



考虑水化叠加效应的硅酸盐硫铝酸盐复合浆流变特性

范建国 刘人太 李峻昌 孙翔 陈孟军 白继文 朱志敬 马晨阳

引用本文：

范建国, 刘人太, 李峻昌, 等. 考虑水化叠加效应的硅酸盐硫铝酸盐复合浆流变特性[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(10): 213–226.

FAN Jianguo, LIU Rentai, LI Junchang. Rheological properties study of portland and sulphaaluminate cement composite slurry considering hydration superposition effect[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(10): 213–226.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1954>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

吡啶对褐煤水煤浆流变性的影响规律研究

Study on effect of pyridine on rheological properties of lignite water slurry

煤炭科学技术. 2022, 50(8): 270–276 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/91a630e4-55b4-4671-a0ec-bf80602b800f>

高水灰比下超细加工对硫铝酸盐水泥注浆材料微结构与力学性能影响

Effect of ultrafine process on microstructure and mechanical properties of sulphaaluminate cement grouting materials under high water–cement ratio

煤炭科学技术. 2025, 53(8): 304–315 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0611>

复合激发剂作用下矿渣钢渣胶凝体系的宏观观特性

Macroscopic and microscopic characteristics of slag–steel slag cementitious system under action of composite activator

煤炭科学技术. 2025, 53(8): 375–386 <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0280>

聚羧酸减水剂对硫铝酸盐水泥基注浆材料影响

Effect of polycarboxylic acid superplasticizer on sulphaaluminate cement based grouting material

煤炭科学技术. 2025, 53(4): 348–361 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1918>

瓦斯抽采钻孔封孔水泥砂浆黏度时变性扩散模型

Time– dependent viscosity diffusion model of cement mortar grouting for gas drainage borehole sealing

煤炭科学技术. 2020, 48(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/1460c2ea-87d8-4229-85ee-9cd06c658c4c>

超细硫铝酸盐水泥复合体系注浆加固性能优化

Optimization of grouting reinforcement performance of superfine sulfoaluminate cement composite system

煤炭科学技术. 2025, 53(6): 166–180 <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0100>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

地球科学与工程



移动扫码阅读

范建国, 刘人太, 李峻昌, 等. 考虑水化叠加效应的硅酸盐-硫铝酸盐复合浆流变特性[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(10): 213–226.

FAN Jianguo, LIU Rentai, LI Junchang, et al. Rheological properties study of portland and sulphaaluminate cement composite slurry considering hydration superposition effect[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(10): 213–226.

考虑水化叠加效应的硅酸盐-硫铝酸盐复合浆流变特性

范建国^{1,2}, 刘人太^{1,2,3}, 李峻昌¹, 孙翔², 陈孟军³, 白继文¹, 朱志敬¹, 马晨阳³

(1. 山东大学 岩土与地下工程研究院, 山东 济南 250061; 2. 山东能源集团有限公司, 山东 济南 250014;

3. 山东大学 未来技术学院, 山东 济南 250003)

摘要: 硅酸盐-硫铝酸盐水泥(PO-SAC)复合浆液具有凝结时间短、早期强度高和抗渗性好等优点, 在煤矿突涌水治理工程中具有广阔的应用前景。在实际注浆参数设计过程中, 需要揭示PO-SAC复合浆液的流变特性与黏度时变规律。研究了复合比和水灰比对PO-SAC复合浆液黏度时变行为的影响。浆液的复合质量比从10:0到0:10, 水灰比为0.5~1.0。结果表明: 硅酸盐水泥(PO)和硫铝酸盐水泥(SAC)具有水化叠加效应, 30%的SAC对OPC的促进作用最强, 使浆液黏度提高了4倍以上。复合浆液的水灰比与黏度值和黏度增长率成反比。不同水灰比条件下复合浆液黏度的时变曲线符合二次方程的形式。浆体的流动模式与水灰比有关, 与复合比无关, 浆液的屈服应力和塑性黏度随水灰比的增加而降低。减水剂能够显著降低复合浆液的初始黏度值, 1%的减水剂使样品的初始黏度值降低了82.46%以上。将PO-SAC材料应用于某煤矿底板突涌水治理工程, 有效封堵了含水层裂隙出水, 保障了煤矿安全开采。可为PO-SAC浆液注浆理论建立、数值计算和注浆参数设计提供参考, 助力煤矿突涌水高效治理。

关键词: 硅酸盐-硫铝酸盐复配浆液; 黏度时变性; 流变性; 微观结构; 水化叠加效应

中图分类号: TU592 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2025)10-0213-14

Rheological properties study of portland and sulphaaluminate cement composite slurry considering hydration superposition effect

FAN Jianguo^{1,2}, LIU Rentai^{1,2,3}, LI Junchang¹, SUN Xiang², CHEN Mengjun³,
BAI Jiwen¹, ZHU Zhijing¹, MA Chenyang³

(1. Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Shandong Energy Group Co., Ltd, Jinan 250014, China; 3. School of Future Technology, Shandong University, Jinan 250003, China)

Abstract: The silicate-sulphaaluminate cement (PO-SAC) composite slurry has the advantages of short setting time, high early strength and good impermeability, and has broad application prospects in the treatment of coal mine water inrush. In the process of actual grouting parameter design, it is necessary to reveal the rheological characteristics and viscosity time-varying law of PO-SAC composite slurry. The effects of compound ratio and water-cement ratio on the viscosity time-varying behavior of PO-SAC composite slurry were studied. The composite ratio of the slurry is from 10 : 0 to 0 : 10, and the water-cement ratio is from 0.5 to 1.0. The results show that Portland cement (PO) and sulphaaluminate cement (SAC) have a hydration superposition effect, and 30% SAC has the strongest promoting effect on OPC, which increases the slurry viscosity by more than 4 times. The water-cement ratio of the composite slurry is inversely proportional to the

收稿日期: 2024-12-30 策划编辑: 常琛 责任编辑: 陈思成 DOI: 10.12438/cst.2024-1954

基金项目: 国家资助博士后研究人员计划资助项目(GZB20240408); 中国博士后科学基金面上基金资助项目(2024M761807)

作者简介: 范建国(1971—), 男, 山东济南人, 研究员, 硕士。E-mail: 17854172682@163.com

通讯作者: 朱志敬(1997—), 男, 山东东营人, 助理研究员, 博士。E-mail: zhuzhijing@sdu.edu.cn

viscosity value and the viscosity growth rate. The time-varying curve of the viscosity of the composite slurry under different water-cement ratio conditions conforms to the form of a quadratic equation. The flow pattern of the slurry is related to water-cement ratio and has nothing to do with the composite ratio. The yield stress and plastic viscosity of the slurry decrease with the increase of water-cement ratio. The water reducing agent can significantly reduce the initial viscosity of the composite slurry, and the initial viscosity of the sample is reduced by more than 82.46% when the water reducing agent is 1%. The PO-SAC material was applied to a coal mine floor water inrush treatment project, which effectively blocked the aquifer fissure water and ensured the safe mining of coal mines. It can provide reference for the establishment of PO-SAC slurry grouting theory, numerical calculation and grouting parameter design, and help the efficient treatment of water inrush in coal mines.

Key words: portland and sulphaaluminate cement composite slurry; time-varying characteristics of viscosity; rheology; microstructure; hydration superposition effect

0 引言

煤矿施工面临着日益复杂的水文地质环境^[1], 大量高风险、深埋深工程正在建设。施工过程中经常发生涌水、涌泥灾害, 造成严重的经济损失和人员伤亡。注浆作为围岩加固和裂隙堵水的有效方法被广泛应用^[2-4]。然而, 堵水效果取决于注浆材料的性能。目前的动水注浆材料 OPC、SAC 和化学浆液存在一系列缺点。OPC 具有凝结时间长、析水率高、施工性差等缺点。SAC 价格高, 长期强度低。化学浆液机械性能不足、价格高、环保性差。因此, 新型高效堵漏注浆材料的研究一直是学者们关注的热点问题^[5-6]。复合是提高注浆材料性能的有效方法。对各种水泥与辅助胶凝材料和添加剂的复合进行了深入探讨, 在复合材料方面也取得了一些进展^[7-10]。CLARAMUNT 等^[11]研究了植物纤维预先角化对水泥砂浆复合材料的影响。结果表明, 对纤维的前处理对所得水泥基复合材料的机械性能和耐久性有好处。同时, 确定浆液的流变特性对于确保其扩散机理和工程适用性也是十分必要的^[12-14]。ZHAO 等^[15]将铁尾矿(IT)与 OPC 混合, 分析了 IT 对混合浆液流变特性的影响。研究表明, 由于掺入了铁尾矿, 新拌浆液的屈服应力和塑性黏度都降低了。因此, 掺入铁尾矿的浆液会在地层中进一步扩散。KE 等^[16]发现, 硅灰(SF)能显著降低硫铝酸钙浆液的最大剪切应力和塑性黏度, 但屈服应力明显增加。他们的研究成果对注浆参数设计具有重要意义。研究成果为煤矿注浆加固的浆液设计和流变参数选择提供了参考。以往的研究表明, 将 OPC 和 SAC 混合得到的复

