

超高性能混凝土流变特性及调控研究进展

刘一帆^{1,2}, 吴泽媚^{1,2}, 张轩翰^{1,2}, 史才军^{1,2}

(1. 湖南大学土木工程学院, 绿色先进土木工程材料及应用技术湖南省重点实验室, 长沙 410082;

2. 湖南省绿色先进土木工程材料国际科技创新合作基地, 长沙 410082)

摘 要: 超高性能混凝土(UHPC)是一种具有超高强度、高韧性和优异耐久性的新型水泥基复合材料。由于它的水胶比低、细颗粒用量大, 导致新拌浆体黏度高、纤维易成团、泵送困难等问题, 不利于混凝土的匀质性及纤维对 UHPC 增强增韧作用的发挥。本文从流变表征和模型层面综述了 UHPC 的流变特性, 基于水胶比、外加剂、矿物掺合料、纤维及骨料特性等因素对 UHPC 流变性能的影响, 讨论分析了 UHPC 流变行为调控技术, 包括调控水膜层厚度、调控浆膜层厚度、降低间隙液黏度、掺入黏度调节外加剂、改变纤维特性等 5 个方面及其调控作用机理。

关键词: 超高性能混凝土; 流变性能; 调控技术; 纤维分散与取向; 力学性能

中图分类号: TU528.31 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)11-3025-14

网络出版时间: 2023-08-15

Rheological Properties and Their Regulation of
Ultra-High Performance Concrete – A Short ReviewLIU Yifan^{1,2}, WU Zemei^{1,2}, ZHANG Xuanhan^{1,2}, SHI Caijun^{1,2}

(1. Key Laboratory for Green & Advanced Civil Engineering Materials and Application Technologies of Hunan Province, College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. International Science and Technology Innovation Center for Green & Advanced Civil Engineering Materials of Hunan Province, Changsha 410082, China)

Abstract: Ultra-high performance concrete (UHPC) is a new cement-based composite material with ultra-high strength, high toughness, and excellent durability. Low water-to-binder ratio and large amount of fine particles in UHPC lead to some problems like high viscosity of fresh paste, fiber cluster issue, and difficulty in pumping, etc.. This is not beneficial to the homogeneity of concrete and fiber strengthening and toughening of UHPC, and restricts the *in-situ* placing and application of UHPC. This review represented the rheological properties of UHPC from aspects of rheological parameters and models. Based on the influence of water-to-binder ratio, chemical admixtures, mineral admixtures, fiber and aggregate characteristics on the rheological properties of UHPC, the techniques in regulating the rheological behavior of UHPC were analyzed. Such techniques include regulating water film thickness, regulating paste film thickness, reducing viscosity of interstitial fluid, adding viscosity modifier, and changing fiber characteristics. In addition, the rheology regulation mechanisms associated with these techniques were also discussed.

Keywords: ultra-high performance concrete; rheological property; regulation techniques and mechanisms; steel fiber dispersion and orientation; mechanical properties

超高性能混凝土(UHPC)是一种基于颗粒紧密堆积理论设计的新型水泥基复合材料, 它具有超高

抗压强度、高韧性、优异耐久性等特点^[1-3], 在大跨径桥梁、薄壁结构、建筑装饰和海洋平台等领域

收稿日期: 2023-05-29。 修订日期: 2023-06-19。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB3708700); 国家自然科学基金青年基金项目(52008164); 湖南省自然科学基金面上项目(2022JJ30144)。

第一作者: 刘一帆(1999—), 女, 硕士研究生。

通信作者: 史才军(1963—), 男, 博士, 教授;

吴泽媚(1987—), 女, 博士, 教授。

Received date: 2023-05-29. Revised date: 2023-06-19.

First author: LIU Yifan (1999—), female, Master candidate.

E-mail: liuyifan00@hnu.edu.cn

Correspondent author: SHI Caijun (1963—), male, Ph.D., Professor;

WU Zemei (1987—), female, Ph.D., Professor.

E-mail: cshi@hnu.edu.cn;

wuzemei@hnu.edu.cn

具有广阔的应用前景。优异的流变性能是保障 UHPC 顺利浇筑、发挥其性能优势的关键^[4–5]。然而, UHPC 采用了极低水胶比(通常为 0.2 左右), 导致新拌 UHPC 黏度高^[6]、流动速度慢、静态损耗快, 给泵送和浇筑带来一定困难, 且对内部纤维分散和取向及其力学性能有着显著影响。表 1 总结了 UHPC 流变性能的应用。合适的屈服应力与塑性黏度有利于 UHPC 中纤维的均匀分散及取向性的提高, 从而改善其拉伸和抗弯性能^[7]。流变性能亦会影响新拌 UHPC 中的气泡稳定性^[8]。UHPC 黏度高会使得搅拌过程中气泡含

量增加, 一定程度上降低了 UHPC 的强度和耐久性。因此, 可通过调整流变学参数^[9]和优化搅拌工艺^[10–11]等方式来控制 UHPC 中气泡含量, 从而提高 UHPC 力学性能。UHPC 亦被用于大型 3D 打印结构^[12], 在 3D 打印过程中, 要求它具有良好的黏聚性和流动性。此外, 良好的流变性有助于胶凝材料颗粒分散均匀, 进一步改善力学性能^[13]。综上所述, 研究 UHPC 的流变性能对于气泡调控^[14]、骨料沉降^[15]、纤维分布和取向^[16]及 3D 打印^[12]等均具有重要的现实意义, 从而有利于推动 UHPC 的应用。

表 1 UHPC 流变性能的应用
Table 1 Application of rheological properties of UHPC

Application	Purpose	Effect
Regulation of fiber distribution and orientation	Achieve better fiber distribution ^[14,17]	Realize the roles of fiber reinforcing and toughening, and improve mechanical properties.
Bubble control	Control bubble content and distribution ^[9,14]	Strength of UHPC increases with the decrease of bubble content.
Dispersion of particles	Great rheological property contributes to particle dispersion, and better particle dispersion in turn promotes improvement of rheological property ^[13]	Rheological properties and particle dispersion interacts with each other to improve mechanical properties.
Mixture design of UHPC	A strong correlation among viscosity of UHPC matrix, fiber dispersion and tensile strain capacity ^[18]	Optimize UHPC design and achieve the balance of good rheology, high mechanical properties and dense microstructure ^[19] .
3D printing, concrete pumping, form filling, shotcrete ^[20]	Appropriate cohesiveness and fluidity	Smoothly flow in the pump pipe without segregation and blockage ^[12]

沈锐^[21]总结了影响 UHPC 黏度的因素, 包括外加剂掺量、砂胶比、钢纤维掺量等, 还提出了一系列降黏措施。张倩倩等^[22]探究了矿物掺合料对低水胶比浆体流变性能的影响, 发现粉煤灰和磨细矿渣的掺入增大了水膜层厚度, 使其流变性能提高, 硅灰对流变的影响则相反。李珂珂等^[23]研究了 UHPC 浆体的流动性随膨润土掺量的变化, 发现当膨润土掺量由 0 增至 15% 时, UHPC 静态屈服应力、动态屈服应力和塑性黏度分别提高了约 17.0、5.8 倍和 1.2 倍, 这主要归因于滞回环面积和触变指数增大, 其触变性得到明显改善。

本文介绍了 UHPC 中常用的流变学模型及其流变特性; 综述了水胶比、外加剂、矿物掺合料、纤维及骨料特性等对 UHPC 流变性能的影响, 并阐明了各因素对其流变性能的调控作用机理, 提出了增加水膜层厚度、降低间隙液浓度、增加富余浆膜层厚度、掺入黏度调节外加剂、改变纤维特性等 5 种 UHPC 流变调控技术手段。本文可为 UHPC 的流变性能调控及配合比设计提供一定的理论参考。

1 UHPC 流变性能表征

UHPC 是由水泥、辅助性胶凝材料、水、骨料、纤维、外加剂组成的复合材料。新拌 UHPC 可看作是骨料和纤维分散于净浆中的两相系统, 表现出典型的剪切变稠特性^[22], 具有明显的非线性流变特征^[24–25]。Wu 等^[26]研究了硅灰含量 (0~25%) 对 UHPC 流变性的影响, 发现大多数 UHPC 拌合物都表现出明显的剪切增稠行为。混凝土剪切增稠表明新拌浆体的表观黏度随剪切速率的增加逐渐增大, 这将导致混凝土泵送更加困难^[27]。

刘豫等^[28]系统总结了用于水泥基材料的流变模型。其中, Bingham 模型、改进的 Bingham 模型和 Herschel-Bulkley 模型已被广泛用于净浆、砂浆、掺钢纤维 UHPC、掺粗骨料 UHPC 等各种水泥基材料的流变行为研究, 如表 2 和 3 所示^[29–31]。Yu 等^[8]证明了 Herschel-Bulkley 模型更适合用来描述新拌状态下 UHPC 的流变特性。郑晓博等^[32]发现采用 Herschel-Bulkley 模型更适宜评价含偏高岭土的

UHPC 流变性能。同时, 郑晓博等^[33]研究了粗骨料 UHPC 的流变性能和稳定性, 发现其新拌混合料呈

剪切变稀行为, 改进的 Bingham 模型具有更准确的流变参数拟合结果。

表 2 常用水泥基材料流变模型

Table 2 Common rheological models for cementitious material

Model	Equation	Year	Applicability
Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma}$	1922	Relationship between τ and $\dot{\gamma}$ is linear, and shear stress of fluid does not vary with shear rate.
Modified Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma} + c\dot{\gamma}^2$	2001	(1) Relationship between τ and $\dot{\gamma}$ is nonlinear. (2) The model can accurately estimate the yield stress compared with Bingham and Hershel-Bulkley models.
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + m\dot{\gamma}^n$	1926	Relationship between τ and $\dot{\gamma}$ is nonlinear.

