

文章编号:1007-9629(2023)04-0437-06

# 氢氧化钙对碱矿渣材料硫酸盐结晶破坏的抑制机理

李青<sup>1,2,3,4,5</sup>, 姚凯<sup>1,2,3</sup>, 李俊潼<sup>1,2,3</sup>, 陈平<sup>1,2,3,4,5</sup>, 尹霞<sup>1,2,3,4,\*</sup>

(1. 桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学广西建筑新能源与节能重点实验室, 广西 桂林 541004; 3. 桂林理工大学广西北部湾绿色海工材料工程研究中心, 广西 桂林 541004; 4. 桂林理工大学广西工业废渣建材资源利用工程技术研究中心, 广西 桂林 541004; 5. 桂林理工大学有色金属矿产勘查与资源高效利用省部共建协同创新中心, 广西 桂林 541004)

**摘要:**通过外观变化和质量损失的发展研究了Ca(OH)<sub>2</sub>对碱矿渣材料硫酸盐结晶破坏的抑制效率, 结合抗压强度、毛细孔隙率、X射线衍射、综合热分析和扫描电子显微镜, 揭示了Ca(OH)<sub>2</sub>对碱矿渣材料硫酸盐结晶破坏的抑制机理. 结果表明: 质量分数为5%的Ca(OH)<sub>2</sub>使碱矿渣水泥石的微结构变得致密, 降低其毛细孔隙率和毛细吸水系数, 显著减小碱矿渣材料的硫酸盐结晶破坏; 质量分数为10%的Ca(OH)<sub>2</sub>使碱矿渣水泥石内部的微裂纹增多, 毛细孔隙率和毛细吸水系数增大, 对抑制硫酸盐结晶破坏不利.

**关键词:**碱矿渣材料; 硫酸盐结晶破坏; 改性技术; 抑制机理

中图分类号: TU528.33

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2023.04.014

## Inhibition Mechanism of Calcium Hydroxide on Sulfate Crystallization Damage of Alkali-Activated Slag Materials

LI Qing<sup>1,2,3,4,5</sup>, YAO Kai<sup>1,2,3</sup>, LI Juntong<sup>1,2,3</sup>, CHEN Ping<sup>1,2,3,4,5</sup>, YIN Xia<sup>1,2,3,4,\*</sup>

(1. College of Civil and Architecture Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Guangxi Key Laboratory of New Energy and Building Energy Saving, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 3. Guangxi Beibu Gulf Engineering Research Center for Green Marine Materials, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 4. Guangxi Engineering and Technology Center for Utilization of Industrial Waste Residue in Building Materials, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 5. Collaborative Innovation Center for Exploration of Nonferrous Metal Deposits and Efficient Utilization of Resources in Guangxi, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** The inhibition efficiency of calcium hydroxide on sulfate crystallization damage of alkali-activated slag material was studied by observing the development of appearance change and mass loss of alkali slag mortars. The inhibition mechanism of calcium hydroxide on sulfate crystallization damage of alkali-activated slag material was revealed through measurement of compressive strength and capillary porosity of alkali-activated slag pastes, combined with X-ray diffraction, integrated thermal analyzer and scanning electron microscope. The results show that an appropriate amount of calcium hydroxide (5%) can significantly reduce the sulfate crystallization damage of

收稿日期: 2022-03-09; 修订日期: 2022-04-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52268039); 广西青年科学基金资助项目(2021GXNSFBA220047); 广西人才专项(桂科AD22035104); 广西建筑新能源与节能重点实验室开放基金资助项目(22-J-21-21, 22-J-21-16, 22-J-21-24); “十三五”国家重点研发计划项目(2019YFC1906202)

第一作者: 李青(1986—), 男, 江苏徐州人, 桂林理工大学讲师, 博士. E-mail: liqing@glut.edu.cn

通讯作者: 尹霞(1984—), 女, 湖北汉川人, 桂林理工大学实验师, 硕士. E-mail: yinxia@glut.edu.cn

alkali-activated slag material by compacting the microstructure and reducing the capillary porosity and capillary pore water absorption coefficient of alkali-activated slag cement stone. Excessive calcium hydroxide (10%) increases the internal microcracks, capillary porosity and capillary water absorption coefficient of alkali-activated slag cement stone, which is unfavorable to the inhibition of sulfate crystallization damage of alkali-activated slag material.

