

# 矿物掺合料和 CLDH 对水泥基材料 氯离子固化性能研究

李 东<sup>1</sup>, 朱月圆<sup>1</sup>, 耿 健<sup>2</sup>, 孙家瑛<sup>1,2</sup>, 李鹏鹏<sup>1</sup>

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200444; 2. 浙江大学 宁波理工学院, 浙江 宁波 315100)

**摘要:** 采用等温吸附平衡方法, 研究了单掺和复掺粉煤灰、矿渣和焙烧层状双金属氢氧化物(CLDH)对水泥基材料氯离子固化性能的影响, 并借助 XRD 对影响机理进行分析。结果表明: 单掺范围为 15%~45% 情况下, 随着粉煤灰和矿粉掺量增加, 水泥基固化氯离子的量先增大后减小, 当粉煤灰和矿粉的掺量在 30% 时, 其固化氯离子的能力较好且都优于纯水泥对氯离子的固化效果; 水泥基材料氯离子固化量随着 CLDH 掺量的增加而增加; 但是粉煤灰和矿渣依次与 CLDH 复掺, 复掺效果不佳, 其复掺效果不如单掺粉煤灰或矿渣对氯离子的固化效果好。研究成果对以后复掺技术在海工混凝土中的有效、合理使用提供相应的参考。

**关键词:** 粉煤灰; 矿渣; CLDH; 氯离子固化

**中图分类号:** TU503

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2019)03-0344-06

## A study on curing characteristics of chloride ions binding in cement based materials with mineral admixture and CLDH

LI Dong<sup>1</sup>, ZHU Yueyuan<sup>1</sup>, GENG Jian<sup>2</sup>, SUN Jiaying<sup>1,2</sup>, LI Pengpeng<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Zhejiang Ningbo 315100, China)

**Abstract:** In this paper, The effects of single admixture and remixed fly ash, slag and calcined double metal hydride (CLDH) on the properties of chloride ion curing of cement based materials were researched after 28 days by use of equilibrium experiment. Then, the effect mechanism was analyzed by XRD, and the results shown that, with the addition of fly ash and mineral powder, the amount of the solidified chloride ions increased first and then decreased with the addition of fly ash and mineral powder. When the fly ash and mineral powder were added to 30%, the solidification of chloride ions was better and better than that of pure cement for the curing effect of chlorine ions. The chloride ion solidification volume of cement based materials increased with the increase of CLDH content. But the fly ash and slag are mixed with CLDH in turn, and the mixed results are not very good, and the effect of the compound effect is not as good as the curing effect of a single fly ash or slag on chloride ions. The research results provide relevant reference for the effective and rational use of the recombination technology in marine concrete.

**Key words:** fly ash; slag; CLDH; chloride binding

钢筋锈蚀是导致混凝土结构耐久性劣化的重要原因, 而氯盐侵蚀是引起混凝土中钢筋锈蚀的重要原因之一<sup>[1]</sup>。氯离子在混凝土内以 3 种形式存在: 游离氯离子、化学结合氯离子(Friedel 盐)和物理吸附氯离子(CS-H 凝胶吸附)。一般认为固化态氯离子在混凝土内部是无法自由移动的, 只有存在于混凝土孔溶液中的游离态氯离子才会导致钢筋锈蚀<sup>[2]</sup>。因此, 研究混凝土固化氯离子性能对服役于海工钢筋混凝土结构的寿命预测和结构的耐久性设计具有重要作用。

镁铝碳酸根水滑石(Mg-Al-CO<sub>3</sub> LDH)是一种层状双金属氢氧化物<sup>[3]</sup>, 属于绿色环保型物质。该水滑石具有较强的层间阴离子交换的能力, 尤其焙烧物表现出特有“结构记忆”特性, 即水滑石在某一温度下进行煅烧后, 将会失去大量的层间水和阴离子, 失去其典型的层状结构。但其焙烧物在某些特定的阴离子(CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)存在的环境下将会重新恢复层状结构, 形成新的镁铝水滑石且固结阴离子的能力要明显优于原状水滑石。正因为水滑石焙烧物特有的“结构记忆”特性

收稿日期: 2018-03-12

修改稿日期: 2019-04-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778578); 浙江省自然科学基金项目(Y17E080072)