合浆体具有水化叠加效应^[8], 即两者的水化产物相互消耗, 进而水化作用相互促进, 实现 2 种材料水化作用叠加的效果。水化叠加后的复合浆体不仅具有更高的抗压和抗折强度, 而且凝结时间更短。因此, 这种水化叠加效应非常适用于动态堵水。然而, PO-SAC 复合浆液的水化叠加效应仍不明确。此外, 学者对 PO-SAC 复合浆液力学性能的研究较多, 对流变特性的关注却较少, 浆液的黏度变化反映了其从稀流体转变为稠流体直至凝固的过程, 其变化速率直接影响动水封堵的效率, 浆液的流变参数影响其在围岩中的注浆扩散过程, 对于理论计算、材料配比和注浆参数设计具有重要的参考意义, 因此是黏度时变性和流变特性是突涌水治理的关键参数。

考虑到水化叠加效应, 笔者研究了 PO-SAC 复合浆液黏度和流变特性的时变行为。PO-SAC 浆液的复合比例为 10:0 至 0:10, 水灰比为 0.5~1.0, 试验在室温下进行。通过 XRD 分析了水化叠加对浆石水化产物的影响。

1 材料与方法

1.1 材料

普通 PO42.5 硅酸盐水泥(PO42.5)和快硬 42.5 硫铝酸盐水泥(R·SAC42.5)被用在了这次试验中。2 种材料的化学和矿物组成的比例见表 1。2 种材料的粒径分布如图 1 所示。普通硅酸盐水泥符合 GB 175—2007 标准, 硫铝酸盐水泥符合 GB 20472—2006 标准, 试验所用水均为去离子水。

1.2 试验仪器

测量仪器选用 RST·SST 型软固体流变仪。复

表 1 OPC 和 SAC 中化学成分的质量分数

Table 1 Mass fraction of chemical composition in OPC and SAC

化合物	w(CaO)	w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(Fe ₂ O ₃)	w(MgO)	w(SO ₃)	w(K ₂ O)	w(Na ₂ O)	w(TiO ₂)	w(LOI)	w(其他)	%
OPC	53.65	22.33	9.19	2.78	3.89	3.45	0.75	0.22	0.44	2.98	0.32	
SAC	35.25	16.22	28.45	1.58	1.04	8.36	0.55	0.52	0.44	7.38	0.21	

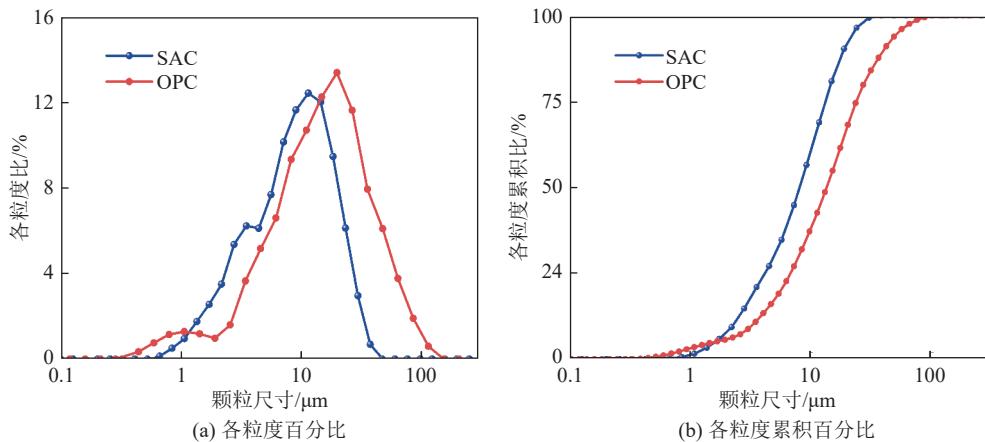


图 1 SAC 和 OPC 的粒度分布
Fig.1 Particle size distribution of SAC and OPC

合浆液液采用 CC40 圆筒式转子。剪切速率和测试黏度分别为 $0.013 \sim 7800 \text{ s}^{-1}$ 及 $10^{-10} \sim 5.4 \times 10^9 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。采用 Rheo3000 软件进行试验与分析。在测量过程中, 被测浆液的流变参数与温度变化被实时显示在计算机上。CC40 型转子在试样当中旋转, 试样和转子被放在圆筒容器当中。圆筒容器外包裹有控温筒, 控温筒与水浴锅通过 3 根管相连。控温装置的控温为 $-20 \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$ 。水泥搅拌机的旋转速率为 $0 \sim 2500 \text{ r/min}$ 。

1.3 试验方法

试验在室温下进行。试验过程中, 浆液的温度控制在 $20 \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。复合浆液试验变量及梯度见表 2。黏度测试中转子的转速为 60 r/min 。流变测量中的

表 2 试验变量及梯度
Table 2 Test variables and gradients

试验变量	试验梯度
	高复合比 $10 : 0, 9 : 1, 8 : 2, 7 : 3$
$m(\text{OPC}) : m(\text{SAC})$	中复合比 $6 : 4, 5 : 5, 4 : 6$
	低复合比 $3 : 7, 2 : 8, 1 : 9, 0 : 10$
水灰比	复合比 $4 : 1, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$ 复合比 $1 : 1, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$ 复合比 $1 : 4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$
黏度	复合比 $4 : 1, 0.1\%, 0.3\%, 0.5\%, 1.0\%$
减水剂掺量	复合比 $1 : 1, 0.1\%, 0.3\%, 0.5\%, 1.0\%$ 复合比 $1 : 4, 0.1\%, 0.3\%, 0.5\%, 1.0\%$
水灰比	复合比 $4 : 1, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$ 复合比 $1 : 1, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$ 复合比 $1 : 4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$
流变	复合比 $4 : 1, 0.1\%, 0.3\%, 0.5\%, 1.0\%$ 复合比 $1 : 1, 0.1\%, 0.3\%, 0.5\%, 1.0\%$ 复合比 $1 : 4, 0.1\%, 0.3\%, 0.5\%, 1.0\%$

剪切速率设定为 $10, 50, 100, 160, 260, 370, 470, 580, 680, 790, 895, 1000 \text{ s}^{-1}$ 。

2 结果和讨论

2.1 复配浆液的黏度时变性

通过试验探究复配比例、水灰比和减水剂对复合浆液黏度时变性的影响。

2.1.1 复配比例对黏度时变性的影响

通过黏度测试获得了不同比例的复合浆液的黏度数据。浆液的复合比例分为高复合比例、中复合比例和低复合比例。复合浆液的水灰比为 0.7。

高复合比是指 OPC 与 SAC 的质量比为 $10 : 0, 9 : 1, 8 : 2, 7 : 3$ 。图 2 显示了高复合比时复合浆液黏度的时变曲线。用函数拟合了高复合比时浆液的时变曲线, 拟合方程见表 3。拟合方程可以反映复合浆液黏度随时间的变化规律, 可用于理论计算和数值模拟。

如图 2 所示, 4 种不同复合比例的样品的黏度均随时间的推移而增加, 其增长速度由快到慢的排序

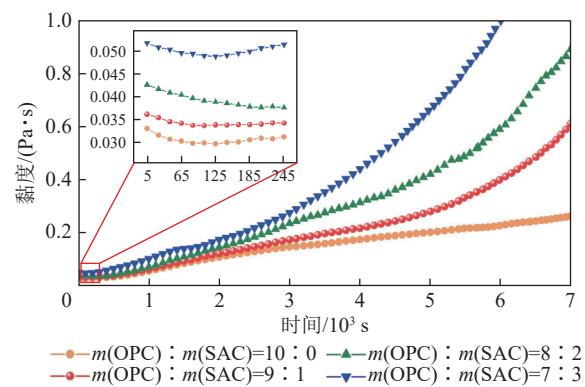


图 2 高复合比浆液黏度的时变曲线
Fig.2 Time-varying curves of slurry viscosity at high composite ratios

表3 高复合比时的黏度时变拟合方程
Table 3 Viscosity time-varying fitting equations at high complex ratio

$m(\text{OPC}) : m(\text{SAC})$	拟合方程	R^2
10 : 0	$\mu_{10}(t) = -4.652 \times 10^{-10} t^2 + 3.679 \times 10^{-5} t + 0.03$	0.996 83
9 : 1	$\mu_9(t) = 9.425 \times 10^{-9} t^2 + 3.952 \times 10^{-6} t + 0.055$	0.978 98
8 : 2	$\mu_8(t) = 1.525 \times 10^{-8} t^2 + 2.236 \times 10^{-6} t + 0.06$	0.987 03
7 : 3	$\mu_7(t) = 2.654 \times 10^{-8} t^2 - 1.267 \times 10^{-5} t + 0.077$	0.997 11

为: 7 : 3、8 : 2、9 : 1、10 : 0。在 0 ~ 3 000 s, 4 个样品的黏度增长缓慢, 黏度增长与时间的关系近似线性。在 3 000 ~ 7 000 s, 复合比例为 10 : 0 的样品黏度增长缓慢, 而其余 3 种样品的黏度则由于添加了 SAC 而显著增加。

在 5 ~ 245 s, 7 : 3、8 : 2、9 : 1 和 10 : 0 样品的初始黏度值分别为 0.052、0.043、0.036、0.033 Pa · s。分析表明, 浆液是一种剪切稀化流体^[17], 因此当浆液被转子剪切时会造成黏度降低。此外, 在水化反应的初始阶段, 水泥颗粒会絮凝, 正在水化的水泥颗粒会包裹未反应的水泥颗粒, 因此黏度会缓慢上升^[17-19]。125 s 时, 样品 7 : 3 的黏度达到最低点, 也就是黏度的临界极值点。7 : 3 浆液的黏度在极值点之后有所上升, 这或许是因为 30% 的 SAC 对 OPC 有促进作用, 浆液的黏度提高了 4 倍以上, 在浆液中形成了大量的胶凝网络结构^[20], 同时 SAC 的前期水化速率更强, 以上原因共同导致样品的黏度值增加。

