

文章编号: 1000-582X(2012)01-086-07

泥对掺聚羧酸减水剂的水泥浆体分散性的影响

李有光^a, 李苑^a, 万煜^b, 邓成^a, 王智^b, 钱觉时^a

(重庆大学 a. 材料科学与工程学院; b. 化学化工学院, 重庆 400044)

摘要: 为了揭示含泥量对聚羧酸减水剂分散能力的影响, 试验选择净浆流动度和黏度两个指标, 研究泥对掺聚羧酸减水剂水泥浆体流变性质的影响, 并利用 IR、UV 手段分析确定了泥的滤液对聚羧酸减水剂分子结构的影响及碱性环境中聚羧酸减水剂在泥颗粒表面的吸附规律。结果表明: 当泥取代水泥质量的 15% 时, 聚羧酸减水剂由于泥的存在已无分散效果; 增大聚羧酸减水剂掺量可以提高含泥水泥浆体的分散性; 泥的滤液不会改变聚羧酸减水剂的分子结构、对聚羧酸减水剂的分散能力无不利影响; 在饱和石灰水模拟的碱性环境中, 泥对减水剂的吸附很快, 初始时间里 (6 min 内) 泥就已经充分吸附了聚羧酸减水剂, 泥对聚羧酸减水剂的吸附量为水泥的 4 倍左右。

关键词: 泥; 聚羧酸减水剂; 分散性; 吸附; 碱性环境

中图分类号: TU528.042.2

文献标志码: A

Effects of clay on the dispersibility of cement paste mixed with polycarboxylate superplasticizer

LI You-guang^a, LI Yuan^a, WAN Yu^b, DENG Cheng^a, WANG Zhi^b, QIAN Jue-shi^a

(a. College of Materials Science and Engineering; b. College of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: To reveal the effect of clay on the dispersibility of polycarboxylate superplasticizer (PC), the fluidity and viscosity of cement paste are chosen as performance indexes to study the effect of clay on the rheological properties of cement paste mixed with PC. The influence of filtrate of clay on molecular structure and the regularity of adsorption of PC on the surface of clay particles in alkaline environment are also analyzed by IR and UV. The results show that PC has no dispersing effect on the cement paste when clay content reaches to 15%. Increasing the dosage of PC can reduce the negative impact of clay. The filtrate of clay can't change the molecular structure of PC and doesn't affect the dispersibility of PC. In simulated alkaline environment (saturated solution of calcium hydroxide), the adsorption speed of clay on PC is rapid, whose adsorption capacity of clay on PC is about 4 times of cement's, and clay will have been reached its equilibrium adsorption amount in the initial period (within 6 min).

Key words: clay; polycarboxylate superplasticizer (PC); dispersion; adsorption; alkaline solution

聚羧酸减水剂因具有高减水率、高保坍性、高增强以及高耐久等优良性能, 被越来越广泛地应用于

混凝土工程中。然而, 大量的工程实例及研究表明, 聚羧酸减水剂与混凝土原材料中的其他组成材料存

收稿日期: 2011-09-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2009CB623104); 高性能土木工程材料国家重点实验室开放基金课题 (2010CEM004); 重庆大学“211 工程”三期建设研究生开放实验室资助项目

作者简介: 李有光 (1957-), 男, 重庆大学副教授, 硕士生导师, 主要从事水泥混凝土研究。

王智 (联系人), 男, 重庆大学教授, (Tel) 023-65126109; (E-mail) cqwangzhi@126.com。

在相容性问题^[1-5],其中,混凝土骨料中不可避免的泥对掺聚羧酸减水剂混凝土的工作性能等具有显著的影响^[5-7],主要表现为聚羧酸减水剂的减水分散能力严重下降、保坍效果差,导致硬化混凝土强度降低等。

