

不同结构聚羧酸减水剂对水泥-硅灰浆体黏度和吸附行为的影响

刘 明, 张 磊, 杨 文, 高育欣, 曾 超, 罗遥凌, 叶 子, 王福涛, 闫松龄

(中国建筑土木工程材料重点实验室, 中建西部建设建材科学研究院有限公司, 成都 610213)

摘 要: 为提升超高性能混凝土(UHPC)工作性能, 制备了聚氧乙烯基(EO)聚醚型与环氧丙烷嵌段聚氧乙烯(EO/PO)聚醚型两种不同结构的减水剂(分别简称 PCE-1 和 PCE-2)。通过测试净浆流动度、浆体黏度、总有机碳、表面张力, 研究了上述两种减水剂在低水胶比水泥-硅灰浆体中的性能差异, 并对相关作用机理进行了探讨。结果表明: 在硅灰掺量(质量分数)5%~25%, 水胶比 0.16 条件下, PCE-2 相比 PCE-1 对硅灰具有更强的吸附-分散作用, 水泥-硅灰浆体流动度更高; 嵌段聚醚结构可调节间隙液的表面张力和黏度, 降低水泥-硅灰浆体黏度。

关键词: 聚羧酸减水剂; 超高性能混凝土; 流动度; 吸附行为; 浆体黏度

中图分类号: TQ216 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)02-0445-07

网络出版时间: 2022-01-20



Effect of Polycarboxylate Superplasticizer with Different Structure on Viscosity and Adsorption Behavior of Cement-Silica Fume Paste

LIU Ming, ZHANG Lei, YANG Wen, GAO Yuxin, ZENG Chao, LUO Yaoling, YE Zi, WANG Futao, YAN Songling

(China West Construction Academy of Building Materials, Chengdu 610015, China)

Abstract: To improve the working performance of ultra-high performance concrete (UHPC), two kinds of water reducers with different structures, *i.e.*, polyoxyethylene (EO) polyether (PCE-1) and propylene oxide block polyoxyethylene (EO/PO) polyether (PCE-2), were prepared. The performance of cement-silica fume slurry in a low water-binder ratio with two water reducing agents was evaluated *via* slurry fluidity, slurry viscosity test, total organic carbon test, and surface tension test, and the relevant mechanism was discussed. The results show that at PCE-2 in the slurry at 0.16 of water-binder ratio and 5%–25% of silica fume content (in mass fraction) has an adsorption-dispersion effect on silica fume rather than PCE-1, thus increasing the fluidity of cement-silica fume slurry. The block polyether structure of water reducer can adjust the surface tension and viscosity of the interstitial fluid, and reduce the viscosity of the cement-silica fume slurry.

Keywords: polycarboxylate superplasticizer; ultra-high performance concrete; fluidity; adsorption behavior; paste viscosity

超高性能混凝土(UHPC)具有超高强度、高韧性、低渗透性和高耐久性等优异性能, 在轻量化、大跨度建筑结构如钢桥面铺装等工程方面具有广泛的用途, 是目前国内外建筑领域研究的热点^[1-3]。UHPC 利用矿物掺合料、超细粉体和合理的骨料级配来实现颗粒的最紧密堆积^[4], 并通过极低的水胶比(≤ 0.22)来获得超高强、低渗透等性能。为保障新拌 UHPC 的工作性需要加入萘系、三聚氰胺系、聚

羧酸减水剂等对水泥颗粒具有高效分散性能的减水剂。聚羧酸减水剂(PCE)是一种梳形聚合物, 减水率高, 分子结构设计性强, 被认为是对水泥基材料分散性能最好的减水剂^[5-6], 并且对水泥水化进程及水化产物形貌有重要影响^[7]。然而在低水胶比、高硅灰掺量的 UHPC 体系中, 传统结构的 PCE 对 UHPC 分散性能不足, 浆体黏度大, 难以满足 UHPC 施工性能需求。

收稿日期: 2021-09-24。 修订日期: 2021-10-26。

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(52002041)。

第一作者: 刘 明(1984—), 男, 博士, 研究生。

通信作者: 张 磊(1987—), 男, 硕士。

Received date: 2021-09-24. Revised date: 2021-10-26.

First author: LIU Ming (1984—), male, Doctoral candidate.

E-mail: lm3706370@163.com

Correspondent author: ZHANG Lei(1987—), male, Master.

