

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201804030



# 泥粉对聚羧酸减水剂水泥净浆 流变性的影响

张亦林<sup>1</sup>, 严捍东<sup>1</sup>, 钟国才<sup>2,3</sup>, 全志龙<sup>3</sup>

- (1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;  
2. 科之杰新材料集团有限公司, 福建 厦门 361101;  
3. 华侨大学 材料科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 为探究泥粉和聚羧酸减水剂对水泥净浆流变性的影响,在掺入聚羧酸减水剂母液和两种复配助剂的基础上,分别外掺 1%, 2%, 3% 的高岭土型和蒙脱土型泥粉,并采用 Bingham 流变模型系统地研究泥粉掺量、种类和聚羧酸减水剂助剂对水泥净浆屈服应力及塑性粘度的影响规律.通过 X 射线(XRD)小角度衍射、总有机碳(TOC)、Zeta 电位对宏观试验结果进行验证.结果表明:增大泥粉掺量可降低聚羧酸减水剂水泥净浆的流变性;高岭土型普通黏土对降低聚羧酸减水剂水泥净浆流变性的程度小于蒙脱土型膨润土;异戊烯基聚氧乙烯醚(TPEG 类)保坍型助剂 F1 对水泥净浆流变性的促进作用大于异丁烯基聚氧乙烯醚(HPEG 类)减水型助剂 F2.

**关键词:** 泥粉; 聚羧酸减水剂; 水泥净浆; 流变性

**中图分类号:** TU 528.52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)06-0832-08

## Influence of Clay Powder to Rheological Behaviour of Cement Paste With Polycarboxylate Superplasticizer

ZHANG Yilin<sup>1</sup>, YAN Handong<sup>1</sup>,  
ZHONG Guocai<sup>2,3</sup>, QUAN Zhilong<sup>3</sup>

- (1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;  
2. KZJ New Materials Group Company Limited, Xiamen 361101, China;  
3. College of Materials Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to explore the effect of clay powder and polycarboxylate superplasticizer on rheological behaviour of cement paste, in addition of the mother liquor of polycarboxylate superplasticizer and two kinds of compound additive, the clay powder with proportion of 1%, 2%, 3% is also added. Using Bingham rheological model, the effect of quantity of clay powder and compound additive of polycarbox ylate superplasticizer on yield stress and plastic viscosity of two rheological parameters of cement paste is systematically discussed, and verified by the macro experimental results by X ray (XRD) analysis of small angle diffraction, total organic carbon (TOC) and Zeta potential testing. The results show that the increasing admixing quantity of clay powder decreases the rheological behavior of cement paste with polycarboxylate superplasticizer. The rheological b-

aviour decrease of cement paste with polycarboxylate superplasticizer due to kaolin clay is more than the behaviour decrease due to montmorillonite clay powder, and the rheological behavior increase of cement paste with polycarboxylate superplasticizer due to isoprene polyoxyethylene ether (TPEG) compound additive of F1 with slump loss resistance is more than the behavior increase due to isobutylene polyoxyethylene ether (HPEG) compound additive of F2 with water reducing ratio.

**Keywords:** clay powder; polycarboxylate superplasticizer; cement paste; rheological behaviour

聚羧酸类减水剂具有掺量低、减水率高、收缩小等特点，不仅能与水泥较好的相容，还能大幅度提高混凝土的早期、后期强度，并提升混凝土的耐久性<sup>[1-3]</sup>。但随着优质砂石资源的短缺，劣质砂石对聚羧酸减水剂的效果带来很大的负面影响，其中，泥粉产生的负面影响尤为突出。研究表明<sup>[4-5]</sup>，泥粉对减水剂有吸附作用，可降低浆体中减水剂浓度，使浆体稠度增大，导致混凝土坍落度损失增大。由于泥粉引起水泥净浆流变性变化的因素较多、作用机理较复杂，现阶段还找不到有效的解决方法<sup>[6]</sup>。Svensson 等<sup>[7]</sup>研究蒙脱土对聚羧酸减水剂水泥净浆流变性及和易性的影响。Sakai 等<sup>[8]</sup>研究对比蒙脱土、高岭土对掺聚羧酸减水剂水泥浆体流动度和粘度的影响。何正恋<sup>[9]</sup>采用 Langmuir 等温吸附模型，研究蒙脱土、高岭土和伊利土对聚羧酸减水剂水泥净浆流变性的影响。王林<sup>[10]</sup>采用 X 射线(XRD)测试方法，研究不同掺量下，蒙脱土、高岭土对聚羧酸减水剂水泥砂浆流变性的影响。程勋<sup>[11]</sup>研究掺量为 1% 的膨润土对聚羧酸减水剂水泥净浆初始扩展度及 2 h 经时扩展度的影响。目前，已有诸多学者就泥粉种类及掺量对水泥净浆和砂浆的流变性展开了诸多研究，但较少有人通过调整聚羧酸减水剂助剂种类，系统地研究泥粉种类和掺量对水泥净浆流变性的影响。因此，本文通过试验测试分析泥粉种类、掺量，以及聚羧酸减水剂助剂种类对水泥净浆流变性的影响。

