

超高性能混凝土流动性与流变性关系

王圣杰¹, 李 兵², 李传习¹, 孙迎春², 杨腾宇³

(1. 长沙理工大学土木工程学院, 长沙 410114; 2. 佛山市建盈发展有限公司 广东 佛山 528300; 3. 佛山市交通科技有限公司 广东 佛山 528000)

摘 要: 传统的扩展度已不能全面反映超高性能混凝土(UHPC)的施工性能, 必须辅之以流变性能。但流变性能测试的专用设备较昂贵, 不便工地直接采用。为此, 改变水胶比和减水剂掺量, 制备了 18 种配合比。通过对相应配合比进行扩展度、特征扩展时间(扩展直径为 0.7 和 0.8 倍扩展度所需时间)、流变参数测试, 以及固化后的力学性能测试, 得到多种配合比的流动参数与流变参数, 建立了力学性能属于 UHPC (掺钢纤维)的素 UHPC (不含钢纤维)流动性与流变性关系。结果表明: 可以采用 Bingham 模型描述素 UHPC 的流变行为; 提出的特征扩展时间指标, 测试精度相对较高; 新拌素 UHPC 流变参数可以通过所建立的流动-流变关系得出, 计算值与试验值吻合较好。

关键词: 超高性能混凝土; 水胶比; 减水剂掺量; 流动性; 流变性

中图分类号: TU528.31 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)08-1962-09

网络出版时间: 2023-04-28



Flowability and Rheological Properties of Ultra-High Performance Concrete

WANG Shengjie¹, LI Bing², LI Chuanxi¹, SUN Yingchun², YANG Tengyu³

(1. College of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Foshan Jianying Development Co., Ltd, Foshan 528300, Guangdong, China; 3. Foshan Transportation Technology Co., Ltd, Foshan 528000, Guangdong, China)

Abstract: The conventional extension degree cannot fully reflect the construction performance of ultra-high performance concrete (UHPC), and it should be supplemented by the rheological properties. However, the proprietary equipment for the measurement of rheological properties is expensive, which is inconvenient to be directly used on the construction site. Therefore, 18 kinds of mix proportions of UHPC were prepared via changing the water-to-binder ratio and superplasticizer dosage. In this work, the flow and rheological parameters of various mix proportions of UHPC were obtained via testing the extension degree, characteristic time of extension degree (i.e., the time required for extension diameter of 0.7 and 0.8 times), rheological behavior, and mechanical properties after curing of the corresponding mix proportions. Finally, a relationship between fluidity and rheology of fresh UHPC (without steel fibers), which the mechanical properties belong to UHPC (with steel fibers), was established. The results show that the Bingham model can be used to describe the rheological behavior of fresh UHPC. The proposed characteristic time of extension degree index has a relatively high test accuracy. The rheological parameters of fresh UHPC can be obtained from the flowability-rheology relationship established. It is indicated that the calculated data by the proposed method agree well with the experimental results.

Keywords: ultra-high performance concrete; water-binder ratio; superplasticizer dosage; flowability; rheology

超高性能混凝土(UHPC)是一种性能优越的水泥基复合材料^[1], 具有超高的抗压强度(通常在 120 ~ 180 MPa^[2])和优异耐久性。近年来, 它广泛

应用于公路、桥梁、军事工程和各种建筑制品等领域^[3-4]。

UHPC 水胶比低(0.14~0.20)、胶凝材料用量高,

收稿日期: 2023-01-16。 修订日期: 2023-01-28。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078059); 湖南省研究生科研创新项目(QL20220196)。

第一作者: 王圣杰(1998—), 男, 硕士研究生。

通信作者: 李传习(1963—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2023-01-16. Revised date: 2023-01-28.

First author: WANG Shengjie (1998—), male, Master candidate.

E-mail: 1173815992@qq.com

Correspondent author: LI Chuanxi (1963—), male, Ph. D., Professor.

E-mail: lichuanxi2@163.com

掺有钢纤维。与普通混凝土相比, UHPC 的黏度大幅增加^[5], 因此有必要在保证力学性能符合要求的情况下, 尽量降低 UHPC 黏度以提高其施工性能。UHPC 力学和施工性能在合理选择减水剂类型, 合适选用钢纤维, 并按最大密实度理论进行胶凝材料和集料的级配后, 受水胶比和减水剂掺量的重要影响。减水剂掺量太少会导致混凝土的施工性能较差, 减水剂过掺则会导致缓凝现象的产生, 明显降低混凝土的早期强度^[6-9]。有研究表明^[10-12]: 水胶比的增大可以有效提高 UHPC 的流动性, 但会对力学性能产生负面影响。有学者^[13-16]研究了水胶比和减水剂掺量对流变性能的影响, 结果表明提高减水剂掺量和水胶比可以改善硅灰的分散性, 从而降低屈服应力和塑性黏度。

为了通过简单的测试方法获得流变参数, 科学评估 UHPC 的施工性能并及时调整以更好地满足现场要求, 有必要建立 UHPC 流动参数和流变参数之间的函数关系。传统的流动性测试, 主要利用坍落度筒和扩展度板进行坍落度试验、扩展度试验等, 这些测试仪器反应结果单一。另一种是流变性测试, 采用流变仪, 根据测试协议对流变桶中素 UHPC 进行特定模式的剪切, 得到素 UHPC 的流变曲线。根据剪切应力-剪切速率的关系曲线, 选择合适的流变模型进行拟合, 从而得到屈服应力和塑性黏度等 2 种流变参数, 较科学地评价了拌合物的流变性能, 因此被大多数实验室所采用^[17]。但流变仪构造精密、价格相对昂贵且易损坏, 不适用于施工现场。有学者通过调整配合比获得了流动性和流变性的相应参数, 然后通过数学拟合或模型分析获得了流动性与流变性之间的关系, 但是他们的研究均存在不足。黄静等^[13]通过对 UHPC 净浆进行流动度试验、流变性测试和湿颗粒堆积密实度测定, 建立了黏度系数(指数型流变模型中的黏度系数与 Bingham 模型中的塑性黏度类似)与流动度之间的线性关系以及颗粒表面水膜层厚度(由新拌混凝土颗粒表面水膜层厚度模型计算得出)与流动度之间的线性关系, 但仅考虑一个参数的线性拟合难以忽略拟合模型的差异, 可能会带来较大的误差。Choi 等^[18]提出了一种通过微坍落度试验, 考虑扩展直径随时间的变化来估计流变特性的方法, 但是所得公式的计算值与试验值相差较大。Roussel 等^[19]建立了坍落度值大于 200 mm 的水泥净浆的扩展半径与屈服应力之间的关系, 但所得方程不适用于混凝土。随后 Roussel^[20]建立了坍落度值在 50 mm 至 250 mm 的混凝土坍落

