

不同减水剂及其复掺对碱矿渣水泥性能的影响

陈科, 杨长辉, 于泽东, 赵爽, 潘群

(重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400045)

摘要: 选用萘系高效减水剂(萘系)、木质素磺酸钙(木钙)、葡萄糖酸钠、砂浆塑化剂、 $C_{18}H_{29}SO_3Na$ 、 $C_{15}H_{34}ClN$, 测试其对碱矿渣水泥砂浆性能的影响。结果表明: 木钙和萘系均对碱矿渣水泥砂浆有一定的塑化作用, 且前者比后者的效果明显; 萘系与引气剂复掺较单掺萘系对碱矿渣水泥砂浆的塑化作用明显; 木钙与萘系复掺, 较单掺一种减水剂对碱矿渣水泥砂浆的塑化作用效果明显; 在相同用水量情况下, 木钙可提高碱矿渣水泥砂浆的强度, 而萘系会降低碱矿渣砂浆的强度。木钙对碱矿渣水泥的凝结时间影响较大, 掺木钙的碱矿渣水泥流动度经时损失较小。

关键词: 碱矿渣; 减水剂; 塑化作用; 强度

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2012)01-0124-06

Effect of Super Plasticizer on Properties of Alkali-Activated Slag

CHEN Ke, YANG Chang-hui, YU Ze-dong, ZHAO Shuang, PAN Qun

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045 P. R. China)

Abstract: With polynaphthalene sulphona, lingsulphonate based plasticizer, Sodium gluconate, Mortar plasticizer, $C_{18}H_{29}SO_3Na$, $C_{15}H_{34}ClN$, the performance of alkali-activated slag mortar was tested. The results show that lingsulphonate based plasticizer and polynaphthalene sulphona have some plasticizing effect for alkali-activated slag mortar, and the effect of the former than the latter obviously. Plasticizing effect of polynaphthalene sulphona compound mixed with air-entraining agent than single-doped polynaphthalene sulphona obviously. Plasticizing effect of polynaphthalene sulphona compound mixed with lingsulphonate based plasticizer than single-doped super plasticizer obviously. When the same amount of water, lingsulphonate based plasticizer can increase the early strength of alkali activated slag mortar, polynaphthalene sulphona can reduce the early strength. The incorporation of slag in the mix of alkali and super plasticizer can increase the strength of alkali activated slag mortar. Lingsulphonate based plasticizer on the setting time of alkali-activated slag have a greater impact, alkali-activated slag mixed lingsulphonate based plasticizer fluidity smaller through time.

Key words: alkali-activated slag; super plasticizer; plasticizing effect; strength

碱矿渣水泥是用碱金属的碱性化合物激发矿渣而得到的一种水硬性胶凝材料^[1]。碱矿渣混凝土具有优良物理力学性能和耐久性能, 是节能、利废、环保的绿色建筑材料^[2]。但是, 拌合物粘度大、硬化体

收缩大是制约碱矿渣水泥及混凝土应用发展的关键技术问题^[3]。在碱矿渣水泥中掺入减水剂是解决上述问题的一项重要技术途径。有学者研究了减水剂对碱矿渣水泥工作性能的影响, 但研究的结果却不

