

文章编号:1673-2049(2007)01-0037-05

# 砂浆固化 $\text{Cl}^-$ 性能的影响因素

马昆林<sup>1</sup>, 谢友均<sup>1</sup>, 刘运华<sup>2</sup>, 石明霞<sup>1</sup>

(1. 中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075; 2. 郴州市建设工程安全管理监督站, 湖南 郴州 423000)

**摘要:**采用化学滴定的方法,研究了单掺粉煤灰、单掺硅灰、粉煤灰与硅灰双掺以及龄期对砂浆固化  $\text{Cl}^-$  性能的影响规律。结果表明:与基准砂浆相比,粉煤灰掺量增加,砂浆固化  $\text{Cl}^-$  性能增强,特别是对  $\text{Cl}^-$  的化学结合能力;在本试验范围内掺入硅灰对砂浆固化  $\text{Cl}^-$  性能影响不显著;粉煤灰与硅灰双掺能够进一步提高砂浆固化  $\text{Cl}^-$  性能;随着龄期的增加,砂浆对  $\text{Cl}^-$  固化能力和化学结合能力均下降,物理吸附能力提高,但到一定龄期后,无论是化学结合量还是物理吸附量都趋于稳定。

**关键词:**混凝土耐久性;化学结合;物理吸附; $\text{Cl}^-$ ;砂浆

中图分类号:TU528

文献标志码:A

## Influence Factors on Performance of Mortar Solidifying Chloride

MA Kun-lin<sup>1</sup>, XIE You-jun<sup>1</sup>, LIU Yun-hua<sup>2</sup>, SHI Ming-xia<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China; 2. Chenzhou Station of Safety Supervision of Construction Engineering, Chenzhou 423000, Hunan, China)

**Abstract:** Influence rules of adding single fly ash, single silica fume, and compound of fly ash and silica fume as well as age on the performance of mortar solidifying chloride were studied through chemical titration method. The results show that by comparing with the blank sample, the performance of mortar solidifying chloride, especially its chemical binding capacity of chloride is strengthened by addition of fly ash. There is hardly influence on the performance of mortar solidifying chloride by the addition of silica fume in this experiment. Appropriate addition of compound of fly ash and silica fume can further improve the performance of mortar solidifying chloride. With age increasing, performance of total amount of mortar solidifying chloride and chemical binding capacity of chloride are on the decline, but the performance of chloride physical adsorption is on the rise. Both chemical binding and physical adsorption will be invariableness when age is definite.

**Key words:** concrete durability; chemical binding; physical adsorption; chloride; mortar

## 0 引言

混凝土中  $\text{Cl}^-$  的渗透有两个基本决定因素:一是与混凝土孔隙率及孔径有关,孔结构粗大、孔径开放,渗透性就大, $\text{Cl}^-$  的侵入速度也就快;二是与

混凝土对  $\text{Cl}^-$  的固化有关,即混凝土对  $\text{Cl}^-$  的物理吸附与化学结合能力,这种固化能力既影响渗透速率,又影响水中游离  $\text{Cl}^-$  的结合速率。渗入混凝土中的  $\text{Cl}^-$  有 3 种存在形式:①  $\text{Cl}^-$  与水泥中  $\text{C}_3\text{A}$  的水化产物水化铝酸盐相及其衍生物反应生成低溶性

收稿日期:2007-01-12

基金项目:国家自然科学基金项目(50678174);中南大学研究生教育创新工程基金项目(063710044)