中等复合比例是指 OPC 与 SAC 的比例为 6 : 4、5 : 5 或 4 : 6。**图 3** 显示了中等复合比例下复合浆

液黏度的时变曲线。**表 4** 列出了中等复合比例下浆液黏度的时变拟合方程。在反应初期, 3 种样品的黏度都有一定程度的下降。几分钟后, 3 种样品的黏度迅速上升。复合体系的黏度增长速度与体系中 SAC 的质量分数呈正相关, 增长速度由快到慢的顺序为: 4 : 6、5 : 5、6 : 4。1 000 s 后, 5 : 5 和 6 : 4 样品的黏度与时间呈近似线性增长, 而 4 : 6 样品的黏度在 1 800 s 后迅速增长。

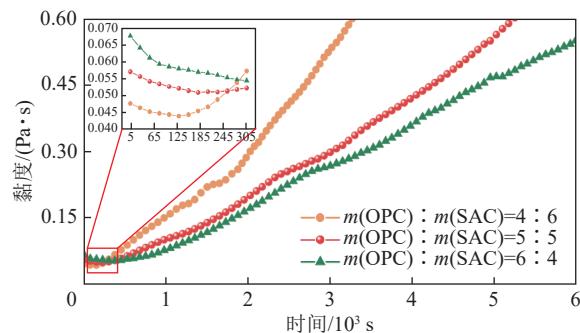


图 3 中等复合比例下浆液黏度的时变曲线

Fig.3 Time-varying curves of slurry viscosity at medium composite ratio

表4 中等复合比时的黏度时变拟合方程
Table 4 Viscosity time-varying fitting equations for medium complex ratio

$m(\text{PO42.5}) : m(\text{SAC42.5})$	拟合方程	R^2
6 : 4	$\mu_6(t) = 3.479 \times 10^{-9} t^2 + 6.982 \times 10^{-5} t + 0.022$	0.994 48
5 : 5	$\mu_5(t) = 8.124 \times 10^{-9} t^2 + 6.465 \times 10^{-5} t + 0.034$	0.998 53
4 : 6	$\mu_4(t) = 3.191 \times 10^{-8} t^2 + 6.448 \times 10^{-5} t + 0.045$	0.997 91

在 5 ~ 305 s, 样品 4 : 6、5 : 5 和 6 : 4 的初始黏度值分别为 0.048、0.057、0.067 Pa · s。由于剪切效应, 这 4 种样品的黏度在最初的 150 s 内都有所下降。所测浆体的黏度变化由 2 个趋势决定: 转子对浆体的剪切效应和水泥颗粒的水化效应^[21]。对于中等复合比的浆体, SAC 质量分数越高, 黏度增长率越大, 临界极值点越小。

低复合比是指 OPC 与 SAC 的比例为 3 : 7、2 : 8、1 : 9 或 0 : 10。**图 4** 显示了低复合比时复合浆液黏度的时变曲线。**表 5** 列出了低复合比时浆液

黏度的时变拟合方程。

如**图 4** 所示, 4 种样品的黏度在略微下降后又有所上升, 其增长速度由快到慢依次为: 3 : 7、2 : 8、1 : 9、0 : 10。低复合比时的黏度增长率与 SAC 的质量分数不再呈正相关。相反, SAC 质量分数越高, 黏度增长率越小。这是因为 OPC 的加入会促进其与 SAC 的水化叠加, 从而使黏度增长更快。样品 7 : 3 和 8 : 2 的浆体黏度增长速度呈加速趋势, 而样品 1 : 9 和 0 : 10 的浆体黏度增长速度几乎呈线性趋势, 两者都具有波浪状特征, 这是部分硫酸盐水

表5 低复合比时的黏度时变拟合方程
Table 5 Viscosity time-varying fitting equations at low complex ratio

$m(\text{PO42.5}) : m(\text{SAC42.5})$	拟合方程	R^2
3 : 7	$\mu_3(t) = 1.281 \times 10^{-7}t^2 - 1.096 \times 10^{-4}t + 0.086$	0.991 49
2 : 8	$\mu_2(t) = 8.149 \times 10^{-8}t^2 - 7.474 \times 10^{-5}t + 0.069$	0.990 34
1 : 9	$\mu_1(t) = 4.231 \times 10^{-9}t^2 + 9.131 \times 10^{-5}t - 0.007$	0.989 90
0 : 10	$\mu_0(t) = 4.035 \times 10^{-9}t^2 + 7.216 \times 10^{-5}t - 0.017$	0.994 05

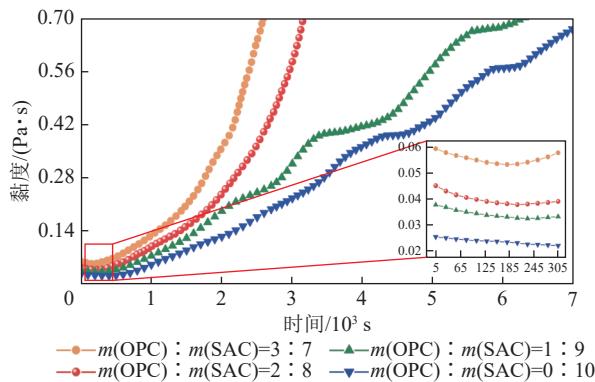


图4 低复合比时浆液黏度的时变曲线

Fig.4 Time-varying curves of slurry viscosity at low composite ratio

泥颗粒快速胶结和转子剪切破坏协同作用的结果。

样品 7 : 3 和 8 : 2 的黏度增长速度持续加快,而样品 1 : 9 和 0 : 10 的黏度增长速度几乎呈线性。样品 1 : 9 和 0 : 10 的黏度曲线均呈波形。这是 SAC 颗粒的快速凝胶化和转子的剪切扰动协同作用的结果。

在 5 ~ 305 s, 样品 3 : 7、2 : 8、1 : 9 和 0 : 10 的初始黏度值分别为 0.059、0.045、0.038、0.026 Pa·s。在 175 s 时, 样品 3 : 7 的黏度曲线出现了一个最小值。样品 2 : 8 和 1 : 9 的临界极点都在 200 s 左右,样品 0 : 10 的黏度直到 500 s 才开始上升。对于低复合比的浆液, 样品中的 OPC 质量分数越高, 黏度增长速度越快, 临界极点越小。

从以上研究可以看出, 复合浆液的初始黏度值和黏度增长率与 SAC 的质量分数密切相关。随着 SAC 质量分数的增加, 复合浆液的黏度和黏度增长

率先增大后减小, 这是因为随着 SAC 的质量分数提高, 浆液的水化速率提升, 因此黏度和黏度增长速率有所提高。而随着 SAC 质量分数的继续提高, 浆液的黏度和黏度增长速率有所下降, 这表明 OPC 和 SAC 的水化叠加作用减弱, SAC 与 OPC 复合浆液的水化速率仅在适中的复配比例下才高于 SAC 浆液, 随着 SAC 质量分数的增加, OPC 与 SAC 的协同水化减弱, 因此黏度有所下降。

2.1.2 水灰比对黏度时变特性的影响

通过黏度测试获得了不同水灰比的复合浆液的黏度数据。浆液的复合比例为 4 : 1、1 : 1 和 1 : 4。复合浆液的水灰比为 0.5 ~ 1.0。

图 5 显示了不同水灰比的复合浆液(4 : 1)黏度的时变曲线。表 6 列出了不同水灰比的复合浆液(4 : 1)黏度的时变拟合方程。

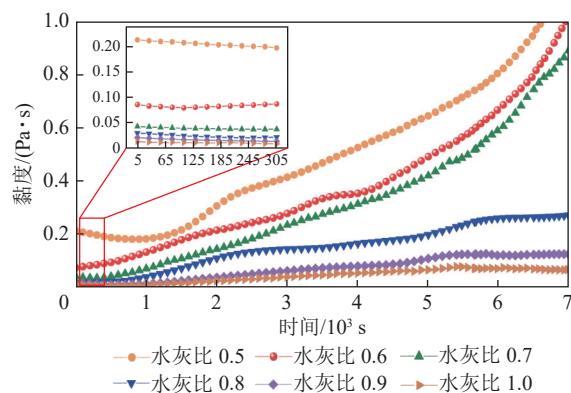


图5 复合比为 4 : 1 的浆液黏度时变曲线

Fig.5 Time-varying viscosity of slurry with 4 : 1 composite ratio

表6 复合比为 4 : 1 时的黏度时变拟合方程

Table 6 Viscosity time-varying fitted equations at 4 : 1 composite ratio

水灰比	拟合方程	R^2
0.5	$\mu_{0.5}(t) = 1.154 \times 10^{-8}t^2 + 4.112 \times 10^{-5}t + 0.167$	0.989 14
0.6	$\mu_{0.6}(t) = 1.675 \times 10^{-8}t^2 - 4.406 \times 10^{-6}t + 0.121$	0.983 76
0.7	$\mu_{0.7}(t) = 1.525 \times 10^{-8}t^2 + 2.236 \times 10^{-6}t + 0.06$	0.987 03
0.8	$\mu_{0.8}(t) = -3.033 \times 10^{-10}t^2 + 4.086 \times 10^{-5}t + 0.014$	0.993 34
0.9	$\mu_{0.9}(t) = -4.323 \times 10^{-10}t^2 + 2.287 \times 10^{-5}t - 0.001$	0.973 19
1.0	$\mu_{1.0}(t) = -1.009 \times 10^{-9}t^2 + 1.837 \times 10^{-5}t - 0.002$	0.957 06