收稿日期: 2011-04-19

基金项目: 国际科技合作计划项目(科技部)(国科发技 2009-612)。

作者简介: 陈科(1977-), 男, 博士, 主要从事新型胶凝材料研究, (E-mail) kechen@cqu.edu.cn。

一样。Isozaki et al^[4]在 NaOH 激发的矿渣水泥中分别使用了木质素磺酸钠(LS)和 β -萘磺酸钠甲醛缩聚物(NS)2 种减水剂,结果表明,LS 有非常明显的塑化效果,但是 NS 对水泥净浆的流变性能影响不大。Jolicoeur et al^[5]研究了不同类型的减水剂和不同激发剂对碱-激发矿渣水泥净浆小型塌落筒扩展度的影响。加入萘系磺酸盐系减水剂能明显增加未掺激发剂净浆的初始扩展度,且随着时间的增加,净浆扩展度经时损失小。T. Bakharev^[6]等研究表明,萘系或者是木质素磺酸盐系减水剂的加入,会降低胶凝材料的 28 d 强度;萘系减水剂能将碱矿渣混凝土的出机坍落度从 55 mm 提高到 200 mm,但是坍落度损失很快,仅 10 min 坍落度几乎为零;木质素磺酸盐减水剂对碱矿渣混凝土和易性有较好改善,但坍落度损失也较快。S. D. Wang et al^[7]研究了木质素磺酸钠和萘系减水剂对碱矿渣砂浆的作用,结果表明,这 2 种外加剂降低了碱矿渣砂浆的抗压强度,对和易性毫无改善作用。朱书景、方宏辉^[8]研究表明 FDN 减水剂和木质素磺酸钙减水剂对矿渣微粉的胶结特性有一定的影响,可改善拌合物流变性能。雷西萍^[9]研究表明矿渣掺量为 70% 时,经过 30 min 后净浆流动度由 290 mm 降到 160 mm,60 min 后失去流动性。其他组均在 30 min 后已失去流动度,流动度经时损失较为严重。丁起^[10]研究表明木质素磺酸钙最佳掺量下具有中等减水率,即 8%~10%,可得到低的水灰比。

通过研究传统减水剂对碱矿渣水泥性能的影响,为研究适合碱矿渣水泥的减水剂提供基础。

1 原材料及试验方法

1.1 原材料

1.1.1 矿渣 重庆钢铁集团有限责任公司生产的水淬高炉矿渣,密度为 2.95 g/cm^3 ,比表面积为 $498 \text{ m}^2/\text{kg}$,矿渣化学成分如表 1。

表 1 矿渣化学成分 /%

化学成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MnO
含量	36.90	26.52	13.55	9.34	2.51	0.45	0.76	0.44

1.1.2 激发剂 分析纯 NaOH,重庆川江化学试剂厂生产,含量 $\geq 96.0\%$ 。

1.1.3 表面活性剂

1) 萘系高效减水剂(后文简称萘系)

重庆江韵混凝土外加剂有限公司生产,粉状,推荐掺量 $0.5\% \sim 1.0\%$ 。

2) 木质素磺酸钙(后文中简称木钙)

重庆江北特种建材有限公司生产,粉状,推荐掺量 $0.2\% \sim 0.5\%$ 。

3) 葡萄糖酸钠

生物试剂,天津精细化工研究所生产,分子量为 218.14。

4) YJ-1 砂浆塑化剂

5) 十二烷基苯磺酸钠

成都市科龙化工试剂厂生产,分析纯,含量 $\geq 90.0\%$,分子量为 348.48。

6) 十二烷基三甲基氯化铵

成都市科龙化工试剂厂生产,含量 $\geq 98.0\%$,分子量为 263.88。

7) 引气剂

1.1.4 水 采用自来水、蒸馏水。

1.1.5 细集料 洞庭湖产中砂,细度模数 2.6,表观密度: 2710 kg/m^3 ,松散密度: 1350 kg/m^3 。

1.2 试验方法

在流动度和强度试验中,胶凝材料为矿渣,水灰比为 0.4,胶砂比为 1:3;激发剂为 NaOH,碱掺量以 Na₂O 对矿渣的质量百分比计为 4.0%;减水剂(表面活性剂)掺量按其有效成分对矿渣的质量百分比计。

碱矿渣水泥砂浆流动度试验参照《水泥胶砂流动度测定方法》(GB/T 2419—2005)进行;碱矿渣水泥砂浆强度试验参照《水泥胶砂强度检验方法》(GBT17671—1999)(ISO 法)进行;碱矿渣水泥净浆流动度试验参照《混凝土外加剂匀质性试验方法》(GB/T8077—2000)和《混凝土外加剂应用技术规范》(GB50119—2003)中附录“混凝土外加剂对水泥的适应性检测方法”进行。

2 不同表面活性剂对碱矿渣水泥砂浆流动性能的影响

首先选用不同的表面活性剂,掺量为 2.0% 测试其对碱矿渣水泥砂浆流动性能的影响,测试结果如图 1。结果表明,木钙和萘系对碱矿渣水泥砂浆有一定的塑化作用,且木钙的塑化作用比萘系明显。葡萄糖酸钠、砂浆塑化剂、C₁₈H₂₉SO₃Na 对碱矿渣砂浆没有塑化作用。虽然 C₁₅H₃₄ClN 对碱矿渣水泥砂浆有非常好的塑化作用,但其良好的引气作用使得碱矿渣水泥砂浆严重发泡,对强度造成严重的负面影响,如表 2。

