

基于纤维增强指数的碱激发砂浆物理力学性能

李 黎^{1,2,3}, 委玉杰², 李宗利^{1,2}, 张文生³, 史 迪³, 李定乾²

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 咸阳 712100;

2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 咸阳 712100; 3. 绿色建筑材料国家重点实验室, 北京 100024)

摘 要: 为探究纤维在碱激发材料中的作用机制, 采用 2 种不同长径比、6 个不同体积掺量的聚丙烯纤维 (PPF)、2 种水胶比制备共计 26 组纤维增强碱激发砂浆 (FRAAM), 研究纤维增强指数 (I) 对 FRAAM 工作性、密实度、强度、裂缝分形维数的影响。结果表明: 纤维和水胶比对 FRAAM 塑性黏度的影响比屈服应力的影响更加显著。当 I 小于临界 I_c ($I_c=100$) 时, 纤维的影响可以忽略, 纤维间的距离较远, FRAAM 的工作性基本不受影响, 但此时纤维也难以阻裂增韧, PPF 对碱激发砂浆和水泥砂浆的增韧作用差异不大。当 I 介于 $I_c=100$ 和致密 I_d ($I_d=350$) 之间时, FRAAM 的抗折强度、抗压强度、折压比及裂缝分形维数均得到显著提高, PPF 对碱激发砂浆的增韧作用开始优于水泥砂浆, 且 FRAAM 仍可自由流动。当 I 大于 $I_d=350$ 时, 显著的纤维结团会极大劣化 FRAAM 的工作性, 硬化后 FRAAM 密实度变差, 抗压强度降低。PPF-FRAAM 在松散堆积状态和紧密堆积状态下的 I 阈值分别为 100 和 350, PPF 的最优体积掺量在 $100/(l/d) \sim 350/(l/d)$ 之间。

关键词: 碱激发材料; 纤维混凝土; 纤维增强指数; 力学性能; 分形维数

中图分类号: TB332 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)08-2212-09

网络出版时间: 2022-07-01



Properties of Alkali Activated Mortar Fresh and Hardened Properties Based on Fiber Reinforced Index

LI Li^{1,2,3}, WEI Yujie², LI Zongli^{1,2}, ZHANG Wensheng³, SHI Di³, LI Dingqian²

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Northwest A & F University, Xianyang 712100, Shaanxi, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Xianyang 712100, Shaanxi, China; 3. State Key Laboratory of Green Building Materials, Beijing 100024, China)

Abstract: In order to explore the mechanism of action of fiber in alkali-activated materials, 26 groups of fiber reinforced alkali-activated mortar (FRAAM) were prepared at different length to diameter ratios, volume contents of polypropylene fiber (PPF) and water-binder ratios. The influence of fiber reinforced index (I) on the slump spread, flow rate, apparent density, ultrasonic wave velocity, compressive strength, bending strength, and crack fractal dimension of FRAAM was investigated. The results show that the effect of water-binder ratio on the plastic viscosity of FRAAM is more dominant than that on the yield stress. When I is less than critical I_c (I_c , i.e., 100), the influence of fibers is slight, the distance between fibers is far, and the workability of FRAAM is basically not affected. However, fibers are difficult to limit the cracking of mortar and improve its mechanical properties. When I is between I_c (i.e., 100) and dense I_d (i.e., 350), the flexural strength, compressive strength and fracture fractal dimension of FRAAM improve, and the FRAAM can still flow freely under dead weight. When I is higher than I_d (i.e., 350), significant fibrous clumps degrade the FRAAM workability, resulting in a poor compactness and a reduced compressive strength. The I thresholds of PPF-FRAAM are 100 and 350 for loose and tight packing, respectively, and the optimal volume fraction of PPF is between $100/(l/d)$ and $350/(l/d)$.

Keywords: alkali-activated material; fiber reinforced concrete; fiber reinforcing index; mechanical properties; fractal dimension

收稿日期: 2021-12-31。 修订日期: 2022-04-25。

基金项目: 国家自然科学基金(52109168); 陕西省自然科学基金计划项目(2021JQ-174); 绿色建筑材料国家重点实验室开放基金(2020GBM10)。

第一作者: 李 黎(1986—), 男, 博士, 副教授。

通信作者: 李宗利(1967—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2021-12-31. Revised date: 2022-04-25.

First author: LI Li (1986—), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: drlili@vip.163.com

Correspondent author: LI Zongli (1967—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: bene@nwsuaf.edu.cn

碱激发水泥是绿色环保、低排放、低能耗的硅酸盐水泥替代品,且可以大量消纳固废,环保、经济和社会效益显著。与硅酸盐水泥基复合材料相比,碱激发材料的脆性更大,引入纤维是提高碱激发材料抗拉强度和韧性的有效方法之一^[1]。由于反应机理和原材料组分与传统硅酸盐水泥基材料有着本质的不同,新拌碱激发材料的工作性与水泥基材料存在着明显差异。Criado 等^[2]发现,碱激发粉煤灰净浆的塑性黏度均显著大于硅酸盐水泥净浆,但其屈服应力却大多小于硅酸盐水泥净浆。郭军^[3]指出,常规减水剂对碱激发矿渣-硅灰高强砂浆的工作性没有明显提高作用,还会导致其硬化后强度下降。而这些差异也将对碱激发材料硬化后的物理力学性能产生显著影响。因此,有必要对纤维碱激发材料的工作性及硬化后的物理力学性能展开系统研究。

钢纤维^[4-7]、聚丙烯纤维(PPF)^[7-9]和聚乙烯醇纤维(PVA)^[10]等在水泥基材料中的应用研究较为广泛^[11-12]。PPF 因其较低的成本、较高的化学稳定性和易于施工等显著优势成为水泥基材料和碱激发材料中应用最多的纤维^[12-13]。PPF、PVA 纤维和钢纤维的国际市场价格不等,若以等体积的方式掺入,则密度较小的 PPF 与钢纤维相比成本优势更加突出^[12]。因此,将采用 PPF 制备纤维增强碱激发砂浆(FRAAM)。