E-mail: 383270349@qq.com

关于聚羧酸减水剂与水泥、硅灰的相互作用,国内外已有相关报道。研究表明,不同结构的减水剂对矿物具有选择性吸附^[8-9]。Plank 等^[10]提出相比酯型减水剂,醚类的聚羧酸减水剂对硅灰有优先吸附。Chröfl 等^[11]进一步研究表明,相比于其他类型的 PCE, APEG 型 PCE 能更好地吸附于混凝土中的硅灰上,且添加不同化学结构的 PCE 相比单种 PCE 效果更好。Liu 等^[12]研究结果显示醚类减水剂相比酯型减水剂具有更好的分散性和保持性。上述研究表明,减水剂的结构对硅灰的分散有重要影响,而硅灰的分散是影响 UHPC 流变性能的关键因素之一。

根据上述研究及 PCE 吸附-分散机理可知, PCE 侧链聚醚对减水剂分散性能具有重要影响。环氧丙烷嵌段聚氧乙烯(EO/PO)聚醚是近年发展起来的一种新型聚醚,有研究表明^[13],相比聚氧乙烯基(EO)聚醚, EO/PO 聚醚分子链容易蜷缩折叠,使憎水甲基远离水分子,位阻效应更强,然而采用嵌段聚醚合成 PCE 在

UHPC 中的应用还未见报道。本工作采用 EO/PO 嵌段聚醚、异戊烯基聚氧乙烯聚醚(TPEG)、丙烯酸(AA)、马来酸酐(MAH)为主要原料,制备了聚氧乙烯基聚醚型与环氧丙烷嵌段聚氧乙烯聚醚型两种不同结构的减水剂 PCE-1 和 PCE-2,采用净浆流动度、浆体黏度测试、总有机碳测试、表面张力测试等技术方法,研究了上述两种减水剂在低水胶比水泥-硅灰浆体中的性能差异,并对其机理进行了探讨。

1 实验

1.1 原材料

水泥:峨胜水泥股份有限公司 P•O 52.5 硅酸盐水泥,比表面积(勃氏法)417 m²/kg,密度 3.04 g/cm³;硅灰:灰白色粉末,平均粒径 65 nm,比表面积(BET 法)25 500 m²/kg,密度为 2.57 g/cm³;减水剂:合成常规 EO 型聚羧酸减水剂(PCE-1)及 EO/PO 嵌段型聚羧酸减水剂(PCE-2),两种减水剂结构参数如表 1 所示。

表 1 减水剂样品分子结构参数
Table 1 Molecular structure parameters of PCE samples

Sample No.	M_w	M_n	M_w/M_n	Conversion of macromonomer	Monomer ratio	R_g /nm	Density of -COOH/(mmol·g ⁻¹)
PCE-1	78 000	49 000	1.59	91.2%	$n(\text{AA}): n(\text{TPEG})=4:1$	8.56	1.54
PCE-2	57 000	43 000	1.33	92.3%	$n(\text{AA}): n(\text{MAH}): n(\text{TPEG}): n(\text{EO/PO})=3:1:0.7:0.3$	7.23	1.92

EO/PO is the abbreviation of block polyether; Formula for calculating the radius of gyration (R_g)^[14]: $R = M_w^{0.537}$, and carboxyl group density = n (repeating unit carboxyl group)/repeating unit molecular mass.

减水剂分子结构测试采用美国 Waters 公司凝胶色谱仪分析,仪器由 Waters 1525 Binary HPLC Pump 和 Waters 2414 Refractive Index Detector(折光率检测器)2 部分组成,色谱柱选用 WAT011540,流动相为 0.1 mol/L NaNO₃ 水溶液,测样流速为 0.8 mL/min,标准品为聚乙二醇,运行时间 20 min。通过标准曲线法测试样品分子量及分子量分布。

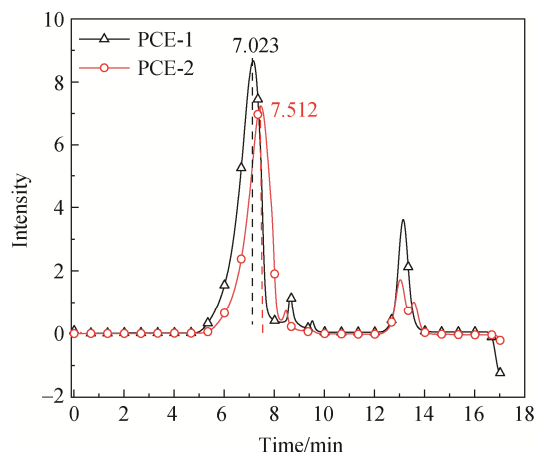


图 1 两种减水剂 GPC 谱
Fig. 1 GPC patterns of PCEs

从图 1 可以看到, PCE-2 残留 TPEG 聚醚单体和 EO/PO 嵌段聚醚单体,且杂峰相对较少,分子量更集中。

聚醚单体表征采用蒸发光散射分析,仪器由 Waters 1525 Binary HPLC Pump 和 Chromachem 蒸发光散射检测器组成,色谱柱选用 Develosil C18 反相色谱柱,流动相为 30% 乙腈水溶液,流速为 1 mL/min,测试结果如图 2 所示:

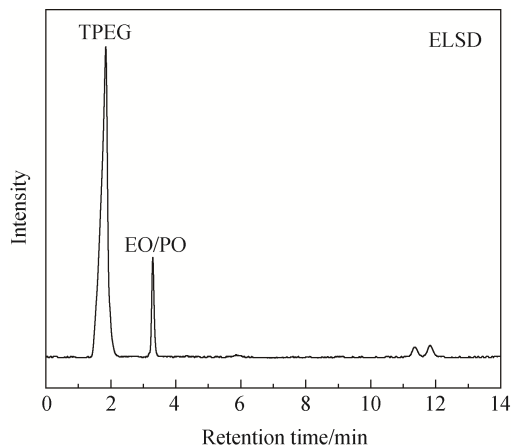


图 2 两种聚醚单体 ELSD 测试
Fig. 2 ELSD test of two polyether monomers

从图 2 可以看到, EO/PO 嵌段聚醚出峰时间更晚, 这是因为环氧丙烷嵌段结构降低了其极性, 在

反相柱中保留时间更长。两种减水剂分子结构式如图 3 所示。

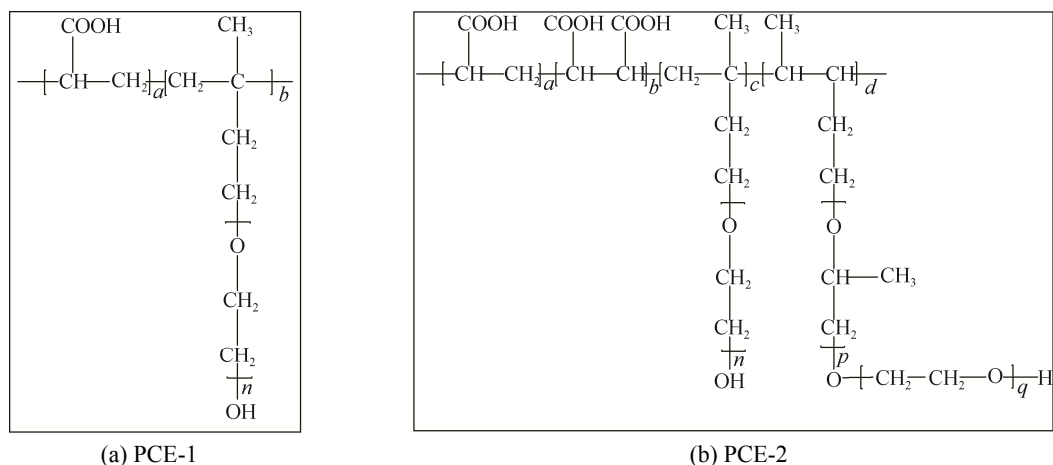


图 3 减水剂分子结构式

Fig. 3 Molecular structures of PCE

1.2 性能测试

1.2.1 水泥-硅灰浆体流动性能测试 固定硅灰掺量占胶凝材料质量 15%, 在 0.16 水胶比条件下, 研究两种减水剂对浆体流动性的影响, 参考 GB/T 8077—2012《混凝土外加剂匀质性测试方法》测试浆体流动度。测试减水剂不同掺量下流动度, 对比两种减水剂的饱和掺量及饱和掺量下流动度。

1.2.2 水泥-硅灰浆体黏度测试 在水胶比 0.16, 调整 PCE 掺量至流动度为(180±5) mm, 以 Brookfield 流变仪(Model R/S SST2000, 美国)研究水泥浆体剪切应力和剪切黏度, 其中转子直径为 26.66 mm, 测试筒内径为 28.92 mm。测试步骤如下所述: 将水泥浆体倒入测试筒后, 剪切速率在 1 min 内以阶梯状从 0 s⁻¹ 增加至 100 s⁻¹, 之后稳定 1 min, 在 1 min 内剪切速率以阶梯状由 100 s⁻¹ 降速到 0 s⁻¹, 每个分段速率测试 10 s, 选取降速段作为流变研究段。

1.2.3 模拟间隙液配制 为研究减水剂在水泥浆体中吸附、分散行为, 配制了模拟间隙液: 1.72 g/L CaSO₄·2H₂O、6.959 g/L Na₂SO₄、4.757 g/L K₂SO₄ 和 7.12 g/L KOH^[15]。

1.2.4 硅灰吸附、分散性能测试 称量 600 g 硅灰, 加入 810 g 模拟间隙液, 参考 GB/T 8077—2012《混凝土外加剂匀质性测试方法》测试不同 PCE 掺量硅灰浆体流动度。