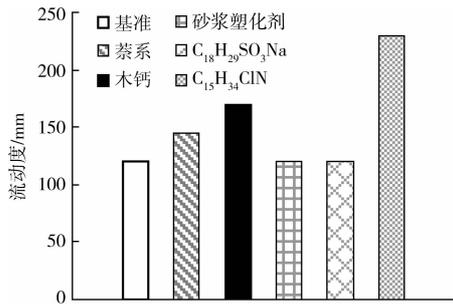


图 1 不同表面活性剂对碱矿渣水泥砂浆流动性能的影响

表 2 C₁₅H₃₄ClN 对碱矿渣水泥砂浆性能的影响

掺量/ %	流动度/ mm	3 d 强度/Mpa	
		抗折	抗压
0.2	200(发泡)	2.5	6.1
0.1	160(发泡)	—	—

通过以上试验表明,木钙和萘系对碱矿渣胶凝材料有一定的塑化作用,故选择这 2 种减水剂进行深入研究。

3 不同减水剂及其复掺对碱矿渣水泥砂浆流动性能的影响

3.1 不同减水剂对碱矿渣水泥砂浆流动性能的影响

实验表明,木钙和萘系对碱矿渣水泥砂浆有一定的塑化作用,且木钙的效果比萘系明显。减水剂掺量为 2.0% 时,木钙对碱矿渣水泥砂浆的减水率为 9.8%,萘系为 6.8%,如表 3。随减水剂掺量的增加,木钙与萘系对碱矿渣水泥砂浆的塑化作用逐渐增强;木钙掺量为 4.0%、萘系掺量为 8.0% 时,碱矿渣水泥砂浆的流动度分别达到平衡,如图 2、3。

表 3 木钙与萘系在碱矿渣水泥砂浆中的减水率测定

减水剂	掺量/%	Na ₂ O/%	激发剂	减水率/%
木钙	2.0	4.0	NaOH	9.8
萘系	2.0	4.0	NaOH	6.8

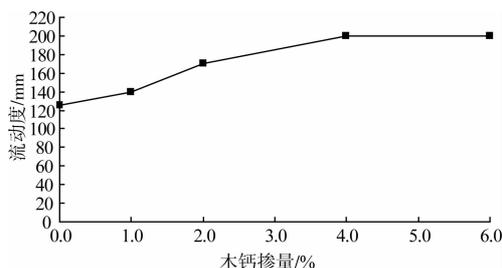


图 2 木钙对碱矿渣水泥砂浆流动性能的影响

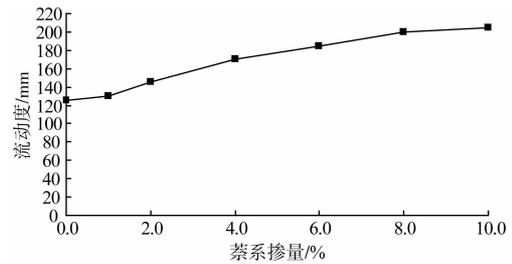


图 3 萘系对碱矿渣水泥砂浆流动性能的影响

已有的研究表明^[2],在 NaOH-矿渣-水系统中掺入木钙使碱矿渣系统中的 ζ 电位的绝对值有较大增加。

木钙减水剂^[11]在 NaOH 激发的碱矿渣水泥系统中起作用主要是由于木钙掺入以后,能离解成大分子阴离子和钙离子,增大了矿渣颗粒表面 ζ 电位的绝对值,增大了矿渣颗粒之间静电斥力,使矿渣颗粒分散,从而得到了较好的减水效果。同时,木钙本身固有的强亲水基和糖还能提高水对矿渣颗粒的润湿作用,使颗粒表面形成较厚的水化膜,对流动度有较一定的改善作用。另外,木钙能降低矿渣颗粒的固液界面能,具有一定的引气作用,产生的气泡具有滚珠和浮托作用,有助于矿渣颗粒和细集料之间的相对滑动,从而对碱矿渣水泥砂浆流动性具有促进作用。当木钙掺量达到一定程度时,吸附量达到平衡,矿渣颗粒的 ζ 电位绝对值达到了一个最大值,使得矿渣颗粒的静电斥力达到最大,因此碱矿渣水泥砂浆的流动度达到平衡。

