



## 激发剂种类对碱矿渣胶凝材料性能的影响研究

袁晓辉, 石艳羽, 芦峰, 张欣, 王家琪

引用本文:

袁晓辉, 石艳羽, 芦峰, 张欣, 王家琪. 激发剂种类对碱矿渣胶凝材料性能的影响研究[J]. 信阳师范学院学报自然科学版, 2021, 34(4): 667–672. doi: 10.3969/j.issn.1003–0972.2021.04.027

YUAN Xiaohui, SHI Yanyu, LU Feng, ZHANG Xin, WANG Jiaqi. Studies on the Influence of the Properties of Alkali-activated Slag Cementitious Materials with Different Activator Types[J]. *Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 34(4): 667–672. doi: 10.3969/j.issn.1003–0972.2021.04.027

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2021.04.027>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 偏硅酸钠激发矿渣-粉煤灰胶凝材料水化机理研究

Study on Hydration Mechanism of Slag-Fly Ash Cementitious Material Excited by Sodium Metasilicate  
信阳师范学院学报自然科学版, 2020, 33(1): 162–166. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2020.01.028>

### 碱矿渣混凝土基本力学性能试验研究

Experimental Study on Basic Mechanical Properties of Alkali-activated Slag Concrete  
信阳师范学院学报自然科学版, 2017, 30(3): 484–488. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2017.03.029>

### 抑制煤炭自燃的新型阻化剂研究

Studies on New Retardant of Inhibiting Coal Spontaneous Combustion  
信阳师范学院学报自然科学版, 2015(1): 121–123. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2015.01.029>

### 基于连云港海相软土的新型土工材料强度试验研究

Experimental Research of a New Soil Material Based on Lianyungang Port's Marine Soft Soil  
信阳师范学院学报自然科学版, 2016(1): 143–147. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2016.01.034>

### 极旱荒漠区超氯盐渍土固化的试验研究

Experimental Study on Curing of Ultra-Chloride Saline Soil in Arid Desertification Area  
信阳师范学院学报自然科学版, 2018, 31(2): 281–285. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2018.02.021>

# 激发剂种类对碱矿渣胶凝材料性能的影响研究

袁晓辉\*, 石艳羽, 芦峰, 张欣, 王家琪

(信阳师范学院 建筑与土木工程学院, 河南 信阳 464000)

**摘要:**为了研究激发剂种类对碱矿渣胶凝材料性能的影响规律,用高炉矿渣作为胶凝材料,氢氧化钠溶液、水玻璃溶液及碳酸钠溶液作为激发剂,在水胶比为0.3、碱当量为4%的条件下,研究3种激发剂对矿渣胶凝材料激发效果的影响,并采用微观测试手段分析了碱矿渣胶凝材料的微观形貌和水化产物。结果表明:不同的激发剂对胶凝材料的性能产生不同的影响,具体表现为碳酸钠作为激发剂,其凝结时间最长,且远远大于氢氧化钠和水玻璃作为激发剂制备的胶凝材料,但其制备的胶凝材料收缩率最小;水玻璃作为激发剂时,能够获得较高的强度,但其收缩率最大;而氢氧化钠作为激发剂,其制备的胶凝材料早期强度较高,但后期强度发展缓慢。微观分析显示,水玻璃和氢氧化钠作为激发剂时,水化产物主要为C-S-H凝胶和CaCO<sub>3</sub>,而碳酸钠作为激发剂时,水化产物主要为CaCO<sub>3</sub>。

**关键词:**碱矿渣胶凝材料;强度;凝结时间;体积变形;微观结构

**中图分类号:**TU398.9 **文献标识码:**A

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Studies on the Influence of the Properties of Alkali-activated Slag Cementitious Materials with Different Activator Types

YUAN Xiaohui\*, SHI Yanyu, LU Feng, ZHANG Xin, WANG Jiaqi

(College of Architecture and Civil Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

