

粗骨料超高性能混凝土流变与稳定性

郑晓博^{1,2}, 韩方玉³, 刘建忠^{1,2}, 刘加平³, 沙建芳^{1,2}, 林 玮^{1,2}

(1. 高性能土木工程材料国家重点实验室, 南京 211103; 2. 江苏苏博特新材料股份有限公司, 南京 211103;
3. 东南大学材料科学与工程学院, 南京 211189)

摘要: 为提升粗骨料超高性能混凝土(CA-UHPC)的流变与物相稳定性能, 研究了硅灰、粗骨料和纤维用量对 CA-UHPC 流变性能的影响规律; 建立了流变参数、纤维、骨料分布间的关系。结果表明: CA-UHPC 呈剪切变稀行为, Modified bingham 模型具有更准确的流变参数拟合结果, 测试流动度宜控制在 450~690 mm。增加硅灰用量, 屈服应力增大而黏度减小, 剪切变稀现象弱化; 增加粗骨料用量, 屈服应力和黏度先降低后增加, 剪切变稀现象加剧; 增加钢纤维掺量, 屈服应力和黏度均增加, 并加剧了剪切变稀现象。硬化后试件从上至下, 纤维分布减少, 而骨料分布增多。粗骨料的整体均匀分散程度随骨料用量的增加而提升, 但纤维会劣化粗骨料的均匀分散程度, 且随纤维掺量增加, 纤维和粗骨料均匀分布程度先升高后降低。

关键词: 粗骨料超高性能混凝土; 流变性能; 粗骨料分布; 钢纤维分布; 稳定性

中图分类号: TU528.31 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)11-2844-11

网络出版时间: 2022-10-12



Rheological Properties and Stability of Ultra-High Performance Concrete Containing Coarse Aggregate

ZHENG Xiaobo^{1,2}, HAN Fangyu³, LIU Jianzhong^{1,2}, LIU Jiaping³, SHA Jianfang^{1,2}, LIN Wei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of High Performance Civil Engineering Materials, Nanjing 211103, China; 2. Jiangsu Sobute New Materials Co., Ltd, Nanjing 211103, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: In order to improve the rheology and stability of ultra-high performance concrete containing coarse aggregate (CA-UHPC), the effects of silica fume, coarse aggregate, and steel fiber contents on the rheological properties of CA-UHPC were investigated, and the relationship among the rheological parameters, fiber, and coarse aggregate distribution was established. The results show that CA-UHPC usually exhibits a shear-thinning behavior. The modified Bingham model has more accurate fitting results of rheological parameters, and the fluidity required for the rheological properties test can be controlled at 450–690 mm. Increasing the silica fume content increases the yield stress, decreases the viscosity, and weakens the shear-thinning behavior. Increasing the coarse aggregate content firstly decreases and then increases the yield stress and viscosity, and intensifies the shear-thinning behavior. And increasing the steel fiber content increases the yield stress and viscosity, and intensifies the shear-thinning behavior. The number of steel fiber decreases from the top to the bottom of samples, while the proportion of coarse aggregate increases. The uniform dispersion degree of coarse aggregate increases with the increase of coarse aggregate content, but steel fibers deteriorate the uniform dispersion degree of coarse aggregate. The uniform distribution degree of steel fiber and coarse aggregate firstly increases and then decreases with the increase of steel fibers content.

Keywords: ultra-high performance concrete containing coarse aggregate; rheological properties; coarse aggregate distribution; steel fiber distribution; stability

传统超高性能混凝土(UHPC)因使用大掺量超细粉体、剔除粗骨料等因素, 存在成本高、弹性模

量低、收缩徐变大和结构轻量化突破难的问题^[1-2]。而粗骨料的引入不仅可以通过发挥骨架效应提高强

收稿日期: 2022-04-06。修订日期: 2022-04-30。

基金项目: 国家自然科学基金(51978318); 国家自然科学基金青年基金(52008191); 国家自然科学基金(51978246)。

第一作者: 郑晓博(1994—), 男, 硕士, 工程师。

通信作者: 韩方玉(1988—), 男, 博士, 工程师。

Received date: 2022-04-06. Revised date: 2022-04-30.

First author: ZHENG Xiaobo (1994–), male, Master, Engineer.

E-mail: zhengxiaobo@cnjsjk.cn

Correspondent author: HAN Fangyu (1988–), male, Ph.D., Engineer.

E-mail: hanfangyu@cnjsjk.cn

度和弹性模量、降低徐变,改善结构刚度稳定性,还能降低胶凝材料用量,减少成本^[3]。已有研究表明:掺入 27.5% 体积用量的玄武岩粗骨料, UHPC 弹性模量可提升 25.6% 达到 58.35 GPa^[4]; 通过降低胶凝材料用量并发挥刚性骨架作用, 32% 体积用量的粗骨料可降低 UHPC 自收缩 20%~38%^[5]。Wang 等^[6]引入 480 kg/m³ 粗骨料, 制备得到的粗骨料 UHPC 抗压强度超过 200 MPa, 弹性模量超过 54 GPa, 降低收缩徐变 60% 和水泥用量减少 30%。为了消除粗骨料对 UHPC 弯拉性能带来的负面影响, Li 等采用最大粒径小于 25 mm 的粗骨料和长度为粗骨料最大粒径 2~5 倍的钢纤维, 获得了弯曲性能良好的粗骨料 UHPC^[7]。然而粗骨料的引入也会对 UHPC 的流动性调控带来巨大挑战, 由于粗骨料和钢纤维的存在, 混凝土因组分密度差异导致的分层会引发结构整体性能的不均匀。如何通过调控拌合物的流变性能, 提高整体物相稳定性, 已成为混凝土设计研究中重点关注的方面^[8]。

剪切作用下, UHPC 通常为非 Newton 流体, 剪切应力和剪切速率间的非线性关系使得 Bingham 型不再适用, 改进 Bingham 和 Herschel-bulkley 模型常被用于描述超高性能混凝土的流变行为^[9-10]。针对外加剂^[11]、掺合料、颗粒特性^[12]和纤维掺量^[13]等影响因素, 国内外学者已经在不同 UHPC 体系(砂浆、砂浆+纤维)中进行了诸多研究, 建立了纤维分散、取向与流变参数间的影响关系^[14]。随减水剂用量增加, UHPC 浆体的屈服应力和体系黏度均降低, 但在高掺量下会提高体系黏度^[12]。增加硅灰掺量, UHPC 浆体的屈服应力和黏度均升高^[15], 但也有研究指出, 硅灰掺量增加到 20%, 其黏度先增加后降低, 而屈服应力先降低后增加^[16]。增加纤维用量可以显著提升 UHPC 的屈服应力和黏度; 其中, 增加刚性纤维用量会提高屈服应力, 而增加柔性纤维用量会提高黏度^[12]。Teng 等^[17]研究发现当 UHPC 的黏度为 50~70 Pa·s, 钢纤维的分散系数和取向系数可达 0.65 和 0.70 以上。但对于含粗骨料 UHPC, 相关研究工作尚未深入开展, 粗骨料和钢纤维的物相分布与稳定性影响机制没有明确, 这将制约粗骨料 UHPC 的规模化推广与应用。

基于此, 以含粗骨料超高性能混凝土(CA-UHPC)

为研究对象, 通过描述 CA-UHPC 的流变模型揭示掺合料、粗骨料用量和纤维掺量对 CA-UHPC 流变性能的影响规律, 进而建立流变参数、纤维、骨料分布间的作用关系, 以期对 CA-UHPC 的流变性能和物相稳定性调控提供参考。