如图5所示,6个样品的黏度在短暂下降后继续上升。浆液的黏度与水灰比呈负相关。水灰比为0.5、0.6和0.7的样品的黏度增长率都会随着时间的推移而增加,而水灰比为0.8、0.9和1.0的样品的黏度增长曲线则趋于平缓。因此,水灰比是影响复合材料浆液黏度增长的一个重要因素。

在5~305 s,水灰比为0.5~1.0的浆液的初始黏度值分别为0.214、0.076、0.043、0.020、0.019、0.013 Pa·s。水灰比对复合浆液的初始黏度有很大影响。6种样品的黏度在最初的105 s内持续下降,然后在水化反应的作用下开始上升。

不同水灰比的复合浆液(1:1)黏度的时变曲线如图6所示。

表7列出了不同水灰比的复合浆液(1:1)黏度

表7 复合比为1:1时的黏度时变拟合方程
Table 7 Viscosity time-varying fitting equations for 1:1 composite ratio

水灰比	拟合方程	R^2
0.5	$\mu_{0.5}(t)' = 1.285 \times 10^{-7} t^2 + 4.362 \times 10^{-5} t + 0.183$	0.997 31
0.6	$\mu_{0.6}(t)' = 7.277 \times 10^{-8} t^2 + 1.277 \times 10^{-4} t + 0.073$	0.996 38
0.7	$\mu_{0.7}(t)' = 8.124 \times 10^{-9} t^2 + 6.465 \times 10^{-5} t + 0.034$	0.998 53
0.8	$\mu_{0.8}(t)' = 1.137 \times 10^{-8} t^2 + 3.231 \times 10^{-5} t + 0.014$	0.997 26
0.9	$\mu_{0.9}(t)' = 1.539 \times 10^{-8} t^2 - 3.439 \times 10^{-6} t + 0.027$	0.994 82
1.0	$\mu_{1.0}(t)' = 1.707 \times 10^{-8} t^2 - 2.059 \times 10^{-5} t + 0.015$	0.994 55

从图6可以看出,水灰比为0.5和0.6的样品有明显的黏度下降过程,随后黏度迅速上升。水灰比为0.7~1.0的4个样品的黏度在开始时略有下降,随后黏度略有上升。在5~305 s,水灰比为0.5~1.0的浆液的初始黏度值分别为0.253、0.107、0.057、0.033、0.024、0.013 Pa·s。与复合比例为4:1的样品相比,复合比例为1:1的浆液的初始黏度平均增加了30.48%。

不同水灰比的复合浆液(1:4)黏度的时变曲线如图7所示。表8列出了不同水灰比的复合浆液(1:4)黏度的时变拟合方程。如图7所示,6个样品的黏度先是略有下降,然后持续上升。浆液黏度的增长速度与水灰比成反比。与复合比为4:1和1:1的浆液相比,复合比为1:4的浆液的黏度增长率更大。

在5~305 s,水灰比为0.5~1.0的浆液的初始黏度值分别为0.214、0.076、0.043、0.020、0.019、0.013 Pa·s。6种样品的黏度在最初的105 s内都有所下降。

2.1.3 减水剂对黏度时变性的影响

通过黏度测试试验获得了不同的减水剂质量分数下复配浆液的黏度曲线。浆液的复配比使用4:1、

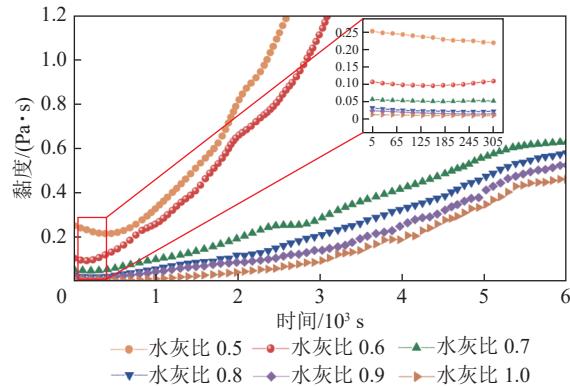


图6 复合比例为1:1的浆液黏度时变曲线

Fig.6 Time-varying viscosity of slurry with 1:1 composite ratio

的时变拟合方程。

1:1和1:4。复配浆液的水灰比为0.7,减水剂的添加量为1‰、3‰、5‰、1%。

减水剂质量分数不同的浆液在复配比例为4:1下的黏度时变性曲线如图8。拟合方程见表9。如图8所示,5组样品的黏度先小幅度下降后持续上升在测试开始后。未添加减水剂的浆液黏度增长速率最快且远高于其他样品,添加1‰减水剂的样品黏度也明显高于添加3‰、5‰和1%减水剂的样品。

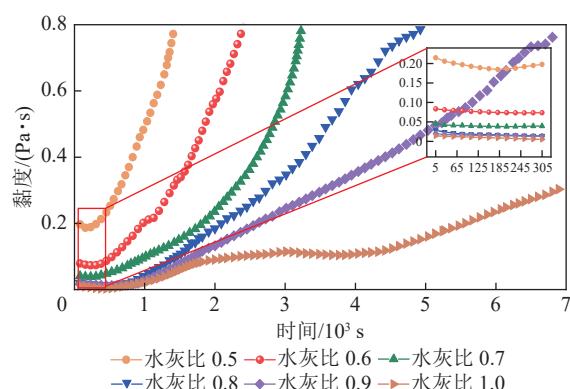


图7 复合比例为1:4的浆液黏度时变曲线

Fig.7 Time-varying viscosity curve of slurry with 1:4 composite ratio

表 8 复合比为 1 : 4 时的黏度时变拟合方程
Table 8 Viscosity time-varying fitting equations for 1 : 4 composite ratio

水灰比	拟合方程	R^2
0.5	$\mu_{0.5}(t)'' = 3.208 \times 10^{-7}t^2 - 3.332 \times 10^{-5}t + 0.193$	0.993 44
0.6	$\mu_{0.6}(t)'' = 1.321 \times 10^{-7}t^2 - 1.993 \times 10^{-5}t + 0.076$	0.998 84
0.7	$\mu_{0.7}(t)'' = 8.149 \times 10^{-8}t^2 - 7.474 \times 10^{-5}t + 0.069$	0.990 34
0.8	$\mu_{0.8}(t)'' = 2.151 \times 10^{-8}t^2 + 6.250 \times 10^{-5}t - 0.023$	0.991 31
0.9	$\mu_{0.9}(t)'' = 9.276 \times 10^{-9}t^2 + 5.305 \times 10^{-5}t - 0.014$	0.997 02
1.0	$\mu_{1.0}(t)'' = 3.331 \times 10^{-9}t^2 + 1.581 \times 10^{-5}t + 0.016$	0.946 02

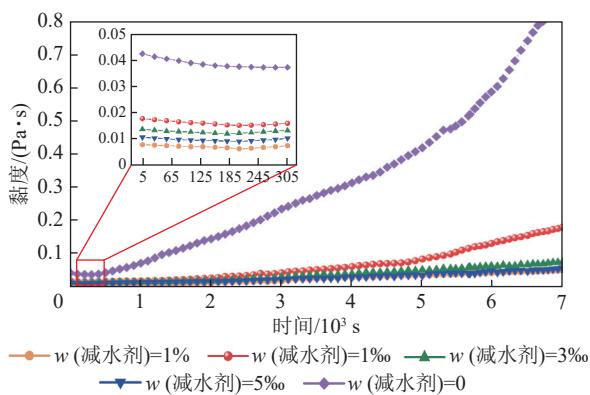


图 8 复配比 4 : 1 下复合浆液的黏度时变曲线

Fig.8 Time-varying viscosity curves of composite slurries at a compound ratio of 4 : 1

浆液的黏度及其增长速率随着减水剂添加量的增大而减小,分析原因为聚羧酸减水剂在水中起到了分散和润滑作用,使得体系絮凝水量降低,自由水含量提高,因此降低了体系的黏度。

在 5 ~ 305 s,相较于未添加减水剂的样品黏度值(0.043 Pa·s),减水剂添加量 1‰、3‰、5‰、1% 可分别使样品的初始黏度值降低 58.14%、67.44%、74.42%、81.40%。4 组添加减水剂的样品的临界极值点相近,均在 180 ~ 230 s,略低于未添加减水剂的 280 s。分析显示聚羧酸减水剂的润滑作用在更大程度上减弱了转子对浆液的剪切稀化效果,从而变相提高了悬浮液的稳定性,因此浆液提前来到了临界极值点。

表 9 复配比 4 : 1 下的黏度时变性拟合方程
Table 9 Viscosity time-varying fitted equations at 4 : 1 compounding ratio

减水剂质量分数/%	拟合方程	R^2
0	$\mu_0(t) = 1.525 \times 10^{-8}t^2 + 2.236 \times 10^{-6}t + 0.06$	0.987 03
0.1	$\mu_{1\%}(t) = -4.094 \times 10^{-9}t^2 - 6.216 \times 10^{-5}t + 0.021$	0.994 18
0.3	$\mu_{3\%}(t) = 6.642 \times 10^{-10}t^2 + 4.735 \times 10^{-6}t + 0.01$	0.992 23
0.5	$\mu_{5\%}(t) = 5.878 \times 10^{-10}t^2 + 2.454 \times 10^{-6}t + 0.01$	0.994 92
1	$\mu_{1\%}(t) = 3.194 \times 10^{-10}t^2 + 4.747 \times 10^{-6}t + 0.003$	0.989 13