度与屈服应力的公式, 并验证了该公式较好的准确性。Ferraris^[21]给出了坍落度在 120 mm 至 260 mm 之间的水泥基材料的塑性黏度与密度、最终坍落度和坍落时间之间的关系。但该公式是对 78 种混合物的测试结果的简单线性拟合, 可能会有较大误差。Ferrara 等^[22]通过微坍落度试验, 建立基本流变特性与现场试验测量值之间的关系, 但预测结果的准确性较差。Meng 等^[23]建立了最小坍落度为 280 mm 的 UHPC 的塑性黏度与微 V 形漏斗流动时间之间的线性关系, 但仅考虑 1 个参数的线性拟合可能会带来较大的误差。

基于上述分析, 借鉴文献[18]理念, 本工作拟通过改变水胶比和减水剂掺量, 得到多种配合比的素 UHPC(不含钢纤维)扩展度、特征扩展时间及剪切应力-剪切速率关系曲线, 进而建立素 UHPC 的流动性-流变性能之间的关系。

1 实验

1.1 原材料

UHPC 由水、水泥、磨细高炉矿渣粉(GGBS)、硅灰、石英砂、钢纤维和减水剂等组成^[24]。其中, 拌合水选用城市自来水, 水泥选用 P·O 52.5 普通硅酸盐水泥, 比表面积 $0.445 \text{ m}^2/\text{g}$; 磨细高炉矿渣粉(GGBS)为 S95 优等品; 硅灰外观呈浅灰色, 主要成分为 SiO_2 , 比表面积 $21.8 \text{ m}^2/\text{g}$; 石英砂选用粒径为 26~40 目($0.700 \text{ mm} \sim 0.425 \text{ mm}$)精制石英砂; 纤维选用镀铜平直型钢纤维, 长度为 13 mm, 直径为 0.20 mm; 减水剂选用某公司生产的 CM6 型、CZ8 型和 CM13 型聚羧酸高性能减水剂(分别为普通型、降黏型和综合型), 三者外观均为浅黄色黏稠液体, 固含量(质量分数)均为 40%, 减水率均为 30%。

1.2 制备

采用 CM6 型聚羧酸减水剂的 UHPC 配合比见表 1。表 1 中的胶凝材料(水泥+硅灰+磨细高炉矿渣粉)质量与石英砂质量的比值为 1.69:1.00, 减水剂质量为液体质量, 水胶比为总用水量(减水剂中含水量+拌合水)与胶凝材料的质量比。先将水泥、硅灰、磨细高炉矿渣粉(GGBS)、石英砂混合干拌 2 min; 再将减水剂和水加入干混料中, 搅拌 6 min 以获得匀质浆体(称为素 UHPC 浆体); 取出部分素 UHPC 浆体立即进行流变性能测试和扩展度测试; 在 6 min 内进行流变性能测试和浆体净浆流动性测试(扩展时间和扩展直径测试)的浆体倒回搅拌机, 加入钢纤维(体积掺量 2%), 再搅拌 3 min, 形成 UHPC 拌

合料。制作力学性能试验的试件，按养护制度养护后进行力学性能试验。

为了检验基于掺入 CM6 减水剂的素 UHPC 浆体所建立的流动–流变关系对不同减水剂的适用性，又分别进行掺入 CZ8 降黏型聚羧酸减水剂、CM13 综合

型聚羧酸减水剂及 CZ8 型和 CM6 型聚羧酸减水剂复配(前者为减水剂总量 15%，后者为 85%，分别记为 PCE2、PCE3、PCE4，3 种减水剂的固含量均为 40%，减水率均为 30%)的 UHPC 配合比流动性和流变性试验，不同减水剂种类的 UHPC 配合比见表 2。

表 1 CM6 型减水剂的 UHPC 配合比
Table 1 UHPC mix proportion of CM6 superplasticizer

Sample No.	Water/Binder ratio	Mix proportion/(kg·m ⁻³)						
		Cement	Silica fume	Quartz sand	Mineral powder	Superplasticizer	SF	Water
PCE1SP0.8WB0.16	0.16	761.0	320.1	761.0	205.5	25.8	156.5	190.4
PCE1SP1WB0.16	0.16	761.0	320.1	761.0	205.5	32.2	156.5	186.5
PCE1SP1.5WB0.16	0.16	761.0	320.1	761.0	205.5	48.3	156.5	176.9
PCE1SP1.7WB0.16	0.16	761.0	320.1	761.0	205.5	54.7	156.5	173.0
PCE1SP1.8WB0.16	0.16	761.0	320.1	761.0	205.5	58.0	156.5	171.1
PCE1SP2WB0.16	0.16	761.0	320.1	761.0	205.5	64.4	156.5	167.2
PCE1SP0.8WB0.17	0.17	761.0	320.1	761.0	205.5	25.8	156.5	203.2
PCE1SP1WB0.17	0.17	761.0	320.1	761.0	205.5	32.2	156.5	199.4
PCE1SP1.5WB0.17	0.17	761.0	320.1	761.0	205.5	48.3	156.5	189.7
PCE1SP1.7WB0.17	0.17	761.0	320.1	761.0	205.5	54.7	156.5	185.9
PCE1SP1.8WB0.17	0.17	761.0	320.1	761.0	205.5	58.0	156.5	183.9
PCE1SP2WB0.17	0.17	761.0	320.1	761.0	205.5	64.4	156.5	180.1
PCE1SP0.8WB0.18	0.18	761.0	320.1	761.0	205.5	25.8	156.5	216.1
PCE1SP1WB0.18	0.18	761.0	320.1	761.0	205.5	32.2	156.5	212.3
PCE1SP1.5WB0.18	0.18	761.0	320.1	761.0	205.5	48.3	156.5	202.6
PCE1SP1.7WB0.18	0.18	761.0	320.1	761.0	205.5	54.7	156.5	198.8
PCE1SP1.8WB0.18	0.18	761.0	320.1	761.0	205.5	58.0	156.5	196.8
PCE1SP2WB0.18	0.18	761.0	320.1	761.0	205.5	64.4	156.5	192.9

Note: SF-Steel fiber; PCE-Type of superplasticizer; SP-Superplasticizer.

