

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.044



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 水泥浆液的絮凝结构和流变性能及其影响因素

刘长岐<sup>1</sup>, 刘浩杰<sup>2</sup>, 苏雷<sup>3</sup>, 白继文<sup>4</sup>, 刘立冬<sup>3</sup>, 田嘉伟<sup>2</sup>

(1. 中国-上海合作组织地方经贸合作示范区管理委员会, 山东青岛 266300; 2. 山东省工业技术研究院, 济南 250101; 3. 中铁三局集团有限公司, 太原 030001; 4. 山东大学土建与水利学院, 济南 250061)

**摘要:** 水泥浆液的流变特性是地质灾害治理中注浆参数设计的重要依据。水泥悬浮液流变性能受多因素影响,但其影响机制尚不清晰。从浆液中颗粒粒径分布对流变性能的影响进行分析,利用聚焦光束反射率测量系统等不同水灰比、水泥细度和剪切速率条件下水泥浆液中的絮凝颗粒弦粒径、颗粒数量进行研究,并测试相同条件下的浆液流变性,分析浆液絮凝颗粒对浆液流变性能的影响。结果表明,随着水泥细度、水灰比和剪切速率的增加,浆液中絮凝颗粒数量增加,弦粒径减小,三者影响机制不同;颗粒絮凝程度随水泥水化时间增加;浆液屈服应力和塑形黏度随水灰比增加而减小,随水泥细度增加而增加;浆液表观黏度随着剪切速率提高而减小,且呈可逆变化。絮凝结构变化和流变性能变化具有一致性,水灰比、水泥细度和剪切速率通过影响絮凝结构从而影响浆液流变特性。

**关键词:** 地质灾害治理; 水泥浆液; 絮凝结构; 颗粒分布; 流变性能; 表观黏度

**中图分类号:** TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-13

## Flocculent structure and rheological properties of cement slurry and its influence factors

LIU Changqi<sup>1</sup>, LIU Haojie<sup>2</sup>, SU Lei<sup>3</sup>, BAI Jiwen<sup>4</sup>, LIU Lidong<sup>3</sup>, TIAN Jiawei<sup>2</sup>

(1. China-Sco Local Economic and Trade Cooperation Demonstration Area, Qingdao 266300, China; 2. Shandong Research Institute of Industrial Technology, Jinan 250101, China; 3. China Railway No.3 Engineering Group Co., Ltd., Taiyuan 030001, China; 4. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** The rheological properties are important basis for the design of grouting parameters in geological disaster management. Rheological property of cement suspension is affected by many factors, and its mechanism is uncharted. In this study, the influence of particle size distribution on rheological property is analyzed. The focused beam reflectivity measurement system was used to measure the chord size and number of flocculated particles under different water-cement ratio, cement fineness and shear rate, and the rheological properties of slurry under the same conditions were measured. The effects of particle size distribution on rheological properties were analyzed. The results show that with the increase of water-cement ratio, cement fineness and shear rate, the chord size of flocculated particles decreases and the number of particles increases.

**收稿日期:** 2025-01-23

**基金项目:** 国家自然科学基金(52378352); 山东省自然科学基金(ZR2024QE048)

**作者简介:** 刘长岐(1974-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事地质灾害防灾减灾研究, E-mail: 1619742308@qq.com.

**Received:** 2025-01-23

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 52378352); Natural Science Foundation of Shandong (No. ZR2024QE048)

**Author brief:** LIU Changqi (1974-), PhD, senior engineer, main research interest: geological disaster prevention and reduction, E-mail: 1619742308@qq.com.

The degree of particle flocculation increased linearly with the increase of time. The yield strength and molding viscosity decrease with the increase of water-cement ratio, and increase with the increase of cement fineness. The apparent viscosity decreases with the increase of shear rate and shows a reversible change. The change of flocculation structure is consistent with the change of rheological properties. The water-cement ratio, cement fineness and shear rate affect the rheological properties by influencing the flocculation structure. This study reveals the change of rheological properties from the perspective of flocculation structure, which can provide guidance for the design and application of cement grout.

**Keywords:** geological disaster prevention and control; cement slurry; flocculent structure; particle distribution; rheological property; apparent viscosity

水泥浆液广泛应用于地质灾害注浆加固治理,水泥浆液的流变特性也是指导合理设计注浆参数的重要依据。在实际应用中,常通过调节浆液水灰比以达到工程需要性质,因此定量评价水泥浆液的流变性是至关重要的<sup>[1-3]</sup>。水泥浆液作为悬浮液体,水泥浆液中颗粒间的微观相互作用将影响浆液的宏观流变性,然而很少有研究聚焦于研究原位状态下颗粒絮凝效应对浆液流变的作用。深入地理解微观结构对水泥浆液的流变性的影响,能为新鲜水泥浆液的处理和应用提供理论指导,因此,有必要开展关于水泥颗粒絮凝特性与水泥浆液流变行为之间联系的研究。

水泥浆液由于组成复杂及水泥水化特性,其流变性比均匀悬浮液复杂,受到多种因素的影响<sup>[4-6]</sup>。Bentz等<sup>[7]</sup>研究了水泥粒径分布、水灰比对浆液屈服应力、黏度等流变参数的影响。Ley-Hernández等<sup>[8]</sup>研究了静息时间对流变学性质发展的影响。叶焕<sup>[9]</sup>根据紧密堆积理论分析了水灰比、胶凝材料组成、减水剂、浆液黏度、屈服应力等参数对浆体流变性能经时变化的影响。Choi等<sup>[10]</sup>提出了一个描述水泥浆体流变学的通用模型,将所提出的模型扩展到评价水泥浆体的微观结构。Zhang等<sup>[11]</sup>评估了胶凝材料颗粒粒径和颗粒形状对流变特性和流变模型的影响。Khayat等<sup>[12]</sup>将浆液黏度时变性分为幂函数型、直线增长型及指数函数型。

流变学理论认为,宏观流变性质变化由颗粒接触点的数量、强度及内聚力大小等决定<sup>[13]</sup>。浆液中水泥颗粒结构化被认为是影响流变性能的重要因素<sup>[14]</sup>,结构化是由不可逆的水化产物和可逆的颗粒絮凝搭接形成的,而水化产物的搭接则随着水化反应而进行<sup>[15]</sup>。颗粒间相互作用力越强,网络结构的强度越大,宏观上表现为屈服应力和黏度越大<sup>[16]</sup>。颗粒絮凝结构被认为是随时间而发展的可逆过程,与水化反应导致的不可逆变化共同影响水泥浆液的流变性能<sup>[17]</sup>。絮凝结构的形成与打破改变了体系中颗粒的尺寸分布及颗粒对水的约束能力,对流变

性能有显著影响<sup>[18-19]</sup>。剪切作用可以破坏结构网络,降低试样的黏度<sup>[20]</sup>。浆体的流变性能还受水泥颗粒形貌和粒径分布影响<sup>[21]</sup>。Kim等<sup>[22]</sup>研究了水灰比、外加剂等因素对浆体中絮凝结构形成的影响,测试了水泥浆液的表观黏度,分析了颗粒触变性与表观黏度之间的相互关系。Autier等<sup>[23]</sup>观察到浆体的两种团聚机制:较大颗粒上的(亚)微米颗粒的絮凝和(亚)微米颗粒的絮凝。张艳荣<sup>[24]</sup>通过激光扫描显微镜分析不同浆体的微观结构特征,建立了三级絮凝结构理论模型。Venkateela等<sup>[25]</sup>通过SEM及其标准水样舱研究了单个水泥颗粒的生长情况。Qian等<sup>[26]</sup>发现,由于浆体结构化的影响,随着施加应力的减少和时间的延长,浆液屈服应力变大。Yim等<sup>[27]</sup>实时监测了悬浮液中絮凝结构的形成和破坏,研究了粒径分布和流变性的变化规律及其联系。

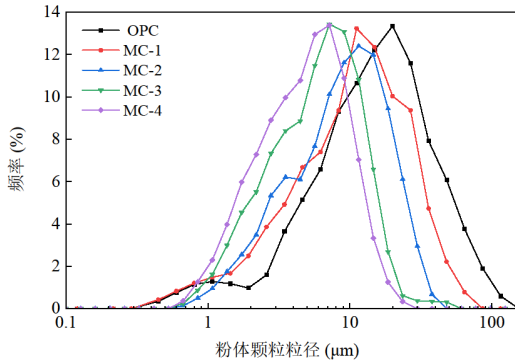
浆液状态下颗粒微观结构变化影响着宏观流变特性。由于水泥浆料的高浓度和高不透明度所造成的实验局限性,对于新拌水泥浆液的原位状态和结构的认识还很缺乏。目前研究多采用光学显微镜或者电子显微镜对高稀释倍率水泥浆液或低水灰比水泥浆体进行研究,较少考虑水泥浆液作为注浆材料的常用水灰比(0.6:1~1.6:1)。