作者简介:马昆林(1976-),男,云南昆明人,工学博士研究生,E-mail:mark-mkl@163.com。

的单氯铝酸钙  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , 即所谓 Friede 盐<sup>[1-2]</sup>, 称为  $\text{Cl}^-$  的化学结合; ②  $\text{Cl}^-$  被吸附到水泥水化产物中或未水化的矿物组分中, 称为  $\text{Cl}^-$  的物理吸附; ③  $\text{Cl}^-$  以游离形式存在于混凝土的孔溶液中, 只有游离态存在的  $\text{Cl}^-$  到达钢筋表面, 达到一定浓度才会对钢筋造成腐蚀。混凝土孔隙率小, 孔径细化, 阻止  $\text{Cl}^-$  渗入混凝土的能力越强, 进入混凝土中的  $\text{Cl}^-$  就越少; 而混凝土固化  $\text{Cl}^-$  能力越强,  $\text{Cl}^-$  的渗透速率越慢, 混凝土中游离态的  $\text{Cl}^-$  就越少, 对混凝土造成的危害也就越小。Tang<sup>[3]</sup>、Dhir<sup>[4-5]</sup> 等及马保国<sup>[6]</sup> 对  $\text{Cl}^-$  的固化研究取得了一定的成果, 但在如何改善混凝土固化  $\text{Cl}^-$  性能的技术手段上尚待进一步探索<sup>[7-9]</sup>。在已有研究基础上, 笔者研究了龄期及粉煤灰、硅灰等矿物掺和料在单掺及双掺时, 对砂浆固化  $\text{Cl}^-$  性能的影响规律。

## 1 试验设计

### 1.1 原材料

水泥(C): 湖南湘乡水泥股份有限公司生产的 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥; 粉煤灰(FA): 湖南湘潭电厂生产的 I 级粉煤灰; 硅灰(SF): 西北铁合金厂生产; 砂: 湖南湘江河砂, 中砂, 细度模数 2.7, II 区级配合格; 外加剂: 湖南湘潭市潭建减水剂厂生产的 TJ 系列高效减水剂; 水: 蒸馏水。试验用原材料化学组成见表 1(本文中涉及到的用量、掺量均以质量分数计)。

表 1 水泥、粉煤灰和硅灰化学组成

Tab. 1 Chemical Compositions of Cement, Fly Ash and Silica Fume

材料	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$w(\text{CaO})$
C	24.30	4.80	3.80	55.30
FA	52.70	25.80	9.70	3.70
SF	85.16	0.06	7.04	0.56
材料	$w(\text{MgO})$	$w(\text{SO}_3)$	烧失料质量分数	
C	4.20	2.20	2.40	
FA	1.20	0.20		
SF	1.10		2.68	

由于混凝土对  $\text{Cl}^-$  的固化主要与胶凝材料的组分及水化产物有关, 因此研究  $\text{Cl}^-$  固化能力时采用砂浆进行, 砂浆中胶凝材料与砂子的质量分数比为 1:2, 水胶比均为 0.35。试验配合比及相关参数见表 2。

### 1.2 试验方法

砂浆试件采用尺寸为  $\Phi 50 \times 85$  的 PVC 管制作, 试件装模后将试模两端用双层薄膜进行密封养护, 以保持水胶比恒定不变, 到不同的龄期后取出砂

浆试件, 去掉砂浆试件表层, 再将其捣碎。用 0.3、1.18 mm 的筛子收集砂浆颗粒, 先把试件置于烘箱内用 60 °C 干燥 6 h, 然后将这些颗粒放入有硅胶的真空干燥皿中真空干燥 3 d, 以去掉砂浆颗粒中的绝大部分水分, 中止水化。

表 2 试验配合比及相关参数

Tab. 2 Experimental Mixed Proportion and Related Parameters

编号	$t/\text{d}$	$w(\text{C})/\%$	$w(\text{FA})/\%$	$w(\text{SF})/\%$	$H/\%$
A <sub>0</sub>	28	100			53.3
B <sub>1</sub>	28	80	20		51.2
B <sub>2</sub>	28	70	30		48.9
B <sub>3</sub>	28	60	40		44.5
B <sub>4</sub>	28	50	50		39.2
B <sub>5</sub>	28	40	60		32.4
C <sub>1</sub>	28	95		5	54.9
C <sub>2</sub>	28	92		8	53.1
C <sub>3</sub>	28	90		10	46.6
D <sub>1</sub>	28	80	15	5	51.9
D <sub>2</sub>	28	70	25	5	46.7
D <sub>3</sub>	28	60	35	5	41.6
D <sub>4</sub>	28	80	10	10	49.4
D <sub>5</sub>	28	70	20	10	39.0
D <sub>6</sub>	28	60	30	10	36.4
F <sub>1</sub>	3	70	30		23.3
F <sub>2</sub>	28	70	30		48.9
F <sub>3</sub>	60	70	30		65.7
F <sub>4</sub>	120	70	30		78.9
F <sub>5</sub>	180	70	30		85.9
G <sub>1</sub>	3	100			41.1
G <sub>2</sub>	28	100			53.3
G <sub>3</sub>	60	100			71.1
G <sub>4</sub>	120	100			82.3
G <sub>5</sub>	180	100			88.6

