

不同养护条件下 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 对钢渣微粉胶凝性能的影响

李悦, 龙世儒, 林辉

(北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 为了消除钢渣微粉 (steel slag, SS) 中的游离氧化钙和氧化铁, 激发 SS 的胶凝性能, 以 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 为激发剂对 SS 进行活性激发, 研究了不同养护条件下, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 掺量对其激发 SS 浆体工作性能、体积稳定性、力学性能的影响规律, 结合 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 和扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 分析探讨了 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 激发 SS 反应产物的种类及微观结构。结果表明: 随 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)/m(\text{SS})$ 的增加, 浆体的凝结时间延长; 室温养护条件下, $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)/m(\text{SS}) > 0.2$ 时, 浆体会发生膨胀, 当 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)/m(\text{SS}) = 0.6$ 时, 膨胀率约 40%。加压养护可以有效避免浆体的膨胀, 在室温环境下, 试样 28 d 的抗压强度可达 5.5 MPa, 快速养护对硬化浆体的抗压强度影响不大。XRD 和 SEM 分析结果显示: SS 经 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 激发后, 所得反应产物主要为 $\text{Ca}(\text{NH}_4)_2(\text{HPO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 和 FePO_4 ; 加压养护使反应产物填充于狭小微观空间里, 增加基体密实度。

关键词: 钢渣; $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$; 膨胀; 加压养护; 抗压强度; 反应产物

中图分类号: TQ 172.4⁺4

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2023)07-0769-07

doi: 10.11936/bjtxb2022010006

Effect of $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ on the Cementitious Properties of Steel Slag Powder Under Different Curing Conditions

LI Yue, LONG Shiru, LIN Hui

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In this investigation, steel slag (SS) was activated by using $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ as an activator to eliminate free calcium oxide and iron oxide in SS powder and to excite the cementitious properties of SS. The effects of $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ content on the working performance, volume stability and mechanical properties of SS slurry activated by $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ under different curing conditions were studied. The types and microstructure of reaction products of SS activated by $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ were characterized by XRD and SEM. Results show that the setting time of slurry prolonged with the increase of the mass ratio of $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ to SS. Slurry will expand under room temperature curing conditions, when the mass ratio of $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ to SS is greater than 0.2, and the expansion rate reaches about 40% when the mass ratio is 0.6. The expansion of slurry can be effectively avoided using pressure curing. The compressive strength of the sample after 28 days reaches 5.6 MPa at room temperature while rapid curing has little effect on the compressive strength of hardened slurry. XRD and SEM results show that the reaction products of SS

收稿日期: 2022-01-10; 修回日期: 2022-07-07

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(8202005); 国家自然科学基金资助项目(52078015)

作者简介: 李悦(1972—), 男, 教授, 主要从事新型建筑材料方面的研究, E-mail: liyue@bjut.edu.cn

通信作者: 林辉(1989—), 男, 讲师, 主要从事新型建筑材料方面的研究, E-mail: linhui5290@bjut.edu.cn

activated by $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ were mainly $\text{Ca}(\text{NH}_4)_2(\text{HPO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ and FePO_4 . The reaction products fill in a narrow micro space and the density of the matrix increases under pressure curing.

Key words: steel slag (SS); $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$; expansion; pressure curing; compressive strength; reaction products

钢渣是钢铁冶炼过程中产生的废渣。我国每年钢渣产量约为 1.2 亿 t, 当前累计堆存量超 18 亿 t, 大量堆积的钢渣不仅占用了土地资源, 且长期堆放的钢渣中重金属的浸出对土壤、河流等生态环境造成了严重破坏^[1]。研究表明, 钢渣的矿物成分与水泥熟料及高炉矿渣相似, 主要包含硅酸二钙 ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, C_2S)、硅酸三钙 ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, C_3S)、铝酸三钙 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, C_3A)、铁酸二钙 ($2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, C_2F)、铁铝酸钙 ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, C_4AF) 和游离氧化钙 (free-CaO, f-CaO) 等, 具有一定的胶凝活性^[2-4]。同时, 不同地区的钢渣矿物组成波动较大, 且由于易磨性差、水化慢、早强低、稳定性差、f-CaO 含量高等因素的影响, 其附加值利用率较低^[5-6]。