1 试验原材料

1.1 水泥

水泥采用符合 GB 8076—2008《混凝土外加剂》<sup>[12]</sup>规定的基准水泥。水泥物理性能为：初凝时间为 146 min；终凝时间为 210 min；密度为 3.18 g · cm<sup>-3</sup>；比表面积为 353 m<sup>2</sup> · kg<sup>-1</sup>。

1.2 聚羧酸减水剂母液及助剂

福建泉州中实新型建材科技有限公司提供母液，用 M 表示。依据规范 JG/T 223—2017《聚羧酸系高性能减水剂》，母液主要性能指标有：固体质量分数为 50.1%；pH 值为 5.34；密度为 1.107 g · mL<sup>-1</sup>；水泥净浆流动度为 314 mm；砂浆减水率为 32.1%；混凝土减水率为 34.0%；母液掺量为水泥用量的 0.9%。福建厦门科之杰新材料集团有限公司提供助剂，保坍型助剂（TPEG 类，异戊烯基聚氧乙烯醚）用 F1 表示，固体质量分数为 39.27%，其主要性能指标见文献<sup>[13]</sup>；减水型助剂（HPEG 类，异丁烯基聚氧乙烯醚）用 F2 表示，固体质量分数为 50.37%，其主要性能指标见文献<sup>[14]</sup>。

减水剂母液和助剂的红外光谱，如图 1 所示。图 1 中： $\eta$  为发光率； $\sigma$  为波数。由图 1 可知：样品 M、样品 F1 和样品 F2 红外谱图的特征吸收峰相似度很高，即 2 878 cm<sup>-1</sup> 处为次甲基（—CH—）的伸缩振动峰；1 718 cm<sup>-1</sup> 处的特征峰说明羧酯基（—COO— 和/或 —COOH）存在；1 105 cm<sup>-1</sup> 处的强吸收峰归属于一CO—的伸缩振动峰。由图 1 还可知：样品 F2 在 1 575 cm<sup>-1</sup> 处，有一个明显的讯号峰，这可能是使用了与母液和样品 F1 不同的共聚合单体。

1.3 泥粉

泥粉采用的普通黏土(S)取自福建省泉州市中泰混凝土发展有限公司洛江搅拌站，膨润土(P)取自

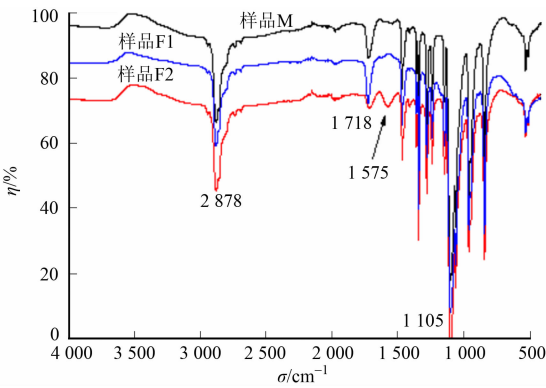


图 1 减水剂母液和助剂的红外光谱  
Fig. 1 Infrared spectrum of water-reducing agent mother liquid and auxiliaries

浙江省湖州市高禹鼎丰膨润土厂. S 的表观密度为  $2.46\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 比表面积为  $351\text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ ; P 的表观密度为  $2.04\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 比表面积为  $227\text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ . S 的主要矿物成分为高岭土( $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_8$ ), 由硅氧 4 面体和铝氧 8 面体相间组成, 层状结构为 1:1 型; P 的主要矿物成分为蒙脱土( $(\text{Al}_{1.67}\text{Mg}_{0.33})[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), 由两个硅氧 4 面体与一个铝氧 8 面体构成, 层状结构为 2:1 型.

两种泥粉的化学成分, 如表 1 所示. 表 1 中:  $w$  为质量分数. 采用 Rigaku Smartlab 型粉末衍射仪(日本理学公司)分析泥粉 XRD 矿物成分, 结果如图 2 所示. 图 2 中:  $\theta$  为入射角. 采用 Bettersize 2000 型激光粒度分布仪(辽宁丹东百特仪器有限公司)对泥粉粒度分布进行测试, 结果如图 3 所示. 图 3 中:  $\zeta$  为累计筛余百分率;  $\psi$  为分计筛余百分率;  $d$  为粒径; D10 代表累计筛余百分率为 10% 时, 对应的粒径值; D50 代表累计筛余百分率为 50% 时, 对应的粒径值; D90 代表累计筛余百分率为 90% 时, 对应的粒径值. 由图 3 可知: P 的粒径颗粒激光粒度分布(D50)小于 S.