注:  $H$  为水化程度。

准确称取真空干燥 3 d 的砂浆颗粒样品 35 g 置于干燥的三角烧杯里, 用移液管取出 40 mL 已知  $\text{Cl}^-$  浓度的饱和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的 NaCl 溶液置于三角烧杯中, 三角烧杯密封后, 放入养护室内 7 d。7 d 后, 将三角烧杯里的清液(平衡液)尽可能多地倒入干燥的称量瓶中, 再加入 80 mL 蒸馏水以及少量的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 使溶液成为饱和的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  液, 把三角烧杯密封后, 再次放入养护室内 3 d。按照《水运工程混凝土试验规程》(JTJ 270—98), 用滴定法测定称量三角烧杯里平衡液的  $\text{Cl}^-$  浓度。3 d 后, 用移液管取出三角烧杯里的第 2 次平衡液 20 mL, 和前述

方法一样,用滴定法测定第 2 次平衡液的  $\text{Cl}^-$  浓度。

两次平衡液的  $\text{Cl}^-$  浓度分别记为  $C_1$ 、 $C_2$ ,则

$$C_1 = \frac{C_{00}V_1}{V}, C_2 = \frac{C_{00}V_2}{20} \quad (1)$$

式中: $C_{00}$  为  $\text{AgNO}_3$  的浓度; $V_1$  为第 1 次滴定所耗用的  $\text{AgNO}_3$  溶液的量; $V_2$  为第 2 次滴定所耗用的  $\text{AgNO}_3$  溶液的量; $V$  为第 1 次用于滴定的平衡液的用量。

由于砂基本不会固化  $\text{Cl}^-$ ,结合  $\text{Cl}^-$  主要由凝胶来完成,为了便于分析  $\text{Cl}^-$  结合量,本文中采用单位质量凝胶的  $\text{Cl}^-$  结合量来表示

$$W_{b1} = \frac{35.45V_0(C_0 - C_1)}{m_{\text{gel}}} \quad (2)$$

$$m_{\text{gel}} = \frac{(1 + m_n^0)\omega_c H}{1 + m_n^0\omega_c H} m \quad (3)$$

式中: $V_0 = 40 \text{ mL}$ ; $C_0$  为已知的  $\text{Cl}^-$  浓度; $W_{b1}$  为总的  $\text{Cl}^-$  结合量(物理吸附和化学结合); $m_{\text{gel}}$  为凝胶总量; $m$  为干试样质量; $m_n^0$  为单位质量水泥的需水量,假定  $m_n^0$  为 0.25; $\omega_c$  为水泥与水泥和砂总量的比值; $H$  由试验测得,即将平行试件在  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$  下烘至恒重,可得到未水化的自由水质量分数,由于采取密封养护,水灰比可认为恒定。根据水灰比可计算单位水泥的耗水量  $m^0$ ,所以  $H$  为  $m^0 \cdot (m_n^0)^{-1}$ ,皆以空白水泥试件的水化程度为标准

$$W_{b2} = \frac{35.45[C_0V_0 - C_1V' - C_2(V_0 + V' - V')]}{m_{\text{gel}}} \quad (4)$$

$$W_{b3} = W_{b1} - W_{b2} \quad (5)$$

式中: $W_{b2}$  为单位质量凝胶的  $\text{Cl}^-$  化学结合量; $W_{b3}$  为单位质量凝胶的  $\text{Cl}^-$  物理吸附量; $V'$  为第 1 次用于滴定的平衡液与三角烧杯里的余液之和; $V' = 80 \text{ mL}$ 。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 粉煤灰的影响