**Key words:** alkali-activated slag material; sulfate crystallization damage; improve technology; inhibition mechanism

与普通水泥(PC)相比,碱矿渣胶结材(AAS)孔隙液的pH值通常大于13<sup>[1]</sup>,主要反应产物硫酸铝钙(钠)(C(N)-A-S-H)凝胶的钙硅比较低<sup>[2]</sup>且不含Ca(OH)<sub>2</sub>,凝胶脱铝需要克服的能量势垒更高<sup>[3]</sup>.因此,全浸泡条件下AAS的抗硫酸盐化学侵蚀能力优异.

然而,自然服役的工程结构常受到干湿循环作用,此时碱矿渣材料还易受到硫酸盐的结晶破坏.程杨杰<sup>[4]</sup>研究发现,在干湿循环条件下经5%硫酸盐侵蚀150 d后,碱矿渣混凝土构件的表层脱落,暴露出大量骨料.余红发<sup>[5]</sup>的工程调研也发现,青海盐湖地区的碱矿渣混凝土构件在自然干湿交替环境下,经34%盐卤水侵蚀690 d后,抗压强度仅降低约3%,抗折强度增长46%,但构件表层大面积开裂、剥落,表现出典型的硫酸盐结晶破坏特征.不同科研机构 and 院校学者们的研究工作<sup>[6-9]</sup>也在侧面印证了上述发现.AAS较严重的硫酸盐结晶破坏问题制约了AAS的推广应用.

硫酸盐晶体生长是混凝土硫酸盐结晶破坏的主要诱因,而晶体与水化产物基体壁之间的过饱和膜层溶液是硫酸盐晶体生长的前提,若能使过饱和膜层溶液消失,就能切断结晶溶质源的供给,使硫酸盐晶体停止生长.

因为Ca(OH)<sub>2</sub>可以通过化学反应消耗Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>过饱和膜层溶液,进而对硫酸盐的结晶压力起到缓解作用<sup>[10-12]</sup>.鉴于此,本文选用Ca(OH)<sub>2</sub>对AAS的硫酸盐结晶破坏进行抑制.为便于研究,试验采用净浆试件.

## 1 试验

### 1.1 原材料与试件制备

粒化高炉矿渣经振动磨磨至比表面积为505 m<sup>2</sup>/kg,根据GB/T 176—2017《水泥化学分析方法》测试的化学组成(质量分数,文中涉及的组成、纯度、掺量等除特别说明外均为质量分数或质量比)见表1.碱组分选用原模数为2.41的钠水玻璃(密度 $\rho=1.53$  g/cm<sup>3</sup>)和片状NaOH进行复配,制得模数为1.5的水玻璃.Ca(OH)<sub>2</sub>的比表面积为625 m<sup>2</sup>/kg,密度为2.21 g/cm<sup>3</sup>.细骨料为细度模数2.6的硅质河砂.硫酸盐为工业级、纯度大于99%的Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

表1 矿渣的化学组成  
Table 1 Chemical composition of slag

									w/%
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	IL	
32.12	13.65	1.36	9.15	36.47	0.35	0.47	0.26	0.57	

砂浆的配合比如表2所示.净浆试件成型时去除细集料并保持其他材料比例不变.制备的砂浆和净浆试件在室温下养护24 h后脱模,再在(20±2)℃、相对湿度大于95%的标准条件下养护28 d,然后进行硫酸盐的半浸泡-干燥循环试验,具体过程为:在5%(质量分数,下同)的Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液中浸泡15 d(浸泡高度为20~30 mm,室内温度约20℃,相对湿度约75%)后在40℃烘箱中干燥5 d,然后再浸泡15 d,如此循环.

表2 砂浆的配合比  
Table 2 Mix proportions of mortars

Sample No.	NaOH pellet	Sodium silicate	Water	Slag	Sand	Ca(OH) <sub>2</sub>	g
AAS/Control	9.5	96.0	141.3	450.0	1 350.0		
AAS/5% CH	9.5	96.0	141.3	450.0	1 350.0	22.5	
AAS/10% CH	9.5	96.0	141.3	450.0	1 350.0	45.0	

### 1.2 试验方法

抗压强度测试参照GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》进行.