考察硅灰对不同掺量下 PCE 的吸附。浆体流动度测试结束后立即倒入离心管。高速离心机以速度 4 200 r/min 离心 10 min, 收取上清液, 用 1 mol/L 的 HCl 去除清液中的无机碳, 并稀释至清液的 10 倍。采用德国 Elementar 公司的 Liqui 总有机碳分析

仪(TOC)分别测试清液与空白样(未拌合粉体)的有机碳含量, 进而获得减水剂在粉体颗粒表面的吸附量。

1.2.5 模拟间隙液表面张力测试 参考 GB/T 8077—2012《混凝土外加剂匀质性测试方法》中表面张力测试方法, 测试 0.1%~1% PCE 浓度的模拟间隙液表面张力。

1.2.6 模拟间隙液黏度测试 测试采用 NDJ-8S 型数字显示旋转黏度计, 以 0 号转子, 1.5 r/min 转速测试 25 °C 下不同浓度减水剂的模拟间隙液黏度。

2 结果与讨论

2.1 减水剂对水泥-硅灰浆体流动度影响

图 4 对比了不同掺量下两种减水剂对水泥-硅灰浆体流动度的影响。

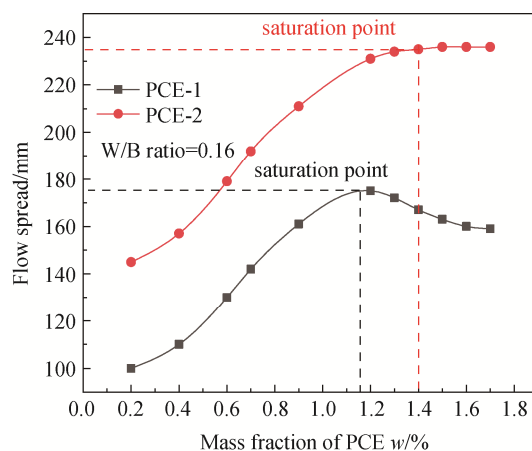


图 4 减水剂掺量对浆体流动度影响

Fig. 4 Effect of the amounts of PCE on the flowability of slurry

从图 4 可以看到, 在 0.2%至 1.2%掺量范围内, 随着减水剂掺量增加, 两种减水剂浆体的流动度均是先增加, 超过 1.2%后, PCE-1 流动度明显下降, PCE-2 基本保持不变。根据减水剂吸附-分散原理, 该点为减水剂的饱和吸附点, 减水剂掺量超过该点后, 减水剂对胶材的吸附不再增加。PCE-1 在掺量 1.15%时达到饱和吸附点, 饱和吸附点流动度为 176 mm; 而 PCE-2 饱和吸附点的掺量为 1.4%, 饱和吸附点流动度 235 mm。PCE-2 的饱和吸附点掺量高于 PCE-1, 饱和吸附点流动度也更高, 说明其能更多的在水泥和硅灰表面吸附, 且增加的吸附量有助于浆体的分散。同时在相同掺量下, PCE-1 流动度远小于 PCE-2, 说明 PCE-2 对水泥-硅灰浆体的分散性能优于 PCE-1。

另外, 从图 4 可以看出, 在达到饱和掺量后, PCE-2 的流动度基本不变或略有增加, 而 PCE-1 流动度却明显下降。达到饱和掺量后多余的减水剂主要残留在间隙液中, 间隙液的性能是影响饱和掺量后浆体流动度的重要因素^[16]。后续在研究减水剂对间隙液性能影响中进一步探讨两种减水剂的性能差异。

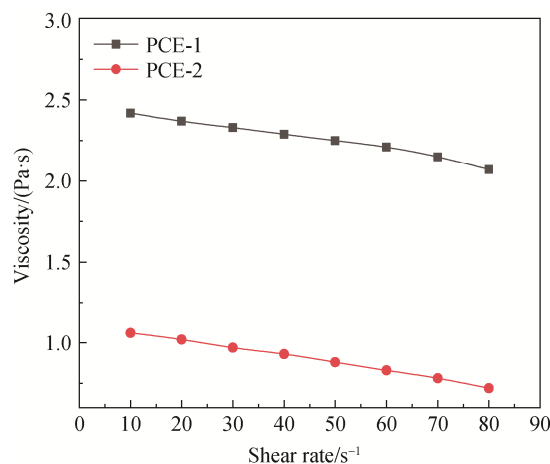
2.2 减水剂对水泥-硅灰浆体黏度影响

黏度是表征浆体流变性能的主要参数之一, 对 UHPC 施工性能有重大影响。水泥基材料浆体的黏度影响因素复杂, 取决于颗粒体积分数、形状、颗粒间相互作用、颗粒的空间排列及堆积密实度等^[2]。浆体黏度由两部分组成: 一是破坏颗粒相互作用形成的网络结构所需的能量(屈服应力), 另一部分是克服剪切过程中的水动力和颗粒惯性的能量耗散^[3]。屈服应力反映的是浆体开始流动需克服的最小阻力, 有学者从理论上给出了浆体屈服应力和其流动度之间的数学关系, 即流动度相同时, 密度相近的浆体屈服应力基本相同^[17]。为排除流动度差异影响黏度数据, 本研究固定 0.16 水胶比, 通过调整减水剂掺量控制浆体流动度均在(180±10)mm 范围内, 探索了不同硅灰掺量下, 减水剂对浆体黏度的影响。