表 2 不同减水剂种类的 UHPC 配合比
Table 2 UHPC mix proportion of different SP

Sample No.	Water/Binder ratio	Mix proportion/(kg·m ⁻³)						
		Cement	Silica fume	Quartz sand	Mineral powder	SP	Water	Type
PCE2SP1.8WB0.16	0.16	761.0	320.1	761.0	205.5	58.0	171.1	CZ8
PCE3SP1.8WB0.16	0.16	761.0	320.1	761.0	205.5	58.0	171.1	CM13
PCE4SP1.8WB0.16	0.16	761.0	320.1	761.0	205.5	8.7+49.3	171.1	CZ8+CM6
PCE2SP1.8WB0.17	0.17	761.0	320.1	761.0	205.5	58.0	183.9	CZ8
PCE3SP1.8WB0.17	0.17	761.0	320.1	761.0	205.5	58.0	183.9	CM13
PCE4SP1.8WB0.17	0.17	761.0	320.1	761.0	205.5	8.7+49.3	183.9	CZ8+CM6
PCE2SP1.8WB0.18	0.18	761.0	320.1	761.0	205.5	58.0	196.8	CZ8
PCE3SP1.8WB0.18	0.18	761.0	320.1	761.0	205.5	58.0	196.8	CM13
PCE4SP1.8WB0.18	0.18	761.0	320.1	761.0	205.5	8.7+49.3	196.8	CZ8+CM6

1.3 流动性能测试

采用坍落度筒和扩展度板，依据《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016)对 18 种配合比进行扩展度和特征扩展时间测定，试验中不施加振动和振捣。

GB/T 50080—2016 中规定当混凝土拌合物不再扩散或扩散持续时间已达 50 s 时，测量混凝土拌合物展开扩展面的最大直径以及与最大直径呈垂直

方向的直径，取其算术平均值作为扩展度试验结果。经大量试测，选取扩散持续时间达 50 s 时的最大直径的算术平均值作为最终扩展度。

GB/T 50080—2016 中规定测定扩展时间时，应自坍落度筒提离地面时开始，至扩展开的混凝土拌合物外缘初触平板上所绘直径 500 mm 的圆周为止(T500)，结果精确至 0.1 s。首先，在各配合的扩展度测试中测定 T500、T600、T700 等扩展时间及

最终扩展度, 并计算扩展直径为 0.7 和 0.8 倍扩展度时的数值。

然后, 在各配合比的扩展度测试中测定特征扩展时间(扩展直径为 0.7 和 0.8 倍扩展度所需时间), 自坍落度筒提离地面时开始, 至扩展开的素 UHPC 扩展直径为 0.7 和 0.8 倍扩展度为止, 结果精确至 0.1 s。

每种配合比按上述步骤测试 2 次, 取 2 次扩展度和特征扩展时间的平均值。

1.4 流变性能测试

采用天津港源试验仪器厂 LBY-1 型混凝土流变仪, 对 18 种配合比下的新拌素 UHPC 浆体进行流变参数测定。由于纤维的加入会造成仪器故障, 所以仅对不含纤维的新拌素 UHPC 浆体进行流变参数测定。流变仪的转子为四叶片叶轮, 转子半径 50 mm, 转子高度(有效测量深度)76 mm, 流变桶深度 150 mm, 测试时装料深度 130 mm, 流变桶内径 150 mm。

为降低静置时间对流变测试的影响, 所有浆体在搅拌完成后的 1 min 之内倒入流变桶进行测量。设定 10 个不同的转速测定新拌素 UHPC 浆体引起的扭矩和剪切速率的变化。仪器的转速从 0 r/min 起, 每 15 s 上升 15 r/min 直至 150 r/min, 匀速运转 80 s, 再依次降低转速至 15 r/min 后停止, 每次测试耗时约 6 min, 具体过程如图 1 所示。图 1 的横坐标时间以仪器启动为计算起点。

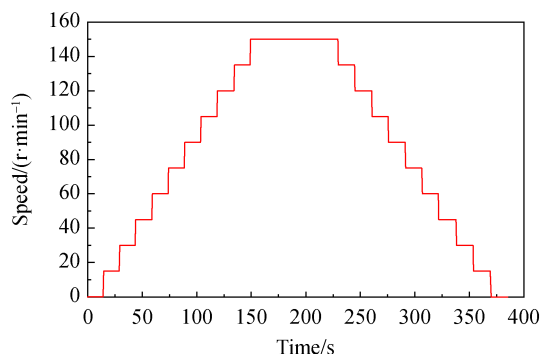


图 1 UHPC 流变参数测量过程

Fig. 1 Measuring protocol of rheological parameters

对转速下降段的流变参数进行分析^[25], 每个转速平台的 15 s 内, 电脑自动记录约 30 个数据。阶梯模式存在转子在某些时刻的转速突然下降, 此时, 转子叶片周围的浆体处于不稳定状态, 这会影响该时刻附近数据测定的准确性^[26]。因此, 在数据处理时, 将剪切速率或剪切应力变化较大的点删去(一般 1~3 个), 对剩余数据求平均值作为该转速下的剪切速率或剪切应力, 得到剪切应力-剪切速率曲线。

1.5 试件养护与力学性能试验

依据标准《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019), 抗压强度试件采用 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体, 抗折(弯曲韧性)试验采用 100 mm×100 mm×400 mm 标准棱柱体试件, 轴拉采用狗骨试件, 以上每组测试 3 个试件。将 UHPC 拌合料浇筑入试模, 标准条件下养护 2 d 后拆模, 在 90 °C 蒸汽养护 48 h, 自然降至常温后进行力学试验。抗压试验采用 3 000 kN 压力试验机进行, 加载速率为 5 kN/s; 抗折试验采用四分点加载, 加载速率为 0.5 mm/min; 抗拉试验采用 CSDW-300M 型混凝土极限拉伸试验机, 加载速率为 0.2 mm/min。

1.6 密度测试

将素 UHPC 浆体浇筑入容积标定为 180 mL, 质量为 23.20 g 的量杯中, 振捣 30 s, 量杯中多余浆体用光滑钢片抹平, 用精度为 0.01 g 的电子秤称得装有素 UHPC 浆体的量杯质量, 测量 2 次取平均值, 即可求得素 UHPC 浆体的密度。