在预拌混凝土实际生产中,当骨料中的含泥量超过标准规定而明显影响到混凝土的质量时,一般采用冲洗作为常用解决手段,但冲洗会污染环境、损害砂的良好级配,不利于有效控制混凝土的水灰比,因而冲洗在很多情况下并不经济合理^[8]。国家标准 JGJ 52-2006 规定了骨料中泥的鉴定方法并限制了其含量^[9]。有研究表明^[10-11]可以通过复配技术制备具有抑制集料含泥量影响的功能型聚羧酸减水剂,但也仅处于起步摸索阶段。因此,为了寻求更加有效的解决措施,研究泥对聚羧酸减水剂分散能力的影响机理是较为基础性的工作。然而,目前关于该方面的研究主要集中于砂石含泥量对水泥混凝土流变性能的影响,碱性环境中分散剂对某些特定黏土流变性质影响或者非碱性环境下关于某些特定黏土如蒙脱土对聚羧酸减水剂的吸附研究^[7,12-15],这些研究对深入分析泥的存在对聚羧酸减水剂分散能力的影响及机理有较好的参考作用,却不够系统和深入,有待进一步深入研究。

减水剂对混凝土工作性能的影响主要是通过改变水泥浆的流变性质来体现的^[16],并且净浆流动度和黏度是表征水泥净浆流变性质的重要参数。笔者研究含泥量(泥取代水泥的质量百分比)对聚羧酸减水剂分散能力的影响、聚羧酸减水剂掺量对含泥水泥浆体流变性质的影响,并通过对比研究泥的滤液对水泥浆体流变性质以及聚羧酸减水剂分子结构的影响,重点通过模拟试验研究泥颗粒在碱性环境中对聚羧酸减水剂的吸附能力,探讨了泥对聚羧酸减水剂分散能力的影响机理。

1 试验原材料及试验方法

1.1 试验原材料

试验采用重庆拉法基 P. O42. 5R 水泥,其主要性能见表 1;泥来自重庆白市驿镇,经烘干(105 °C)粉磨过 0.08 mm 筛后待用,其 XRD 谱图见图 1;砂:中砂,细度模数为 3.0,经淘洗并在 100±5 °C 下烘干待用;减水剂:聚羧酸减水剂,PC-1(聚醚类),PC-2(聚酯类);萘系高效减水剂(FDN),最佳折固掺量分别为粉料(水泥+泥)用量的 0.18%、0.32% 和 0.6%。

表 1 水泥的主要性能

安定性	细度 /%	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
		初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
合格	0.9	117	228	27.5	48.7	5.7	9.1

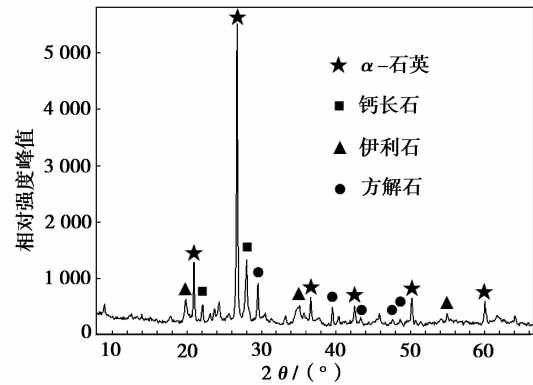


图 1 泥的 XRD 图谱

1.2 试验方法

1)黏度的测定:称取粉料(水泥+泥)450 g,水灰比 0.29,加入相应掺量的减水剂,用搅拌机搅拌 2 min,静置所需的不同时间,通过数字旋转黏度计 NDJ-5S 在恒定的转速 12 r/min 测定浆体的黏度。

2)净浆流动度的试验参照 GB 50119—2003《混凝土外加剂应用技术规范》。胶砂强度试验参照 GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》。

3)红外光谱(IR)分析:取一定量的减水剂样品,加入乙醚使聚合物沉淀与共存物质分离,用乙醚洗涤沉淀 4~5 次,真空干燥。用 KBr 压片,在 Nicolet Avatar 360 红外光谱仪上扫描红外吸收光谱图。

4)吸附量的测定:准确称取泥的质量 M (g)、水泥试样置于烧杯中,加入体积为 V (mL)已知浓度 C_0 (g/L)的聚羧酸减水剂溶液,液固质量比为 10,在一定的温度下搅拌 2 min 后,静置所需时间,抽滤,取上层清液,用 TGL-10 台式离心机(转速为 4 000 r/min)离心 10 min,稀释分离出的液相,使之符合朗伯-比耳定律的浓度范围。采用 TU-1901 紫外可见分光光度计测定液相的浓度,记为 C_1 。然后按照公式计算泥、水泥对减水剂的吸附量 Γ (mg/g)。

$$\Gamma = \frac{V \times (C_0 - C_1)}{M}$$

2 试验结果与讨论

2.1 含泥量对掺聚羧酸减水剂的水泥浆体分散性的影响

减水剂分散能力的优劣,可以通过掺加减水剂的水泥净浆的流变性质来表征。通常水泥净浆的流变性质主要通过浆体的黏度和流动度来表征,前者主要表征浆体抵抗剪切变形的特性,后者主要反映净浆的屈服应力及其与流动度的关系。