萘系表面活性剂^[2]具有较强的固液界面活性作用,可以迅速吸附到矿渣颗粒表面,增加了矿渣颗粒的 ζ 电位的绝对值,增大了矿渣颗粒的静电斥力,同时氧化钠当量为 4% 的 NaOH 溶液对萘系表面活性剂的分子结构影响不大。鉴于此,萘系减水剂对碱矿渣水泥砂浆的流动性有一定的改善作用。

萘系掺量增加到一定程度时,吸附量不再增加,呈平衡趋势,达到了“饱和吸附点”^[12],矿渣颗粒的 ζ 电位达到一个最大值,使得矿渣颗粒静电斥力达到最大,因此碱矿渣水泥砂浆的流动度达到平衡。

3.2 萘系与外加剂复掺对碱矿渣水泥砂浆流动性能的影响

3.2.1 萘系与引气剂复掺对碱矿渣水泥砂浆流动性能的影响 鉴于引气剂产生的气泡具有滚珠和浮托作用,有助于矿渣颗粒和细集料之间的相对滑动,从而增加碱矿渣水泥砂浆的流动性。因此,在萘系中复配引气剂,测定其对碱矿渣水泥砂浆的流动性能的影响,测试结果如图 4。结果表明,在萘系中复

配引气剂(固定萘系掺量为 2%,调整引气剂掺量)使得碱矿渣水泥砂浆的流动性能得到了一定的改善,且随引气剂掺量的增加,碱矿渣水泥砂浆流动度呈增大趋势;当引气剂的掺量增至 0.02%时,碱矿渣水泥砂浆的流动度达到平衡。

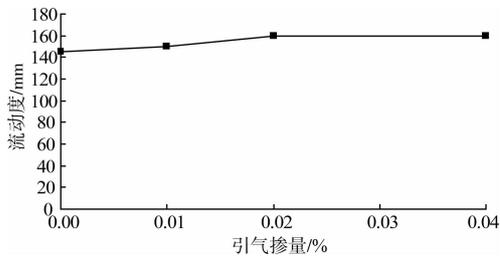


图 4 萘系与引气剂复掺对碱矿渣水泥砂浆流动性能的影响

3.2.2 萘系与钢渣复掺对碱矿渣水泥砂浆流动性能的影响 钢渣的微观填充作用可填充于矿渣颗粒间的间隙和絮凝结构中,占据了原水分占据的空间,原来絮凝结构中的水被释放出来,产生减水填密效应,使流动性增大。所以,在碱矿渣水泥中掺入钢渣(内掺法)与萘系复配(萘系掺量固定为 2%,调整钢渣掺量)使得碱矿渣水泥砂浆的流动性能得到了一定的改善,如图 5。随钢渣掺量的增加,碱矿渣水泥砂浆的流动度呈增长趋势。