经过多年的研究,学者们基本形成了共识,即纤维增强指数(I ,纤维体积掺量与纤维长径比的乘积)对纤维水泥基复合材料的工作性和力学性能起着控制性作用^[8-10, 14-15]。中国《纤维混凝土结构技术规程》(CECS38: 2004)^[16]建议了计算钢纤维混凝土强度的方法,表明抗拉强度和弯拉强度均与钢纤维的 I 呈线性关系。Said 等^[17-18]指出,应变硬化水泥基复合材料的弯曲挠度、韧性、抗拉强度均随聚乙烯纤维和 PVA 纤维的 I 线性增长。李黎等^[14]研究发现,混杂纤维增强水泥基复合材料的弯曲韧性与 I 呈二次函数关系。Mehdipour 等^[15]通过研究玻璃纤维自密实砂浆的工作性、体积稳定性和力学性能,发现自密实砂浆中玻璃纤维的最优 I 约为 450;而 PPF 在砂浆中的最优 I 在 100~300 之间^[8]。

但 PPF 的 I 对碱激发材料的新拌性能和硬化物

性能的影响,与传统纤维水泥基复合材料体系的差异,缺乏系统研究。因此,采用 2 种不同长径比、6 个不同体积掺量的 PPF、2 种水胶比制备共计 26 组 FRAAM,研究 I 对 FRAAM 流动扩展度、流动速率、表观密度、超声波速、抗压强度、抗弯强度、折压比、裂缝分形维数的影响规律,确定松散堆积和紧密堆积状态下 I 的阈值,并讨论 FRAAM 与传统纤维增强水泥基复合材料的差异。

1 实验

1.1 原材料

所用矿物掺合料包括二级粉煤灰(陕西渭河电厂)、S95 粒化高炉矿渣粉(西安德龙粉体工程有限公司)、硅灰(河南鼎诺净化材料有限公司)。激发剂包括硅酸钠溶液(巩义市昌隆泡花碱厂)和氢氧化钠(广东光华科技股份有限公司),硅酸钠溶液中的 Na_2O 、 SiO_2 的质量分数分别为 9.0%、28.08%,模数为 3.22;氢氧化钠纯度 96%以上,分析纯。水为陕西省杨凌示范区市政自来水。PPF: 浙江史尉卡材料科技有限公司生产,长度: 6 mm 和 12 mm;直径: 31 μm ;密度 0.91 g/cm^3 。

1.2 配合比及拌和制度

水胶比设定为 0.45 和 0.48;设定粉煤灰:矿渣:硅灰质量比为 1:0.14:0.29;固定砂胶比为 0.5;加入 6 mm 与 12 mm 长的 PP 纤维,体积掺量分别为 0、0.3%、0.6%、0.9%、1.2%、1.5%、1.8%,得到 26 组不同纤维因子和水胶比的 FRAAM 配合比,如表 1 所示。采用水泥胶砂搅拌机进行 FRAAM 的拌和,拌和制度如图 1。

拌和完成的 FRAAM 在进行工作性测试后,倒入模具,混合料入模后在振动台上振动,然后成型收面,用塑料膜覆盖试件表面,24 h 之后拆模,而后在标准温湿度条件下[温度(20±2)℃,相对湿度≥95%]的标准养护室中养护 28 d 后,取出进行力学性能、超声波速等实验。

1.3 新拌砂浆工作性测试

使用小型 V 型漏斗测量 FRAAM 的流动速率,流动速率计算为 V 型漏斗的容积(1 134 mL)除以流动时间(从打开下口开关到通过下口看到光线的时间,以 s 计)。采用小型坍落度筒测定 FRAAM 的

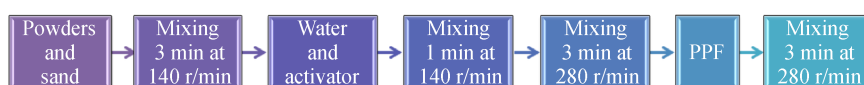


图 1 纤维碱激发砂浆的搅拌制度

Fig. 1 Mixing procedure of FRAAM

表 1 纤维增强碱激发砂浆的配合比
Table 1 Mixture proportion of FRAAM

Specimen No. (X-Y-Z)*	Water-binder ratio	Volume fraction of PPF/%	Aspect ratio	Fiber reinforced index (<i>I</i>)
0.45-0	0.45	0.0	193.55	0.00
0.45-6-0.3	0.45	0.3	193.55	58.06
0.45-6-0.6	0.45	0.6	193.55	116.13
0.45-6-0.9	0.45	0.9	193.55	174.19
0.45-6-1.2	0.45	1.2	193.55	232.26
0.45-6-1.5	0.45	1.5	193.55	290.32
0.45-6-1.8	0.45	1.8	193.55	348.39
0.45-12-0.3	0.45	0.3	387.10	116.13
0.45-12-0.6	0.45	0.6	387.10	232.26
0.45-12-0.9	0.45	0.9	387.10	348.39
0.45-12-1.2	0.45	1.2	387.10	464.52
0.45-12-1.5	0.45	1.5	387.10	580.65
0.45-12-1.8	0.45	1.8	387.10	696.77
0.48-0	0.48	0.0	193.55	0.00
0.48-6-0.3	0.48	0.3	193.55	58.06
0.48-6-0.6	0.48	0.6	193.55	116.13
0.48-6-0.9	0.48	0.9	193.55	174.19
0.48-6-1.2	0.48	1.2	193.55	232.26
0.48-6-1.5	0.48	1.5	193.55	290.32
0.48-6-1.8	0.48	1.8	193.55	348.39
0.48-12-0.3	0.48	0.3	387.10	116.13
0.48-12-0.6	0.48	0.6	387.10	232.26
0.48-12-0.9	0.48	0.9	387.10	348.39
0.48-12-1.2	0.48	1.2	387.10	464.52
0.48-12-1.5	0.48	1.5	387.10	580.65
0.48-12-1.8	0.48	1.8	387.10	696.77

*: *X* represents water-binder ratio, *Y* represents fiber length of polypropylene fiber (PPF), *Z* represents fiber volume fraction of PPF in specimen.