**Abstract:** In order to study on the influence of the properties of alkali-activated slag cementitious materials with different activator types, using blast furnace slag as cementing material, sodium hydroxide solution and sodium silicate solution as exciting agent, and sodium carbonate solution in water/cement ratio is 0.3, equivalent to 4% of the alkali conditions, three kinds of exciting agent excitation effects on slag cement materials were studied, and the microstructure and hydration products of alkali slag cement materials were analyzed by microscopic test means. The results showed that different initiators had different effects on the properties of the cementitious materials. Specifically, the setting time of sodium carbonate as the initiator was the longest, which was much longer than that of sodium hydroxide and sodium silicate as the initiator. When sodium silicate is used as an activator, it can obtain higher strength, but its shrinkage rate is the highest. As an initiator, the cementitious material prepared by sodium hydroxide had higher strength in the early stage, but the later stage of strength development is slow. Microanalysis shows that when sodium silicate and sodium hydroxide are used as the initiator, the hydration products are mainly C-S-H gel and CaCO<sub>3</sub>, while when sodium carbonate is used as the initiator, the hydration products are mainly CaCO<sub>3</sub>.

**Key words:** Alkali activated slag cementing material; strength; setting time; volume deformation; microstructure

## 0 引言

自1940年比利时PACHECO-TORGAL<sup>[1]</sup>首次以矿渣和氢氧化钠或者由矿渣及碱金属盐制备

了无熟料水泥以来,碱激发胶凝材料的研究逐渐成为国内外研究的热点。

法国DAVIDOVITS<sup>[2]</sup>研究发现,当水玻璃模数为1.85时,碱激发偏高岭土性能最好,28d抗压

收稿日期:2020-11-07;修订日期:2021-05-15; \* 通信联系人, E-mail: yxh@xynu.edu.cn

基金项目:河南省科技攻关项目(182102310878);驻马店科技重大项目(19005)

作者简介:袁晓辉(1986—),男,河南灵宝人,副教授,博士,主要从事钢管混凝土及混凝土新材料研究。

强度达到 70~100 MPa. 杨南如<sup>[3-4]</sup>从物理、化学的角度出发,介绍了碱胶凝材料的形成理论、水化机理和水化产物特性. 张长森等<sup>[5]</sup>通过 IR 和 SEM 分析得出碱激发煤矸石胶凝材料的水化产物是无定形碱-硅铝凝胶.

矿渣是高炉炼铁的副产品,是一种具有活性的矿物材料. 据统计,我国每年矿渣的产量约 2.4 亿吨<sup>[6]</sup>,产量巨大的矿渣堆放严重占有土地. 为了合理使用矿渣,解决矿渣堆放问题,很多学者开始研究用矿渣作为胶凝材料,选择合适的激发剂激发其活性,以此获得具有绿色<sup>[7]</sup>、耐高温<sup>[8]</sup>、力学性能发展快<sup>[9-11]</sup>、耐久性良好<sup>[12]</sup>等优异性能的碱激发矿渣胶凝材料. 碱激发胶凝材料在替代硅酸盐水泥胶凝材料方面表现出了巨大潜能,本文采用 3 种不同的激发剂来激发矿渣制备胶凝材料,并对其凝结时间、抗压强度和体积变形性能进行试验研究,研究激发剂种类对其性能的影响规律,并借助微观测试方法对其性能的影响机理进行分析.

## 1 试验原料及试验方案

### 1.1 试验原料

矿渣:本次试验所使用的矿渣来自于新乡新水泥厂. 矿渣等级为 S95 级,矿渣密度为 3.27 g/cm<sup>3</sup>,比表面积为 434.6 m<sup>2</sup>/kg,其微观形貌、粒径分布分别如图 1、图 2 所示,主要的化学组成成分由 X 荧光光谱进行分析,分析结果如表 1 所示.