2 结果与讨论

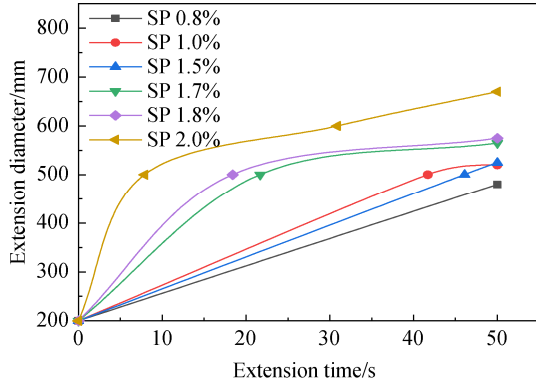
2.1 扩展时间及扩展直径

表 1 为水胶比 0.16、0.17、0.18, 减水剂掺量(固体掺量) 0.8%、1.0%、1.5%、1.7%、1.8%、2.0% 共 18 种配合比素 UHPC 浆体。其扩展时间及扩展直径随水胶比和减水剂量变化的测试结果如图 2 所示。图 2 中的横坐标时间以提升坍落度筒的开始时刻为计算起点。扩展时间 50 s 后 18 种配合比的素 UHPC 浆体不再流动, 此时的扩展直径即扩展度。图 2 也反映了各浆体的扩展速率(即单位时间的扩展直径), 达到同样扩展直径所需时间(如达到扩展直径 500 mm 所需时间 T500)越短, 则扩展速率越快。由图 2 可见: 1) 素 UHPC 浆体的扩展度和扩展速率随水胶比的增大而增大。水胶比从 0.16, 增大到 0.17, 再增大到 0.18, T500 则从 7.9~46.1 s, 缩短到 4.4~21.3 s, 再缩短到 2.7~8.9 s, 扩展度从 480~670 mm, 增加到 580~770 mm, 再增加到 660~780 mm。2) 在水胶比 0.16~0.18 变化范围, 水胶比越小, 减水剂量(0.8%~2.0%)的变化对扩展速率(T500)和扩展度影响越显著。

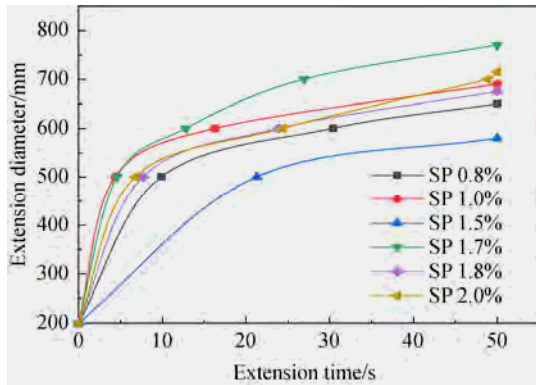
当水胶比 0.17, 减水剂量 1.5% 时, 扩展度和扩展速率最小。产生这种现象的原因是屈服应力与扩展度之间存在良好的相关性, 扩展度主要由屈服应力控制。

当水胶比 0.16, 减水剂掺量 0.8% 时, 新拌 UHPC

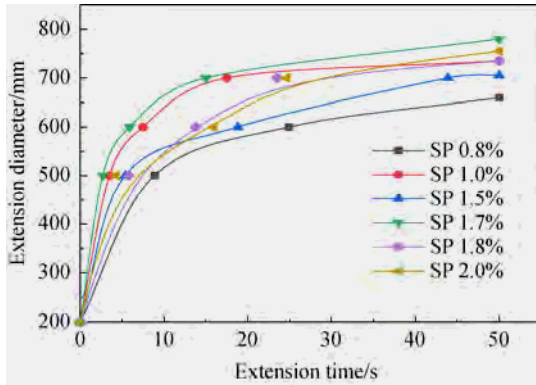
净浆扩展度约 480 mm, 该配合比在加入减水剂和水后需搅拌约 15 min 方能变成浆体, 其余配合比加入减水剂和水后仅需搅拌 6 min, 说明该配合比中减水剂掺量过少。



(a) Water/binder ratio is 0.16



(b) Water/binder ratio is 0.17



(c) Water/binder ratio is 0.18

图 2 素 UHPC 浆体扩展时间和扩展直径

Fig. 2 Extension time and extension diameter of fresh UHPC mixtures

2.2 流变性能试验结果与分析

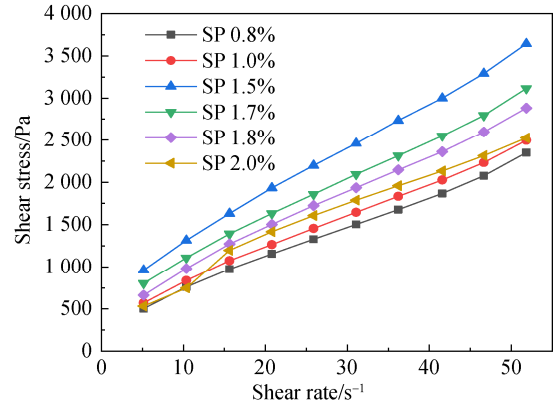
对流变性能测试过程中转速下降段的剪切应力–剪切速率进行分析, 所测得的剪切应力–剪切速率关系如图 3 所示。

从图 3 可以看出 UHPC 新拌浆体剪切速率与剪切应力基本呈线性关系。因而, 采用 Bingham 模型

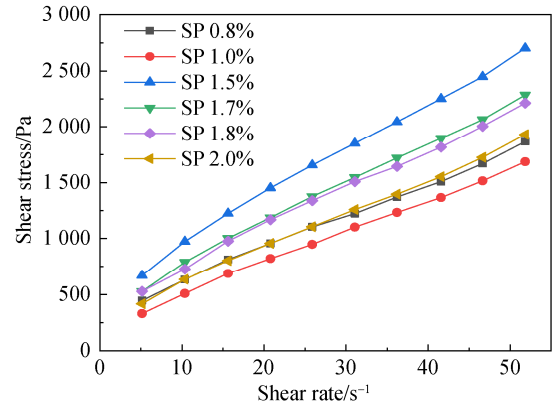
[式(1)]求得素 UHPC 的屈服应力和塑性黏度^[27–28]。

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

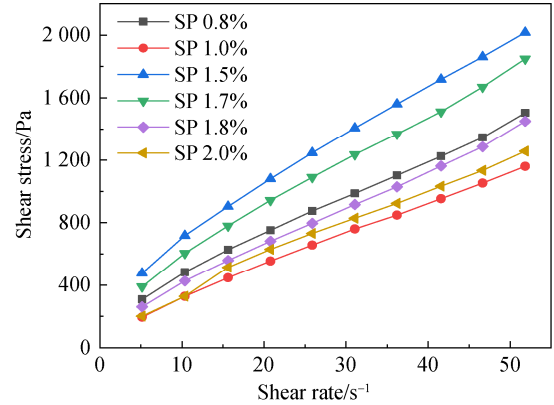
式中: τ 为剪切应力, Pa; τ_0 为屈服应力, Pa, 反映浆体开始流动需克服的最小阻力(即破坏颗粒相互作用所需的剪切应力); μ 为塑性黏度, Pa·s, 单位剪切速率下克服剪切过程水动力和颗粒惯性的能量耗散(剪切应力); $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, 1/s。