减水剂质量分数不同的浆液在复配比例为 1 : 1 下的黏度时变性曲线如图 9 所示。复配比例 1 : 1 样品的黏度时变曲线被拟合,拟合方程见表 10。

如图 9 所示,减水剂质量分数为 0、1‰、3‰ 的样品的黏度先小幅度下降后明显上升,而减水剂质量分数为 5‰ 和 1% 的样品黏度增长缓慢。相比复配比例为 4 : 1 的样品,减水剂对复配比例 1 : 1 的样品黏度影响更大,分析原因为 1 : 1 样品具有更强的水化协同作用,而减水剂会促进水泥颗粒的相互分散并破坏絮凝结构,因此对 1 : 1 样品的影响更大。

在 5 ~ 305 s,未添加减水剂样品的初始黏度值

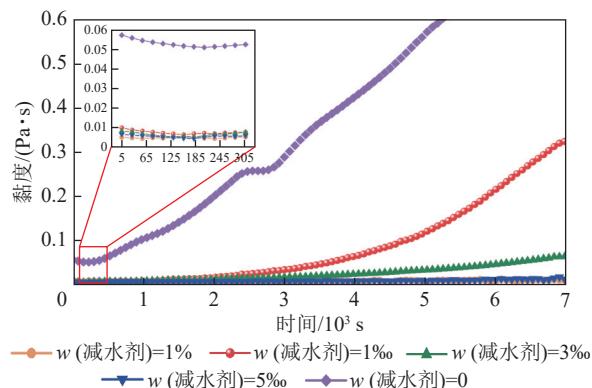


图 9 复配比 1 : 1 下复合浆液的黏度时变曲线
Fig.9 Viscosity time-varying curves of composite slurries at the compounding ratio of 1 : 1

表 10 复配比 1:1 下的黏度时变性拟合方程
Table 10 Viscosity time-varying fitted equations at 1:1 compounding ratio

减水剂质量分数/%	拟合方程	R^2
0	$\mu_0(t)' = 8.124 \times 10^{-9}t^2 + 6.465 \times 10^{-5}t + 0.034$	0.998 53
0.1	$\mu_{1\%}(t)' = 1.025 \times 10^{-8}t^2 - 3.014 \times 10^{-5}t + 0.026$	0.991 05
0.3	$\mu_{3\%}(t)' = 1.243 \times 10^{-8}t^2 - 1.026 \times 10^{-6}t + 0.008$	0.994 98
0.5	$\mu_{5\%}(t)' = 1.634 \times 10^{-10}t^2 - 9.798 \times 10^{-8}t + 0.007$	0.984 05
0.1	$\mu_{1\%}(t)' = 2.263 \times 10^{-11}t^2 + 5.633 \times 10^{-7}t + 0.006$	0.955 39

为 0.057 Pa·s, 而添加减水剂样品的初始黏度值均小于 0.01 Pa·s, 降幅均超过 82.46%。5 组样品的临界极值点均在 155~230 s。

减水剂质量分数不同的浆液在复配比例为 1:4 下的黏度时变性曲线如图 10 所示。复配比例 1:4 样品的黏度时变曲线被拟合, 拟合方程见表 11。

如图 10 所示, 未添加减水剂和添加 1‰减水剂的样品黏度增长速率较快, 而添加 3‰减水剂的样品在 4 500 s 之后才有明显的黏度提高, 添加 5‰和 1‰减水剂的样品黏度几乎保持不变。相比复配比例 1:1 和样品, 复配比例 1:4 样品受减水剂的影响更小。

在 5~305 s, 受 SAC 水泥速凝效果的影响, 5 组样品的初始黏度值分布更为均匀, 没有出现大幅变化的情况。5 组样品的初始黏度值分别为 0.045 Pa·s (0)、0.029 Pa·s (1‰)、0.019 Pa·s (3‰)、0.014 Pa·s (5‰)、0.009 Pa·s (1%)。5 组添加减水剂的样品的临界极值点均在 155~280 s。

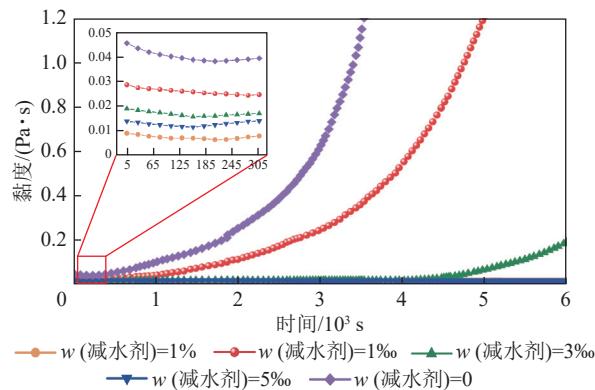


图 10 复配比 1:4 下复合浆液的黏度时变曲线
Fig.10 Viscosity time-varying curves of composite slurries at the compounding ratio of 1:4

(5‰)、0.009 Pa·s(1%)。5 组添加减水剂的样品的临界极值点均在 155~280 s。

表 11 复配比 1:4 下的黏度时变性拟合方程
Table 11 Viscosity time-varying fitted equations at compounding ratio 1:4

减水剂质量分数/%	拟合方程	R^2
0	$\mu_0(t)'' = 8.149 \times 10^{-8}t^2 - 7.474 \times 10^{-5}t + 0.069$	0.990 34
0.1	$\mu_{1\%}(t)'' = 8.640 \times 10^{-8}t^2 - 2.226 \times 10^{-4}t + 0.146$	0.995 48
0.3	$\mu_{3\%}(t)'' = 9.374 \times 10^{-9}t^2 - 4.038 \times 10^{-5}t + 0.045$	0.945 42
0.5	$\mu_{5\%}(t)'' = 1.521 \times 10^{-10}t^2 - 4.556 \times 10^{-7}t + 0.007$	0.989 77
0.1	$\mu_{1\%}(t)'' = 1.187 \times 10^{-10}t^2 + 3.325 \times 10^{-7}t + 0.007$	0.996 53

减水剂会破坏分散水泥颗粒的絮凝结构, 使体系中絮凝水和自由水的质量分数改变, 因此对复配浆液的初始黏度值及黏度增长速率影响巨大, 特别是复配比例为 1:1 的样品。1‰的减水剂就能使复配比例 4:1、1:1 和 1:4 样品的初始黏度值分别降低 58.14%、82.63% 和 35.56%。

2.2 复配浆液的流变特性

2.2.1 水灰比对浆液流变性能的影响

水泥基浆液在不同的水灰比下可表现出牛顿流体、宾汉姆流体和幂律流体的特征^[22]。幂律流体又可分为剪切稀化流体和剪切增稠流体。上述流体的

典型流变曲线如图 11 所示。图 11 中, τ 为剪切应力, τ_0 为屈服应力, μ_p 为塑性黏度, γ 为剪切速率, K 为稠度系数, n 为流变指数, μ 为动态黏度。曲线 3 是牛顿流体的典型曲线, 其他曲线为非牛顿流体。牛顿流体可以描述水灰比大于 2.0 的浆液。水灰比小于或等于 0.7 的浆液符合曲线 2 的形式。宾汉流体是一种含有固体颗粒的不均匀流体, 其屈服值与液体中颗粒之间的静电吸引力有关。水灰比在 0.8~1.0 的浆液符合 Bingham 模型^[23]。

通过分析剪切应力和剪切速率之间的关系, 分析了水灰比对浆液流变特性的影响, 并通过函数拟合。

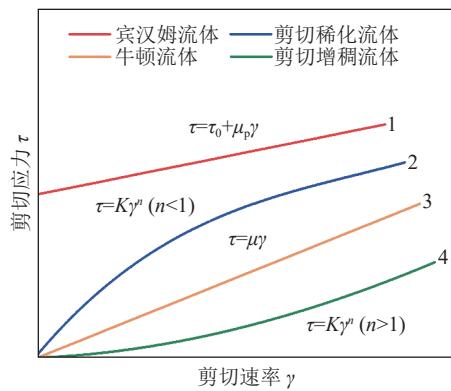


图 11 各种流体的流变曲线

Fig.11 Rheological curves for various fluids

图 12 为 3 种复合比下不同水灰比浆液的流变特性。所有浆液的剪切应力都与剪切速率成正比。对于不同复合比的浆液，剪切应力随水灰比的增加而减小。随着水灰比的增大，浆液的流变特性接近于水的流变特性。

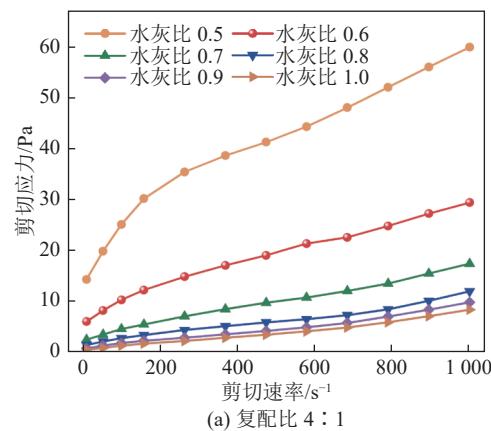
当水泥与水混合时，浆液是一种水-胶体-颗粒悬浮体系。受水化作用的影响，体系中固相和液相的体积会随时间发生变化。水灰比的减小会导致浆液中固体体积分数的增大以及水与水泥颗粒之间接触面积的增大，从而使体系的水化反应更加剧烈。然而，水化反应的加剧会减少体系中的自由水，增加胶体质量分数。浆液中胶体颗粒的增加会直接增加流体的黏度^[24]，在受到剪切力作用时，剪切力也会增加。

