

# 碱激发对磷尾矿胶凝特性影响

王 浩, 顾炳伟, 王景正

(江苏海洋大学, 连云港 222000)

**摘要:** 为了践行低碳环保政策, 减少磷尾矿资源的堆积, 增加磷尾矿资源的合理利用。通过对碱激发磷尾矿胶凝材料的凝结时间、力学性能、组成特征、微观结构和水化热五种方法, 对其力学性能做出判断。结果表明: 碱激发对磷尾矿胶凝材料凝结时间影响与激发剂的类型密切相关。PTSC 配比比 PTSS 配比初凝时间平均减少 92 min, PTSC 配比的终凝时间随着氢氧化钠比例减少而延长, PTSS 配比的终凝时间随着碳酸钠比例减少而缩短。在复合激发条件下, 氢氧化钠与硅酸钠的复合激发效果比碳酸钠与硅酸钠的混合激发效果好, 形成的产物更丰富、结构更密实。在氢氧化钠与硅酸钠混合比例为 1:6 时效果最好。不同碱激发剂配比对磷尾矿水化热的影响变化不大, 磷尾矿极大的抑制了水化热的发生。所以碱激发可以促进磷尾矿力学性能的提升, 尤其在使用硅酸钠和氢氧化钠混合激发时尤为明显。研究结果可为相关应用提供参考。

**关键词:** 磷尾矿; 碱激发; 微观结构; 水化; 胶凝性能

**中图分类号:** TU526 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 02-0021-08

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.02.004

## Influence of Alkali Activation on the Gelling Properties of Phosphorus Tailings

WANG Hao, GU Bingwei, WANG Jingzheng

(Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222000, China)

**Abstract:** In order to implement the low-carbon and environmental protection policy, reduce the accumulation of phosphorus tailings resources and increase the rational utilization of phosphorus tailings resources, this paper judges the mechanical properties of alkali-activated phosphorus tailings cementitious materials through five methods: setting time, mechanical properties, composition characteristics, microstructure and hydration heat. The results show that the effect of alkali activation on the setting time of phosphorus tailings cementitious materials is closely related to the type of activator. The initial setting time of the PTSC ratio is on average 92 minutes shorter than that of the PTSS ratio. The final setting time of the PTSC ratio is prolonged with the decrease of the sodium hydroxide ratio, while the final setting time of the PTSS ratio is shortened with the decrease of the sodium carbonate ratio. Under the condition of composite activation, the composite activation effect of sodium hydroxide and sodium silicate is better than that of sodium carbonate and sodium silicate, and the formed products are more abundant and the structure is more compact. The best effect is achieved when the mixed ratio of sodium hydroxide and sodium silicate is 1:6. The influence of different alkali activator ratios on the hydration heat of phosphorus tailings is not significant, and phosphorus tailings greatly inhibit the occurrence of hydration heat. Therefore, alkali activation can promote the improvement of the mechanical properties of phosphorus tailings, especially when sodium silicate and sodium hydroxide are used. Research

作者简介: 王 浩 (2000—), 男, 硕士, 研究方向: 碱激发材料。

通信作者: 顾炳伟 (1966—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 碱激发材料、超高性能混凝土。

收稿日期: 2025-04-18

## 材料科学

findings can provide references for related applications.

**Key words:** phosphate tailings; alkali activation; microstructure; hydration; cementing performance

### 0 引言

在过去的几十年里,工业化发展对矿物资源需求的增加,使得矿山尾矿的容量大大增加。尾矿通常存放在尾矿存储设施中<sup>[1]</sup>,尾矿处理具有高潜在能量和污染的特点<sup>[2]</sup>。尾矿给环境带来了各种挑战,造成了土壤侵蚀、空气质量恶化、水污染、动植物损伤等问题,使其成为了重要的公共危害之一<sup>[3-4]</sup>。