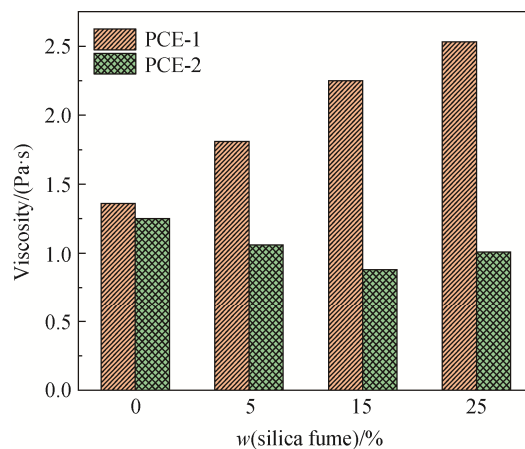
图 5a 显示了不同剪切速率下两种减水剂对浆体黏度的影响(硅灰掺量 15%)。可以看到, 随着剪切速率增加, 浆体的黏度降低, 浆体呈现剪切变稀的特性。白静静等^[18]研究表明, 在低水胶比条件下, 硅灰的加入会抑制剪切增稠反应。这是因为硅灰的粒径远小于水泥颗粒, 能够填充在水泥颗粒之间, 通过滚珠效应减少水泥颗粒之间的摩擦^[19]。因此浆体呈现出剪切变稀的特性。

图 5b 显示了不同硅灰掺量对浆体黏度的影响

(剪切速率为 20 s^{-1}), 硅灰的加入增大了掺 PCE-1 减水剂的浆体黏度, 且掺量越高增幅越大。这可能是因为硅灰比表面积大, 在浆体中易形成团簇, 降低了体系中自由水含量, 从而增大了黏度^[20]。但硅灰掺量对掺 PCE-2 的浆体黏度的影响却截然相反, 随着硅灰掺量由 5%增至 15%, 浆体相比纯水泥浆体黏度分别降低了 12%、29%, 继续增加至 25%后黏度略有增加。这可能是因为 PCE-2 对硅灰具有较好的分散性能, 分散后的硅灰填充在水泥颗粒之间, 利用滚珠效应减少水泥颗粒间的摩擦。另外, 分散的硅灰可降低水泥颗粒间的距离, 提高颗粒间的水动力压力, 将絮凝颗粒间的水挤出, 增加自由水的量, 通过润滑效应, 从而降低浆体整体黏度^[21]。而当硅灰掺量达到 25%后, 团聚状态的硅灰量增大, 抵消了分散硅灰带来的润滑效应和滚珠效应, 因此黏度又略有增加。



(a) Effect of shear rate on viscosity



(b) Influence of silica fume content on viscosity

图 5 不同减水剂对不同硅灰掺量的浆体黏度影响

Fig. 5 Effect of PCE on the slurry viscosity with different silica fume contents

2.3 减水剂对硅灰的吸附-分散性能

为探究两种减水剂对掺硅灰的水泥浆体黏度影响的差异原因, 考察了减水剂对在模拟间隙液中的纯硅灰浆体分散性能的影响, 其中模拟间隙液与硅灰质量比为 1.35, 测试结果见图 6。从图 6 可以看到, 当掺量小于 1.2% 时, PCE-1 对硅灰基本没有分散, 之后随着掺量增加, 流动度缓慢上升, 当掺量为 2.0% 时, 达到最大流动度 121 mm, 之后继续增加掺量流动度不再增加, 说明 2.0% 是 PCE-1 对硅灰的饱和掺量; 随着 PCE-2 掺量的增加, 硅灰浆体流动度大幅上升, 掺量 2.8% 时, 浆体流动度可达 260 mm。同时, 在相同掺量下, PCE-2 对硅灰的分散性能均优于 PCE-1。