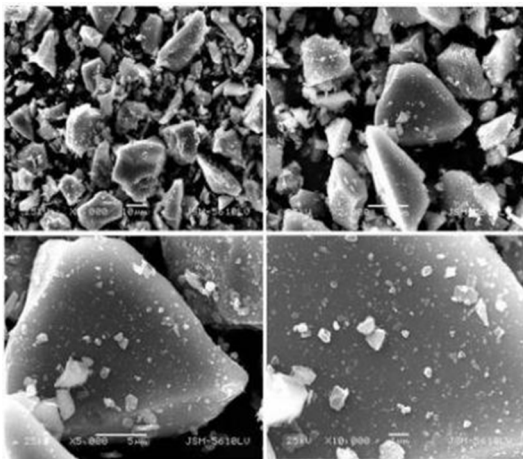


图 1 矿渣的 SEM 图

Fig. 1 SEM diagram of slag

根据矿渣的化学组成,计算出矿渣的特性指标为<sup>[13]</sup>:水硬性系数  $b = 2.14 > 1$ ; 活性系数  $H_0 = 0.45 > 0.25$ ; 碱性系数  $M_0 = 1.16 > 1$ ; 质量系数  $K = 1.99 > 1.6$ . 由上述结果可知,本文所选用的矿渣为高活性且优质的碱性矿渣.

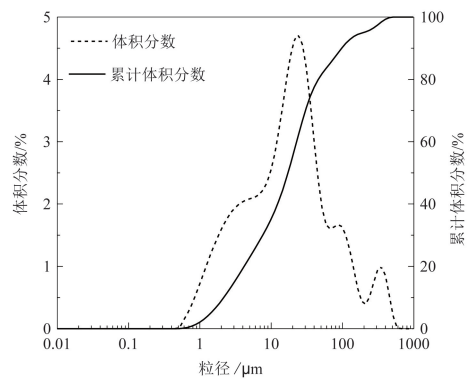


图 2 矿粉粒径分布图

Fig. 2 Slag particle size distribution map

表 1 矿渣化学组成

Tab. 1 Chemical composition of slag

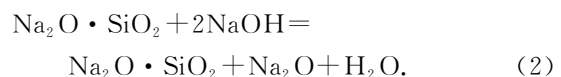
分子式	质量分数/%
CaO	41.840
SiO <sub>2</sub>	30.080
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.640
MgO	9.030
TiO <sub>2</sub>	1.930
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.596
Na <sub>2</sub> O	0.550
K <sub>2</sub> O	0.475
MnO	0.473

激发剂:3类激发剂分别为氢氧化钠、碳酸钠和液体水玻璃,其中氢氧化钠和碳酸钠为分析纯,含量分别大于等于 96.0% 和 99.6%;水玻璃分子式为 Na<sub>2</sub>O · SiO<sub>2</sub>,其模数 ( $M_s$ ) 为二氧化硅 (SiO<sub>2</sub>) 物质的量与氧化钠 (Na<sub>2</sub>O) 物质的量之比,计算式如式(1):

$$M_s = n_{\text{SiO}_2} / n_{\text{Na}_2\text{O}} = 62W_{\text{SiO}_2} / 60W_{\text{Na}_2\text{O}}, \quad (1)$$

其中: $n$  为物质的量, $W$  为物质质量.

通过滴定法测定水玻璃模数,测得 Na<sub>2</sub>O 含量为 9.05%,SiO<sub>2</sub> 含量为 26.49%,计算得到水玻璃模数为 2.93. 将一定量的氢氧化钠加入水玻璃溶液中降低水玻璃的模数,具体反应式见式(2)<sup>[14-15]</sup>:



### 1.2 试验方法

(1)凝结时间测试:参照《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》(GB/T 1346—2011)来测定碱矿渣胶凝材料的凝结时间.