流动扩展度, 工作性测试所用仪器尺寸和实验方法参考文献[19–20]。

1.4 硬化砂浆物理性能测试

测试每组 3 个试件的质量, 计算出的平均质量, 根据质量与体积之比得出试件的表观密度。采用北京市康科瑞工程检测技术有限公司生产的 NM-4A 非金属超声波检测分析仪来测量超声脉冲波在 FRAAM 中的传播速度, 测试方法依据 ASTM C597^[21]。

1.5 硬化砂浆力学性能测试

按照 GB/T 17671 规定测试 FRAAM 的抗折强度和抗压强度^[22]。在 FRAAM 的抗折强度实验结束后, 使用数码相机采集试件受弯破坏后表面裂缝形态, 利用 IMAGE PRO 提取裂缝, 方法参考文献[23], 提取裂缝后计算裂缝的分形维数。

2 结果与讨论

2.1 *I* 对 FRAAM 工作性的影响

图 2 为水胶比 0.45 和 0.48 时 FRAAM 的流动速率和坍落扩展度与 *I* 的关系。随着 *I* 的增大,

FRAAM 的流动速率和流动扩展度均显著降低, 但下降速度随 *I* 的增大逐渐降低, 趋于稳定。根据 Krieger 和 Dougherty 的理论^[24]以及 Philipse 的随机接触方程^[25], 纤维增强水泥基复合材料可以简化为刚性球形颗粒和小棒悬浮在浆液中。基于 *I* 的大小, 可将纤维增强水泥基复合材料的工作性指标划分为 3 个阶段^[8–9, 15]。与之相似, FRAAM 的流动速率和坍落扩展度亦可划分为如下 3 个区域。

第 1 阶段, $I < I_c = 100$, FRAAM 为稀悬浮液, 纤维对砂浆的流动性影响很小。在该阶段, 纤维间的距离足够远, 可以忽略纤维的相互作用。因此, FRAAM 的流动性与无纤维砂浆的流动性基本相同。水胶比为 0.48 的 FRAAM, 其坍落扩展度还较对照组略有增大。当砂浆流动时, 纤维的分散性良好, 没有出现纤维搭接结团的现象。

第 2 阶段, $I_c = 100 < I < I_d = 350$, 纤维间的接触增加, 开始影响砂浆的流动性。从图 2 可以看出, 增大 *I* 减小了位于第 2 阶段 FRAAM 的流动速率和流动扩展度。对于水胶比为 0.48 的 FRAAM, *I* 从 0 增加到 116.13 和 348.39, 流动扩展度分别降低了

约 13% 和 42%。第 2 阶段流动性最差的为 0.45-12-0.9 组, 其中流动扩展度为 137 mm, 流动速率为 28.09 mL/s。当 I 增加到 $I_d=350$ 附近时, FRAAM 的工作性由纤维间的接触和碰撞控制。试验时的观察结果表明, 在第 1 阶段和第 2 阶段, 纤维均分散均匀, 没有明显的不稳定或纤维结团, FRAAM 仍具有足够的流动性, 可在自重作用下自由流动。

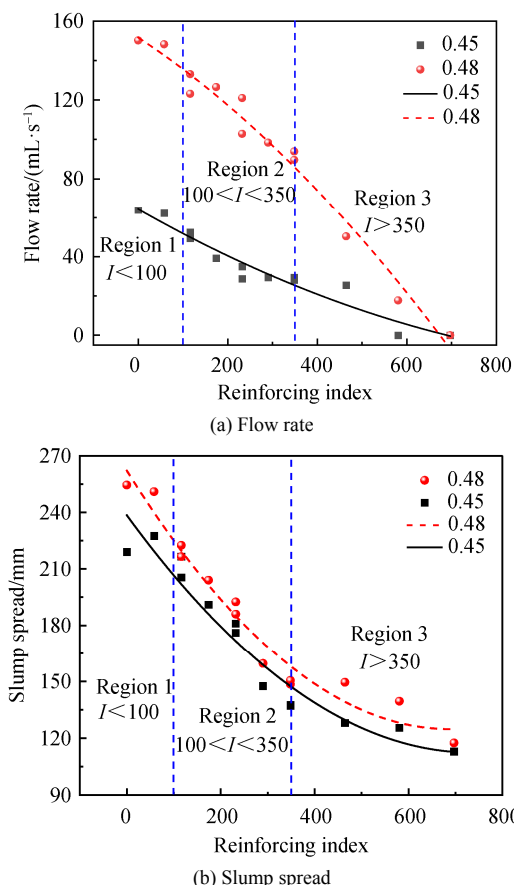


图 2 纤维碱激发砂浆的纤维增强指数与流动速率和流动扩展度的关系

Fig. 2 Relationships of I -flow rate and I -slump spread of FRAAM

第 3 阶段, $I > I_d=350$, FRAAM 的流动性急剧劣化, 已不能自由流动。纤维分散性差, 出现明显结团, 大大降低了 FRAAM 的流动性和稳定性。根据 Krieger 和 Dougherty 的理论, FRAAM 在这一阶段纤维体积分数接近随机紧密堆积的上限, 纤维间紧密接触。在这种情况下, 单纯通过增大水胶比提高 FRAAM 的流动性会导致明显的离析和泌水, 严重劣化砂浆的和易性。

无论水胶比为 0.45 还是 0.48, I 从 0 增大至 700, 流动扩展度降低了约 50%, 而流动速率降低了 100%, 流动速率对 I 的变化更敏感。水胶比 0.48

的 FRAAM 的流动速率和流动扩展度均高于水胶比 0.45 的 FRAAM, 但流动速率的差异也较流动扩展度更大, 说明流动速率对水胶比的变化也更敏感。即纤维和水胶比对 FRAAM 塑性黏度的影响比对屈服应力的影响更显著。无独有偶, Mehdipour 等^[15]的研究也表明, 坍落度扩展度试验所测得的玻璃纤维水泥砂浆工作性结果不如 V 型漏斗试验稳定性好。这是由于坍落度扩展度研究的是砂浆的自由变形能力, 而无法体现砂浆在约束状态下的变形能力, 在纤维增强水泥基材料中尤为明显。

与文献报道的混杂纤维增强硅酸盐水泥基复合材料^[26]的结果相似, I 与 FRAAM 流动性参数之间存在二次函数关系, 如式(1)~式(4)所示, 相关性较好, 相关系数均在 0.95 以上。可见, 随 I 的增加, 坍落度扩展度和流动速率减小。而当二次函数曲线接近最低点时, FRAAM 也已无法自由流动。