粉煤灰掺量对砂浆固化  $\text{Cl}^-$  性能的影响如图 1 所示。由图 1 可知,粉煤灰掺量在 20%~60% 时,砂浆对  $\text{Cl}^-$  固化量、化学结合量及物理吸附量逐渐增加。这是因为粉煤灰主要成分是活性的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$ ,作为掺和料加入水泥后,水泥熟料水化后生成的碱性激发剂  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  激发粉煤灰水化,生成较多的水化铝酸盐相及其衍生物等水化产物,并和  $\text{Cl}^-$  反应生成 Friede 盐,这样增强了砂浆对  $\text{Cl}^-$  化学结合能力。28 d 时,水泥中的粉煤灰仍有部分粉煤灰颗粒未能水化,经试验测试,粉煤灰掺量为 50%、60% 时胶凝材料水化程度分别为 39.2% 和

32.4%。由于粉煤灰颗粒具有较大的比表面积和空心结构,且较大的粉煤灰颗粒内部具有空腔,空腔通过气孔与表面连接,粉煤灰内部对  $\text{Cl}^-$  的吸附就在粉煤灰球体的表面和粉煤灰的内部空腔同时进行,这样就增加了吸附的有效面积,使  $\text{Cl}^-$  物理吸附的能力增强,见图 2。28 d 时,在对掺粉煤灰的胶凝材料水化产物用 SEM 观察发现有大量未水化的粉煤灰颗粒,且部分粉煤灰颗粒表面有气孔和内部相连或是表面破碎,这样都增大了粉煤灰对  $\text{Cl}^-$  物理吸附的有效面积,由文献[6]可知,粉煤灰颗粒本身具有一定的物理吸附  $\text{Cl}^-$  的能力。

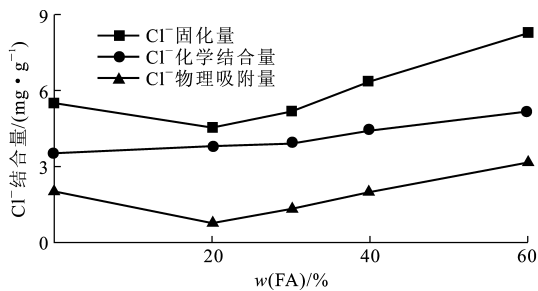


图 1 粉煤灰掺量对固化  $\text{Cl}^-$  性能的影响

Fig. 1 Influence of Performance of Solidifying Chloride of Fly Ash

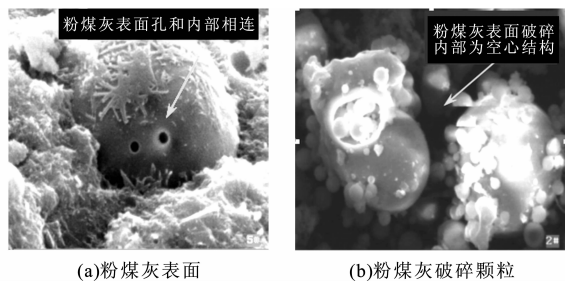


图 2 粉煤灰表面 SEM

Fig. 2 SEM of Fly Ash Surface

粉煤灰掺量在 20%~30% 时,砂浆对  $\text{Cl}^-$  的物理吸附性能低于基准砂浆试件,从而导致砂浆对  $\text{Cl}^-$  的固化量也低于基准的砂浆试件。这种结果可能是由于粉煤灰掺量在 20%~30% 时,粉煤灰掺入对  $\text{Cl}^-$  固化的正面效应未能超过由于粉煤灰掺入引起的 28 d 时胶凝材料水化程度降低造成的单位质量水化产物减少所引起的负面效应。

### 2.2 硅灰的影响

硅灰掺量对砂浆固化  $\text{Cl}^-$  性能试验结果如图 3 所示。由图 3 可知,随着硅灰掺入,砂浆固化  $\text{Cl}^-$  的性能并没有明显改变。这与文献[10]中硅灰的掺入降低了砂浆结合  $\text{Cl}^-$  的能力不符。砂浆对  $\text{Cl}^-$  的物理吸附主要发生在 C-S-H 凝胶的层间表面,由于硅