毛细孔隙率( $\phi_c$ )参照ASTM C462-13《Standard test method for density, absorption, and

voids in hardened concrete》进行测试,将试件保水72 h后用饱水湿毛巾擦除试样表层的水膜,称取试件的表干质量( $m_{imm}$ );然后,用钢丝网挂篮将试件悬浮于水中,称取试件水中质量( $m_{sus}$ );最后,将试件在40℃烘箱中干燥直至恒重,并称取其干质量( $m_{40^\circ\text{C-dry}}$ ).毛

细孔隙率按下式计算:

$$\phi_c = \frac{(m_{\text{imm}} - m_{40^\circ\text{C-dry}})}{m_{\text{imm}} - m_{\text{sus}}} \quad (1)$$

毛细吸水系数(S)测试参照 ASTM C1585-13《Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic cement concretes》进行.首先,将试件置于40℃的鼓风干燥箱中干燥7d;然后,转入20℃的干燥皿中静置48h,使试件内部的相对湿度均匀分布;最后,将试件四周用铝箔胶带作密封处理(暴露底面).将试件的40mm×40mm面浸泡于水中,浸泡高度为3~5mm,测试其浸泡1、3、5、8、12、16、20、45min(之后试件质量基本稳定)后的质量,然后按下式计算毛细吸水系数:

$$i = a + St^{0.5} \quad (2)$$

式中: $i$ 为试件单位面积的吸水体积, $\text{mm}^3/\text{mm}^2$ ;  $t$ 为测试时间,min; $a$ 为常数.

微观结构测试:首先,将标准养护28d的样品破碎,采用无水乙醇终止其水化,并在真空烘箱(40℃)中烘至恒重;然后,使用玛瑙研钵磨细后过76 $\mu\text{m}$ (200目)筛,备用.采用Phillips X'Pert型X射线衍射仪(XRD)对样品进行物相分析(Cu K $\alpha$ 射线),电压为40kV,电流为40mA,扫描速率为4( $^\circ$ )/min.采用STA250(耐驰,德国)型综合热分析仪(TG-DSC)进行热分析,温度范围为20~1000℃,升温速率为10℃/min,试验气氛为N<sub>2</sub>.采用配有能谱仪的Zeiss Auriga Fib型扫描电子显微镜(SEM)进行微观形貌观察.

## 2 结果及讨论

### 2.1 Ca(OH)<sub>2</sub>对碱矿渣砂浆硫酸盐结晶破坏的抑制效率

#### 2.1.1 碱矿渣砂浆的外观

图1为掺入Ca(OH)<sub>2</sub>前后碱矿渣砂浆试件的外观.由图1可知:

(1)120d后(即6个循环周期)试件AAS/Control表面富集有大量的硫酸盐晶体,且硫酸盐结晶位置达到试件顶部.这是因为碱矿渣砂浆的毛细吸水系数比较大,硫酸盐溶液可以通过毛细孔迅速迁移至试件顶部并结晶.450d后(即23个循环周期)试件AAS/Control顶部约有1/5粉化剥落.清除顶部附着的溃散粉体,试件横截面表现出“洋葱头式”形态,这是一种典型的硫酸盐结晶物理破坏形式<sup>[13]</sup>.

(2)与试件AAS/Control相比,掺加5%Ca(OH)<sub>2</sub>后试件AAS/5%CH120d的硫酸盐晶体数量显著降低,最大析晶高度由试件AAS/Control的顶部降低至试件中部附近,450d后试件AAS/5%CH的中上部虽有剥落痕迹,但破坏程度明显小于试件AAS/Control.随着Ca(OH)<sub>2</sub>的掺量增至10%,试件AAS/10%CH120d的硫酸盐晶体量略有增加,450d后试件AAS/10%CH中上部的剥落面积和剥落程度略有增大,但仍小于试件AAS/Control.由此可见,掺入适量的Ca(OH)<sub>2</sub>可以有效抑制碱矿渣砂浆硫酸盐结晶破坏的程度,而过多Ca(OH)<sub>2</sub>的抑制效率略有降低.