针对目前存在的问题,笔者研究水泥浆液中颗粒微观结构演化及其对流变行为的影响,旨在找出微观结构与宏观流变特性之间的联系。通过聚焦光束反射率测量系统对不同水灰比、水泥细度和剪切速率条件下新拌水泥浆液微观颗粒絮凝特征进行的原位探测,获得絮凝颗粒初始时刻和随时间变化的分布特征,并测定水泥浆液的初始时刻流变特性和流变时变特性,讨论浆料中颗粒的絮凝特性,分析水泥浆液流型、屈服应力和表观黏度变化规律。从颗粒结构化和颗粒间作用力等方面解释微观絮凝效应对浆液宏观流变性的影响机制,认为外界因素通过影响浆液絮凝过程进而影响流变性,从微观角度揭示浆液流变性的变化。

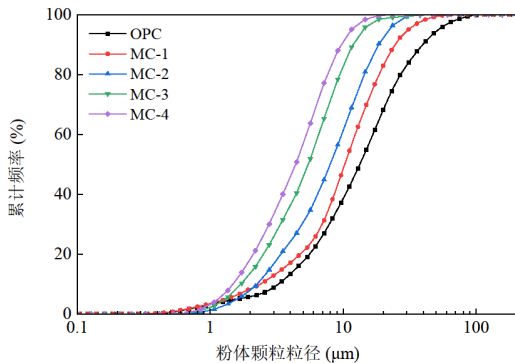
# 1 试验方法

## 1.1 材料与样品制备

水泥选用山水水泥厂生产的 5 种不同细度的普通硅酸盐水泥 (P·O42.5), 分别采用 OPC、MC-1、MC-2、MC-3、MC-4 表示。5 种水泥的粒径分布关键特征值及比表面积测试值见表 1, 粒径分布见图 1。



(a) 水泥粒径频率



(b) 水泥粒径累计频率

图 1 水泥粒径分布曲线图

Fig.1 Particle size distribution of cement powder

制备 5 种不同水泥细度、6 种水灰比 (分别为 0.6:1、0.8:1、1.0:1、1.2:1、1.4:1、1.6:1) 的 28 组试样, 其中 MC-3、MC-4 的水灰比为 0.6 时水泥浆液流动性差不能作为注浆材料, 没有对其测试。测试每组试样在 100~800 s<sup>-1</sup> 不同剪切速率下的流变特性, 剪切速率包括递增和递减两个阶段。试验过程中水温始终控制在 (20±2)°C。

表 1 水泥粒径特征值及比表面积

Table 1 Particle size distribution and specific surface area of cement powder

水泥类型	平均粒径/μm	D10/μm	D50/μm	D90/μm	D97/μm	D100/μm	比表面积/(m <sup>2</sup> /kg)
OPC	18.09	3.26	13.36	39.74	60.71	115.70	349.65
MC-1	12.58	2.38	10.71	24.77	26.82	64.47	467.85
MC-2	10.55	2.26	7.99	18.48	24.81	37.79	731.00
MC-3	7.22	1.71	5.46	11.91	16.36	29.91	1028.80
MC-4	5.74	1.48	4.39	9.74	13.26	23.41	1362.51

## 1.2 测试方法

### 1.2.1 流变性测试

用法国 Lamy rheology 公司生产的 RM-100 旋转黏度计测试评估浆液的流变性能, 黏度计与转子结构如图 2 所示, 内轴直径 30 mm, 外筒直径 32.5 mm, 内轴高度 40 mm。测试时外筒固定, 内轴旋转, 当转子在水泥浆液中旋转时, 在转子上产生黏性扭矩, 应用 ω 测量转速的扭转阻力 M, 根据式 (1) 计算剪切速率 γ 和剪切应力 τ, 对数据处理后获得浆液的黏度。

$$\delta = R_d/R_i$$

$$\gamma = \omega \times (1 + \delta^2)/(\delta^2 - 1) \quad (1)$$

$$\tau = (1 + \delta^2/2\delta^2) \times (M/2\pi LR_i^2)$$

式中: R<sub>d</sub> 为转子直径, mm; R<sub>i</sub> 为转筒直径, mm; δ 为常数; ω 为转速, r/s, γ 为剪切速率, s<sup>-1</sup>; M 为扭转阻力, kg·m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>, L 为转子长度, mm; τ 为剪切应力, Pa。

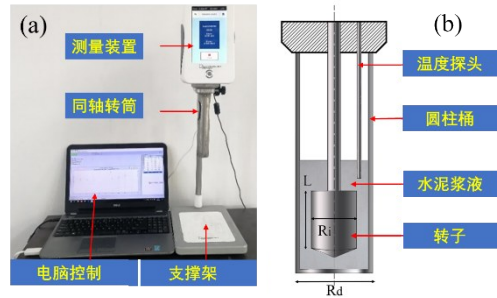


图 2 RM-100 旋转黏度计

Fig. 2 RM-100 rotary viscometer

浆液流变性按照图 3 所示的试验过程进行测试。根据表 2 制备不同配合比的水泥浆液, 测试浆液流变性能时黏度计剪切速率先从 100 s<sup>-1</sup> 增加到 800 s<sup>-1</sup> 再降低至 100 s<sup>-1</sup>, 经过 15 个步骤, 得到不同剪切速率下的浆液流变性能。

测量浆液时变特性时, 选取水灰比为 1:1 的浆液, 除初始阶段 (0 min) 外, 测试时间分别为静置 30、60、90、120 min。为确保悬浮液处于均匀状态, 预先剪切 60 s, 再进行流变试验。为使测试误差最小化, 每组悬浮液重复进行 3 次流变测量, 测量在 (20±2)°C 恒温下进行。

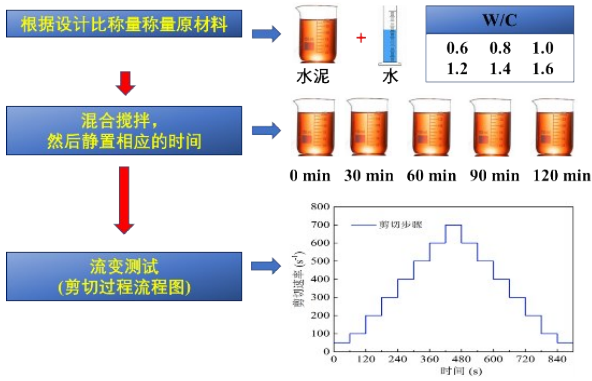


图3 流变性测试流程

Fig. 3 Rheological test procedure

1.2.2 絮凝颗粒原位状态测试

用梅特勒-托利多公司生产的FBRM颗粒分析仪(见图4)对水泥浆液中颗粒状态进行原位测试,仪器由计算机监测系统、搅拌系统、FBRM探头系统、PVM观测系统和烧杯组成。FBRM颗粒分析仪测量范围为0.5~1000 μm,可以实时获取原位状态下浆液中的颗粒信息,包括颗粒弦粒径、数量和频率等。它不需要稀释或采样悬浮液就能直接获取颗粒状态<sup>[28]</sup>。FBRM方法是一种实时提供颗粒弦粒径分布信息的测量技术,弦粒径定义为扫描平面与焦平面中粒子投影面积的交点,是粒子几何形状和尺寸的特征测量。其原理为旋转透镜在蓝宝石窗口外表面提供高度聚焦的激光束,以固定速度沿圆形路径扫描。当聚焦光束与粒子的边缘相交时,粒子会将激光发生散射,直到光束到达粒子的相反边缘,利用鉴别电子电路分离出散射光的时间周期,将这个时间周期乘以扫描速度,计算出两边缘的距离。在FBRM术语中,这个距离被称为弦粒径,如图4(d)所示。

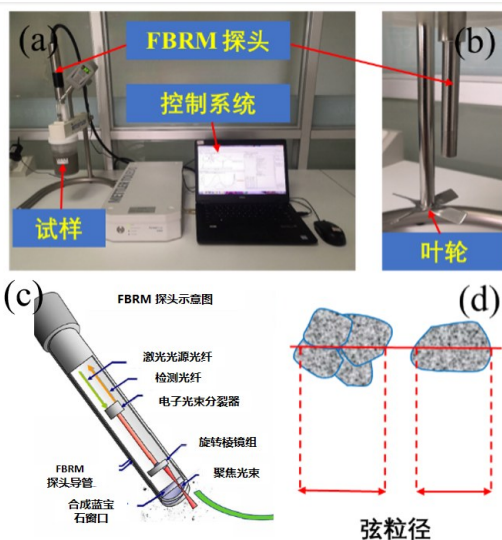


图4 FBRM颗粒分析仪

Fig. 4 FBRM particle analyzer

试样测试过程为:首先将拌和水加热至20℃;按照表2配合比配制水泥浆液,分别称取对应质量的拌合水、水泥,倒入搅拌机中搅拌均匀,然后将配制好的水泥浆液放入恒温水浴中,使浆液温度保持在(20±2)℃,在测量时,将浆液样品转移到FBRM烧杯中,测试过程与流变测试中保持相同的加载过程,每隔5s采集一次数据。