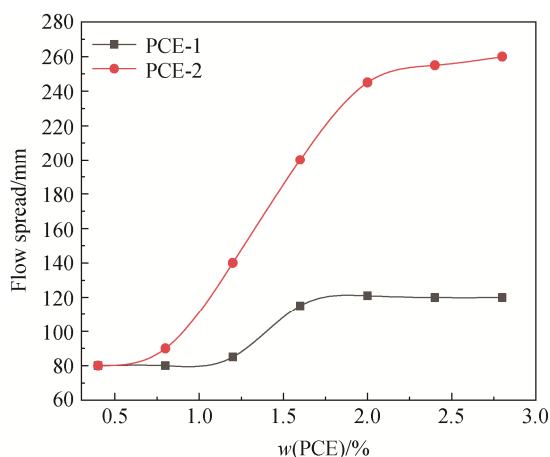


图 6 减水剂对硅灰的分散性能影响

Fig. 6 Effect of PCE on the dispersion performance of silica fume

PCE 对水泥的分散性能主要依靠带负电的锚固基团与水泥颗粒表面带正电离子的静电吸附, 而硅灰表面主要为硅羟基, 在水泥孔隙液的碱性条件下电离为氧负离子, 可吸附钙离子等正电荷, 最后吸附带负电的 PCE^[10]。因此, 为进一步探讨 PCE 对硅灰分散机理, 测试了不同掺量下 PCE 对硅灰的吸附, 结果如图 7 所示。从图 7 可以看出, 在相同掺量下, PCE-2 对硅灰的吸附量大于 PCE-1, 与之对应的是相同掺量下, PCE-2 硅灰浆体流动度也大于 PCE-1; 随着 PCE 掺量增加, 两种减水剂吸附量增

大, 其中 PCE-1 的饱和吸附掺量约为 2.0%, 与图 6 中达到最大流动度的掺量基本一致, PCE-2 的饱和吸附量约为 3.0%, 也与图 6 中 PCE-2 最大流动度掺量基本一致。

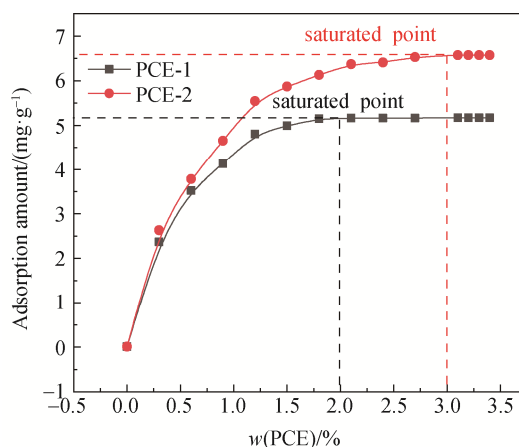


图 7 不同掺量条件下减水剂在硅灰表面的吸附量

Fig. 7 Adsorption amount of PCE on silica fume under different dosage conditions

上述结果可以看到, 相同减水剂掺量下, 硅灰对 PCE-2 的吸附量更大, 且饱和吸附量明显高于 PCE-1, 说明 PCE-2 相比 PCE-1 更容易在硅灰表面吸附。这是因为在低水胶比、高硅灰掺量条件下, PCE-2 主链中引入了马来酸酐, 双羧基官能团对硅灰表面的钙离子形成更稳定的螯合吸附结构, 吸附稳定性增强, 同时主链羧基密度更高, 对硅灰吸附速度快, 且分子半径更小, 在低水胶比体系中, PCE-2 更易进入颗粒空隙间, 因此饱和吸附量更大。

有效的硅灰分散可提升浆体中颗粒最大堆积密度, 降低相对固体体积分数(固相浓度与最大堆积密度之比)^[22-23]。分散性硅灰的滚珠效应、对颗粒的润滑效应, 在一定程度上降低浆体的黏度。在一定范围内, 这种降黏效应随硅灰掺量的增加更加明显。结合图 5 和图 6 试验结果, 也进一步说明, 不同结构减水剂在硅灰表面吸附-分散作用, 是其影响水泥-硅灰流动度和黏度大小的重要原因。不同 PCE 吸附-分散硅灰作用机理如图 8 所示。

