

文章编号:1007-9629(2021)04-0710-06

# 钠盐激发钢渣水泥的早期水化特性及动力学

张长森<sup>1</sup>, 李 杨<sup>1,2</sup>, 胡志超<sup>1,3</sup>, 吴其胜<sup>1</sup>, 杨 宇<sup>1</sup>

(1. 盐城工学院 材料科学与工程学院, 江苏 盐城 224051; 2. 常州大学 材料科学与工程学院, 江苏 常州 213164; 3. 江苏大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:** 采用钠盐作为激发剂, 通过水化热测定、扫描电镜(SEM)分析和水化动力学模拟, 研究了不同钠盐激发钢渣水泥的早期水化进程、水化特性及其水化动力学。结果表明: 钠盐掺入不影响钢渣水泥的水化进程, 掺与不掺钠盐的钢渣水泥水化进程均分为起始快速放热期、诱导期、加速期、减速期和衰减期 5 个阶段; 加速期水化反应由成核反应控制, 属自催化反应; 减速期水化反应由相边界反应与扩散机制共同控制; 衰减期水化反应由扩散机制控制; 由于反应机理的不同, 加速期反应速率常数是衰减期的 6~8 倍, 掺入钠盐的钢渣水泥反应速率常数大于未掺钠盐的, 钠盐的掺入有助于钢渣水泥水化反应的进行, 不同钠盐对水化的促进作用表现不同, 加速期前铝酸钠对水化的促进效果较好, 而到减速期后硅酸钠表现更佳。

**关键词:** 钠盐; 钢渣水泥; 水化特性; 水化动力学

中图分类号: TQ172.4

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2021.04.006

## Early Hydration Properties and Kinetics of Steel Slag-Cement Activated by Sodium Salts

ZHANG Changsen<sup>1</sup>, LI Yang<sup>1,2</sup>, HU Zhichao<sup>1,3</sup>, WU Qisheng<sup>1</sup>, YANG Yu<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China;  
2. School of Materials Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China;  
3. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** The early hydration process, hydration properties, and kinetics of steel slag cement activated by different sodium salts were studied through hydration heat measurement, scanning electron microscope (SEM) analysis, and hydration kinetics simulation. The results show that the incorporation of sodium salt does not affect the hydration process, and the hydration exothermic process of steel slag-cement with or without sodium salt can be divided into five stages: initial rapid exothermic stage, induction stage, acceleration stage, deceleration and attenuation stage. The acceleration stage hydration reaction is controlled by nucleation reaction, which belongs to the autocatalytic reaction. During the deceleration stage, the hydration reaction is jointly controlled by the phase boundary reaction and diffusion mechanism. In the attenuation stage, the hydration reaction is also controlled by diffusion mechanism. The reaction rate constant in the acceleration stage is 6 to 8 times of that in the attenuation stage due to the different reaction mechanisms. However, the reaction rate constant of steel slag-cement doped with sodium salt is greater than that without sodium salt. The addition of sodium salt is conducive to the hydration reaction of steel slag-cement. The promotion effect of different sodium salt on hydration is different. The promotion effect of

收稿日期: 2020-02-13; 修订日期: 2020-05-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51672236, 51572234); 江苏省生态建材与环保装备协同创新中心和江苏省新型环保重点实验室联合资助项目(CP201506)

第一作者: 张长森(1957—), 男, 江苏盐城人, 盐城工学院教授, 硕士生导师, 学士。E-mail: zcs@ycit.cn

sodium aluminate on hydration is better before the acceleration stage, and the promotion effect of sodium silicate is better after the deceleration stage. Different sodium salts have different promotion effects on hydration. The sodium aluminate promotes hydration better before the acceleration stage, while sodium silicate performs better after the deceleration stage.