2 试验结果与讨论

2.1 颗粒絮凝效应分析

2.1.1 初始时刻颗粒絮凝效应

图5为水泥浆液原位状态下不同水泥细度、水灰比和剪切速率对絮凝颗粒平均弦粒径和总数量的影响。从图5可以看出,随着水灰比、水泥细度和剪切速率的增加,浆液中絮凝颗粒总数量增加,平均弦粒径减小。根据颗粒数量和粒径变化可知,水灰比和水泥细度对絮凝的影响明显大于剪切速率的影响。同时,絮凝结构随剪切速率变化的响应揭示了在水泥水化初期水泥絮凝过程的可逆性。

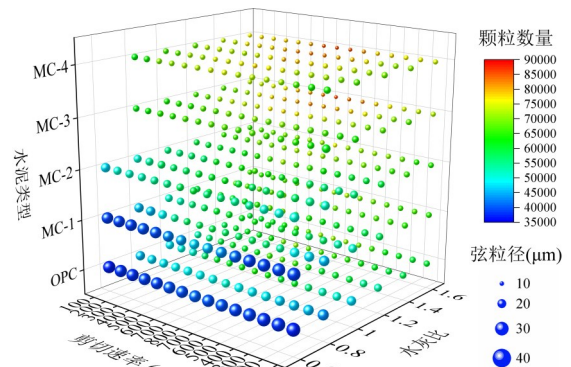


图5 水灰比、水泥细度、剪切速率对颗粒平均弦粒径和数量的影响

Fig. 5 Effect of water cement ratio, shear rate and cement fineness on chord size and particle number

图6和图7分别为水泥浆液中絮凝颗粒随水灰比和水泥细度的变化规律。由图可知,水泥颗粒与水混合后,所得絮凝颗粒频率分布仍符合对数正态分布,其絮凝颗粒粒径较粉体更大,分布范围更广,甚至出现超过1000 μm的超大絮凝颗粒。随水灰比增加,浆液中小颗粒频率增加,大颗粒分布频率降低,颗粒弦粒径分布范围减小。同样的,随水泥细度的增加,浆液中絮凝颗粒分布也具有相同的变化规律。这说明水灰比和水泥细度都对絮凝颗粒的粒径分布具有显著影响。

图8和图9为5种不同细度水泥在不同水灰比和剪切速率下的絮凝弦粒径和数量。从图8可知,随着水灰比增加,浆液中絮凝颗粒数量增加,平均

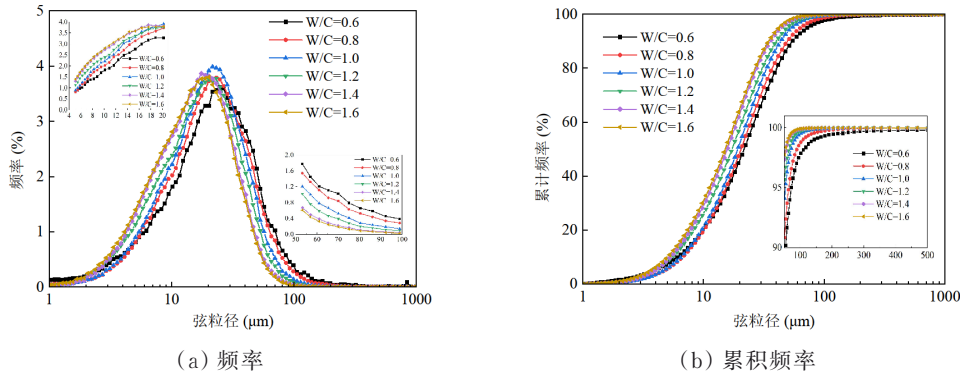


图 6 不同水灰比浆液中水泥絮凝颗粒分布 (MC-2, 剪切速率=400 s<sup>-1</sup>)

Fig. 6 Effect of water-cement ratio on the distribution of flocculated particles (MC-2, Rate=400 s<sup>-1</sup>)

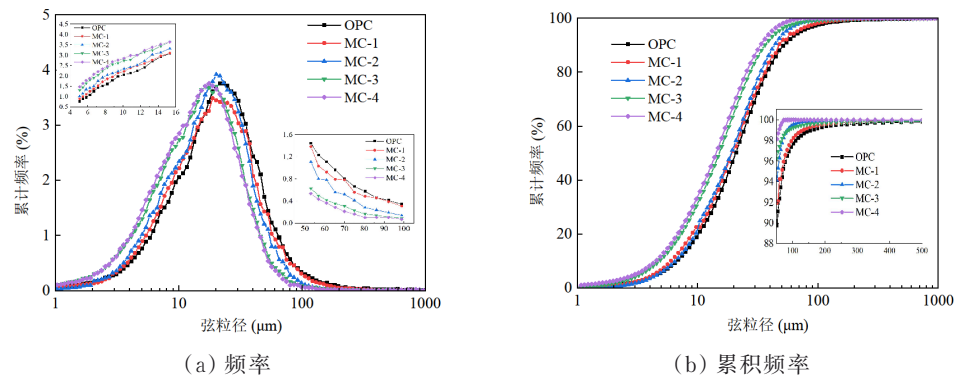


图 7 不同细度水泥浆液中水泥絮凝颗粒分布 (水灰比=1、剪切速率=400 s<sup>-1</sup>)

Fig. 7 Effect of cement fineness on the distribution of flocculated particles (W/C=1, Rate=400 s<sup>-1</sup>)

弦粒径减小。当水灰比大于 1.2 后,絮凝颗粒弦粒径和数量变化不大,且细度更小的水泥受水灰比的影响更大。水灰比从 0.8 增加到 1.6, OPC 浆液颗粒平均弦粒径从 28.58  $\mu\text{m}$  减小到 19.99  $\mu\text{m}$ , 仅为水灰比 0.8 时的 69.94%; 而 MC-4 浆液颗粒平均弦

粒径从 17.35  $\mu\text{m}$  减小到 14.53  $\mu\text{m}$ , 为水灰比 0.8 时的 83.75%。随着水灰比的增加,水泥颗粒表面覆盖的水膜厚度会因自由水的增加而变厚,降低了颗粒间的作用力,使水泥颗粒形成大絮凝结构的能力减弱,当水泥细度越小时这种变化越显著。

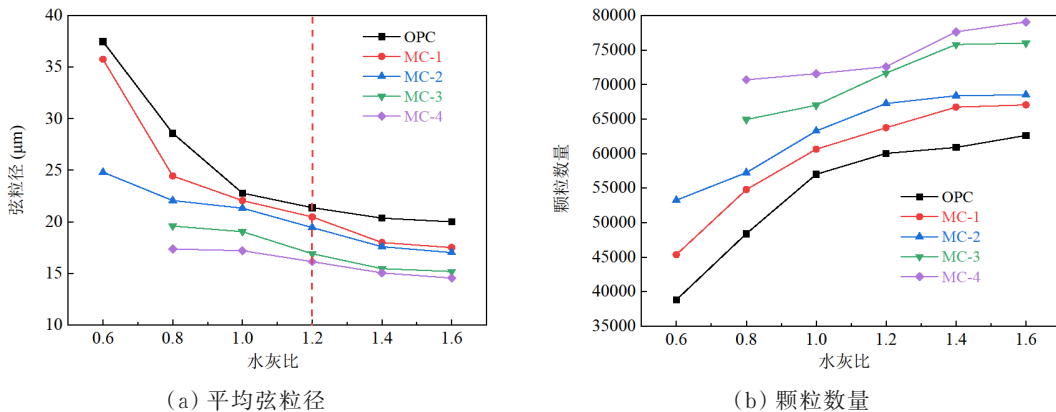


图 8 不同水灰比浆液中絮凝颗粒平均弦粒径和数量变化 (剪切速率=400 s<sup>-1</sup>)

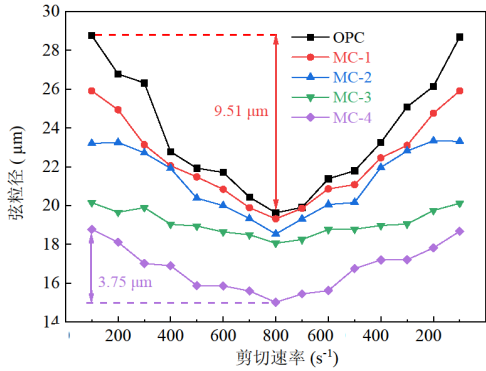
Fig. 8 Effect of water-cement ratio on chord size and particle number (Rate=400 s<sup>-1</sup>)