$r = 0.45$:

$$S = 238.52 - 0.34I + 0.0002I^2, R^2 = 0.93 \quad (1)$$

$r = 0.45$:

$$\mu = 64.33 - 0.13I + 0.00003I^2, R^2 = 0.95 \quad (2)$$

$w/b = 0.48$:

$$S = 262.17 - 0.40I + 0.0003I^2, R^2 = 0.96 \quad (3)$$

$r = 0.48$:

$$\mu = 151.64 - 0.15I + 0.00004I^2, R^2 = 0.98 \quad (4)$$

其中: r 为水胶比; S 为流动扩展度(mm); μ 为流动速率(mL/s); I 为纤维增强指数; R^2 为回归分析相关系数。

表 2 所示为本工作与文献[8, 15]中纤维增强砂浆相对流动扩展度的对比。无论水胶比为 0.45 还是 0.48, 在 $I \approx 300$ 和 700 时, PPF 碱激发砂浆的相对流动扩展度均小于 PPF 水泥砂浆, 而大于玻璃纤维水泥砂浆。即 PPF 对碱激发砂浆工作性的劣化较水泥砂浆更显著, 而弱于玻璃纤维对水泥砂浆工作性的劣化程度。这是因为纤维间摩擦力越大, 纤维增强砂浆达到相同的工作性所需要的能量就越多^[8]。纤维间摩擦力的大小与接触的纤维间的法向力成正比, 而这一法向力是纤维刚度的函数。根据 Martinie 等^[6]的理论, 纤维的刚度指数定义为式(5)。

$$\frac{f}{l} \cong \frac{\tau_0}{E} (l/d)^3 \quad (5)$$

其中: τ_0 为水泥基材料的屈服应力; E 为纤维的弹性模量, 而 l/d 为纤维的长径比。纤维的刚度指数小于 1% 为刚性纤维^[6]。文献[6]中硅酸盐水泥基复

合材料中钢纤维、玻璃纤维和 PPF 的刚度指数分别为 0.03%、2%和 39%~3 500%^[27]。本工作中, FRAAM 中 PPF 的刚度指数介于 2.6%~20.9%, 大于 1%, 为柔性纤维, 其值介于硅酸盐水泥砂浆中的 PPF 与玻璃纤维之间, 且纤维刚度指数与纤维增强砂浆的流动性指标正相关, 纤维刚度指数越小, 纤维对砂浆的流动性劣化作用越显著。

表 2 本工作与文献[8, 15]中纤维增强砂浆相对流动扩展度对比

Table 2 Comparison table of relative flow spread of fiber reinforced mortar between this work and literatures[8, 15]

Type of Mortar	Relative flow rate/%		
	$I \approx 60$	$I \approx 300$	$I \approx 700$
FRAAM in this work	104($r=0.45$)	67($r=0.45$)	52($r=0.45$)
	99($r=0.48$)	63($r=0.48$)	46($r=0.48$)
PPF mortar ^[8]	91	74	61
Glass-fiber mortar ^[15]	83	65	26

r represents water-binder ratio.

2.2 I 对 FRAAM 表观密度和超声波速的影响

图 3 为表观密度与 I 的关系图。水胶比为 0.45 的 FRAAM 的表观密度高于 0.48 的 FRAAM, 且水胶比 0.48 的 FRAAM 表观密度的数据离散性更大, 表观密度的下降是由于碱激发砂浆中自由水的增多造成的, 而大水胶比组的严重泌水也导致拌合物稳定性变差, 硬化后表观密度的结果更加离散。

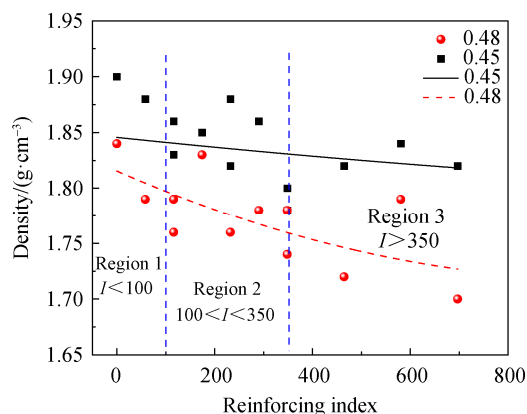


图 3 纤维碱激发砂浆的纤维增强指数与表观密度的关系
Fig. 3 Relationships of I -apparent density of FRAAM

随着 I 的增加, 表观密度总体呈下降的趋势。表观密度表征的是 FRAAM 的致密性和均匀性。在第 1 阶段和第 2 阶段($I < 350$)内, 表观密度有所降低, 但下降比例较低, FRAAM 的和易性总体较好, 没有明显纤维结团的情况发生, 因此 FRAAM 较致密, 表观密度较高。而在第 3 阶段($I > 350$), 表观密度随着 I 的增大显著减小, 这是由纤维结团和分

散不均匀导致的。

超声波速的试验结果也印证了上述分析, 如图 4 所示。水胶比为 0.45 时, 随着 I 的增大, 超声波速呈现先上升后下降的趋势, 在第 2 阶段($100 < I < 350$)时达到峰值。超声波速体现了砂浆的致密性和均匀性。在第 1 阶段和第 2 阶段($I < 350$)内, FRAAM 表观密度相对较高, 且 PP 纤维可以桥接缺陷和初始裂缝, 有助于超声波的传导, 因此 FRAAM 的超声波速还有所增大^[28]。而在第 3 阶段($I > 350$), 超声波速随着 I 的增大显著减小, 这是由于基体表观密度减小, 且纤维结团和分散不均匀也降低了桥接缺陷和初始裂缝的能力。与表观密度类似, 大水胶比组的超声波速结果也更加离散。

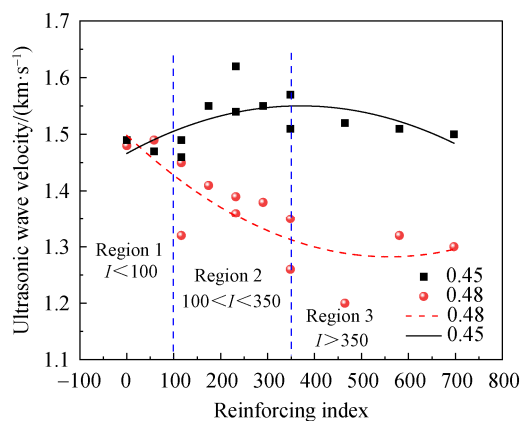


图 4 纤维碱激发砂浆的纤维增强指数与超声波速的关系
Fig. 4 Relationships of I -ultrasonic velocity of FRAAM

2.3 I 对 FRAAM 强度的影响

I 对 FRAAM 抗折强度的影响如图 5 所示。PPF 的加入对碱激发砂浆的抗折强度有显著提高, PPF 桥联裂缝并传递荷载, 限制了裂缝的扩展。总体来说, FRAAM 的抗折强度随 I 的增大而增大, 原因是纤维数量的增加和纤维长度的增大都能提升其桥联裂缝的能力, 显著提高材料的抗拉能力, 因此抗折强度得以提高。但并不是纤维含量越高, 抗弯强度增长越快, 对水胶比为 0.45 的 FRAAM, 当 $I > 500$ 时, 抗折强度开始出现明显的降低。当 $I > 500$ 时, 水胶比 0.48 的 FRAAM 抗折强度开始高于水胶比 0.45 的 FRAAM, 说明与基体内部缺陷造成的劣化相比, 纤维对砂浆抗拉强度的提高作用更显著。