Note: τ —shear stress (Pa); τ_0 —yield stress (Pa); η —plastic viscosity (Pa·s); $\dot{\gamma}$ —shear rate (s^{-1}); c —coefficient of correct; m —consistency index; n —flow index.

表 3 UHPC 常用流变模型及相关研究成果

Table 3 Commonly used rheological models of UHPC and relevant research results

Model	Author	Research contents and results
Herschel-Bulkley	Yu <i>et al.</i> ^[8]	(1) Effects of water reducing agents and SCMs on the rheological properties of UHPC
		(2) An optimal design method of UHPC with dense microstructure based on rheology was proposed
	Zheng <i>et al.</i> ^[32]	Effect of metakaolin on rheological properties and fiber distribution of UHPC
	Bai <i>et al.</i> ^[34]	Design and synthesis of viscosity-reducing polycarboxylate superplasticizer and its influence on cement-silica fume paste with low water-to-binder ratio
	Yalcinkaya <i>et al.</i> ^[35]	Effect of quartz volume on rheological properties, shrinkage, and mechanical properties of UHPC
	Zhu <i>et al.</i> ^[36]	Mechanisms affecting viscosity of cement paste made with microfines of manufactured sand
Modified Bingham	Xiong <i>et al.</i> ^[37]	Performance and microstructure of UHPC with silica fume replaced by inert mineral powders
	Lin <i>et al.</i> ^[38]	Based on analytic hierarchy process (AHP), five types of silica fume are selected to measure fluidity of UHPC.
	Dils <i>et al.</i> ^[10]	Influences of cement type and mixing pressure on air content, rheology, and mechanical properties of UHPC
	Baumert and Garrecht ^[20]	(1) It is believed that the modified Bingham model can more accurately estimate the yield stress of UHPC
	Wu <i>et al.</i> ^[26]	Influence of silica fume content on rheology and mechanical properties of UHPC
	Sun <i>et al.</i> ^[39]	Effect of nanofibers on rheology and mechanical properties of UHPC matrix
Bingham	Abdelrazik and Khayat ^[40]	(1) The measured flow curve is linear. (2) Influences of fiber type and content on the fresh performance of fiber reinforced self compacting concrete (FR-SCC)
	Yu <i>et al.</i> ^[8]	Rheological and mechanical properties of UHPC mixed with recycled fine aggregate
	Meng and Khayat ^[41]	Effect of graphite nanoplatelets and carbon nanofibers on rheology, hydration, shrinkage, mechanical properties, and microstructure of UHPC
	Liu <i>et al.</i> ^[42]	Effect of superabsorbent polymer characteristics on rheology of UHPC
	Ragalwar <i>et al.</i> ^[43]	Significance of the particle size distribution modulus for strain-hardening-ultra-high performance concrete (SH-UHPC) matrix design
	Teng <i>et al.</i> ^[7]	Improve the flexural properties of UHPC prepared with different steel fiber content by controlling the rheological property of mortar

2 UHPC 流变性能调控

从材料组分方面看, 影响 UHPC 流变性能的主要因素有水胶比、外加剂、矿物掺合料、纤维和骨料特性等, 其影响机理可划分为物理作用、化学作用或者物理和化学作用的结合。其中, 物理作用机理主要包括颗粒形貌、紧密堆积、水膜厚度、纤维种类及尺寸、滚珠效应, 化学作用机理主要包括减水剂静电及空间位阻分散作用、外加剂分子结构不同而引起的间隙液黏度差异等, 以上物理和化学作用都是 UHPC 流变特性改变的内在原因。从流变影响要素和作用机理出发, 表 4 总结了调控 UHPC 流

变行为的有效技术手段, 主要包括调控水膜层厚度、调控富余浆膜层厚度、降低间隙液浓度、掺入黏度调节外加剂、改变纤维特性等。下面内容系统综述其调控作用。

2.1 水膜层厚度

在 UHPC 浆体中, 一部分水填充在固体颗粒间隙中, 另一部分水则吸附在颗粒表面形成水膜层。如图 1 所示, 水膜层厚度定义为所有颗粒表面的平均水层厚度, 2 倍的水膜层厚度可反映颗粒间的平均距离^[22]。根据已有研究可知, UHPC 浆体的流变性与颗粒表面的水膜层厚度密切相关, 增加水膜层厚度可以有效降低颗粒与颗粒之间的内摩擦阻力,

改善新拌 UHPC 的流变性能。

在假定水泥基材料内部颗粒均分散良好的前提下, 水膜层厚度可采用式(1~4)进行计算^[45-46]。

$$u = \frac{(1 - \tau)}{\tau} \quad (1)$$

$$u'_w = u_w - u \quad (2)$$

$$A_s = A_\alpha R_\alpha + A_\beta R_\beta + A_\gamma R_\gamma + \dots \quad (3)$$

$$WFT = \frac{u'_w}{A_s} \quad (4)$$

式中: WFT (Water film thickness)为颗粒表面的平均水膜层厚度; u 为湿颗粒堆积密度对应的空隙比(单位体积内空隙体积与胶凝材料体积的比); u'_w 为富

余水体积比; A_s 为胶凝材料中所有固体颗粒的平均比表面积; A_α 、 A_β 、 A_γ 分别为固体颗粒 α 、 β 、 γ 的比表面积, R_α 、 R_β 、 R_γ 分别是固体颗粒 α 、 β 、 γ 的体积比。

由上述公式可以看出, WFT 与颗粒堆积密度、颗粒总表面积以及用水量密切相关^[22]。但由于 UHPC 中微细颗粒含量多, 其比表面积大且表面能高, 处于热力学不稳定状态, 内部颗粒之间易相互吸引而絮凝成团, 这使得颗粒在浆体中的实际比表面积与理论值有所差异, 导致颗粒表面水膜层厚度值不均匀, 因此采用颗粒充分分散时的比表面积代替, 可计算理想的水膜层厚度值。

表 4 UHPC 流变调控技术及作用机理

Table 4 Rheological regulation techniques and mechanisms of UHPC

No	Mechanism	Regulation techniques
1	Regulating water film thickness	(1) Change water-to-binder ratios (2) Increase the packing density of solid particles (3) Reduce specific surface area of particles
2	Regulating paste film thickness	Optimize aggregate gradation
3	Reducing concentration of interstitial fluid	Enhance adsorption behavior of superplasticizers
4	Adding viscosity modifier	(1) Add Viscosity-Modifying Admixture (2) Add viscosity reducer
5	Changing fiber characteristics	(1) Change fiber type and content (2) Hybrid long and short fibers

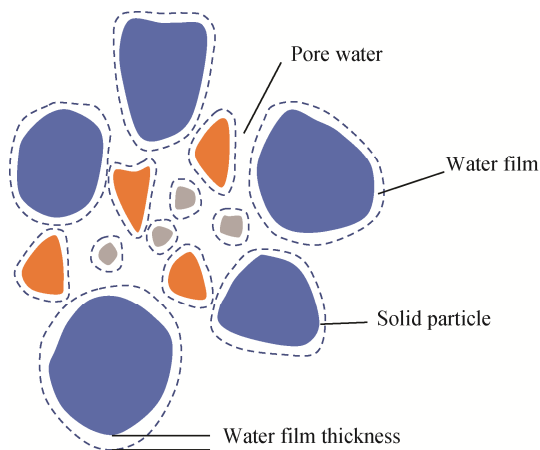


图 1 水泥基材料内部颗粒水膜层厚度示意图(改编自参考文献[44])

Fig. 1 Illustration of water film thickness around particles in cement-based materials (adapted from Ref. [44])

2.1.1 用水量或水胶比 水胶比是影响 UHPC 浆体工作性与流变性的重要因素, 新拌 UHPC 的流动性随水胶比的增加而增大。贾迪^[47]发现将 UHPC 水胶比由 0.21 增至 0.27, 其塑性黏度降低 62%, 屈服应力变化更为显著, 由 182.78 Pa 降至 1.68 Pa。且在水胶比为 0.27 时, 其流动性达到最佳。Wang

等^[16]探索了水胶比(w/b 比)、减水剂掺量和钢纤维掺量与新拌 UHPC 流变性能的关系。当水胶比从 0.24 降至 0.20, UHPC 砂浆的塑性黏度明显增加, 然而, 随着水胶比进一步从 0.20 降低到 0.18, 其对塑性黏度的增加作用有限。黄静等^[46]通过正交实验研究了水胶比对新拌 UHPC 流变性与工作性的影响, 得出水胶比增加, 黏度系数减小, 流动度增大的结论, 并发现计算的 UHPC 净浆的 WFT 也随之增大。

UHPC 因水胶比低, 其 WFT 下降, 导致颗粒平均间距减小, 颗粒间相互作用力增强, 易产生絮凝和网状结构。絮凝结构能够抑制大量自由水, 从而使 UHPC 拌合物屈服应力和黏度提高^[25], 流动性降低。而当水胶比增大时, UHPC 浆体颗粒间 WFT 增大, 颗粒间距增大, 颗粒间作用力减弱^[48], 同时颗粒间相互吸引和排斥的位能均降低^[49]。因此, 产生的絮凝结构数量减少, UHPC 拌和物产生初始流动的阻力亦随之减小, 进一步导致屈服应力降低, 流动性增大。