从图 9 可知,随剪切速率的增加,絮凝结构被破坏,絮凝颗粒数量增加,平均弦粒径减小;当剪切速率减小时,絮凝结构恢复;剪切速率对比表面积小的水泥破坏程度更大。剪切速率从 100 s<sup>-1</sup> 增加到

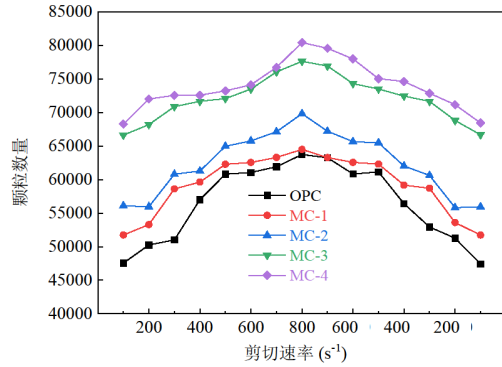
800 s<sup>-1</sup> 再减至 100 s<sup>-1</sup>, OPC 浆液颗粒弦粒径从 28.77  $\mu\text{m}$  先减小至 19.62  $\mu\text{m}$  后增加至 28.56  $\mu\text{m}$ ; MC-4 浆液颗粒弦粒径则从 18.77  $\mu\text{m}$  先减小至 15.02  $\mu\text{m}$  后增加至 18.52  $\mu\text{m}$ 。张艳荣的研究表明<sup>[24]</sup>,絮凝结

构存在3级结构,即弱、强和超强絮凝结构颗粒。随着剪切速率的缓慢增加,首先打破了浆液中弱絮凝结构,接着强絮凝结构也被打破,同时根据浆液颗粒平均粒径大小也可知浆体中存在试验条件下无法打破或者完全打破的絮凝结构;随着剪切速率减

小,颗粒受到的作用力减弱,部分颗粒又重新形成絮凝结构。絮凝颗粒对剪切速率循环变化的响应,也揭示了絮凝过程在初始时刻主要受物理作用,絮凝过程是可逆的。



(a) 平均弦粒径



(b) 颗粒数量

图9 不同剪切速率下浆液中絮凝颗粒数量和弦粒径变化(水灰比=1)

Fig. 9 Effect of shear rate on chord size and particle number (W/C=1)

从图8和图9可知,水泥细度的增加显著增加了浆液中絮凝颗粒数量,降低了弦粒径。OPC浆液中絮凝颗粒弦粒径为28.77 μm,而MC-4絮凝颗粒弦粒径降低至18.77 μm。水泥细度的改变从根本上改变了颗粒粉体的粒径和数量。水泥细度增加使絮凝颗粒具有较大的比表面积,颗粒数量增加导致颗粒密度减小,颗粒间距离缩短,增加了颗粒间作用力。絮凝结构内的结合力增强,不易被外力破坏,絮凝程度提高。因此,水泥细度越大,粒径和数量受水灰比和剪切力的影响越小。

水灰比增加起到稀释作用,理论上颗粒数量应减少。然而与预期相反的是,在研究范围内(水灰比0.6~1.6),FBRM检测到颗粒数量增加。不同

水灰比、不同剪切速率下浆液中大颗粒(50~1 000 μm)和小颗粒(小于20 μm)的数量如图10、图11所示。随水灰比增加,小颗粒数量增加,大颗粒减少,且小颗粒增加的数量远大于大颗粒减少的数量。水灰比增加导致水泥粉体被稀释,使浆液中大絮凝颗粒的结构被破坏性分散为更多的小颗粒,水含量的增加对大絮凝结构的破坏作用大于稀释作用,导致检测到颗粒的总数量增加。随剪切速率增加,较大的絮凝结构也会被破坏分散成许多较小的絮凝颗粒。因此,随着水灰比和剪切速率增加,浆液絮凝程度降低。图12为FBRM系统配套的PVM系统观测到的浆液中絮凝颗粒真实形态,浆液中存在大于100 μm和小于20 μm的絮凝颗粒。

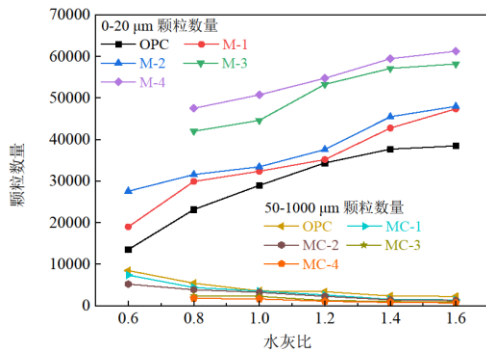


图10 不同水灰比浆液中大颗粒和小颗粒数量变化 (剪切速率=400 s<sup>-1</sup>)

Fig. 10 Effect of water-cement ratio on the quantity of large particles and small particles (Rate=400 s<sup>-1</sup>)

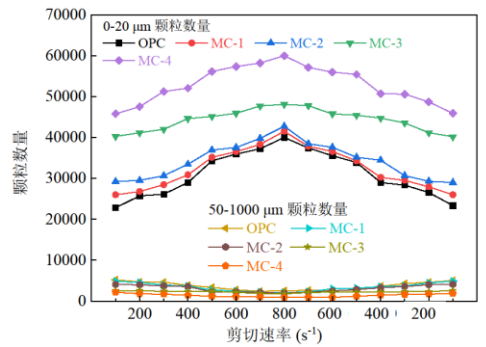


图11 不同剪切速率下浆液中大颗粒和小颗粒数量变化 (水灰比=1)

Fig. 11 Effect of shear rate on the quantity of large and small particles (W/C=1)

### 2.1.2 时间对颗粒絮凝效应的影响

选取最常用水灰比1:1的浆液测试120 min内

絮凝颗粒的变化,如图13所示。随时间增加,不同细度水泥浆液中絮凝颗粒总数量逐渐减少,颗粒弦

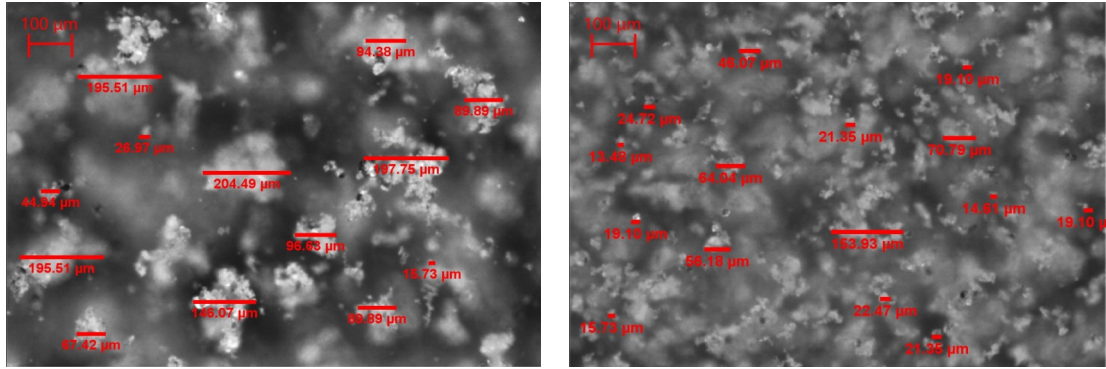


图 12 絮凝结构实测图片

Fig. 12 Photos of the actual flocculation structure

粒径逐渐增加;随剪切速率变化,絮凝过程同样表现出可逆性。

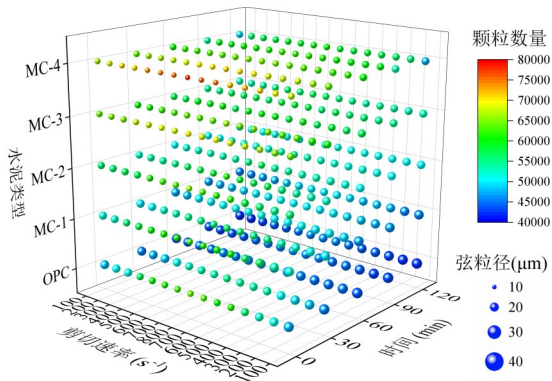
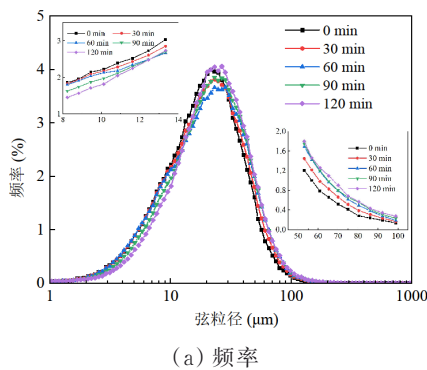
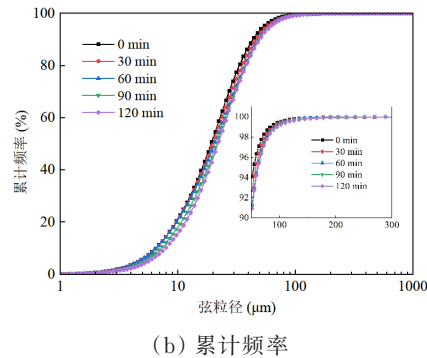