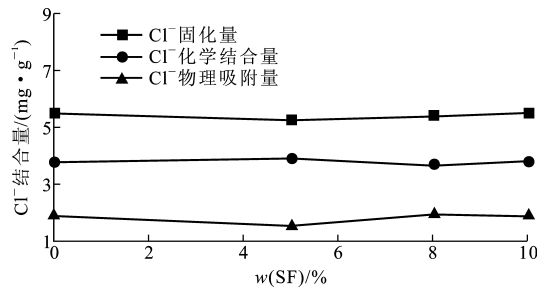


图 3 硅灰掺量对固化 Cl<sup>-</sup> 性能的影响  
Fig. 3 Influence of Silica Fume on Performance of Solidifying Chloride

灰中 SiO<sub>2</sub> 的质量分数较大,本试验中硅灰 SiO<sub>2</sub> 的质量分数高达85.16%,因此硅灰的掺入会对水泥水化产物中 C-S-H 凝胶的 Ca(Si)产生较大的影响,即减小 C-S-H 凝胶中的 Ca(Si),而 Ca(Si)减小又会改变 C-S-H 凝胶的表面特征,进而会减少可以吸附 Cl<sup>-</sup> 的有效面积,且硅灰颗粒为极小的球形玻璃体,表面光滑,对 Cl<sup>-</sup> 的物理吸附能力差,硅灰表面 SEM 如图 4 所示,但如果排除试验误差的可能性,本文中的试验结果也是可信的。因为文献[10]中的研究是在硅灰掺量较大(20%以上)的情况下进行,而本文中的试验硅灰掺量较小[ $w(\text{SF}) \leq 10\%$ ],其次,硅灰的掺入

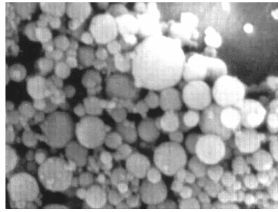


图 4 硅灰表面 SEM  
Fig. 4 SEM of Silica Fume Surface

能够促进水泥水化,相同龄期内可产生较多水化产物,这样相同龄期内硅灰掺入后水泥水化生成的水化产物比空白试件所生成的多,就能固化较多的 Cl<sup>-</sup>,这些都可能减弱由于硅灰掺入对 C-S-H 凝胶表面特征改变所造成的固化 Cl<sup>-</sup> 量的不利影响。

2.3 硅灰与粉煤灰双掺的影响

由第 2.1 节、第 2.2 节中的试验结果可知,粉煤灰与硅灰对 Cl<sup>-</sup> 的固化能力存在一定的差异。这可能是由于各自的化学组成和颗粒粒度与结构存在差别的结果,基于粉煤灰与硅灰各自的特点,以下探讨硅灰与粉煤灰双掺时对砂浆固化 Cl<sup>-</sup> 性能的影响规律。

硅灰与粉煤灰双掺对砂浆固化 Cl<sup>-</sup> 性能影响的试验结果如图 5 所示。由图 5 可知,硅灰与粉煤灰双掺后进一步提高了砂浆对 Cl<sup>-</sup> 固化量与化学结合量,且随着粉煤灰掺量的增加而增加;同时,由图 5 还可以看出,硅灰掺量 10%与粉煤灰双掺时的效果

要好于硅灰掺量 5%与粉煤灰双掺时的组合。粉煤灰与硅灰双掺后,一方面,硅灰能迅速参与水化反应生成更多的水化产物;另一方面,随着第 2 次水化反应的进行,粉煤灰水化生成较多的水化铝酸盐相及其衍生物,能够结合更多的 Cl<sup>-</sup>。

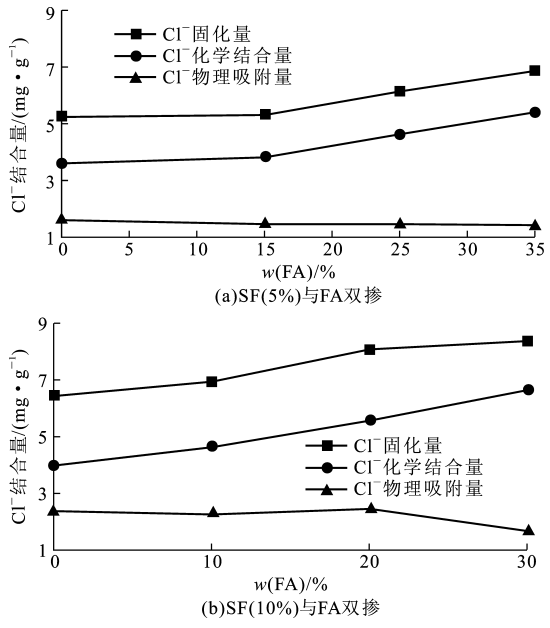


图 5 硅灰与粉煤灰双掺对砂浆固化 Cl<sup>-</sup> 性能的影响  
Fig. 5 Influence of Fly Ash and Silica Fume on Performance of Mortar Solidifying Chloride

