第 48 卷第 11 期
2020 年 11 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 11
November，2020

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200237

减水剂吸附行为对水泥-硅灰浆体黏度的影响

张倩倩[1]，舒 鑫[1]，杨 勇[1]，冉千平[1,2]

(1. 高性能土木工程材料国家重点实验室，江苏苏博特新材料股份有限公司，南京 211103；
2. 东南大学材料科学与工程学院，南京 211189)

摘 要：为提升超高性能混凝土（UHPC）的工作性能，研究了两类减水剂对低水胶比水泥-硅灰浆体流变性能的影响，并通过分析减水剂的吸附行为、浆体中颗粒堆积密实度以及间隙液黏度等，揭示减水剂的吸附行为对 UHPC 浆体黏度的影响机制。结果表明：减水剂在不同粉体表面具有显著的选择性吸附行为，羧酸基减水剂对水泥具有优异的吸附能力，膦酸基减水剂对硅灰吸附能力更强；对于流动度相近的纯水泥浆体，低间隙液黏度是导致掺入羧酸基减水剂浆体黏度更低的主要原因；而膦酸基减水剂对硅灰更强的分散能力导致了水泥-硅灰浆体中颗粒堆积密实度大幅度增加，浆体黏度显著低于掺羧酸基减水剂的浆体。

关键词：超高性能混凝土；硅灰；减水剂；选择性吸附；颗粒堆积；间隙液黏度
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)11–1716–06
网络出版时间：2020–09–18



Adsorption of Superplasticizer and its Effect on Viscosity of Cement-Silica Fume Paste

ZHANG Qianqian[1], *SHU Xin*[1], *YANG Yong*[1], *RAN Qianping*[1,2]

(1. State Key Laboratory of High-Performance Civil Engineering Materials, Jiangsu Sobute New Materials Co., Ltd., Nanjing 210008, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: To improve the workability of ultra-high performance concrete (UHPC), the effect of superplasticizers (*i.e.*, carboxylic-superplasticizer and phosphonic-superplasticsizer) on the rheological properties of cement/silica fume pastes with a low water-binder ratio was investigated, and the adsorption behavior of the superplasticizers in paste, the packing density and the viscosity of interstitial solution were analyzed. The results show that the superplasticizers have a preferential adsorption behavior on different particle surfaces, and carboxylic-superplasticizer has a superior adsorption ability on cement particle surfaces, and phosphonic-superplasticsizer has a stronger adsorption ability on silica fume particle surfaces. It is indicated that for a cement paste with the similar flow spread, a lower viscosity of the interstitial solutions is the main reason for a lower viscosity of paste with carboxylic-superplasticizer rather than that with phosphonic-superplasticsizer. However, the well- dispersion of silica fume particles with phosphonic-superplasticizer can result in an increased packing density, thus leading to a lower viscosity of cement-silica paste, compared to that of paste with carboxylic-superplasticizer.

Keywords: ultra-high performance concrete; silica fume; superplasticizer; preferential adsorption; packing density; viscosity of the interstitial solution

超高性能混凝土(UHPC)是 20 世纪 90 年代初诞生的一种以低水胶比、高硅灰含量、高减水剂用量以及纤维增强等为主要制备特征的新型水泥基复合材料，通常抗压强度大于 150 MPa、抗拉强度大于 7 MPa，且具有明显硬化行为[1]。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。然而，低水胶比导致 UHPC 的黏度大幅增加[2]，且加入硅灰进一步降低了其工作性能，严重制约了 UHPC 工程大规模高效施工和应用领域的拓宽。因此，提升 UHPC 工作性能对于推动 UHPC 的规模化应用具有重要的现实意义。

高性能减水剂(SP)是超高性能混凝土不可缺少

收稿日期：2020–03–31。　Received date: 2020–05–06。
基金项目：国家重点研发计划项目(2018YFC0705400)。
第一作者：张倩倩（1986—），女，硕士，高级工程师。

Received date: 2020–03–31.　**Revised date:** 2020–05–06.
First author: ZHANG Qianqian (1986—), female, Master, Senior Engineer.
E-mail: zhangqianqian@cnjsjk.cn