**Key words:** sodium salt; steel slag-cement; hydration property; hydration kinetic

钢渣是一种由炼钢所产生的固体废弃物,其排放量约占钢产量的10%~15%<sup>[1]</sup>. 2018年中国钢产量9亿t以上<sup>[2]</sup>,则钢渣排放量在0.9~1.35亿t. 钢渣的主要矿物为过烧硅酸三钙(C<sub>3</sub>S)、硅酸二钙(C<sub>2</sub>S)、RO相(MgO、FeO和MnO的固溶体)及少量游离氧化钙(f-CaO)、铁铝酸钙(C<sub>4</sub>AF)、金属铁、橄榄石、镁蔷薇辉石<sup>[3-4]</sup>. 钢渣可以作为原料用于生产无熟料或少熟料水泥<sup>[5]</sup>,也可作为水泥混合材或混凝土掺和料. 为促进钢渣在水泥和混凝土中的应用,国家出台了GB/T 20491—2017《用于水泥和混凝土中的钢渣粉》标准,规定了用于水泥和混凝土中钢渣粉的比表面积应大于等于350 m<sup>2</sup>/kg等技术要求.

但钢渣作为混合材或掺和料应用存在以下问题:一是钢渣生成的温度较高,导致成分中含有较多的f-CaO和MgO,这些组分在水泥混凝土硬化后可与水反应生成Ca(OH)<sub>2</sub>、Mg(OH)<sub>2</sub>,使体积膨胀,影响水泥混凝土安定性及后期强度;二是钢渣的冷却过程常常是自然缓慢冷却,矿物结晶比较完整,其活性较低<sup>[6]</sup>;此外,钢渣中含有大量的RO相和Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>等活性较低的物质,限制了钢渣作为辅助胶凝材料的应用. 因此如何提高钢渣的活性和胶凝性能是钢渣在水泥基材料中得到广泛应用的关键问题. 提高钢渣活性的方法有机械激发、化学激发和高温激发.

在钢渣-水泥体系中,钢渣和水泥的水化过程会相互影响,钢渣对水泥的早期水化有一定的抑制作用,随着钢渣掺量的增加,水泥的早期水化率降低<sup>[7]</sup>;而水泥水化产生的碱性环境在一定程度上可以激发钢渣活性,在钢渣水泥体系中,水泥水化生成的Ca(OH)<sub>2</sub>可以激发钢渣的活性<sup>[4]</sup>. 掺入生石灰、石膏、明矾、水玻璃质量比为3:1:2:1的复合激发剂可提高钢渣的水化活性,促进钢渣的水化<sup>[8]</sup>. 水泥-钢渣-矿渣复合胶凝材料水化硬化过程中钢渣所起的化学作用小于矿渣;随着钢渣掺量的增大和矿渣掺量的减小,复合胶凝材料的早期和后期胶凝性能均降低,且钢渣的反应程度受复合胶凝材料组成的影响很小<sup>[9]</sup>. 采用硫酸钠、铝酸钠、硅酸钠单掺和复掺激发钢渣活性时,硫酸钠与铝酸钠复掺的效果

最好,复掺硫酸钠与铝酸钠的钢渣水泥28d抗压强度较不掺激发剂的提高42%<sup>[10]</sup>. 在钢渣水泥(钢渣掺量<sup>1)</sup>为30%)中,分别掺入3%水玻璃、烧石膏、硫酸钠和硫酸铝,其28d抗压强度分别提高了21.2%、25.8%、22.0%、16.0%<sup>[11]</sup>.

关于硫酸盐、硅酸盐、碳酸盐等无机盐作激发剂的研究主要集中在对钢渣水泥强度、凝结时间及水化产物方面. 也有学者研究钢渣水泥的水化特性和动力学,发现提高养护温度可促进钢渣水泥水化<sup>[12]</sup>;钢渣水泥的水化诱导期比纯水泥的要长,且随着钢渣掺量的增大而延长<sup>[12-13]</sup>;钢渣会抑制水泥早期水化,随钢渣掺量增加水泥早期水化程度降低<sup>[7]</sup>;将醇胺类物质掺入钢渣水泥中,可延长水化诱导期,在0.01%~0.05%的掺量下,可提高水化的第2个放热峰;而对第2次水化速率的影响不一<sup>[14]</sup>. 然而,鲜见对钠盐-钢渣水泥体系早期水化反应及其动力学的研究.