(2)抗压强度测试:参照《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671—1999)进行,试样尺寸为 40 mm × 40 mm × 160 mm,在室温成型后覆保鲜膜养护 24 h 后脱模放入温度为 20 ± 1 °C、相对

湿度高于 90% 的标准养护箱中养护至 7 d、28 d 后进行抗压强度测试。

(3) 干燥收缩测试: 按照《建筑砂浆基本性能试验方法》(JGJ 70—2009) 测定试样的收缩率。

(4) 微观测试分析: 选用日本日立集团 S4800 扫描电子显微镜测试胶凝材料微观形貌; 日本理学株式会社 Smartlab 9 多功能 X-射线粉末衍射仪测试水化产物。

(5) 微观测试样品的制备: 当试件养护至规定龄期, 敲碎后取其芯部, 用无水乙醇终止水化, 然后放入 105 °C 的烘箱内干燥 24 h, 选取较平整的小块

样品固定在导电胶上, 在抽真空状态下进行喷金制样, 用扫描电镜观察其水化产物的形貌。其余试样用研钵粉磨, 过 0.08 mm 方孔筛, 用 XRD 测定其反应的水化产物。

## 2 试验结果及分析

本试验主要研究激发剂种类对矿渣胶凝材料性能的影响, 试验水玻璃模数为 1.6,  $\text{Na}_2\text{O}$  含量为 4%, 水胶比为 0.3, 按此配合比制备碱矿渣胶凝材料, 测定其凝结时间和抗压强度, 并对结果进行分析。具体试验结果见表 2。

表 2 碱矿渣胶凝材料净浆试验结果

Tab. 2 Test results of net slurry of alkali-activated slag material

编号	碱组分			凝结时间/min		抗压强度/MPa	
	激发剂	$M_s$	pH	初凝时间	终凝时间	7 d	28 d
1	水玻璃	1.6	12.7	8	14	37.8	67.4
2	氢氧化钠	/	>14	14	19	27.4	36.6
3	碳酸钠	/	12.29	273	436	0.5	0.7

### 2.1 凝结时间

结合表 2 和图 3 分析激发种类对碱矿渣胶凝材料凝结时间的影响。

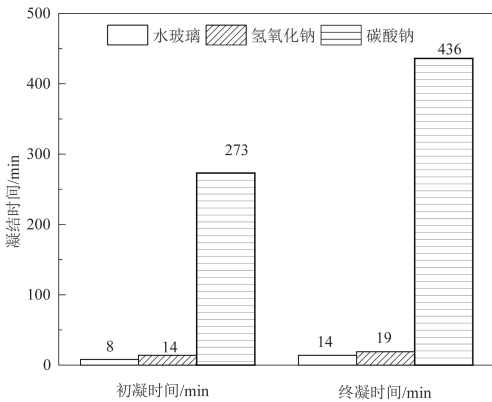
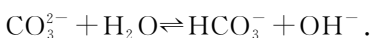


图 3 激发剂种类对碱矿渣净浆胶凝材料凝结时间的影响  
Fig. 3 Influence of different activator types on the setting time of alkali activated cementitious material

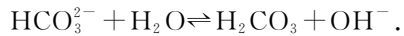
由图 3 可清晰看出, 碳酸钠激发矿粉制备的胶凝材料凝结时间最长, 初凝达到 273 min, 终凝达到 436 min; 水玻璃最短, 初凝仅 8 min, 终凝 14 min。分析可知, 碱激发矿渣主要是通过碱溶液里面的  $\text{OH}^-$  离子来激发矿渣的活性, 从而生成碱矿渣胶凝材料。而碳酸钠属于强碱弱酸盐, 它溶解在水中形成碳酸钠溶液, 存在如下的水解平衡<sup>[16]</sup>。



一级水解:



二级水解:



碳酸钠的水解以一级水解为主, 由一级水解的  $\text{OH}^-$  离子来激发矿渣的活性, 结合表 2 激发剂的 pH 值可知, 碳酸钠溶液中的  $\text{OH}^-$  离子浓度要远低于氢氧化钠和水玻璃溶液, 故用碳酸钠激发矿渣净浆的凝结时间最长。同时, 氢氧化钠激发剂的 pH 值大于水玻璃激发剂, 表明氢氧化钠激发剂溶液中  $\text{OH}^-$  离子浓度大于水玻璃激发剂溶液, 理论上氢氧化钠作为激发剂的反应速率要高于水玻璃, 但水玻璃水解后不仅生成了  $\text{OH}^-$  离子, 同时还会有  $(\text{SiO}_4)^{4-}$  离子生成, 前者用以激发矿粉的活性, 而后者促进 C—S—H 凝胶的生成, 二者共同作用, 加速了水化过程, 因此最终的结果是水玻璃作为激发剂的效果要优于氢氧化钠。由试验结果及上述分析来看, 碱矿渣胶凝材料的凝结时间不仅与激发剂碱性强弱, 还与激发剂水解的其他阴离子有关。其对碱矿渣胶凝材料凝结时间的影响顺序为水玻璃 > 氢氧化钠 > 碳酸钠。