的组分之一，通常是长链聚合物或带负电荷的共聚物，通过静电斥力和空间位阻效应将水泥颗粒分散，从而降低颗粒间的引力并释放出聚集在絮凝结构中的自由水[3–4]。对于带正电荷颗粒表面，减水剂通过静电作用直接吸附；对于带负电荷的颗粒表面，减水剂与 Ca^{2+}络合在吸附过程中发挥了关键作用。对于不同粉体混合的胶凝材料体系，实现在各种粉体表面的均匀吸附是获得最佳分散性能的关键。然而，众多研究表明，减水剂在不同粉体表面具有选择性吸附行为。Yoshioka 等[5]提出减水剂在不同矿物相表面具有显著的选择性吸附行为；Atarashi 等[6–7]和 Sakai 等[8]发现萘系减水剂和羧酸基减水剂在黏土和石灰石粉表面均具有选择性吸附现象；Plank[9]提出醚类的减水剂优选吸附在硅灰表面。UHPC 中采用的硅灰比表面积是水泥颗粒的 10 倍以上，在粉体总表面积中占有极高的比例。因此，提升硅灰的分散效果对实现 UHPC 高流态以及低黏度至关重要。Stecher 等[10]发现含膦酸基的减水剂在水泥浆体中表现出优异的分散性能；此外，还提出与普通羧酸基减水剂相比，含膦酸基减水剂具有更强竞争吸附能力[11]；Tramaux[12–13]等报道了含膦酸基团减水剂在高离子强度环境中仍具有优异的分散性能。上述研究表明，与 Ca^{2+}络合能力较强的膦酸基减水剂，对在碱性环境中表面带负电荷的硅灰具有优异的分散能力。

基为此，本工作对比研究了羧酸基和膦酸基 2 种减水剂对低水胶比水泥-硅灰浆体流变性能的影响，并通过分析 2 种减水剂在纯水泥浆体以及水泥-硅灰浆体中的吸附行为、颗粒堆积密实度以及间隙液黏度等，揭示减水剂的选择性吸附对 UHPC 浆体黏度的影响机制。

1　实验

1.1　原材料

水泥为江南小野田水泥有限公司生产的 P•Ⅱ52.5 硅酸盐水泥，比表面积(BET 法)为 933 m^2/kg，密度为 3.04 g/cm^3；硅灰为 Elkem 97 级微硅粉，比表面积(BET 法)为 29 900 m^2/kg，密度为 2.09 g/cm^3；减水剂为江苏苏博特新材料股份有限公司生产的羧酸基减水剂 SP1 和膦酸基减水剂 SP2，减水率均大于 30%。

1.2　测试

1.2.1　流变性能　　固定水胶比为 0.20，研究不同硅灰掺量下 2 种减水剂对浆体流变性能的影响。依据 GB/T 8077—2012《混凝土外加剂匀质性测试方法》测试浆体流动度。通过调整减水剂掺量，控制浆体流动度在(210±10) mm。浆体流变性能测试采用 MCR302 流变仪，选用 CC27 同轴圆筒测试系统(转子直径 26.66 mm，测试筒内径 28.92 mm)，测试程序如图 1 所示。具体过程如下：静置 30 s 后，以剪切速率 100 s^{-1} 匀速预剪切 60 s；预剪切结束后，10 s 内速度匀速下降至 0；静置 60 s 后，剪切速率以阶梯状从 0 增加至 100 s^{-1}，然后再以阶梯状从 100 s^{-1} 下降到 0。在剪切速率以阶梯状上升和下降过程中，每个分段速率均测试 10 s，采集 10 个剪切应力。最后采用剪切速率从 100 s^{-1} 下降到 0 过程中 11 个分段的剪切应力平均值分析浆体的流变性能。