根据标准^[9]和工程经验配比计算得出,大于或等于 C30 等级混凝土中砂石含泥量上限值为水泥质量的 12% 左右,因而,笔者特别选择范围为 0~15% 的含泥量进行对比试验研究。

2.1.1 对掺聚羧酸减水剂的水泥净浆黏度的影响

掺减水剂的水泥净浆的流变特征符合一般宾汉姆流体模型或牛顿流体模型,水泥浆体系要求具有良好流动性的同时,且尽量分散稳定。试验采用旋转黏度计测试掺不同减水剂的水泥净浆在恒定剪切速率下的黏度相对值,从侧面反映了聚羧酸减水剂的分散能力。

图 2 是含泥量对掺不同减水剂的水泥净浆初始黏度的试验结果。由图 2 可知,掺 FDN 的水泥净浆体系的黏度随着含泥量的增大略有增加,但变化幅度较平缓;当含泥量超过 3% 时,掺 PC-1 和 PC-2 水泥净浆体系的黏度均随着含泥量增大而迅速增加,特别是当含泥量为 15% 时,浆体黏度已达到 7 000~10 000 mPa·s,为纯水泥浆体黏度的 10~15 倍。可见,当含泥量超过一定限值时,泥将会对聚羧酸减水剂的分散能力起显著的负面作用。

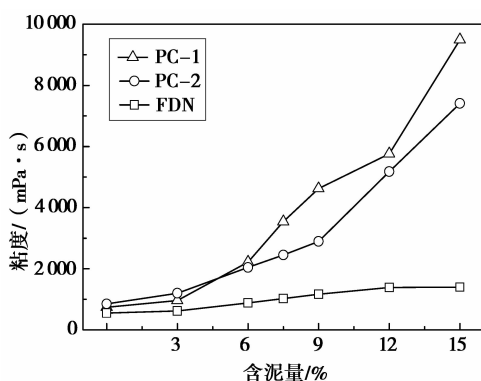


图 2 含泥量对掺不同减水剂的水泥浆体初始粘度的影响 (W/C=0.29)

图 3 是 0~15% 含泥量对掺 PC-1 的水泥净浆体系时间-黏度曲线。由图 3 可知,当水泥水化时间不超过 2 h 时,不同含泥量的掺 PC-1 的浆体黏度随

时间的变化并不明显。因此可以认为,在泥和减水剂接触的初始时间内泥已经充分影响了其对水泥颗粒的分散能力。

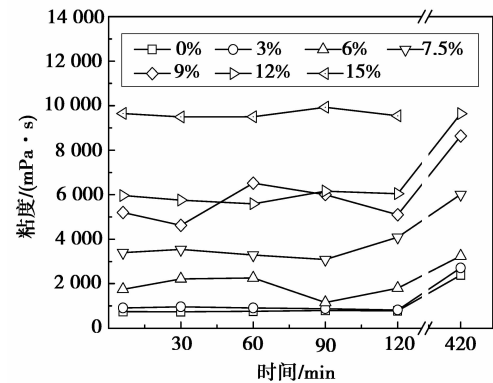


图 3 0~15% 含泥量对掺 PC-1 的水泥净浆体系时间-粘度曲线 (W/C=0.29)

2.1.2 对掺聚羧酸减水剂的水泥净浆流动度的影响

图 4 为含泥量对掺不同减水剂的水泥净浆流动度的试验结果。由图 4 可知,泥的存在不利于减水剂分散能力的发挥。无减水剂的水泥体系,含泥量的增大对流动度影响不明显;掺 FDN 的水泥体系,随着泥掺量的增大,初始流动度和 1 h 流动度变小,但变化幅度均比较小;掺 PC-1 的水泥体系,当泥掺量小于 4.5% 时,含泥量的变化基本上对净浆的流动性无影响,但当泥掺量大于 4.5% 时,曲线出现拐点,净浆的初始流动度和 1 h 流动度均急剧减小,掺 PC-2 的水泥体系,流动度随着泥掺量的增加则一直均匀快速降低。当泥掺量达到 15% 时,聚羧酸减水剂由于泥的存在已几乎无分散效果,其净浆流动度和无减水剂的水泥净浆体系相当,均在 120 mm 左右。