### 2.2 抗压强度

对于不同激发剂激发矿渣制备净浆胶凝材料抗压强度的试验结果见表 2 和图 4。由图 4 可知, 当激发剂为水玻璃时, 碱矿渣净浆胶凝材料早期强度和后期强度发展都比较快, 7 d 和 28 d 抗压强度分别为 37.8 MPa 和 67.4 MPa, 这也是试验选取的 3

种激发剂中抗压强度最高的一组;当激发剂为氢氧化钠时,其 7 d 抗压强度为 27.4 MPa,28 d 抗压强度为 36.6 MPa,7 d 抗压强度即达到了 28 d 抗压强度的 74.9%,表明选用氢氧化钠为激发剂,胶凝材料早期强度发展很快,但后期强度发展十分缓慢;当激发剂为碳酸钠时,碱矿渣净浆胶凝材料在 7 d 和 28 d 龄期几乎没有强度,出现“凝而不硬”现象.对比水玻璃和氢氧化钠激发胶凝材料早期强度发展情况,正好印证了二者对凝结时间的影响.

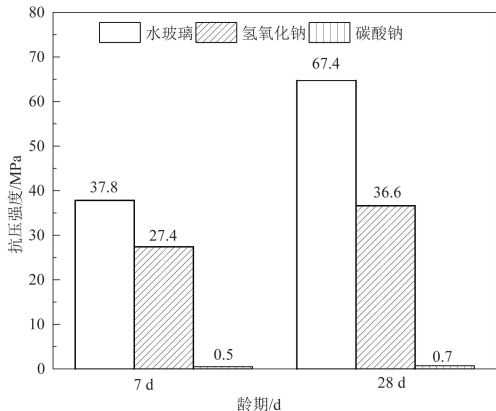


图 4 激发剂种类对碱矿渣净浆胶凝材料抗压强度的影响  
Fig. 4 Influence of the type of activator on the compressive strength of alkaline slag paste

从强度发展结果来看,水玻璃的最终激发效果明显优于其他两种激发剂.主要原因是碱激发剂在矿渣胶凝材料中起激发作用的是  $\text{OH}^-$  离子,矿渣在这些离子作用下  $\text{Si-Si}$  键被打开而活化后再聚合发生水化反应.同时,  $(\text{SiO}_4)^{4-}$  离子也会促进  $\text{C-S-H}$  凝胶的生成,使得水玻璃激发矿渣的反应速率较快,生成水化产物的量多,故强度高.但使用碳酸钠作为激发剂时,产生的  $\text{OH}^-$  离子量较少,碱度较低,因此产生的水化产物的量较少,故强度低.

### 2.3 体积变形性能

不同激发剂激发矿渣胶砂的干缩率变化曲线如图 5 所示.由图 5 可知,当测试条件一致,在水胶比和碱当量相同的条件下,水玻璃激发的矿渣胶砂的干缩率最大,氢氧化钠次之,碳酸钠最小.由氢氧化钠和碳酸氢钠激发的矿渣胶砂干缩率在 0~7 d 增长速度较快,7~14 d 增长速度逐渐放慢,14 d 趋于稳定.14 d 时,由水玻璃、氢氧化钠、碳酸钠激发的矿渣胶砂干缩率分别为  $34.35 \times 10^{-4}$ 、 $10.62 \times 10^{-4}$ 、 $4.73 \times 10^{-4}$ ,其中水玻璃的干缩率是碳酸钠的 7 倍左右,主要是因为水玻璃激发矿粉早期水化不完全,自由水较多,结构不够致密,所以导致其前

期收缩比较大.