图 13 时间对不同水泥细度和剪切速率下浆液絮凝颗粒粒径和颗粒数量的影响

Fig. 13 Effect of time on chord size and particle number under different cement fineness and shear rates



(a) 频率



(b) 累计频率

图 14 不同时间下浆液絮凝颗粒弦粒径分布(MC-2、剪切速率=400 s<sup>-1</sup>)

Fig. 14 Effect of time on the distribution of flocculated particles (MC-2, Rate=400 s<sup>-1</sup>)

随着时间的增加,浆液中小絮凝颗粒(0~20 μm)减少,大絮凝颗粒(50~1 000 μm)增加(见图 17 和图 18)。在试验时间内,絮凝过程随外力变化是可逆的,但是随着时间增加,颗粒产生不可逆的变化。水化过程消耗浆液中的自由水,出现凝胶产物,也增加了颗粒间引力,水泥颗粒越小水化反应越明

图 14 为浆液中絮凝颗粒分布随时间变化的曲线。图 14 表明浆液中絮凝颗粒分布随时间变化仍符合正态分布。随着时间增加,浆液中小絮凝颗粒频率降低,大颗粒分布频率增加,累积频率达到 100% 对应更大的粒径。

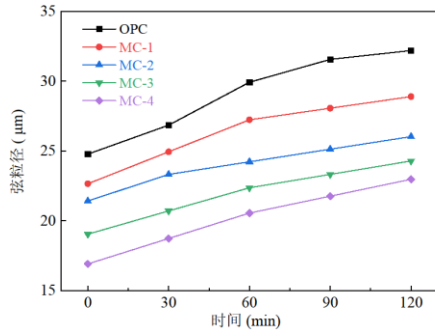
120 min 内水泥浆液的絮凝颗粒平均弦粒径与数量变化规律如图 15、图 16 所示。浆液中絮凝颗粒粒径随着时间增长逐渐增大,且随水泥细度增加,其颗粒生长速率更快。120 min 时 OPC 增长速率为  $2.49 \times 10^{-3}/\text{min}$ , MC-4 的粒径增长速率为  $2.99 \times 10^{-3}/\text{min}$ 。随着时间增长,絮凝颗粒产生部分不可逆的增长,剪切速率从  $100 \text{ s}^{-1}$  增加到  $800 \text{ s}^{-1}$  颗粒变化范围减小,0 min 时颗粒粒径变化范围为  $23.202 \mu\text{m}$  到  $18.537 \mu\text{m}$ , 120 min 时颗粒粒径变化范围为  $26.653 \mu\text{m}$  到  $24.687 \mu\text{m}$ , 表明随时间增加絮凝颗粒形成更多不容易被打破的结构。

显,导致其颗粒生长速率更加显著。

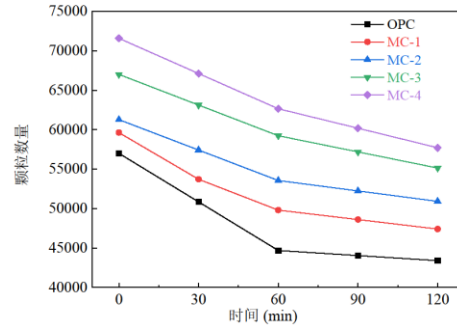
## 2.2 浆液流变特性

### 2.2.1 初始时刻浆液流变特性

为了研究不同细度水泥和不同水灰比条件下水泥浆液的流变特性,选择先前研究中常用的经验模型,拟合试验数据,确定评估流变特性的最佳模



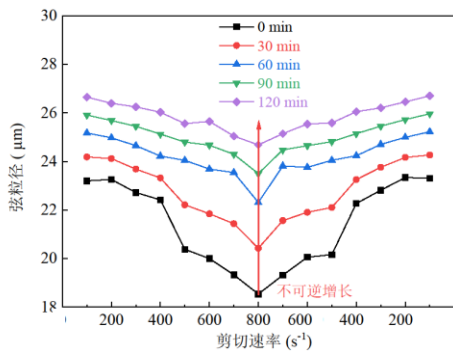
(a) 粒径



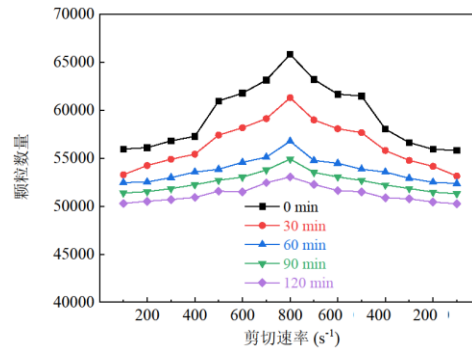
(b) 颗粒数量

图 15 不同水泥细度下时间对浆液中絮凝颗粒粒径和数量的影响(剪切速率=400 s<sup>-1</sup>)

Fig. 15 Effect of time on chord size and particle number with different fineness cement (Rate=400 s<sup>-1</sup>)



(a) 粒径



(b) 粒径

图 16 不同剪切速率下时间对浆液中絮凝弦粒径和颗粒数量的影响(MC-2)

Fig. 16 Effect of time on the chord size and particle number at different shear rates (MC-2)

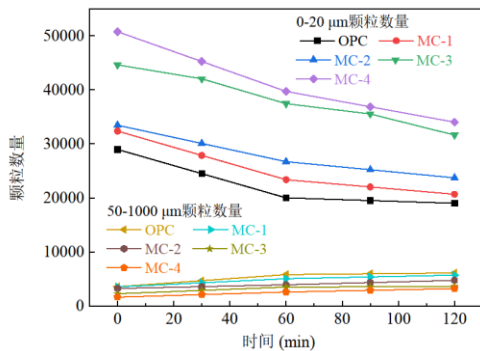


图 17 时间对不同细度水泥小颗粒和大颗粒数量的影响(剪切速率=400 s<sup>-1</sup>)

Fig. 17 Effect of time on the quantity of small and large particles with different fineness (Rate=400 s<sup>-1</sup>)

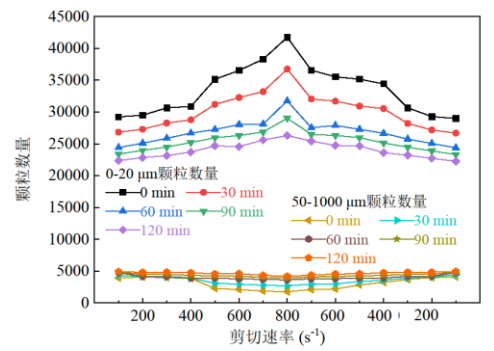


图 18 不同剪切速率下时间对大颗粒和小颗粒数量的影响(MC-2)

Fig. 18 Effect of time on the quantity of small and large particles with different fineness cement (MC-2)

型。分析不同细度水泥、水灰比对浆体流变参数的影响,包括屈服应力、塑性黏度和不同剪切速率下的表观黏度。通过对剪切速率-剪切应力进行函数拟合得到了浆液的流变方程(表2)。对于水灰比为0.6~1.6的5种细度的水泥,水泥浆液的流变模式并未随水灰比和水泥细度而发生明显改变,剪应力和剪切速率呈明显线性关系。虽然牛顿流体屈服应力为零,但通过实验数据拟合发现,浆液屈服应力不完全为零。不同组别浆液都可采用宾汉流体

计算,区别主要在于屈服应力和黏度的不同。

图 19 和图 20 分别为水灰比和水泥细度对水泥浆液屈服应力和塑性黏度的影响规律。随水灰比减小和水泥细度增加,浆液屈服应力和塑性黏度呈现指数型增长。水泥浆液屈服应力和塑性黏度在水灰比 1.2 后随水泥细度增加变化较小;水灰比越小,水泥浆液的屈服应力受水泥细度的影响越大;这些与水灰比对絮凝结构的影响一致。当水灰比为 0.8 时,浆液屈服应力从 1861 mPa 增加到 52250