可见,泥的量达到一定程度后将明显影响聚羧酸减水剂的分散能力,所选择的聚醚类减水剂与聚酯类减水剂由于具有不同的化学结构导致其受泥的影响规律略有不同,但这两种聚羧酸减水剂受含泥量影响的敏感性程度均大于萘系减水剂。这些结果与上述黏度的试验结果基本一致。

图 5 为含泥量对掺不同减水剂的水泥胶砂强度试验结果。由图 5 可知,当淘洗的砂混掺一定量的泥时,由于泥一定程度上改善了砂的级配,均利于 3 种砂浆体系强度的提高。其中,无减水剂的水泥砂浆体系,当泥取代淘洗砂质量的 3% 时,砂浆强度最大;掺 FDN 的水泥砂浆体系,当泥取代淘洗砂质量大于 2% 时,砂浆强度变化不大;掺 PC-1 的水泥砂浆体系,当泥掺量大于 1% 时,随着含泥量的增大砂

浆强度出现较大幅度的降低。分析原因,一方面泥是惰性材料,另一方面泥降低了聚羧酸减水剂对水

泥颗粒的分散能力,进一步导致掺聚羧酸减水剂的水泥砂浆抗压强度降低明显。

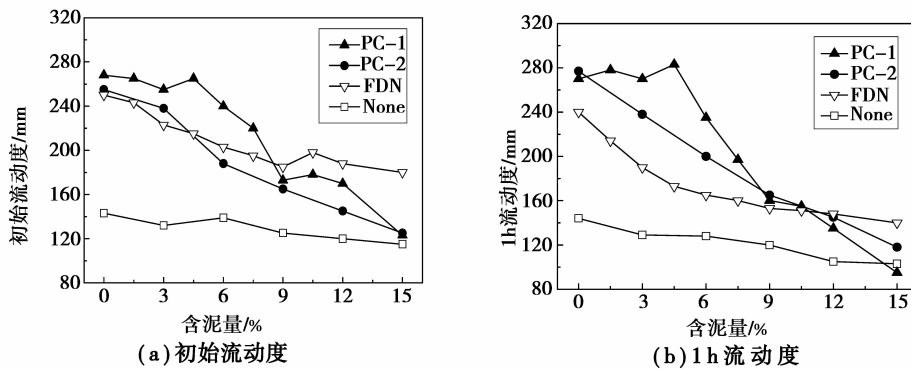


图 4 含泥量对掺不同减水剂的水泥净浆流动度的影响
(无减水剂的水泥体系 $W/C=0.45$, 掺减水剂的水泥体系 $W/C=0.29$)

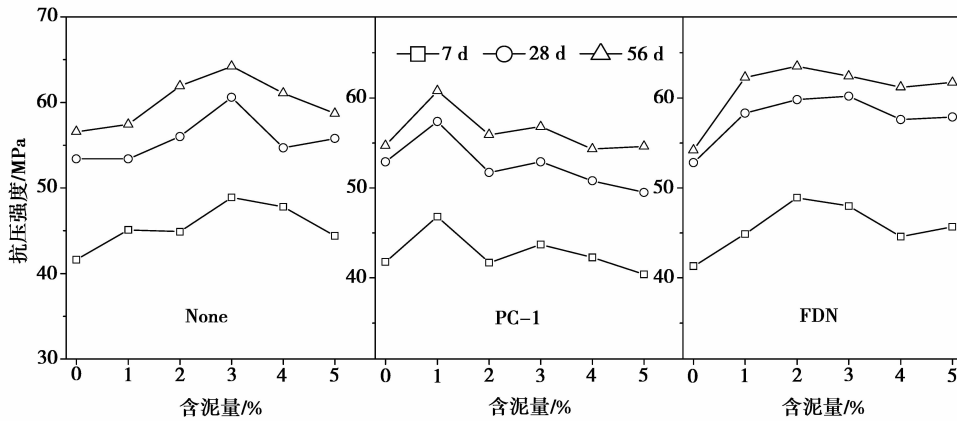


图 5 含泥量对掺不同减水剂的水泥胶砂强度的影响($W/C=0.4$, 胶砂比=1:3)