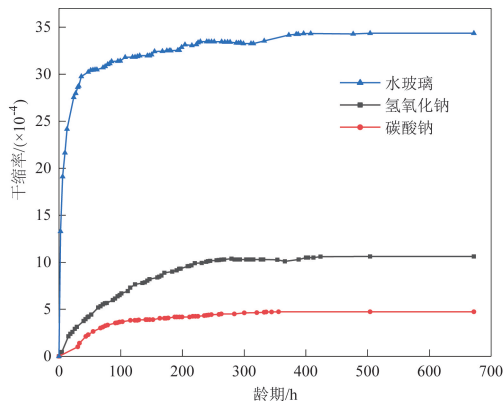


图 5 不同激发剂激发矿渣胶砂的收缩  
Fig. 5 Shrinkage of alkaline slag mortar with different activator types

### 2.4 微观结构分析

图 6(a)、(b)是 3 种不同激发剂激发矿渣制备的胶凝材料 7 d 和 28 d 龄期的 XRD 图谱.由图 6 可知,水玻璃和氢氧化钠激发矿渣胶凝材料的主要水化产物为水化硅酸钙( $\text{C-S-H}$ )和  $\text{CaCO}_3$ ,而碳酸钠激发矿渣主要的水化产物为  $\text{CaCO}_3$ .由图 6(b)可知,当激发剂为  $\text{NaOH}$  时,28 d 龄期  $\text{C-S-H}$  凝胶衍射峰强度有所降低, $\text{C-S-H}$  结晶度下降,表明后期  $\text{C-S-H}$  凝胶生成的量有所降低,因此  $\text{NaOH}$  激发矿渣胶凝材料后期的抗压强度增长较慢.

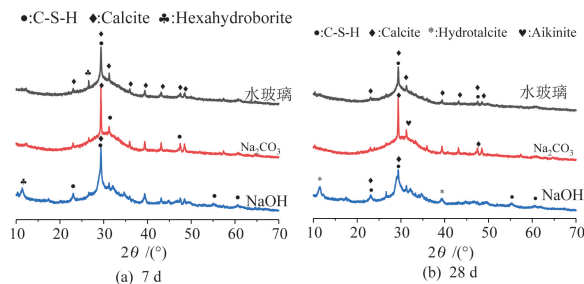


图 6 不同激发剂激发矿渣胶凝材料 XRD 图谱  
Fig. 6 XRD patterns of slag gelling materials excited by different activator types

图 7 是由 3 种激发剂制得的胶凝材料 7 d 龄期的 SEM 照片.从图 7 中可以看出,3 种激发剂制得的胶凝材料的微观形貌各不相同.从图 7(a)和 7(b)可见,水玻璃和氢氧化钠作为激发剂激发矿渣 7 d 龄期凝胶样品 SEM 图表面有明显的大量  $\text{C-S-H}$  结晶产物,凝胶结构为絮状物,相互交织,将矿渣颗粒连接在一起,矿渣颗粒大多都参与了水化反应,故其早期龄期表现出了很高的抗压强度.

对比图 7(a)、7(b)可见,图 7(a)较图 7(b)表观

裂缝多而宽,这主要是因为水玻璃激发矿渣胶凝材料早期干燥收缩性能要比氢氧化钠的高造成的.当使用碳酸钠作为激发剂时,由图 7(c)可以清晰地观

察到矿渣颗粒结构,仅有极少量的 C-S-H 絮凝体产生,这也很好地解释了碳酸钠作为激发剂,胶凝材料强度较低的原因.