1 实验

1.1 原材料

水泥为小野田 52.5 P-II 水泥, 密度为 3.19 g/cm³, 比表面积为 367 m²/kg, 化学组成见表 1; 硅灰(SF)密度为 2.25 g/cm³, 比表面积为 20 200 m²/kg; 掺合料由江苏苏博特新材料股份有限公司生产的 HDC 活性粉末, 密度为 2.58 g/cm³, 比表面积为 3 100 m²/kg。砂为粒径 ≤ 1.18 mm 的洁净河砂, 细度模数为 2.8; 粗骨料(CA)为 5~10 mm 的玄武岩碎石, 密度为 3.12 g/cm³; 减水剂由江苏苏博特新材料股份有限公司生产, 含固量为 30%、减水率大于 30%; 纤维为江苏苏博特新材料股份有限公司生产的 0.2/13 mm 平直型镀铜钢纤维(SSF)。为保证实验结果稳定性, 提前储备同一批次原材料, 并在测试前将所有原材料在(20±2) °C 环境条件下恒温 24 h。

1.2 制备

配合比、流动度和抗压强度见表 2。其中, 以使用 11% SF (胶凝材料质量分数)、480 kg/m³ CA 以及 0% SSF 为基准, 控制不同流动度制备 JZ1 (550 mm) 和 JZ2 (720 mm); 调整 SF 用量为 5%、7%、15% 制备 SF5%、SF7% 和 SF15%; 调整 CA 用量为 400 kg/m³、440 kg/m³、560 kg/m³ 制备 CA400、CA440 和 CA560; 调整 SSF 体积掺量为 0.5%、1.0%、2.0% 制备 SSF0.5%、SSF1%、SSF2%-1 和 SSF2%-2。具体制备与成型过程为: 先将水泥、硅灰、掺合料、砂和粗骨料干混 30 s; 加入水和减水剂后搅拌 4 min, 以获得稳定流动浆体; 再加入钢纤维搅拌 3 min, 搅拌结束。取适量粗骨料 UHPC 拌合物进行混凝土流变性能测试, 剩余浆体进行流动度测试并成型立方体试块用于抗压强度测试和骨料、纤维的分布试验研究。

1.3 方法

1.3.1 流动度 参照 GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》测试 CA-UHPC 拌合物的流动扩展度。

表 1 水泥化学组成
Table 1 Chemical composition of cement

									w/%
CaO	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Others
64.312	19.468	1.237	3.170	4.226	3.143	0.109	0.536	0.251	3.548

w—Mass fraction.

表 2 CA-UHPC 配合比
Table 2 Mix proportions of CA-UHPC

Sample No.	Mix proportion/(kg·m ⁻³)							Fluidity/mm	28 d compressive strength/MPa
	Cement	HDC	Silica fume	River sand	Coarse aggregate	Steel fiber	Superplasticizer		
JZ1	700	190	110	850	480	0	14	140	132.0
JZ2	700	190	110	850	480	0	15.5	140	135.6
SF5%	700	250	50	850	480	0	14	140	126.5
SF7%	700	230	70	850	480	0	14	140	130.2
SF15%	700	150	150	850	480	0	14	140	122.4
CA400	700	190	110	850	400	0	14	140	128.5
CA440	700	190	110	850	440	0	14	140	131.6
CA560	700	190	110	850	560	0	14	140	125.2
SSF0.5%	700	190	110	850	480	56	16	140	137.7
SSF1%	700	190	110	850	480	78	16	140	142.2
SSF2%	700	190	110	850	480	156	16	140	155.8
SSF2%-2	700	190	110	850	480	156	13	140	144.2

JZ1 is also the mix proportion of 11% silica fume content (SF11%) and 480 kg/m³ coarse aggregate content (CA480);SSF0.5%, SSF1%, SSF2% and SSF2%-2 represent the steel fiber volume fraction of 0.5%, 1% and 2% respectively.

1.3.2 抗压强度 参照 GB/T 31387—2015《活性粉末混凝土》测试标准养护条件下 28 d 抗压强度, 试件尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm。

1.3.3 流变性能 使用冰岛 ConTec 公司的 Viscometer 5 砂浆/混凝土流变仪对新拌混凝土进行流变性能测试以获取流变参数。流变仪的转子半径为 $R=100$ mm, 测试筒半径为 $R_0=145$ mm, 测试程序如图 1 所示。转速范围为 0.04~0.66 r/s, 通过测试转速从 0.66 r/s 下降到 0.04 r/s 过程中 8 个阶段的扭矩平均值, 测定 CA-UHPC 拌合物的流变性能。每组试验测试 3 次, 第 1 次测试后静置 1.5 min (作为预剪切阶段), 第 2 次和第 3 次测试间隔 1 min, 对第 2、3 次数据取平均值作为该组的流变参数拟合数据。其中, 测试过程中观察转子在旋转过程

中剪切带的位置, 若在转子和测试桶壁间有明显的剪切带, 则意味有栓流存在, 进行标记。

1.3.4 物相稳定性 采用抗压强度试件, 将硬化后的试件沿浇筑方向在中心位置和距中心位置 25 mm 处进行切割, 得到 2 个厚度为 15 mm 的薄片; 使用 Canon DS126201 相机取景; 将图像导入 Image-Pro Plus 软件进行图像处理; 将获得的灰度图像沿水平方向分成 9 等份, 计算粗骨料和钢纤维的分布情况; 以上述 2 片样品测试结果的平均值作为本组试件的最终结果。

1) 骨料分布

参照武斌等^[18]对混凝土中骨料分布情况的表征方法, 计算各等份中骨料面积与该等份面积的比例, 使用式(1)计算得到粗骨料的稳定性指数 SI(%)值。

$$SI(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (P_i - \bar{P})^2}{\frac{10}{\bar{P}}}} \times 100 \quad (1)$$

式中: P_i 为第 i 等份骨料面积与该等份面积的比例, $\bar{P}$ 为 P_i 的平均值。SI(%)值越大, 表示骨料分布均匀程度越低, 稳定性越差。

2) 纤维分布

以纤维分散系数 α 来定量评价钢纤维的均匀分散性能, α 可用截面内的纤维数量分布表示。计算公式如式(2)^[19]:

$$\alpha = \exp \left(-\sqrt{\frac{\sum (x_i / \bar{x}_{\text{avg}} - 1)^2}{t}} \right) \quad (2)$$