第一作者: 李 东(1963—), 男, 博士, 副教授。主要从事混凝土耐久性研究。E-mail: lidongbibo@163.com

通信作者: 朱月圆(1994—), 男, 硕士研究生。主要从事混凝土耐久性研究。E-mail: 18817620751@163.com

使得其在催化、生物制药、污水处理及电子材料等领域显示出良好的应用前景<sup>[4-5]</sup>。

国内外许多学者研究认为粉煤灰和矿渣等辅助胶凝材料替代部分水泥有助于水泥基材料氯离子的固化能力提高。Jitendra 等<sup>[6]</sup>研究了粉煤灰浆体在不同氯离子浓度下氯离子的固化量, 结果表明粉煤灰的掺入能够有效的提高水泥基氯离子固化量。莫利伟等<sup>[7]</sup>研究了双掺粉煤灰和矿粉对水泥基材料氯离子固化能力影响, 发现水泥基在水化早期粉煤灰和矿粉能够优势互补, 发挥“粉末效应”使得复掺氯离子固化量大于任意单掺。勾密峰等<sup>[8]</sup>研究了硬化矿渣浆体氯离子固化能力, 发现硬化矿渣浆体不仅可以化学结合氯离子而且还可以通过物理吸附氯离子, 溶液的碱度和温度对硬化矿渣浆体氯离子固化能力影响较大。然而, 目前大量文献对常见的矿物掺合料替代水泥有较好的研

究, 对于焙烧双层金属氢氧化物替代水泥研究较少。基于此, 本文研究了单掺和复掺粉煤灰、矿渣和 CLDH 对水泥基材料氯离子固化性能的影响, 并借助 XRD 进行氯离子固化机理分析, 为以后复掺技术在海工混凝土中的有效、合理使用提供相应的参考。

1 试验

1.1 原材料

矿渣: 宝田新型建材有限公司生产的磨细矿渣; 粉煤灰: 宁波北仑电厂 II 级粉; 水泥: 三狮 PO42.5 普通硅酸盐水泥; 镁铝水滑石: 北京爱丽汶森科技有限公司生产的镁铝碳酸根型水滑石; NaCl 采用分析纯 NaCl; 实验用水为去离子水。矿渣、水泥与粉煤灰的化学组成成分如表 1 所示。

表 1 水泥、粉煤灰和矿渣的化学组成成分  
Tab. 1 Chemical composition of cement, fly ash, slag/wt%

Material	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	IL
Cement	22.70	57.2	5.09	4.82	3.42	3.27	1.85	1.65
Fly ash	31.50	23.10	28.60	5.50	0.54	5.93	0.86	3.97
Slag	22.7	53.4	10.5	0.58	7.45	2.62	0.36	2.39

1.2 Mg-Al CLDH 制备与表征

将镁铝水滑石在高温硅钼炉中 500 ℃焙烧, 其中升温速率为 4 ℃/min, 恒温 5 h 后, 然后冷却 30 min 取出, 再冷却至室温, 破碎和粉磨, 过 250 目筛后密封保存使用(记为 CLDH)。取 LDHs、CLDH 试样进行 XRD 衍射晶相结构测定, 其中 XRD 衍射仪采用德国布鲁克公司(Bruker AXS)生产的 D8 Advance 型号。

1.3 试验配合比

水泥净浆试验用配合比如表 2 所示(其中表格数据均采用质量百分比):

表 2 水泥净浆配合比

Tab. 2 Mix proportions of cement paste /wt%

NO.	Cement	Slag	Fly ash	CLDH
C1	100	/	/	/
3LHO1	97	/	/	3
6LHO1	94	/	/	6
9LHO1	91	/	/	9
15F1	85	/	15	/
15G1	85	15	/	/
30F1	70		30	/

续表 2

NO.	Cement	Slag	Fly ash	CLDH
30G1	70	30	/	/
45F1	55		45	/
45G1	55	45	/	/
3LHO1+30G1	67	30	/	3
3LHO1+30F1	67	/	30	3