目前,许多学者对尾矿的各种应用进行了探索。朱秀雯等<sup>[5]</sup>利用磷尾矿中含有植物生长所需元素,用于制肥与土壤保水剂等,实现磷尾矿在农业方面的资源利用;Luan等<sup>[6]</sup>利用建筑和拆除碎片的回收混凝土粉末和铁矿石尾矿砂,通过一定比例的机械研磨和九水偏硅酸钠活化,以替代水泥和天然砂,结果表明,这些材料的加入可以显著改善其机械性能,且降低了流动性。这说明,尾矿可以作为一种代替水泥的材料,在混凝土中加入部分尾矿可以改善混凝土的力学性能,提高混凝土的耐久性。Huang等<sup>[7-8]</sup>通过Ca(OH)<sub>2</sub>、CaSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O和CaCO<sub>3</sub>为矿物添加剂,NaOH和液体硅酸钠为激发剂,制备碱激发材料,研究了用于高钙添加剂对制备工艺及抗压强度的影响。结果表明,高钙添加剂能够显著提升材料的力学性能,这说明磷尾矿作为碱激发材料是可行的。Jiang等<sup>[9]</sup>探讨了4种不同细度磷尾矿对水泥凝结时间和力学强度等影响。结果表明磷尾矿细度降低对水泥凝结时间有负面影响,但对后期水化强度性能有正面影响。该研究提供了另一种增强磷尾矿活性的办法,通过机械激活来增强力学性能<sup>[10-11]</sup>。由于尾矿利用的工艺复杂、成本高、收益低等问题,连云港地区至今仍有大量的磷尾矿未能得到充分利用而被堆弃<sup>[12-13]</sup>。不仅造成资源浪费,也污染环境。目前对于磷尾矿的研究较少,一个重要原因是其活性较低,一般工程中仅作为惰性填充料使用<sup>[14-15]</sup>。

因此,应该寻求新的提高磷尾矿活性的办法,减少资源堆积以及环境污染。在前人研究基础上,拟通过机械活化、碱激发手段,以强度为控制指标,

采用单因素分析法,分析各类激发剂的种类、掺量对强度目标值敏感性以及影响趋势,以期获得碱激发磷尾矿胶凝材料最佳配比,为工程应用提供参考。

### 1 试验

#### 1.1 试验原料

磷尾矿:其化学组成见表1。其矿物成分经XRD检测主要为白云石、方解石,其次为石英及白云母,含少量的磷灰石及选矿加入的碳酸钠等。颗粒级配呈现单峰的特征,粒级范围在1.04~716.80 μm之间,平均粒径:199.9 μm,中位粒径:178.8 μm,粒径众数:185.4 μm,属于细砂粒级。其中粒径d≥0.05 mm颗粒含量达95.96%,粒径d≤0.005 mm的黏粒含量不足0.60%。磷尾矿中的颗粒形态呈现菱面体形状、不规则状及片状等。

表1 磷尾矿化学组成  
Table 1 Chemical composition of phosphorus tailings /%

组成	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	LOI
含量	13.2	26.3	15.0	2.03	1.90	0.72	0.17	33.57

硅酸钠:由无水硅酸钠粉末(SiO<sub>2</sub>:47.5%,Na<sub>2</sub>O:50%)、2.0模硅酸钠粉末(SiO<sub>2</sub>:53.52%,Na<sub>2</sub>O:26.75%)、3.0模硅酸钠粉末(SiO<sub>2</sub>:62.15%,Na<sub>2</sub>O:21.43%)分别配制而成。

氢氧化钠:市售10%氢氧化钠标准溶液。

碳酸钠:市售无水碳酸钠分析纯粉末。

#### 1.2 试验原料处理

使用磷尾矿前,需将磷尾矿砂过1 mm筛,除去其中的杂质备用;使用磷尾矿粉末前,需将磷尾矿砂在105℃烘箱烘干24 h后,放入球磨机研磨40 min后使用。

硅酸钠:按照设计的模数与掺量,称取不同种类、不同质量的硅酸钠粉末与水加热并充分搅拌使其完全溶解,冷却至室温备用。

氢氧化钠、碳酸钠:按照设计的浓度,分别称取氢氧化钠、碳酸钠粉末,加水充分搅拌溶解,冷却至室温备用。

采用复合激发时,将预配的硅酸钠与复掺的激发剂溶液混合后充分搅拌均匀,用保鲜膜密封后静

置 24 h 后使用。

### 1.3 试验配比设计

单独采用硅酸钠激发时, 硅酸钠的模数设定为 1.5、2.0、2.5, 掺量分别设计为 4%、6%、8%、10% (以激发剂总量占胶凝材料质量百分比计), 液固比分别为 0.31、0.33、0.35、0.37; 采用硅酸钠与氢氧化钠、碳酸钠进行复合激发时, 在确定的最佳硅酸钠掺量的基础上复掺不同比例的氢氧化钠、碳酸钠。具体试验材料配比见表 2、3、4。