表 1 泥粉的化学成分

Tab. 1 Chemical components of clay powder

%

种类	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$w(\text{TiO}_2)$	$w(\text{K}_2\text{O})$	$w(\text{Na}_2\text{O})$	$w(\text{CaO})$	$w(\text{MgO})$	$w(\text{LOI})$
普通黏土	47.49	27.39	5.39	0.65	3.17	2.14	1.49	0.54	11.70
膨润土	59.80	13.52	2.50	0.30	2.64	3.31	4.93	2.15	10.64

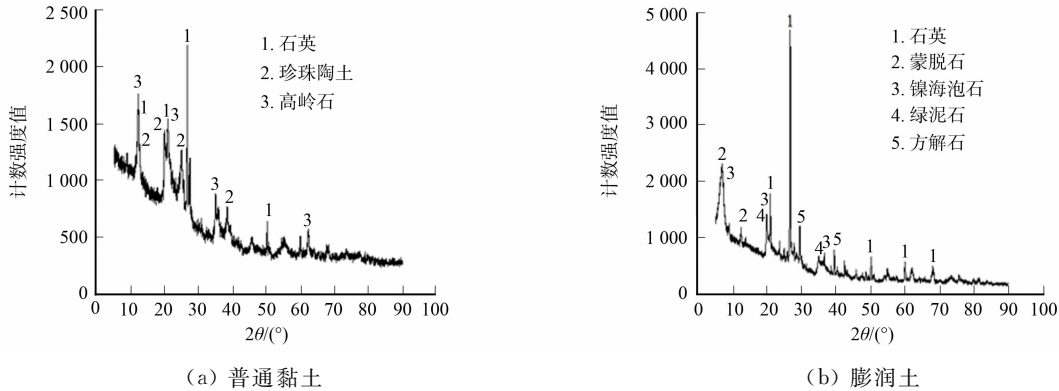


图 2 泥粉 XRD 矿物成分测试

Fig. 2 XRD mineral component test of clay powder

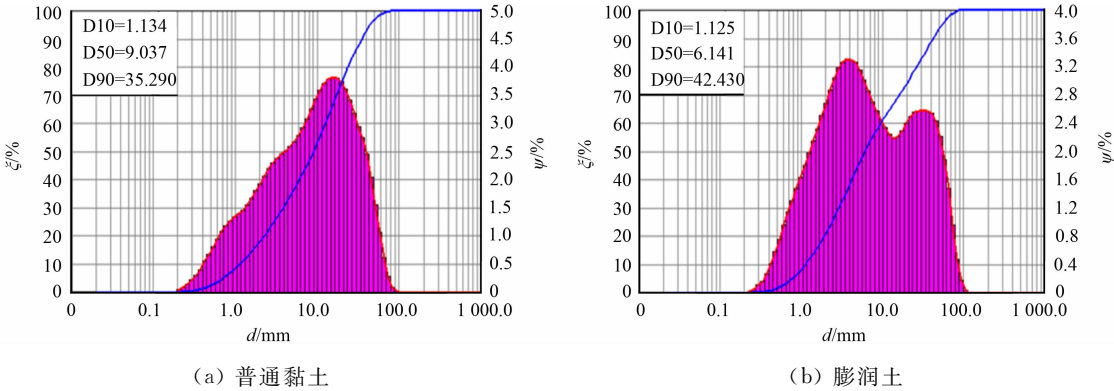


图 3 泥粉激光粒度分布测试

Fig. 3 Laser crystal size distribution of clay powder

## 2 试验方法

### 2.1 XRD 小角度衍射

在掺聚羧酸减水剂母液 M 及助剂 F1 时, 利用 Rigaku Smartlab 型粉末衍射仪(日本理学公司)的 X 射线小角度衍射分析 S, P 层间间距的变化, 若泥粉层间发生吸附作用, 则层间间距增大.

### 2.2 Bingham 流变模型

采用 NJ-160A 型水泥净浆搅拌机(江苏无锡建仪仪器机械有限公司)制备水泥净浆, 采用 NXS-11B

型旋转粘度计(四川成都仪器厂)测试水泥净浆在不同剪切速率下的剪切应力, 根据 Bingham 流变模型进行线性拟合, 得到屈服应力、塑性粘度参数. 拟合直线与纵坐标的截距为屈服应力( $\tau_0$ ), 斜率为塑性粘度( $\eta_{pl}$ ). Bingham 线性拟合方程为

$$\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \cdot \gamma \tag{1}$$

式(1)中: $\tau_0$  为水泥净浆的屈服应力; $\tau$  为水泥净浆的剪切应力; $\eta_{pl}$  为水泥净浆的塑性粘度; $\gamma$  为水泥净浆搅拌机的剪切速率.