通过拟合图 12 中的曲线，得到了复合浆液的流变方程和流动模式(表 12)。随着水灰比的变化，浆液的流动模式也发生了变化。当水灰比为 0.5 或 0.6 时，剪切应力随剪切速率的增加而非线性增加，因此采用幂律模型来描述淤浆的流变特性。当浆液的水灰比为 0.7~1.0 时，浆液的剪切应力与剪切速率之比近似恒定。比较了幂律模型和宾汉模型对浆液流变曲线的描述。结果表明，Bingham 模型更符合 0.7~1.0 水灰比条件下的浆液流变曲线。

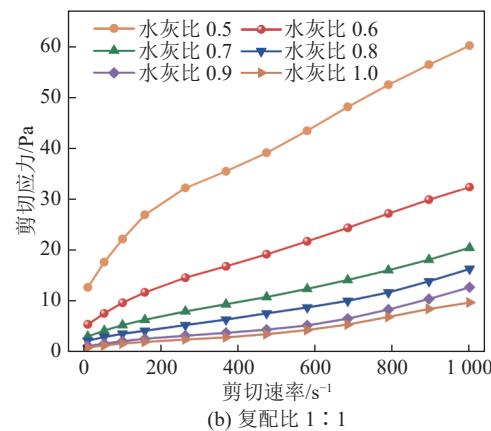
对于复合浆液，当水灰比小于 0.7 时，水灰比的增大或复合比的减小将分别导致稠度系数的减小和流变指数的增大。当水灰比介于 0.7~1.0 时，流变模型由幂律模型变为宾汉模型。浆液的屈服应力和黏度保持不变。黏度、屈服应力和水灰比之间的关系如图 13 所示。用幂律函数拟合屈服应力和塑性黏度随水灰比的变化，发现相关性显著。如图 13 所示，复合比为 1:1 的浆液具有较高的屈服应力和塑性黏度。新鲜浆液的黏度和屈服应力主要取决于浆液中胶体颗粒的浓度。因此，复合比为 1:1 的浆液

中含有更多的水化胶体，OPC 和 SAC 的水化作用相互促进并产生叠加效应。随着水灰比的增加，浆液的屈服应力和塑性黏度迅速降低，浆液的屈服应力受水灰比(a 为样品的水灰比， $a=W/C$, W 为水的质量； C 为水泥的质量)的影响比塑性黏度大。

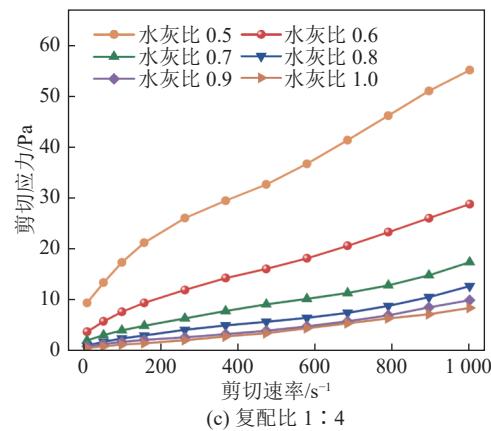
拟合函数的形式由式(1)和式(2)给出。式(1)表示复合材料浆液屈服应力随水灰比的变化规律，式(2)用于表征塑性黏度随水灰比的变化规律，水灰比为 0.7~1.0。



(a) 复配比 4:1



(b) 复配比 1:1



(c) 复配比 1:4

图 12 不同水灰比下复合浆液的流变特性
Fig.12 Rheological properties of composite slurries with different water-cement ratios

表 12 复配浆液的流变方程和流型

Table 12 Rheological equations and flow patterns of compounded slurries

复配比例	水灰比	Rheological equation	R^2	Flow pattern
4 : 1	0.5	$\tau = 4.892\gamma^{0.354}$	0.982	Power law model
	0.6	$\tau = 1.315\gamma^{0.441}$	0.979	Power law model
	0.7	$\tau = 2.309 + 0.015\gamma$	0.975	Bingham model
	0.8	$\tau = 1.212 + 0.01\gamma$	0.968	Bingham model
	0.9	$\tau = 0.47 + 0.008\gamma$	0.978	Bingham model
	1.0	$\tau = 0.201 + 0.007\gamma$	0.982	Bingham model
1 : 1	0.5	$\tau = 3.164\gamma^{0.419}$	0.980	Power law model
	0.6	$\tau = 0.768\gamma^{0.534}$	0.976	Power law model
	0.7	$\tau = 2.618 + 0.017\gamma$	0.976	Bingham model
	0.8	$\tau = 1.479 + 0.014\gamma$	0.973	Bingham model
	0.9	$\tau = 0.407 + 0.01\gamma$	0.945	Bingham model
	1.0	$\tau = 0.292 + 0.008\gamma$	0.958	Bingham model
1 : 4	0.5	$\tau = 1.607\gamma^{0.503}$	0.973	Power law model
	0.6	$\tau = 0.44\gamma^{0.60}$	0.978	Power law model
	0.7	$\tau = 1.898 + 0.015\gamma$	0.977	Bingham model
	0.8	$\tau = 0.861 + 0.011\gamma$	0.975	Bingham model
	0.9	$\tau = 0.445 + 0.009\gamma$	0.971	Bingham model
	1.0	$\tau = 0.193 + 0.008\gamma$	0.990	Bingham model

$$\tau_0(a) = D(a)^E \quad (1)$$

$$\mu_p(a) = F(a)^G \quad (2)$$

式中: D 和 E 为用来描述屈服应力与水灰比之间关系的系数; F 和 G 为用于描述塑性黏度与水灰比之间关系的系数。

根据上述分析, 可得出水灰比为 0.7 和 1.0 的复合浆液的流变公式。该式反映了复合淤浆流变性随水灰比的变化。计算式为式(3)。

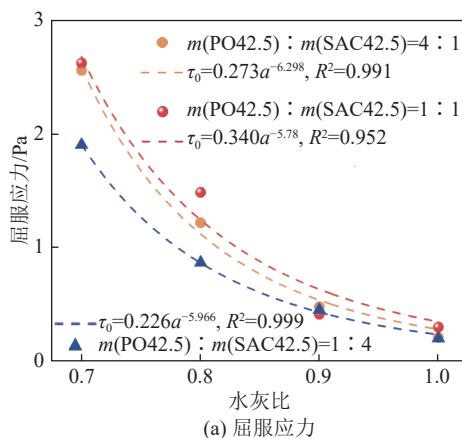


图 13 流变参数与水灰比的关系
Fig.13 Relationship between rheological parameters

$$\tau(a) = \tau_0(a) + \mu_p(a)\gamma = D(a)^E + F(a)^G\gamma \quad (3)$$

式中: $\tau_0(a)$ 和 $\mu_p(a)$ 为与水灰比有关的系数。在室温下, 系数 D 、 E 、 F 和 G 主要与浆液的复合比例、水化时间和添加剂有关。式(3)揭示了水灰比为 0.7~1.0 的 PO-SAC 复合浆液的流变特性, 是建立复合浆液注浆扩散模型的基础。

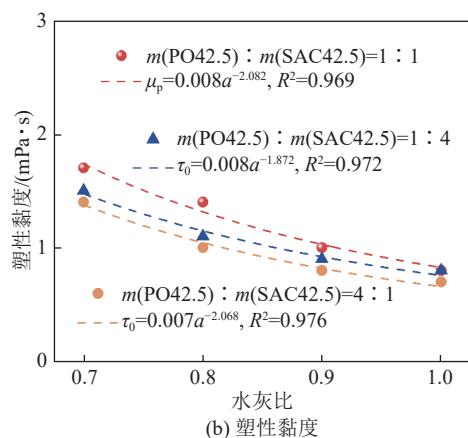
2.2.2 减水剂掺量对浆液流变性能的影响

剪切应力与剪切速率的关系被分析得到了减水剂对浆液流变性能的影响, 并且浆体的流变方程被拟合得到。不同掺量减水剂的浆液在 3 种复配比例下的流变行为如图 14。

图 14 显示了在添加不同质量分数的减水剂时, 3 种复配比例的浆液具有相似的流变特征。所有浆液的剪切应力都与剪切速率成正比例关系。对于不同复配比的浆液, 相同剪切速率下的剪切应力都随着减水剂掺量的增加而减小。减水剂的掺量越小, 浆液的剪切应力受减水剂的影响就越小。千分之一掺量的减水剂就能对复配浆液的流变性产生很大的影响。随着减水剂的添加, 浆液的流变模型接近于牛顿模型。

当水泥与水混合后, 浆液为水-胶体-颗粒悬浮体系。水泥颗粒与水结合发生水化反应并形成絮凝结构。当减水剂作为一种表面活性剂被加入悬浮体系中时, 聚羧酸分子会吸附在水泥颗粒表面并形成静电斥力。这使得水泥颗粒之间相互分散并且絮凝结构被破坏, 体系中的自由水质量分数增加, 因此宏观表现为浆液的黏度和剪切力减小。

通过对图中曲线拟合得到了浆液在不同减水剂掺量下的流变方程和流型(表 11)。随着减水剂的添加, 浆液的流型也发生了改变。当复配浆液中不掺加减水剂时, 剪切应力随着剪切速率的增大呈近似