表 2 硅酸钠溶液的配合比  
Table 2 Mixing ratio of sodium silicate solution

名称	硅酸钠模数	硅酸钠掺量/%	液固比
PTS-1.5	1.5	4	0.31
	1.5	6	0.33
	1.5	8	0.35
	1.5	10	0.37
PTS-2.0	2.0	4	0.31
	2.0	6	0.33
	2.0	8	0.35
	2.0	10	0.37
PTS-2.5	2.5	4	0.31
	2.5	6	0.33
	2.5	8	0.35
	2.5	10	0.37

表 3 硅酸钠与氢氧化钠溶液的配合比

Table 3 Proportion of sodium silicate and sodium hydroxide solution

名称	氢氧化钠与硅酸钠比例	液固比
PTSC2-1	1:3	0.30
PTSC2-2	1:6	0.30
PTSC2-3	3:20	0.31
PTSC2-4	1:10	0.31
PTSC2-5	1:15	0.31

表 4 硅酸钠与碳酸钠溶液的配合比

Table 4 Proportion of silicate and sodium carbonate solution

名称	碳酸钠与硅酸钠比例	液固比
PTSS2-1	1:3	0.30
PTSS2-2	1:6	0.30
PTSS2-3	3:20	0.31
PTSS2-4	1:10	0.31
PTSS2-5	1:15	0.31

### 1.4 试样制备

称取足量磷尾矿, 与碱激发剂溶液一起放入搅拌锅中, 先慢搅 4 min, 中间停 15 s, 然后快搅 1 min, 搅拌结束后在试模中成型试件并养护到规定龄期。

### 1.5 试样检测

物相检测: 采用日本理学 Smartlab9 的 X 射线衍射仪测定。测试条件为 Cu 靶, 40 kV 电压, 40 mA 电流, 连续扫描, 10  $\mu\text{m}/\text{min}$  扫描速度, 5 ~ 70  $\mu\text{m}$

扫描范围。

微区组成与形貌分析: 采用 Zeiss Gemini 300 扫描电子显微镜对磷尾矿胶凝材料的微观结构进行了分析。

凝结时间测定: 根据 GB/T 1346—2011《水泥标准稠度用水量凝结时间稳定性试验方法》, 测定不同碱激发剂配比下磷尾矿碱激发复合胶凝材料初终凝结时间。

抗压强度测定: 根据 JTG 3430—2020《公路土工试验规程》, 测定了磷尾矿碱激发胶复合胶凝材料的抗压强度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 硅酸钠模数与掺量对磷尾矿激发效果分析

由图 1 可知, 使用 PTS-1.5 硅酸钠溶液在最低掺量下的强度为 28.5 kPa。随着 PTS-1.5 溶液掺量增加, 强度先增加后减少, 在掺量为 6% 时强度最高, 强度为 30 kPa。使用 PTS-2 硅酸钠溶液在最低掺量下的强度为 38 kPa。随着 PTS-2 溶液掺量增加, 强度先增加后减少, 在掺量为 10% 时强度最高, 强度为 45.8 kPa。使用 PTS-2.5 硅酸钠溶液在最低掺量下的强度为 36 kPa。随着 PTS-2.5 硅酸钠溶液掺量增加, 强度先增加后减少, 在掺量为 6% 时强度最高, 强度为 44.8 kPa。上述研究结果表明, 硅酸钠对于磷尾矿粉末有一定的激发作用, 随着碱激发剂掺量增加, 强度都呈现先增加后减少的趋势。通过对三种模数的硅酸钠激发效果比较可知, 模数为 2、掺量为 20% 时激发效果最好。分析其原因, 当  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  的摩尔比在 30 ~ 55 时, 如图 2 所示, 会促进 N-A-S (H) 和 C-A-S (H) 凝胶相的生成, 反应过程中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  等离子和  $\text{H}_2\text{O}$  被不断消耗, 浆液会变得黏稠, 从而  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  和  $[\text{AlO}_4]^{5-}$  会得到更加直接的接触, 使得材料强度变高。因此, 在这个配合比下, 因为反应体系中  $\text{SiO}_2$  质量分数与  $\text{Na}_2\text{O}$  质量分数之比适中, 碱激发剂溶液提供的  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  四面体, 有利于胶凝材料的聚合反应。