#### 2.1.2 碱矿渣砂浆的质量损失

图2为碱矿渣砂浆试件质量随龄期的变化.从图2中可以看出,试件AAS/Control的质量随着龄期的延长先增大后减小,90d的质量增大了约1.4%,450d的质量减小了约15.5%.在约60d前,碱矿渣砂浆质量的增加主要是由富集在孔隙内部的硫酸盐所致(此时硫酸盐量较少,对试件几乎不会造成破坏),之后富集在孔隙中的硫酸盐结晶在干湿循环作用下形成了较大的扩散应力和结晶压力,并造成碱矿渣砂浆的表层剥落、质量下降.试件AAS/5%CH质量随龄期的发展规律不变,450d后质量降幅约为试件AAS/Control的1/2(7.6%),说明掺入Ca(OH)<sub>2</sub>后碱矿渣砂浆抗硫酸盐结晶破坏的能力得到提升.当Ca(OH)<sub>2</sub>掺

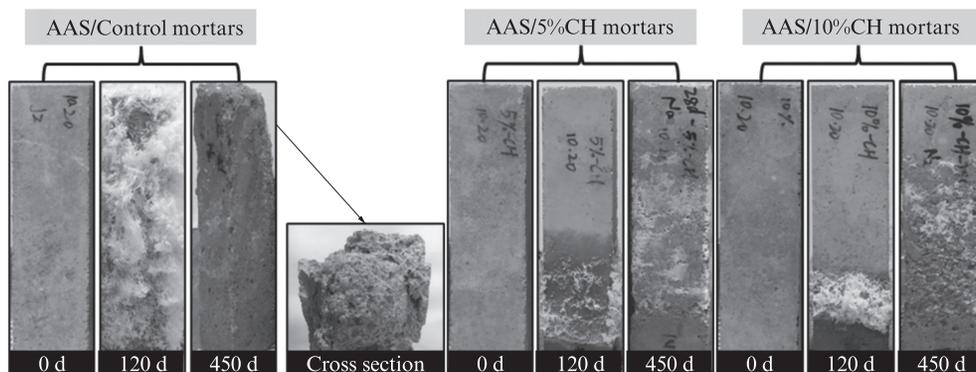


图1 掺入Ca(OH)<sub>2</sub>前后碱矿渣砂浆试件的外观

Fig. 1 Appearance of AAS mortars with and without CH before and after sodium sulfate attack

量从5%提高至10%时,试件AAS/10%CH 450 d时的质量损失略有增大(8.0%), $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 对硫酸盐结晶破坏的抑制效率下降,这与试件的外观变化规律一致。

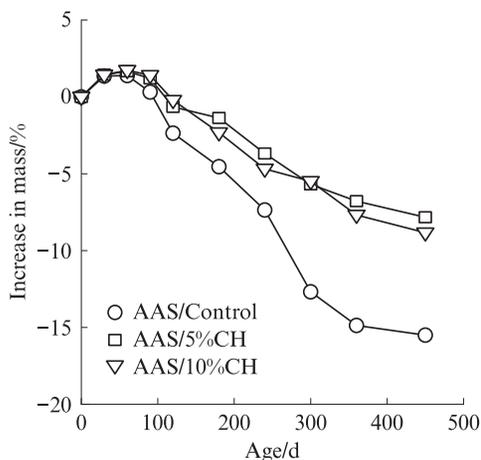


图2 碱矿渣砂浆试件质量随龄期的变化

Fig. 2 Mass changes of AAS mortars with curing ages

## 2.2 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 对碱矿渣净浆硫酸盐结晶破坏的抑制机理

为消除细骨料的干扰性影响,本试验采用净浆试件研究改性前后碱矿渣水泥石的性能变化,以探讨 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 对AAS硫酸盐结晶破坏的抑制机理。