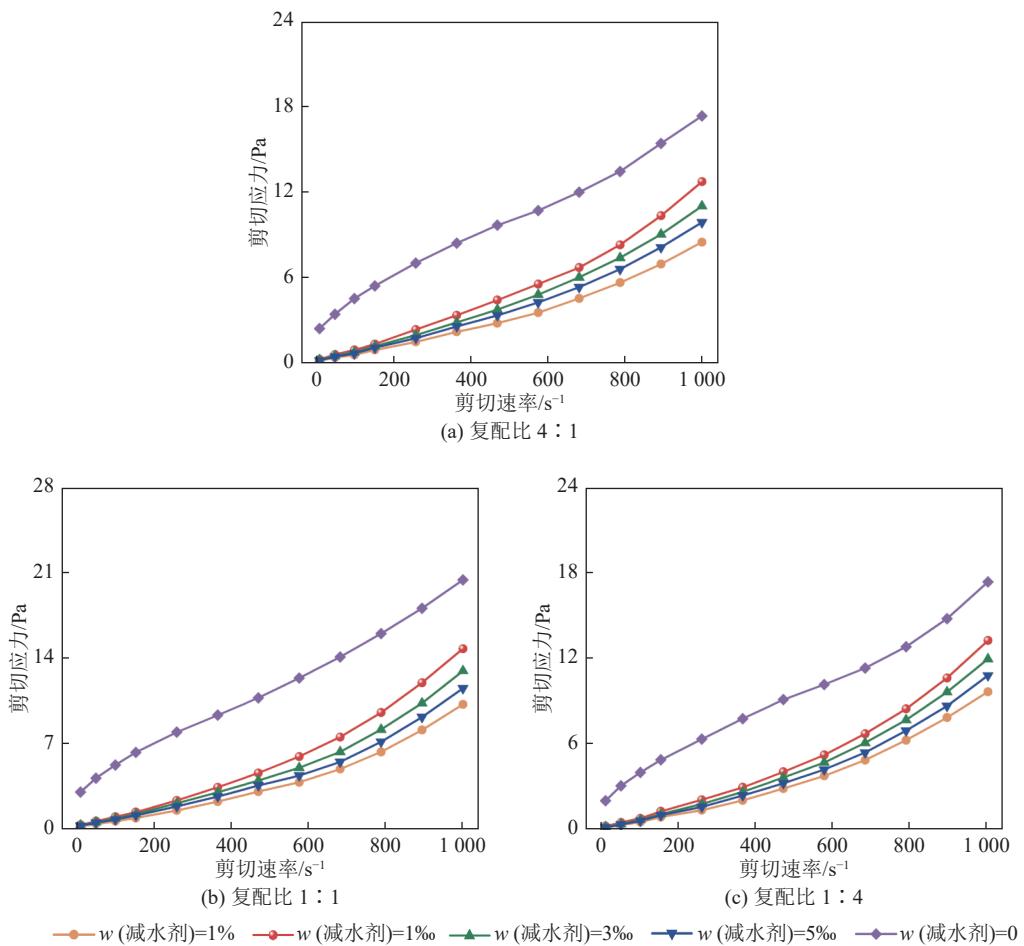


图 14 不同减水剂掺量下复合浆液的流变特性

Fig.14 Rheological properties of composite slurries with different water reducer dosages

线性增加，因此宾汉姆模型被用来描述浆液的流变曲线。当浆液中添加减水剂时，浆液的剪切应力与剪切速率之比在测试前半段近似为常数。在测试后半段，浆液的剪切应力的变化速率大于剪切速率的变化速率。因此，幂律模型可以更好地描述浆液的流变曲线。

2.3 微观结构

采用SEM和XRD分析了OPC、SAC和PO-SAC复合浆液结石体(复配比为1:1)的微观结构和水化产物。3种浆液的水灰比均为0.7。不同龄期(3 d和9 d)的测试结果如图15和图16所示。

如图15a所示，固化3 d的OPC水化产物中可

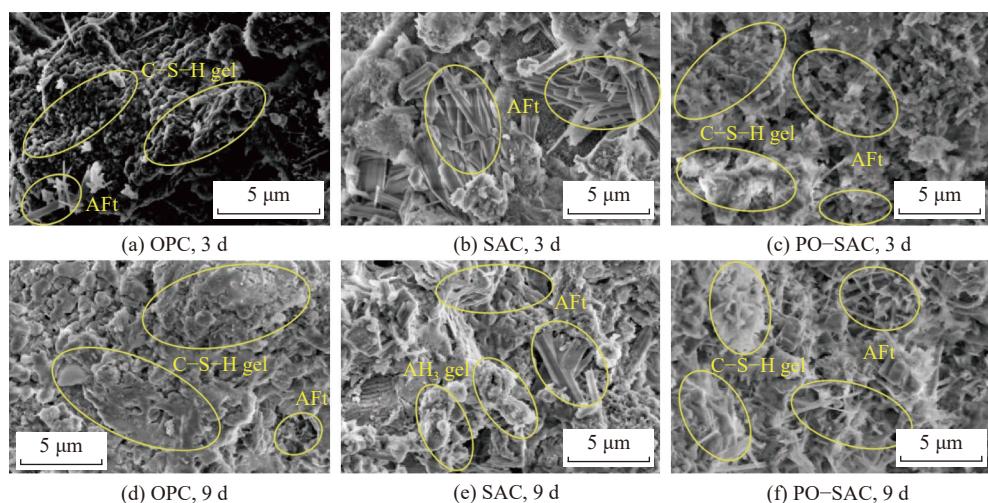


图 15 不同固化时间的样品的扫描电镜图像

Fig.15 SEM images of samples with different curing times

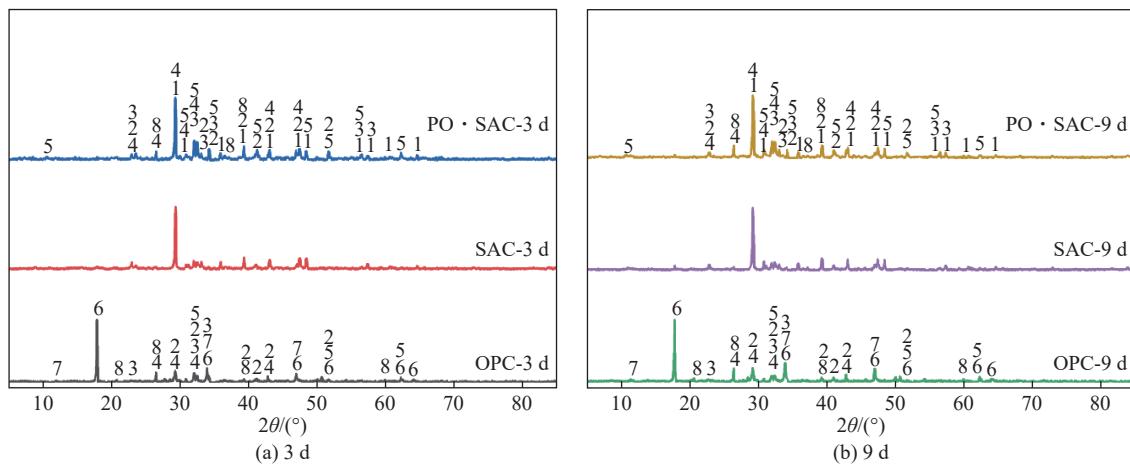
注: 1—CaCO₃; 2— β 为C₂S; 3—AFt; 4—Ca₃SiO₅; 5—C₃S; 6—CH; 7—C₄AF; 8—SiO₂

Fig.16 XRD results of samples with different hydration ages

见形状和大小不规则的C-S-H凝胶和针状AFt，水泥石结构疏松，空隙较多；固化9d后，浆体中大量的C-S-H、CH晶体和AFt胶凝成相对致密的网状结构，如图15e所示。在固化3d时，SAC浆液的结构间隙中可见大量针状和杆状AFt晶体，这使得SAC具有较高的早期强度。固化至9d时，水泥石空隙与AFt晶体之间充填了大量的AH₃凝胶，水泥石体空间结构致密。固化3d的PO-SAC复合水泥结构中可见少量CH晶体、C-S-H凝胶和AH₃凝胶。复合水泥的水化产物与OPC和SAC基本相同，但PO-SAC复合水泥结构稍显致密。固化9d后，水泥晶体结构进一步扩大，AFt广泛分布并成为粗杆。

图16为每个样品在不同水化龄期的XRD测试结果。从图16可以看出，复合水泥体系的水化产物与OPC和SAC的水化产物基本一致。PO-SAC中钙矾石和水化硅酸盐的衍射峰强于SAC，说明OPC和SAC的结合促进了C₄A₃S、C₃S的水化。上述XRD分析结果证实了OPC和SAC在水化过程中具有相互促进作用，即水化叠加效应。

3 动水冲刷试验及工程应用

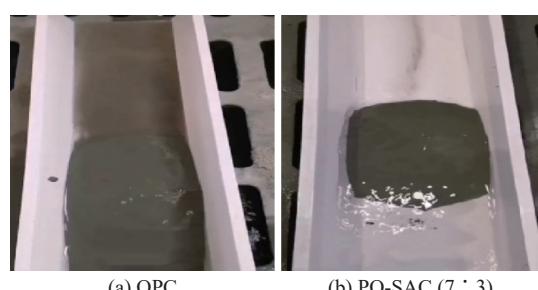
为了验证PO-SAC复合材料在动水冲刷条件下的留存效果。对OPC和7:3的PO-SAC复合材料开展了动水冲刷对比试验，试验预先在凹槽内分别倒入不同水灰比的材料，然后在不同的动水流速下开展冲刷试验，对比耐冲刷效果，试验效果见图17和表13。