目前, 钢渣主要用于道路填充材料^[7-8]。以钢渣作为辅助胶凝材料在水泥基材料中的应用也有较多研究, 取得很多进展^[9], 但仍存在一些问题。由于钢渣中 C_2S 和 C_3S 含量少、胶凝活性较低、水化速度较慢, 因此, 作为辅助胶凝材料时会引起水泥混凝土制品的凝结时间较长、早期强度偏低^[10]。钢渣中的 f-CaO 和方镁石可能会导致水泥基材料安定性不良^[11]。有学者基于碱激发原理, 提出采用钢渣和矿渣复合制备少(无)熟料钢渣-矿渣水泥^[12-13]。但碱激发钢渣胶凝材料在实际工程中并未得到广泛的应用, 且当钢渣矿渣水泥中添加大量激发剂时, 虽然能提高水泥基材料力学性能, 但会对耐久性带来不利影响^[14]。针对上述问题, Huo 等^[15-16]以磷酸 + 无水乙醇为激发剂, 对钢渣进行改性, 使得酸性环境下钢渣中 f-CaO 含量明显

降低, 钢渣浆体的安定性问题得到改善, 同时早期力学性能大幅度提高, 但钢渣浆体 28 d 抗压强度会随磷酸用量的增加而降低。

此外, 国外有学者使用正磷酸溶液和磷酸二氢钾激发含大量游离石灰的高钙粉煤灰, 经磷酸溶液激发后浆体的产物中有结晶磷酸钙等物且抗压强度较高, 而由于磷酸二氢钾溶解度较低, 故经其激发后的浆体中未检测到磷酸钙晶体且强度较低^[17]。Sassoni 等^[18]以磷酸氢二铵溶液分别固化消石灰、天然水硬性石灰和水泥的砂浆, 结果表明所有类型的砂浆中都出现了磷酸钙相, 新的磷酸钙相使试样表现出更高的机械性能^[18]。由此可见, 采用磷酸盐激发含氧化钙的原料可以得到机械性能较好的试样, 为了消除钢渣微粉 (steel slag, SS) 中的 f-CaO, 实现钢渣高附加值的资源化利用, 本文以 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 为激发剂对 SS 进行活性激发, 主要研究了不同养护条件下, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 掺量对其激发 SS 浆体工作性能、力学性能和体积稳定性的影响规律, 并结合 XRD 和 SEM 分析探讨了 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 与 SS 之间的相互作用机制。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

所用钢渣来自郑州某钢厂, 细度为 80 目, 其化学组成见表 1。钢渣的 XRD 分析如图 1 所示, 可以看出钢渣的主要矿物成分为 C_2S 、 C_3S 、RO 相 (由 FeO 、 MgO 和 MnO 形成的固熔体)、 $\text{Ca}_2\text{Fe}_9\text{O}_{13}$ 、 C_2F 、f-CaO 和 Fe_3O_4 。所用 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 为分析纯, 纯度为 99.0%。

表 1 钢渣微粉的化学组成

Table 1 Chemical composition of steel slag powder

$w(\text{CaO})$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{MnO})$	$w(\text{MgO})$	$w(\text{其他})$
30.98	27.24	22.73	7.48	5.04	2.83	3.70

1.2 试样制备及养护

选用新拌浆体的流动度作为控制指标来调节用水量。控制每组浆体的扩展度为 (180 ± 5) mm 时的各组试样配合比, 见表 2。其中 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 掺

量为 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 占总固体 ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 和 SS) 的质量分数, SS 掺量为 SS 占总固体的质量分数。加水搅拌之前先将 SS 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 混合均匀。由于 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 激发 SS 浆体的反应速度较快, 凝结时间