矿物掺和料总量对固化 Cl<sup>-</sup> 性能影响的试验结果如图 6 所示。由图 6 可知,在试验及掺量相同的条件下,不同组合的矿物掺和料对砂浆固化 Cl<sup>-</sup> 性能的影响明显不同,在砂浆中双掺硅灰和粉煤灰要比单掺粉煤灰和单掺硅灰对 Cl<sup>-</sup> 的固化能力强,特别是双掺 10%的硅灰与粉煤灰时,砂浆对 Cl<sup>-</sup> 的固化能力明显增强,因此,双掺适量的硅灰与粉煤灰能够提高砂浆固化 Cl<sup>-</sup> 的能力。

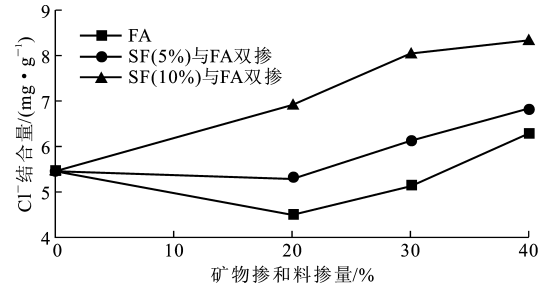


图 6 矿物掺和料掺量对固化 Cl<sup>-</sup> 性能的影响  
Fig. 6 Influence of Quantity of Mineral Admixture on Performance of Solidifying Chloride

2.4 龄期的影响

本文中试验分别对不掺矿物掺和料和粉煤灰掺

量为 30% 时的两组试件进行了研究。

纯水泥砂浆对  $\text{Cl}^-$  的固化性能如图 7(a) 所示。由图 7(a) 可知, 砂浆对  $\text{Cl}^-$  的固化量及化学结合量都随龄期增加而降低, 而对  $\text{Cl}^-$  的物理吸附量随龄期增加而增加。粉煤灰掺量 30% 的砂浆对  $\text{Cl}^-$  的固化性能如图 7(b) 所示。由图 7(b) 可知, 随龄期增加, 砂浆对  $\text{Cl}^-$  的固化量降低, 但是化学结合量先增加后降低, 物理吸附量先降低后增加。