### 2.2.1 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 对碱矿渣水泥石抗压强度与毛细孔隙率的影响

表3为碱矿渣净浆试件的28 d抗压强度和毛细孔隙率。由表3可知,掺加5%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 后试件AAS/5%CH的抗压强度增大28.6%,毛细孔隙率降低25.5%;当 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 掺量增至10%时,试件AAS/10%CH的抗压强度略有回降,毛细孔隙率降幅减小。这主要是因为,掺入适量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 相当于提高了碱矿渣体系的碱度,进而促进矿渣的解离,迅速形成固相三维骨架结构<sup>[14]</sup>,抗压强度快速发展,结构更加致密;而 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 过量使碱矿渣浆体硬化速度过快,水化产物难以充分扩散,水分消耗后残留的孔隙来不及被水化产物充分填充,造成试件内部的微观缺陷较多,抗压强度降低。

表3 碱矿渣净浆试件的28 d抗压强度和毛细孔隙率  
Table 3 28 d compressive strength and  $\phi_c$  of AAS paste specimens

Sample No.	28 d compressive strength/MPa	$\phi_c$ /%
AAS/Control	52.1	24.3
AAS/5%CH	67.0	18.1
AAS/10%CH	64.1	19.6

### 2.2.2 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 对碱矿渣水泥石毛细吸水系数的影响

图3为碱矿渣净浆试件的毛细孔吸水系数。由图3可以看出,与试件AAS/Control相比,掺入5%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 后,试件AAS/5%CH的毛细吸水系数降低1/3;当 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 掺量增至10%时,试件AAS/10%CH的毛细吸水系数略回升,但仍小于试件AAS/Control。根据硫酸盐结晶破坏的原理可知,扩散应力大是碱矿渣净浆硫酸盐结晶破坏的主要原因之一。显然,适量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 使碱矿渣水泥石的结构更加致密,毛细孔吸水系数降低,缓解了硫酸盐的迁移扩散,抑制了扩散压力的形成和发展,有利于抗硫酸盐结晶破坏性能的提升;过量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 引起碱矿渣净浆毛细吸水系数增大,会使硫酸盐扩散更快,产生较大的破坏应力,不利于硫酸盐结晶破坏的改善。

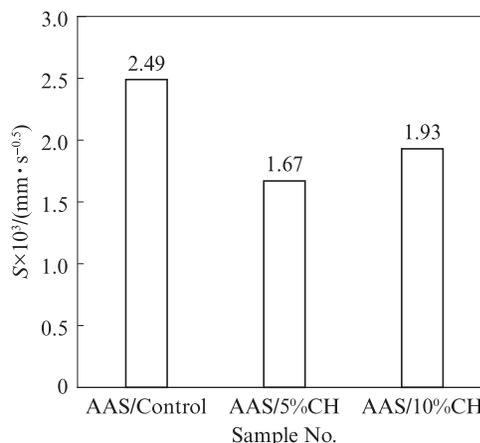


图3 碱矿渣净浆试件的毛细孔吸水系数

Fig. 3 Capillary water absorption coefficient of AAS paste specimens

### 2.2.3 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 对碱矿渣水化产物的影响

图4为碱矿渣净浆试件的XRD图谱。从图4可以看出:试件AAS/Control的主要成分为C-S-H凝胶

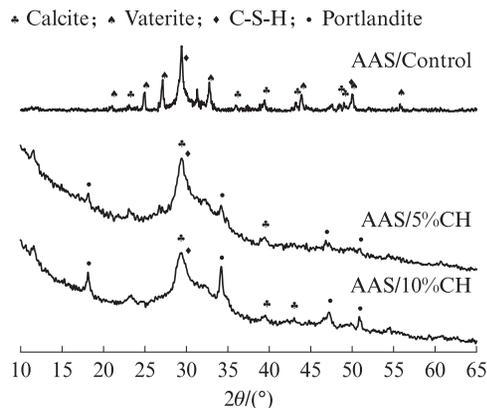


图4 碱矿渣净浆试件的XRD图谱

Fig. 4 XRD patterns of AAS paste specimens

胶,没有Ca(OH)<sub>2</sub>;改性碱矿渣净浆的主要产物无明显变化,仍以C-S-H凝胶为主,同时检测到残余Ca(OH)<sub>2</sub>;当Ca(OH)<sub>2</sub>掺量由5%提高至10%时,碱矿渣净浆中残余Ca(OH)<sub>2</sub>的含量增大,这与预想结果一致.另外,各试件中均发现方解石和球霏石,这是样品制备过程中试样碳化的结果.