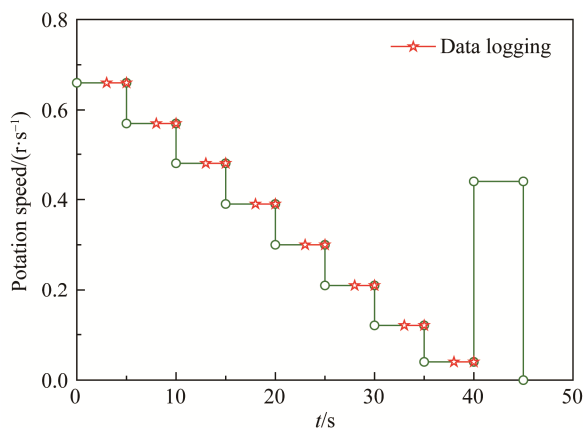


图 1 流变测试程序

Fig. 1 Procedure for rheology test

式中: t 为试件切割面所采集的图像张数; x_i 为切割面上第 i 张图像中的纤维数量; $\bar{x}_{\text{avg}}$ 为采集的所有图

像中纤维数量的平均值。 α 越接近于 1, 纤维均匀分散程度越高。

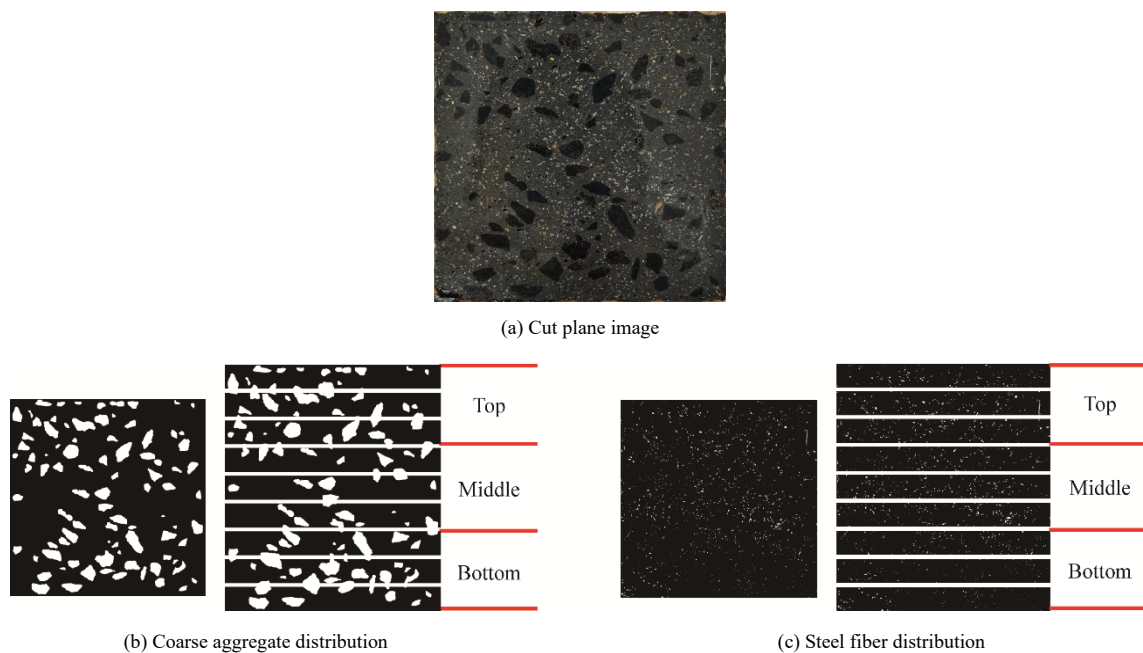


图 2 物相稳定性测试示意图

Fig. 2 Schematic diagram of phase stability test

2 结果与讨论

2.1 流变模型

为获得更具普适性的结果, 基于表 2 配合比, 考虑流动度、掺合料用量、石子用量和钢纤维掺量等多因素变化, 选取 JZ1、JZ2、SF15%、CA400、CA560、SSF0.5% 和 SSF2%-2 用于研究适用于 CA-UHPC 体系的流变模型, 测试得到的扭矩-转速 (T - N) 曲线如图 3 所示。由图 3 可知, CA-UHPC 在剪切作用下呈现明显的非线性行为, 但由于流变仪在标准测试条件记录转速与扭矩值, 此时通过内置公式将原始数据转换为剪切速率-剪切应力曲线进行拟合得到的结果并不准确, 需利用 Couette 转换对稳态下测定的扭矩 T 与转速 N 进行推导^[20-21]。式 (3)~式(6)和式(7)~式(10)为 Modified Bingham 模型和 Herschel-Bulkley 模型对应的 Couette 转换方程。

改进 Bingham 模型:

$$T = \frac{4\pi h \ln \frac{R_0}{R}}{\frac{1}{R^2} - \frac{1}{R_0^2}} \tau_0 + \frac{8\pi^2 h}{\frac{1}{R^2} - \frac{1}{R_0^2}} \mu N + \frac{8\pi^3 h (R_0 + R)}{\left(\frac{1}{R^2} - \frac{1}{R_0^2}\right) (R_0 - R)} c N^2 = G + H \cdot N + C N^2 \quad (3)$$

$$\tau_0 = \frac{\left(\frac{1}{R^2} - \frac{1}{R_0^2}\right)}{4\pi h \ln \left(\frac{R_0}{R}\right)} G \quad (4)$$

$$\eta_p = \frac{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_0^2}\right)}{8\pi^2 h} H \quad (5)$$

$$c = \frac{\left(\frac{1}{R^2} - \frac{1}{R_0^2}\right) (R_0 - R)}{8\pi^3 h (R_0 + R)} C \quad (6)$$

Herschel-bulkley 模型:

$$T = \frac{4\pi h \ln \frac{R_0}{R}}{\frac{1}{R^2} - \frac{1}{R_0^2}} \tau_0 + \frac{2^{2n+1} \pi^{n+1} h K}{n^n \left(\frac{1}{R^{2/n}} - \frac{1}{R_0^{2/n}}\right)^n} N^n \equiv G + H N^J \quad (7)$$

$$\tau_0 = \frac{\left(\frac{1}{R^2} - \frac{1}{R_0^2}\right)}{4\pi h \ln \left(\frac{R_0}{R}\right)} G \quad (8)$$

$$K = \frac{H n^n}{2^{2n+1} \pi^{n+1} h} \left(\frac{1}{R^{2/n}} - \frac{1}{R_0^{2/n}}\right)^n \quad (9)$$

$$n = J \quad (10)$$

式中： h 为转子浸没深度； R_0 为测试筒半径； R 为转子半径； G 与 H 为流动阻力与黏度系数， C 为常数， J 为流动指数系数，分别由式(3)和式(7)拟合扭矩与转速曲线得出。 τ_0 为屈服应力； μ 为黏度； c 为常数； K 为稠度系数； n 为流变特性指数； $c/\mu < 0$ 或 $n < 1$ 为剪切变稀， $c/\mu > 0$ 或 $n > 1$ 为剪切增稠。

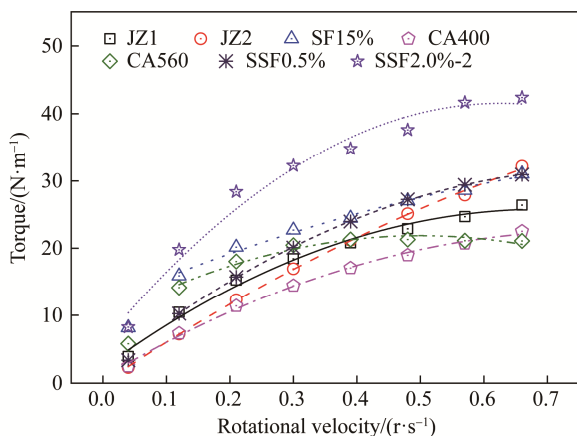


图3 扭矩-转速曲线

Fig. 3 T - N (torque-rotational velocity) curves

屈服应力为浆体开始稳定流动所需克服的最小阻力，Roussel 等^[22]提出了屈服应力和流动度之间的理论函数关系，通过对比计算值(Roussel 值)与拟合值来判定不同流变模型的准确性。

$$\tau_0 = \frac{225\rho_p g V^2}{4\pi^2 D_f^5} - \lambda \frac{D_f^2}{4V} \quad (11)$$

式中： ρ_p 为浆体密度； g 为重力加速度； V 为浆体总体积(截锥圆模容积)； D_f 为浆体流动度； λ 与水泥基材料无关，由测试表面特性决定，常取 0.005。

表 3 为 Modified bingham 模型和 Herschel-bulkle

模型的拟合结果。结合图 3 可知，与无粗骨料 UHPC 表现出的剪切增稠特性不同，CA-UHPC 通常呈现剪切变稀现象。这是因为在剪切作用下，由于粗骨料的存在，UHPC 中由超细粉体颗粒形成的颗粒团簇会被打散，网状絮凝结构逐步被破坏，从而使得体系黏度下降^[23]。拟合结果表明：虽然 Herschel-bulkle 模型的相关系数 R^2 高于 Modified bingham 模型，但是其拟合得到的屈服应力均为负值，且从图 4 中的对比结果可以明显发现，Modified bingham 模型的拟合结果更加接近理论值。对于屈服应力流体，只有使用 Modified bingham 模型得到的屈服应力与 Roussel 值的比值为定值，而 Herschel-bulkle 模型得到的屈服应力与 Roussel 值的比值会随 n 值发生变化，即使用 Modified bingham 模型能得到最稳定的屈服应力^[20]。这与不含粗骨料 UHPC 表现为剪切变稀或非明显剪切增稠($n < 2$)时，Modified bingham 模型具有更好的准确性相一致^[12]。此外，不同流动度下屈服应力偏差值与流动度间的关系如图 5 所示。Modified bingham 模型的拟合结果与 Roussel 值间的偏差和 CA-UHPC 的流动度具有相关性，随流动度的增大，屈服应力偏差值先减小后增大。对于小流动度拌合物，较大的屈服应力会导致塞流的形成，而对于大流动度拌合物，较小的屈服应力又会使得大尺寸和高密度颗粒发生迁移^[24]。当流动度小于 450 mm 和大于 690 mm 时，屈服应力偏差值明显升高，分别为 26.7%、47.7%和 106.6%。为消除上述因素的影响，通常是需获取更加准确的剪切区域半径或降低剪切速率，但前者难度较大而后者又会存在不能充分打散絮凝结构的危险。因此，在测试 CA-UHPC 流变性能时，推荐其流动度为 450~690 mm，从工作性角度进行直观控制。