表 3 为本工作与文献中纤维增强砂浆相对抗折强度的对比。在 $I \approx 60$ 和 300 时, PPF 碱激发砂浆的相对抗折强度均小于 PPF 水泥砂浆和玻璃纤维水泥砂浆, 而在 $I \approx 700$ 时, 大水胶比 PPF 碱激发砂浆的相对抗折强度大于 PPF 水泥砂浆和玻璃纤

维水泥砂浆。主要原因是碱激发材料的塑性黏度显著大于硅酸盐水泥基材料^[2], PPF 在碱激发砂浆中的分布和取向较其在水泥砂浆中变差, 因此 PPF 碱激发砂浆的相对抗折强度总体小于 PPF 水泥砂浆; 而当水胶比较大时, 基体塑性黏度降低, PPF 的分布和取向得到改善, 因此 PPF 碱激发砂浆的相对抗折强度显著提高。

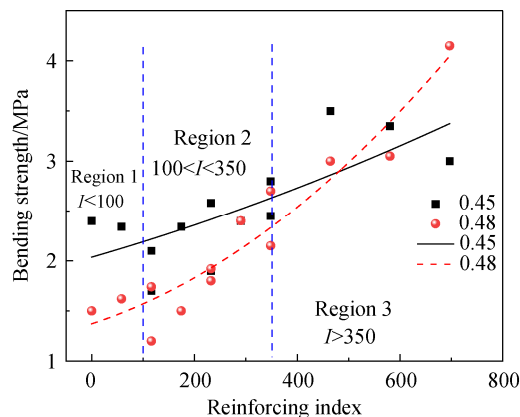


图 5 纤维碱激发砂浆的纤维增强指数与抗折强度的关系
Fig. 5 Relationships of I -bending strength of FRAAM

表 3 本工作与文献[8, 15]中纤维增强砂浆相对抗折强度对比

Table 3 Comparison table of relative bending strength of fiber reinforced mortar between this paper and literatures

Type of Mortar	Relative bending strength /%		
	$I \approx 60$	$I \approx 300$	$I \approx 700$
FRAAM in this work	98($r=0.45$) 108($r=0.48$)	100($r=0.45$) 160($r=0.48$)	125($r=0.45$) 277($r=0.48$)
PPF mortar ^[8]	157	167	133
Glass-fiber mortar ^[15]	157	183	120

图 6 为 I 对抗压强度的影响。抗压强度先上升(超过 6%), 但当 I 达到 350 左右时, 抗压强度开始下降, 这与超声波速的变化趋势比较接近。原因是 I 小于 350 时, 纤维分散良好, 无明显结团, 如图 7a 所示, 纤维提高了砂浆的耗能能力, 提升其抗压强度、抗折强度、超声波速。然而, 当 I 超过 $I_d=350$ 时, 纤维往往会出现明显的结团, 导致砂浆中形成更多的缺陷, 如图 7b 所示, 从而降低了砂浆的抗压强度、表观密度和超声波速。

对比图 5 和图 6, 在 $I=350$ 左右时, 抗压强度下降趋势较抗折强度更明显, 因为抗压强度对砂浆内的缺陷更敏感。表 4 为本工作与文献[8, 15]中纤维增强砂浆相对抗压强度的对比。在 $I \approx 60$ 、300 和 700 时, PPF 碱激发砂浆的相对抗压强度均大于 PPF 水泥砂浆和玻璃纤维水泥砂浆。即 PPF 对碱激

发砂浆抗压强度的劣化作用在相对较小、甚至还有一定程度的提高, 而 PPF 和玻璃纤维对水泥砂浆的劣化作用则更显著, 原因是纤维与碱激发砂浆的界面黏结较水泥砂浆更强^[29], 而纤维与水泥砂浆的界面薄弱部位更多, 导致抗压强度的劣化更明显。碱激发材料的界面过渡区更密实、均匀, 原因是在孔隙溶液中 Na_2SiO_3 的减水作用和较高初始浓度的 $(\text{SiO}_4)^{-4}$ ^[30]。

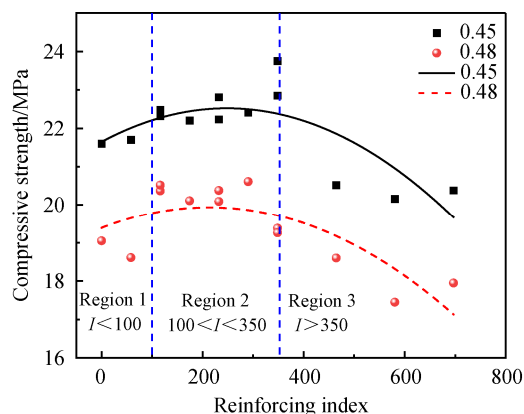
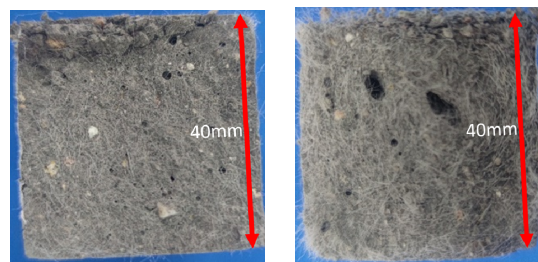


图 6 纤维碱激发砂浆的纤维增强指数与抗压强度的关系
Fig. 6 Relationships of I -compressive strength of FRAAM



(a) 0.45-6-0.3 (b) 0.45-12-1.5
图 7 纤维碱激发砂浆抗折破坏后试件的断面形貌

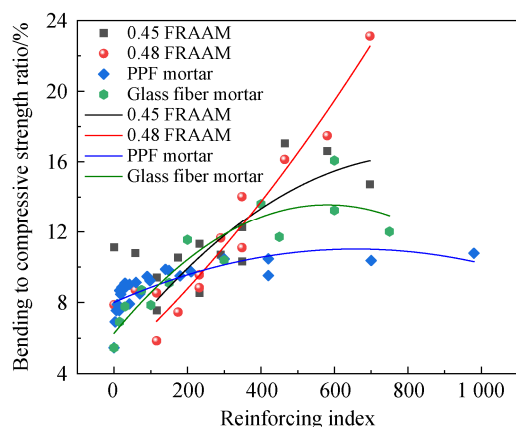
Fig. 7 Section morphology of specimens of FRAAM after flexural damage