1.4 试验方法

按表 2 的配合比, 以水灰比为 0.42, 根据 GB/T 50082-2009《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法》进行试件制作, 试件尺寸为 40 mm×40 mm×40 mm, 试件成型后, 移入标准养护室[RH≥90%, t=(20±3 ℃)]养护, 24 h 后脱模, 继续标准养护 27 d, 取出试件, 在真空干燥箱中 45 ℃恒温下干燥 24 h 后, 将试件捣碎、研磨, 用孔径为 0.315 mm 和 2.5mm 的筛子收集粒径在 0.315~2.5 mm 范围内的水泥石细碎颗粒, 并充分混合均匀, 得到水泥石颗粒样品, 将样品放入干燥皿内留用。

参考 Tang<sup>[9]</sup>方法和 Andrej<sup>[10]</sup>方法, 即吸附平衡法来测定水泥净浆对氯离子固化情况。

取 20.000 g(精确至 0.001 g)干燥后的样品放入试剂瓶中,浸泡液为 100 ml 用饱和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶液配置的 0.5 mol/L NaCl 溶液.此后,用丝盖拧紧瓶口,放入  $(25 \pm 0.5)^\circ\text{C}$  恒温箱中静置 60 d,每隔一天对瓶子进行摇晃一次,防止水泥结块.等温吸附平衡试验结束后,将样品取出,放入无水乙醇中浸泡 7 d 以终止水化.7 d 后,样品首先在  $50^\circ\text{C}$  真空干燥箱中烘干至恒重,然后放入装有硅胶和生石灰的干燥皿中,以备 XRD 微观测试使用.

氯离子浓度的测试根据根据 SL352-2006《水运工程混凝土实验规程》<sup>[11]</sup>测定平衡液中氯离子的浓度  $C_e$ (mol/L),则水泥基固化氯离子量  $C_b$ (mg/g),可按下式进行计算:

$$C_b = \frac{35.453 \times (C_o - C_e)V}{G} \quad (1)$$

式中:  $C_o$  为 NaCl 溶液的初始浓度(mol/L);  $G$  为样品质量(g);  $V$  是饱和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶液配制的初始 NaCl 溶液的体积(ml).

## 2 结果与讨论

### 2.1 层状双氢氧化物的物像分析

由图 1,可以观察到 Mg-Al LDHs 的 XRD 图谱基线平稳,其衍射峰尖而窄,无杂峰存在,表明 Mg-Al LDHs 的吸收峰强度大,结晶程度较高,具有良好的对称结构.由图 2,可以看出  $500^\circ\text{C}$  高温煅烧后,从衍射图谱上可以观察到水滑石层状结构发生严重的改变,与 Mg-Al LDHs 相比失去了材料典型的特征衍射峰,出现了尖晶石类物质,这可能是因为  $500^\circ\text{C}$  高温煅烧后, Mg-Al LDHs 失去了大部分的层间水和阴离子.

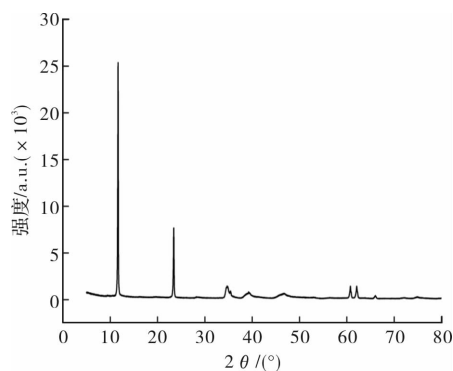


图 1 Mg-Al LDHs 的 XRD 谱图

Fig. 1 XRD patterns of Mg-Al LDHs

### 2.2 单掺粉煤灰、矿渣和 CLDH 对氯离子固化特征的影响

将磨细的粉煤灰和矿渣分别按照水泥质量的

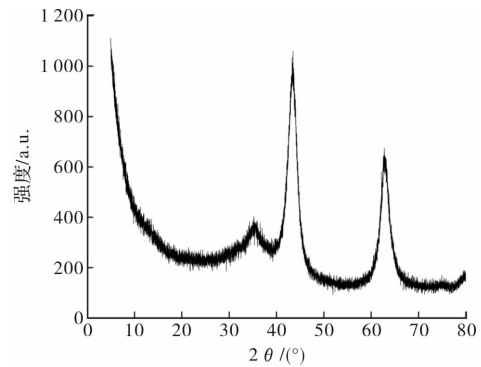


图 2 Mg-Al CLDH 的 XRD 谱图

Fig. 2 XRD patterns of Mg-Al CLDH

15%、30%、45% 等量取代水泥掺入,将 CLDH 按照水泥质量的 3%、6%、9% 等量取代水泥掺入,经吸附平衡实验测得水泥基材料氯离子的固化量,结果见图 3.