表 3 流变模型拟合结果
Table 3 Fitting results of rheological model

Samples No.	$\rho_p/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	h/m	Roussel value	Modified bingham					Herschel–bulkley			
				τ_0	μ	c	R^2	c/μ	τ_0	K	n	R^2
JZ1	2 460	0.150	155.52	167.26	301.16	−12.71	0.988	−0.042	−1218.3	1772	0.27	0.999
JZ2	2 470	0.185	37.13	−2.45	225.86	−4.68	0.999	−0.021	−119.9	340	0.75	0.999
SF15%	2 420	0.165	951.42	497.49	258.56	−10.63	0.965	−0.041	−4764.6	6089	0.12	0.998
CA400	2 480	0.135	69.96	64.09	275.14	−10.30	0.996	−0.037	−587.5	959	0.45	0.999
CA560	2 430	0.145	383.91	358.91	343.04	−21.00	0.928	−0.061	Failed			
SSF0.5%	2 490	0.165	46.33	44.43	328.87	−12.86	0.998	−0.039	−690.7	1093	0.41	0.997
SSF2%-2	2 560	0.180	507.69	372.10	419.09	−19.56	0.969	−0.047	−6175.8	8057	0.10	0.995

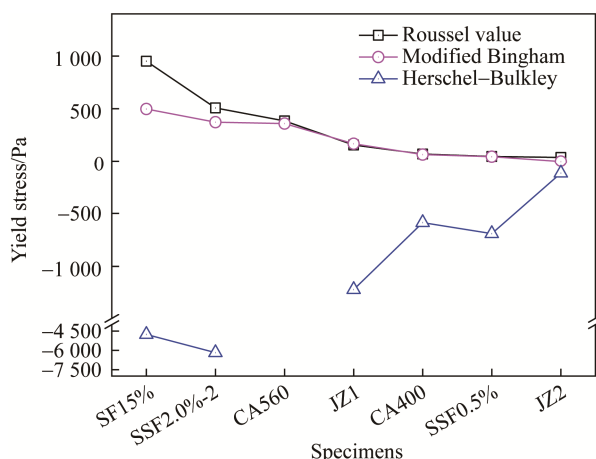


图 4 屈服应力拟合值与 Roussel 值对比

Fig. 4 Comparison between yield stress fitting value and Roussel value

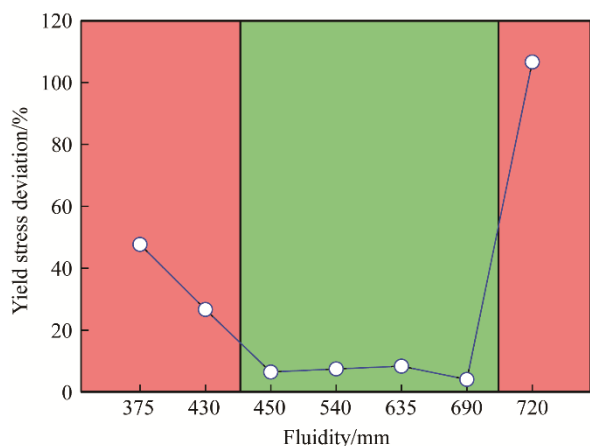


图 5 屈服应力偏差值与流动度间的关系

Fig. 5 Relationship between yield stress deviation and fluidity

2.2 影响因素

基于上述研究结果,选取 Modified Bingham 模型拟合 CA-UHPC 流变参数。

2.2.1 硅灰 不同硅灰掺量下的流变性能测试与拟合结果如图 6 和图 7 所示。结果表明:随硅灰掺量的增加,屈服应力增大而黏度减小。当掺量从 5% 增加至 15%,屈服应力提高 52.1%、252.5%、948.5%;黏度降低 8.7%、42.8%、67.7%,这与 Wu 等^[22]的研究结果相似。即使对于小流动度的 15%SF (375 mm < 450 mm),由于塞流的存在会导致得到剪切变稀以及偏低的屈服应力和偏高的黏度^[23],其仍然具有最高的屈服应力和最低的黏度。球形纳米颗粒的增加,一方面会因比表面积增大而大量吸附水和减水剂造成屈服应力增加;另一方面,由于其填充效应和滚珠效应来改善颗粒级配、减小颗粒摩擦,从而降低黏度^[25-26]。同时,硅灰掺量的增加弱化了

CA-UHPC 拌合物的剪切变稀行为。随硅灰掺量增加至 15%, c/μ 也更加接近于 0,这与图 8 中硅灰能够弱化无粗骨料 UHPC 剪切增稠的效果相反。对于 CA-UHPC,纳米颗粒交互作用形成的颗粒团簇以及增大的屈服应力有利于抑制纤维、骨料在剪切作用下的定向迁移,这减弱了拌合物内部结构的有序运动。因此,无论 UHPC 是否含有粗骨料,硅灰均能够阻止其内部结构在剪切作用下的过度无序或有序运动,从而提高拌合物内部结构稳定性。

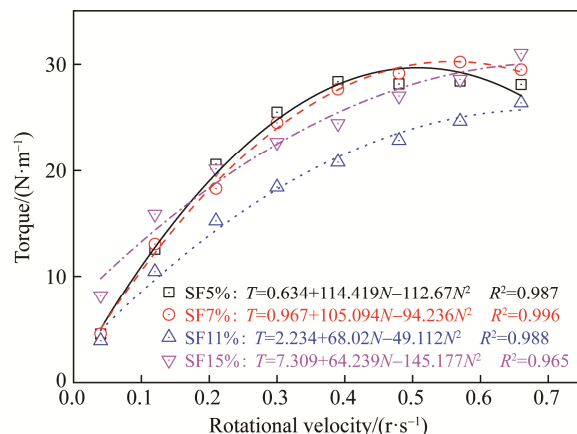


图 6 流变性能测试结果

Fig. 6 Rheological property test results

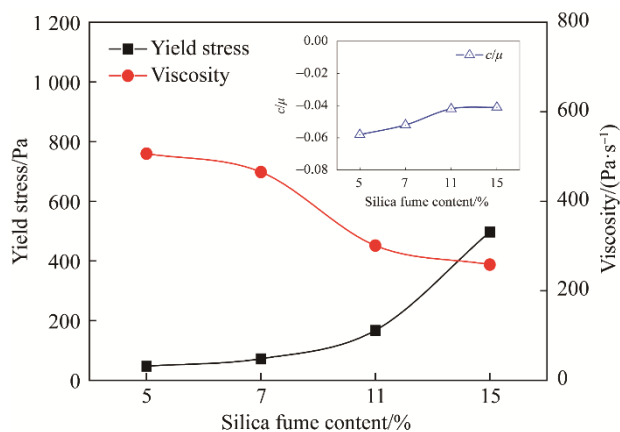


图 7 流变参数拟合结果

Fig. 7 Rheological parameter fitting results

2.2.2 粗骨料 不同粗骨料用量下的流变性能测试与拟合结果如图 9 和图 10 所示。结果表明:增加粗骨料用量,CA-UHPC 的屈服应力和黏度先降低后增加,剪切变稀现象加剧。由于 UHPC 使用大量超细粉体致使其黏度较高,增加粗骨料可以通过提升大尺寸颗粒含量,改善混凝土砂率,从而降低流变参数;而当粗骨料用量进一步增加,此时需要更多的砂浆量来用于包裹粗骨料,裹浆层厚度减小,