表 4 本工作与文献[8, 15]中纤维增强砂浆相对抗压强度对比

Table 4 Comparison table of relative compressive strength of fiber reinforced mortar between this work and literatures[8, 15]

Type of Mortar	Relative compressive strength /%		
	$I \approx 60$	$I \approx 300$	$I \approx 700$
FRAAM in this work	100($r=0.45$) 98($r=0.48$)	104($r=0.45$) 108($r=0.48$)	94($r=0.45$) 94($r=0.48$)
PPF mortar ^[8]	94	87	70
Glass-fiber mortar	98	96	55

图 8 为 I 对 FRAAM 和纤维增强水泥砂浆折压比的影响。折压比常被用于衡量水泥基材料的韧性, 其值越大, 水泥基材料的韧性越高^[31]。

图8 纤维增强指数与纤维增强砂浆抗压强度比的关系^[8, 15]Fig. 8 Relationships of I -bending to compressive strength ratio of fiber reinforced mortar^[8, 15]

在 $I < 100$ 时, FRAAM 与纤维增强水泥砂浆的抗压比相比差距不大, 个别 FRAAM 试件的抗压比还略小于纤维增强水泥砂浆, 原因是该阶段纤维根数较少, 还难以充分发挥其阻裂增韧效果, 试件的强度与韧性主要由基体控制, 而 Ding 等^[32]研究证实无纤维的碱激发材料比水泥基材料脆性更显著。随着 I 的增大, FRAAM 的抗压比增速较纤维增强水泥砂浆更快, $I > 100$ 时, PPF 对碱激发砂浆的增韧效果优于水泥砂浆。当 $I > 350$ 时, 无论水胶比 0.45 还是 0.48 的 FRAAM, 其抗压比均大于相同 I 的纤维增强水泥砂浆, 说明此时 FRAAM 的韧性更优异, 主要来源于 PPF 与碱激发砂浆更好的界面粘结^[29], 使其在拔出和拉断时耗散了更多的能量。

2.4 I 对 FRAAM 裂缝特征的影响

随着 I 的提高, 除了 FRAAM 的抗折强度得到显著提高外(见图 5), 其受弯破坏时的裂缝形貌也发生了显著改变, 如图 9 所示。当 $I=0$ 时(图 9a), 砂浆为明显的脆性破坏, 端口平整, 裂缝基本垂直于受拉方向。当 $I=174.19$ 时(图 9b), 砂浆开始向延性破坏转变, 断口裂缝变的曲折, 裂缝边缘还能观察到 PPF 上粘附的砂浆碎片和大量受拉拔出的纤维。当 $I=290.32$ 时(图 9c), 试件在破坏时都还能保持其整体性, 在纤维的桥联作用下没有折断, 裂缝变的更加曲折。而当 I 进一步增大至 348.39 时(图 9d), 试件在破坏时出现了多缝开裂的趋势, 由单一主裂缝转变为 2~3 条主裂缝, 意味着试件在破坏时变形能力和耗能能力的显著提高, 这也是 FRAAM 抗折强度和抗压比提高的重要原因。

为进一步定量评价 I 对 FRAAM 破坏时裂缝特征的影响, 利用 IMAGE PRO 提取裂缝并将试件侧面、底面的图像拼接为完整的裂缝, 进而计算裂缝

的分形维数。分形维数可以用来描述混凝土裂缝形貌的复杂程度, 利用计盒维数法定量描述裂缝的分形特征。计盒维数法是一种测量空间分形维数的计算方法: 将裂缝放置在均匀分割的盒子上, 计算出完全覆盖裂缝所需的最小盒子数。逐级缩小盒子尺寸, 记录所需盒子数量的变化^[33]。

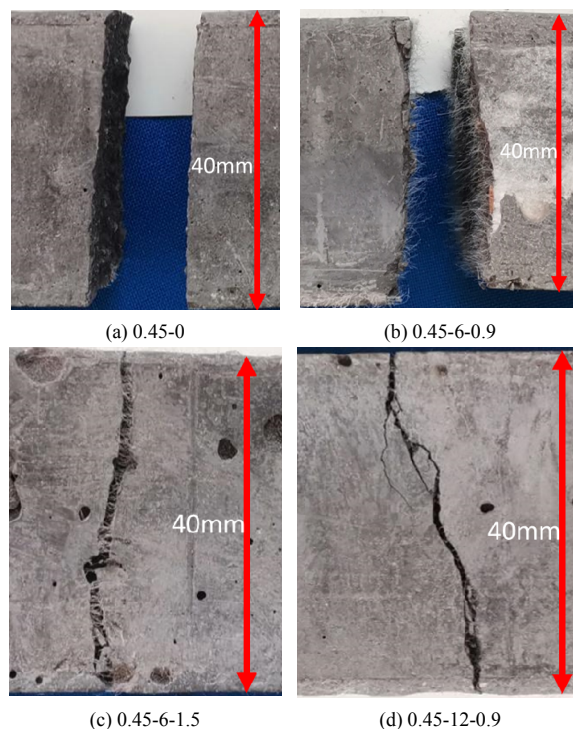


图9 纤维碱激发砂浆抗折破坏后的裂缝形貌

Fig. 9 Fracture morphology of FRAAM after flexural damage

假设盒子边长为 a , 将空间分成 N 个盒子, 分形维数的定义如式下:

$$\text{Fractal}_{\text{box}}(\text{crack}) = \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\lg N(a)}{\lg(1/a)} \quad (6)$$

FRAAM 表面裂缝分形维数随 I 的变化如图 10 所示。可以发现随着 I 的增大, FRAAM 表面裂缝分形维数总体呈增大趋势, 原因是随着纤维数量和长度的增大, 纤维桥联裂缝的能力增强, 试件弯曲破坏时, 裂缝的曲折程度增大、裂缝根数增多, 裂缝变得愈加复杂化, 则其分形维数随之增大。

总体来看, 在 $I < 350$ 的阶段, 水胶比 0.45 的 FRAAM 的裂缝分形维数大于水胶比 0.48 的 FRAAM; 而在 $I > 350$ 的阶段, 水胶比 0.45 的 FRAAM 的裂缝分形维数则小于水胶比 0.48 的 FRAAM。这与图 5 中抗折强度的变化规律类似, 说明裂缝分形维数与其抗折强度有一定相关性^[34]。此外, 裂缝分形维数的变化规律也证实了 PPF 引入后对于碱激发砂浆韧性的显著提高作用。