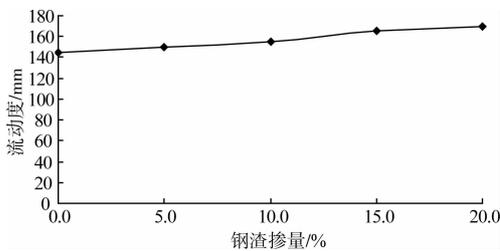


图 5 萘系与钢渣复掺对碱矿渣水泥砂浆流动性能的影响

3.3 木钙与萘系复掺对碱矿渣水泥砂浆流动性能的影响

为了使碱矿渣水泥的流动性能得到进一步的改善,综合考虑萘系和木钙的塑化作用机理,笔者将两者复配进行试验。测试结果如图 6、7。

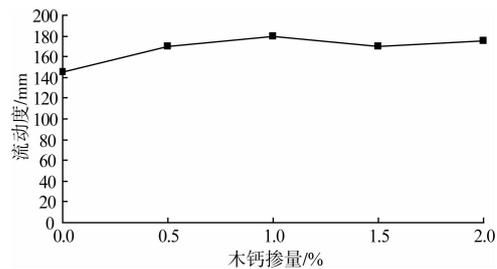


图 6 木钙与萘系不等掺量复掺对碱矿渣水泥砂浆流动性能的影响

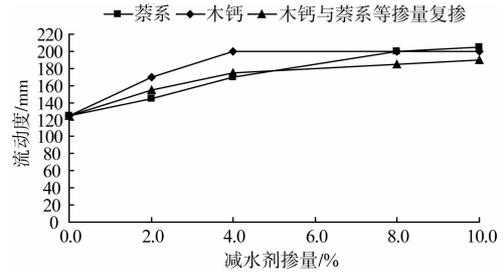


图 7 木钙与萘系等掺量复掺对碱矿渣水泥砂浆流动性能的影响

木钙与萘系不等掺量复合(固定萘系掺量为 2.0%,调整木钙掺量)时,碱矿渣水泥砂浆的流动性较单掺萘系的好,且随着木钙掺量的增加,碱矿渣水泥砂浆的流动度先增长后趋于平衡。木钙与萘系等掺量复掺时,碱矿渣水泥砂浆的流动性较单掺木钙的差,且当掺量大于 4.0%后,复掺的效果也比单掺萘系效果差。

4 不同减水剂及其复掺对碱矿渣水泥砂浆强度性能的影响

4.1 不同减水剂对碱矿渣水泥砂浆强度性能的影响

木钙对碱矿渣水泥砂浆强度性能的影响如表 4。木钙具有一定缓凝作用,碱矿渣水泥砂浆水化缓慢,木钙掺量在 2.0%以上时,所成型的试件 3 d 亦不能拆模,故统一测试 28 d 强度。结果表明,在相同用水量情况下,木钙可增加碱矿渣水泥砂浆的 28 d 强度,且随木钙掺量的增加,强度会逐渐增加。

表 4 木钙对碱矿渣水泥砂浆强度性能的影响

木钙掺量/%	3 d 强度/Mpa		28 d 强度/Mpa	
	抗折	抗压	抗折	抗压
0	8.9	33.8	9.7	45.3
1.0	—	—	8.8	42.5
2.0	—	—	8.0	43.2
4.0	—	—	8.7	44.5

为了解决掺木钙后,碱矿渣水泥砂浆 3 d 难以拆模的问题,在矿渣中内掺熟料进行试验,木钙与熟料复掺对碱矿渣水泥砂浆强度性能的影响如表 5。结果表明,由于熟料的速凝作用,可抑制木钙的缓凝作用,从而解决了 3 d 难以拆模的问题;且随熟料掺量的增加,碱矿渣水泥砂浆的强度呈增长趋势。

萘系对碱矿渣水泥砂浆强度性能的影响如表 6。结果表明,在相同用水量情况下,在萘系掺量较低时,其对碱矿渣水泥砂浆强度的负面影响不大,碱矿渣水泥砂浆的强度随着萘系掺量的增加略有降低。萘系掺量较大时,碱矿渣水泥砂浆的强度损失较大。

表5 木钙与熟料复掺对碱矿渣水泥砂浆强度性能的影响

木钙掺量/ %	熟料掺量/ %	3 d 强度/MPa		28 d 强度/MPa	
		抗折	抗压	抗折	抗压
	0	—	—	8.0	43.4
	5.0	6.2	20.4	8.0	41.0
2.0	10.0	6.3	21.6	8.8	42.2
	15.0	6.4	24.6	8.1	45.6
	20.0	6.6	25.0	9.2	46.0

表6 萘系对碱矿渣水泥砂浆强度性能的影响

萘系掺量(%)	3 d 强度/MPa		28 d 强度/MPa	
	抗折	抗压	抗折	抗压
0	8.9	33.8	9.7	45.3
1.0	8.7	33.3	9.0	41.0
2.0	8.2	32.4	8.6	40.8
4.0	7.5	28.0	7.6	39.1
6.0	—	—	7.4	31.3