在胶凝材料及其他组分用量一定情况下, UHPC 水胶比越低, 其强度越高、微观结构越致密。

但需要注意的是,水胶比过低会限制其流动性,而水胶比增大,流动性得到改善,但过大新拌浆体易发生泌水和离析。因此在进行 UHPC 配合比设计时,要综合考虑流动性、流变性与强度选取合适的水胶比。

2.1.2 高效减水剂 高效减水剂通过吸附在水泥颗粒表面形成静电斥力及空间位阻效应以减弱颗粒间的相互作用,使相互包裹的水泥颗粒分散,絮凝结构被打开并释放出内部包裹的自由水^[50-51],增加 WFT,从而改善新拌 UHPC 流变行为。高效减水剂对颗粒分散及整个体系堆积密实度的影响取决于其掺量与种类。随着减水剂用量的增加,UHPC 拌合物的屈服应力和塑性黏度降低,流动性增大。贾迪^[47]探究了不同掺量减水剂对 UHPC 流变性的影响,发现减水剂掺量由 2.5%增至 4.5%时,塑性黏度降低 20%,屈服剪切应力降低 88%。Ali 等^[52]研究了高效减水剂掺量(1.0%、1.2%、1.4%)、硅灰掺量(15%、20%、25%)和不同水胶比(0.18、0.20、0.22)对 UHPC 砂浆流变性能、力学性能及微观结构的影响,发现屈服应力和塑性黏度随减水剂掺量与水胶比的增大均减小。Huang 等^[9]的研究表明减水剂掺量为 2.5%~4.0%时,UHPC 屈服应力和塑性黏度随其掺量的增加分别降低了 88.9%、20.6%。作者还通过调节流变性能、掺入消泡剂和优化搅拌工艺的方式成功控制了 UHPC 中的气泡含量,提高了其力学性能。此外,值得注意的是,减水剂掺量存在临界值,即减水剂饱和掺量,超过临界值后减水剂分子便不再有效吸附于胶凝材料颗粒表面而是以液体形态存在,这将引发拌合物的泌水现象^[25]。

减水剂在不同胶凝材料组分上的吸附能力不同导致掺不同品种减水剂浆体的黏度存在差异。研究表明,掺聚羧酸系高效减水剂(PCE)的 UHPC 拌合物的湿堆积密实度高于掺萘系高效减水剂(PNS)的 UHPC,且在相同条件下,PCE 具有比 PNS 更好的保坍能力和降黏功能^[53]。刘沙沙^[54]研究了不同减水剂品种对砂浆流变性能的影响,发现掺聚羧酸高效减水剂的砂浆的扩展度经时损失率小,且砂浆的初始屈服应力小。因此,聚羧酸高效减水剂适用于配制高流动性混凝土;用萘系减水剂配制的砂浆其扩展度经时损失率介于氨基磺酸盐减水剂和聚羧酸高效减水剂之间;掺氨基磺酸盐减水剂的砂浆的扩展度经时损失率最大。目前聚羧酸系高效减水剂已逐步成为制备 UHPC 的首选外加剂。Schröfl 等^[55]探究了甲基丙烯酸酯(MPEG)型和烯丙醚(APEG)型 PCE

对 UHPC 中水泥和硅灰的吸附行为,结果表明,MPEG-PCE 对水泥的分散效果优于硅灰,而 APEG-PCE 优先吸附在硅灰表面。在水泥孔溶液中,PCE 通过 Ca^{2+} 络合的方式使硅灰表面电荷变为正电荷以完成吸附与分散。因此,当 UHPC 中存在不同的矿物掺合料时,可考虑掺入不同分子结构的高效减水剂,从而实现对不同矿物掺合料表面吸附的优化作用^[56]。此外,从热力学能量角度,熵的增加是推动 PCE 吸附的主要动力。PCE 在吸附过程中应产生较强的熵效应,才能成为更有效的分散剂^[57]。短侧链 PCE 的吸附主要是由静电作用引起;具有长侧链 PCE 的吸附则是因为熵的显著增加,而熵的增加是由于附着在聚合物主链羧酸基上的负离子及吸附在 CaCO_3 表面的水分子和离子的释放。此外,高效减水剂对细颗粒的分散作用还取决于其自身相对分子质量^[58]、浓度、结构^[59]以及拌合物中水胶比、颗粒表面吸附量、水泥类型^[60]和矿物掺合料种类。

2.1.3 固体颗粒堆积密度 UHPC 中采用的主要胶凝材料包括水泥、粉煤灰、硅灰、偏高岭土等,它们的颗粒粒径及比表面积大小对比如表 5 所示。

表 5 水泥、矿物掺合料颗粒物理性能
Table 5 Physical characteristics of ordinary Portland cement and supplementary cementing materials (SCMs)

Materials	Particle size/ μm	Specific surface/ $(\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$
Cement	3.0 – 25.0	350 – 400
Silica fume	<1.0	13 000 – 30 000
Fly ash	0.4 – 300.0	300 – 500
Ultra-fine fly ash	<10.0	>600
Metakaolin	10.0	2 500
Rice husk ash	5.0 – 10.0	50 000 – 100 000
Slag	<45.0	375 – 425 (Britain) 450 – 550 (America) >450 (China) 350 – 450 (India)

粉煤灰能够有效降低 UHPC 浆体的屈服应力和塑性黏度,从而改善其流动性与和易性^[61-63]。Long 等^[64]发现超细矿渣和粉煤灰的加入可以增大水泥浆体中的固体颗粒堆积密度,并改善低水胶比水泥浆体(水胶比=0.22)的流动性。姜哲^[61]等研究了矿物掺合料种类及掺量对低水胶比水泥浆体(水胶比=0.2)流变性能的影响,结果表明,在水胶比及减水剂掺量固定的情况下,掺入 10%、30%、50%粉煤灰,其流动度分别增长 8.2%、12.7%和 18.2%;当掺入 10%和 20%硅灰时,浆体屈服应力和塑性黏度显著增加,流动度分别降低 17.3%、100.0%。

由水膜层厚度计算公式(4)可以看出, WFT 与颗粒堆积密实度密切相关。由于填充效应, 粉煤灰的掺入能填充水泥颗粒间空隙, 一定程度上降低颗粒间空隙率, 增大固体颗粒堆积密实度, 从而使 WFT 变大, 改善 UHPC 浆体的流变性能。张倩倩等^[22]验证了矿物掺合料主要是通过颗粒表面水膜层厚度作用对低水胶比浆体流变性能产生影响, 试验结果表明掺 15%、30% 和 45% 的粉煤灰, 水膜层厚度分别增大 11.0%、19.2% 和 22.2%; 掺 4%、8% 和 12% 的硅灰, 水膜层厚度分别降低 69.8%、81.1% 和 86.2%; 掺入 15%、30% 和 45% 的磨细矿渣, 水膜层厚度分别增大 0.6%、3.6% 和 4.1%。且水膜层厚度越大, 浆体屈服应力和黏度越小。

超细粉煤灰对浆体流变性能的改善作用效果更为显著^[65], 可以更好地填充在水泥颗粒间空隙。曹润倬等^[66]系统研究了超细粉煤灰取代粉煤灰后 UHPC 的流变性, 发现当取代量小于 50% 时, UHPC 浆体的流动性随取代量的增加而增大, 屈服应力和塑性黏度显著降低; 取代量大于 50% 时, UHPC 的流动性随取代量的增加而降低。

2.1.4 颗粒比表面积 硅灰的掺入能显著增大 UHPC 浆体的屈服应力和塑性黏度, 降低流动性。

张倩倩等^[22]发现掺入 4%、8% 和 12% 的硅灰时, 浆体的屈服应力分别从 5.3 Pa 增加至 23.3、51.1 Pa 和 54.1 Pa, 表观黏度分别从 2.9 Pa·s 增加至 3.3、7.4 Pa·s 和 9.2 Pa·s。刘宇等^[67]基于大流态混凝土配合比, 研究了矿物掺合料种类对低水胶比浆体(水胶比=0.167)的流变性和触变性的影响, 发现掺入硅灰、粉煤灰微珠、磨细矿渣粉后, 屈服应力分别是对照组的 4.00、0.17 倍和 0.59 倍, 塑性黏度分别是对照组的 1.56、0.21 倍和 1.08 倍, 触变环面积分别是对照组的 0.11、1.56 倍和 0.63 倍, 表明硅灰的掺入增大了浆体的屈服应力、塑性黏度和触变性, 而磨细矿渣粉和粉煤灰微珠的掺入均降低浆体的触变性。但也有研究表明, 硅灰对 UHPC 流变性的影响存在临界掺量。如表 6 所示, Wu 等^[26]探究了硅灰对 UHPC 基体和掺 2% 钢纤维 UHPC 流变性、纤维-基体粘结性能和力学性能的影响, 发现硅灰的最佳掺量为 10%~15%, 在此范围内其黏度降低了约 45 Pa·s。可以看出, 当硅灰掺量低于临界掺量时, 硅灰对 UHPC 流动性产生促进作用, 其影响机理可总结为“滚珠效应”和“填充效应”^[38]。基于水膜层厚度公式(4), WFT 增加, 浆体流动性得到提升, 同时有助于减少孔隙率和形成致密微观结构多相体

表 6 硅灰对 UHPC 流变性能的影响
Table 6 Effect of silica fume on rheological properties of UHPC

References	Mixture	w/b ratio	Fiber content	Silica fume content	Flowability	Rheological parameters	Optimal content of silica fume	Rheological parameters corresponding to optimum content
Liu ^[67]	Great fluidity concrete	0.167	0	0 4.30% 6.00%	↓	$\tau_0 \uparrow$ $\eta \uparrow$		
		0.274	0	0 6.20% 7.00% 7.80%				
Liu et al. ^[69]	UHPC mortar (cement-silica fume-fly ash)	0.170	0	0 10.00% 20.00% 30.00%		$\eta \uparrow$		
Ozolins ^[13]	UHPC mortar (cement-silica fume-quartz)	0.250	0	0–13.75%	↑–↓		5.0%–7.5%	$T_{20}=3s$ $D_{max}=35\text{--}36\text{ cm}$
Bahrami ^[70]	SCC	0.410	0	5.00% 7.50% 10.00%	↑–↓		5.0%	Slump flow= 55–85 cm
Wu et al. ^[26]	UHPC mortar (cement-silica fume, s/b ratio=1.0)	0.180	0	0–25.00%		$\tau_0 (\downarrow\uparrow)$	10.0%–15.0%	$\tau_0 = 34\text{--}41\text{ Pa}$ $\eta = 30\text{--}33\text{ Pa}\cdot\text{s}$
		0.180	2%	0–25.00%		$\eta (\downarrow\uparrow)$		

Note: “↑–↓” means a parameter increases at first and reduces then.