虽然单一硅酸钠对磷尾矿粉末有一定的激发作用, 但总体激发效果相对较差, 尚难满足工程需要。因此考虑采用复合激发剂激发。

## 材料科学

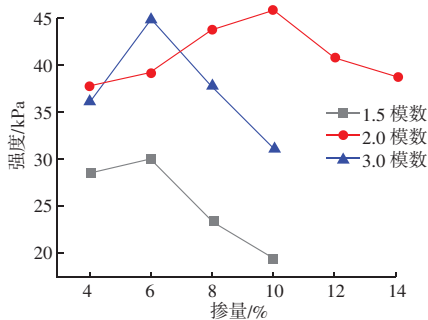


图1 不同模数的硅酸钠溶液激发磷尾矿砂抗压强度

Fig. 1 Compressive strength of phosphor tailings sand activated by sodium silicate solutions of different moduli

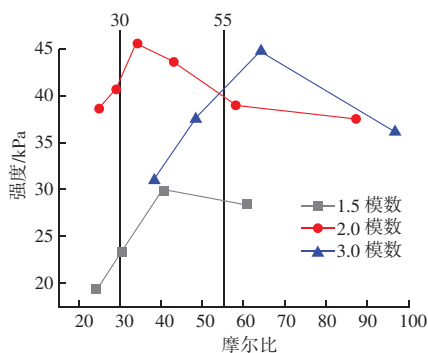
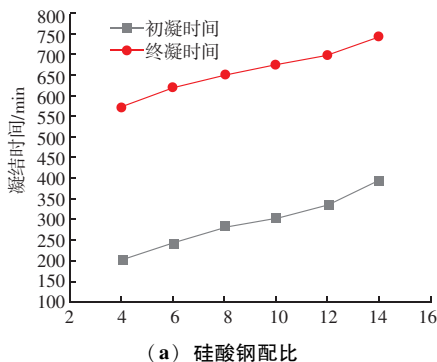


图2 摩尔比对材料强度影响

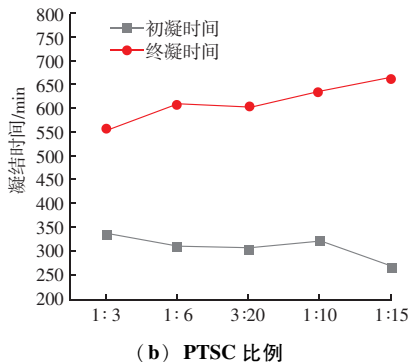
Fig. 2 Effect of molar ratio on material strength

## 2.2 不同碱激发对比对磷尾矿胶凝材料凝结时间影响

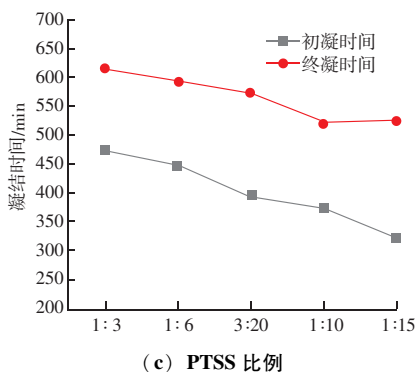
由图3(a)可知,在硅酸钠激发下的磷尾矿胶凝材料的初、终凝时间均会随着硅酸钠的掺量增加而增加。由图3(b)可知,在硅酸钠与氢氧化钠激发下的磷尾矿胶凝材料的凝结时间会随着氢氧化钠含量的减少,初凝时间变短,终凝时间会延长。由图3(c)可知,在硅酸钠与碳酸钠激发下的磷尾矿胶凝材料的凝结时间会随着碳酸钠含量的减少,初凝、终凝时间会减少。通过三组激发剂的激发效果对比可知,碳酸钠会延长磷尾矿胶凝材料的初凝时间,其原因可能是在凝结过程中产生的 $\text{CO}_2$ 对胶凝材料的凝结起到了延长作用;而氢氧化钠则会缩短



(a) 硅酸钠配比



(b) PTSC 比例



(c) PTSS 比例

图3 不同碱激发对比对初终凝时间的影响

Fig. 3 Effect of different alkali activation mixratios on initial and final setting time

磷尾矿胶凝材料的凝结时间。PTSC 与 PTSS 两组初凝时间对比,PTSC 组平均减少 92 min,但 PTSC 组对比 PTSS 组终凝时间明显延长,说明 NaOH 对于终凝时间具有延长作用。因此,碱激发对磷尾矿胶凝材料凝结时间的影响与采用的激发剂有关。