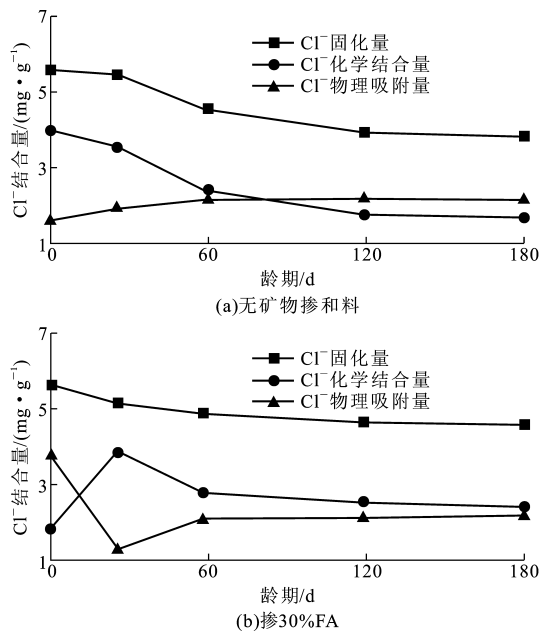


图 7 龄期对固化  $\text{Cl}^-$  性能的影响

Fig. 7 Influence of Age on Performance of Solidifying Chloride

随着龄期的增加, 纯水泥水化更加充分, 胶凝材料的水化生成的 C-S-H 凝胶增多, 会吸附更多各种带电离子或离子团, 如  $\text{Cl}^-$ , 这样物理吸附  $\text{Cl}^-$  的能力增强。此外, 纯水泥砂浆对  $\text{Cl}^-$  的化学结合与物理吸附是一个动态竞争的过程, 化学结合量必然会影 响物理吸附, 反之一样, 即存在一个动态平衡, 这样  $\text{Cl}^-$  物理吸附能力增强, 必然会影 响  $\text{Cl}^-$  化学结合的能力。随着龄期的增加, 纯水泥水化更加充分, 砂浆孔径更加细化, 生成 C-S-H 凝胶增多, 物理吸附能力相对增强, 化学结合量相对就降低了, 可是由于物理吸附不如化学结合稳定, 有一部分被物理吸附的  $\text{Cl}^-$  又会恢复成游离的状态, 所以, 虽然物理吸附量在增加, 但是增加量不如化学结合量下降的多, 所以固化量是随龄期下降的; 而且, 随着龄期的增加, 约在 120 d 以后, 纯水泥砂浆对  $\text{Cl}^-$  的化学结合与物理吸附量基本达到一个稳定值, 这反映了砂浆内部纯水泥水化产物的生成及孔结构的变化趋于稳

定; 另外, 分析粉煤灰掺量为 30% 的粉煤灰砂浆情况。由于有粉煤灰的掺入, 3 d 时, 砂浆的水化程度会很低, 仅为 23.33%, 砂浆中含有大量未水化的粉煤灰颗粒, 这时砂浆对  $\text{Cl}^-$  的固化以物理吸附为主, 所以 3 d 时, 物理吸附量较大, 化学结合量较低。随着龄期的增加, 第 2 次水化反应同时进行, 由于粉煤灰在  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶液的激发下参与水化, 生成了较多的水化铝酸盐相及其衍生物, 能够化学结合更多的  $\text{Cl}^-$ , 未水化的粉煤灰颗粒大量减少, 化学结合能力逐渐提高, 物理吸附能力有所下降, 大约在 28 d 后, 粉煤灰砂浆的水化程度与纯水泥砂浆接近, 所以 28 d 后, 固化  $\text{Cl}^-$  的特点与纯水泥砂浆相似。通过比较图 7 中的 (a) 与 (b) 可以看出, 虽然随着龄期的增加, 两种砂浆对  $\text{Cl}^-$  的固化的规律基本相同, 但在不同龄期, 粉煤灰砂浆的固化量特别是化学结合量还是比纯水泥砂浆要高。

### 3 结 语

(1) 随着粉煤灰掺量的增加, 砂浆对  $\text{Cl}^-$  的结合能力增强; 同时硅灰的掺入对砂浆固化  $\text{Cl}^-$  的性能影响不大。

(2) 硅灰与粉煤灰双掺能够充分发挥各自的特点, 提高砂浆对  $\text{Cl}^-$  的结合能力, 尤其明显增强了砂浆对  $\text{Cl}^-$  的化学结合能力, 在矿物掺和料总量相同的情况下, 硅灰与粉煤灰双掺时砂浆对  $\text{Cl}^-$  的结合能力要强于单掺粉煤灰砂浆, 适量的硅灰与粉煤灰双掺能够提高砂浆固化  $\text{Cl}^-$  的能力。

(3) 随着龄期的增加, 砂浆对  $\text{Cl}^-$  的化学结合量降低, 物理吸附量增加, 但达到一定龄期时, 化学结合量与物理吸附量都趋于稳定, 且相同龄期进行比较时, 掺粉煤灰的砂浆对  $\text{Cl}^-$  的固化能力比纯水泥砂浆强。

### 参考文献:

#### References:

- [1] 王绍东, 黄煜斌, 王 智. 水泥组分对混凝土结合氯离子能力的影响[J]. 硅酸盐学报, 2000, 28(6): 570-574.  
WANG Shao-dong, HUANG Yu-bin, WANG Zhi. Concrete Resistance to Chloride Ingress; Effect of Cement Composition[J]. Journal of the China Ceramic Society, 2000, 28(6): 570-574.
- [2] 洪定海. 混凝土中钢筋的腐蚀与保护[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998.