2.2 聚羧酸减水剂掺量对含泥水泥浆体流变性质的影响

鉴于当泥含量超过某一限值时将对聚羧酸减水剂的分散能力起到显著的负作用,试验固定含泥量为 9%,聚羧酸减水剂选用 PC-1,研究聚羧酸减水剂掺量对该含泥水泥浆体流变性质的影响,探讨增大聚羧酸减水剂掺量能否改善泥对其分散能力的负面影响,结果如图 6 所示。

由图 6 可知,含泥量为 9% 的水泥净浆体系是可以通过增加聚羧酸减水剂的掺量来获得较高的净浆流动度和较低的黏度。当聚羧酸减水剂的掺量由 0.18% 增大到 0.54% 左右时,水泥净浆流动度从 173 mm 增加至与不掺泥的净浆(280 mm)相当;当聚羧酸减水剂的掺量由 0.18% 增大到 0.7% 时,水泥净浆黏度从 5 060 $mPa \cdot s$ 减少至与不掺泥的净浆黏度(680 $mPa \cdot s$)相当。因此,试验条件下需要再增加 2~3 倍掺量的聚羧酸减水剂才可以抵消泥

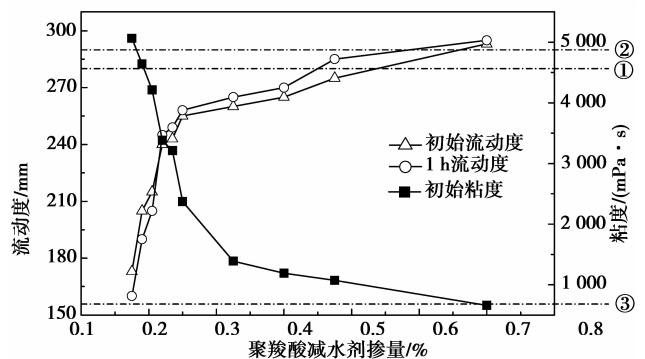


图 6 聚羧酸减水剂掺量对含泥水泥净浆体系流动度和黏度的影响(含泥量为 9%, $W/C=0.29$)

①初始流动度(无泥)-280 mm; ②1 h 流动度(无泥)-290 mm; ③初始黏度(无泥)-680 $mPa \cdot s$

的负面影响。

另外,对于含泥量为 9% 的水泥净浆体系,不同

掺量范围的聚羧酸减水剂对浆体流变性质的影响程度有差异:当掺量小于 0.25% 时,浆体流动性增大明显;当掺量大于 0.25% 时,浆体的流动性随减水剂掺量的变化趋缓,且在折固掺量增大至 0.7% 时,浆体均未出现泌水与沉降现象。有资料表明^[17],在泥-水系统中,加入碱液增大 pH 值,能够改变黏土颗粒断口的双电层性质,使断口双电层与基面双电层性质趋于一致,使得黏土胶体颗粒的 ξ -电位增加,静电斥力增加,黏土颗粒分散,悬浮液稳定。因此,当碱性的水泥浆体系中混入一定量的泥后,泥颗粒胶体变得更稳定,再加上聚羧酸减水剂对泥颗粒也起到一定的分散稳定作用,因而使得含泥的水泥浆体系稳定性增加,不易泌水和沉降。

2.3 泥的滤液对掺聚羧酸减水剂的水泥浆体分散性的影响

基于前文含泥量为 15% 时,聚羧酸减水剂由于泥的存在已几乎无分散效果,试验对比研究分别用蒸馏水和泥的滤液(15% 含泥量配制)拌制的水泥净浆体系流变性质,研究泥溶解于水后滤液对聚羧酸减水剂分散能力的影响,结果如表 2 所示。由表 2 可知,泥的滤液对聚羧酸减水剂的分散能力并无不利影响。