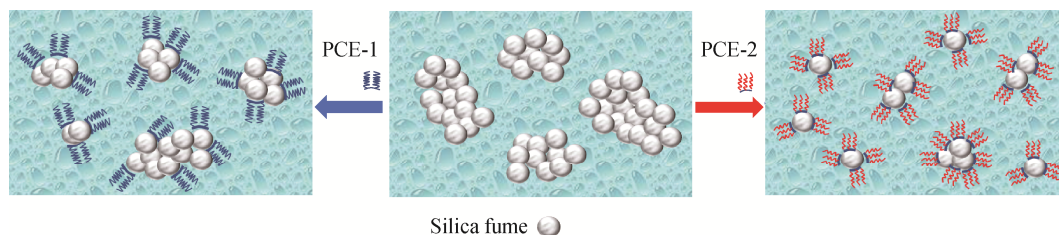


图 8 不同 PCE 在硅灰表面的吸附-分散机理

Fig. 8 Adsorption-dispersion mechanism of different PCE on silica fume surface

2.4 减水剂对浆体间隙液性能的影响

浆体中的减水剂除了吸附在胶材表面外, 还有一部分残留在间隙液中。研究结果显示^[5]这部分未吸附的减水剂对颗粒的分散、浆体的流动性也有重要影响。残留的减水剂能降低间隙液表面张力, 增强对水泥颗粒的润湿性, 从而提升浆体的流动性^[16]。因此, 对比了两种减水剂在模拟间隙液中表面张力, 测试结果如图 9 所示。

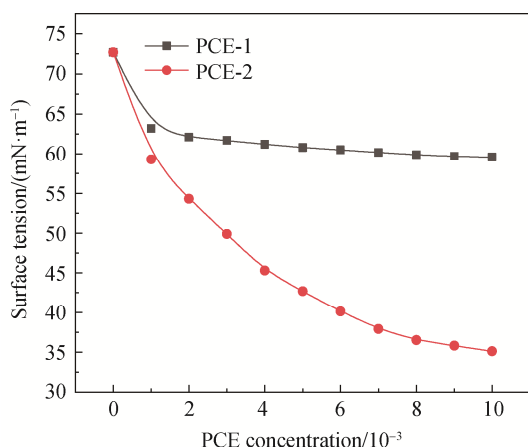


图 9 PCE 浓度对模拟间隙液表面张力的影响

Fig. 9 Effect of PCE concentration on surface tension of simulated interstitial liquid

从图 9 可以看到, 随着 PCE 浓度的增加, 溶液表面张力逐渐降低。当 PCE 浓度为 0.1% 时, PCE-2 溶液表面张力为 59.3 mN/m, PCE-1 溶液表面张力为 63.2 mN/m。随着 PCE 浓度的增加, PCE-1 溶液的表面张力下降缓慢, 浓度超过 0.2% 后基本达到稳定, 而 PCE-2 溶液的表面张力持续下降。

除了对表面张力的影响, 残留减水剂对间隙液黏度也有影响。测试了两种减水剂在不同浓度下的模拟间隙液中黏度, 结果如图 10 所示。

从图 10 可以看到, 随着 PCE 浓度增加, 间隙液黏度逐渐增大, 然而 PCE-2 增幅小于 PCE-1, 相同浓度下, PCE-2 间隙液黏度更小。当 PCE 浓度大于 6% 后, 两者差异更明显。

综合两种减水剂对间隙液表面张力和黏度的影响可以看出, 尽管随着 PCE 掺量增加, 两种 PCE 均会造成间隙液黏度增加, 但 PCE-2 黏度增幅较小; 且相比 PCE-1, PCE-2 间隙液表面张力低, 有助于增强胶材表面对水的润湿性, 提升浆体的流动度^[16]。而从吸附特性数据可以看出, PCE-2 对硅灰的吸附量远远大于 PCE-1, 即在相同掺量下, PCE-2 间隙液浓度更低, 相对黏度也更小。因此, PCE-2 可在达到饱和掺量后流动度依然保持甚至略有增加,

PCE-1 流动度则明显下降。

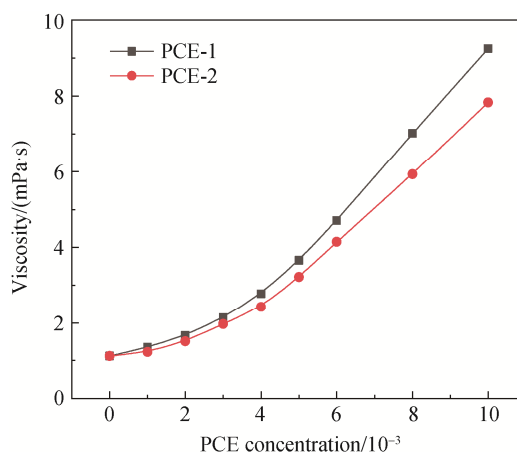


图 10 PCE 浓度对模拟间隙液黏度的影响

Fig. 10 Effect of PCE concentration on viscosity of simulated interstitial fluid

3 结论

1) 采用 EO/PO 嵌段聚醚、TPEG、AA、MAH 等为主要原料, 制备了聚氧乙烯基聚醚型和 EO/PO 嵌段聚醚型两种不同结构减水剂 PCE-1 和 PCE-2。

2) 和 PCE-1 相比, PCE-2 对 0.16 水胶比的水泥-硅灰浆体分散性更好。相同减水剂掺量条件下, PCE-2 在硅灰表面的吸附量明显高于 PCE-1, 掺 PCE-2 的浆体流动度更大, 黏度更低。