系^[68]。当高于临界掺量时, 硅灰比表面积大^[67], 硅灰颗粒比表面积增加产生的负面影响克服了正填充效应^[13], 润湿需水量大大增加, 浆体中的自由水量相对降低, 此时减水剂分子主要吸附在硅灰颗粒表面, 降低了减水剂对水泥颗粒的分散性^[56], 即比表面积对流变性能的影响较固体颗粒堆积密度更为显著, 因此 WFT 减小, 黏度增大, 流动度降低。

低硅灰掺量有助于降低塑性黏度, 提高浆体流动性, 但对 UHPC 的微观结构和力学性能改善有限; 高掺量硅灰可确保其充分的火山灰反应和致密微观结构的形成, 但会增加黏度和材料成本^[26], 因此要注意硅灰的最佳掺量问题。

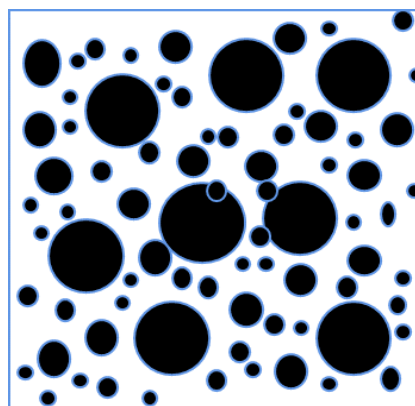
另外, 有研究表明, UHPC 流动性与硅灰中的含碳量有关, 低碳含量可以提高高效减水剂的吸附效率^[71]。Lin 等^[38]分析了不同含碳量的硅灰对 UHPC 流动性的影响, 发现碳含量最高的硅灰对应的 UHPC 流动性最小。碳是一种多孔结构, 硅灰中残留的碳可以吸附减水剂, 从而降低混合物的流动性^[72]。

综上所述, 矿物掺合料对 UHPC 浆体流变性能的调控机理主要体现在以下几方面: 1) 矿物掺合料对堆积密实度的影响; 2) 矿物掺合料对固体颗粒比表面积的影响; 3) 矿物掺合料对减水剂吸附性能的影响。究其根本, 矿物掺合料对 UHPC 体系流变性能的影响通过水膜层厚度体现, 水膜层厚度反映了固体颗粒堆积密实度与颗粒比表面积的共同作用, 颗粒堆积密实度越大, 水膜层越厚; 颗粒比表面积越大, 水膜层厚度越小。水膜层厚度增大还是减小, 取决于上述两个作用哪个更为显著。水膜层厚度越大, UHPC 浆体屈服应力和黏度越小, 流动性越好。

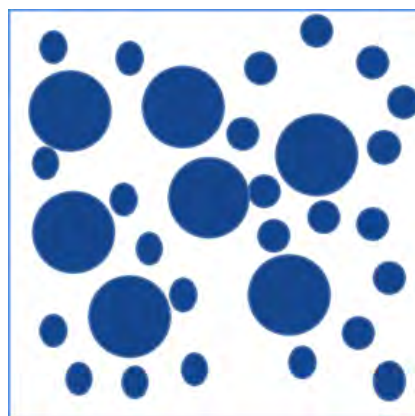
2.2 富余浆膜层厚度

骨料掺量、粒径和级配都是影响 UHPC 流变性能的重要因素。Choi 等^[73]发现最大骨料粒径对混凝土和其润滑层的流变性有较大影响, 进而影响混凝土的泵送性能。Yalcinkaya 等^[35]研究了石英体积分数对 UHPC 流变性、收缩和力学性能的影响, 发现制备出自密实 UHPC 的骨料体积分数上限为 45%。流动性良好的 UHPC 存在一个合理砂率范围, 在此范围内, UHPC 流变性能最佳^[74]。此外, 流变性能的调控还可以通过优化骨料级配来实现。图 2 展示了连续型、间隙型与均匀型^[75] 3 种骨料级配。连续型砂粒级配基于最大紧密堆积密度所建立, 其颗粒之间有许多接触点; 与连续型级配相比, 间隙型级配缺乏一定范围的砂粒径, 空隙率更大; 而均匀型

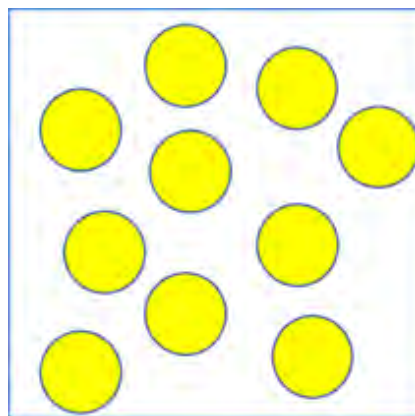
砂粒级配代表单一尺寸的砂粒, 其颗粒之间的接触点少, 屈服应力较低^[76]。由于黏度与填充率成反比, 因此连续型级配砂的黏度最低, 级配连续的混合料亦具有更高的力学性能。



(a) Continuous



(b) Gap



(c) Uniform

图 2 不同类型骨料级配

Fig. 2 Different types of aggregate gradation

骨料对 UHPC 流变性的影响最终体现在浆膜层厚度(PFT)上。与 WFT 理论相似, 在 PFT 模型中: 一部分净浆用来填充骨料间的空隙, 多余的净浆包裹在骨料表面形成浆膜层^[77]。研究表明, 浆膜层厚

度越大, UHPC 浆体的流动性越好。由 PFT 公式^[46]可以看出, PFT 与骨料比表面积成反比。在 UHPC 中, 采用的砂主要为粒径小于 0.6 mm 的优质磨细石英砂, 细小的砂粒会产生较大的比表面积, 导致水泥浆包裹骨料表面的 PFT 较小, 从而对浆体的流变性能造成不利影响。因此可以通过向 UHPC 中掺入适量粗骨料的方式, 降低骨料比表面积, 以增大 PFT, 从而提高新拌 UHPC 的流动性^[21]。但应注意, 骨料粒径不应过大, 若粗骨料掺量过多, 骨料之间的摩擦力便会增大, 使得浆体对颗粒的润滑作用降低, 骨料颗粒发生堆积, 进而导致骨料对纤维的阻碍作用增强, 浆体发生团聚, 均匀性降低。

$$v = \frac{(1-\phi)}{\phi} \quad (5)$$

$$v'_w = v_w - v \quad (6)$$

$$A_n = A_1 \times R_1 + A_2 \times R_2 + \dots \quad (7)$$

$$\text{PFT} = \frac{v'_w}{A_n} \quad (8)$$

式中: PFT (Paste film thickness) 为骨料表面的浆体膜层厚度; v 为湿颗粒堆积密实度对应的空隙比(单位体积内空隙体积与细骨料体积的比); v'_w 为富余胶砂体积比; A_n 为细骨料的平均比表面积; A_1 、 A_2 、 A_3 ... 分别为骨料 1、2、3... 的比表面积; R_1 、 R_2 、 R_3 分别是骨料 1、2、3... 的体积比。

2.3 间隙液黏度

UHPC 浆体中的减水剂去向分为两部分: 一部分吸附在颗粒表面; 另一部分残留在间隙液中, 残留在间隙液中的未吸附减水剂会导致间隙液黏度增加。因此增强减水剂吸附性可降低间隙液黏度, 从而实现对 UHPC 流变性能的调控。

减水剂在水泥基材料颗粒表面具有选择性吸附行为^[78], 导致浆体中的间隙液黏度存在较大差异。Sakai 等^[79]发现羧酸基减水剂在石灰石粉和黏土表面具有选择性吸附现象。Plank^[55]指出醚类减水剂优先吸附在硅灰表面。张倩倩等^[80]对比分析了羧酸基和膦酸基两种减水剂对低水胶比水泥-硅灰浆体流变性能的影响, 结果表明低间隙液黏度是羧酸基减水剂浆体工作性高于膦酸基减水剂浆体的主要原因; 并发现羧酸基减水剂对水泥的吸附能力较强, 而膦酸基减水剂对硅灰的分散能力更强。Adjoudj 等^[81]研究了石灰石粉、磨细高炉粒化矿渣和天然火山灰对 UHPC 砂浆流变性的影响, 并探讨了其与聚羧酸系高效减水剂的相互作用, 发现减水剂与石灰石粉和矿渣的相互作用较