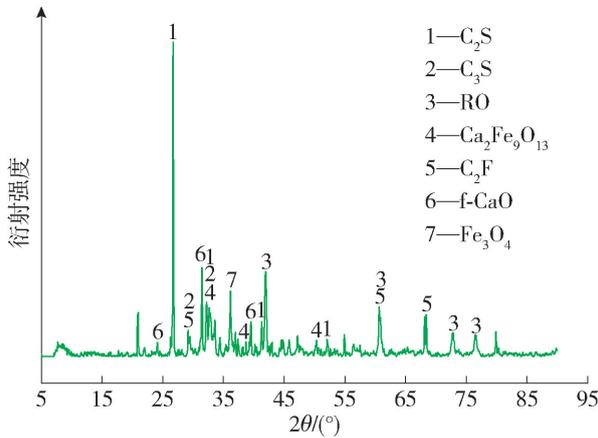


图1 钢渣微粉的XRD图谱

Fig. 1 XRD spectrum of steel slag powder

很短,因此加水后先低速搅拌 30 s,然后高速搅拌

表2 试样制备配合比

Table 2 Mix proportion of sample

试样编号	$w(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)/\%$	$w(\text{SS})/\%$	$m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)/m(\text{SS})$	$m(\text{H}_2\text{O})/m(\text{固体})^{①}$
A0 A1 A2	16.7	83.3	0.2	0.31
B0 B1 B2	28.6	71.4	0.4	0.27
C0 C1 C2	37.5	62.5	0.6	0.25

① $m(\text{H}_2\text{O})/m(\text{固体})$ 中的固体质量指的是 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 和SS的质量和。

1.3 测试方法

1.3.1 宏观性能测试方法

$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 激发SS浆体的流动度参照GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法》进行测试,本次试验使用上口直径65 mm、下口直径75 mm、高度40 mm的截锥圆模代替标准圆锥试模。浆体凝结时间参照GB/T 1346—2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》给出的方法进行试验。膨胀性测试是将浆体筑入口径为38 mm、体积为250 mL的量筒中用保鲜膜密封,垂直方向无约束的条件下记录5、10、20、30、60 min共5个时间点量筒中浆体体积的变化,根据体积变化表征浆体膨胀性。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,分别测试3 d和28 d立方体试块的抗压强度,每组配比测试3个试样,取平均值作为该配比试样抗压强度的最终结果。

1.3.2 微观性能测试方法

1) 采用PANalytical Axios型X射线荧光分析仪测试钢渣微粉的化学成分。

2) 采用BRUKER D8 ADVANCE X射线衍射仪对钢渣微粉及 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 激发SS硬化浆体粉末进

30 s,搅拌完毕后迅速将浆体浇筑到40 mm × 40 mm × 40 mm的塑料模具中,振动2 min后采用保鲜膜将其包裹,进行养护。由于无约束情况下, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 和SS的质量比大于0.2时浆体会发生膨胀。因此,采用加压方式对浆体进行养护,即在模具上方放置质量为10 kg的配重块,将部分浆体置于室温环境(温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度为 $60\% \pm 5\%$)进行养护,其余浆体采取两阶段快速养护(在 40°C 下养护24 h之后,在 70°C 下继续养护24 h,相对湿度均为 $85\% \pm 5\%$)。随后脱模试样置于室温环境中继续养护至设定龄期,进行抗压强度测试。其中,采用未加压养护试样编号为A0、B0、C0,采用加压室温养护的试样编号为A1、B1、C1,采用加压快速养护的试样编号为A2、B2、C2。

行XRD测试。测试样品制备时,将养护至规定龄期的 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 激发SS浆体用酒精浸泡从而终止水化,随后研磨成粉并过200目筛,将过筛后的样品在 60°C 真空干燥箱中干燥24 h后进行测试。测试过程中,入射靶CuK α 的波长设置为 $\lambda = 0.154 \text{ nm}$,X射线管的电压为40 kV,电流为30 mA,数据收集的衍射角 2θ 范围为 $5^\circ \sim 80^\circ$,测试结果采用Jade软件分析。

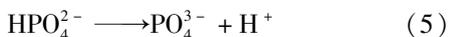
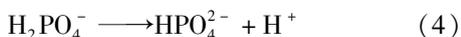
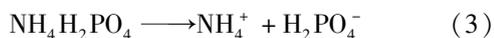
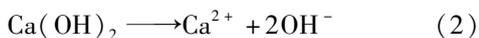
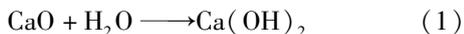
3) 采用日立S-3400NSEM对 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 激发SS硬化浆体的微观形貌进行测试。测试样品制备时,将养护至规定龄期的 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 激发SS浆体用酒精浸泡从而终止水化,随后使用环氧树脂浸渍,待树脂固化后将样品在 60°C 真空干燥箱中干燥24 h后,用导电胶粘贴到样品台上,经过E-1010型离子溅射仪进行喷金处理后测试。