图5为碱矿渣净浆试件的TG-DSC曲线.由图5可见:

(1)试件AAS/Control中未发现Ca(OH)<sub>2</sub>,改性碱矿渣净浆的DSC曲线在457℃处出现了Ca(OH)<sub>2</sub>脱羟基吸热峰,这与XRD结果一致.残余Ca(OH)<sub>2</sub>可以消耗硫酸盐过饱和膜层溶液,缓解Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>结晶压力的过早形成<sup>[10]</sup>.

(2)掺入5% Ca(OH)<sub>2</sub>后碱矿渣净浆水化产物的脱水温度从89℃变为144℃,这可能与反应产物特性与微观结构差异有关.值得注意的是,虽然Ca(OH)<sub>2</sub>可能会增大碱矿渣材料硫酸盐化学侵蚀的风险,但从前期试验结果可以看出,即使试件内部出现石膏,碱矿渣材料硫酸盐化学侵蚀的风险仍较低.主要是因为石膏的破坏性与孔溶液的pH值密切相关<sup>[15-16]</sup>,pH值大于12.7时其破坏性较低,而碱矿渣砂浆是高碱性体系,孔溶液的pH值通常大于13.0.干湿循环和硫酸盐作用下碱矿渣砂浆产物和形貌的变化详见文献[17-18].

2.2.4 Ca(OH)<sub>2</sub>对碱矿渣水泥石微观结构的影响

图6为碱矿渣净浆试件的SEM图像.由图6可以看出:

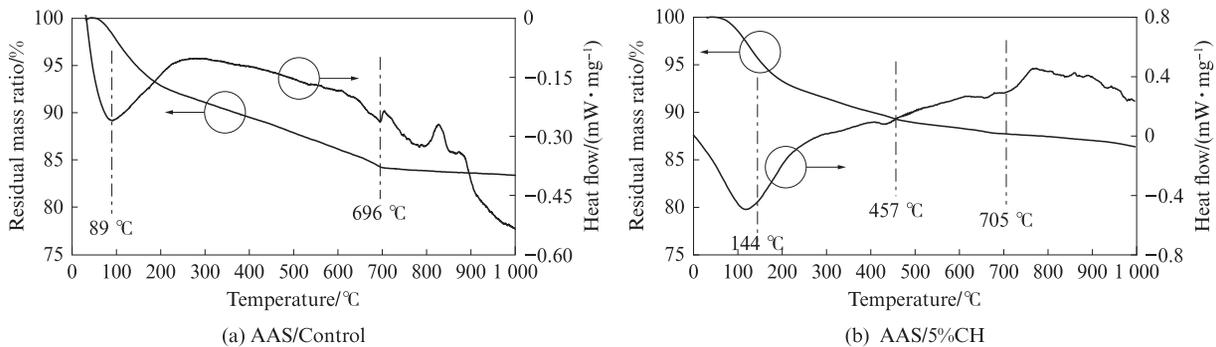


图5 碱矿渣净浆试件的的TG-DSC曲线  
Fig. 5 TG-DSC curves of AAS paste specimens

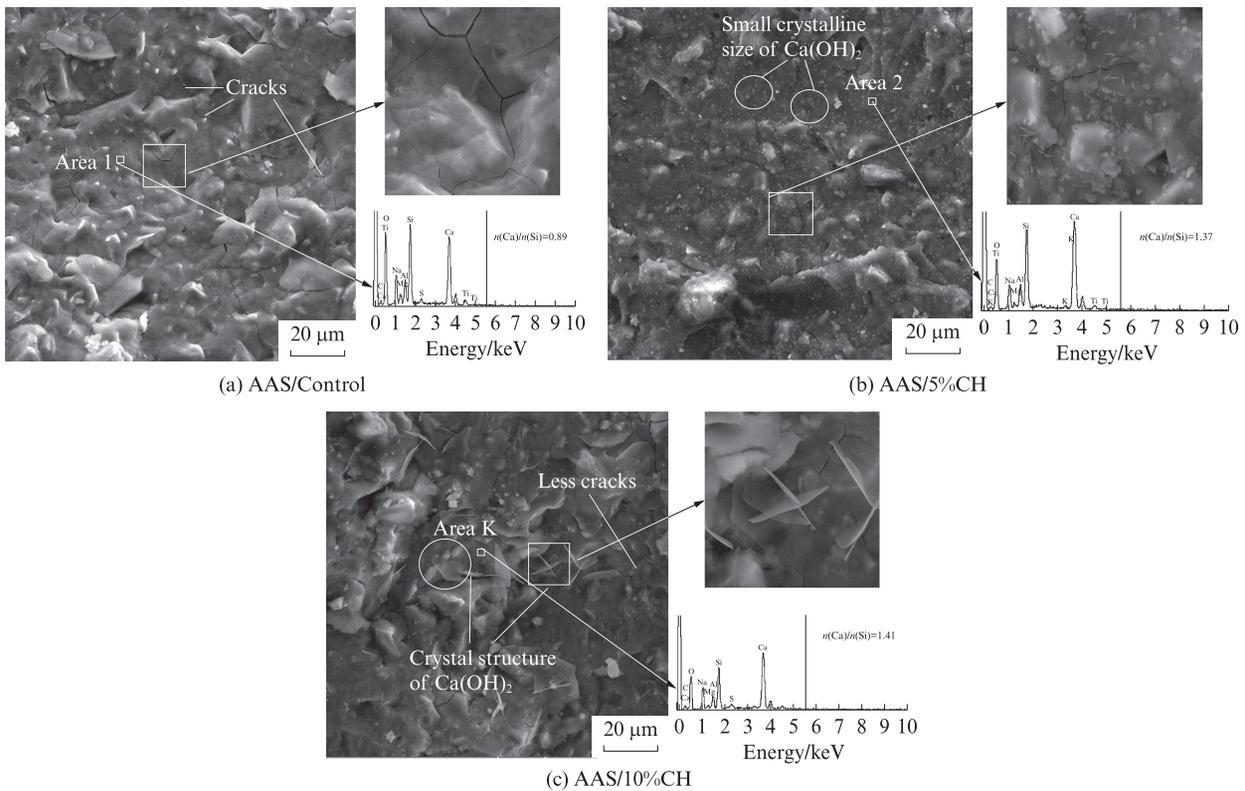


图6 碱矿渣净浆试件的SEM图像  
Fig. 6 SEM images of AAS paste specimens

(1) 试件 AAS/Control 水化产物的钙硅比为 0.89. 掺加 5%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  后, 在试件 AAS/5%CH 内部发现了  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体, 同时碱矿渣水泥水化产物的钙硅比增大到 1.37; 当  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量增至 10% 时, 试件 AAS/10%CH 水化产物的钙硅比增大到 1.41, 说明  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  使 C-S-H 的性能发生了变化<sup>[19]</sup>.

(2) 5%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  改性碱矿渣水泥石的微观结构更加致密. 当  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量提高至 10% 时, 碱矿渣水泥石微裂纹的数量增多, 微裂纹宽度变大, 内部微观缺陷增多, 这是过量  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  导致碱矿渣水泥石的毛细孔隙率增大, 毛细孔吸水系数变高的主要原因.

### 3 结论

(1) 在半浸泡-干燥循环条件下, 碱矿渣材料的硫酸盐结晶物理破坏较为严重; 质量分数为 5% 的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  显著抑制了碱矿渣材料表面硫酸盐的结晶量, 降低了试件的结晶高度, 试件质量损失减少了约 50%; 质量分数为 10% 的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  对碱矿渣材料硫酸盐结晶破坏的抑制效率略有降低.

(2)  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  使碱矿渣净浆的致密度提高, 毛细吸水系数降低, 缓解了硫酸盐迁移产生的扩散应力. 试件内部残余的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  可以通过消耗硫酸盐过饱和膜层溶液来缓解硫酸盐结晶压力的过早形成.

(3)  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  改性碱矿渣试件在出现明显硫酸盐结晶破坏迹象时, 仍未检测到明显的化学侵蚀产物石膏等.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  在显著抑制硫酸盐结晶破坏的同时, 未增加碱矿渣材料硫酸盐化学侵蚀的风险.