火山灰更为明显。

根据文献综述发现矿物掺合料对减水剂的吸附性能也会对 UHPC 流变特性造成影响。譬如, 一定掺量的偏高岭土会大幅提高 UHPC 浆体的屈服应力与黏度^[4]。郑晓博等^[32]研究了相同流动度下偏高岭土对新拌 UHPC 净浆和砂浆流变性能和静置状态下纤维分布的影响规律, 发现随着偏高岭土掺量从 5% 增至 10%, UHPC 浆体的表观黏度逐渐增加; 并且偏高岭土可以通过提升 UHPC 浆体的结构重建速率来改善纤维分散性能, 尤其在坍落度为(245±5) mm 下, 弛豫指数提升 15.9%, 纤维分散系数增大 377.4%, 纤维取向系数增大 27.9%。Vance 等^[82]研究发现当偏高岭土的掺量从 0 增至 10% 时, 浆体屈服应力增加 1.75 倍, 塑性黏度增加 1.00 倍。这归因于偏高岭土表面电荷效应会与水泥颗粒发生相互作用, 增强颗粒间团聚, 从而进一步提高絮凝效率, 有效促进浆体的结构重建^[32]。但随着减水剂用量的增加, 减水剂对偏高岭土的包覆使得颗粒间距增大, 颗粒表面吸附层厚度增加, 虽然这有助于颗粒分散, 但会削弱偏高岭土颗粒自身的电荷效应, 从而阻碍浆体内部结构的形成与重建。

综上所述, 在 UHPC 中掺入适量的高效减水剂有助于实现其高流动性, 并改善体系中颗粒的分散性能。除高效减水剂外, 还可使用其他类型的化学外加剂, 如降黏剂, 以改善 UHPC 的流变性能。

2.4 黏度调节外加剂

除减水剂外, 调节 UHPC 黏度的化学外加剂还包括降黏剂, 它通过改变新拌 UHPC 的屈服应力和塑性黏度来影响其流变性。降黏剂在 UHPC 中发挥着降低黏度、增大流动性的作用, 通常包括醚类和酯类。降黏剂有着更为丰富的支链结构和更加优异的吸附性能, 这使得聚合物在水泥颗粒表面上的吸附层厚度增加, 能够明显降低其塑性黏度^[21]。随着掺量的增加, 水泥浆体的密实度增大, 释放出大量水分, 使得水泥颗粒表面水膜层厚度增加, 流动度增大。沈锐^[21]将降黏剂与消泡剂复掺加入 UHPC 中, 起到了很好的降黏效果, 黏度降低率最大达 42.9%。许斌等^[83]为制备满足铁路钢桥面铺装性能要求的 UHPC, 通过掺入降黏剂以改善其流变性能。掺降黏剂的 UHPC 屈服应力接近 100 Pa, 塑性黏度约为 70 Pa·s, 有效提升了泵送施工性能, 同时发现 UHPC 力学性能不受降黏剂的影响。此外, 目前有部分学者在普通聚羧酸减水剂的基础上通过调整其分子结构与合成

技术, 研发出了降黏型聚羧酸系减水剂^[34,84], 可以更好地将体系中被包裹的自由水释放出来以达到降黏和减水的双重效果。

2.5 纤维特性

基于两相复合材料模型, 新拌 UHPC 浆体可视为由含纤维的固相颗粒组成的悬浮液, 纤维掺量、种类、长径比等都会直接影响新拌 UHPC 的流变性能。

2.5.1 纤维掺量 根据研究表明, 纤维掺量越高, UHPC 的屈服应力和塑性黏度也越大。张倩倩等^[85]发现, 纤维掺量从 0 增加至 1% 和 3%, UHPC 的屈服应力分别增加 48.5% 和 133.0%, 塑性黏度分别增加 39.4% 和 82.3%。Yu 等^[86]研究表明, 随着钢纤维的掺入, UHPC 的相对坍落度流动性呈线性下降, 尤其当钢纤维掺量从 0.5% 增至 2.5% 时, 其相对坍落度从 4.29 急剧下降到 1.10。Wu 等^[26]发现未掺入纤维的 UHPC 基体屈服应力范围在 34~41 Pa, 黏度为 30~33 Pa·s。而 2% 钢纤维的加入进一步将屈服应力和黏度分别提高至 70~80 Pa·s 和 48~85 Pa·s。这是由于流变性能与浆体中固体颗粒浓度和水膜层厚度密切相关。一方面, 与骨料相比, 钢纤维更长, 在相同体积下比表面积更大, 从而增加了纤维与基体之间的粘结力^[86]。另一方面, 纤维掺量增加后,

纤维会在拌合物中交叉搭接形成骨架结构, 固体颗粒浓度增大, 包裹颗粒的水分减少, WFT 降低, 颗粒间摩擦作用力增强, 导致新拌 UHPC 流动阻力增大, 进而增大了其屈服应力和塑性黏度^[87], 使得流动度减小。

优异的纤维分散性是发挥其对 UHPC 增强增韧作用的关键, 而流变性能被认为是影响纤维分布和取向的重要因素^[88]。UHPC 基体流变性、纤维取向和分散及力学性能三者之间存在强相关性, 其三者的关系如表 7 所示。Meng 等^[89]认为合适的塑性黏度有利于提高纤维的取向性, 取向良好且分散均匀的纤维更容易桥接裂纹, 从而提高 UHPC 的拉伸和抗弯性能; Wang 等^[16]的研究表明, 纤维沿深度的分布主要取决于新拌 UHPC 的流变参数, 尤其是屈服应力, 适当的流变参数有利于钢纤维在 UHPC 中均匀分布; 对于纤维体积分数为 1%、2% 和 3% 的 UHPC 拌合物, 最佳屈服应力范围分别为 900~1 000、700~900 Pa 和 400~800 Pa。张倩倩等^[85]通过掺入 6% 和 12% 的降黏掺合料降低了 UHPC 的屈服应力和塑性黏度, 发现纤维有效利用率分别提高了 3.0% 和 10.5%, 纤维沿轴向取向系数分别增加了 6.4% 和 8.6%; 并发现 UHPC 中纤维团聚现象减少, 纤维分散效果好。

表 7 UHPC 流变性能与纤维分散及取向研究

Table 7 Research on relationship between rheological properties and fiber dispersion and orientation of UHPC

References	Mixture	Fiber content, length, and diameter	Yield stress/Pa	Plastic viscosity/Pa·s	Effect
Zhang et al. ^[85]	UHPC (w/b ratio=0.17)	$\phi_f=1\%$ $\phi_v=6\%$	12.1%↓	18.5%↓	Fiber efficiency=3.0%↑ Fiber axial orientation factor=6.4%↑
	UHPC (s/b ratio =0.90)	$\phi_f=1\%$ $\phi_v=12\%$	17.2%↓	45.0%↓	Fiber efficiency=10.5%↑ Fiber axial orientation factor=8.6%↑
Wang ^[16]	UHPC (w/b ratio =0.18, 0.20, 0.22, 0.24)	$\phi_f=1\%$	900~1 000		Optimal rheological property was obtained, and steel fiber was evenly distributed.
		$\phi_f=2\%$	700~900		
		$\phi_f=3\%$	400~800		
Teng et al. ^[17]	UHPC (w/b ratio =0.20)	$l_f=13\text{ mm}$ $d_f=0.2\text{ mm}$ $\phi_f=1\%$		36.0	Optimal flexural strength of UHPC is 17 MPa.
		$\phi_f=2\%$		52.0	Optimal flexural strength of UHPC is 21 MPa.
		$\phi_f=3\%$		66.0	Optimal flexural strength of UHPC is 27 MPa.
Meng and Khayat ^[89]	UHPC (w/b ratio =0.23)	$l_f=13\text{ mm}$ $d_f=0.2\text{ mm}$ $\phi_f=2\%$		53.0	Steel fiber was evenly distributed, and the optimal flexural strength of UHPC is 35 MPa.
Li et al. ^[90]	UHPC (w/b ratio =0.22)	$l_f=13\text{ mm}$ $d_f=0.2\text{ mm}$ $\phi_f=2\%$	845.6	13.1	1.00% SP
					Fiber partition coefficient=0.97
					1.20% SP
					Fiber partition coefficient=0.82
					1.40% SP
					Fiber partition coefficient=0.61
					1.60% SP
					Fiber partition coefficient=0.50

Note: V_v means content of viscosity-reducing admixture.