2 试验结果与分析

2.1 凝结时间

图2为SS经 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 激发后浆体的凝结时间。由图可知,随 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)/m(\text{SS})$ 增加,浆体的凝结时间逐渐延长。 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)/m(\text{SS})$ 对3

组浆体的初凝时间影响较小,各浆体均在5~12 min发生初凝;但随 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)/m(\text{SS})$ 的增加,3组浆体的终凝时间发生了明显变化,从14 min(试样A0)延长到70 min(试样C0)。引起上述现象的主要原因是随 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)/m(\text{SS})$ 增加,浆体用水量减少,导致 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 电离出的 H^+ 粒子数和SS中CaO水解产生的 OH^- 粒子数减少,进而导致浆体的凝结时间随 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)/m(\text{SS})$ 增加而延长。而 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)/m(\text{SS})$ 对各浆体初凝时间影响较小的主要原因是SS中的CaO与水反应生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 会和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 发生酸碱中和反应,方程式为



反应速率较快,且释放出大量热量,从而导致浆体初凝时间短^[19-20]。终凝时间相对较长的主要原因是随着反应的进行,反应模式逐渐由化学反应转变为扩散反应,进而导致浆体的终凝时间明显延长。

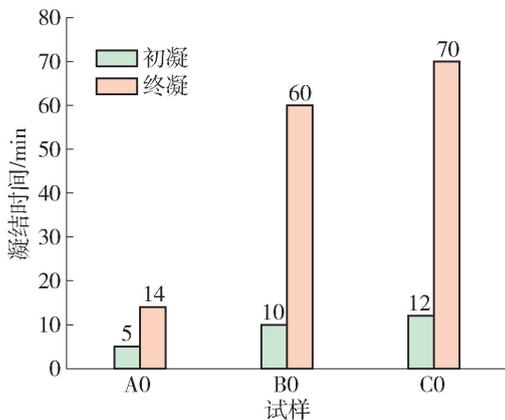


图2 试样的初凝时间和终凝时间

Fig. 2 Initial setting time and final setting time of samples

2.2 膨胀性

图3为 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 激发SS浆体在250 mL量筒中的体积变化规律。由图可知,当 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)/m(\text{SS}) = 0.2$ 时,浆体体积稳定,未出现膨胀现象。随 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)/m(\text{SS})$ 的进一步增大,各浆体发生明显膨胀,在反应30 min后,各浆体体积趋于稳

定。此时,与试样A0相比,试样B0、C0的体积膨胀率为40%左右。引起上述现象的主要原因是,当 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)/m(\text{SS})$ 较小时,反应产生的 NH_3 较少,由于反应速率较快,故试样A0产生的 NH_3 在拌和过程中会完全释放,而随 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)/m(\text{SS})$ 增大,浆体搅拌完毕注入玻璃量筒后会进一步反应,并伴随着 NH_3 释放,进而导致试样B0、C0在量筒中发生膨胀^[21-22]。

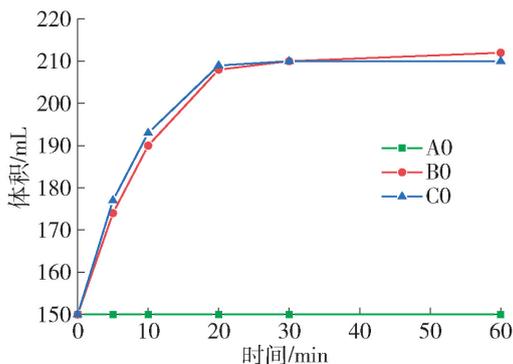


图3 试样的体积膨胀

Fig. 3 Volume expansion of samples

2.3 抗压强度

图4为 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 激发SS浆体3 d和28 d的抗压强度。由图可知,在2种养护方式下,试样的3 d抗压强度变化不大,28 d抗压强度均随 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)/m(\text{SS})$ 增加而降低,且与室温养护相比,快速养护对试样抗压强度的影响不大。由此可见,固液比的降低并未使基体抗压强度得到改善。 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 与SS之间的反应主要以酸碱中和为主,基体抗压强度的发展主要取决于体系中 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 电离出 H^+ 粒子数和SS中碱性氧化物水解产生的 OH^- 粒子数。在