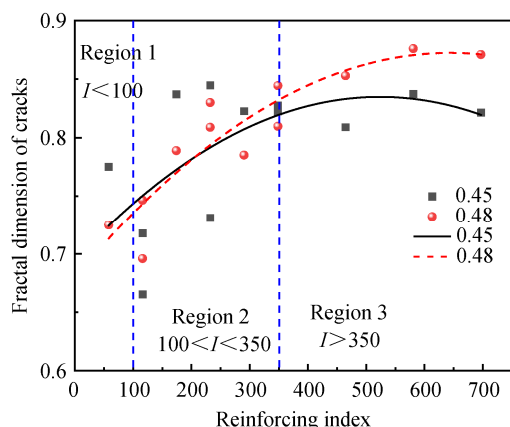


图 10 纤维碱激发砂浆纤维增强指数与裂缝分形维数的关系
Fig. 10 Relationships of I -Cracks fractal dimension of FRAAM

2.5 关于 I 阈值的讨论

为便于与文献中数据对比,参考 Roussel 等^[35]的方法将本工作中的坍落扩展度转化为相对屈服应力(即掺加纤维砂浆屈服应力与无纤维砂浆屈服应力的比值),如图 11 所示。无论是纤维增强水泥砂浆还是 FRAAM,随着 I 的增大,相对屈服应力均呈先小幅上下波动、接着缓慢增长、最终迅速增长的趋势,采用指数函数回归分析的相关性较好,如图 11 所示。

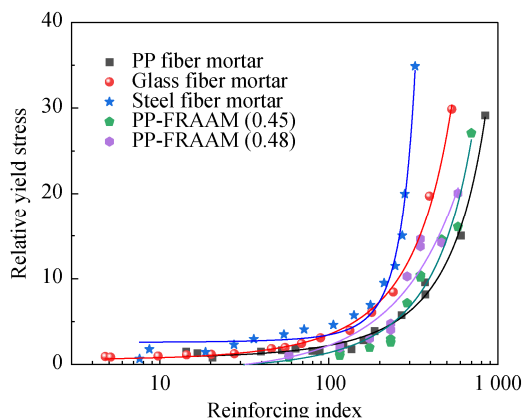


图 11 纤维增强指数对砂浆相对屈服应力的影响^[6, 8, 15]
Fig. 11 Effect of I on relative yield stress of mortars^[6, 8, 15]

当 $I < 20$ 时,钢纤维增强砂浆的相对屈服应力与玻璃纤维、PPF 增强砂浆的相对屈服应力相差不大,甚至略小于玻璃纤维、PPF 增强砂浆的相对屈服应力,说明此时钢纤维数量较少,纤维间无接触,对浆体流变性基本没有影响;而当 $I > 20$ 时,钢纤维增强砂浆的相对屈服应力均大于其他纤维增强砂浆,说明此时纤维间的接触开始影响砂浆的流变性,也即钢纤维松散堆积状态下的 I 阈值大致在 20 左右。类似地,当 $I > 30$ 时,玻璃增强砂浆的相对

屈服应力均大于 PPF 增强砂浆,这与 Mehdipour 等^[15]提出的玻璃纤维在松散堆积状态下的 I 阈值是一致的。

当 $I < 100$ 时,PPF-FRAAM 的相对屈服应力小于 PPF 增强水泥砂浆;当 $I > 100$ 时,PPF-FRAAM 的相对屈服应力与 PPF 增强水泥砂浆相差不大,所确定 PPF-FRAAM 在松散堆积状态 I 阈值即为 100。

而当 $I > 300 \sim 400$ 时,PPF-FRAAM 的相对屈服应力均大于 PPF 增强水泥砂浆,其增韧效果亦优于水泥砂浆基体,所确定 PPF-FRAAM 在紧密堆积状态 I 阈值为 350,而 Emdadi 等^[8]确定的 PPF 增强水泥砂浆在紧密堆积状态 I 阈值为 300,二者较接近。当碱激发砂浆中 PPF 的 I 在 $100 \sim 350$ 时,FRAAM 能够在保持较好工作性的同时获得良好的强度、韧性和密实度,即碱激发砂浆中 PPF 的最优体积掺量在 $100/(l/d) \sim 350/(l/d)$ 之间。

3 结论

1) 纤维的加入和水胶比的改变对碱激发砂浆流动速率的影响比对坍落扩展度的影响更显著,表明纤维和水胶比对碱激发砂浆塑性黏度的影响比对屈服应力的影响更大。

2) 当 I 小于 $I_c=100$ 时,纤维的影响可以忽略,纤维间的距离较远,砂浆的工作性基本不受影响,但此时纤维在碱激发砂浆和水泥砂浆中的增韧效果差异不大。

3) 当 I 值在 $I_c=100$ 和 $I_d=350$ 之间时,碱激发砂浆的抗折强度、抗压强度、折压比及裂缝分形维数均得到显著提高,PPF 对碱激发砂浆的增韧效果开始优于水泥砂浆,且碱激发砂浆仍可自由流动。

4) 当 I 值高于 $I_d=350$ 时,显著的纤维结团会极大劣化碱激发砂浆的工作性,其硬化后砂浆的密实度变差、抗压强度降低。

5) PPF 增强碱激发砂浆在松散堆积状态和紧密堆积状态下的阈值分别为 100 和 350,碱激发砂浆中 PPF 的最优体积掺量在 $100/(l/d) \sim 350/(l/d)$ 之间。

参考文献:

- [1] SILVA G, KIM S, AGUILAR R, et al. Natural fibers as reinforcement additives for geopolymers - A review of potential eco-friendly applications to the construction industry[J]. Sustain Mater Technol, 2020, 23: e132.
- [2] CRIADO M, PALOMO A, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A, et al. Alkali activated fly ash: Effect of admixtures on paste rheology[J]. Rheol Acta, 2009, 48(4): 447-455.