4.2 萘系与外加剂复掺对碱矿渣水泥砂浆强度性能的影响

4.2.1 萘系与引气剂复掺对碱矿渣水泥砂浆强度性能的影响 萘系与引气剂复掺对碱矿渣水泥砂浆强度性能的影响如表7。结果表明,由于引气剂的产生的气泡对强度造成负面影响,且随引气剂掺量的增加,碱矿渣水泥砂浆强度呈降低趋势。

表7 萘系与引气剂复掺对碱矿渣水泥砂浆强度性能的影响

萘系掺量/ %	引气剂掺量/ %	3 d 强度/MPa		28 d 强度/MPa	
		抗折	抗压	抗折	抗压
	0	8.2	32.4	8.6	40.8
2.0	0.01	8.0	29.7	8.4	38.1
	0.02	7.9	30.1	8.3	36.5
	0.04	7.6	28.2	7.7	33.3

4.2.2 萘系与钢渣复掺对碱矿渣水泥砂浆强度性能的影响 萘系与钢渣复掺对碱矿渣水泥砂浆强度性能的影响如表8。测试结果表明,钢渣的掺入会降低碱矿渣水泥砂浆的强度,且随钢渣掺量的增加,其对碱矿渣水泥砂浆的强度的负面影响增大。

表8 萘系与钢渣复掺对碱矿渣水泥砂浆强度性能的影响

萘系掺量/ %	钢渣掺量/ %	3 d 强度/MPa		28 d 强度/MPa	
		抗折	抗压	抗折	抗压
	0	8.2	32.4	8.6	40.8
	5.0	8.0	33.0	8.4	40.4
2.0	10.0	7.9	31.1	8.1	38.1
	15.0	7.6	30.3	7.5	36.0
	20.0	7.6	28.5	7.9	34.1

4.3 木钙与萘系复掺对碱矿渣水泥砂浆强度性能的影响

木钙与萘系复掺对碱矿渣水泥砂浆强度性能的影响如表9。测试结果表明,两者不等掺量复掺时,随着木钙掺量的增加,碱矿渣水泥砂浆的强度逐渐增加;两者等掺量复掺时,随着复掺量的增加,碱矿渣水泥砂浆的强度呈增长趋势,但木钙具有较强的缓凝作用,故在掺量较大的情况下,碱矿渣水泥砂浆水化缓慢,以致所成型的试件在短时间内难以拆模。

表9 木钙与萘系复掺对碱矿渣水泥砂浆强度性能的影响

萘系掺量/ %	木钙掺量/ %	7 d 强度/MPa		28 d 强度/MPa	
		抗折	抗压	抗折	抗压
2.0	0	8.2	32.4	8.6	40.8
2.0	0.5	7.8	34.1	9.2	42.5
2.0	1.0	6.6	35.9	9.0	44.3
2.0	1.5	5.7	36.8	9.1	43.2
	2.0	4.8	37.5	9.2	43.9
1.0	1.0	5.4	34.9	7.8	41.5
4.0	4.0	—	—	7.7	41.6
5.0	5.0	—	—	6.0	42.9

5 不同减水剂对碱矿渣水泥流变性能的影响

5.1 不同减水剂对碱矿渣水泥净浆凝结时间的影响

萘系减水剂^[11]由于不含有羟基(—OH)、醚基(—O—)等亲水性强的极性基团,故无缓凝作用;木钙除了本身的分子中含有强亲水基团羟基(—OH)、醚基(—O—)以外,还含有一定的糖,因而具有一定的缓凝作用。因此,萘系对碱矿渣水泥净浆凝结时间的影响不大,掺木钙的碱矿渣水泥净浆的初凝、终凝时间延长,具体试验结果如表10。

表10 不同减水剂对碱矿渣水泥净浆凝结时间的影响

减水剂	初凝/min	终凝/min
—	58	80
萘系	66	83
木钙	332	430

注:减水剂掺量为2.0%。

5.2 不同减水剂对碱矿渣水泥流动度经时损失的影响

减水剂对碱矿渣水泥净浆流动度的经时损失及对砂浆流动度的经时损失分别见表11、12。结果表明,掺木钙的碱矿渣水泥流动度经时损失较小,而掺萘系的碱矿渣水泥流动度经时损失较大。这主要是木钙具有缓凝作用,而萘系不具有缓凝作用所致。