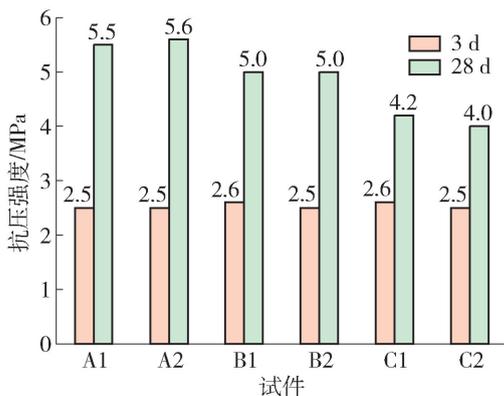


图4 不同养护方式下试样的3 d和28 d抗压强度

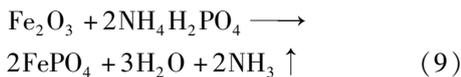
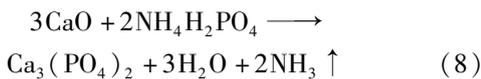
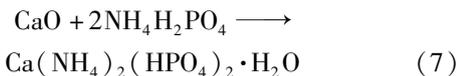
Fig. 4 Compressive strength of samples after 3 days and 28 days, respectively, under different curing methods

以浆体流动度为控制指标时,随 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)/m(\text{SS})$ 的增加,浆体达到相同流动度时所需水量减少,从而使 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 电离出的 H^+ 粒子数和 SS 中碱性氧化物水解产生 OH^- 粒子数减少,进而导致基体的 28 d 抗压强度随 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)/m(\text{SS})$ 的增加而降低^[23]。

由上述结果可以看出,试样 A0 凝结硬化过快,并且抗压强度与试样 B1 相差不大。此外,快速养护对 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 激发 SS 浆体的抗压强度影响也不大(如图 4 中试样 B1、B2 的 28 d 抗压强度)。因此,在综合考虑经济性、施工性能和力学性能的基础上,选择试样 B1 进行 XRD 和 SEM 测试,探究室温加压养护条件下 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 对 SS 的激发反应机制。

2.4 XRD 分析

图 5 为 SS 和试样 B1 在 28 d 的 XRD 图谱。从图中可以看出,原材料 SS 中主要的矿物相有 C_2S 、 C_3S 、RO 相、 $\text{Ca}_2\text{Fe}_9\text{O}_{13}$ 、 C_2F 、f-CaO 和 Fe_3O_4 , 试样 B1 在 28 d 的 XRD 图谱中新生成了 $\text{Ca}(\text{NH}_4)_2(\text{HPO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 和 FePO_4 的衍射峰。对比发现,经 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 激发后, $2\theta = 27.0^\circ$ 处 C_2S 的衍射峰、 $2\theta = 36.0^\circ$ 时 Fe_3O_4 的衍射峰、 $2\theta = 68.0^\circ$ 时 C_2F 的衍射峰强度变得非常弱, $2\theta = 31.5^\circ$ 时 f-CaO 的衍射峰消失。上述结果说明经 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 激发后, SS 中的 C_2S 、 C_2F 、 Fe_3O_4 和 f-CaO 与 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 发生反应,反应方程式为



此外,还可以看出:XRD 图谱中 RO 相的衍射峰强度变化不大,其主要原因是 RO 为无活性相,不易被 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 激发^[16]。

2.5 SEM 分析

为探究养护过程中压力作用对 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 激发 SS 反应产物微观形貌的影响,选择未加压养护试样 B0 和加压室温养护试样 B1 进行 SEM 测试,结果如图 6 所示。从图中可以看出,未加压试样在 3 d 时基体中以排列无序的针棒状物质为主,结构疏松;加压试样在 3 d 时孔隙被反应产物填充,基体较密实^[24]。在 28 d 时,未加压试样的反应产