表 2 泥的滤液对掺聚羧酸减水剂的水泥净浆流变性质的影响

水的类型	pH	黏度/(mPa·s)	净浆流动度/mm	
			初始	1h
蒸馏水	6.96	480	295	305
泥滤液	8.54	430	296	300

注:聚羧酸减水剂选用的是 PC-1, W/C=0.29

图 7 是泥的滤液配制的聚羧酸减水剂的红外谱图。图中, 956.28 cm^{-1} 处是磺酸基的特征峰; 1 105.53 cm^{-1} 处是醚键的特征吸收峰; 1 250.25 cm^{-1} 处是羧酸酐的特征峰; 1 648.24 cm^{-1} 处是碳碳双键的特征吸收峰; 1 711.56 cm^{-1} 处是羰基的特征吸收峰。与蒸馏水作溶剂的聚羧酸减水剂红外谱图相比较,泥的滤液没有改变聚羧酸减水剂的分子结构。

上述实验结果表明泥的滤液没有改变聚羧酸减水剂的分子结构和影响其分散能力,泥对聚羧酸减水剂分散能力的影响可能是通过泥颗粒来产生作用的。

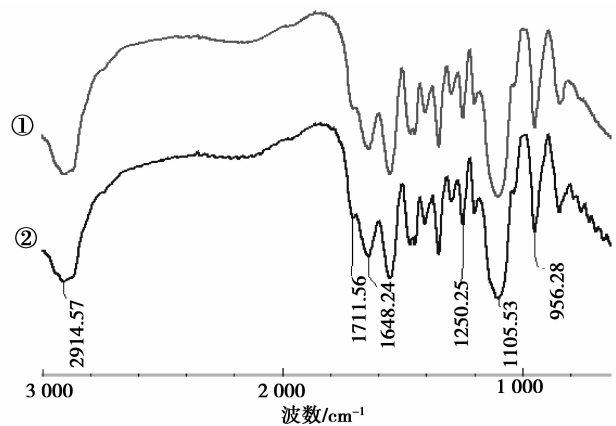


图 7 泥的滤液处理后的聚羧酸减水剂的红外光谱图

①蒸馏水配制的 PC-1; ②泥的滤液配制的 PC-1

2.4 泥在碱性环境中对聚羧酸减水剂的吸附

聚羧酸减水剂主要是通过吸附于水泥等颗粒表面,依靠空间位阻及静电斥力作用发挥其分散效果。现有研究认为:泥降低聚羧酸减水剂对水泥的分散能力,是因为泥颗粒与水泥颗粒之间存在竞争吸附,导致吸附在水泥颗粒的减水剂偏少,分散效果变差。但缺少泥在水泥水化环境下颗粒吸附聚羧酸减水剂的试验研究证实该理论推论。笔者模拟研究泥在水泥水化环境下对聚羧酸减水剂的吸附能力及其吸附规律。

2.4.1 模拟泥在水泥水化环境中吸附的必要性

在水泥实际水化环境中,水泥水化会溶出 Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , OH^- 等离子,使水泥浆体呈强碱性,因此需要研究泥在碱性环境中对聚羧酸减水剂的吸附规律。考虑到若直接用水泥滤液,存在着如下难题:水泥滤液成分复杂,其所含各离子的浓度将随着水泥水化不同时间而变化,因而会影响到吸附的测定。为了尽量模拟水泥水化的碱性环境,又利于吸附的测定,拟采用饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液来模拟。

图 8 是不同溶剂中聚羧酸减水剂的紫外吸收谱图。比较各谱图发现,泥滤液对聚羧酸减水剂的最佳紫外吸收波长没有影响;水泥滤液与饱和石灰水溶液均使聚羧酸减水剂的最佳紫外吸收波长发生红移,且两者的最佳波长一致(均为 214 nm),因此,在使用紫外吸收谱图测试泥颗粒对聚羧酸减水剂的吸附量时,使用饱和石灰水模拟碱性环境是必要的,而且是可行的。