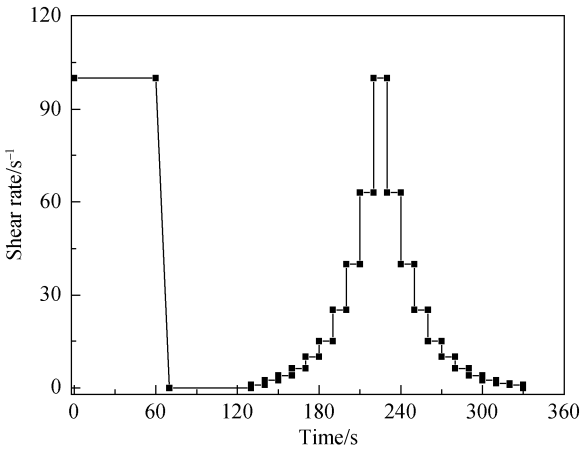


图 1　浆体流变性能测试程序

Fig. 1　Test program for rheology of cement paste

1.2.2　吸附性能　　固定水胶比为 0.20，称量 300 g 水泥或含有 10%硅灰的水泥–硅灰混合粉体，采用与浆体流变性能测试相同的搅拌制度，考察不同掺量下减水剂在纯水泥浆体中以及水泥–硅灰浆体中的吸附行为。浆体搅拌结束后立即倒入离心管。采用高速离心机以速度 10 000 r/min 离心 5 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 50 倍。采用德国耶拿公司生产的 Multi N/C3100 总有机碳分析仪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。

1.2.3　堆积密实度　　采用“最小需水量法”测试浆体中颗粒堆积密实度。堆积密实度可通过颗粒之间的空隙计算，而颗粒间的空隙则由粉末从固体粉末状态转变成浆体状态瞬间的需水量(称之为“最小需水量”)来确定[14]。具体试验方法如下：采用净浆搅拌机，首先将减水剂(掺量与浆体流变性能试验相同)与水混合均匀后倒入搅拌锅，然后将一定质量

m_c(350 g)的水泥或含 10%硅灰的水泥-硅灰混合粉体倒入搅拌锅，先慢搅 1 min，再高速搅拌 1 min，停止后将叶片、锅边缘和底部的拌合物刮下，再以高速搅拌 5 min，通过尝试找到恰好使拌合物从潮湿的固体(形成球状)变成平坦均匀的浆体所需的最小用水量 m_w，即稍微减少此用水量只能得到潮湿成团的固体。固体颗粒混合料的实测堆积密实度 ϕ_{max} 为固体物体积除以总体积，即：

$$\phi_{max}=\frac{\rho_w m_c}{\rho_w m_c+\rho_c m_w} \tag{1}$$

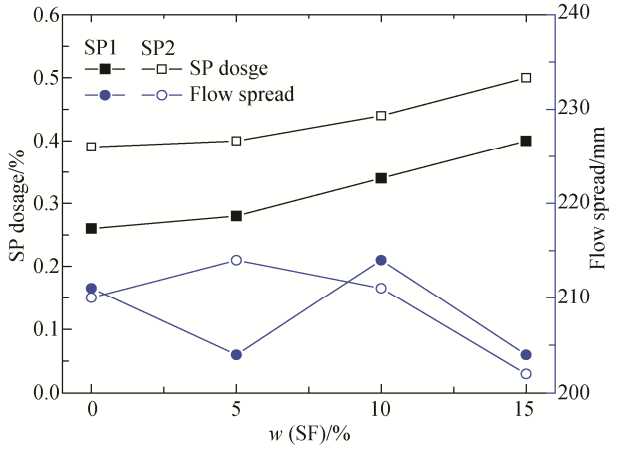
式中：ρ_w 和 ρ_b 分别为水和粉体的密度，g/cm^3；m_w 和 m_c 分别为最小需水量以及粉体的质量，g。

1.2.4 溶液黏度 测试了含不同浓度减水剂的模拟间隙液的黏度。模拟间隙液组成为：1.72 g/L $CaSO_4\cdot 2H_2O$、6.959 g/L Na_2SO_4、4.757 g/L K_2SO_4 和 7.12 g/L KOH[15]。溶液黏度测试同样采用 MCR302 流变仪，选择选用 CC39 同轴圆筒测试系统(转子直径 38.72 mm，测试筒内径 42.01 mm)，以 10 s^{-1} 速率匀速剪切 2 min，取表观黏度平均值作为最终溶液黏度。