笔者在前期研究了不同激发剂对钢渣活性及水泥强度影响<sup>[10,15]</sup>的基础上,选取了硫酸钠、铝酸钠和硅酸钠3种钠盐作为激发剂,探究了钠盐激发钢渣水泥的早期水化特性及其动力学,以期探明钠盐对钢渣水泥体系早期水化速率的影响,为选择合适的钢渣激发剂提供理论支持.

## 1 试验

### 1.1 原材料

水泥为江苏八菱海螺水泥股份有限公司生产的P·I 52.5级普通硅酸盐水泥,比表面积340 m<sup>2</sup>/kg;钢渣取自江苏淮安钢铁厂. 水泥和钢渣化学组成见表1. 钠盐激发剂选用硫酸钠(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)、铝酸钠(NaAlO<sub>2</sub>)和硅酸钠(Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>),均为分析纯,掺量均采用1%;试验用水为去离子水.

表1 水泥和钢渣化学组成  
Table 1 Chemical composition of cement and steel slag w/%

Material	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	IL	Total
Cement	21.59	4.48	63.37	4.71	1.58	2.36	1.32	99.41
Steel slag	16.71	25.95	35.34	6.09	8.53		1.65	94.27

1)文中涉及的掺量、组成、水灰比等均为质量分数或质量比.

图1为钢渣的XRD图谱.由图1可知,钢渣的主要矿物相包括:f-CaO、硅酸二钙( $C_2S$ )、硅酸三钙( $C_3S$ )、铝酸钙( $C_{12}A_7$ )、RO相( $CaO$ 、 $FeO$ 、 $MnO$ 、 $MgO$ 固溶体)和铁酸钙( $C_2F$ )等,该钢渣含有一定量不具有胶凝活性的铁酸盐及含铁固溶体.

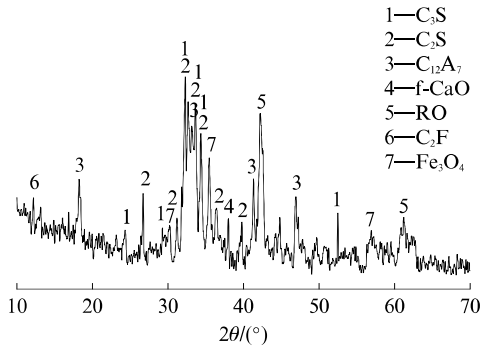


图1 钢渣的XRD图谱

Fig. 1 XRD pattern of steel slag

## 1.2 试验方法

用颚式破碎机将钢渣破碎至3 mm以下,将硅酸钠、铝酸钠和硫酸钠配制成饱和溶液,按设定配比均匀喷洒在破碎后的钢渣上后,用球磨机粉磨为比表面积 $380\text{ m}^2/\text{kg}$ 以上的钢渣粉.钢渣粉与水泥的质量比为3:7,水灰比为0.4,用水泥净浆搅拌机搅拌成水泥浆体,试样浇筑成型后放入 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿度95%以上的恒温恒湿养护箱中养护至相应龄期,取出试样浸泡在无水乙醇中终止水化,然后置于 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱中干燥36 h,用于微观结构分析.

## 1.3 测试与表征

采用STD-11202604D型恒温量热仪在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 下测定钢渣水泥水化反应的水化热.采用QANTA200型环境扫描电子显微镜(SEM)观察水泥硬化浆体的微观形貌.

## 2 结果与讨论

### 2.1 水化热分析

钢渣水泥水化放热速率曲线如图2所示.由图2可知:无论掺还是不掺钠盐,钢渣水泥水化进程均可分为起始快速放热期、诱导期、加速期、减速期和衰减期5个阶段;在起始快速放热期,钢渣水泥加水后很快形成了放热峰,在0.1 h左右,各试样均有1个较尖锐的放热峰,不掺钠盐、掺铝酸钠、硅酸钠、硫酸钠的钢渣水泥峰值分别为12.0、16.5、6.4、4.8  $\text{mW/g}$ ,且掺硅酸钠和硫酸钠的钢渣水泥在0.25 h左右还有1个较缓慢的放热峰.第1个尖锐放热峰是由于粉体在接触水时表面能的释放和铝