2.3 总有机碳测试

采用 TOC-Vwp 型总有机碳分析仪(日本岛津公司)分析总有机碳(TOC). 先计算已知溶液中聚羧酸减水剂的质量比, 当泥粉吸附减水剂后, 再将初始减水剂的质量比减去溶液中减水剂剩余质量比, 从而测定泥粉颗粒聚羧酸减水剂分子的吸附量. 首先, 分别称取 S, P 各 5 g, 加入 50 mL 聚羧酸减水剂 M, F1 和 F2, 搅拌 10 min 后, 静置 5 min; 然后, 将 10 mL 上层悬浊液倒入离心管, 保持 25 ℃ 恒温, 在 6 000 r · min<sup>-1</sup> 转速下离心 5 min 后, 取上层清液 3 mL 稀释 100 倍; 最后, 根据计算公式计算泥粉颗粒对聚羧酸减水剂分子的吸附量, 其计算公式为

$$Q = \frac{V \times (C_0 - C_1)}{m} \tag{2}$$

式(2)中:Q 为颗粒对聚羧酸减水剂分子的吸附量;V 为聚羧酸减水剂溶液的体积;C<sub>0</sub> 为吸附前聚羧酸减水剂的质量浓度;C<sub>1</sub> 为吸附后聚羧酸减水剂的质量浓度;m 为加入的泥粉或水泥颗粒质量.

2.4 Zeta 电位测试

在保持聚羧酸减水剂含固质量一致的情况下, 采用 JS94K2 型微电泳仪(上海中晨数字技术设备有限公司)进行电动电位(Zeta)测试. 由于, 掺入的泥粉会吸附聚羧酸减水剂分子, 导致电位变化, 从而测得泥粉对聚羧酸减水剂分子的吸附速度和吸附量.

3 试验方案

由于砂石带入的泥, 将增大混凝土拌合物经时坍落度损失. 为满足预拌混凝土施工要求, 搅拌站一般会适当提高混凝土拌合物初始坍落度. 为与工程中大流动性混凝土相适应, 试验设定净浆水灰比为 0.35, 聚羧酸减水剂 M 掺量为 0.39%. 为使减水剂固体质量分数保持不变, M 与 F1 复配减水剂的掺量为 1.44%, M 与 F2 复配减水剂的掺量为 1.34%. 泥粉分别按水泥用量的 1%, 2% 和 3% 掺入净浆中, 分别用 S1, S2, S3 和 P1, P2, P3 表示. 初始流变性测试后, 将样品放置于恒温水箱(35 ℃), 每隔 30 min 重新搅拌均匀, 再重新取样测试, 测试至 120 min.

4 试验结果与分析

4.1 流变参数的线性拟合

Bingham 流变模型线性拟合得到的流变参数, 如图 4~6 所示. 图 4~6 中:  $t$  为时间. 通过对比研究泥粉掺量、泥粉种类和减水剂种类, 研究其对聚羧酸减水剂水泥净浆流变性的影响规律. 拟合过程中, 出现少量测试点的屈服应力为负值, 原因是在某些剪切速率范围内水泥净浆不稳定<sup>[15]</sup>, 这些负值点不作为实际参考, 仅观察相对变化趋势.

4.2 泥粉掺量的影响

由图 4~6 可知: 在泥粉、聚羧酸减水剂种类均相同时, 掺 S1, P1 时, 聚羧酸减水剂水泥净浆屈服应力、塑性粘度相对较小, 流变参数大致随着时间的增长而增大, 在 2 h 经时基本达到最大值; 增加泥粉掺量至 2% 和 3% 时, 两种泥粉的初始屈服应力和塑性粘度相较掺量为 1% 时, 皆有大幅度增加, 不仅经时流变参数随着时间的增长而增加, 而且参数数值始终大于同一时刻掺量为 1% 的泥粉. 出现这一现象的机理为: 泥粉颗粒为松散多孔的层状结构, 使其吸水性优于水泥; 同时, 泥粉颗粒对减水剂吸附性较强, 在有限的减水剂掺量下, 水泥颗粒缺乏足够的减水剂, 导致净浆颗粒分散, 故随着泥粉掺入量的增加, 净浆流变性大幅下降<sup>[16-17]</sup>. 这充分表明增大泥粉掺量显著降低了聚羧酸减水剂水泥净浆的流变性. 根据 JGJ

52—2006《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》<sup>[18]</sup> 规定,以及结合试验现象分析,为最大程度减小泥粉掺量的不利影响,控制泥粉掺量在 1%左右比较合适.

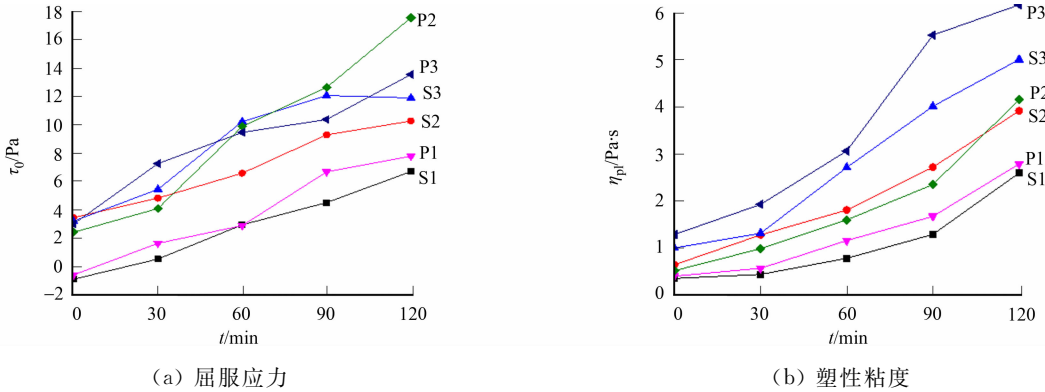


图 4 泥粉种类和掺量对 M 净浆流变参数影响曲线

Fig. 4 Influence curve of species and admixing quantity of clay powder to rheological parameters of M paste