2 结果与讨论

2.1 浆体的流变性能

图 2 为掺入不同量硅灰后，目标流动度为(210±10) mm 时的减水剂用量(固体掺量)及浆体实际流动度值。由图 2 可见，为达到目标流动度值，随硅灰掺量的增加，2 种减水剂用量均逐渐增大；2 种减水剂中 SP1 掺量大幅低于 SP2，但随着硅灰掺量的增加两者差距有逐渐减小的趋势。



w is mass fraction. SP is superplasticiter; SF is silica fume.

图 2 不同硅灰掺量下的减水剂用量和浆体流动度

Fig. 2 SP dosage and flow spread for paste with different content of silica fume

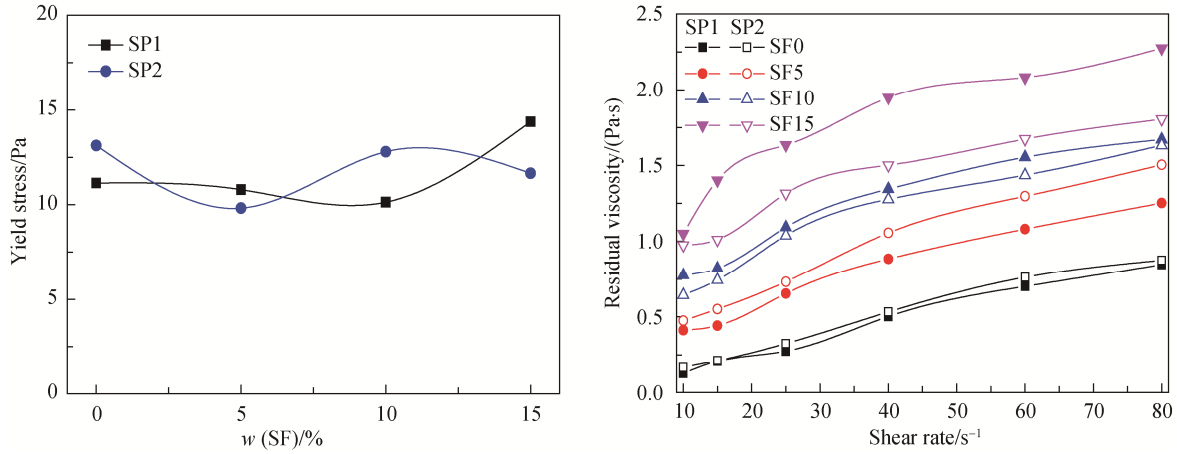
低水胶比浆体的剪切速率-剪切应力关系通常为非线性，可采用 Herschel-Bulkley 模型分析[2,16]。图 3a 为拟合获得的浆体屈服应力。可以看出，在(210±10) mm 的流动度范围内，不同硅灰掺量的浆体屈服应力较为接近。从流体力学的角度来看，在流动度测试过程中，浆体流动过程属于非牛顿流体在重力和表面张力作用下的自由表面流(或无压流)，而屈服应力反应了浆体开始流动需克服的最小阻力。已有学者从理论上给出了浆体屈服应力和其流动度之间的数学关系[17]。流动度相同时，密度相近的浆体屈服应力基本相同。

表观黏度是浆体中水动力、胶体作用力和接触力等共同作用的结果。它可以分为 2 部分：一部分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(剩余黏度)。在中低剪切速率下，屈服应力在表观黏度占有重要的比例。此时，关于黏度的影响存在较高的误读风险，即黏度的变化可能只是由于屈服应力导致。考虑到本研究中几组浆体的屈服应力并非完全相同，因此采用剩余黏度概念表征浆体的黏度，其表达式如下：

$$\eta_r=\frac{\tau-\tau_0}{\dot{\gamma}}=\eta-\frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} \tag{2}$$