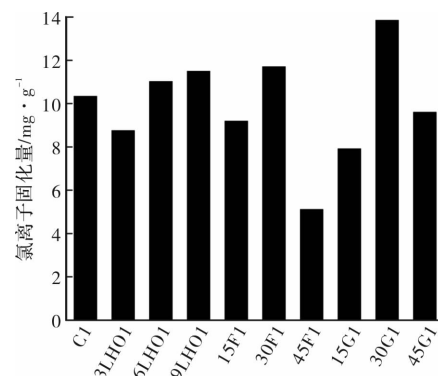


图 3 单掺粉煤灰、矿渣和 CLDH 对氯离子固化量

Fig. 3 The binding of chloride ion with fly ash, slag, CLDH

由图 3 可以看出,粉煤灰等量取代水泥之后,随着粉煤灰取代水泥的百分比增大,氯离子固化量先增大后减小,当粉煤灰掺量为 30% 时,其对氯离子的固化效果最好,并且固化量高于纯水泥;同样,矿渣等量取代水泥之后,随着矿渣掺量的增加,氯离子固化量先增大后减小,这与余红发<sup>[12]</sup>的结论相似. CLDH 等量取代水泥后,随着 CLDH 掺量的增加,氯离子固化量一直增大.当掺量达到 9% 时,其固化量高于纯水泥.同时从图 3 还可以看出,当粉煤灰和矿渣掺量较低时,单掺粉煤灰水泥基氯离子固化量要高于单掺矿渣,而随着掺量的不断增加,单掺粉煤灰水泥基氯离子固化效果不如单掺矿渣水泥基氯离子固化效果.

### 2.3 复掺粉煤灰、矿渣和 CLDH 对氯离子固化特征的影响

目前,单掺粉煤灰或单掺矿粉对氯离子固化的研究已有很多;而有关两者与焙烧双层金属氧化物复掺对固化氯离子影响的研究较少.由于复掺是海工高性能混凝土制备的关键技术,而氯离子

的固化作用对混凝土耐久性有重大影响. 本文设计了五组配合比, 其中基准组及单掺组均为与复掺组相比较而设置.

表 3 复掺粉煤灰、矿渣和 CLDH 对水泥基氯离子固化量 (mg/g)

Tab. 3 The binding of chloride ion with fly ash, slag and CLDH

NO.	Replacement/%	Binding chloride/mg · g <sup>-1</sup>
3LHO1	3	8.75
30F1	30	11.70
30G1	30	13.85
3LHO1+30F1	33	9.54
3LHO1+30G1	33	12.56

由表 3 可知, 粉煤灰和矿渣依次与 CLDH 复掺, 其复掺结果不如单掺粉煤灰或矿渣对氯离子的固化效果, 但是比单掺 CLDH 对氯离子的固化效果好. 粉煤灰和 CLDH 复掺时, 水泥基材料氯离子固化量为 9.54 mg/g, 较单掺粉煤灰下降了 18.5%, 而矿渣与 CLDH 复掺时, 水泥基材料氯离子固化量为 12.56 mg/g, 较单掺矿渣下降了 9.3%. 由此可见粉煤灰与 CLDH 复掺水泥基氯离子固化效果低于矿渣与 CLDH 复掺水泥基氯离子固化效果. 究其原因, 由表一各组分含量可知: 粉煤灰较矿渣含有较多的 SO<sub>3</sub>, 当粉煤灰和 CLDH 掺入水泥基材料, 由于粉煤灰自身材料的特性, 将会发生二次火山灰效应, 生成较多的水化铝酸钙和水化硅酸钙, 但是不可避免的将会引入 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 这种阴离子, 众多文献表明<sup>[13-14]</sup>: CLDH 具有较多的活性中心, 吸附能力极强, 能够吸附较多的阴离子和水分, 段平研究<sup>[15]</sup>指出, 阴离子在层间的交换能力顺序为 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> ≥ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > OH<sup>-</sup> > Cl<sup>-</sup> > Br<sup>-</sup> > NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 所以当孔隙溶液同时存在 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 时, CLDH 会优先吸附 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 同时由于内掺 CLDH 质量较少, 过多的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 还会和水化产物水化铝酸钙生成钙矾石(Aft), 降低了 Friedel 盐的生成量, 造成复掺粉煤灰和 CLDH 的水泥基对氯离子的固化效果降低.