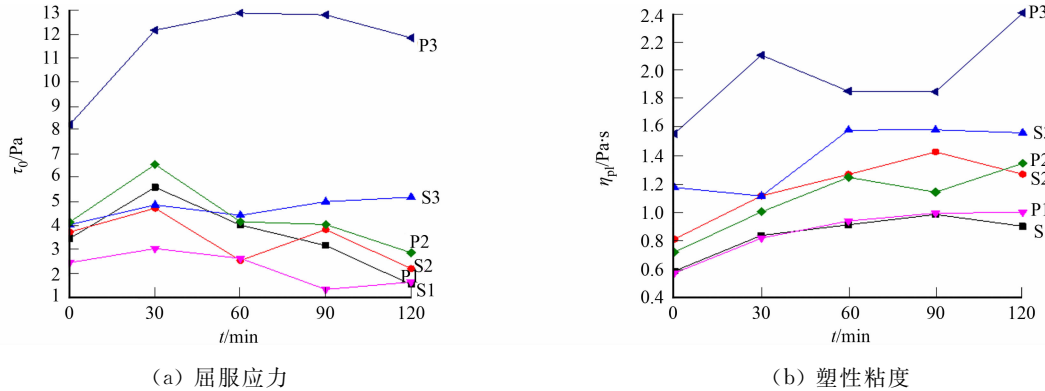


图 5 泥粉种类和掺量对 F1 净浆流变参数影响曲线

Fig. 5 Influence curve of species and admixing quantity of clay powder to rheological parameters of F1 paste

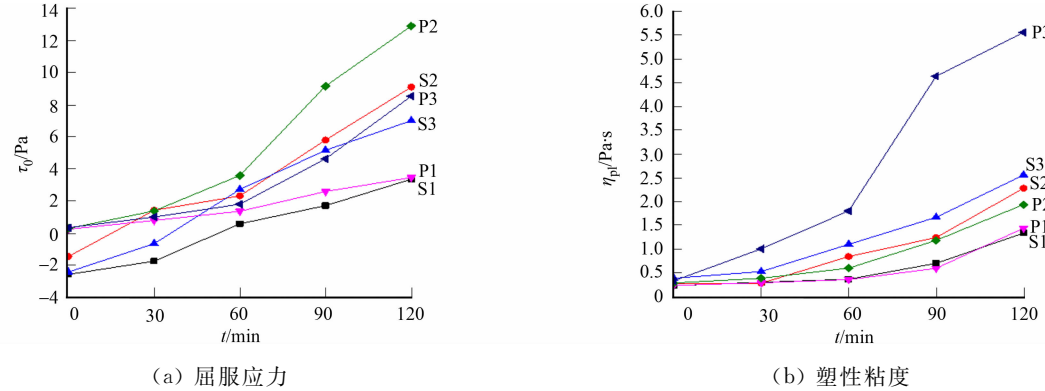


图 6 泥粉种类和掺量对 F2 净浆流变参数影响曲线

Fig. 6 Influence curve of species and admixing quantity of clay powder to rheological parameters of F2 paste

4.3 泥粉种类的影响

由图 4~6 可知:在泥粉掺量、聚羧酸减水剂种类均相同时,掺 P 时,聚羧酸减水剂水泥净浆屈服应力、塑性粘度皆大于 S. 其中,泥粉掺量为 1%,掺 S,P 时,流变参数均随着时间的增长而增大,且在参数数值上两者差异较小;泥粉掺量为 2%,3%,掺 S,P 时,流变参数同样随着时间的增长而增大,但二者的参数数值存在明显差异,且随着时间的增长,数值差异越来越大. 从宏观角度分析,P 颗粒堆积较为疏松,且颗粒间空隙较大,吸水性较强;S 颗粒堆积相对紧密,且颗粒间空隙较小,故吸水性弱于 P<sup>[19]</sup>.

4.4 减水剂种类的影响

由图 4~6 可知:在泥粉掺量和种类相同的条件下,复掺 F1 或 F2 时,聚羧酸减水剂水泥净浆初始屈服应力、塑性粘度明显小于单掺 M;复配时,流变参数大致随着时间的增长而增加,在 2 h 经时基本达



到最大值,且参数数值始终小于单掺 M 的水泥净浆,这说明复配能促进水泥净浆的流变性. 对比图 5,6 可知:除个别时间点外,掺 F2 时,聚羧酸减水剂水泥净浆屈服应力、塑性粘度皆大于 F1,这充分说明 TPEG 类保坍型助剂 F1 对水泥净浆流变性的促进作用大于 HPEG 类减水型助剂 F2.

