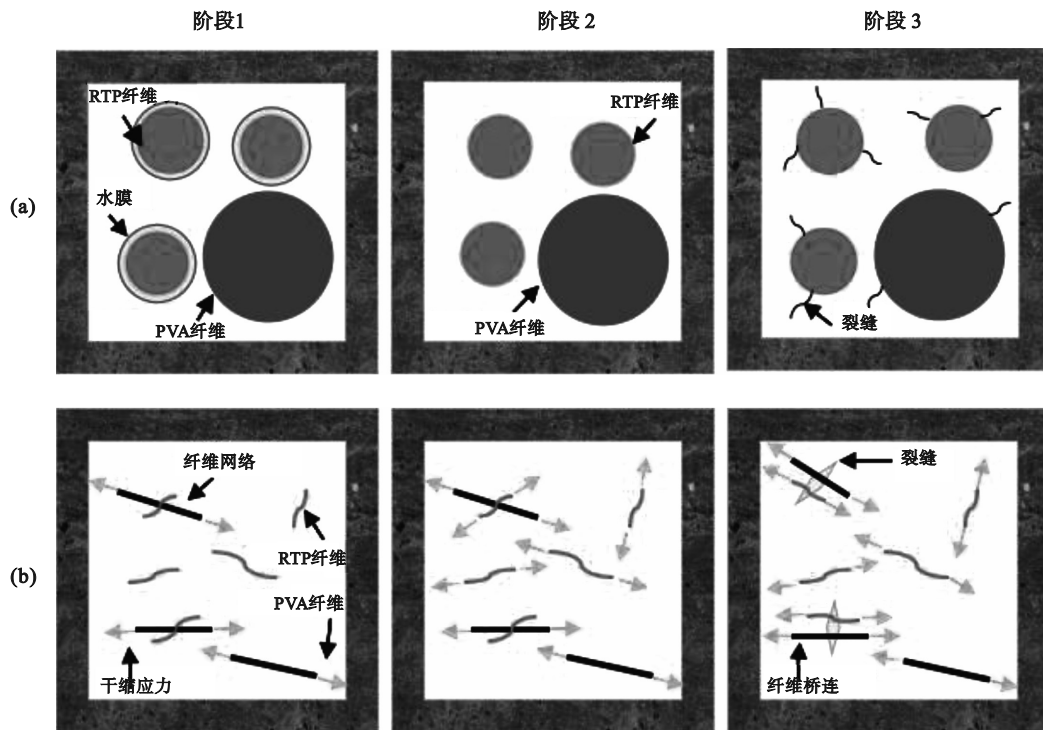


图 9 RTP-PVA 混杂纤维作用机理

Fig. 9 Mechanism of action of RTP-PVA hybrid fibres

(a)—基体中纤维横截面图;(b)—纤维桥连作用图.

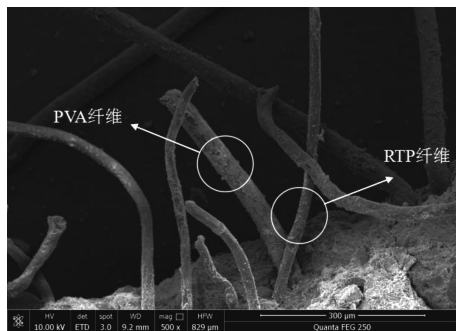


图 10 RTP-PVA 混杂纤维与基体黏结

Fig. 10 Bonding between RTP-PVA hybrid fibre and the matrix

3 ECC 干缩计算模型

干缩计算模型是预测水泥基材料干缩变形与龄期关系的一种常用手段.常用的干缩模型为双曲线模型、单对数模型和指数模型,表达形式如式(2)~式(4)所示^[24].

$$S_d = \frac{at}{b+t}, \quad (2)$$

$$S_d = c + d \cdot \ln(t+1), \quad (3)$$

$$S_d = S_s \cdot (1 - f \cdot e^{g \cdot t}). \quad (4)$$

式中: t 为龄期; d ; a ; b ; c ; d ; f ; g 为待定系数; S_s 为干缩率终值,%.

将 ECC 干缩率试验值按不同模型进行拟合,得到待定系数和相关系数(见表 3),对比不同模型相关系数 R^2 ,将不同模型 R^2 由大到小排序,指数模型>双曲线模型>单对数模型.

对比不同模型的干缩率计算值与干缩率试验值,如图 11 所示,指数模型的干缩率计算值比另外两种模型的干缩率计算值更接近试验值,指数模型的干缩率计算值与试验值差的平方和最小(见表 3),表明指数模型更适合预测 RTP-PVA 混杂纤维 ECC 的干缩率.