## 2.3 不同碱激发对比对磷尾矿胶凝材料强度的影响

## 2.3.1 氢氧化钠与硅酸钠复合激发体系对比对磷尾矿胶凝材料强度的影响

由图4可知,7 d时,随着激发剂中氢氧化钠与硅酸钠比例减小,磷尾矿胶凝材料的抗压强度曲线呈现凹型特征;而28 d时,则呈现相反的特征。分析其原因:在硅酸钠对磷尾矿胶凝材料抗压强度的影响主要发生在早期,而氢氧化钠相较于硅酸钠对抗压强度的影响较晚。

由图5可知,在相同养护条件下,7 d时 PTSC2-5 试样表面干燥,试件强度较高,显示其反应较充分;而 PTSC2-1 试件表面湿润且出现微孔,显示氢氧化钠对磷尾矿胶凝材料反应较缓慢,且在此过程中不断产生 $\text{H}_2$ ,产生影响强度的孔洞。这可能是由于氢氧化钠与磷尾矿中的石英反应形成氢气所致。

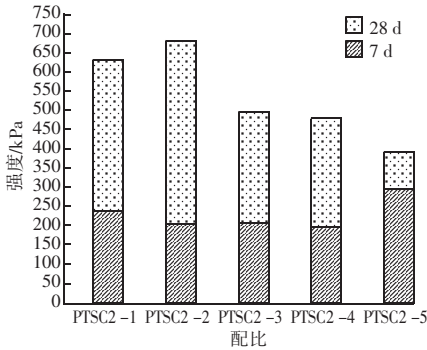


图4 PTSC 配比对磷尾矿粉末复合激发抗压强度  
Fig. 4 PTSC proportioning to synergistically enhance the compressive strength of phosphorus tailings powder

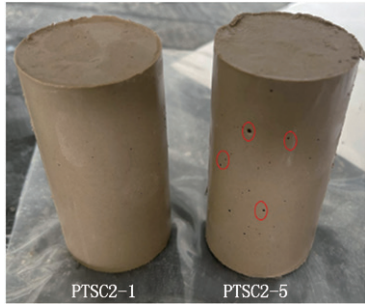


图5 7 d 龄期 PTSC2-1 和 PTSC2-5 试样表面特征  
Fig. 5 Surface characteristics of 7-day-old PTSC2-1 and PTSC2-5 samples

氢氧化钠对于磷尾矿胶凝材料的激发效果较好,随着氢氧化钠含量增加,强度也随之增加。28 d 时,随着氢氧化钠含量的减少,强度呈先增加后减少的趋势。由于 PTSC2-1 中氢氧化钠较多,形成了较多  $H_2$ , 形成的孔洞影响了抗压强度。PTSC2-2 中氢氧化钠含量适中,充分反应后,孔洞对整体影响较小,因此强度较高,相较于 7 d 强度有着较大提升,呈现出早期强度低,后期强度高的趋势。

### 2.3.2 碳酸钠与硅酸钠复合激发体系配比对磷尾矿胶凝材料抗压强度的影响

由图 6 可知,7 d 时,随着碳酸钠与硅酸钠比例的逐渐降低,磷尾矿胶凝材料的抗压强度也随之降低,比例为 1:3 时强度最高;28 d 时,随着碳酸钠与硅酸钠比例的逐渐降低,磷尾矿胶凝材料的抗压强度呈现先降低后增加的规律,碳酸钠与硅酸钠之间比例为 1:15 时抗压强度最高。分析其原因,碳酸钠对于磷尾矿胶凝材料的抗压强度影响可能主要体现在早期,而后期相较于纯硅酸钠激发效果反而起到消极作用。

由于磷尾矿本身矿物组成中大多是活性较低的

惰性组分,碱对于磷尾矿的反应较慢,因此,7 d 时试件表面湿润,并带有小气孔,如图 7 所示。28 d 时,磷尾矿表面干燥,气孔较多。说明在此期间碱一直与磷尾矿粉末发生反应,持续放出  $CO_2$ , 气孔变多,使内部结构不致密,导致强度降低。相比于氢氧化钠与硅酸钠的复合激发,碳酸钠与水合激发剂不适合于激发磷尾矿粉的激发。