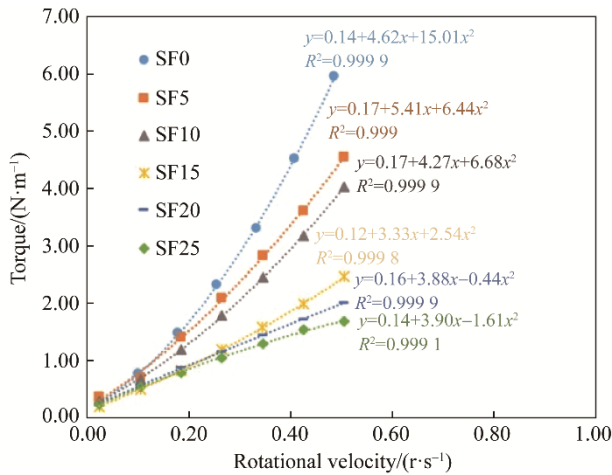
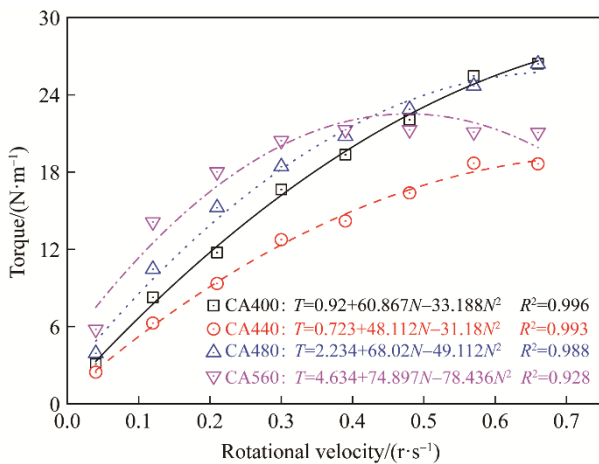
图 8 无粗骨料 UHPC 流变性能测试结果^[22]Fig. 8 Rheological property test results of UHPC without coarse aggregate^[22]

图 9 流变性能测试结果

Fig. 9 Rheological property test results

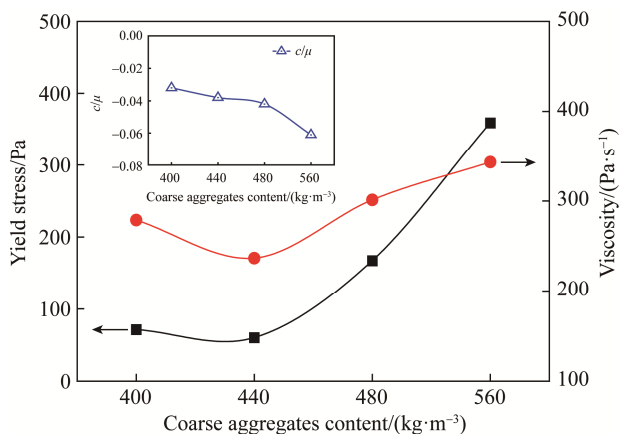


图 10 流变参数拟合结果

Fig. 10 Rheological parameter fitting results

颗粒碰撞加剧, 进而导致屈服应力和黏度增加^[27]。粗骨料用量从 $400 \text{ kg}/\text{m}^3$ 增加至 $560 \text{ kg}/\text{m}^3$, 屈服应

力增加-15.5%、134.8%和 403.8%, 黏度增加-15.1%、8.0%和 23.0%。但需要指出的是, 相比于屈服应力的增加幅度, 黏度的增幅更小。大量大尺寸颗粒的存在, 会破坏 CA-UHPC 浆体中的颗粒团簇和絮凝结构, 使得体系黏度不会显著提升, 这也是造成 CA-UHPC 剪切变稀的原因^[28]。此外, 大量粗骨料又会进一步促使 CA-UHPC 拌合物内部结构在剪切作用下发生有序运动, 最终导致随粗骨料用量增加, c/μ 愈加小于 0。

2.2.3 钢纤维 由于钢纤维的引入会显著降低流动度, 为使 CA-UHPC 拌合物能够满足流变性能测试需求, 通过增加减水剂用量以获取合适的工作性能, 不同钢纤维掺量下的流变性能测试与拟合结果如图 11 和图 12 所示。由于 SSF1% 和 SSF2% 在高转速下出现扭矩下降明显的情况, 因此数据拟合时进行剔除。结果表明: CA-UHPC 拌合物的屈服应力和黏度随钢纤维掺量的增加而增加, 剪切变稀现象明显。钢纤维的填充能力差, 具有比骨料更大的比

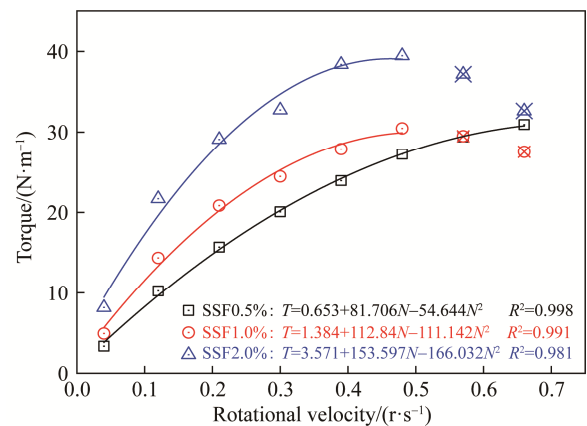


图 11 流变性能测试结果

Fig. 11 Rheological property test results

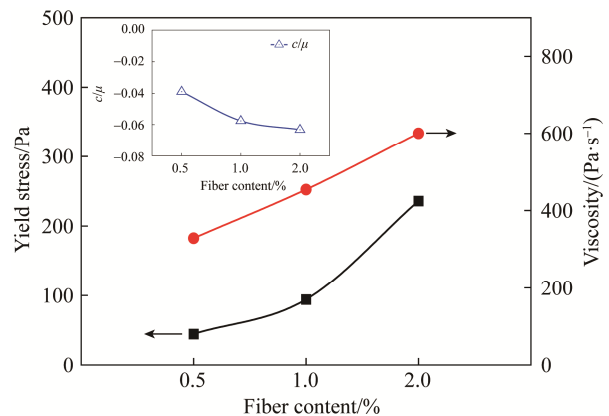


图 12 流变参数拟合结果

Fig. 12 Rheological parameter fitting results

表面积, 其引入会劣化 UHPC 中的紧密堆积状态、降低密实度, 并且纤维-纤维与纤维-粗骨料间的互锁效应增大了物相间的摩擦, 进一步限制了浆体流动^[14, 29]。这就造成纤维掺量从 0.5% 增加至 2.0% 时, 拌合物屈服应力分别增加 112.1% 和 430.9%; 黏度分别增加 38.1% 和 82.5%, 且黏度明显高于不含纤维的 CA-UHPC 体系。此外, 与粗骨料对流变特性的影响机理相似, 钢纤维也会破坏 CA-UHPC 浆体中的颗粒团簇和絮凝结构, 并促进拌合物内部结构进行有序运动, 从而加重剪切变稀特性。

2.3 物相稳定性

2.3.1 不含钢纤维的 CA-UHPC 体系 图 13 为不同粗骨料用量下 CA-UHPC 试件中心切面处的骨料分布情况, 图 14 为粗骨料在试件纵截面不同位置处的分布和整体均匀分布程度结果。由图 14a 可知,