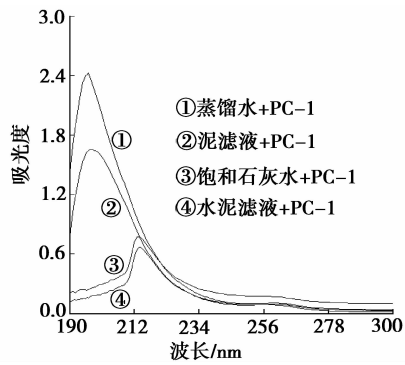


图 8 不同溶剂中 PC-1 的紫外全波长扫描曲线

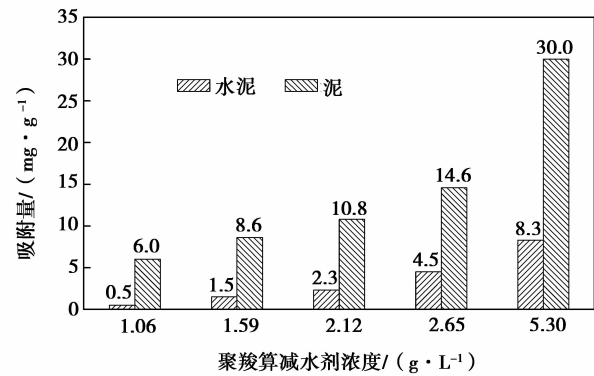


图 10 泥和水泥对聚羧酸减水剂的吸附比较

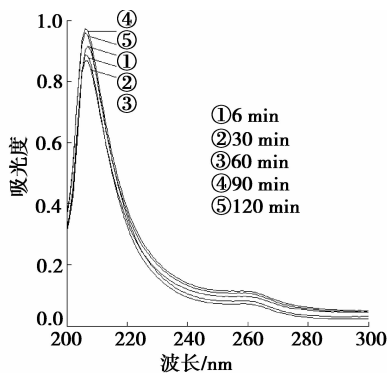


图 9 不同吸附时间对应的吸光度

2.4.2 泥对吸附平衡时间的影响

控制环境温度为 25 ℃,准确称取 5 g 泥于烧杯中,加入 50 mL 6 g/L 的聚羧酸减水剂溶液(饱和石灰水配制),先搅拌 2 min,分别静置至 6, 30, 60, 90, 120 min,然后过滤,取滤液上清液离心,稀释分离出的液相,用紫外可见分光光度计进行全波长扫描,结果如图 9 所示。由图 9 可知,不同时间对应的吸光度差别不大,根据朗伯-比耳定律计算发现泥对聚羧酸减水剂的吸附量随时间变化不大,即泥对聚羧酸减水剂吸附很快,初始 6 min 就已达到其平衡吸附量。这也更好地解释了前文关于掺聚羧酸减水剂的含泥净浆黏度在 2 h 内随时间变化不明显的试验现象。

2.4.3 泥对聚羧酸减水剂吸附量

图 10 为泥和水泥对聚羧酸减水剂的吸附比较结果。从图中可以看出,在同样的聚羧酸减水剂质量浓度下,泥对聚羧酸减水剂的吸附量为水泥的 4 倍左右。当聚羧酸减水剂浓度为 5.3 g/L 时,泥对聚羧酸减水剂的吸附量为 30 mg/g。说明聚羧酸减水剂分子在加入到水泥浆体系中时,泥与水泥存在着竞争吸附,且泥对聚羧酸减水剂的吸附能力远远

强于水泥颗粒,这正是导致绝大多数聚羧酸系减水剂对砂石料的含泥量非常敏感的原因,这也可以进一步解释为何增大聚羧酸减水剂掺量可以消除泥对其分散能力的负面影响。

3 结 论

1) 泥在聚羧酸减水剂分散水泥颗粒的过程中起负面作用,随着含泥量的增加,掺聚羧酸减水剂的水泥浆体的屈服应力和相对黏度均呈增大趋势;当泥掺量达到 15% 时,聚羧酸减水剂由于泥的存在已无分散作用;试验所用聚醚类聚羧酸减水剂与聚酯类聚羧酸减水剂的分散能力受含泥量影响的敏感性有所差别,但均大于萘系减水剂的。

2) 增大聚羧酸减水剂掺量可以提高含泥水泥浆体的分散性,对于含泥量为 9% 的水泥净浆体系,试验条件下需要再增加 2~3 倍掺量的聚羧酸减水剂才可以抵消泥的负面影响。泥的存在可以提高掺有聚羧酸减水剂水泥浆体系的稳定性。