酸盐的快速反应<sup>[4,12]</sup>,掺铝酸钠的钢渣水泥第1个放热峰最高,这是因为铝酸钠具有很强的水解性,其在早期水化过程中迅速水解生成 $Al(OH)_3$ 和 $NaOH$ ,加速了钢渣水泥中矿物的水化进程;掺入硫酸钠的钢渣水泥第1个放热峰最低,这是因为整个体系中 $SO_3$ 相对含量最高,抑制了铝酸盐矿物的快速反应.掺硅酸钠、硫酸钠样品在第1个放热峰后还有1个较缓慢放热峰的出现,这是因为硅酸钠和硫酸钠水解速度较铝酸钠慢,刚开始其体系中碱浓度要低于掺铝酸钠的水泥体系,之后随着水解生成 $NaOH$ ,体系中 $Na^+$ 浓度增加,从而促进钢渣玻璃体中的硅、铝解聚,并重新聚合形成凝胶释放热量<sup>[16]</sup>.

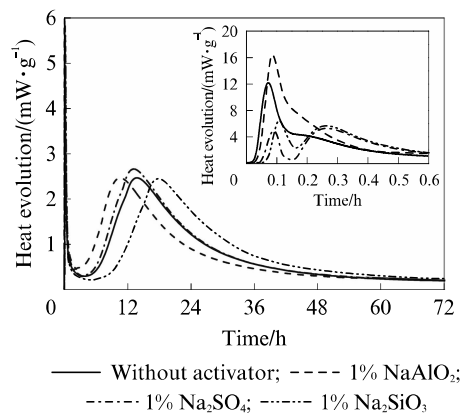


图2 钢渣水泥的水化放热速率曲线

Fig. 2 Hydration heat emission rate curves of steel slag-cement

起始快速放热期结束后,进入诱导期,水泥浆体水化生成钙矾石(Aft)、氢氧化钙等,并伴随着水化硅酸钙(C-S-H)凝胶结晶成核的形成.之后进入加速期,生成大量的氢氧化钙和C-S-H凝胶等水化产物,形成了第2个放热峰;掺入铝酸钠有利于加速钢渣水泥中矿物的早期水化进程,因此掺铝酸钠样品最先出现第2个放热峰,掺硫酸钠样品与未掺钠盐样品的第2个放热峰几乎同时出现,而掺入硅酸钠对钢渣水泥的水化进程表现出明显的延缓作用,使得钢渣水泥诱导期和加速期延长,达到第2个放热峰即最大水化放热速率的时间推迟.掺硫酸钠样品的第2个放热峰强度最高,但对诱导期和加速期的时间没有影响.究其原因:硫酸钠中的 $SO_4^{2-}$ 与浆体中溶出的 $Ca^{2+}$ 和氧化铝反应生成钙矾石,并有助于 $C_3S$ 和 $C_2S$ 水化,从而生成大量C-S-H凝胶,因此第2个放热峰峰值提高.加速期形成的大量水化产物在钢渣和水泥颗粒上生长,形成一层水化物膜,进入减速期,水化反应减缓,各钢渣水泥的水化放热速率急剧下降.最后进入衰减期水化反应进程几乎停滞,各钢渣水泥的放热速率曲线几乎重

合,放热速率趋同.

图 3 为钢渣水泥的累积水化放热曲线.由图 3 可知:各体系的水化放热量随着水化反应的进行逐步上升,水化 20 h 前,掺铝酸钠钢渣水泥累积放热量最大,依次是掺硫酸钠、未掺钠盐和掺硅酸钠钢渣水泥;随着水化时间的延长,掺硫酸钠、硅酸钠钢渣水泥的累积水化放热量则缓慢上升,36 h 后各样品的累积水化放热量按大小依次为掺硫酸钠、掺硅酸钠、未掺钠盐和掺铝酸钠钢渣水泥.总体来说各体系累积水化放热量相差不大,且其变化趋势与图 2 中放热峰的变化趋势一致.