2.5.2 纤维种类 UHPC 中常用的纤维根据弹性模量的不同分为刚性纤维和柔性纤维两类。由于二者弹性模量的差异及在纤维拉伸、弯曲和扭转时扭矩常数的不同,使得对 UHPC 流变性能的影响亦有区别^[25],对比如表 8 所示。常见的刚性纤维形状包括直纤维、端钩纤维和波纹纤维^[91],纤维末端的钩状与波纹形能很好地改善纤维与 UHPC 基体之间的锚固力,同时二者与骨料之间的摩擦均比直端钢纤维的摩擦力大^[86]。研究表明,在掺刚性纤维的 UHPC 浆体中,可能存在临界掺量,其流变参数随着掺量的增加先减小后增大;这是由于在流体动力与力矩作用下,刚性纤维在低于临界掺量时发生定向流动并打破浆体内部的絮凝结构,自由水释放,使得流动性增大;在高于临界掺量时则会相互搭接形成网状结构,减小流动性。而在掺柔性纤维的 UHPC 浆体中,如聚丙烯或聚乙烯纤维^[92],则主要通过纤维的变形与周期性旋转,发生缠绕并成团,进一步阻止了颗粒的流动^[93],增加了黏度^[85]。掺柔性纤维浆体的搅拌时间也会影响 UHPC 新拌性能,搅拌时间越长,纤维在其内部分散越均匀^[49]。

2.5.3 纤维混杂 研究表明,新拌 UHPC 的屈服应力和塑性黏度随纤维长度与长径比的增加而增大^[25]。其流变特性与 WFT 有关^[46],纤维长径比和长度较大的纤维比表面积更大,更容易吸收悬浮液中的自由水,导致包裹颗粒的水减少,WFT 减小,颗粒间摩擦作用力增强,从而使 UHPC 浆体发生流动所需克服的阻力增大,流动性减小。

长短纤维搭配能降低 UHPC 的黏度。Yu 等^[94]发现,不同种类钢纤维搭配会提高活性粉末混凝土(RPC)的流动性和力学性能。高育欣等^[95]用 6 mm 较短钢纤维部分替代 13 mm 和 19 mm 长纤维,发现其替代比例小于 0.75 时,随着短纤维的加入,UHPC 黏度降低;超过 0.75 后,长短钢纤维的“边壁效应”对流动度的贡献作用降低。根据 Boulekbache^[96]的研究,流动的 UHPC 浆体对钢纤维取向有着重要影响,流体对纤维施加流体动力,钢纤维可能会沿垂直于浆体流动的方向旋转并重新定向,如图 3 所示。掺入长纤维后,短纤维将被当作长纤维的边界,阻碍长纤维的旋转,以促进浆体流动;同理,长纤维也能阻碍短纤维的旋转。因此,长短纤维混掺,可

表 8 纤维品种对 UHPC 流变性能影响
Table 8 Effect of fiber type on rheological properties of UHPC

Fiber	Elastic modulus	Fiber category	Effect
Rigid fiber	$>E_{\text{matrix}}$	Hooked fiber, straight fiber, and wavy fiber ^[91]	There may be an optimal content, and its rheological parameters first decrease and then increase with the increase in fiber volumes.
Flexible fiber	$<E_{\text{matrix}}$	PVA, PPF, and PE ^[92]	Rheological parameters increase with the increase in fiber volumes.

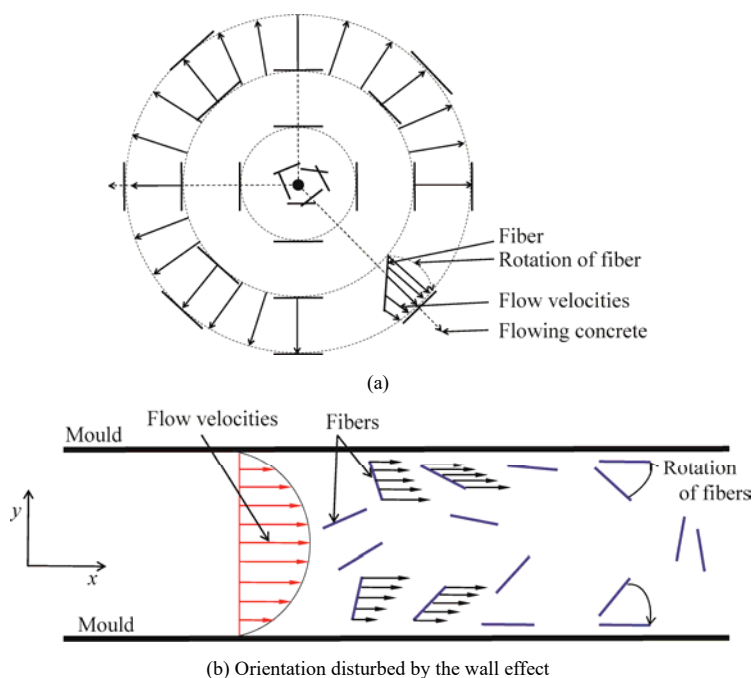


图 3 纤维混掺“边壁效应”^[96]
Fig. 3 Wall effect of fiber hybridization^[96]

以提高 UHPC 的流动性。此外,有学者将宏观纤维与微纤维混杂,譬如 Cao 等^[97]将 PVA 纤维、钢纤维和 CaCO_3 晶须混杂评估了水泥砂浆的流变性和力学性能。随着钢纤维体积分数的降低及 PVA 纤维和 CaCO_3 晶须含量的增加,水泥砂浆的屈服应力增大,这主要是由于 PVA 纤维的亲水性和 CaCO_3 晶须的高比表面积所致。此种混杂纤维砂浆及混凝土表现出良好的力学强度和弯曲韧性,能更有效地抵抗多尺裂缝的扩展。

3 结束语

本文首先阐述了 UHPC 的流变特性,基于水胶比、外加剂、矿物掺合料、纤维及骨料特性等因素对 UHPC 流变性能的影响规律,总结分析了 UHPC 流变调控技术及调控机理研究进展。基于本文的分析与讨论,可得出以下结论。

1) 大多数新拌 UHPC 表现出典型的剪切增稠特性,具有明显的非线性流体特征,但含粗骨料新拌 UHPC 呈剪切变稀行为。普通混凝土常用的 Bingham 模型不能准确表征其流变特性,采用 Herschel-Bulkley 模型或改进 Bingham 模型更为适宜。

2) 影响 UHPC 流变性能的主要因素包括水胶比、外加剂、矿物掺合料、纤维和骨料特性等,其影响机理可划分为物理作用机理与化学作用机理。从材料组分上看,物理作用机理主要包括颗粒形貌、紧密堆积、水膜厚度、纤维材料及尺寸、滚珠效应,化学作用机理主要包括减水剂静电及空间位阻分散作用、外加剂分子结构不同而引起的间隙液黏度差异等。

3) 在调控 UHPC 体系流变行为层面,水膜层厚度反映了颗粒堆积密度和颗粒总比表面的共同作用,水膜层厚度的增大还是减小,取决于上述两个作用哪个更为显著。但 WFT 是在采用颗粒充分分散时理想状态下的水膜层厚度值,这是由于 UHPC 中微细颗粒含量多,内部颗粒之间易相互吸引而絮凝成团,使得颗粒在浆体中的实际比表面积与理论值有所差异,导致颗粒表面水膜层厚度值不均匀。因此如何改善微细颗粒的分散,是有效降低 UHPC 黏度并使 WFT 更接近理论值的一个关键问题。

4) 浆膜层厚度与骨料比表面积成负相关,降低骨料比表面积,优化骨料级配,以增大 PFT,可以提高 UHPC 浆体的流动性。减水剂在水泥基材料颗粒表面具有选择性吸附行为,增强减水剂的吸附性能可降低间隙液黏度。可考虑掺入不同分子结构的

高效减水剂,从而实现对不同矿物掺合料表面吸附的优化作用。

5) UHPC 的流变性能、纤维分散性能、力学性能三者密切相关,如何通过不同形式(种类、掺量比例)的纤维混杂如长短纤维混杂、宏观纤维与微纤维混杂等调控 UHPC 的黏度,提高 UHPC 匀质性,使纤维分散更均匀、纤维有效利用率更高,进而改善 UHPC 的力学强度和弯曲韧性,此方面还有很多问题值得研究。

参考文献:

- [1] WANG D H, SHI C J, WU Z M, et al. A review on ultra high performance concrete: part II. Hydration, microstructure and properties[J]. Constr Build Mater, 2015, 96: 368–377.
- [2] TAFRAOUI A, ESCADEILLAS G, VIDAL T. Durability of the ultra high performances concrete containing metakaolin[J]. Constr Build Mater, 2016, 112: 980–987.
- [3] MENG W N, VALIPOUR M, KHAYAT K H. Optimization and performance of cost-effective ultra-high performance concrete[J]. Mater Struct, 2017, 50(1): 29.
- [4] 杨吴生, 黄政宇. 新拌活性粉末混凝土流变性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2004, 23(2): 28–31.
YANG Wusheng, HUANG Zhengyu. Bull Chin Ceram Soc(in Chinese), 2004, 23(2): 28–31.
- [5] YOO D Y, YOON Y S. A review on structural behavior, design, and application of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete[J]. Int J Concr Struct Mater, 2016, 10(2): 125–142.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] YU R, ZHOU F J, YIN T Y, et al. Uncovering the approach to develop ultra-high performance concrete (UHPC) with dense meso-structure based on rheological point of view: experiments and modeling[J]. Constr Build Mater, 2021, 271: 121500.
- [9] HUANG H H, GAO X J, JIA D. Effects of rheological performance, antifoaming admixture, and mixing procedure on air bubbles and strength of UHPC[J]. J Mater Civ Eng, 2019, 31(4).
- [10] DILS J, BOEL V, DE SCHUTTER G. 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] DILS J, BOEL V, SCHUTTER G. Vacuum mixing technology to improve the mechanical properties of ultra-high performance concrete[J]. Mater Struct, 2015, 48(11): 3485–3501.
- [12] 白刚, 王里, 王芳, 等. 3D打印UHPC的制备和力学性能试验研究[J]. 材料导报, 2021, 35(12): 12063–12069.
BAI Gang, WANG Li, WANG Fang, et al. Mater Rev(in Chinese), 2021, 35(12): 12063–12069.
- [13] OZOLINS E, ZAVICKIS J, LUKASENOKS A, et al. Compressive strength and rheology dependency on micro silica dosage in ultra-high-performance concrete[A]/20th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development[C]. Jelgava, Latvia,