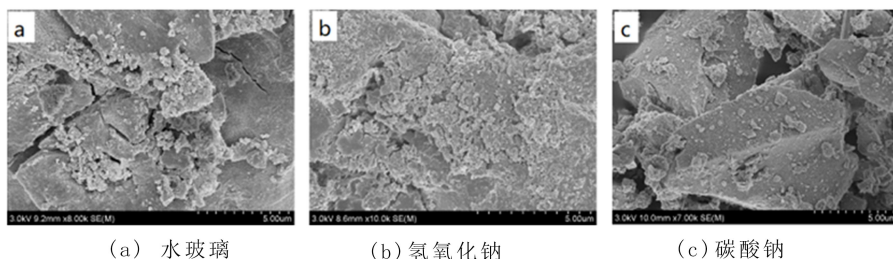


图 7 3 种激发剂制得的胶凝材料的 7 d 龄期 SEM 图

Fig. 7 SEM diagram of 7 days' age of cementitious materials prepared by three activator

图 8 是由 3 种激发剂制得的胶凝材料的 28 d 龄期时的 SEM 图片.从图 8(a)、(b)可看出,同水化 7 d 时相比,水化 28 d 时,矿渣表面及内部进一步发生水化,C-S-H 产物的量增多,矿渣颗粒之间的间隙缩小,连接紧密,形成了结构更加致密的胶凝体.而且可以明显地发现水化 28 d 时,水玻璃激发矿渣胶凝材料的裂纹减少,宽度降低,这是因为随着龄期增长,C-S-H 结晶物的不断生成和

生长对早期裂缝进行填充和挤压的结果.由图 8(c)可见,碳酸钠作为激发剂时,28 d 矿渣颗粒的棱角开始模糊,C-S-H 絮状物较 7 d 增多,但矿粉颗粒形态依然清晰可见,主要是因为碳酸钠属于强碱弱酸盐,在水解后产生的  $\text{OH}^-$  离子不能有效地活化矿渣微粉使其有效发生水化,故其 28 d 强度与 7 d 强度均较低.

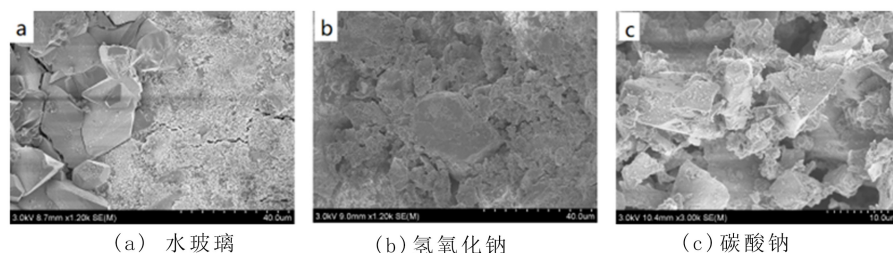


图 8 3 种激发剂制得的胶凝材料的 28 d 龄期 SEM 图

Fig. 8 SEM diagram of 28 days' age of cementitious materials prepared by three activator

### 3 结论

(1)凝结时间不仅与激发剂碱性强弱有关,还与激发剂水解的其他阴离子有关.本文选用 3 类激发剂激发的矿渣胶凝材料的凝结时间顺序为水玻璃>氢氧化钠>碳酸钠.

(2)抗压强度测试的结果表明,以水玻璃作为激发剂获得的胶凝材料 7 d 和 28 d 的抗压性能优

于氢氧化钠和碳酸钠,4%碱当量下,碳酸钠激发剂对矿渣微粒几乎无激发效果.

(3)在相同条件下,由水玻璃激发的矿渣胶砂的干缩率最大,氢氧化钠次之,碳酸钠最小.

(4)SEM、XRD 分析的结果表明,水玻璃和氢氧化钠制得的碱矿渣胶凝材料水化产物主要为 C-S-H 凝胶和  $\text{CaCO}_3$ ,而碳酸钠制得的碱矿渣胶凝材料水化产物主要为  $\text{CaCO}_3$ .