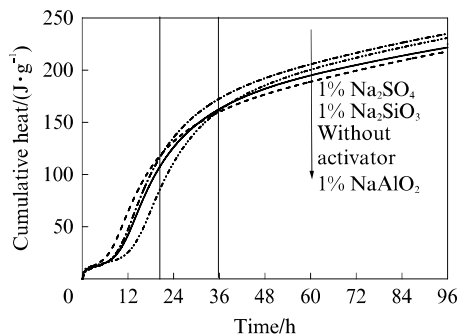


图 3 钢渣-水泥的累积水化放热曲线  
Fig. 3 Cumulative hydration heat curves of steel slag-cements

### 2.2 水化动力学分析

Knudson 和 Kondon 提出的水化动力学方程式(式(1)~(3))被广泛应用于研究矿渣水泥<sup>[17-18]</sup>、钢渣水泥<sup>[12-14]</sup>和硫铝酸盐水泥<sup>[19]</sup>的水化反应.

$$[1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{N}}]^N = Kt \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{Q}{Q_{\max}} \quad (2)$$

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{\max}} + \frac{t_{50}}{Q_{\max}(t - t_0)} \quad (3)$$

式中: $K$  为水化反应速率常数; $N$  为与水化机理相关的常数, $N < 1$  时,表示水化反应为自催化反应阶段,受成核反应控制; $N = 1$  时,表示水化反应由边界反应控制; $N \geq 2$  时,表示水化反应由扩散机制控制; $\alpha$  为水化放热量  $Q$  对应的水化程度; $t$  为水化龄期; $Q_{\max}$  为最大水化放热量; $t_0$  为加速期开始的时间; $t_{50}$  为水化放热量达到  $50\%Q_{\max}$  的时间.

根据水化动力学方程式,对图 2 水化放热曲线分段求导后确定加速期、减速期和衰减期的  $N$ 、 $K$ ,计算结果见表 2.由图 2 和表 2 可知,钢渣水泥无论掺入钠盐与否,其诱导期结束后水化反应均分为加速期、减速期和衰减期,并且加速期  $N < 1$ ,减速期  $1 < N < 2$ ,衰减期  $N > 2$ ,也就是说钠盐的掺入与否不改变钢渣水泥的整个水化反应进程.

表 2 钢渣水泥水化动力学参数  
Table 2 Hydration kinetic parameters of steel slag-cements

Sample	N			K		
	Acceleration stage	Deceleration stage	Attenuation stage	Acceleration stage	Deceleration stage	Attenuation stage
Without activator	0.82	1.34	2.27	0.016 3	0.007 4	0.002 1
1% Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	0.77	1.21	2.08	0.016 9	0.008 3	0.003 3
1% NaAlO <sub>2</sub>	0.71	1.41	2.24	0.017 8	0.007 2	0.002 3
1% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.69	1.27	2.17	0.017 5	0.007 9	0.002 7

$N$  值与反应阻力有关, $N$  值越大,反应阻力越大; $K$  值越大,水化反应速率越快<sup>[6,19]</sup>.加速期  $N < 1$ ,说明加速期水化反应属自催化反应阶段,受成核反应控制;未掺钠盐的钢渣水泥  $N$  值最大,掺钠盐钢渣水泥的反应阻力均小于未掺钠盐钢渣水泥.在钢渣中掺入钠盐后,钠盐水解生成  $\text{NaOH}$ ,使体系中碱性增强,加速钢渣中玻璃体的解聚,加快玻璃体中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SiO}_4^{4-}$ 、 $\text{AlO}_4^{5-}$  等离子进入溶液,生成新的水化产物,进而促进水泥熟料矿物的水化反应,使反应阻力降低;因此未掺钠盐钢渣水泥的反应阻力最大<sup>[20-21]</sup>.从水化反应速率常数  $K$  来看,掺铝酸钠钢渣水泥的  $K$  值最大,其成核反应速率高于其他 3 个样品.