### 5 试验结果验证

为进一步验证结论的准确性,采用 XRD 小角度衍射分析、总有机碳 TOC 和 Zeta 电位测试对上述试验结果进行验证.

#### 5.1 XRD 小角度衍射测试结果

两种泥粉层间间距测试结果,如图 7 所示. 图 7 中:S,S+M,S+F1,S+F2 分别为单掺 S,掺 S 和 M,掺 S 和 F1,掺 S 和 F2;P,P+M,P+F1,P+F2 分别为单掺 P,掺 P 和 M,掺 P 和 F1,掺 P 和 F2. 由图 7 可知:与未经减水剂处理的 S 相比,经聚羧酸减水剂 M,F1,F2 处理后的 S 层间间距增加不明显,几乎可以忽略不计,说明聚羧酸减水剂 M,F1,F2 没有进入 S 层间;与未经减水剂处理的 P 相比,经聚羧酸减水剂 M,F1,F2 处理后的 P 层间间距明显增加,说明聚羧酸减水剂分子进入 P 层间. 从微观角度分析,P 为分子间作用力,键能较弱,故分子吸水后体积膨胀,晶层间距增大,聚羧酸减水剂分子易被吸入 P 分子层间,因此,水泥净浆中具有功能作用的聚羧酸减水剂分子减少;而 S 晶层两侧由氢键连接,键能远强于分子间作用力,水分子不易渗入层间<sup>[20-25]</sup>. 这充分表明高岭土型普通黏土对降低聚羧酸减水剂水泥净浆流变性的程度小于蒙脱土型膨润土.

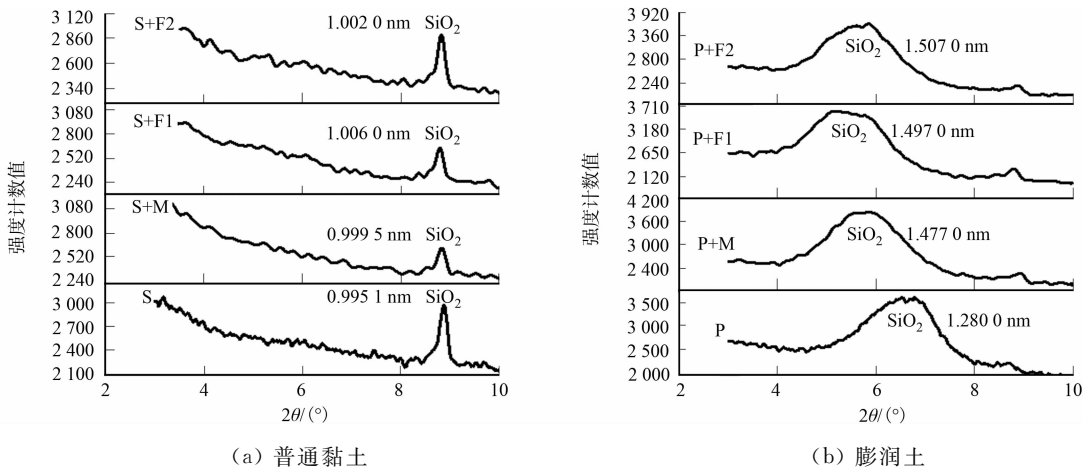


图 7 泥粉层间间距测试  
Fig. 7 Interlayer spacing test of clay powder

#### 5.2 总有机碳 TOC 测试结果

泥粉对聚羧酸减水剂的吸附量的影响,如图 8 所示. 由图 8 可知:掺 M 时,S 吸附量约为水泥的 2 倍,P 吸附量约为水泥的 2.5 倍;掺 F1,F2 时,S 吸附量约为水泥的 2 倍,P 吸附量则达到水泥的 3 倍以上. 故无论是单掺 M,还是复掺 F1 或 F2,泥粉对聚羧酸减水剂分子的吸附量均为  $Q(P) > Q(S) > Q(\text{水泥})$ . 因此,S 降低聚羧酸减水剂水泥净浆流变性的程度小于 P,与水泥净浆流变性的试验一致. 同时,掺 F2 时,泥粉对聚羧酸减水剂分子的吸附量大于掺 F1,即保坍型助剂 F1 对水泥净浆流变性的促进作用大于减水型助剂 F2.

#### 5.3 Zeta 电位测试结果

两种泥粉对聚羧酸减水剂分子 Zeta 电位测试结果,如表 2 所示. 表 2 中: $\omega$  为掺量. 由表 2 可知:掺 S 时,单掺及复掺水泥净浆 Zeta 电位值相对较低,电位绝对值不超过 8.2 mV;掺 P 时,Zeta 电位绝对值比掺 S 时有所增大.