- 2021: 483–492.
- [14] WANG R, GAO X J, ZHANG J Y, et al. Spatial distribution of steel fibers and air bubbles in UHPC cylinder determined by X-ray CT method[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 160: 39–47.
 - [15] CAI Y X, LIU Q F, YU L W, et al. An experimental and numerical investigation of coarse aggregate settlement in fresh concrete under vibration[J]. *Cem Concr Compos*, 2021, 122: 104153.
 - [16] WANG R, GAO X J, HUANG H H, et al. Influence of rheological properties of cement mortar on steel fiber distribution in UHPC[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 144: 65–73.
 - [17] ABBAS S, SOLIMAN A M, NEHDI M L. Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages[J]. *Constr Build Mater*, 2015, 75: 429–441.
 - [18] RAGALWAR K A, NGUYEN H, RANADE R, et al. Influence of Distribution Modulus of Particle Size Distribution on Rheological and Mechanical Properties of Ultra-High-Strength SHCC Matrix[A]//4th International RILEM Conference on Strain-Hardening Cement-Based Composites (SHCC)[C]. *Tech Univ Dresden, Dresden, Germany*, 2018: 221–229.
 - [19] ARORA A, AGUAYO M, HANSEN H, et al. Microstructural packing- and rheology-based binder selection and characterization for Ultra-high Performance Concrete (UHPC)[J]. *Cem Concr Res*, 2018, 103: 179–190.
 - [20] BAUMERT C, GARRECHT H. Minimization of the influence of shear-induced particle migration in determining the rheological characteristics of self-compacting mortars and concretes[J]. *Materials*, 2020, 13(7): 1542.
 - [21] 沈锐. 降低UHPC拌合物粘度的技术措施[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
SHEN Rui. Technical measures to reduce viscosity of UHPC mixture(in Chinese, dissertation). *Chongqing: Chongqing University*, 2018.
 - [22] 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): 22054–22057.
ZHANG Q Q, LIU J Z, ZHANG L H, et al. *Mater Rep(in Chinese)*, 2020, 34(22): 22054–22057.
 - [23] 李珂珂, 李龙, 何友林, 等. 超高性能混凝土流变特性及其调控研究[J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(5): 1570–1577.
LI Keke, LI Long, HE Youlin, et al. *Bull Chin Ceram Soc(in Chinese)*, 2022, 41(5): 1570–1577.
 - [24] 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.
 - [25] 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能研究进展[J]. *材料导报*, 2019, 33(5): 819–825.
SI Wen, CAO Mingli, FENG Jiaqi. *Mater Rev(in Chinese)*, 2019, 33(5): 819–825.
 - [26] WU Z M, KHAYAT K, SHI C. Changes in rheology and mechanical properties of ultra-high performance concrete with silica fume content[J]. *Cem Concr Res*, 2019, 123: 105786.
 - [27] FEYS D, KHAYAT K H, PEREZ-SCHELL A, et al. Prediction of pumping pressure by means of new tribometer for highly-workable concrete[J]. *Cem Concr Compos*, 2015, 57: 102–115.
 - [28] 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.
 - [29] NEHDI M, RAHMAN M A. Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction[J]. *Cem Concr Res*, 2004, 34(11): 1993–2007.
 - [30] YAHIA A, KHAYAT K H. Analytical models for estimating yield stress of high-performance pseudoplastic grout[J]. *Cem Concr Res*, 2001, 31(5): 731–738.
 - [31] YAHIA A, KHAYAT K H. Applicability of rheological models to high-performance grouts containing supplementary cementitious materials and viscosity enhancing admixture[J]. *Mat Struct*, 2003, 36(6): 402–412.
 - [32] 郑晓博, 韩方玉, 刘建忠, 等. 偏高岭土对超高性能混凝土流变及纤维分布的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(11): 2375–2383.
ZHENG Xiaobo, HAN Fangyu, LIU Jianzhong, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2021, 49(11): 2375–2383.
 - [33] 郑晓博, 韩方玉, 刘建忠, 等. 粗骨料超高性能混凝土流变与稳定性[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(11): 2844–2854.
ZHENG Xiaobo, HAN Fangyu, LIU Jianzhong, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2022, 50(11): 2844–2854.
 - [34] 白静静, 王敏, 史才军, 等. 降粘性聚羧酸减水剂的设计合成及在低水胶比水泥-硅灰体系中的作用[J]. *材料导报*, 2020, 34(6): 6172–6179.
BAI Jingjing, WANG Min, SHI Caijun, et al. *Mater Rev(in Chinese)*, 2020, 34(6): 6172–6179.
 - [35] Yalcinkaya C, Felekoglu B, Yazici H. Influence of aggregate volume on the shrinkage, rheological and mechanical properties of ultra-high performance concrete[J]. *J Fac Eng Archit Gaz*, 2020, 35(4): 1701–1718.
 - [36] ZHU J, LIU J P, KHAYAT K H, et al. Mechanisms affecting viscosity of cement paste made with microfines of manufactured sand[J]. *Cem Concr Res*, 2022, 156: 106757.
 - [37] XIONG X, WU M M, SHEN W G, et al. Performance and microstructure of ultra-high-performance concrete (UHPC) with silica fume replaced by inert mineral powders[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 327: 126996.
 - [38] LIN Y Z, YAN J C, WANG Z F, et al. Effect of silica fumes on fluidity of UHPC: experiments, influence mechanism and evaluation methods[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 210: 451–460.
 - [39] SUN H, QUE Z C, WEI H N, et al. Tuning matrix rheology and mechanical performance of ultra-high performance concrete using cellulose nanofibers[J]. *Nanotechnol Rev*, 2022, 11(1): 1570–1582.
 - [40] ABDELRAZIK A T, KHAYAT K H. Effect of fiber characteristics on fresh properties of fiber-reinforced concrete with adapted rheology[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 230: 116852.
 - [41] MENG W N, KHAYAT K H. Effect of graphite nanoplatelets and carbon nanofibers on rheology, hydration, shrinkage, mechanical properties, and microstructure of UHPC[J]. *Cem Concr Res*, 2018, 105: 64–71.
 - [42] LIU J H, KHAYAT K H, SHI C J. Effect of superabsorbent polymer characteristics on rheology of ultra-high performance concrete[J]. *Cem Concr Compos*, 2020, 112: 103636.
 - [43] RAGALWAR K, HEARD W F, WILLIAMS B A, et al. Significance of the particle size distribution modulus for strain-hardening-ultra-high performance concrete (SH-UHPC) matrix design[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 234: 117423.