(a) Water/binder ratio is 0.16



(b) Water/binder ratio is 0.17



(c) Water/binder ratio is 0.18

图 3 素 UHPC 浆体剪切应力–剪切速率的关系

Fig. 3 Relationship between shear stress–shear rate of fresh UHPC mixtures

由式(1)可知, 剪切应力–剪切速率关系拟合直

线的斜率为新拌浆体的塑性黏度, 截距为屈服应力。18 种配合比的素 UHPC 屈服应力、塑性黏度和拟合优度如表 3 所示。表 3 中的拟合优度 R^2 均接近于 1, 说明素 UHPC 的流变行为可以用 Bingham 模型来描述。

由表 3 可知: 随水胶比增加, 减水剂掺量从 1.5% 增至 2.0%, 浆体的屈服应力和塑性黏度降低, 这是因为孔隙液中残余减水剂的浓度高, 浆体流动能力强^[25]; 极低的水胶比导致 UHPC 中颗粒表面水膜层较小、颗粒间作用强, 浆体黏度大^[28]。而减水剂掺量从 0.8% 增至 1.5% 时, 屈服应力和塑性黏度增大, 这可能是因为较低的减水剂量导致游离水增多、加快水化反应、生成大量水化产物, 剪切应力增大, 而减水剂的分散作用不足以抵消其影响^[29]。

在 18 种配合比中, 减水剂掺量 1.5% 时的素 UHPC 浆体屈服应力和塑性黏度最大, 分别为 735.1 Pa 和 55.5 Pa·s, 施工流变性能可接受[人工用铁锹铲移对应的掺 2% 钢纤维的新拌 UHPC 的难度可

接受。按铁锹面积 0.25 m×0.35 m、剪切速率 5 s^{-1} , 掺 2% 钢纤维后屈服应力增加 200 Pa, 塑性黏度增加 20 Pa·s 计算, 所需克服的剪切应力为: $0.25 \times 0.35 \times (935.1 + 5 \times 75.5) = 114.9\text{ N}$, 成年人作业可接受]。

2.3 UHPC 力学性能试验结果与分析

为确保各配比 UHPC 的力学性能符合基本要求, 故进行力学性能试验。其中, 水胶比 0.16~0.18, 减水剂掺量 0.8% 的配合比, 因流动性有限均未浇筑力学试件。表 4 给出了各配合比 UHPC 力学性能的平均值和变异系数。当水胶比 0.18, 减水剂掺量 1.8% 时, 其抗折强度平均值为 31.1 MPa, 变异系数为 0.174, 较大, 舍去。当水胶比 0.16, 减水剂掺量 1.8% 时, 其抗拉强度平均值为 12.91 MPa, 变异系数为 0.237, 较大, 舍去。其他各配合比抗折强度变异系数为 0.012~0.127, 抗拉强度变异系数为 0.027~0.148, 所有配合比抗压强度变异系数为 0.008~0.065, 均小于 15%。可见, 各配合比的力学性能均符合 UHPC 的基本要求。

表 3 新拌 UHPC 浆体流变参数
Table 3 Rheological parameters of fresh UHPC mixtures

Sample No.	τ_0/Pa	$\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	R^2	Sample No.	τ_0/Pa	$\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	R^2
PCE1SP0.8WB0.16	352.3	37.5	0.996 49	PCE1SP0.8WB0.17	329.6	29.1	0.997 15
PCE1SP1WB0.16	419.3	39.4	0.997 62	PCE1SP1WB0.17	217.7	28.0	0.998 03
PCE1SP1.5WB0.16	735.1	55.5	0.998 35	PCE1SP1.5WB0.17	535.0	41.8	0.996 37
PCE1SP1.7WB0.16	611.3	47.6	0.997 95	PCE1SP1.7WB0.17	406.0	36.3	0.997 03
PCE1SP1.8WB0.16	510.5	45.5	0.997 95	PCE1SP1.8WB0.17	392.9	35.0	0.995 91
PCE1SP2WB0.16	442.7	41.4	0.980 01	PCE1SP2WB0.17	294.5	31.0	0.997 63
PCE1SP0.8WB0.18	222.7	24.5	0.996 94	PCE1SP1.7WB0.18	290.2	30.0	0.996 87
PCE1SP1WB0.18	120.8	20.2	0.997 88	PCE1SP1.8WB0.18	160.7	24.4	0.998 00
PCE1SP1.5WB0.18	382.2	32.2	0.995 77	PCE1SP2WB0.18	134.6	21.9	0.992 18

τ_0 : Yield stress; μ : Plastic viscosity; R^2 : Goodness of fit.

表 4 UHPC 力学性能
Table 4 Mechanical properties of UHPC

Sample No.	Compressive strength /MPa	C_v	Flexural strength /MPa	C_v	Tensile strength /MPa	C_v
PCE1SP1WB0.16	157.3	0.012	41.3	0.016	8.44	0.029
PCE1SP1.5WB0.16	170.1	0.035	43.0	0.036	8.31	0.035
PCE1SP1.7WB0.16	172.0	0.012	50.7	0.087	8.79	0.075
PCE1SP1.8WB0.16	168.5	0.022	51.9	0.091	12.91	0.237
PCE1SP2WB0.16	170.0	0.027	47.0	0.012	8.06	0.033
PCE1SP1WB0.17	164.3	0.035	39.8	0.033	10.63	0.133
PCE1SP1.5WB0.17	177.7	0.020	41.4	0.127	10.47	0.130
PCE1SP1.7WB0.17	180.3	0.020	43.1	0.108	11.07	0.104
PCE1SP1.8WB0.17	178.2	0.008	44.7	0.093	11.44	0.046
PCE1SP2WB0.17	149.0	0.051	42.3	0.095	10.98	0.148
PCE1SP1WB0.18	155.5	0.009	38.7	0.018	11.10	0.032
PCE1SP1.5WB0.18	168.3	0.065	40.6	0.037	11.01	0.027
PCE1SP1.7WB0.18	168.3	0.042	41.3	0.104	9.25	0.093
PCE1SP1.8WB0.18	166.0	0.016	31.1	0.174	9.35	0.055
PCE1SP2WB0.18	154.7	0.045	41.5	0.050	8.21	0.051

Note: C_v - Coefficient of variation.