表 11 不同减水剂对碱矿渣水泥净浆流动度经时损失的影响

减水剂	掺量/%	流动度/mm			
		0 min	30 min	60 min	120 min
—	—	70	70	70	70
萘系	2.0	180	115	70	70
木钙	2.0	195	205	210	175

水矿比为 0.29, 激发剂为 NaOH, 其掺量以 Na₂O 对矿渣的质量百分比计为 4.0%

表 12 不同减水剂对碱矿渣水泥砂浆流动度经时损失的影响

减水剂	掺量/%	流动度/mm			
		0 min	30 min	60 min	120 min
—	—	115	115	100	100
萘系	2.0	145	140	120	105
木钙	2.0	170	170	160	150

6 结论

通过以上试验可得到如下结论:

1) 木钙和萘系均对碱矿渣水泥砂浆一定的塑化作用, 且木钙比萘系的效果明显。当以 NaOH 为激发剂, Na₂O% 为 4.0%, 减水剂掺量为 2.0% 时, 木钙对碱矿渣水泥砂浆的减水率为 9.8%, 萘系为 6.8%。

2) 萘系与引气剂复掺对碱矿渣水泥砂浆的塑化作用较单掺萘系的效果明显; 但掺引气剂会降低碱矿渣水泥砂浆的强度。

3) 木钙与萘系复掺, 可改善单掺 1 种减水剂对碱矿渣水泥砂浆的塑化作用。

4) 在相同用水量下, 木钙能提高碱矿渣水泥砂浆的强度, 萘系会降低碱矿渣砂浆的强度。

5) 木钙对碱矿渣水泥净浆凝结时间影响较大, 掺木钙的碱矿渣水泥流动度经时损失较小。

参考文献:

[1] 陈友治. 碱矿渣水泥的理论基础[J]. 新世纪水泥导报, 2000(5):10-12.
CHEN YOU-ZHI. The theoretical basis of alkali-activated slag cement [J]. Cement Guide For New Epoch, 2000(5):10-12.

- [2] 宋洋. 表面活性剂在碱矿渣系统中的作用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009:41-42.
- [3] COLLINS, FRANK, SANJAYAN J G. Microcracking and strength development of alkali activated slag concrete. Cement and Concrete Composites, 2001, 23(4/5):345-352.
- [4] ISOZAKI K, IWAMOTO S, NAKAGAWA K. Some properties of alkali-activated slag cements [J]. CAJ Review, 1986, 3:120-123.
- [5] JOLICOEUR C, SIMAR M A, SHARMAN J, et al. Chemical activation of blast-furnace slag, An overview and systematic experimental investigation[C]//Advance in Concrete Technology, Ministry of Supply and Services, Ottawa, Canada: 471-502.
- [6] BAKHAREV T, SANJAYAN J G, CHENG Y B. Effect of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete[J]. Cem. Concr. Res, 2000, 30(9):1367-1374.
- [7] WANG S D, SCRIVENER K L, PRATT P L. Factors affecting the strength of alkali activated slag[J]. Cem Concr Res, 1994, 24(6):1033-1043.
- [8] 朱书景, 方宏辉. 外加剂对矿渣微粉胶结特性的影响[J]. 粉煤灰, 2009, 21(5):13.
ZHU SHU-JING, FANG HONG-HUI. Effect of admixture on cementitious characteristics of slag powder[J]. Fly Ash, 2009, 21(5):13.
- [9] 雷西萍. 聚羧酸减水剂对矿渣水泥性能影响的研究[J]. 硅酸盐通报, 2010, 29(6):1470.
LEI XI-PING. Study on the effect of polycarboxylic water reducer on the performance of slag cement[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2010, 29(6):1470.
- [10] 丁起. 矿渣水泥混凝土缓凝剂和减水剂最佳掺量研究[J]. 中国市政工程, 2009(5):13.
DING QI. Research on the optimum amount of retarder and water reducing agent for slag cement concrete[J]. China Municipal Engineering, 2009(5):13.
- [11] 何延树. 混凝土外加剂[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2003.
- [12] 刘先锋. 表面活性剂在碱矿渣水泥系统中表面化学特性的初步研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.

(编辑 胡 玲)