- [44] 汪玺玥. 超高性能水泥基材料流变行为及机理研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
WANG Xiyue. Study on rheological behavior and mechanism of ultra-high performance cement-based materials(in Chinese, dissertation). Nanjing: Southeast University, 2020.
- [45] 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.
- [46] 黄静, 季文玉, 阎培渝. UHPC浆体的工作性和流变性与颗粒膜层厚度的关系[J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(3): 766–776.
HUANG Jing, JI Wenyu, YAN Peiyu. *Bull Chin Ceram Soc*(in Chinese), 2022, 41(3): 766–776.
- [47] 贾迪. 超高性能混凝土搅拌引入气泡控制及其对强度的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
JIA Di. Control of bubbles in ultra-high performance concrete mixing and its influence on strength(in Chinese, dissertation). Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [48] 赵碧华, 刘永胜, 何松华, 等. 玄武岩纤维参数对水泥砂浆流动性的影响[J]. *武汉理工大学学报*, 2009, 31(7): 5–8.
ZHAO Bihua, LIU Yongsheng, HE Songhua, et al. *J Wuhan Univ Technol*(in Chinese), 2009, 31(7): 5–8.
- [49] 曹明莉, 许玲, 李志文. 聚乙烯醇纤维及钢纤维增强水泥砂浆流变性和流动性能[J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(1): 112–117.
CAO Mingli, XU Ling, LI Zhiwen. *J Build Mater*(in Chinese), 2017, 20(1): 112–117.
- [50] YAMADA K. Basics of analytical methods used for the investigation of interaction mechanism between cements and superplasticizers[J]. *Cem Concr Res*, 2011, 41(7): 793–798.
- [51] Gelardi G, Flatt R J. 11 - Working mechanisms of water reducers and superplasticizers[A]//Aitcin P-C, Flatt R J, ed. *Science and Technology of Concrete Admixtures*[M]. Woodhead Publishing, 2016: 257–278.
- [52] SADRMOHTAZI A, TAJASOSI S, TAHMOURESI B. Effect of materials proportion on rheology and mechanical strength and microstructure of ultra-high performance concrete (UHPC)[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 187: 1103–1112.
- [53] 刘腾生, 赵加豪. 萘系与聚羧酸系高效减水剂流变性能对比研究[J]. *江西建材*, 2020(6): 19–20.
LIU T S, ZHAO J H. *Jiangxi Build Mater*(in Chinese), 2020(6): 19–20.
- [54] 刘沙沙. 水泥砂浆流变性能测试方法及外加剂对流变性能影响的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
LIU Shasha. Study on testing method of rheological properties of cement mortar and influence of additives on rheological properties(in Chinese, dissertation). Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [55] SCHRÖFL C, GRUBER M, PLANK J. Preferential adsorption of polycarboxylate superplasticizers on cement and silica fume in ultra-high performance concrete (UHPC)[J]. *Cem Concr Res*, 2012, 42(11): 1401–1408.
- [56] PLANK J, SCHROEFL C, GRUBER M, et al. Effectiveness of polycarboxylate superplasticizers in ultra-high strength concrete: the importance of PCE compatibility with silica fume[J]. *J Adv Concr Technol*, 2009, 7(1): 5–12.
- [57] PLANK J, SACHSENHAUSER B, DE REESE J. Experimental determination of the thermodynamic parameters affecting the adsorption behaviour and dispersion effectiveness of PCE superplasticizers[J]. *Cem Concr Res*, 2010, 40(5): 699–709.
- [58] ANDERSEN P J, ROY D M, GAIDIS J M. The effect of superplasticizer molecular weight on its adsorption on, and dispersion of, cement[J]. *Cem Concr Res*, 1988, 18(6): 980–986.
- [59] UCHIKAWA H, HANEHARA S, SHIRASAKA T, et al. Effect of admixture on hydration of cement, adsorptive behavior of admixture and fluidity and setting of fresh cement paste[J]. *Cem Concr Res*, 1992, 22(6): 1115–1129.
- [60] FELEKOĞLU B, TOSUN K, BARADAN B. Compatibility of a polycarboxylate-based superplasticiser with different set-controlling admixtures[J]. *Constr Build Mater*, 2011, 25(3): 1466–1473.
- [61] 姜哲, 刘建忠, 刘加平. 低水胶比下矿物掺合料对净浆流动性与流变性能的影响[J]. *混凝土*, 2011(5): 67–69.
JIANG Zhe, LIU Jianzhong, LIU Jiaping. *Concrete*(in Chinese), 2011(5): 67–69.
- [62] ZHAO M, ZHANG X, ZHANG Y J. Effect of free water on the flowability of cement paste with chemical or mineral admixtures[J]. *Constr Build Mater*, 2016, 111: 571–579.
- [63] PYO S, KIM H K. Fresh and hardened properties of ultra-high performance concrete incorporating coal bottom ash and slag powder[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 131: 459–466.
- [64] LONG G, WANG X Y, XIAO R, et al. The influences of ultra-fine powders on the compatibility of cement and superplasticiser with very low water/binder ratio[J]. *Adv Cem Res*, 2003, 15(1): 17–21.
- [65] WANG Q, WANG D Q, CHEN H H. The role of fly ash microsphere in the microstructure and macroscopic properties of high-strength concrete[J]. *Cem Concr Compos*, 2017, 83: 125–137.
- [66] 曹润俦, 周茗如, 周群, 等. 超细粉煤灰对超高性能混凝土流变性、力学性能及微观结构的影响[J]. *材料导报*, 2019, 33(16): 2684–2689.
CAO Runzhuo, ZHOU Mingru, ZHOU Qun, et al. *Mater Rev*(in Chinese), 2019, 33(16): 2684–2689.
- [67] 刘宇, 黎梦圆, 阎培渝. 矿物掺合料对胶凝材料浆体流变性能和触变性的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2019, 47(5): 594–601.
LIU Yu, LI Mengyuan, YAN Peiyu. *J Chin Ceram Soc*, 2019, 47(5): 594–601.
- [68] VIKAN H, JUSTNES H. Rheology of cementitious paste with silica fume or limestone[J]. *Cem Concr Res*, 2007, 37(11): 1512–1517.
- [69] 刘珍, 王武峰, 余睿, 等. 基于黏度区间优选与颗粒紧密堆积理论协同作用的高密度UHPC材料研究[J]. *混凝土*, 2020(1): 11–14.
LIU Zhen, WANG Wufeng, YU Rui, et al. *Concrete*(in Chinese), 2020(1): 11–14.
- [70] BAHRAMI N, ZOHRAHI M, ALI MAHMOUDY S, et al. Optimum recycled concrete aggregate and micro-silica content in self-compacting concrete: Rheological, mechanical and microstructural properties[J]. *J Build Eng*, 2020, 31: 101361.
- [71] Yan H E, Zhang X, Zhang Y, et al. Effect of Remnant Carbon on Rheological Properties of Cement Paste with FDN Superplasticizer Added[J]. *J Build Mater*, 2014, 17(3): 507–510, 525.
- [72] CHANDARA C, SAKAI E, AZIZLI K A M, et al. The effect of unburned carbon in palm oil fuel ash on fluidity of cement pastes containing superplasticizer[J]. *Constr Build Mater*, 2010, 24(9): 1590–1593.
- [73] CHOI M S, KIM Y J, KWON S H. Prediction on pipe flow of pumped concrete based on shear-induced particle migration[J]. *Cem Concr Res*, 2013, 52: 216–224.
- [74] 郭向勇, 方坤河, 郭建平. 超高强混凝土的强度和流动性的影响因素研究[J]. *青海大学学报(自然科学版)*, 2003, 21(3): 23–27.
GUO Xiangyong, FANG Kunhe, GUO Jianping. *J Qinghai Univ Nat*

- Sci(in Chinese), 2003, 21(3): 23–27.
- [75] KHAYAT K H, MENG W N, VALLURUPALLI K, et al. Rheological properties of ultra-high-performance concrete—an overview[J]. *Cem Concr Res*, 2019, 124: 105828.
- [76] WENG Y W, LI M Y, TAN M J, et al. Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 163: 600–610.
- [77] 焦登武, 安晓鹏, 史才军, 等. 骨料裹浆厚度对混凝土流变性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2017, 45(9): 1360–1366.
- JIAO Dengwu, AN Xiaopeng, SHI Caijun, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2017, 45(9): 1360–1366.
- [78] YOSHIOKA K, TAZAWA E I, KAWAI K J, et al. Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals[J]. *Cem Concr Res*, 2002, 32(10): 1507–1513.
- [79] Nikola Mikanovic, Jeff Sharman, Carmel jolicoeur, et al. Compatibility of viscosity-enhancing agents and superplasticizers in cementitious and model systems: rheology, bleeding, and segregation[A]//9th International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete[C]. Seville, Spain, 2009: 67–85.
- [80] 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.
- [81] ADJOUDJ M, EZZIANE K, KADRI E H, et al. Evaluation of rheological parameters of mortar containing various amounts of mineral addition with polycarboxylate superplasticizer[J]. *Constr Build Mater*, 2014, 70: 549–559.
- [82] VANCE K, KUMAR A, SANT G, et al. The rheological properties of ternary binders containing Portland cement, limestone, and metakaolin or fly ash[J]. *Cem Concr Res*, 2013, 52: 196–207.
- [83] 许斌, 童欢, 陈露一. 浩吉铁路洞庭湖大桥钢桥面铺装UHPC性能研究及应用[J]. *世界桥梁*, 2022, 50(3): 87–93.
- XU Bin, TONG Huan, CHEN Luyi. *World Bridge*(in Chinese), 2022, 50(3): 87–93.
- [84] 陈景, 杨长辉, 高育欣, 等. 微交联降粘型聚羧酸减水剂的合成及其在低水胶比体系中的作用[J]. *材料导报*, 2022, 36(9): 215–222.
- CHEN Jing, YANG Changhui, GAO Yuxin, et al. *Mater Rev*(in Chinese), 2022, 36(9): 215–222.
- [85] 张倩倩, 刘建忠, 周华新, 等. 超高性能混凝土流变特性及其对纤维分散性的影响[J]. *材料导报*, 2017, 31(23): 73–77.
- ZHANG Qianqian, LIU Jianzhong, ZHOU Huaxin, et al. *Mater Rev*(in Chinese), 2017, 31(23): 73–77.
- [86] YU R, SPIESZ P, BROUWERS H J H. Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC)[J]. *Cem Concr Res*, 2014, 56: 29–39.
- [87] MARTINIE L, ROSSI P, ROUSSEL N. Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction[J]. *Cem Concr Res*, 2010, 40(2): 226–234.
- [88] 王睿. 基于纤维分布的UHPC制备及其渗透性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- WANG Rui. Preparation and permeability of UHPC based on fiber distribution(in Chinese, dissertation). Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [89] MENG W N, 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.
- [90] LI Z G, ZHANG H, WANG R. Influence of steel fiber distribution on splitting damage and transport properties of ultra-high performance concrete[J]. *Cem Concr Compos*, 2022, 126: 104373.
- [91] WU Z M, SHI C J, HE W, et al. Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2016, 103: 8–14.
- [92] SULTANGALIYEVA F, CARRÉ H, LA BORDERIE C, et al. Influence of flexible fibers on the yield stress of fresh cement pastes and mortars[J]. *Cem Concr Res*, 2020, 138: 106221.
- [93] YAMANOI M, MAIA J M. Analysis of rheological properties of fibre suspensions in a Newtonian fluid by direct fibre simulation. Part1: rigid fibre suspensions[J]. *J Non Newton Fluid Mech*, 2010, 165(19–20): 1055–1063.
- [94] YU R, SPIESZ P, BROUWERS H J H. Static properties and impact resistance of a green Ultra-High Performance Hybrid Fibre Reinforced Concrete (UHPHFRC): experiments and modeling[J]. *Constr Build Mater*, 2014, 68: 158–171.
- [95] 高育欣, 沈锐, 程宝军, 等. 钢纤维搭配对超高性能混凝土拌合物性能的影响[J]. *混凝土与水泥制品*, 2019(1): 55–60.
- GAO Yuxin, SHEN Rui, CHENG Baojun, et al. *China Concr Cem Prod*(in Chinese), 2019(1): 55–60.
- [96] BOULEKBACHE B, HAMRAT M, CHEMROUK M, et al. Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material[J]. *Constr Build Mater*, 2010, 24(9): 1664–1671.
- [97] CAO M L, XU L, ZHANG C. Rheological and mechanical properties of hybrid fiber reinforced cement mortar[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 171: 736–742.