- [3] 郭军. 碱激发超高性能混凝土(UHPC)的制备与性能研究[D]. 福州大学, 2017.
GUO Jun. Research on process and properties of alkali-activated cement based ultra-high performance concrete (in Chinese, dissertation). Fuzhou: Fuzhou University, 2017.
- [4] LIU Y, SHI C, ZHANG Z, et al. Mechanical and fracture properties of ultra-high performance geopolymer concrete: Effects of steel fiber and silica fume[J]. *Cem Concr Compos*, 2020, 112: 103665.
- [5] 王力. 钢纤维-混凝土基体界面粘结性能数值分析[J]. *水利与建筑工程学报*, 2019, 17(2): 56–60.
WANG Li. *J Water Resour Archit Eng* (in Chinese), 2019, 17(2): 56–60.
- [6] MARTINIE L, ROSSI P, ROUSSEL N. Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction[J]. *Cem Concr Res*, 2010, 40(2): 226–234.
- [7] 丁一宁, 王岳华, 董香军, 等. 纤维自密实高性能混凝土工作度的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2005, 38(11): 51–57.
DING Ying, WANG Yuehua, DONG Xiangjun, et al. *China Civ Eng J* (in Chinese), 2005, 38(11): 51–57.
- [8] EMDADI A, MEHDIPOUR I, LIBRE N A, et al. Optimized workability and mechanical properties of FRCM by using fiber factor approach: theoretical and experimental study[J]. *Mater Struct*. 2015, 48(4): 1149–1161.
- [9] MEHDIPOUR I, VAHDANI M, LIBRE N A, et al. Relationship between workability and mechanical properties of fibre-reinforced self-consolidating mortar[J]. *Mag Concr Res*, 2013, 65(17): 1011–1022.
- [10] SI W, CAO M, LI L. Establishment of fiber factor for rheological and mechanical performance of polyvinyl alcohol (PVA) fiber reinforced mortar[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 265: 120347.
- [11] PAKRAVAN H R, LATIFI M, JAMSHIDI M. Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 142: 280–294.
- [12] PAKRAVAN H R, OZBAKKALOGLU T. Synthetic fibers for cementitious composites: A critical and in-depth review of recent advances[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 207: 491–518.
- [13] FARHAN K Z, JOHARI M A M, DEMIRBOĞA R. Impact of fiber reinforcements on properties of geopolymer composites: A review[J]. *J Build Eng*, 2021, 44: 102628.
- [14] 李黎, 曹明莉. 混杂纤维增强水泥基复合材料弯曲韧性与纤维增强指数的定量关系[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(5): 30–34.
LI Li, CAO Mingli. *Acta Mater Compos Sin* (in Chinese), 2018, 35(5): 30–34.
- [15] MEHDIPOUR I, LIBRE N A, SHEKARCHI M, et al. Effect of workability characteristics on the hardened performance of FRSCCMs[J]. *Constr Build Mater*, 2013, 40: 611–621.
- [16] CECS. CECS38-2004 纤维混凝土结构技术规程[S]. 中国: 北京, 中国工程建设标准化协会, 2004.
CECS. Technical specification for fiber reinforced concrete structures: CECS 38-2004 (in Chinese). Beijing: China Planning Press, 2004.
- [17] SAID S H, RAZAK H A, OTHMAN I. Flexural behavior of engineered cementitious composite (ECC) slabs with polyvinyl alcohol fibers[J]. *Constr Build Mater*, 2015, 75: 176–188.
- [18] SAID S H, RAZAK H A. The effect of synthetic polyethylene fiber on the strain hardening behavior of engineered cementitious composite (ECC)[J]. *Mater Design*, 2015, 86: 447–457.
- [19] CAO M, SI W, XIE C. Relationship of Rheology, Fiber Dispersion, and Strengths of Polyvinyl Alcohol Fiber-Reinforced Cementitious Composites[J]. *ACI Mater J*, 2020, 117(3): 191–204.
- [20] CAO M, LI L, XU L. Relations between rheological and mechanical properties of fiber reinforced mortar[J]. *Computers Concr*, 2017, 20(4): 449–459.
- [21] ASTM. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete (ASTM C597–16)[S]. West Conshohocken, PA, USA, Astm, 2016.
- [22] 中华人民共和国质量技术监督局. 水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)[S]. 北京, 中华人民共和国质量技术监督局, 1999.
Bureau of Quality and Technical Supervision of the People's Republic of China. Test method of cement mortar strength (ISO method) (in Chinese). Beijing, Bureau of Quality and Technical Supervision of the People's Republic of China, 1999.
- [23] CAO M, ZHANG C, LV H. Mechanical response and shrinkage performance of cementitious composites with a new fiber hybridization[J]. *Constr Build Mater*, 2014, 57: 45–52.
- [24] KRIEGER I M, DOUGHERTY T J. A Mechanism for Non-Newtonian Flow in Suspensions of Rigid Spheres[J]. *Trans Soc Rheol*, 1959, 3(1): 137–152.
- [25] PHILIPSE A P. The random contact equation and its implications for (colloidal) rods in packings, suspensions, and anisotropic powders[J]. *Langmuir*, 1996, 12(5): 1127–1133.
- [26] CAO M, LI L. New models for predicting workability and toughness of hybrid fiber reinforced cement-based composites[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 176: 618–628.
- [27] CAO M, LI L, SHEN S. Influence of reinforcing index on rheology of fiber-reinforced mortar[J]. *ACI Mater J*, 2019, 116(6): 95–105.
- [28] LI L, CAO M. Influence of calcium carbonate whisker and polyvinyl alcohol-steel hybrid fiber on ultrasonic velocity and resonant frequency of cementitious composites[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 188: 737–746.
- [29] AYDIN S, BARADAN B. The effect of fiber properties on high performance alkali-activated slag/silica fume mortars[J]. *Compos Part B: Eng*, 2013, 45(1): 63–69.
- [30] SHI C, XIE P. Interface between cement paste and quartz sand in alkali-activated slag mortars[J]. *Cem Concr Res*, 1998, 28(6): 887–896.
- [31] CAO M, ZHANG C, LI Y, et al. Using calcium carbonate whisker in hybrid fiber-reinforced cementitious composites[J]. *J Mater Civ Eng*, 2015, 27(4): 4014139.
- [32] DING Y, DAI J, SHI C. Fracture properties of alkali-activated slag and ordinary Portland cement concrete and mortar[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 165: 310–320.
- [33] 郭伟, 秦鸿根, 陈惠苏, 等. 分形理论及其在混凝土材料研究中的应用[J]. *硅酸盐学报*, 2010, 38(7): 1362–1368.
GUO Wei, QIN Honggen, CHEN Huisu et al. *J Chin Ceram Soc*, 2010, 38(7): 1362–1368.
- [34] LI L, LI Z, CAO M, et al. Nanoindentation and porosity fractal dimension of calcium carbonate whisker reinforced cement paste after elevated temperatures (up to 900°C)[J]. *Fractals*, 2021, 29(2): 2140001.
- [35] ROUSSEL N, STEFANI C, LEROY R. From mini-cone test to Abrams cone test: measurement of cement-based materials yield stress using slump tests[J]. *Cem Concr Res*, 2005, 35(5): 817–822.