由图17和表13可以看出，OPC在动水冲刷下的留存效果较差，PO-SAC在不同水灰比和冲刷流速下的留存率均高于OPC，这可能归因于PO-SAC

表13 浆液在不同流速下的留存率

Table 13 Retention rate of slurry at different flow rates

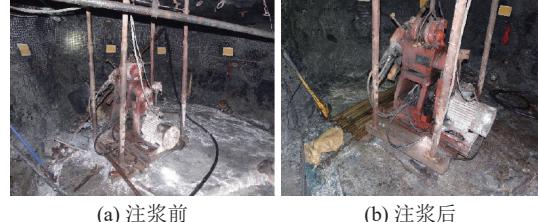
材料类型	水灰比	冲刷流速/(m·s ⁻¹)	留存率/%
OPC	0.6	0.5	37
	0.6	1.0	13
	0.8	0.5	11
	0.8	1.0	7
PO-SAC	1.0	0.5	<5
	1.0	1.0	<5
	0.6	0.5	88
	0.6	1.0	75
PO-SAC	0.8	0.5	67
	0.8	1.0	55
	1.0	0.5	46
	1.0	1.0	41



(a) OPC (b) PO-SAC (7:3)

图17 动水冲刷试验效果

Fig.17 Effect of dynamic water scouring test



(a) 注浆前 (b) 注浆后

图18 注浆前后突水情况

Fig.18 Water inrush before and after grouting

更快的凝结速度、更高的黏度以及 OPC 和 SAC 两者的水化叠加效应。由上述试验数据可知, 在动水注浆过程中使用 PO-SAC 材料的效果明显优于 OPC。因此, 将 PO-SAC 材料用于某煤矿底板突涌水治理以验证其工程效果, 注浆前后突涌水情况如图 18 所示。

使用 PO-SAC 材料注浆后, 有效封堵了含水层裂隙出水, 防止了工作面底板突水, 保障了煤矿安全开采, 验证了材料的工程效果。

4 结 论

1) 浆液的黏度变化由 2 种趋势决定: 转子对浆液的剪切作用和水化反应的增稠作用。反应初期浆液的黏度降低主要受剪切稀化的影响。在临界极点之后, 水泥颗粒的水化反应占主导地位, 因此黏度不断增加。

2) OPC 和 SAC 的水化过程具有叠加效应。随着复合体系中 SAC 质量分数的增加, 复合浆液的黏度增长率也呈上升趋势。当 OPC 占体系的 40%、30% 和 20% 时, 复合浆液的黏度增长速度较快。当 OPC 占体系的 30% 时, 2 种水泥的水化叠加效应最大。

3) 水灰比是影响复合浆液黏度增长率的一个重要因素。复合浆液的水灰比与黏度值和黏度增长率成反比。不同水灰比条件下复合浆液黏度的时变曲线符合二次方程的形式。

4) 复合浆液的流动模式与水灰比有关, 与复合比无关。随着水灰比的增加, 浆液的屈服应力和塑性黏度明显降低。流变参数随水灰比的拟合方程符合幂函数形式。根据流变参数拟合方程得到了流变方程随水灰比的变化规律。

5) 使用 PO-SAC 材料注浆后, 有效封堵了含水层裂隙出水, 防止了工作面底板突水, 保障了煤矿安全开采, 表明材料的工程效果较好。

参考文献(References):

- [1] 成琦, 张宗文, 张建, 等. 复杂地质灾害条件下沿空掘巷施工工艺研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(S2): 40–46.
- CHENG Qi, ZHANG Zongwen, ZHANG Jian, et al. Study on construction technology of gob-side entry driving under complex geological conditions [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(S2): 40–46.
- [2] LIU J Q, YUEN K V, CHEN W Z, et al. Grouting for water and mud inrush control in weathered granite tunnel: A case study [J]. *Engineering Geology*, 2020, 279: 105896.
- [3] BAI J W, ZHU Z J, LIU R T, et al. Groundwater runoff pattern and keyhole grouting method in deep mines [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(7): 5743–5755.
- [4] 田成东, 白海波. 龙固煤矿延伸巷掘进防治水及底板注浆加固方案 [J]. 煤矿安全, 2015, 46(6): 136–138.
- TIAN Chengdong, BAI Haibo. Water prevention and floor grouting reinforcement for extended roadway driving in Longgu coal mine [J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(6): 136–138.
- [5] LI S C, MA C Y, LIU R T, et al. Super-absorbent swellable polymer as grouting material for treatment of karst water inrush [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 31(5): 753–763.
- [6] 刘宝森. 改性复合注浆堵漏材料配合比设计与浆液扩散特性研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2023.
- LIU Baosen. Study on proportion design and slurry diffusion characteristics of modified composite grouting plugging materials [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2023.
- [7] 李秋利, 赵光明, 王艳芬, 等. 玻纤粉改性粉煤灰-水泥复合注浆材料水化产物与工程特性试验研究 [J/OL]. 煤炭学报, 2024: 1–16. [2024-12-16]. <https://link.cnki.net/doi/10.13225/j.cnki.jccs.2024.0766>
- LI Qiuli, ZHAO Guangming, WANG Yanfen, et al. Experimental study on hydration products and engineering properties of glass fiber powder modified fly ash-cement composite grouting material [J/OL]. Journal of China Coal Society, 2024: 1–16. [2024-12-16]. <https://link.cnki.net/doi/10.13225/j.cnki.jccs.2024.0766>.
- [8] LI W, WANG G M, JIANG Y, et al. Study on the physical properties and hydration mechanism of Portland · sulphaaluminate composite cement system [J]. *Acta Materialia Sinica*, 2014, 28: 407–409, 442.
- [9] 魏江. 硅酸盐-硫铝酸盐复合水泥砂浆在水平定向钻施工中的应用研究 [D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2024.
- WEI Jiang. Study on the application of silicate-sulphoaluminate composite cement mortar in horizontal directional drilling construction [D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2024.
- [10] ZHANG C, YANG J S, FU J Y, et al. Optimal formulation design of polymer-modified cement based grouting material for loose deposits [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 261: 120513.
- [11] CLARAMUNT J, ARDANUY M, GARCÍA-HORTAL J A, et al. The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2011, 33(5): 586–595.
- [12] BOHLOLI B, SKJØLSVOLD O, JUSTNES H, et al. Cements for tunnel grouting—Rheology and flow properties tested at different temperatures [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 91: 103011.
- [13] 侯淑鹏, 朱亚林, 李蕊, 等. 水灰比对硅酸盐-硫铝酸盐复配水泥浆液流变特性响应机理研究 [J]. 混凝土, 2023(11): 175–180.
- HOU Shupeng, ZHU Yalin, LI Rui, et al. Study on rheological properties and response mechanism of Portland sulphoaluminate composite cement slurry with water cement ratio [J]. *Concrete*,

2023(11): 175–180.

- [14] 孔庆文, 王志远, 马楠, 等. 黄原胶和羧甲基纤维素对水合物浆液流变特性的影响规律研究[J]. 中国海上油气, 2022, 34(2): 146–155.
KONG Qingwen, WANG Zhiyuan, MA Nan, et al. Study on the influence of xanthan gum and carboxymethyl cellulose on the rheological properties of hydrate slurries[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(2): 146–155.
- [15] ZHAO Y L, QIU J P, MA Z Y. Temperature-dependent rheological, mechanical and hydration properties of cement paste blended with iron tailings[J]. Powder Technology, 2021, 381: 82–91.
- [16] KE G J, ZHANG J, XIE S X, et al. Rheological behavior of calcium sulfoaluminate cement paste with supplementary cementitious materials[J]. Construction and Building Materials, 2020, 243: 118234.
- [17] LIU Q S, LU C B, LIU B, et al. Study on the rheological characteristics of cement paste considering the influence of temperature and hydration time[J]. Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33: 3730–3740.
- [18] XIE Y J, CHEN X B, MA K L, et al. Shear thinning and thickening effects of fly ash on cement paste[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, 43: 1040–1046.
- [19] 王林, 杜良坤, 潘月凡, 等. 降粘型外加剂的复配及对水泥水化性能影响[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(11): 3947–3957.
WANG Lin, DU Genkun, PAN Yuefan, et al. Effect of com-

pounding of viscosity reducing admixtures on hydration performance of cement[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2024, 43(11): 3947–3957.

- [20] TRAUCHESSÉC R, MECHLING J M, LECOMTE A, et al. Hydration of ordinary Portland cement and calcium sulfoaluminate cement blends[J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 56: 106–114.
- [21] EMOTO T, BIER T A. Rheological behavior as influenced by plasticizers and hydration kinetics[J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(5): 647–654.
- [22] HOU F J, SUN K G, WU Q D, et al. Grout diffusion model in porous media considering the variation in viscosity with time[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 11: 1687814018819890.
- [23] 李博, 刘蓉蓉, 邹良超. 单裂隙内浆液基本流动规律的理论、试验、模拟对比分析[J]. 岩土力学, 2024, 45(S1): 751–760.
LI Bo, LIU Rongrong, ZOU Liangchao. Theoretical, experimental and numerical analysis of fundamental flow laws of grout in single rock fractures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(S1): 751–760.
- [24] 朱江. 石粉对水泥浆体流变性能的影响及作用机制 [D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
ZHU Jiang. Influence of microfines from manufactured sand on the rheological properties of cement paste and its mechanism[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.