2.4 XRD 分析

图 4~图 6 分别是粉煤灰、矿渣和 CLDH 按一定比例单掺时的 XRD 衍射图. 由图 4~图 6 可知各试样均存在明显的氢氧化钙(CH)、方解石(C)、石英(Qu)和 Friedel 盐(F)衍射峰. 图中 Qu(石英)的含量很高, 分析原因应该是在研磨水泥石时, 研磨罐中的石英被磨入试样内.

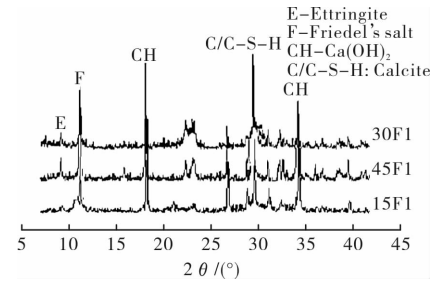


图 4 粉煤灰单掺情况下的 XRD 衍射图

Fig. 4 XRD pattern of the fly ash only mixed cases

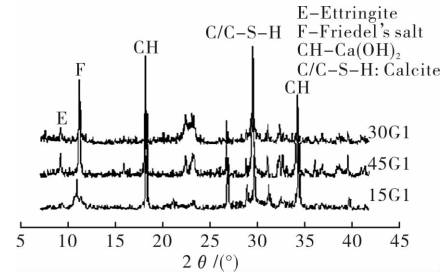


图 5 矿渣单掺情况下的 XRD 衍射图

Fig. 5 XRD pattern of the slag only mixed cases

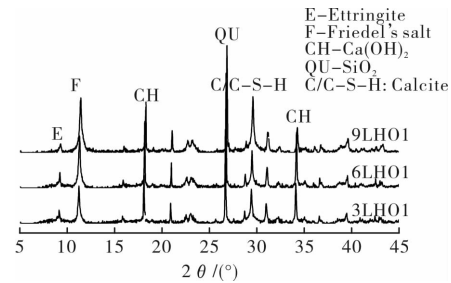


图 6 CLDH 单掺情况下的 XRD 衍射图

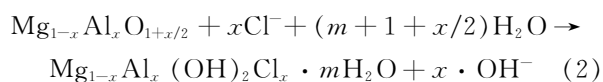
Fig. 6 XRD pattern of the CLDH only mixed cases

氯离子在混凝土中的固化是一种化学和物理相结合的过程, 前者主要以 Friedel 盐 (3CaO · CaCl<sub>2</sub> · 10H<sub>2</sub>O) 的形式存在, 后者主要以水化硅酸钙凝胶(C-S-H)物理吸附所致. 由图 4 可知, 随着粉煤灰掺入比例的增加, Friedel 衍射峰先增加后减小, 当粉煤灰掺量为 30% 时, Friedel 衍射峰最高, 同时 C-S-H 凝胶衍射峰也随着粉煤灰掺入比例的增加呈现先增大后减小的现象, 这与图 3 随着粉煤灰取代水泥的百分比增大, 氯离子固化量先增大后减小的试验结果一致. 究其原因可能是: 由表一可知粉煤灰的 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量较高, 水泥水化产生的 Ca(OH)<sub>2</sub> 作为碱性激发剂能够促使粉煤灰的水化, 生成较多的 C-S-H 凝胶及 C-A-H 等水化产物, 其中, C-A-H 可以和氯离子反应生成 Friedel 盐, 提高化学固化量; 而 C-S-H 凝胶能够吸附较多的氯离子, 提高物理吸附量. 但是当其掺量过大时, 会降低水泥水化产生的 Ca(OH)<sub>2</sub>, 而作为碱性激发剂的 Ca(OH)<sub>2</sub> 是促使粉煤灰水化的