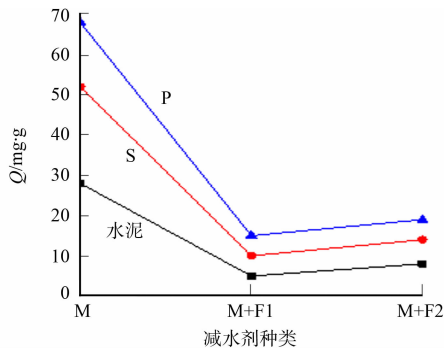


图 8 泥粉对聚羧酸减水剂的  
吸附量的影响曲线  
Fig. 8 Influence curve of clay powder to  
adsorption of polycarboxylate superplasticizer

结合泥粉特性分析,P对聚羧酸减水剂分子的吸附量和吸附速度大于S,由于减水剂分子与水泥颗粒呈齿形吸附,此吸附方式将对水泥颗粒起排斥分散作用,从而增强水泥浆体的流变性,而泥粉对聚羧酸减水剂有较强的吸附作用,其对聚羧酸减水剂的吸附量和吸附速度将极大地影响减水剂分子与水泥颗粒之间的结合<sup>[26-30]</sup>.因此,Zeta 电位绝对值越大,且达到最大绝对值的时间越短时,泥粉对聚羧酸减水剂水泥净浆的流变性能的抑制作用越强,故P对降低聚羧酸减水剂水泥净浆流变性的程度大于S,这与节4.2的结论相契合.

仅对聚羧酸减水剂母液及助剂进行研究.掺M时,Zeta 电位绝对值在外掺S,P时,其电位绝对值在30 min和90 min分别达到最大值,7.48,13.68;掺F1时,Zeta 电位绝对值在外掺S,P时,其电位绝对值在90 min分别达到最大值,5.89,11.78;掺F2时,Zeta 电位绝对值在外掺S,P时,其电位绝对值在30 min分别达到最大值,8.29,12.35.由于掺F2时,Zeta 电位绝对值大于F1,且达到绝对值最大时间长于F1,即F2对聚羧酸减水剂吸附量和吸附速度大于F1.结合文献<sup>[26-30]</sup>可知,保坍型助剂F1对水泥净浆流变性的促进作用大于减水型助剂F2.

表 2 Zeta 电位测试  
Tab.2 Test of Zeta potential

聚羧酸 减水剂	$\bar{\omega}/g$	泥粉	$\bar{\omega}/g$	Zeta 电位/mV				
				初始	30 min	60 min	90 min	120 min
M	1.170 0	S	3	-3.35	-7.48	-6.52	-6.21	-6.03
		P	3	-10.50	-11.86	-12.95	-13.68	-12.72
F1	4.327 7	S	3	-4.30	-5.12	-5.53	-5.89	-5.63
		P	3	-9.53	-10.89	-11.15	-11.78	-10.32
F2	4.030 9	S	3	-4.37	-8.29	-7.45	-6.73	-6.16
		P	3	-9.12	-12.35	-9.82	-6.43	-4.21

6 结 论

1) 泥粉的物理性能对聚羧酸减水剂水泥净浆的流变性起决定性作用.泥粉的比表面积大,需水性强,导致对聚羧酸减水剂的吸附性增强,从而对水泥净浆的流变性产生不利影响.为最大程度降低泥粉对聚羧酸减水剂水泥净浆流变性的不利影响,泥粉掺量宜控制在1%左右.

2) 不同泥粉对掺聚羧酸减水剂水泥净浆流变性的影响不同.泥粉颗粒间空隙越大、颗粒堆积越紧密、分子间作用力越强,对水泥净浆流变性的不利影响越小.故高岭土型普通黏土对降低聚羧酸减水剂水泥净浆流变性的程度小于蒙脱土型膨润土.

3) 加入助剂对聚羧酸减水剂进行复配,可以使水泥净浆流变性有较大的提升,其中,TPEG类保坍型助剂F1对水泥净浆流变性的促进作用大于HPEG类减水型助剂F2.

参考文献:

[1] 王玲.中国混凝土外加剂行业发展现状和趋势[C]//中国硅酸盐学会2013年混凝土与水泥制品学术讨论会.武汉:中国硅酸盐学会.2013;9-14.

[2] 缪昌文,冉千平,洪锦祥,等.聚羧酸系高性能减水剂的研究现状及发展趋势[J].中国材料进展,2009,28(11):36-45.

[3] 宋家乐,周智密,李禅禅,等.聚羧酸系减水剂的研究现状与展望[J].材料导报,2014,28(24):280-285.

[4] TOPCU I B,DEMIR A. Relationship between methylene blue values of concrete aggregate fines and some concrete properties[J]. Canada Journal of Civil Engineering,2008,35(4):379-383. DOI:10.1139/L07-111.

[5] ZHANG Dongfang,JU Benzhi,ZHANG Shufen,*et al.* The study on the dispersing mechanism of starch sulfonate as a water-reducing agent for cement[J]. Cement Concrete Research,2007,70(4):187-198. DOI:10.1016/j.carbpol.2007.04.024.

[6] MOHAMMEED H K,MOHAMED S Y,AHMED E. Data on effect of a reducer of water and retarder of setting time admixtures of cement pastes and mortar in hardened stat[J]. Data in Brief,2018,18:454-462. DOI:10.1016/j.