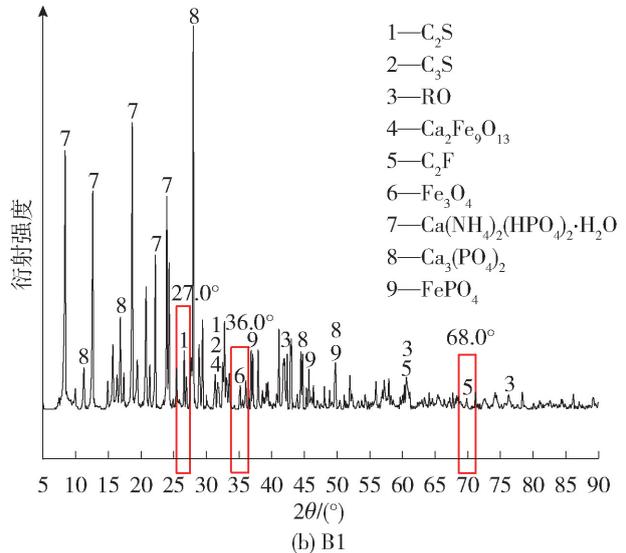
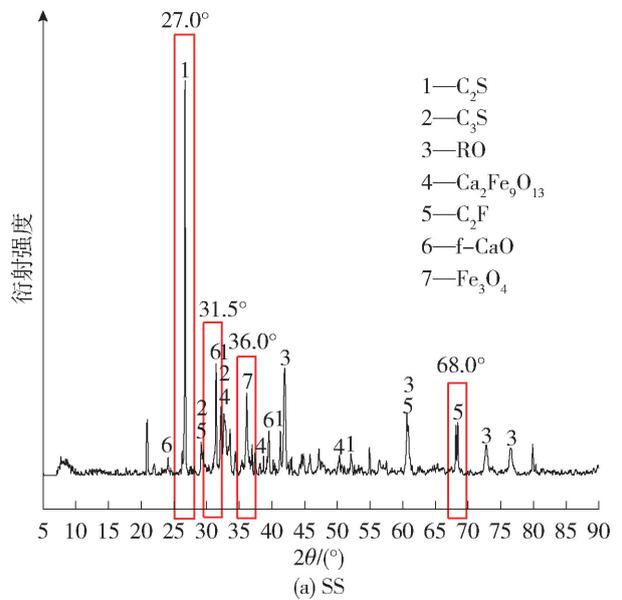


图 5 SS 和试样 B1 在 28 d 的 XRD 图谱
Fig. 5 XRD spectrum of SS and sample B1 after 28 days

物以疏松的层片状为主,而加压条件下试样的基体更加密实,未观察到明显层片状的反应产物。由上述结果可知,加压养护可使 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 激发 SS 反应产物填充于狭小微观空间里,增加基体密实度。

综上所述, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 激发 SS 浆体凝结硬化快,室温养护条件下浆体具有膨胀性且硬化浆体具有一定强度(3 d 抗压强度达到 2.5 MPa, 28 d 抗压强度为 4.0 ~ 5.6 MPa), 该种材料可用作膨胀剂或填充料浆。该类材料应具备可调凝、早强、大流动性、膨胀、成型容易和养护简单等性能^[25]。 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 激发 SS 浆体可较好地满足上述性能的要求。

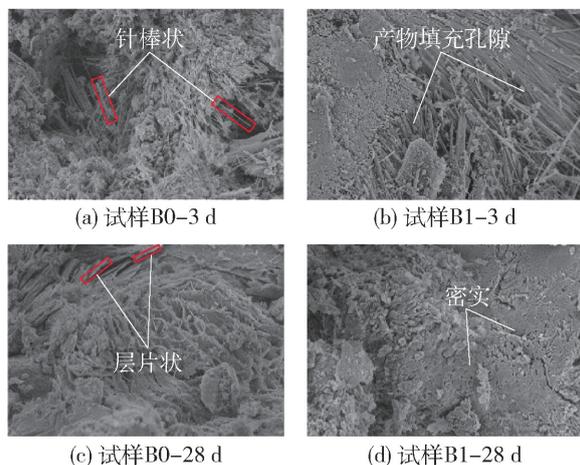


图6 试样 B0、B1 分别在 3、28 d 的 SEM 图

Fig. 6 SEM images of sample B0 and sample B1 after 3 days and 28 days, respectively