重要因素,所以过量的粉煤灰生成的水化产物较少,从而水化生成 C-S-H 凝胶较少,这可能是导致其固化能力下降的直接原因。

由图 5 可知,随着矿渣掺量的比例增加,水化产物中钙矾石(E)衍射峰强度逐渐增强、而 C-S-H 凝胶和 Friedel 盐的衍射峰强度先增大后减小,这与图 3 的试验结果一致。究其原因可能是:由表 1 可知矿渣中  $\text{SO}_3$  含量低于纯水泥,矿粉等量取代水泥降低了胶凝材料中硫酸盐的含量,减弱了硫酸根和氯离子的竞争力,提高了氯离子固化能力。而当矿渣掺量过高时,水泥中的初级水化产物—CH 的数量不足,影响了矿渣火山灰效应的发挥,从而导致其固化氯离子的能力下降。

由图 6 可知,C-S-H 凝胶和 Friedel 盐的衍射峰随着 CLDH 的掺入比例增加而增加,表明生成的 Friedel 盐数量增多,氯离子固化量随着 Friedel 盐数量增多而增大,这与图 3 中的试验结果一致。究其原因是:LDHs 经过高温煅烧后,将会失去大量的层间水和阴离子,焙烧产物具有较多的活性中心,而且 CLDH 特有的“结构记忆特性”使得恢复层状结构,具体的反应方程为



同时对比图 3 可知,当内掺 9% 的 CLDH,其氯离子固化量大于纯水泥氯离子固化量,这表明 CLDH 固化氯离子的能力大于 Friedel 盐固化氯离子能力,这一结论与 Yoon<sup>[16]</sup> 的定量分析结果一致。

综上分析,矿物掺合料内掺入水泥基中,虽然不能改变水泥水化产物的种类,但是可以增加水化产物的数量,提高水泥基材料的氯离子固化能力。

### 3 结论

(1)单掺情况下,随着粉煤灰和矿渣掺量的增加,水泥基固化氯离子的量先增大后减小,当粉煤灰和矿粉的掺量在 30% 时,其固化氯离子的能力较好且都好于纯水泥对氯离子的固化效果;水泥基材料氯离子固化量随着 CLDH 的掺量增加而增加,当掺量为 9% 时,其固化量大于纯水泥。

(2)粉煤灰和矿渣依次与 CLDH 复掺,复掺结果并不是很好,其复掺效果不如单掺粉煤灰或矿渣对氯离子的固化效果好。

(3)粉煤灰、矿渣和 CLDH 均可以提高水泥基材料氯离子固化性能,但是原理不尽相同,粉煤

灰是通过提高物理吸附,矿渣是通过提高化学结合,CLDH 是通过结构自身“记忆”特性恢复重组而吸附氯离子。

### 参考文献 References

- [1] 李士彬,孙伟. 疲劳、碳化和氯盐作用下混凝土劣化的研究进展[J]. 硅酸盐学报,2013,41(11):1459-1464.  
LI Shibin, SUN Wei. Review on deterioration of concrete subjected to coupling effect of fatigue load, carbonation and chlorides[J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2013, 41(11): 1459-1464.
- [2] 耿健,莫利伟. 碳化环境下矿物掺合料对固化态氯离子稳定性的影响[J]. 硅酸盐学报,2014,42(4):500-505.  
GENG Jian, MO Liwei. Effect of supplementary cementitious materials on stability of bound chloride ion under carbonation condition[J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2014, 42(4): 500-505.
- [3] 冯跃,耿健,李东. 焙烧水滑石对砂浆中氯离子渗透的影响[J]. 硅酸盐通报,2018,37(4):1195-1199.  
FENG Yue, GENG Jian, LI Dong. Influence of calcined hydrotalcite on chloride penetration in [J]. Mortar Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(4): 1195-1199.
- [4] 孙金陆,甄卫军,李进. LDHs 材料的结构、性质及其应用研究进展[J]. 化工进展,2013,32(3):610-616.  
SUN Jinlu, ZHEN Weijun, LI Jin. Structure, properties and applications of LDHs [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2013, 32(3): 610-616.
- [5] 李克超,王承明,汪雪瑞,等. 焙烧镁铝水滑石对棉粕水提液中棉酚的吸附性能及吸附机理研究[J]. 中国粮油学报,2018,33(2):82-88.  
LI Kechao, WANG Chengming, WANG Xuerui, et al. Adsorption properties and mechanism of gossypol in extract of cottonseed meal by Mg-Al calcined layered double hydroxide [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2018, 33(2): 82-88.
- [6] JITENDRA A Jain, NARAYANAN Neithalath. Chloride transport in fly ash and glass powder modified concretes-Influence of test methods on microstructure [J]. Cement and Concrete Research, 2010(32):14.
- [7] 莫利伟,耿健,柳俊哲,等. 粉煤灰和矿渣双掺对水泥基材料固化氯离子能力的研究[J]. 硅酸盐通报,2013,32(12):45-50.  
MO Liwei, GENG Jian, LIU Junzhe, et al. Study on fly ash and slag on binding of chloride ion into cement based materials [J]. Mortar Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(12): 45-50.
- [8] 勾密峰,黄飞,管学茂. 矿渣对氯离子的固化作用[J],