- ZHANG Lin-lin, LI Jie. Cross Stochastic Fourier Spectrum Function of Turbulence Wind Velocity[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(2):57-61.
- [5] 沈世钊, 武岳. 膜结构风振响应中的流固耦合效应研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(1):1-9.
- SHEN Shi-zhao, WU Yue. Research Progress on Fluid-solid Interaction Effect of Wind-induced Vibration Response of Membrane Structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(1):1-9.
- [6] 武岳, 陈波, 沈世钊. 大跨度屋盖结构等效静风荷载研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(4):27-31.
- WU Yue, CHEN Bo, SHEN Shi-zhao. Research on Equivalent Static Wind Loadings of Large-span Roof Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4):27-31.
- [7] 倪振华, 段旻, 谢壮宁. 柱壳屋盖的等效静风荷载[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(1):17-22.
- NI Zhen-hua, DUAN Min, XIE Zhuang-ning. Equivalent Static Wind Loads of Cylinder Roof[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(1):17-22.
- [8] 童秉纲, 张炳暄, 崔尔杰. 非定常流与涡运动[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993:286-300.
- TONG Bing-gang, ZHANG Bing-xuan, CUI Er-jie. Unsteady Flow and Vortex Motion[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1993:286-300.
- [9] 葛楠, 周锡元, 侯爱波. 建筑结构横向脉动风压谱密度函数的分析计算[J]. 建筑科学, 2006, 22(1):10-14.
- GE Nan, ZHOU Xi-yuan, HOU Ai-bo. A Solution for the Spectral Density Function of Across Wind Load Fluctuation[J]. Building Science, 2006, 22(1):10-14.
- [10] SWADDIWUDHIPONG S, KHAN M S. Dynamic Response of Wind-excited Building Using CFD[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 253(4):735-754.
- [11] 孙哈琦. 并行计算在计算流体力学中的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- SUN Han-qi. Research of Parallel Computing in Computational Fluid Dynamics[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [12] 梁枢果, 刘胜春, 张亮亮, 等. 矩形高层建筑横风向动力荷载解析模型[J]. 空气动力学学报, 2002, 20(1):32-39.
- LIANG Shu-guo, LIU Sheng-chun, ZHANG Liang-liang, et al. Analytical Model of Across Wind Dynamic Loads on Rectangular Tall Buildings[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2002, 20(1):32-39.
- (上接第 41 页)
- HONG Ding-hai. Protection and Corrosion of Steel in Concrete [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1998.
- [3] TANG L, NILSSON L. Chloride Binding Capacity and Binding Isotherm of OPC Pastes and Mortars[J]. Cement and Concrete Research, 1993, 23(2):247-253.
- [4] DHIR R K, EL-MOHR M A K, DYER T D. Developing Chloride Resisting Concrete Using PFA[J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(11):1 633-1 639.
- [5] DHIR R K, JONES M R. Development of Chloride-resisting Concrete Using Fly Ash[J]. Fuel, 1999, 78(2):137-142.
- [6] 马保国. 海洋高性能混凝土(MHPC)的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2000.
- MA Bao-guo. Research on Maritime High Performance Concrete[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2000.
- [7] 贺拴海, 吕颖钊. 考虑材料耐久性的在役混凝土结构可靠度研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1):71-75.
- HE Shuan-hai, LU Ying-zhao. Reliability Research of Existing Reinforced Concrete Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1):71-75.
- [8] 王东阳, 陈淑贤. 水下不分散混凝土耐久性研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(1):54-58.
- WANG Dong-yang, CHEN Shu-xian. Durability Study of Underwater Nondispersible Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(1):54-58.
- [9] 陈拴发, 郑木莲, 王秉纲. 粉煤灰混凝土应力腐蚀特性试验研究[J]. 中国公路学报, 2005, 18(3):14-17.
- CHEN Shuan-fa, ZHENG Mu-lian, WANG Bing-gang. Experimental Research on Stress Corrosion Character of Fly-ash-cement Concrete[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(3):14-17.
- [10] MEJLHEDE J O, FREIESLEBEN H P. Chloride Ingress in Cement Paste and Mortar[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 29(12):1 497-1 504.