加速期生成的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、C-S-H 凝胶等水化产

物在水泥颗粒表面生长,逐渐长大形成一层水化产物层,阻碍了水化反应的继续进行,此时转入减速期.减速期水化反应从成核反应控制为主逐步转为扩散机制控制为主,水化反应速率降低, $N$  值开始增大, $1 < N < 2$ ,此时反应由相边界反应与扩散机制共同控制.在减速期,掺铝酸钠钢渣水泥体系的  $N$  值最大, $K$  值最小,这是由于掺入铝酸钠后,其水化早期迅速水解生成  $\text{Al}(\text{OH})_3$  和  $\text{NaOH}$ ,加速了钢渣水泥中矿物的水化进程,在加速期掺铝酸钠钢渣水泥比未掺钠盐钢渣水泥和掺另外 2 种钠盐的钢渣水泥形成了较多的水化产物,附着在水泥颗粒表面,因此水化反应速率较低.

衰减期  $N > 2$ ,主要是由扩散机制控制水化反应

进程. 由于反应机理的不同, 钠盐激发钢渣水泥的加速期  $K$  值是衰减期的 5.12~7.76 倍, 表明成核反应速率远大于扩散反应速率. 掺钠盐钢渣水泥的  $N$  值均小于未掺钠盐钢渣水泥,  $K$  值均大于未掺钠盐钢渣水泥, 说明钠盐的掺入使得钢渣水泥的扩散阻力变小, 即有利于扩散反应的进行, 这是因为  $\text{Na}^+$  离子能够促进钢渣水泥的水化反应, 有利于水化产物的生成.

### 2.3 SEM 分析

图 4 为水化 24 h 后钢渣水泥的 SEM 照片. 由图 4 可知: 未掺钠盐钢渣水泥中有少部分的钢渣

发生了水化, 水化产物有板状的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体和团絮状 C-S-H 凝胶, 水化产物总体较少, 结构较疏松; 掺硫酸钠、铝酸钠和硅酸钠的钢渣水泥结构更致密, 样品中可见大量团絮状 C-S-H 凝胶和板状  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体, 还有针状的 AFt 晶体穿插在体系中. 在钢渣水泥中添加钠盐后, 由于  $\text{Na}^+$  的存在, 增强了整个体系的碱性, 有利于钢渣中的玻璃体结构解体, 促进钢渣的活性激发, 产生更多的水化凝胶, 使结构变得致密; 另外, 钢渣水泥中的  $\text{Ca}^{2+}$  离子与钠盐中的阴离子 ( $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}$  或  $\text{AlO}_2^-$ ) 发生反应, 生成水化硅酸钙、水化铝酸钙、水化硫铝酸钙等凝胶<sup>[10,22]</sup>.