表 2 初始时刻浆液流变方程和所属流型

Table 2 Rheological equation and flow pattern of cement slurry at initial time

水灰比	水泥类型	流变方程	相关系数	所属流型
0.6	OPC	$\tau=2.646+0.02876\gamma$	0.9987	宾汉流体
	MC-1	$\tau=12.944+0.03457\gamma$	0.9986	宾汉流体
	MC-2	$\tau=29.676+0.07405\gamma$	0.9934	宾汉流体
0.8	OPC	$\tau=1.861+0.00953\gamma$	0.9379	宾汉流体
	MC-1	$\tau=3.035+0.02479\gamma$	0.9985	宾汉流体
	MC-2	$\tau=12.114+0.04575\gamma$	0.9988	宾汉流体
	MC-3	$\tau=28.224+0.05064\gamma$	0.9923	宾汉流体
1.0	MC-4	$\tau=52.250+0.12548\gamma$	0.9651	宾汉流体
	OPC	$\tau=0.749+0.00544\gamma$	0.9658	宾汉流体
	MC-1	$\tau=0.768+0.01113\gamma$	0.9975	宾汉流体
	MC-2	$\tau=2.788+0.02302\gamma$	0.9981	宾汉流体
1.2	MC-3	$\tau=6.806+0.02569\gamma$	0.9980	宾汉流体
	MC-4	$\tau=14.660+0.04672\gamma$	0.9783	宾汉流体
	OPC	$\tau=0.295+0.00520\gamma$	0.9995	宾汉流体
	MC-1	$\tau=0.858+0.00593\gamma$	0.9674	宾汉流体
1.4	MC-2	$\tau=1.759+0.01192\gamma$	0.9913	宾汉流体
	MC-3	$\tau=2.033+0.01686\gamma$	0.9915	宾汉流体
	MC-4	$\tau=7.751+0.01973\gamma$	0.9973	宾汉流体
	OPC	$\tau=0.320+0.00471\gamma$	0.9983	宾汉流体
1.6	MC-1	$\tau=0.272+0.00614\gamma$	0.9979	宾汉流体
	MC-2	$\tau=0.613+0.00792\gamma$	0.9911	宾汉流体
	MC-3	$\tau=0.762+0.00969\gamma$	0.9990	宾汉流体
	MC-4	$\tau=1.588+0.01281\gamma$	0.9952	宾汉流体
1.6	OPC	$\tau=0.360+0.00457\gamma$	0.9802	宾汉流体
	MC-1	$\tau=0.258+0.00586\gamma$	0.9958	宾汉流体
	MC-2	$\tau=0.376+0.00691\gamma$	0.9963	宾汉流体
	MC-3	$\tau=0.554+0.00875\gamma$	0.9927	宾汉流体
MC-4	$\tau=1.335+0.00938\gamma$	0.9963	宾汉流体	

mPa,提高了 27 倍;当水灰比为 1.6 时,屈服应力从 360 mPa 增加到 1355 mPa,仅提高了 2.76 倍。

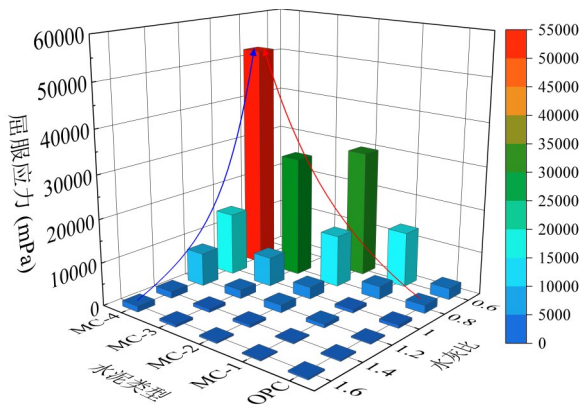


图 19 初始时刻水泥浆液的屈服应力  
Fig. 19 Yield strength of slurry at initial time

固相体积分数受水泥浆体水灰比的影响:水灰比增加,固相体积分数减少,颗粒间距增大,导致颗粒间作用力减弱,表现为塑性黏度和屈服应力降

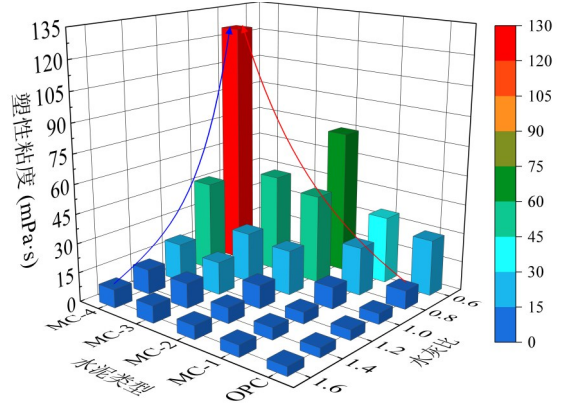


图 20 初始时刻水泥浆液塑性黏度  
Fig. 20 Plastic viscosity of slurry at initial time

低。随着水泥细度增加,浆体中水泥颗粒更易形成絮凝结构,消耗自由水,使塑性黏度和屈服应力增大。结合图 8 和图 9 可知,水灰比越小对絮凝结构的影响越显著,导致浆液屈服应力和塑性黏度越大。

水泥浆液中絮凝结构可以被外力打破,外力对浆液的流变性能有显著的影响,浆液的表现黏度是分析流变性的重要因素,图 21 为初始时刻不同水灰比和水泥细度下浆液表现黏度随剪切速率变化规律。由图 21 可知,随着剪切速率先增大后减少,浆液表现黏度先减小后增大;随水灰比的增大和水泥细度减少而减小;水灰比越小,表现黏度受水泥细度与剪切速率影响越大;在高剪切速率下不同细度水泥浆液表现黏度差别减小。主要是因为颗粒的絮凝及解絮凝。浆液中水分包括结合水、絮凝水、自由水,自由水决定浆液的流变性质<sup>[24]</sup>。剪切速率增大后颗粒受到的剪切力增大,可以打破絮凝结构,减少絮凝水增加自由水含量,剪切速率增大后能够打破结合强度更大的絮凝结构;剪切力减少时部分颗粒又重新形成絮凝结构,浆液的表现黏度随外力减少而增大。而当水灰比较大时,絮凝结构破坏对自由水含量的影响较小,图 22 为浆液表现黏度变化示意图。

2.2.2 时间对浆液流变特性的影响

选用水灰比 1:1 水泥浆液分析流变的时变特性,120 min 内 5 种细度水泥浆液其流变模式仍符合宾汉流体方程(表 3)。屈服应力、塑性黏度与水化时间的关系曲线如图 23、图 24 所示,可以发现,浆液的屈服应力和塑性黏度随时间的延长呈线性增加,与絮凝结构随时间变化一致。随着水泥细度的增加,屈服应力增长量增加,120 min 时 OPC 从 167 mPa 增加到 501 mPa,增加了 334mPa, MC-4 从 14660 mPa 增加到 31316 mPa,增加了 16656 mPa。这与絮凝颗粒粒径随水泥细度的变化一致,说明颗

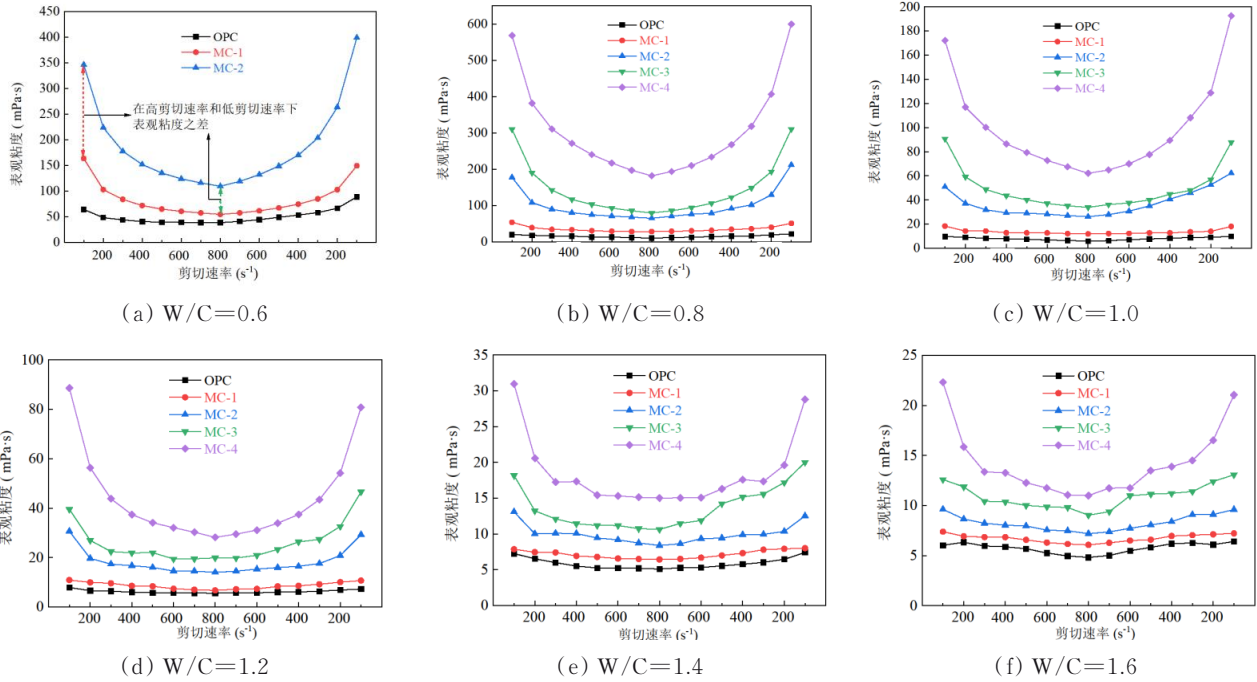


图 21 水灰比、水泥细度和剪切速率对表观黏度的影响

Fig. 21 Effects of water-cement ratio, cement fineness and shear rate on apparent viscosity