当流变参数较小时, 骨料会因发生沉降而造成骨料主要分布在试件中下部(CA400); 而增加骨料用量和流变参数会显著提升骨料在试件上部的分布; 但较大的流变参数和较多的骨料会因延缓其沉降速率且在试件底部形成支撑, 进而导致骨料在试件中部的分布增加而在底部的分布减少(SF5% 和 CA560)。图 14b 的结果表明, 骨料整体均匀分布程度没有随流变参数的减小而劣化, 也没有随流变参数的增大而得到显著改善; 其 SI 值随骨料用量的增加而降低。骨料用量增加至 560 kg/m^3 , SI 值分别下降 37.3%、61.9% 和 70.5%。增加粗骨料用量, 会在模具内形成骨架支撑效应, 即使流变参数较小, 在骨料的相互支撑下, 其分布也会比较均匀; 而随用量增加, 骨料在试件各处的分布差异减小, 过多的骨料无法进一步提升其均匀分布程度。

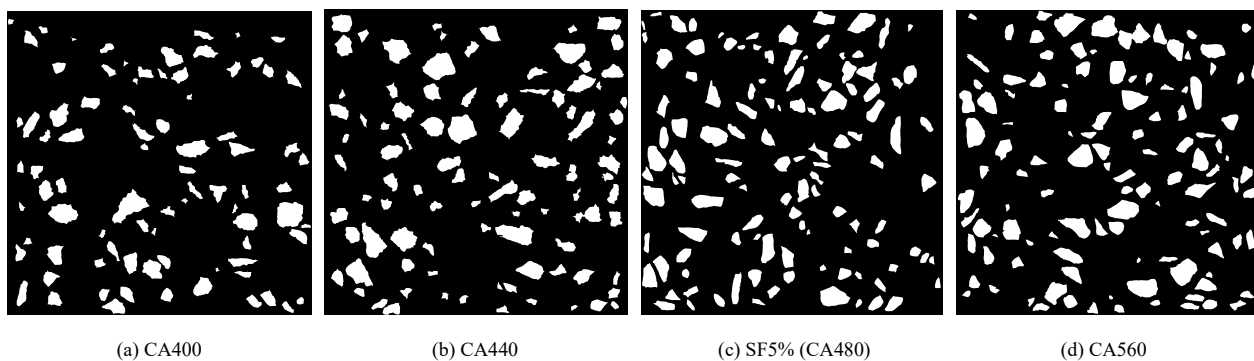


图 13 不同粗骨料用量下 CA-UHPC 中心切面图

Fig. 13 Cut plane image at center position of CA-UHPC with different coarse aggregate content

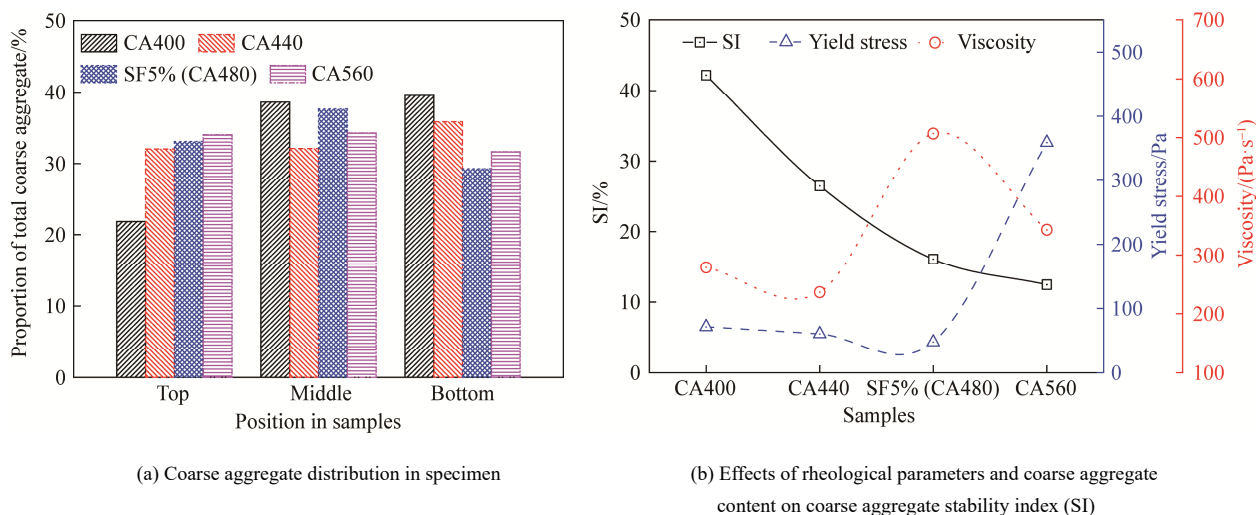


图 14 不含钢纤维 CA-UHPC 中的粗骨料分布计算结果

Fig. 14 Calculation results of coarse aggregate distribution in CA-UHPC without steel fiber

2.3.2 含钢纤维的 CA-UHPC 体系 在 SF7%、JZ1、SF15% 中加入 1% 钢纤维, 并结合 SSF0.5%、

SSF1% 和 SSF2%, 分析纤维、骨料在试件中的分布情况。图 15 为不同钢纤维掺量下 CA-UHPC 试件中

心切面处的骨料和纤维分布状态,图 16 为粗骨料和钢纤维在试件纵截面不同位置处的分布和整体均匀分布程度结果。从图 15 中的纤维和骨料分布结果来看,从上至下,纤维分布逐渐减少,而骨料分布逐渐增多。将纤维和骨料在浆体中的受力情况简化为式(12),由于粗骨料粒径为 5~10 mm,假设粗骨料为边长 7 mm 的立方体;并基于粗骨料和钢纤维的材料特性,当其达到受力平衡而不沉降时,计算可得粗骨料所需 F_r 约为钢纤维所需 F_r 的 115 倍。因此。当砂浆所提供的 F_r 相同时,粗骨料与钢纤维间的体积和密度差异会导致粗骨料优先发生向下运动;且

骨料的骨架支撑作用和纤维互锁作用会进一步削弱纤维的沉降,最终形成纤维主要分布在试件的中上层,而骨料分布在中下层。此外,当流变参数较大时,其同样改善了骨料在试件上部的分布,且使得在下部的分布减少,这与不含钢纤维体系中骨料的分布情况相同。

$$mg - \rho g v - F_r = ma \quad (12)$$

式中: m 为纤维或粗骨料质量; g 为重力加速度; ρ 为 UHPC 砂浆密度; v 为纤维或粗骨料体积; F_r 为纤维或粗骨料沉降时由屈服应力和黏度带来的阻力。