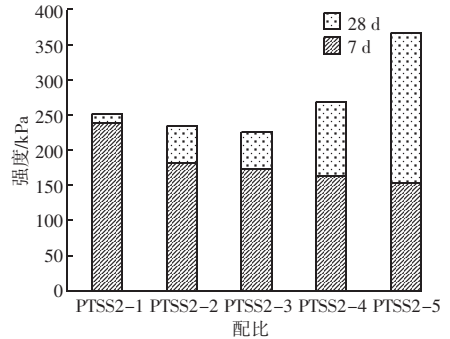


图6 PTSS 配比对磷尾矿粉末复合激发抗压强度  
Fig. 6 Effect of PTSS ratio on compressive strength of phosphorus tailings powder composite activation

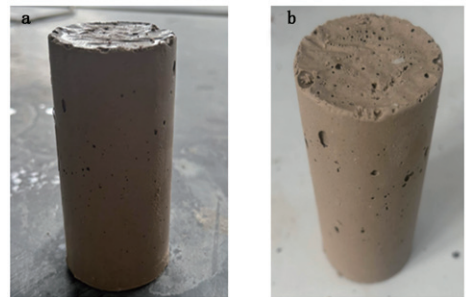


图7 7 和 28 d 时 PTSC 试样表面特征  
Fig. 7 Surface characteristics of PTSC specimens at 7 and 28 days

## 2.4 XRD 分析

为探讨碱激发磷尾矿胶凝材料组成对于抗压强度的影响,选取龄期为 28 d 的 PTSC 和 PTSS 试样进行 XRD 分析,由图 8 可知,PTSC 复合碱激发试样中主要存在的物相有:  $CaMg(CO_3)_2$ 、 $SiO_2$ 、 $SrCrO_4$ 、 $CaCO_3$ 、 $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$  和  $Ca_5(PO_4)_3$ 。PTSC 复合碱激发试样的  $CaMg(CO_3)_2$  衍射峰呈现先降低后提高,PTSC2-2 最低,PTSC2-5 最高,与图 4 所示的抗压强度具有相似的变化规律。由于磷尾矿粉末与碱反应会消耗  $CaMg(CO_3)_2$  和  $CaCO_3$ , 在  $2\theta$  为  $52^\circ \sim 58^\circ$  的区间,PTSC2-2 趋势平坦,衍射峰基本消失,说明反应比较显著,碳酸盐矿物基本消失。而剩余的其他四个样品在此区间内仍有明显的小馒头峰,说明此样品白云石与碱并没有完全反应。

## 材料科学

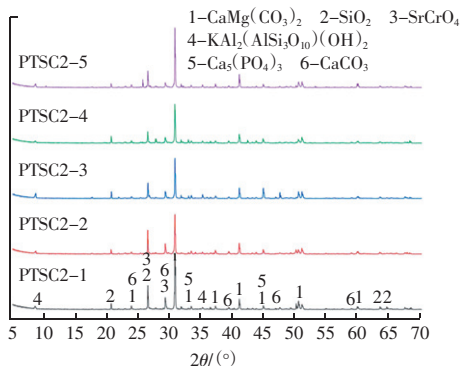


图8 PTSC样品的XRD  
Fig. 8 XRD of PTSC sample

由图9可知, PTSS与PTSC复合激发试样衍射峰相比较强。在PTSS组试样中, 部分配比的试样中尚存 $\text{CaCO}_3$ 的衍射峰, 说明PTSS对于磷尾矿激发效果不好, 并不完全反应。PTSS2-5组内 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 衍射峰仍弱于其他试样中。这表明, 随着磷尾矿碱激发龄期的增长, 磷尾矿胶凝材料中的 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 会被大量消耗。

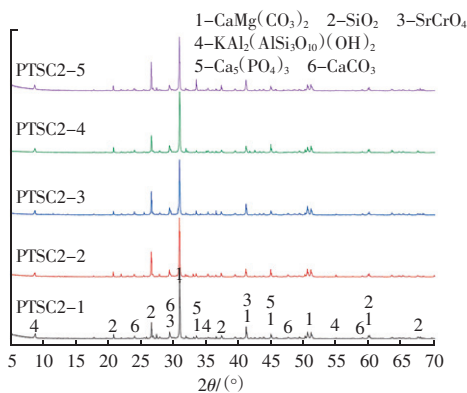


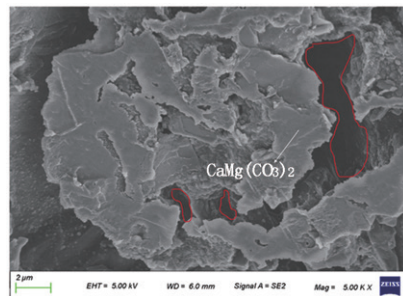
图9 PTSS样品的XRD  
Fig. 9 XRD of PTSS sample