表 3 不同预测模型拟合参数及相关系数
Table 3 Fitness parameters and correlation coefficient of different predicting models

材料类型	双曲线模型				单对数模型				指数模型			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	$\Delta^2 \times 10^4$	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>R</i> ²	$\Delta^2 \times 10^4$	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>R</i> ²	$\Delta^2 \times 10^4$
P2.0R0	19.21	4.68	0.973	10.52	0.25	5.09	0.938	23.92	1.04	-0.22	0.992	3.30
P1.75R0.25	18.25	4.63	0.968	11.33	0.20	4.86	0.931	24.74	1.05	-0.23	0.990	3.58
P1.5R0.5	18.17	4.85	0.968	11.28	0.03	4.85	0.934	23.52	1.06	-0.22	0.989	3.72
P1.25R0.75	17.22	5.11	0.966	10.68	-0.14	4.59	0.935	20.79	1.06	-0.22	0.987	3.90
P1.0R1.0	17.30	5.58	0.955	14.60	-0.47	4.63	0.925	24.30	1.08	-0.21	0.980	6.46

注:*R*²为拟合曲线的相关系数; Δ^2 为干缩率计算值与试验值差的平方和。

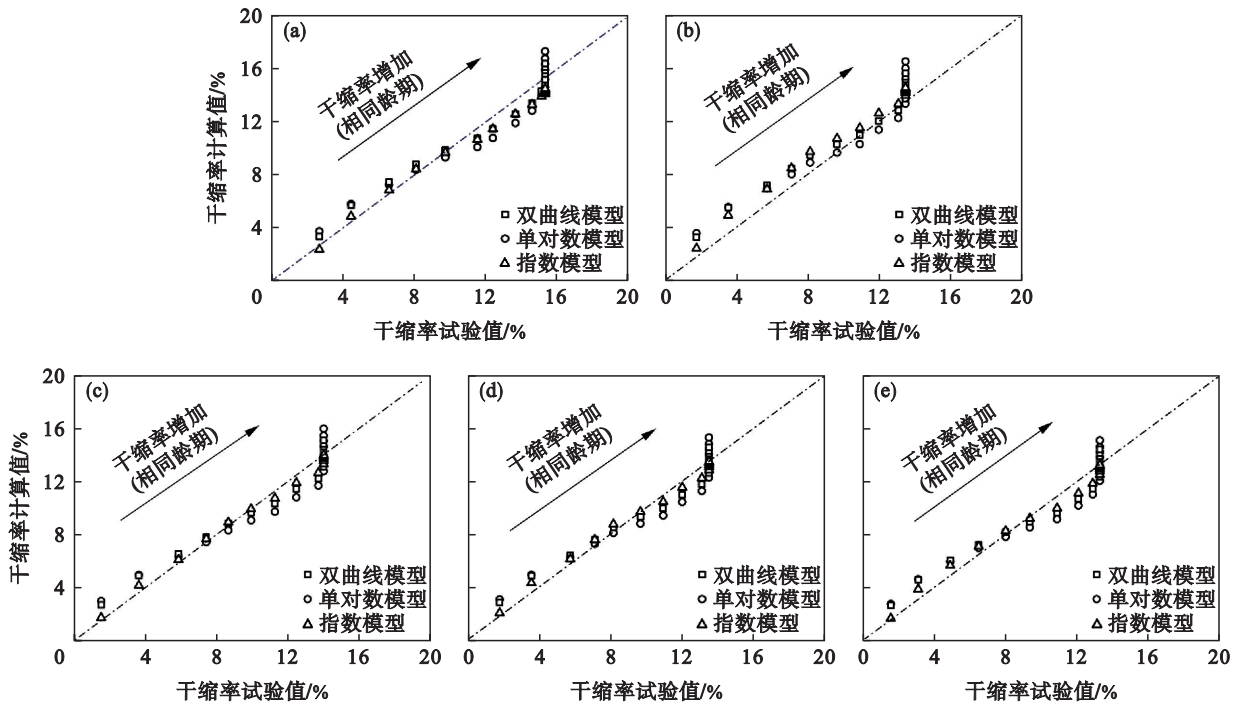


图 11 不同模型干缩率计算值与试验值对比

Fig. 11 Comparison between calculated value and experimental value of drying shrinkage rate of different models (a)—P2.0R0; (b)—P1.75R0.25; (c)—P1.5R0.5; (d)—P1.25R0.75; (e)—P1.0R1.0.

4 结 论

1) ECC 流动度随着 RTP 纤维对 PVA 纤维的替代率增加而降低, RTP 纤维替代率为 12.5%~50% 的 ECC 流动度比 P2.0R0 降低 1.09%~3.69%, RTP 纤维的加入对 ECC 流动性影响不大. ECC 的抗拉强度随 RTP 纤维对 PVA 纤维的替代率增加而降低, RTP 纤维替代率为 12.5%~50% 的 ECC 抗拉强度比 P2.0R0 降低 23.6%~56.6%.

2) 不同 RTP 纤维替代率 ECC 干缩率曲线趋势相近, 0~7 d 的增长速率较快, RTP 纤维的替代率为 0~50% 的 ECC 在 7 d 时干缩率为 28 d 时的 80.92%~82.77%. ECC 的干缩率随 RTP 纤维替代率的增加而降低. 28 d 时的 RTP 纤维替代率为

12.5%~50% 的 ECC 干缩率比 P2.0R0 降低了 0.80%~2.09%.