3) PCE-2 的 EO/PO 嵌段结构能降低水泥-硅灰间隙液表面张力, 相比 PCE-1, 掺 PCE-2 的模拟间隙液黏度更低。

参考文献:

- [1] SHI C, WU Z, XIAO J, et al. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design[J]. Constr Build Mater, 2015, 101: 741–751.
- [2] LIU J, WANG K, ZHANG Q, et al. Influence of superplasticizer dosage on the viscosity of cement paste with low water-binder ratio[J]. Constr Build Mater, 2017, 149: 359–366.
- [3] 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.
- [4] ZHANG Q, SHU X, YANG Y, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(11): 1716–1721.
- [5] 刘路明, 方志, 黄政宇, 等. 膨胀剂与内养剂对超高性能混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(11): 1706–1715.
- [6] LIU L, FANG Z, HUANG Z, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(11): 1706–1715.
- [7] MATSUZAWA K, SHIMAZAKI D, KAWAKAMI H, et al. Effect of non-adsorbed superplasticizer molecules on fluidity of cement paste at low water-powder ratio[J]. Cem Concr Compos, 2019, 97: 218–225.
- [8] LIU M, LEI J H, BI Y, et al. Preparation of polycarboxylate-based superplasticizer and its effects on zeta potential and rheological property of cement paste[J]. J Wuhan Univ Technol, 2015, 30(5): 1000–1005.

- 1008–1012.
- [7] LIU M, GAO Y, ZHANG L, et al. The application of thermal analysis to study the hydration behavior of tricalcium aluminate-gypsum in the presence of polycarboxylate-based superplasticizers[J]. *Thermochim Acta*, 2021, 696: 178821.
- [8] ATARASHI D, SAKAI E, DAIMON M. Interaction between superplasticizers and clay minerals[J]. *Cem Sci Concr Technol*, 2004, 58: 387–392.
- [9] YOSHIOKA K, TAZAWA E, KAWAI K, et al. Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals[J]. *Cem Concr Res*, 2002, 32(10): 1507–1513.
- [10] PLANK J, SCHRÖFL C, GRUBER M, LESTI M, SIEBER R. 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): 75–12.
- [11] 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.
- [12] LIU M, LEI J, DU X, HUANG B, CHEN L. Synthesis and properties of methacrylate-based and allylether-based polycarboxylate superplasticizer in cementitious system[J]. *J Sustain Cement-Based Mater*, 2013, 2(3/4): 218–226.
- [13] 邱峰, 范雷. 新型嵌段聚醚型减水剂的研制[J]. *现代化工*, 2018, 38(10): 158–161.
- QIU F, FAN L. *Mod Chem Ind*(in Chinese), 2018, 38(10): 158–161.
- [14] FISCHER J, PASCHEK D, GEIGER A, et al. Modeling of aqueous poly(oxyethylene) solutions. 2. Mesoscale simulations[J]. *J Phys Chem B*, 2008, 112(43): 13561–13571.
- [15] LANGE A, HIRATA T, PLANK J. The role of non-adsorbed PCE molecules in cement dispersion: Experimental evidence for a new dispersion mechanism[J]. *ACI Special Publ*, 2012, 288(30): 435–449.
- [16] ILG M, PLANK J. Non-adsorbing small molecules as auxiliary dispersants for polycarboxylate superplasticizers[J]. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, 2020, 587: 124307.
- [17] ROUSSEL N, STEFANI C, LEROY R. From mini-cone test to Abrams cone test: measurement of cement-based materials yield stress using slump tests[J]. *Cem Concr Res*, 2005, 35(5): 817–822.
- [18] 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 J, WANG M, SHI C, et al. *Mater Rep* (in Chinese), 2020, 34(6): 6172–6179.
- [19] FEYS D, VERHOEVEN R, SCHUTTER G D. Why is fresh self-compacting concrete shear thickening? [J]. *Cem Concr Res*, 2009, 39(6): 510–523.
- [20] JIAO D, SHI C, YUAN Q, et al. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review[J]. *Cem Concr Compos*, 2017, 83: 146–159.
- [21] YAHIA A. Shear-thickening behavior of high-performance cement grouts-Influencing mix-design parameters[J]. *Cem Concr Res*, 2011, 41(3): 230–235.
- [22] STRUBLE L, SUN G K. Viscosity of Portland cement paste as a function of concentration[J]. *Adv Cem Based Mater*, 1995, 2(2): 62–69.
- [23] HOT J, BESSAIES-BEY H, BRUMAUD C, et al. Adsorbing polymers and viscosity of cement pastes[J]. *Cem Concr Res*, 2014, 63: 12–19.