3 结论

1) 室温养护条件下,随 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)/m(\text{SS})$ 增加, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 激发 SS 浆体凝结时间延长。当 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)/m(\text{SS}) > 0.2$ 时,浆体会发生膨胀, $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)/m(\text{SS}) = 0.6$ 时,浆体的膨胀率为 40% 左右。加压养护可以有效避免浆体的膨胀,使反应产物填充于微观空间里,增加基体密实度。

2) $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)/m(\text{SS})$ 的增加会导致硬化浆体抗压强度降低,与室温加压养护相比,快速加压养护对硬化浆体的抗压强度影响不大。

3) $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 激发 SS 硬化浆体抗压强度主要源于 SS 中的 C_2S 、 C_2F 、 Fe_3O_4 、 $f\text{-CaO}$ 与 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 反应生成的 $\text{Ca}(\text{NH}_4)_2(\text{HPO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 、 FePO_4 。

参考文献:

[1] 陈平, 梁康, 赵艳荣, 等. 赤泥、电解锰渣复合激发钢渣活性的研究[J]. 混凝土, 2018(10): 67-69.
CHEN P, LIANG K, ZHAO Y R, et al. Study on activation of steel slag by red mud and electrolytic manganese slag composite[J]. Concrete, 2018(10): 67-69. (in Chinese)

[2] 张长森, 李杨, 胡志超, 等. 钠盐激发钢渣水泥的早期水化特性及动力学[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(4): 710-715.
ZHANG C S, LI Y, HU Z C, et al. Early hydration properties and kinetics of steel slag cement activated by sodium salts [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4): 710-715. (in Chinese)

[3] 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 Y, ZHANG C S, WU F H, et al. The influence of different activator on activity of steel slag and strength of cement [J]. China Concrete and Cement Products, 2018(4): 7-11. (in Chinese)

[4] 张浩, 王林, 龙红明. 基于 XRD 与 FTIR 的碱钢渣胶凝材料复合激发机理研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(7): 2302-2306.
ZHANG H, WANG L, LONG H M. Study on composite activating mechanism of alkali steel slag cementations materials by XRD and FTIR [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(7): 2302-2306. (in Chinese)

[5] 宋学锋, 崔贺龙, 杨尔康, 等. 不同养护条件下化学激发钢渣的强度与体积稳定性[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(5): 140-147.
SONG X F, CUI H L, YANG E K, et al. Strength and volume stability of chemico-activated steel slag under different curing conditions [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41(5): 140-147. (in Chinese)

[6] 邓永锋, 赵余, 刘倩雯, 等. 钢渣的硅系与复合系激发及其在软土固化中的应用[J]. 中国公路学报, 2018, 31(11): 11-20.
DENG Y F, ZHAO Y, LIU Q W, et al. Na_2SiO_4 -and cement-based activation on steel slag and its application in soft-soil stabilization [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(11): 11-20. (in Chinese)

[7] HAYASHI A, WATANABE T, KANEKO R, et al. Decrease of sulfide in enclosed coastal sea by using steelmaking slag [J]. Isij International, 2013, 53(10): 1894-1901.

[8] HAYASHI A, ASAOKA S, WATANABE T, et al. Mechanism of suppression of sulfide ion in seawater using steelmaking slag [J]. Isij International, 2014, 54(7): 1741-1748.

[9] GUO J, BAO Y, WANG M. Steel slag in China: treatment, recycling, and management [J]. Waste Management, 2018, 78: 318-330.

[10] 刘倩雯. 钢渣的成分增补和激发与再生利用效能提升 [D]. 南京: 东南大学, 2016: 5-11.
LIU Q W. Component adjustment and activation of steel slag and effectiveness enhancement of its recycling application [D]. Nanjing: Southeast University, 2016: 5-11. (in Chinese)

[11] 张浩, 张欣雨, 龙红明. 弱酸改性钢渣微粉的光谱学分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(11): 3502-3506.
ZHANG H, ZHANG X Y, LONG H M. Spectroscopic analysis of weak acid modified steel slag powder [J].

- Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38 (11): 3502-3506. (in Chinese)
- [12] 宋月, 林娜, 马彦伟, 等. 复合激发剂对钢渣-矿渣基胶凝材料性能的影响[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2019, 36(1): 24-28.
SONG Y, LIN N, MA Y W, et al. Influence of composite activator on the properties of steel slag and slag based cementing materials [J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Sciences), 2019, 36(1): 24-28. (in Chinese)
- [13] 彭小芹, 刘朝, 李三, 等. 碱激发钢渣矿渣胶凝材料凝结硬化性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(6): 47-52.
PENG X Q, LIU C, LI S, et al. Research on the setting and hardening performance of alkali-activated steel slag-slag cementitious materials [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(6): 47-52. (in Chinese)
- [14] 王磊, 李金丞, 张晓伟, 等. 地质聚合物激发剂及其激发原理[J]. 无机盐工业, 2022, 54(2): 16-20.
WANG L, LI J C, ZHANG X W, et al. Geopolymer activator and its excitation principle [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2022, 54(2): 16-20. (in Chinese)
- [15] HUO B, LI B, HUANG S, et al. Hydration and soundness properties of phosphoric acid modified steel slag powder [J/OL]. Construction and Building Materials, 2020, 254: 119319 [2022-01-05]. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119319>.
- [16] 霍彬彬, 李保亮, 罗阳林, 等. 磷酸刻蚀钢渣的形貌及其矿物特性[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(6): 591-597.
HUO B B, LI B L, LUO Y L, et al. Morphological and mineralogical characteristics of phosphoric acid etched steel slag [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(6): 591-597. (in Chinese)
- [17] MAHYAR M, ERDOĞAN S T. Phosphate-activated high-calcium fly ash acid-base cements [J]. Cement & Concrete Composites, 2015, 63: 96-103.
- [18] SASSONI E, FRANZONI E. Lime and cement mortar consolidation by ammonium phosphate[J/OL]. Construction & Building Materials, 2020, 245: 118409 [2022-01-05]. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118409>.
- [19] YU B Y, ZHOU J W, CHENG B J, et al. Compressive strength development and microstructure of magnesium phosphate cement concrete [J/OL]. Construction & Building Materials, 2021, 283: 122585 [2022-01-05]. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122585>.
- [20] ZÁRYBNICKÁ L, MACHOTOVÁ J, MÁCOVÁ P, et al. Design of polymeric binders to improve the properties of magnesium phosphate cement [J/OL]. Construction & Building Materials, 2021, 290: 123202 [2022-01-05]. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123202>.
- [21] 刘进, 吴润华, 张增起. 磷酸镁水泥性能的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(23): 23068-23075.
LIU J, GUO R H, ZHANG Z Q. Research progress of properties of magnesium phosphate cement[J]. Materials Reports, 2021, 35(23): 23068-23075. (in Chinese)
- [22] 王轶默, 吕阳, 刘卓霖, 等. 磷酸镁水泥研究进展[J]. 科技资讯, 2019, 17(2): 113-116.
WANG Y M, LÜ Y, LIU Z L, et al. Research progress of magnesium phosphate cement [J]. Science & Technology Information, 2019, 17(2): 113-116. (in Chinese)
- [23] 方旭彬, 李兆锋, 吴祥福, 等. 酸性激发剂激发钢渣替代部分水泥熟料的机理研究[J]. 混凝土, 2007(8): 49-51.
FANG X B, LI Z F, WU X F, et al. Mechanism investigation of acid exciting steel slag substituting part cement clinker[J]. Concrete, 2007(8): 49-51. (in Chinese)
- [24] 陈顺满, 王伟, 吴爱祥, 等. 养护压力对膏体充填体强度影响规律及机理分析[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(12): 3740-3749.
CHEN S M, WANG W, WU A X, et al. Influence rules of curing stress on strength of cemented paste backfill materials and its mechanism analysis [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(12): 3740-3749. (in Chinese)
- [25] 韦寒波. 低品质固废高值化制备 FS 充填胶凝材料与应用研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2021: 5-7.
WEI H B. Development and application of fly ash-slag filling cementing materials by high-value utilization of low-quality solid waste[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021: 5-7. (in Chinese)

(责任编辑 郑筱梅)