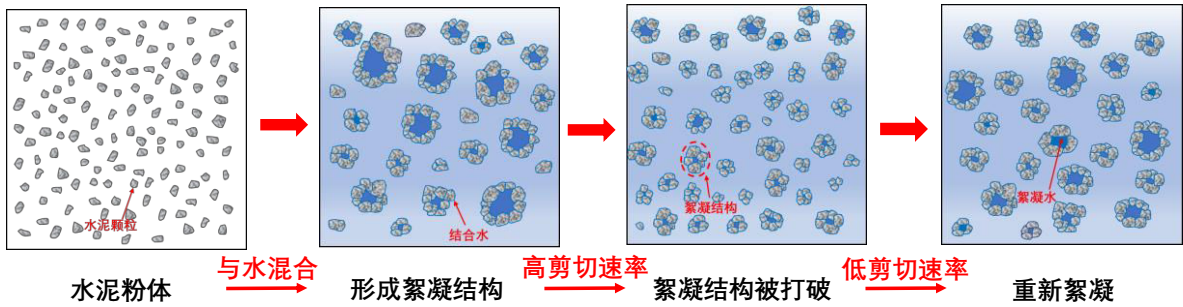


图 22 絮凝效应对流变性能影响机制示意图

Fig. 22 Schematic diagram of mechanism flocculation effect on rheological properties

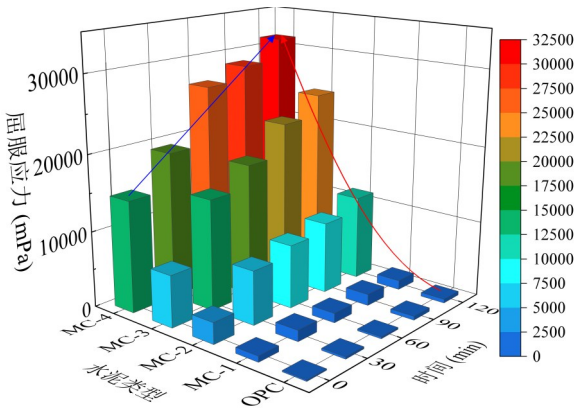


图 23 不同时刻水泥浆液屈服应力

Fig. 23 Yield strength of slurry at different time

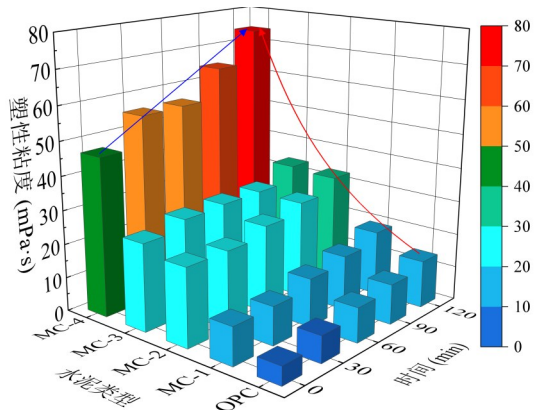


图 24 不同时刻水泥浆液塑性黏度

Fig. 24 Plastic viscosity of slurry at different time

粒的絮凝影响浆液黏度。随着时间的延长,颗粒发生水化和进一步絮凝,消耗自由水,最终形成结合力更强的絮凝结构,这是屈服应力经时变增大的原因。水泥细度大,水化反应更加明显,絮凝颗粒生长更显著,减少自由水含量多,黏度增长量增加。

图 25 为表观黏度随时间的变化。表观黏度随剪切速率变化的响应表现出可逆性,但随时间变化发生不可逆增长,与剪切速率对絮凝结构的影响一致,表明絮凝结构影响浆液流变性。

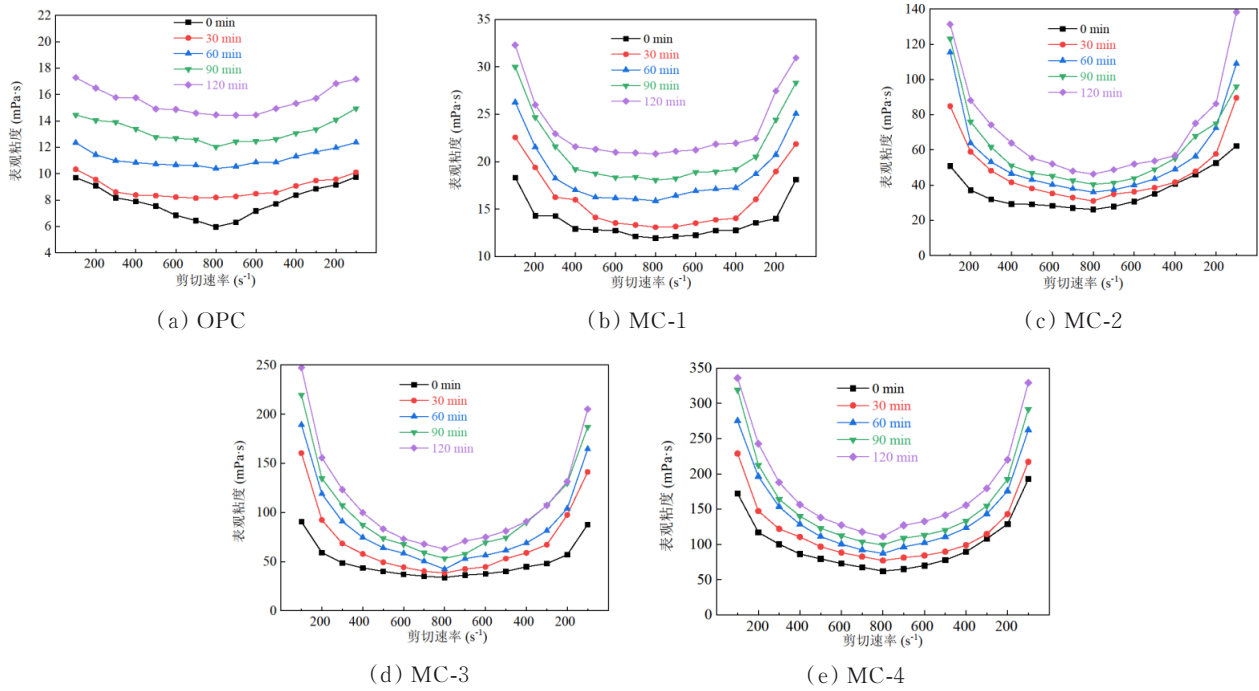


图 25 展示了不同时刻水泥浆液表观黏度的变化。

Fig. 25 Change of apparent viscosity of cement slurry at different time

表 3 不同时刻浆液流变方程和所属流型

Table3 Rheological equation and flow pattern of cement slurry at different time

水泥类型	时间/min	流变方程	相关系数	所属流型
OPC	0	$\tau=0.167+0.006\ 26\gamma$	0.965 8	宾汉流体
	30	$\tau=0.270+0.007\ 80\gamma$	0.999 5	宾汉流体
	60	$\tau=0.243+0.010\ 20\gamma$	0.999 6	宾汉流体
	90	$\tau=0.495+0.011\ 74\gamma$	0.996 3	宾汉流体
	120	$\tau=0.501+0.013\ 95\gamma$	0.998 7	宾汉流体
MC-1	0	$\tau=0.768+0.011\ 13\gamma$	0.997 5	宾汉流体
	30	$\tau=1.450+0.011\ 33\gamma$	0.993 0	宾汉流体
	60	$\tau=1.236+0.014\ 18\gamma$	0.998 2	宾汉流体
	90	$\tau=1.485+0.016\ 09\gamma$	0.997 7	宾汉流体
	120	$\tau=1.217+0.019\ 10\gamma$	0.998 9	宾汉流体
MC-2	0	$\tau=2.788+0.023\ 02\gamma$	0.998 1	宾汉流体
	30	$\tau=7.084+0.022\ 99\gamma$	0.989 8	宾汉流体
	60	$\tau=8.363+0.025\ 86\gamma$	0.995 2	宾汉流体
	90	$\tau=9.434+0.028\ 80\gamma$	0.997 5	宾汉流体
	120	$\tau=11.228+0.032\ 86\gamma$	0.986 0	宾汉流体
MC-3	0	$\tau=6.806+0.025\ 69\gamma$	0.997 9	宾汉流体
	30	$\tau=12.876+0.028\ 42\gamma$	0.992 4	宾汉流体
	60	$\tau=17.502+0.028\ 98\gamma$	0.986 1	宾汉流体
	90	$\tau=21.601+0.029\ 09\gamma$	0.935 3	宾汉流体
	120	$\tau=24.366+0.033\ 62\gamma$	0.948 4	宾汉流体
MC-4	0	$\tau=14.660+0.046\ 72\gamma$	0.978 3	宾汉流体
	30	$\tau=19.254+0.055\ 50\gamma$	0.983 2	宾汉流体
	60	$\tau=26.674+0.055\ 68\gamma$	0.963 4	宾汉流体
	90	$\tau=28.483+0.064\ 60\gamma$	0.988 7	宾汉流体
	120	$\tau=31.316+0.074\ 29\gamma$	0.976 9	宾汉流体