3) 泥的滤液没有改变聚羧酸减水剂的分子结构,对聚羧酸减水剂的分散能力无不利影响。泥对聚羧酸减水剂吸附是影响其分散能力的主要原因:泥在较快时间(6 min)内就吸附了聚羧酸减水剂;泥对聚羧酸减水剂的吸附能力要强于水泥对其的吸附,泥对聚羧酸减水剂的吸附量为水泥的 4 倍左右。

参考文献:

- [1] 李崇智,冯乃谦. 梳形聚羧酸系减水剂与水泥的相容性研究[J]. 建筑材料学报, 2004, 7(3): 252-260.
LI CHONG-ZHI, FENG NAI-QIAN. Study on compatibility of comb-like polycarboxylic acid type water-reducer with cements [J]. Journal of Building Materials, 2004, 7(3): 252-260.
- [2] YAMADA K Z, OGAWAS C, HANEHARA S S K.

- Controlling of the adsorption and dispersing force of polycarboxylate-type superplasticizer by sulfate ion concentration in aqueous phase [J]. *Cement and Concrete Research*, 2001,31(3):375-383.
- [3] BILAL S H, MAHER S I. Bond strength of reinforcement in high-performance concrete; the role of silica fume, casting position, and superplasticizer dosage[J]. *ACI Mater Journal*,1998,95(4):499-511.
- [4] 王子明. 聚羧酸系高性能减水剂-制备、性能与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [5] 付培根. 聚羧酸系高效减水剂在贵州地区的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [6] 李崇智, 祁艳军, 陈家珑, 等. 聚羧酸系减水剂在高性能混凝土中的应用研究[J]. *新型建筑材料*, 2008(6): 57-62.
LI CHONG-ZHI, QI YAN-JUN, CHEN JIA-LONG, et al. Application study on HPC with polycarboxylate water reducer[J]. *New Building Materials*, 2008(6): 57-62.
- [7] JEKNAVORIAN A, HAZRATI K, BENTUR A, et al. Use of chemical admixtures to modify the rheological behavior of cementitious systems containing manufactured aggregates [C]//*Proceedings of the Concrete Sustainability Conference*, April 13 - 15, 2010, Tempe, Arizona, USA. [S. l.]: National Ready Mixed Concrete Association, 2010:1-14.
- [8] 王春发. 砂石含泥量对混凝土强度的影响[J]. *混凝土*, 1982(1):37-41.
WANG CHUN-FA. Influence of clay in the sand and aggregate on compressive strength of concrete [J]. *Concrete*, 1982(1):37-41.
- [9] 中华人民共和国建设部. JGJ52-2006 普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [10] JARDINE L A, KOYATA H, FOLLIARD K J, et al. Admixture and method for optimizing addition of EO/PO superplasticizer to concrete containing smectite clay-containing aggregates: USA, 6352952[P]. 2002-03-05.
- [11] 王信刚, 宋固全, 胡明玉. 一种抑制集料含泥量影响的控缓释聚羧酸系减水剂及其制备方法: 中国, 201010119879.3 [P]. 2010-08-11.
- [12] 刘星宇, 姜建华, 傅乐峰, 等. 减水剂与耐火材料原料相容性研究[J]. *建筑材料学报*, 2007(4):424-429.
LIU XING-YU, JIANG JIAN-HUA, FU LE-FENG, et al. Study of compatibility of water reducer with refractory material[J]. *Journal of Building Materials*, 2007(4):424-429.
- [13] KONAN L K, PEYRATOUT C, CERBELAUD M, et al. Influence of two dispersants on the rheological behavior of kaolin and illite in concentrated calcium hydroxide dispersions [J]. *Applied Clay Science*, 2008(42):252-257.
- [14] ATARASHI D, SAKAI E, DAIMON M. Interaction between superplasticizers and clay minerals [C]//*Proceedings of the 6th International symposium on cement & concrete*, Sept 19-22, 2006, Xi'an, China. [S. l.]: Cement Branch of Chinese Ceramic Society, 2006:1560-1566.
- [15] KONAN K L, PEYRATOUT C, SMITH A, et al. Comparison of surface properties between kaolin and metakaolin in concentrated lime solutions[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2009,339(1):103-109.
- [16] YAMADA K, TAKAHASHI T, HANEHARA S, et al. Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer[J]. *Cement and Concrete Research*, 2000,30(2):197-207.
- [17] 周亚栋. 无机材料物理化学[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1994:241-242.

(编辑 王维朗)