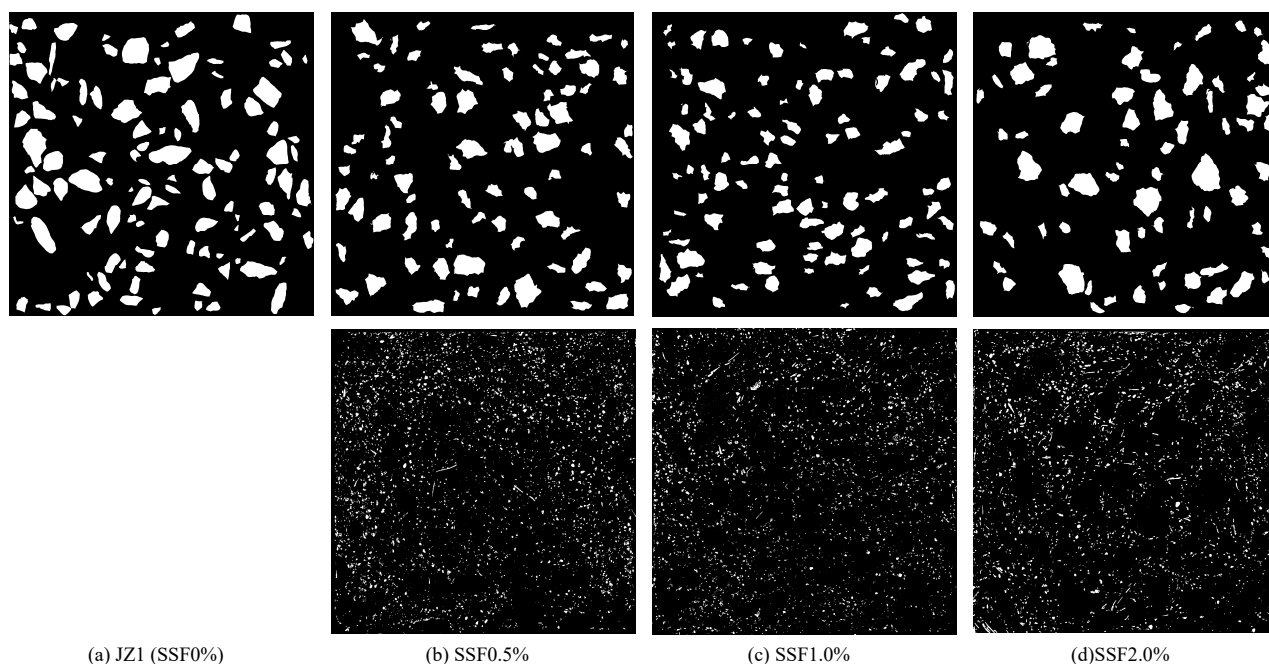


图 15 不同钢纤维掺量下 CA-UHPC 中心切面图

Fig. 15 Cut plane image at center position of CA-UHPC with different steel fibers content

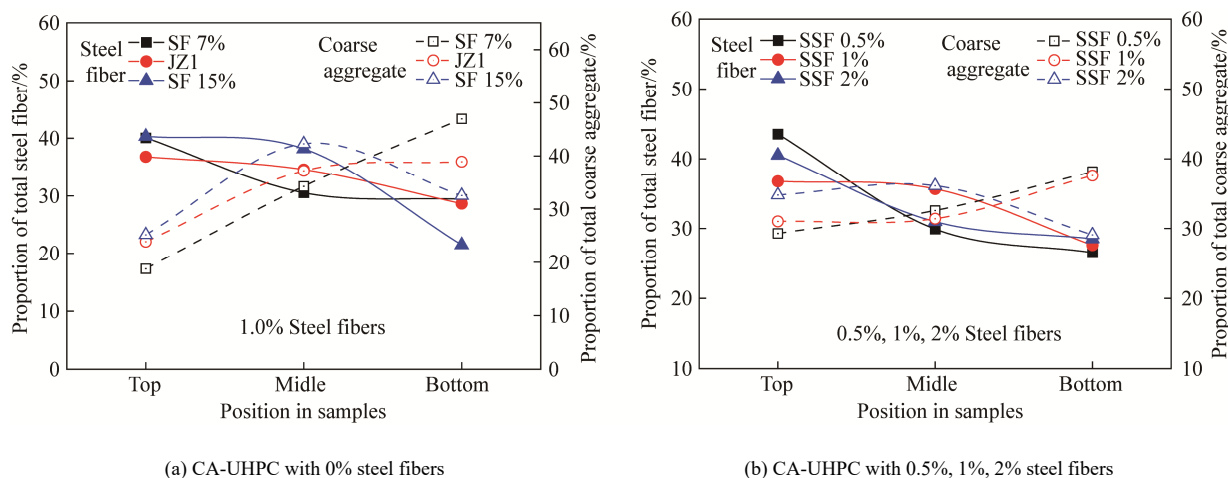


图 16 粗骨料和钢纤维在 CA-UHPC 中的分布

Fig. 16 Coarse aggregate and steel fiber distribution in CA-UHPC

图 17 为纤维、粗骨料在试件中的整体均匀分布情况。图 17a 结果表明, 在相同钢纤维掺量下, 屈服应力和黏度均对纤维分布起到重要作用。当黏度降低屈服应力升高时, 纤维均匀分散系数 α 提升 4.9%; 当黏度继续下降, 此时即使屈服应力增大, α 也降低了 12.8%。这是因为提高屈服应力会增大纤维沉降的阻力; 但屈服应力过大不利于 UHPC 拌合物在模具内的填充, 且黏度过小又会加速纤维的沉降过程, 进而影响纤维均匀分布^[17,30]。而随着纤维掺量的增加, 增大的流变参数利于纤维的均匀分散, 但继续增加掺量, 纤维间的缠结、互锁效应会促进纤维集聚而不利于分散^[9], 因而造成纤维分散系数先升高后降低。同时, 从图 17b 中的骨料分布

可以发现, 在 480 kg/m^3 相同骨料用量下, 含纤维体系中的骨料均匀分布程度(SI: 26%~42%)明显低于不含纤维体系(SI=16%), 纤维自身形状产生的壁障作用以及与骨料间的互锁作用劣化了骨料的均匀分布。且与流变参数、纤维掺量、纤维分布间的关系相似, 增大流变参数可以改善粗骨料的均匀分布程度, 但过大的流变参数和过高的纤维掺量会因阻碍浆体填充以及加剧纤维骨料间的相互作用, 进而劣化粗骨料的均匀分布程度。此外, 需要指出的是, 无论是不含钢纤维体系还是含钢纤维体系, CA-UHPC 中的物相分布结果均是在 100 mm 立方体试件中得出; 对于更大尺寸的试件, 仍需进一步验证与研究。

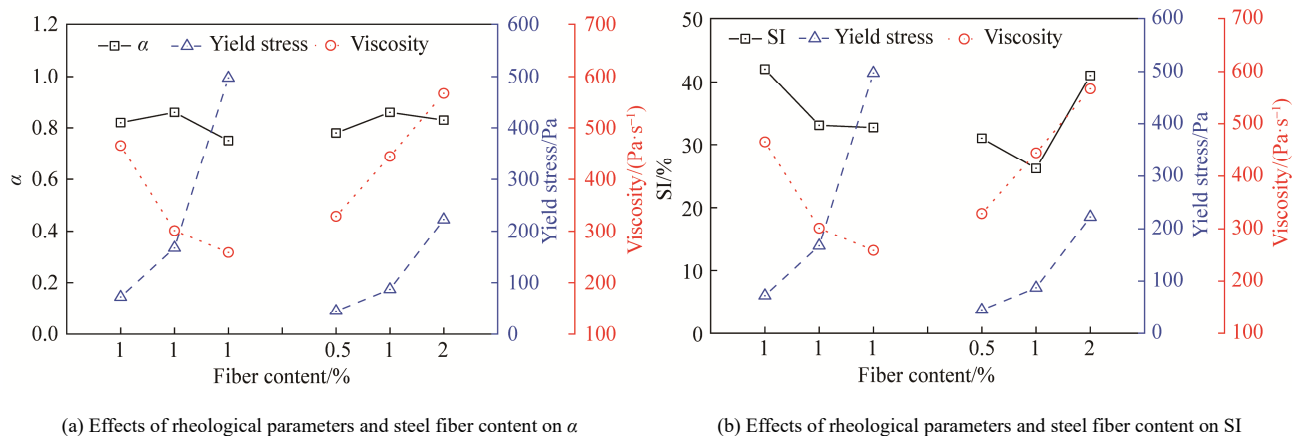


图 17 CA-UHPC 中的纤维分散系数(α)和粗骨料稳定性指数
Fig. 17 Fiber dispersion (α) and coarse aggregate SI of CA-UHPC

3 结论

1) CA-UHPC 通常呈现剪切变稀现象; 以 Roussel 值为基准, Modified Bingham 模型的拟合结果具有更好的准确性; 但随流动度的增大, 屈服应力拟合值的偏差先减小后增大, 建议流变性能测试流动度为 $450\sim 690 \text{ mm}$ 。