式中：η_r 和 η 分别为剩余黏度和表观黏度，Pa·s；τ 和 τ_0 分别为剪切应力和屈服应力；$\dot{\gamma}$ 为剪切速率，s^{-1}。

图 3b 为不同硅灰掺量下，2 种减水剂对浆体剩余黏度的影响。可以看出：低水胶比浆体剪切增稠显著，剩余黏度随着剪切速率的增加逐渐增大；掺加硅灰增大了浆体剩余黏度，且掺量越高黏度增幅越大；纯水泥浆体中，掺 SP1 的浆体黏度略低于掺 SP2 的浆体；掺加 5%的硅灰，减水剂种类对剩余黏度的影响与纯水泥浆体一致；然而，当硅灰掺量增加至 10%以上时，减水剂种类对黏度的影响出现了相反的规律，即掺 SP1 的浆体黏度明显高于掺 SP2 的浆体黏度，且硅灰掺量越高两者差异越显著。上述结果说明，浆体中掺加硅灰导致 2 种减水剂对浆体黏度的影响规律产生了显著的变化，膦酸基减水剂有助于降低高硅灰掺量浆体的黏度。



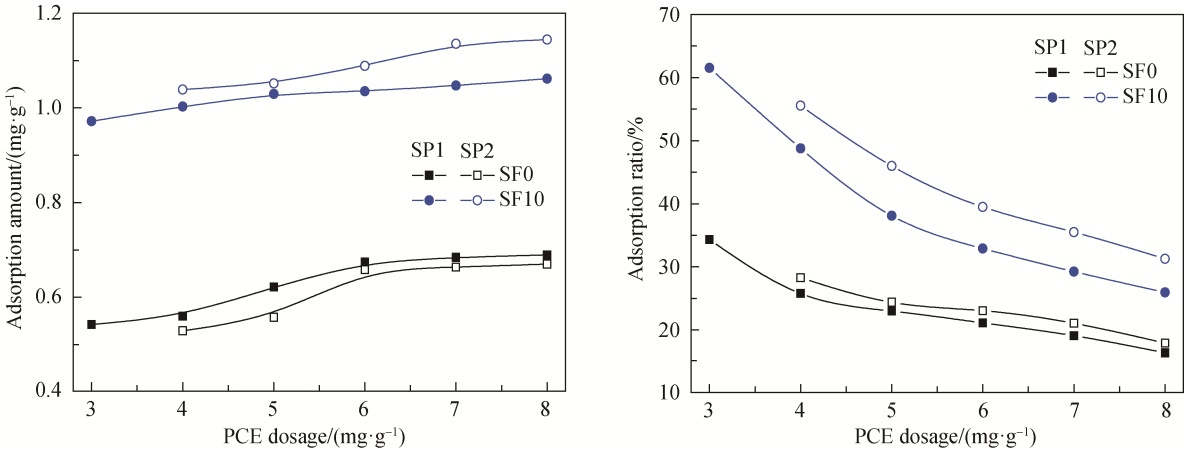
(a) Yield stress　　(b) Residual viscosity

图 3　不同硅灰掺量下减水剂种类对浆体流变性能的影响

Fig. 3　Effect of SP types on rheology of paste with different content of silica fume

2.2　减水剂在浆体中的吸附行为

为了探明掺加硅灰导致两种减水剂作用效果变化的原因，考察了纯水泥浆体以及含 10%硅灰的浆体中，2 种减水剂的吸附行为，结果见图 4。从图 4 可见：纯水泥浆体中，相同掺量时 SP1 的吸附量高于 SP2，但吸附率略低于 SP2；掺加硅灰导致 2 种减水剂的吸附量和吸附率均大幅增加，其中 SP2 的增幅更为显著；掺加硅灰后，SP1 的吸附量低于 SP2，且减水剂掺量越高差距越显著。上述结果说明，减水剂在硅灰表面的吸附能力显著高于水泥表面，且不同减水剂在不同粉体表面的吸附能力存在明显的差异。羧酸基减水剂在水泥颗粒表面具有一定的吸附优势，而膦酸基减水剂在硅灰表面的吸附能力更强。



(a) Adsorption amount　　(b) Adsorption ratio

图 4　浆体中两种减水剂的吸附行为:

Fig. 4　Adsorption behavior of the two SP in pastes

减水剂在粉末表面的吸附行为与吸附亲和力有关。含有带负电荷的羧酸基减水剂主链可以吸附在带正电荷的粒子表面，并通过 Ca^{2+}络合吸附在带负电荷的颗粒表面。含有膦酸基团的减水剂与 Ca^{2+}具有更强的络合能力，对带正电荷的表面和带负电荷的表面均具有更好的吸附亲和力[18]。硅灰的比表面积远高于水泥，导致 2 种减水剂对硅灰的吸附亲和力显著高于水泥。此外，在碱性溶液中硅灰表面呈负电荷，因而膦酸基减水剂对硅灰的吸附亲和力高于羧酸基减水剂。

2.3　选择性吸附与浆体黏度

浆体黏度主要由相对固体体积分数(ϕ/ϕ_{max}，固相浓度与最大堆积密实度的比值)、颗粒平均分散距离以及间隙液黏度等因素决定[19–20]。浆体中固相浓度和颗粒堆积密实度均是影响颗粒间距关键因素。从宏观尺度来看，颗粒间的微观剪切速率与宏观剪

切速率和颗粒间距的比例成正比。在给定的宏观剪切速率下，增大颗粒平均分散距离可降低微观剪切速率，进而减小水动力。此外，降低间隙液黏度可以降低剪切过程的粘滞阻力。因此，为了揭示减水剂选择性吸附对浆体黏度的影响机制，同时考察了浆体中的颗粒堆积以及间隙液黏度。

由于 van der Waals 力、静电力等颗粒间相互作用，胶凝颗粒与水接触后即发生絮凝。减水剂可以有效破坏颗粒间的絮凝结构。考虑到在较低的絮凝状态下颗粒更容易紧密堆积[21]，不同分散效果的减水剂将导致颗粒在浆体中的堆积密实度不同。图 5 为采用最小需水量法测得的不同硅灰掺量下浆体的堆积密实度。从图 5 可以看出：对于流动度相近的纯水泥浆体，颗粒堆积无明显差异；由于微细颗粒的填充作用，掺入硅灰可显著提高颗粒堆积密实度；此外，掺入 SP2 的浆体中颗粒堆积显著高于 SP1，且掺量越高 SP2 的优势越显著。该结果与预期相符。硅灰的比表面积较高，颗粒极易团聚。膦酸基减水剂对硅灰的分散效果更强，可实现浆体中硅灰颗粒的更充分分散，进而发挥其的填充效应，实现颗粒堆积密实度大幅度提高。

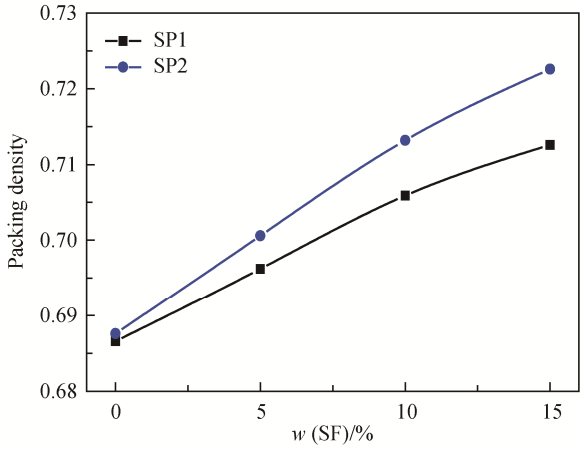


图 5 不同硅灰掺量下颗粒堆积密实度

Fig. 5 Packing density of particles in pastes with different content of silica fume