### 参考文献:

- [1] PACHECO-TORGAL F, CASTRO-GOMES J, JALALI S. Alkali-activated binders: A review: Part 1: Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products[J]. Construction & Building Materials, 2008, 22(7): 1305-1314.
- [2] DAVIDOVITS J. Geopolymers and geopolymeric materials[J]. Journal of Thermal Analysis Calorimetry, 1989, 35(2): 429-441.
- [3] 杨南如. 碱胶凝材料形成的物理化学基础(I)[J]. 硅酸盐学报, 1996, 24(2): 209-215.  
YANG Nanru. Physical and chemical basis of formation of alkaline cementitious materials(I)[J]. Journal of The

- Chinese Ceramic Society, 1996, 24(2): 209-215.
- [4] 杨南如. 碱胶凝材料形成的物理化学基础(Ⅱ)[J]. 硅酸盐学报, 1996, 24(4): 459-465.  
YANG Nanru. Physical and chemical basis of formation of alkaline cementitious materials(Ⅱ)[J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 1996, 24(4): 459-465.
- [5] 万暑, 史才军, 姜磊, 等. 碱激发胶凝材料中碱硅反应研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(11): 3214-3221.  
WAN Shu, SHI Caijun, JIANG Lei, et al. Research progress of alkali-silica reaction in alkali-activated materials[J]. Bulletin of The Chinese Ceramic Society, 2015, 34(11): 3214-3221.
- [6] 郑文忠, 焦贞贞, 邹梦娜, 等. 碱激发矿渣混凝土空心砌块砌体抗压强度试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(6): 40-45.  
ZHENG Wenzhong, JIAO Zhenzhen, ZOU Mengna, et al. Experiment of axial compressive strength of alkali-activated slag concrete hollow block masonry[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(6): 40-45.
- [7] 王贇. 绿色胶凝材料研究概述[J]. 化工新型材料, 2012, 40(5): 19-20, 26.  
WANG Yun. A review on green cementing materials[J]. New Chemical Materials 2012, 40(5): 19-20, 26.
- [8] PROVIS J L, VAN DEVENTER J S J. Alkali activated materials[M]. Dordrecht: Springer, 2014.
- [9] LAW D W, ADAM A A, MOLYNEAUX T K, et al. Durability assessment of alkali activated slag(AAS) concrete [J]. Materials and Structures, 2012, 45(9): 1425-1437.
- [10] 袁晓辉, 王士革, 李永强, 等. 碱矿渣混凝土受压应力-应变关系试验研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2019, 32(3): 492-497.  
YUAN Xiaohui, WANG Shige, LI Yongqiang, et al. Experimental study on compressive stress-strain relationship of alkali-activated slag concrete[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2019, 32(3): 492-497.
- [11] 万小梅, 张宇, 赵铁军, 等. 碱激发矿渣混凝土的力学性能[J]. 材料导报, 2018, 32(6): 2091-2095.  
WAN Xiaomei, ZHANG Yu, ZHAO Tiejun, et al. Mechanical properties of alkali activated slag concrete[J]. Materials Guide, 2018, 32(6): 2091-2095.
- [12] 高海浪, 蒋林华, 喻骁, 等. 碱激发矿渣混凝土耐久性研究进展[J]. 混凝土, 2015, 27(8): 49-52.  
GAO Hailang, JIANG Linhua, YU Xiao, et al. Research progress on durability of alkali activated slag concrete[J]. Concrete, 2015, 27(8): 49-52.
- [13] 董刚. 粉煤灰和矿渣在水泥浆体中的反应程度研究[D]. 北京: 中国建筑材料科学研究总院, 2008.  
DONG Gang. Reaction degree of fly ash and blast furnace slag in cement pastes [D]. Beijing: China Building Materials Academy, 2008.
- [14] 汪华方, 樊自田. 水玻璃模数快速测定方法的改进[J]. 理化检验(化学分册), 2008, 44(1): 47-49.  
WANG Huafang, FAN Zitian. Modification of method for rapid determination of modulus of water glass[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis, 2008, 44(1): 47-49.
- [15] 孙淑文. 水玻璃模数的调节与计算[J]. 建井技术, 1984, 5(2): 26-29.  
SUN Shuwen. Adjustment and calculation of water glass modulus[J]. Mine Construction Technology, 1984, 5(2): 26-29.
- [16] 王新. 碳酸钠对碱矿渣水泥性能的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.  
WANG Xin. Investigation of effect of sodium carbonate on properties of alkali-activated slag cement[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.

责任编辑: 郭红建