2) 增加硅灰掺量, CA-UHPC 拌合物的屈服应力增大而黏度减小, 弱化了剪切变稀现象, 提高拌合物内部结构稳定性; 增加粗骨料用量, CA-UHPC 的屈服应力和黏度先降低后增加, 剪切变稀现象加剧; 增加钢纤维掺量, CA-UHPC 拌合物的屈服应力和黏度增加, 也加剧了剪切变稀现象。

3) 对于不含钢纤维的 CA-UHPC 体系, 流变参数对粗骨料整体均匀分布程度的影响较小, 而对其局部分布的影响较大。当流变参数较小时, 粗骨料主要分布在试件中下部; 而增加骨料用量和流变参

数会显著提升其在试件上部的分布; 粗骨料的整体均匀分布程度随骨料用量的增加而提升。

4) 对于含钢纤维的 CA-UHPC 体系, 试件从上至下, 纤维分布逐渐减少, 而粗骨料分布逐渐增多; 含纤维体系中的粗骨料均匀分散程度明显低于不含纤维体系。在相同钢纤维掺量下, 屈服应力和黏度均对纤维和粗骨料分布起到重要作用, 而随纤维掺量增加, 纤维和粗骨料均匀分布程度先升高后降低。

参考文献:

- [1] 陈宝春, 季韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3): 1-24.
CHEN Baochun, JI Tao, HUANG Qingwei, et al. J Archit Civ Eng (in Chinese), 2014, 31(3): 1-24.
- [2] WANG Y, SHAO X D, CAO J H. Experimental study on basic performances of reinforced UHPC bridge deck with coarse aggregates[J]. J Bridge Eng, 2019, 24(12): 04019119.
- [3] LV Y, ZHANG W, WU F, et al. Static mechanical properties and mechanism of C200 ultra-high performance concrete (UHPC) containing

- coarse aggregates[J]. *Sci Eng Compos Mater*, 2020, 27(1): 186–195.
- [4] 黄政宇, 李仕根. 含粗骨料超高性能混凝土力学性能研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(3): 47–54.
HUANG Zhengyu, LI Shigen. *J Hunan Univ (Nat Sci, in Chinese)*, 2018, 45(3): 47–54.
- [5] MA J, ORGASS M, DEHN F, et al. Comparative investigations on ultrahigh performance concrete with and without coarse aggregates[C]//In: *International symposium on ultra high performance concrete*. Germany: Kassel, 2004: 205–212.
- [6] WANG J Q, LIU J Q, WANG Z, et al. Cost-effective uhpc for accelerated bridge construction: Material properties, structural elements, and structural applications[J]. *J Bridge Eng*, 2020, 26(2): 04020117.
- [7] LI P P, CAO Y Y, SLUIJSMANS M J C, et al. Synergistic effect of steel fibres and coarse aggregates on impact properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete[J]. *Cem Concr Compos*, 2021, 115: 103866.
- [8] ESMAEILKHANIAN B, DIEDERICH P, KHAYAT K H, et al. Influence of particle lattice effect on stability of suspensions: Application to self-consolidating concrete[J]. *Mater Struct*, 2017, 50(1): 1–15.
- [9] SHI C J, WU Z M, XIAO J F, et al. A review on ultrahigh performance concrete: Part I. raw materials and mixture design[J]. *Constr Build Mater*, 2015, 101: 741–751.
- [10] DILS J, BOEL V, SCHUTTER G D. Influence of cement type and mixing pressure on air content, rheology and mechanical properties of UHPC[J]. *Constr Build Mater*, 2013, 41: 455–463.
- [11] LIU J Z, WANG K J, ZHANG Q Q, et al. Influence of superplasticizer dosage on the viscosity of cement paste with low water-binder ratio[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 149: 359–366.
- [12] KAMAL H K, MENG W N, KAVYA V, et al. Rheological properties of ultra-high-performance concrete-an overview[J]. *Cem Concr Res*, 2019, 124: 105828.
- [13] KUDER K G, OZYURT N, MU E B, et al. Rheology of fiber-reinforced cementitious materials[J]. *Cem Concr Res*, 2007, 37(2): 191–199.
- [14] ZHOU M, WU Z M, OUYANG X, et al. Mixture design methods for ultra-high-performance concrete-A review[J]. *Cem Concr Compos*, 2021, 124: 104242.
- [15] NANTHAGOPALAN P, HAIST M, SANTHANAM M, et al. Investigation on the influence of granular packing on the flow properties of cementitious suspensions[J]. *Cem Concr Compos*, 2008, 30: 763–768.
- [16] LASKAR A I, TALUKDAR S. Rheological behavior of high performance concrete with mineral admixtures and their blending[J]. *Constr Build Mater*, 2008, 22: 2345–2354.
- [17] TENG L, MENG W N, KHAYAT K H. Rheology control of ultra-high-performance concrete made with different fiber contents[J]. *Cem Concr Res*, 2020, 138: 106222.
- [18] 武斌, 安晓鹏, 史才军, 等. 混凝土流变特性对其稳定性及浇筑后外观质量的影响[J]. *材料导报*, 2020, 34(4): 47–52.
WU Bin, AN Xiaopeng, SHI Caijun, et al. *Mater Rev (in Chinese)*, 2020, 34(4): 04043–04048.
- [19] LIU J P, LI C F, LIU J Z, et al. Characterization of fiber distribution in steel fiber reinforced cementitious composites with low water-binder ratio[J]. *Indian J Eng Mater Sci*, 2011, 18(6): 449–457.
- [20] FEYS D, WALLEVIK J E, YAHIA A, et al. Extension of the Reiner-Riwlin equation to determine modified Bingham parameters measured in coaxial cylinders rheometers[J]. *Mater Struct*, 2013, 46(1/2): 289–311.
- [21] HEIRMAN G, VANDEWALLE L, VAN G D, et al. Integration approach of the Couette inverse problem of powder type self-compacting concrete in a wide-gap concentric cylinder rheometer[J]. *J Non-Newton Fluid*, 2008, 150(2/3): 93–103.
- [22] 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.
- [23] 刘豫, 史才军, 焦登武, 等. 新拌水泥基材料的流变特性、模型和测试研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2017, 45(5): 708–716.
LIU Yu, SHI Caijun, JIAO Dengwu, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2017, 45(5): 708–716.
- [24] OLAFUR H W, FEYS D, JON E, et al. Avoiding inaccurate interpretations of rheological measurements for cement-based materials[J]. *Cem Concr Res*, 2015, 78: 100–109.
- [25] WU Z M, KHAYAT K H, SHI C J. Changes in rheology and mechanical properties of ultra-high performance concrete with silica fume content[J]. *Cem Concr Res*, 2019, 123: 105786.
- [26] 张倩倩, 刘建忠, 张丽辉, 等. 矿物掺合料对低水胶比浆体流变性能的影响机制研究[J]. *材料导报*, 2020, 34(22): 22054–22086.
ZHANG Qianqian, LIU Jianzhong, ZHANG Lihui, et al. *Mater Rev (in Chinese)*, 2020, 34(22): 22054–22086.
- [27] JIAO D W, SHI C J, YUAN Q, et al. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review[J]. *Cem Concr Compos*, 2017, 83: 146–159.
- [28] FEYS D, VERHOEVEN R, SCHUTTER G D. Why is fresh self-compacting concrete shear thickening?[J]. *Cem Concr Res*, 2009, 39(6): 510–523.
- [29] JIANG S, SHAN B, OUYANG J, et al. Rheological properties of cementitious composites with nano/fiber fillers[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 158: 786–800.
- [30] WANG R, GAO X, HUANG H, et al. Influence of rheological properties of cement mortar on steel fiber distribution in UHPC[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 144(30): 65–73.