浆体中的减水剂可分为两部分：一部分吸附在颗粒表面；另一部分是残留在间隙溶液中。剩余在间隙液中的未吸附减水剂导致了间隙液黏度增加。由于减水剂自身的分子结构不同，且不同减水剂在粉体颗粒表面的吸附行为也存在显著的差异，因此含不同减水剂的浆体中间隙液黏度可能会有很大的差异。图 6 为 2 种减水剂在模拟液间隙液中的浓度-黏度关系曲线。从图 6 可以看出，相同浓度时，SP1 的黏度明显高于 SP2。根据 2 种减水剂的掺量以及在浆体中的吸附行为测试结果，可以估算 2 种减水剂在浆体间隙液中的浓度，进而获得间隙液的黏度值。对于纯水泥浆体，由于 SP1 的掺量远低于 SP2，而低掺量时减水剂的吸附率更高，因此间隙液中 SP1 的浓度较低，溶液黏度明显低于掺 SP2 的间隙液；当掺加硅灰后(以 10%掺量为例)，尽管为了实现目标流动度增加了减水剂用量，但由于减水剂吸附率大幅度提高，掺 SP1 的浆体中间隙液黏度并无明显增加，而掺 SP2 的浆体间隙液黏度反而低于纯水泥浆体。这也导致了掺加硅灰后，2 种减水剂中浆体的间隙液黏度无明显差异。此外，根据上述结果可以推测，掺加硅灰降低了 2 种减水剂浆体中间隙液黏度的差异，且掺量越高，含 SP2 的浆体间隙液黏度越接近含 SP1 的浆体；硅灰掺量达到一定值后，掺 SP2 的间隙液黏度将会低于掺 SP1 的间隙液黏度。

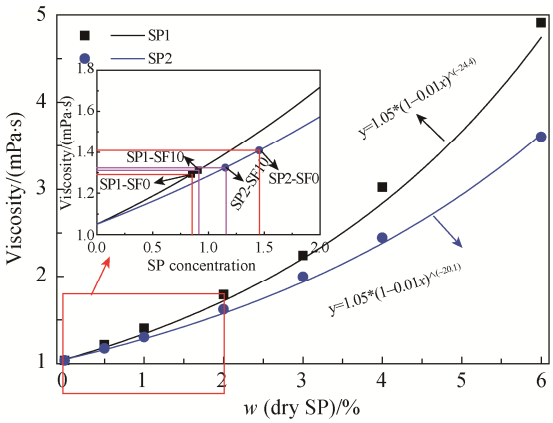


图 6 不同减水剂浓度下模拟间隙液黏度

Fig. 6 Viscosity of the simulated interstitial solutions with various SP dosages

对于流动度相近的纯水泥浆体，颗粒堆积密实度接近，但羧酸基减水剂的掺量明显低于膦酸基减水剂，导致其间隙液黏度更低，进而导致羧酸基减水剂的浆体黏度略低于膦酸基减水剂的浆体黏度。掺加 5%、10%和 15%硅灰时，羧酸基减水剂的浆体中颗粒堆积密实度分别提高了 1.4%、2.8%、3.8%，膦酸基减水剂的浆体中颗粒堆积密实度分别提高了 1.9%、3.7%、5.1%。然而，硅灰的密度低于水泥，导致浆体中固相浓度分别增加了 2.3%、4.5%和 6.8%，因此相对固体体积分数(ϕ/ϕ_{max})增大。此外，硅灰的比表面积远高于水泥颗粒，导致固体颗粒比表面积大幅度增加，颗粒平均间距减小[22]。这些因素均导致掺加硅灰增大了浆体黏度。但对比 2 种减水剂作用效果可以发现，由于膦酸基减水剂对硅灰

具有更强的分散能力，提升水泥-硅灰浆体中颗粒堆积密实度效果更为显著，进而导致 ϕ/ϕ_{max} 低于羧酸基减水剂的浆体，且硅灰掺量越大差距越显著。此外，2 种减水剂的间隙液黏度差异较小。因此，掺入膦酸基减水剂的水泥-硅灰浆体黏度更低。

以上结果表明，改善硅灰的分散对提高颗粒堆积极为有利，是降低 UHPC 黏度最有效的措施之一。因此，可以推测：对于掺入大量硅灰的 UHPC，采用 2 种分别能有效分散水泥和硅灰的减水剂混合使用，可以显著提高各颗粒的分散程度，从而提高工作性。后续工作将通过开展不同种类减水剂复配对 UHPC 黏度的影响来验证该推断。