3) RTP-PVA 混杂纤维在 ECC 中抑制干缩作用分为 3 个阶段: 阶段 1, RTP 纤维在水化过程中释放水分, 减小干缩变形, 主要由 PVA 纤维承担收缩应力; 阶段 2, RTP 纤维与基体黏结作用随水化进程发展而增强, 混杂纤维共同承担收缩应力; 阶段 3, 纤维周围产生应力集中导致基体出现微裂纹, 纤维发挥桥连作用, 减小试件干缩变形.

4) 通过试验数据拟合得到 RTP-PVA 混杂纤维 ECC 的 3 种干缩计算模型. 对比干缩率计算值与试验值, 表明指数模型最适合预测 RTP-PVA 混杂纤维 ECC 的干缩率.

参考文献:

- [1] Gao S L, Wang Z, Wang W C, et al. Effect of shrinkage-reducing admixture and expansive agent on mechanical properties and drying shrinkage of engineered cementitious composite (ECC)[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 179: 172-185.
- [2] Ma H, Zhang Z G, Ding B, et al. Investigation on the adhesive characteristics of engineered cementitious composites (ECC) to steel bridge deck [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 191: 679-691.
- [3] Yu J T, Lin J H, Zhang Z G, et al. Mechanical performance of ECC with high - volume fly ash after sub - elevated temperatures [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 99: 82-89.
- [4] Zheng Y Z, Wang W W, Brigham J C. Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened with a composite reinforcement layer: BFRP grid and ECC [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 115: 424-437.
- [5] Zhang J, Gao Y, Wang Z B. Evaluation of shrinkage induced cracking performance of low shrinkage engineered cementitious composite by ring tests [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 52: 21-29.
- [6] Chen M, Chen W, Zhong H, et al. Experimental study on dynamic compressive behaviour of recycled tyre polymer fibre reinforced concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 98: 95-112.
- [7] Chen M, Zhong H, Zhang M Z. Flexural fatigue behaviour of recycled tyre polymer fibre reinforced concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 105: 103441.
- [8] Chen M, Zhong H, Wang H, et al. Behaviour of recycled tyre polymer fibre reinforced concrete under dynamic splitting tension [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 114: 103764.
- [9] Zhong H, Zhang M Z. Dynamic splitting tensile behaviour of engineered geopolymer composites with hybrid polyvinyl alcohol and recycled tyre polymer fibres [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 379: 134779.
- [10] Serdar M, Baričević A, Rukavina M J, et al. Shrinkage behaviour of fibre reinforced concrete with recycled tyre polymer fibres [J]. *International Journal of Polymer Science*, 2015, 2015: 1-9.
- [11] Baricevic A, Pezer M, Rukavina M J, et al. Effect of polymer fibers recycled from waste tires on properties of wet-sprayed concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 176: 135-144.
- [12] Zhong H, Zhang M Z. Effect of recycled tyre polymer fibre on engineering properties of sustainable strain hardening geopolymer composites [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 122: 104167.
- [13] Feng Z J, Zhou Y W, Sui L L, et al. Optimal design of a low-cost high-performance hybrid fiber engineered cementitious composites [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 345: 128372.
- [14] Wang Z B, Wang P Y, Zhu F Q. Synergy effect of hybrid steel - polyvinyl alcohol fibers in engineered cementitious composites: fiber distribution and mechanical performance [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 62: 105348.
- [15] Wang Q S, Yi Y, Ma G W, et al. Hybrid effects of steel fibers, basalt fibers and calcium sulfate on mechanical performance of PVA-ECC containing high - volume fly ash [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 97: 357-368.
- [16] Standard test method for flow of hydraulic cement mortar: ASTM C1437-15 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2015.
- [17] Standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar, and concrete: C490/C490M-17 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2017.
- [18] Hsie M, Tu C J, Song P S. Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 494: 153-157.
- [19] Zhong H, Chen M, Zhang M Z. Engineering properties of sustainable engineered cementitious composites with recycled tyre polymer fibres [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 370: 130672.
- [20] Wang Q H, Wang Y Y, Geng Y, et al. Experimental study and prediction model for autogenous shrinkage of recycled aggregate concrete with recycled coarse aggregate [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 268: 121197.
- [21] Yousefieh N, Joshaghani A, Hajibandeh E, et al. Influence of fibers on drying shrinkage in restrained concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 148: 833-845.
- [22] Tran N P, Gunasekara C, Law D W, et al. A critical review on drying shrinkage mitigation strategies in cement-based materials [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 38: 102210.
- [23] Tang S W, Huang D H, He Z. A review of autogenous shrinkage models of concrete [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 44: 103412.
- [24] 徐世焱, 刘志凤. 超高韧性水泥基复合材料干缩性能及其对抗裂能力的影响 [J]. *水利学报*, 2010, 41 (12): 1491-1496.
- (Xu Shi-lang, Liu Zhi-feng. The effect of ultra-high toughness cementitious composites on drying shrinkage properties crack resistance [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41 (12): 1491-1496.)