#### 参考文献:

- [1] 万小梅, 韩笑, 于琦, 等. 碱激发矿渣净浆对氯离子的固化作用[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(5):952-960.  
WAN Xiaomei, HAN Xiao, YU Qi, et al. Solidification of chloride ions in alkali-activated slag paste[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(5):952-960. (in Chinese)
- [2] 彭晖, 李一聪, 罗冬, 等. 碱激发偏高岭土/矿渣复合胶凝体系反应水平及影响因素分析[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(6):1390-1396.  
PENG Hui, LI Yicong, LUO Dong, et al. Analysis of reaction level and factors of alkali activated metakaolin/GGBFS[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(6):1390-1396. (in Chinese)
- [3] MYERS R J, BERNAL S A, GEHMAN J D, et al. The role of Al in cross-linking of alkali-activated slag cements[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2014, 98(3):996-1004.
- [4] 程杨杰. 硫酸盐干湿循环下碱激发矿渣混凝土服役性能机理及孔溶液研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.  
CHENG Yangjie. Research on service performance and pore solution of alkali-activated slag concrete under sulfate drying and wetting cycles[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [5] 余红发. 盐湖地区高性能混凝土的耐久性、机理与使用寿命预测方法[D]. 南京: 东南大学, 2004.  
YU Hongfa. Study on high performance concrete in salt lake: Durability, mechanism and service life prediction[D]. Nanjing: Southeast University, 2004. (in Chinese)
- [6] 贺亮. 碱激发矿渣粉煤灰水泥抗干湿循环及耐腐蚀性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.  
HE Liang. The research on resistance to dry-wet cycling and corrosion of alkali-activated slag/fly ash cements[D]. Changsha: Hunan University, 2013. (in Chinese)
- [7] 张高展. 侵蚀性离子作用下矿渣-水泥复合浆体 C-S-H 微结构形成与演变机理[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.  
ZHANG Gaozhan. The microstructure of formation and evolution mechanism of C-S-H gels in Portland cement pastes with granulated blast furnace slag under the attack of corrosive ions[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [8] 金祖权. 西部地区严酷环境下混凝土的耐久性与寿命预测[D]. 南京: 东南大学, 2006.  
JIN Zuquan. Durability and service life prediction of concrete exposed to harsh environment in West of China[D]. Nanjing: Southeast University, 2006. (in Chinese)
- [9] 郑娟荣, 杨长利, 陈有志. 碱激发胶凝材料抗硫酸盐侵蚀机理的探讨[J]. 郑州大学学报(工学版), 2012, 33(3):4-7.  
ZHENG Juanrong, YANG Changli, CHEN Youzhi. Discussion on sulfate resistance mechanism of alkali activated cementitious materials[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2012, 33(3):4-7. (in Chinese)
- [10] LIU Z Q, LI X N, DENG D H, et al. The role of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  in sulfate salt weathering of ordinary concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 123:127-134.
- [11] SULEIMAN A R, SOLIMAN A M, NEHDI M L. Effect of surface treatment on durability of concrete exposed to physical sulfate attack[J]. Construction and Building Materials, 2014, 73:674-681.
- [12] LIU Z Q, HU W L, HOU L, et al. Effect of carbonation on physical sulfate attack on concrete by  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ [J]. Construction and Building Materials, 2018, 193:211-220.
- [13] HAYNES H, O'NEILL R, NEFF M, et al. Salt weathering of concrete by sodium carbonate and sodium chloride[J]. ACI Materials Journal, 2010, 107(3):258-266.
- [14] 杨长辉, 朱效宏, 郑雨佳, 等. 内掺  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  对碱矿渣混凝土水化进程的影响[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(2):161-167.  
YANG Changhui, ZHU Xiaohong, ZHENG Yujia, et al. Effect of calcium hydroxide on hydration process of alkali-activated slag concrete[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(2):161-167. (in Chinese)
- [15] 肖佳, 邓德华, 张文恩, 等. 硫酸盐侵蚀下石膏形成引起的水泥净浆破坏[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(1):19-23.  
XIAO Jia, DENG Dehua, ZHANG Wen'en, et al. Formation of