由表 4 可见,随着水胶比的增加,UHPC 的抗压强度先升高后降低。在相同的水胶比下,UHPC 的抗压强度随减水剂掺量的增加先增加后降低。在低水胶比(0.16)下,减水剂掺量的轻微变化对抗压强度的影响更显著。当减水剂掺量从 1.7%增加到 1.8%时,水胶比为 0.16、0.17 和 0.18 的 UHPC 抗压强度平均值分别降低 6.5%、1.2%和 1.4%。

UHPC 的抗折强度与抗拉强度会受到纤维分散和取向的影响,并且纤维分散和取向与素 UHPC 的流变性能有关^[30]。由表 4 可见,与抗压强度呈现的规律不同,UHPC 的抗折强度随着水胶比的增加而降低。这是因为 UHPC 较高的塑性黏度会提升其抗折强度。由表 4 可见,达到更高抗拉强度所需的减水剂掺量随着水胶比的增加而减少。

3 特征扩展时间与流变参数的关系建立及其检验

3.1 特征扩展时间与流变参数的关系建立

建立 UHPC 浆体流动性和流变性的数学关系至关重要^[17]。有了这个关系可以简单估算流变参数,无需通过流变性能专用设备进行测试。本工作给出了部分学者建立的混凝土流动–流变关系,以进行比较,从而帮助确定素 UHPC 流动–流变关系。

Roussel^[20]采用三维数值模拟的方法,建立了坍落度值在 50~250 mm 的混凝土坍落度与屈服应力的公式[式(2)]。

$$s = 25.5 - 17.6 \frac{\tau_0}{\rho} \quad (2)$$

式中: τ_0 为屈服应力, Pa; s 为坍落度, cm; ρ 为密度, kg/m³。

Ferraris^[21]建立了坍落度值在 120 mm 至 260 mm 之间,密度为 2 400 kg/m³ 的混凝土的流动–流变的关系式(式 3)。

$$\begin{aligned} \mu &= \rho T \cdot 1.08 \times 10^{-3} (S - 175) \\ 200 \text{ mm} < S < 260 \text{ mm} \\ \mu &= 25 \times 10^{-3} \rho T \quad S < 200 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: μ 为塑性黏度, Pa·s; T 为坍落时间, s; S 为最终坍落度, mm。

王睿^[25]在研究新拌素 UHPC 浆体流动性与流变参数之间的关系时得到与 Ferrara 等^[22]相似的结论,即屈服应力与扩展度有良好的相关性,规定量的浆体从 V 型漏斗喷嘴流出时间主要与塑性黏度有关。虽然国内外学者尚未建立起适用于 UHPC 流动性和

流变性的可靠关系^[17–23],但他们的研究也说明了 UHPC 的流动性与流变性确实存在联系。因此,通过扩展度测试,考虑扩展直径随时间的变化(特征扩展时间、扩展度)来计算流变参数(屈服应力、塑性黏度),并将该方法计算出的流变参数与用流变仪测出的流变参数进行比较。

参考式(2)、式(3)的形式,考虑到坍落度筒提起后,浆体前期流动速度过快,难以准确计时;后期流动速度太慢,难以区分扩展直径的变化等两方面的原因,经大量试测,选用扩展直径为 0.7 倍和 0.8 倍扩展度的时间(选用 2 个扩展时间,可进一步减少测量误差影响)和扩展度等流动参数表征流变性能。经分析,屈服应力 τ_0 和塑性黏度 μ 与浆体密度 ρ 成正比。显然,两者均可表示为特征扩展时间和扩展度的函数。按 Taylor 级数展开,经试拟合,确定的流动–流变关系形式为:

$$\tau_0 = a_1 \rho + b_1 \rho t_{0.7D} + c_1 \rho t_{0.8D} + d_1 \rho D \quad (4)$$

$$\mu = a_2 \rho + b_2 \rho t_{0.7D} + c_2 \rho t_{0.8D} + d_2 \rho D + e \rho t_{0.7D}^2 + f \rho t_{0.8D}^2 + g \rho D^2 \quad (5)$$

式中: D 为素 UHPC 浆体扩展 50 s 时间的扩展直径, cm; $t_{0.7D}$ 为扩展直径达到 0.7D 所需的时间, s; $t_{0.8D}$ 为扩展直径达到 0.8D 所需的时间, s; ρ 为素 UHPC 浆体密度, g/cm³。 $e, f, g, a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2$ 为拟合系数。

用掺入 CM6 型聚羧酸减水剂的素 UHPC 相关数据所得拟合结果为式(6)和式(7)。式(6)的拟合优度 $R^2=0.955$,表明扩展度不仅与屈服应力有关,也与特征扩展时间(或浆体停止流动之前的流动速度)有关。式(7)的拟合优度 $R^2=0.981$ 。拟合公式所得屈服应力、塑性黏度的计算值及试验值与计算值之比见表 5 (屈服应力和塑性黏度的试验值见表 3)。

$$\tau_0 = 52.84 \rho + 10.79 \rho t_{0.7D} + 1.45 \rho t_{0.8D} - 0.761 \rho D \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mu &= 11.43 \rho + 1.11 \rho t_{0.7D} - 0.18 \rho t_{0.8D} - \\ &0.0345 \rho D - 0.0273 \rho t_{0.7D}^2 + \\ &0.0058 \rho t_{0.8D}^2 - 0.0005 \rho D^2 \end{aligned} \quad (7)$$

3.2 流动–流变关系的检验

未见其他学者类似工作及其检验式(6)和式(7)适用性的相关数据^[17–23],因而,无法用其他学者数据验证式(6)和式(7)。表 6 给出了用于检验试验的其他减水剂种类的素 UHPC 配合比的扩展度、特征扩展时间、密度、流变参数的试验值及式(6)和式(7)的计算值。