### 3 结论

基于絮凝颗粒原位状态和水泥浆流变性能的试验结果,得出以下结论:

1)水灰比、水泥细度和剪切速率对絮凝颗粒数量和粒径分布具有显著影响。随着水灰比、水泥细度和剪切速率的增加,絮凝颗粒平均弦粒径减小,颗粒总数量增加;随着时间增加,絮凝颗粒平均弦粒径增加,颗粒总数量减少。絮凝结构随剪切速率的变化而变化,揭示了絮凝过程的可逆性;随着时间增加,絮凝颗粒形成更多不易被打破的结构,产生不可逆的变化。

2)在水灰比 0.6:1~1.6:1 范围内,5 种不同细度水泥的流型属于宾汉流体。随着水灰比减小和水泥细度增加,水泥浆液的屈服应力和塑性黏度增加。浆液的表观黏度随水泥细度的增加而增大,随着剪切速率先增加后减少,表观黏度先减小后增大。剪切速率对表观黏度和絮凝结构的影响规律相同,且呈现出可逆性。

3)选择水灰比 1:1 浆液分析其流变时变性,120 min 以内 5 种细度水泥浆液仍符合宾汉流体特征,屈服应力和塑性黏度随时间的延长呈线性增加,与絮凝颗粒随时间呈线性增长的规律一致。

4)水灰比、水泥细度和剪切速率对絮凝效应的变化和流变参数的影响表现出一致性,表明水泥絮凝结构的形成和破坏是影响浆液流变特性的重要因素。

## 参考文献

- [1] LIAO C, LIN B H, LI M, et al. Study on the properties of graphene oxide cementitious grout materials and its cementing effect in reinforcing broken rock mass by grouting [J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 96: 110458.
- [2] 杨成, 熊凌鑫, 游俊杰, 等. 掺入普通硅酸盐水泥的粉煤灰地聚物混凝土力学性能与微观特征[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2024, 46(3): 207-215.  
YANG C, XIONG L X, YOU J J, et al. Mechanical properties and microscopic characteristics of fly ash geopolymer concrete containing ordinary Portland cement [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024, 46(3): 207-215. (in Chinese)
- [3] 孙谓, 李建中, 黄松, 等. 全风化花岗岩地层膨润土-超细水泥浆液滤失特性研究[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(20): 8812-8820.  
SUN X, LI J Z, HUANG S, et al. Filtration characteristics of bentonite-ultrafine cement grout in fully weathered granite formation [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(20): 8812-8820. (in Chinese)
- [4] LI Q L, WANG B W, WEI Z, et al. Experiment and numerical simulation study of polycarboxylate superplasticizer modified cemented ultrafine tailings filling slurry: Rheology, fluidity, and flow properties in pipeline [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 438: 137041.
- [5] SKARE E L, SHEIATI S, CEPURITIS R, et al. Rheology modelling of cement paste with manufactured sand and silica fume: Comparing suspension models with artificial neural network predictions [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 317: 126114.
- [6] 杨贵永, 侯淑鹏, 万宇豪, 等. 硅酸盐-硫铝酸盐复配水泥浆液流变特性试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(35): 65-71.  
YANG G Y, HOU S P, WAN Y H, et al. Experimental study on the rheological behavior of silicate-sulphoaluminate composite cement grout [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(35): 65-71. (in Chinese)
- [7] BENTZ D P, FERRARIS C F, GALLER M A, et al. Influence of particle size distributions on yield stress and viscosity of cement-fly ash pastes [J]. *Cement and Concrete Research*, 2012, 42(2): 404-409.
- [8] LEY-HERNÁNDEZ A M, FEYS D. Resting time effect on the rheological behavior of cement paste in presence of superplasticizer [J]. *Cement and Concrete Research*, 2021, 142: 106347.
- [9] 叶焕. 不同胶凝材料体系的絮凝特性及流变性能 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.  
YE H. Flocculation and rheological performance of variable cementitious systems [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [10] CHOI B I, KIM J H, SHIN T Y. Rheological model selection and a general model for evaluating the viscosity and microstructure of a highly-concentrated cement suspension [J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 123: 105775.
- [11] ZHANG C Y, WANG M, LIU R T, et al. Rheological properties of cement-based slurry and evaluation of rheological model: Influence of particle size and shape [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 406: 133498.
- [12] KHAYAT K H, MENG W N, VALLURUPALLI K, et al. Rheological properties of ultra-high-performance concrete: An overview [J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 124: 105828.
- [13] 王鹏刚, 高义志, 陈际洲, 等. 新拌低水胶比水泥浆体流变性能影响因素及流变参数预测方法[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(12): 6681-6690.  
WANG P G, GAO Y Z, CHEN J Z, et al. Influencing factors of rheological properties and prediction of rheological behavior of fresh low water-to-cement ratio cement pastes [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(12): 6681-6690. (in Chinese)
- [14] ALNAHHAL M F, KIM T, HAJIMOHAMMADI A. Distinctive rheological and temporal viscoelastic behaviour of alkali-activated fly ash/slag pastes: A comparative study with cement paste [J]. *Cement and Concrete Research*, 2021, 144: 106441.
- [15] QIN Q L, MENG Q S, YI P P, et al. Investigation on the rheology, self-shrinkage, pore structure, and fractal dimension of coral powder-cement slurry [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 77: 107517.
- [16] KWAN A K H, FUNG W W S. Roles of water film thickness and SP dosage in rheology and cohesiveness of mortar [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2012, 34(2): 121-130.
- [17] WANG X C, LI S C, ZHOU A N, et al. Influence of the bleeding characteristic on density and rheology in cement slurry [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 269: 121316.
- [18] ROUSSEL N, LEMAÎTRE A, FLATT R J, et al. Steady state flow of cement suspensions: A micromechanical state of the art [J]. *Cement and Concrete Research*, 2010, 40(1): 77-84.
- [19] 韩鑫, 叶飞, 梁晓明, 等. 盾构隧道壁后注浆地层及浆液颗粒特性分析[J]. *现代隧道技术*, 2020, 57(增刊 1): 191-202.  
HAN X, YE F, LIANG X M, et al. Analysis of the particle characteristic of the surrounding rock and grout as backfill grouting of shield tunnel [J]. *Modern Tunnelling*

- Technology, 2020, 57(Sup 1): 191-202. (in Chinese)
- [20] CALMON J L, TRISTÃO F A, GIACOMETTI M, et al. Effects of BOF steel slag and other cementitious materials on the rheological properties of self-compacting cement pastes [J]. Construction and Building Materials, 2013, 40: 1046-1053.
- [21] ZHANG T S, YU Q J, WEI J X, et al. A gap-graded particle size distribution for blended cements: Analytical approach and experimental validation [J]. Powder Technology, 2011, 214(2): 259-268.
- [22] KIM J H, YIM H J, FERRON R D. In situ measurement of the rheological properties and agglomeration on cementitious pastes [J]. Journal of Rheology, 2016, 60 (4): 695-704.
- [23] AUTIER C, AZEMA N, TAULEMESSE J M, et al. Mesostructure evolution of cement pastes with addition of superplasticizers highlighted by dispersion indices [J]. Powder Technology, 2013, 249: 282-289.
- [24] 张艳荣. 水泥-化学外加剂-水分散体系早期微结构与流变性 [D]. 北京: 清华大学, 2014.
- ZHANG Y R. Early microstructure and rheology of cement-chemical admixture-water dispersion system [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014. (in Chinese)
- [25] VENKITEELA G, SUN Z H. In situ observation of cement particle growth during setting [J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(3): 211-218.
- [26] QIAN Y, KAWASHIMA S. Distinguishing dynamic and static yield stress of fresh cement mortars through thixotropy [J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 86: 288-296.
- [27] YIM H J, KIM J H, SHAH S P. Cement particle flocculation and breakage monitoring under Couette flow [J]. Cement and Concrete Research, 2013, 53: 36-43.
- [28] SENAPUTRA A, JONES F, FAWELL P D, et al. Focused beam reflectance measurement for monitoring the extent and efficiency of flocculation in mineral systems [J]. AIChE Journal, 2014, 60(1): 251-265.

(编辑 XXX)