- 材料导报, 2014(10):120-122.
- GOU Mifeng, HUANG Fei, GUAN Xuemao. The binding effect of slag on the chloride ions[J]. Materials Review, 2014(10):120-122.
- [9] TANG L, NILSSON L O. Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars[J]. Cement and Concrete Research, 1993, 23(2):247-253.
- [10] ANDREJ Ipavec, TOMAŽ Vuk, ROMAN Gabrovšek. Chloride binding into hydrated blended cements: The influence of limestone and alkalinity[J]. Cement and Concrete Research, 2013(48):74-85.
- [11] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土规程: SL352-2006 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- Ministry of Water Resources, People's Republic of China. Testing code for hydraulic concrete: SL352-2006 [S]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2006.
- [12] 余红发, 翁智财, 孙伟, 等. 矿渣掺量对混凝土氯离子结合能力的影响[J]. 硅酸盐学报. 2007. 35(6): 801-806.
- YU Hongfa, WENG Zhicai, SUN Wei, et al. Influences of slag content on chlorine ion binding capacity of concrete[J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2007. 35(6):801-806.
- [13] CHEN Y, SHUI Z, CHEN W, et al. Chloride binding of synthetic Ca-Al-NO<sub>3</sub> LDHs in hardened cement paste[J]. Construction and Building Materials, 2015, 93:1051-1058.
- [14] YANG Z, FISCHER H, POLDER R. Synthesis and characterization of modified hydrotalcites and their ion exchange characteristics in chloride rich simulated concrete pore solution[J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 47(0):87-93.
- [15] 段平. 层状双氢氧化物改善混凝土耐久性能的机理及其应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- DUAN Ping. Research on modification mechanism and the application of layered double hydroxides for durability of concrete [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
- [16] YOON S, MOON J, BAE S, et al. Chloride adsorption by calcined layered double hydroxides in hardened Portland cement paste [J]. Materials Chemistry and Physics, 2014, 145(3):376-386.

(编辑 吴海西 沈 波)

(上接第 326 页)

- [11] 刘晋超, 熊跟, 朱斌, 等. 砂土海床中大直径单桩水平承载与变形特性[J]. 岩土力学, 2015, 36(2):591-599.
- LIU Jinchao, XIONG Gen, ZHU Bin, et al. Bearing capacity and deflection behaviors of large diameter monopile foundations in sand seabed[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2):591-599.
- [12] 蔡忠祥, 刘陕南, 高承勇, 等. 基于混凝土损伤模型的灌注桩水平承载性状分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增 2):4032-4040.
- CAI Zhongxiang, LIU Shannan, GAO Chengyong, et al. Analysis of lateral response of bored piles based on concrete damaged plasticity model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 4032-4040.
- [13] 孔位学, 芮勇勤, 董宝第. 岩土材料在非关联流动法则下剪胀角选取探讨[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3278-3282.
- KONG Weixue, RUI Yongqin, DONG Baodi. Determination of dilatancy angle for geomaterials under non-associated flow rule[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11):3278-3282.
- [14] AL-SHAKARCHI Y J, Fattah M Y, Kashat I K. The behaviour of batter piles under uplift loads[C]//Proceedings of international conference on geotechnical engineering. Sharjah: [s. n.], 2004: 105-114.
- [15] HANNA A M, AFRAM A. Pull-out capacity of single batter piles in sand: Reply[J]. Revue Canadienne De Géotechnique, 1987, 24(3):468-468.
- [16] CHATTOPADHYAY B C, Pise P J. Axial uplift capacity of inclined piles [J]. Indian Geotechnical J, 1986, 16(3): 197-214.

(编辑 吴海西 沈 波)