表 5 流变参数计算公式的拟合
Table 5 Fitting of rheological parameter calculation formulas

Sample No.	Experimental value				Calculated value		Experimental value/ Calculated value	
	$t_{0.7D}/s$	$t_{0.8D}/s$	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	D/cm	τ_0/Pa	$\mu/(Pa \cdot s)$	Yield stress ratio	Plastic viscosity ratio
PCE1SP0.8WB0.16	9.6	25.4	2.27	48.0	356.1	36.1	0.99	1.04
PCE1SP1WB0.16	15.3	24.1	2.30	52.0	491.0	41.1	0.85	0.96
PCE1SP1.5WB0.16	20.1	45.6	2.34	52.5	693.0	54.5	1.06	1.02
PCE1SP1.7WB0.16	17.8	37.5	2.37	56.5	607.9	48.2	1.01	0.99
PCE1SP1.8WB0.16	16.2	30.4	2.38	57.5	543.0	43.9	0.94	1.04
PCE1SP2WB0.16	15.1	28.6	2.29	67.0	472.7	38.8	0.94	1.07
PCE1SP0.8WB0.17	8.9	18.8	2.25	65.0	285.3	30.2	1.16	0.96
PCE1SP1WB0.17	7.4	20.3	2.34	69.0	256.8	28.3	0.85	0.99
PCE1SP1.5WB0.17	15.3	30.3	2.34	58.0	509.9	42.5	1.05	0.98
PCE1SP1.7WB0.17	13.6	33.1	2.33	77.0	440.8	37.8	0.92	0.96
PCE1SP1.8WB0.17	11.3	17.3	2.33	67.5	346.2	33.7	1.13	1.04
PCE1SP2WB0.17	7.9	19.6	2.33	71.5	261.4	28.3	1.13	1.10
PCE1SP0.8WB0.18	6.0	14.9	2.26	66.0	201.2	25.4	1.11	0.96
PCE1SP1WB0.18	4.1	12.4	2.32	73.5	137.3	20.7	0.88	0.98
PCE1SP1.5WB0.18	10.9	19.4	2.31	70.5	335.1	32.4	1.14	0.99
PCE1SP1.7WB0.18	9.6	18.8	2.34	78.0	291.2	29.2	1.00	1.03
PCE1SP1.8WB0.18	5.3	12.9	2.33	73.5	169.8	23.1	0.95	1.05
PCE1SP2WB0.18	4.7	15.3	2.31	75.5	157.9	21.2	0.85	1.03
$\bar{X}$							1.00	1.01
σ							0.11	0.04
C_v							0.11	0.04

$t_{0.7D}$: Time required to expand the diameter by 0.7 times the expansion degree; $t_{0.8D}$: Time required to expand the diameter by 0.8 times the expansion degree;
 $\bar{X}$: Average value; σ : Standard deviation; C_v : Coefficient of variation.

表 6 流变参数计算公式的检验
Table 6 Test of rheological parameter calculation formulas

Sample No.	Experimental value						Calculated value		Experimental value/ Calculated value	
	τ_0/Pa	$\mu/(Pa \cdot s)$	$t_{0.7D}/s$	$t_{0.8D}/s$	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	D/cm	τ_0/Pa	$\mu/(Pa \cdot s)$	Yield stress ratio	Plastic viscosity ratio
PCE2SP1.8WB0.16	253.0	28.0	8.9	20.1	2.29	68.5	288.6	30.1	0.88	0.93
PCE2SP1.8WB0.17	216.9	20.3	6.5	17.6	2.29	73.5	212.2	24.9	1.02	0.82
PCE2SP1.8WB0.18	152.0	14.9	4.7	14.7	2.29	86.5	135.4	18.1	1.12	0.82
PCE3SP1.8WB0.16	218.3	25.4	7.8	20.1	2.30	70.5	259.0	28.1	0.84	0.90
PCE3SP1.8WB0.17	151.3	18.4	5.5	15.2	2.31	77.0	174.9	22.3	0.87	0.82
PCE3SP1.8WB0.18	133.6	13.0	4.1	13.8	2.29	81.0	127.2	18.4	1.05	0.70
PCE4SP1.8WB0.16	421.1	37.2	13.6	32.1	2.30	62.0	458.0	40.4	0.92	0.92
PCE4SP1.8WB0.17	331.8	27.5	9.6	20.8	2.27	66.5	309.0	31.3	1.07	0.88
PCE4SP1.8WB0.18	265.7	21.6	7.2	18.8	2.32	74.0	235.7	26.3	1.13	0.82
$\bar{X}$									0.99	0.85
σ									0.11	0.07
C_v									0.11	0.08

检验试验中的屈服应力试验值与计算值的比值平均值为 0.99，变异系数为 0.11，吻合情况良好；塑性黏度试验值与计算值的比值平均值为 0.85，变异系数为 0.08，变异系数较小，但比值平均值与 1 相差 15%，说明式(7)对不同类型减水剂应进行系数修正。由此可见，所提出的流动流变参数计算式(6)和式(7)，能较为准确地预测新拌素 UHPC 浆体的流变性能。

4 结论

1) 新拌素 UHPC 浆体剪切速率与剪切应力基本呈线性关系且各配合比的拟合优度 R^2 均接近于 1，其流变行为可采用 Bingham 模型描述。

2) 提出了特征扩展时间(扩展直径为 0.7 和 0.8 倍扩展度所需时间)指标，选用 2 个扩展时间，可进一步减少测量误差影响。

3) 基于特征扩展时间、扩展度等流动性指标所得屈服应力、塑性黏度等流变性能指标的公式(简称流动-流变公式)精度高,式(6)中屈服应力试验值与计算值之比的平均值为 1.00, 方差 0.11, 变异系数 0.11, 式(7)中塑性黏度试验值与计算值之比的平均值为 1.01, 方差 0.04, 变异系数 0.04。该公式可较为准确地计算出扩展度值在 480 mm 至 780 mm 的素 UHPC 的屈服应力和塑性黏度。

参考文献:

- [1] 余睿, 范定强, 水中和, 等. 基于颗粒最紧密堆积理论的超高性能混凝土配合比设计[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(8): 1145–1154.
YU Rui, FAN Dingqiang, SHUI Zhonghe, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(8): 1145–1154.
- [2] 中国建筑材料联合会, 中国混凝土与水泥制品协会. T/CBMF 37/T/CCPA7-2018 超高性能混凝土基本性能与试验方法[S] 2018
- [3] 黄祥, 刘天舒, 丁庆军. 超高性能混凝土研究综述[J]. 混凝土, 2019, 359(9): 36–38.
HUANG Xiang, LIU Tianshu, DING Qingjun. Concrete (in Chinese), 2019, 359(9): 36–38.
- [4] 樊俊江, 於林峰. 超高性能混凝土(UHPC)在装配式建筑中的应用及质量控制指标[J]. 混凝土与水泥制品, 2020, 293(9): 1–4.
FAN Junjiang, YU Linfeng. Chin Concr Cem Prod (in Chinese), 2020, 293(9): 1–4.
- [5] KAMAL H, KHAYAT, MENG W, et al. Rheological properties of ultra-high-performance concrete -An overview[J]. Cem Concr Res, 2019, 124: 105828.
- [6] MATSUZAWA K, SHIMAZAKI D, KAWAKAMI H, et al. Effect of non-adsorbed superplasticizer molecules on fluidity of cement paste at low water-powder ratio[J]. Cem Concr Compos, 2019, 97: 218–225.
- [7] LIU M, LEI J, BI Y, et al. Preparation of polycarboxylate-based superplasticizer and its effects on zeta potential and rheological property of cement paste[J]. J Wuhan Univ Technol -Mat Sci Ed, 2015, 30(5): 1008–1012.
- [8] 王哲, 肖勋光, 水中和, 等. 基于最紧密堆积理论合理选择 UHPC 的减水剂掺量[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(5): 1503–1509.
WANG Zhe, XIAO Xuguang, SHUI Zhonghe, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2019, 38(5): 1503–1509.
- [9] KIM H, KOH T, PYO S. Enhancing flowability and sustainability of ultra high performance concrete incorporating high replacement levels of industrial slags[J]. Constr Build Mater, 2016, 123: 153–160.
- [10] WILLE K, NAAMAN A E, EI-TAWIL S. Optimizing ultra-high performance fiber-reinforced concrete[J]. Concr Inter, 2011, 33(9): 35–41.
- [11] 李传习, 聂洁, 潘仁胜, 等. 水胶比对超高性能混凝土施工与力学性能的影响[J]. 土木与环境工程学报, 2020, 42(4): 164–174.
LI Chuanxi, NIE Jie, PAN Ren-sheng, et al. J Civ Environ Eng (in Chinese), 2020, 42(4): 164–174.
- [12] LEE K H, YOON H S, YANG K H. Tests on magnesium potassium phosphate composite mortars with different water-to-binder ratios and molar ratios of magnesium-to-phosphate[J]. Constr Build Mater, 2017, 146: 303–311.
- [13] 黄静, 季文玉, 阎培渝. 新拌 UHPC 净浆的工作性与流变性试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2022(1): 1–6.
HUANG Jing, JI Wenyu, YAN Peiyu. Chin Concr Cem Prod (in Chinese), 2022(1): 1–6.
- [14] 王朝阳. UHPC 的组成设计及其流变特性研究[J]. 江西建材, 2020(S1): 38–42.
WANG Chaoyang. Jiangxi Build Mater (in Chinese), 2020(S1): 38–42.
- [15] 张倩倩, 舒鑫, 杨勇, 等. 减水剂吸附行为对水泥-硅灰浆体黏度的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(11): 1716–1721.
ZHANG Qianqian, SHU Xin, YANG Yong, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(11): 1716–1721.
- [16] 刘明, 张磊, 杨文, 等. 不同结构聚羧酸减水剂对水泥-硅灰浆体黏度和吸附行为的影响[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(2): 445–451.
LIU Ming, ZHANG Lei, YANG Wen, et al. J Chin Ceram Soc, 2022, 50(2): 445–451.
- [17] 司雯, 曹明莉, 冯嘉琪. 纤维增强水泥基复合材料的流动性与流变性研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(5): 819–825.
SI Wen, CAO Mingli, FENG Jiaqi. Mater Rep (in Chinese), 2019, 33(5): 819–825.
- [18] CHOI M S, LEE J S, RYU K S, et al. Estimation of rheological properties of UHPC using mini slump test[J]. Constr Build Mater, 2016, 106: 632–639.
- [19] 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.
- [20] ROUSSEL N. Correlation between yield stress and slump: comparison between numerical simulations and concrete rheometers results[J]. Mater Struct, 2006, 39(4): 501–509.
- [21] FERRARIS C F. Measurement of the rheological properties of cement paste: A new approach[J]. J Res Natl Inst Stand Technol, 1999, 104(5): 461.
- [22] FERRARA L, CREMONESI M, TREGGER N, et al. On the identification of rheological properties of cement suspensions: Rheometry, Computational Fluid Dynamics modeling and field test measurements[J]. Cem Concr Res, 2012, 42(8): 1134–1146.
- [23] MENG W, KHAYAT K H. Improving flexural performance of ultra-high-performance concrete by rheology control of suspending mortar[J]. Compos B Eng, 2017, 117: 26–34.
- [24] 李传习, 聂洁, 潘仁胜, 等. 水胶比对掺粉煤灰超高性能混凝土施工与力学性能影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(1): 14–21.
LI Chuanxi, NIE Jie, PAN Rensheng, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2019, 38(1): 14–21.
- [25] 王睿. 基于纤维分布的 UHPC 制备及其渗透性能研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2018.
WANG Rui. Research on preparation and permeability of UHPC based fiber distribution (in Chinese, dissertation). Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [26] 黎梦圆, 刘宇, 韩建国, 等. 采用 Couette 逆问题的解计算水泥基材料流变参数[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(8): 1302–1309.
LI Mengyuan, LIU Yu, HAN Jianguo, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(8): 1302–1309.
- [27] KEKE L, YONG L, LIULIU X, et al. Rheological characteristics of Ultra-High performance concrete (UHPC) incorporating bentonite[J]. Constr Build Mater, 2022, 349: 128793.
- [28] LIU J, WANG K, ZHANG 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.
- [29] 何春燕. 减水剂对水泥浆体流变性能的影响[D]. 广东: 华南理工大学, 2006.
HE Chunyan. Effect of superplasticizer on rheological properties of cement paste (in Chinese, dissertation). Guangzhou: South China University of Technology, 2006.
- [30] 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.