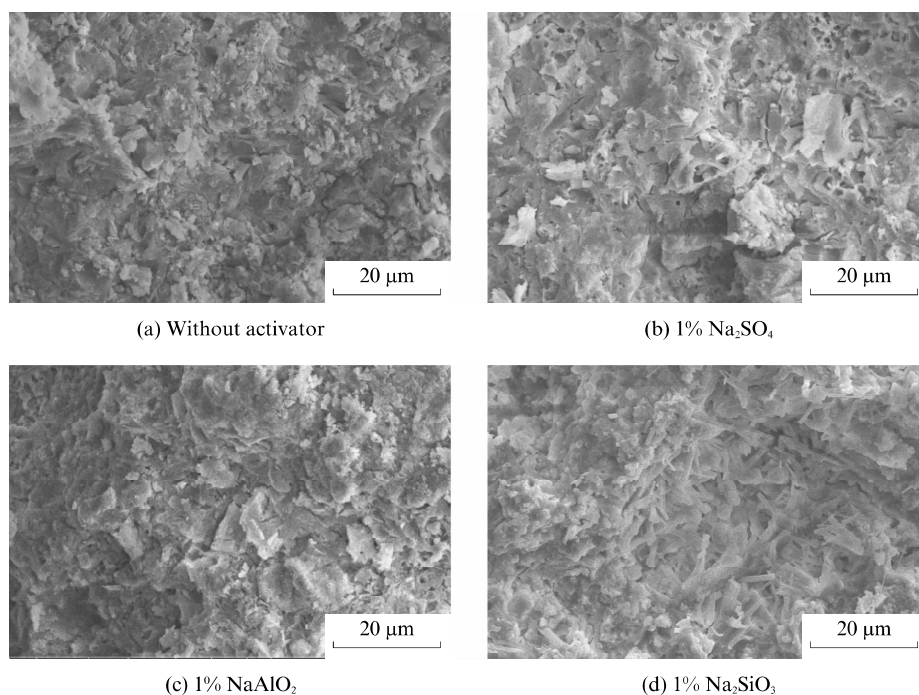


图 4 水化 24 h 后钢渣水泥的 SEM 照片

Fig. 4 SEM micrographs of steel slag-cement after hydration for 24 h

## 3 结论

(1) 掺与不掺钠盐钢渣水泥的水化进程均可分为 5 个阶段, 即起始快速放热期、诱导期、加速期、减速期和衰减期; 但钠盐的掺入影响了钢渣水泥的水化速率, 掺铝酸钠钢渣水泥的第 1 个放热峰最高, 且第 2 个放热峰提前; 掺硫酸钠钢渣水泥的第 2 个放热峰最高. 掺与不掺钠盐钢渣水泥的累积放热量相差不大, 36 h 后各样品的累积放热量大小依次是掺硫酸钠、掺硅酸钠、未掺钠盐和掺铝酸钠钢渣水泥.

(2) 加速期  $N < 1$ , 由成核反应控制; 减速期  $1 < N < 2$ , 由相边界反应与扩散机制共同控制; 衰减期  $N > 2$ , 主要由扩散机制控制. 由于反应机理的不同, 加速期反应速率常数是衰减期的 6~8 倍, 加速期、

减速期和衰减期掺入钠盐钢渣水泥的反应速率常数  $K$  基本大于未掺钠盐钢渣水泥, 钠盐的掺入有助于钢渣水泥水化反应的进行.

(3) 钠盐的掺入可有效促进钢渣水泥的水化反应, 而不同钠盐对水化的促进作用表现不同, 加速期前铝酸钠对水化的促进效果较好, 而到减速期后则硅酸钠表现更佳.

### 参考文献:

- [1] 黄毅, 徐国平, 程慧高, 等. 典型钢渣的化学成分、显微形貌及物相分析[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(8): 1902-1907.  
HUANG Yi, XU Guoping, CHENG Huigao, et al. Analysis on chemical composition, micro-morphology and phase of typical steel slag[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(8): 1902-1907. (in Chinese)