- dib, 2018, 03, 050.
- [7] SVENSSON P D, HANSEN S. Intercalation of smectite with liquid ethylene glycol resolved in time and space by synchrotron X-ray diffraction[J]. *Clays and Clay Minerals*, 2016, 64(4): 488-502. DOI: 10.1346/ccmn.2016.0640411.
- [8] SAKAI E, ATARASHI D, DAIMON M. Interaction between superplasticizers and clay minerals[C]//第六届水泥与混凝土国际会议暨 CANMET/ACI 混凝土技术可持续发展国际会议. 西安:中国硅酸盐学会, 2006:654-655.
- [9] 何正恋. 粘土对聚羧酸减水剂吸附性能的机理研究[D]. 武汉:武汉科技大学, 2015.
- [10] 王林. 粘土矿物对聚羧酸减水剂性能的影响及机理研究[D]. 北京:中国矿业大学, 2013.
- [11] 程勋. 混凝土原材料对聚羧酸减水剂应用性能的影响[D]. 北京:北京工业大学, 2010.
- [12] 中国国家标准化管理委员会. 混凝土外加剂: GB 8076—2008[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009.
- [13] 官梦芹, 方云辉, 蒋卓君, 等. 一种新型聚羧酸保坍剂的合成及性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2017(5): 25-28. DOI: 10.3969/j.issn.1001-702X.2017.05.007.
- [14] 柯余良. 高和易性聚羧酸减水剂的开发及其评价方法的建立[J]. *新型建筑材料*, 2016(9): 84-86. DOI: 10.3969/j.issn.1001-702X.2016.09.024.
- [15] MARTIN C, CLAUDE L, MICHEL M. Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives[J]. *Cement and Concrete Research*, 2000(30): 1477-1483. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00330-6.
- [16] 李国新, 曾志英, 陈畅, 等. 泥粉对掺高效减水剂水泥浆体流动性的影响及对策研究[J]. *硅酸盐通报*, 2013, 32(7): 1340-1345. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2013.07.003.
- [17] 腾爱国, 杨海成, 范志宏, 等. 泥粉对砂岩机制砂 MB 值及砂浆性能的影响[J]. *水运工程*, 2017, 9: 48-52. DOI: 10.16233/j.cnki.issn1002-4972.2017.09.010.
- [18] 中国建筑科学研究院. 普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准: JGJ 52—2006[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2007.
- [19] 亓欣, 匡亚莉. 黏土矿物对煤泥表面性质的影响[J]. *煤炭科学技术*, 2013, 41(7): 126-128. DOI: 10.13199/j.cst.2013.07.132.qix.033.
- [20] ZAGHOUEANE B H, BOUTAHALA M. Preparation and characterization of organo-montmorillonites application in adsorption of the 2, 4, 5-trichlorophenol from aqueous solution[J]. *Advanced Powder Technology*, 2011, 22(6): 735-740. DOI: 10.1016/j.appt.2010.10.014.
- [21] WU Qingfeng, LI Zhaohui, HONG Hanlie. Adsorption of the quinolone antibiotic nalidixic acid onto montmorillonite and kaolinite[J]. *Applied Clay Science*, 2013, 74(4): 66-73. DOI: 10.1016/j.clay.2012.09.026.
- [22] 马保国, 杨虎, 谭洪波, 等. 水泥和黏土矿物对不同减水剂的吸附特性[J]. *硅酸盐学报*, 2013, 41(3): 328-333. DOI: 10.7521/j.issn.0454-5648.2013.03.09.
- [23] 黄周强, 毛永琳. 高岭土对聚羧酸减水剂分散性能的影响[J]. *商品混凝土*, 2013(4): 38-40.
- [24] 王智, 胡倩文, 王应, 等. 蒙脱石对聚羧酸减水剂的层间吸附特性[J]. *硅酸盐学报*, 2013, 41(8): 1100-1104. DOI: 10.7521/j.issn.0454-5648.2013.08.12.
- [25] 陈常亮, 郭丽萍, 杜小弟, 等. 蒙脱土对聚羧酸减水剂的吸附特性及其影响因素研究[J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(1): 214-218. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2017.01.036.
- [26] 李建伟. 聚羧酸减水剂的改性和性能研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2017.
- [27] 巨浩波, 吕生华, 刘晶晶. 砂石质量对混凝土性能影响的研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2013, 32(12): 2538-2543. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2013.12.019.
- [28] 王志林. 含泥量对应用复合型脂肪族减水剂水泥净浆流动性的影响研究[J]. *混凝土*, 2012(3): 103-107. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2012.03.031.
- [29] OUYANG XINping, QIU Xueqin, CHEN Pu, *et al.* Physicochemical characterization of calcium lignosulfonate-A potentially useful water reducer[J]. *Colloids and Surface A Physicochemical and Engineering Aspects*, 2006, 282: 489-497. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2005.12.020.
- [30] 周明, 陈锡芹, 温小栋, 等. 泥粉下主链长度对聚羧酸减水剂性能的影响[J]. *施工技术*, 2018(10): 122-126.

(编辑: 李宝川 责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)