3　结论

1) 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吸附能力更强。

2) 对于流动度相近的低水胶比水泥浆体，羧酸基的减水剂掺量远低于膦酸基减水剂，浆体黏度也更低；然而，硅灰的掺入导致浆体黏度增大，但随掺量的增加，羧酸基减水剂的浆体黏度逐渐高于膦酸基减水剂。

3) 流动度相近时，由于颗粒堆积无明显差异，低间隙液黏度是导致羧酸基减水剂浆体黏度低于膦酸基减水剂浆体主要原因；掺加硅灰后，由于膦酸基减水剂对硅灰具有更强的分散能力，导致了颗粒堆积密实度增加更为显著，进而导致了其浆体黏度低于羧酸基减水剂浆体。

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] YAMADA K, HANEHARA S. Interaction mechanism of cement and superplasticizers-The roles of polymer adsorption and ionic conditions of aqueous phase[J]. Concr Sci Eng, 2001, 11: 135–145.

[4] GELARDI G, FLATT R J. 11-Working mechanisms of water reducers and superplasticizers [J]. Sci Technol Concr Admix, 2016: 257–278.

[5] 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.

[6] ATARASHI D, SAKAI E, OBINATA R, et al. Influence of clay minerals on fluidity of $CaCO_3$ suspension containing comb-type polymer[J] Cem Sci Concr Technol, 2003, 57: 386–391.

[7] ATARASHI D, SAKAI E, DAIMON M. Interaction between superplasticizers and clay minerals[J]. Cem Sci Concr Technol, 2004, 58: 387–392.

[8] SAKAI E, ATARASHI D, DAIMON M. Interaction between superplasticizers and clay minerals//6th International Symposium on Cement and Concrete, CANMET/ACI International Symposium on Concrete Technology for Sustainable Development, Xi'an, Sept. 19-22, 2006: 1560–1566.

[9] 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.

[10] STECHER J, PLANK J. Phosphated comb polymers-a new generation of highly effective superplasticizers[C]//International Concrete Sustainability Conference (SCC 2016), Washington, May 15-18, 2016: 61–71.

[11] STECHER J, PLANK J. Novel concrete superplasticizers based on phosphate esters[J]. Cem Concr Res, 2019, 119: 36–43.

[12] TRAMAUX A, AZÉMA, N, DAVID G, et al. Synthesis of phosphonated comb-like copolymers and evaluation of their dispersion efficiency on $CaCO_3$ suspensions. Part I: Effect of an increasing phosphonic acid content[J]. Powder Technol, 2018, 333: 19–29.

[13] TrAMAUX A, AZÉMA N, DAVID G, et al. Synthesis of phosphonated comb-like copolymers and evaluation of their dispersion efficiency on $CaCO_3$ suspensions part II: Effect of macromolecular structure and ionic strength[J]. Powder Technol, 2018, 334: 163–172.

[14] DE LARRARD F. Concrete constituents: relevant parameters, in: F. De Larrard (Ed.), Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach, CRC Press, 1999: 222–249.

[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 Publication, 2012: 435–449.

[16] 刘建忠, 孙伟, 张倩倩, 等. 低水胶比水泥基复合材料的流变特性[J]. 混凝土与水泥制品, 2014(1): 1–4.
LIU J, SUN W, ZHANG Q. China Concr Cem Prod (in Chinese), 2014(1): 1–4.

[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] DALAS F, NONAT A, POURCHET S, et al. Tailoring the anionic function and the side chains of comb-like superplasticizers to improve their adsorption[J]. Cem Concr Res, 2015, 67: 21–30.

[19] 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.

[20] HOT J, BESSAIES-BEY H, BRUMAUD C, et al. Adsorbing polymers and viscosity of cement pastes[J]. Cem Concr Res, 2014, 63: 12–19.

[21] AITCIN P C, JOLICOEUR C, MACGREGOR J G. Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't[J]. Concr Int, 1994, 16: 45–52.

[22] FUNG W W S, KWAN A K H. Role of water film thickness in rheology of CSF mortar[J]. Cem Concr Compos, 2010, 32(4): 255–264.