- [2] 工信部. 预计2018年我国钢产量将达到9亿t以上[J]. 现代矿业, 2019(1):86.  
MIIT (Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China). In 2018, China's steel output expected to reach more than 900 million tons [J]. Modern Mining, 2019(1):86. (in Chinese)
- [3] KOUROUNIS S, TSIVILIS S, TSAKIRIDIS P E, et al. Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(6):815-822.
- [4] 王强, 阎培渝, 韩松. 钢渣在复合胶凝材料的水化过程中对水泥水化的影响 [J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 41(2): 170-176.  
WANG Qiang, YAN Peiyu, HAN Song. The influence of steel slag on the hydration of cement during the hydration process of complex binder [J]. Science China: Technological Sciences, 2011, 41(2): 170-176. (in Chinese)
- [5] 孙家琰, 耿健. 无熟料钢渣水泥稳定再生集料性能研究与应用 [J]. 建筑材料学报, 2010, 13(1):52-56.  
SUN Jiaying, GENG Jian. Research and application of recycled aggregate by clinker free stabilized steel slag cement [J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(1):52-56. (in Chinese).
- [6] MURPHY J N, MEADOWCROFT T R, BARR P V. Enhancement of the cementitious properties of steelmaking slag [J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 1997, 36(5):315-331.
- [7] 付卫华, 王长龙, 郑永超, 等. 转炉钢渣的水化特性研究 [J]. 炼钢, 2016, 32(1):74-78.  
FU Weihua, WANG Changlong, ZHENG Yongchao, et al. Study on hydration characteristics of converter steel slag [J]. Steelmaking, 2016, 32(1):74-78. (in Chinese)
- [8] 朱伶俐, 赵宇. 钢渣复合激发剂的实验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2010, 29(5):1164-1168.  
ZHU Lingli, ZHAO Yu. Experiment study of steel slag compounded activators [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2010, 29(5):1164-1168. (in Chinese)
- [9] 王强, 黎梦圆, 石梦晓. 水泥-钢渣-矿渣复合胶凝材料的水化特性 [J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(5):629-634.  
WANG Qiang, LI Mengyuan, SHI Mengxiao. Hydration properties of cement-steel slag-ground granulated blast furnace slag complex binder [J]. Journal of Chinese Ceramic Society, 2014, 42(5):629-634. (in Chinese)
- [10] 王毓, 张长森, 吴发红, 等. 不同激发剂对钢渣活性及水泥强度的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2018(4):7-11.  
WANG Yu, ZHANG Changsen, WU Fahong, et al. The effects of different activators on the activity and strength of cement with steel slag [J]. China Concrete and Cement Products, 2018(4):7-11. (in Chinese)
- [11] 王瑞兰, 蒋文莉, 李庚英. 化学激发剂对钢渣体系的激发效果研究 [J]. 水科学与工程, 2018(4):12-15.  
WANG Ruilan, JIANG Wenli, LI Gengying. Study on the excitation effect of chemical activator on steel slag system [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2018(4):12-15. (in Chinese)
- [12] HAN F H, ZHANG Z Q, WANG D M, et al. Hydration heat evolution and kinetics of blended cement containing steel slag at different temperatures [J]. Thermochemica Acta, 2015, 605: 43-51.
- [13] 武伟娟, 刘家祥, 齐立倩, 等. 钢渣-水泥复合胶凝材料的水化放热和动力学研究 [J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2016, 43(4):40-45.  
WU Weijuan, LIU Jiaxiang, QI Liqian, et al. Study of hydration exotherms and kinetics of steel slag-cement composite binder [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2016, 43(4):40-45. (in Chinese)
- [14] YANG S G, WANG J F, CUI S P, et al. Impact of four kinds of alkanolamines on hydration of steel slag-blended cementitious materials [J]. Construction and Building Materials, 2017, 131:655-666.
- [15] 吴发红, 王毓, 张长森, 等. 激发剂对钢渣胶凝活性及微观结构的影响 [J]. 混凝土, 2019, 12:99-102.  
WU Fahong, WANG Yu, ZHANG Changsen, et al. Effect of activator on gelling activity and microstructure of steel slag [J]. Concrete, 2019, 12:99-102. (in Chinese)
- [16] SUN J W, CHEN Z H. Effect of silicate modulus of water glass on the hydration of alkali-activated converter steel slag [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019, 138: 47-56.
- [17] ZHOU H H, WU X Q, XU Z Z, et al. Kinetic study on hydration of slag-activated slag [J]. Cement and Concrete Research, 1993, 23(6):1253-1258.
- [18] 吴学权. 矿渣水泥水化动力学研究 [J]. 硅酸盐学报, 1988, 16(5):423-429.  
WU Xuequan. Kinetic study on hydration of blast furnace slag cement [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1988, 16(5):423-429. (in Chinese)
- [19] 徐冠立, 孙遥, 林金辉. 含钡硫铝酸盐水泥的水化动力学与热力学研究 [J]. 材料导报, 2013, 27(6):126-130.  
XU Guanli, SUN Yao, LIN Jinhui. Study on kinetics and thermodynamics of hydration of Ba-bearing sulphoaluminate cement [J]. Materials Reports, 2013, 27(6):126-130. (in Chinese)
- [20] 柴倩, 张耀君, 刘礼才. 化学激发硅灰强化钢渣基胶凝材料的微观结构及力学性能 [J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(9): 2354-2359.  
CHAI Qian, ZHANG Yaojun, LIU Licai. Microstructure and mechanical properties of chemical-activated steel slag-based cementitious material reinforced by silica fume [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(9):2354-2359. (in Chinese)
- [21] 关少波. 钢渣粉活性与胶凝性及其混凝土性能的研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.  
GUAN Shaobo. Research on active and cementitious capacity of steel-making slag and its concrete properties [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [22] SHI C J, QIAN J S. High performance cementing materials from industrial slags - A review [J]. Resource, Conservation and Recycling, 2000, 29(3):195-207.