用碱处理28 d后, 一部分白云石会发生反应, 通过试验分析得出结论, 大约有15% (以磷尾矿的总质量计) 的白云石发生了反应。

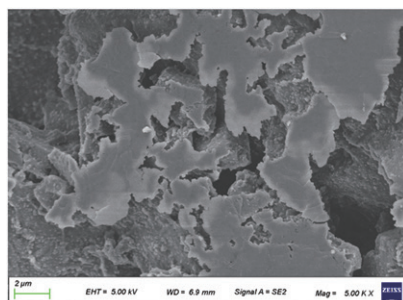
## 2.5 SEM分析

由图10(a)可知, 磷尾矿中的白云石与碱激发剂发生了强烈化学反应, 原有矿物被反应蚕食, 只有部分剩余, 内部结构存在明显间隙。由图10(b)可知, 白云石表面发生了腐蚀反应, 较为平整, 略带黏附物, 内部孔隙率增多。由图10(c)可知, 可以明显看出反应区是大面积不连续分布, 可见未反应的棱角状白云石裸露。由图10(d)可知, 反应程度微弱, 反应面积最小, 白云石表面存在大量黏附物。从四张

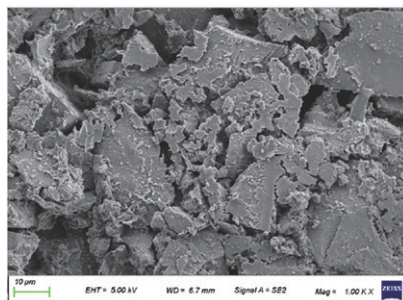
图我们可以得出: 随着氢氧化钠掺量减少, 反应情况先增强后减少, 在PTSC2-2这个配比下反应最佳。



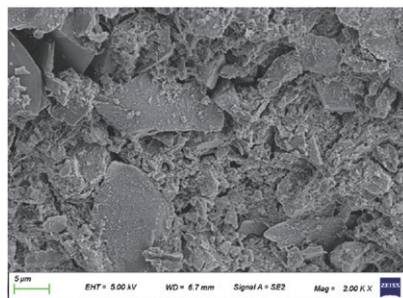
(a) PTSC2-1



(b) PTSC2-2



(c) PTSC2-4

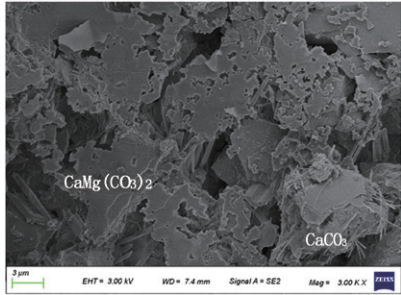


(d) PTSC2-5

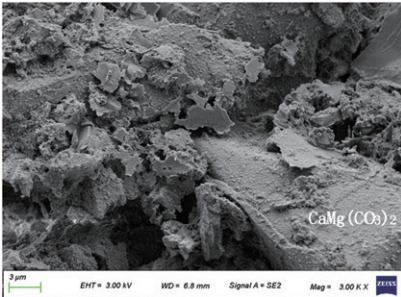
图10 28 d PTSC样品的SEM显微照片  
Fig. 10 SEM micrographs of 28-day PTSC sample

由图11(a)可知, 白云石与碱激发剂发生反应, 产生腐蚀区域间隙明显。右下角可以观察到明显的针刺状的文石( $\text{CaCO}_3$ ), 附着在白云石表面, 说明反应并没有完全消耗完 $\text{CaCO}_3$ , 导致强度不足。由图11(b)可知, 可以观察到明显的白云石

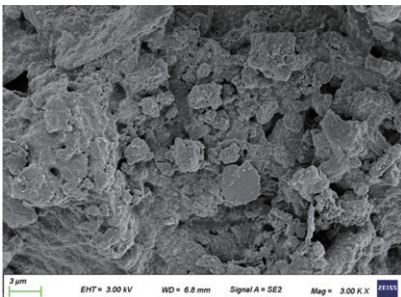
( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ )，其与 PTSS2-1 相比反应面积变小，在大颗粒白云石表面附着碱激发产物。由图 11 (c) 可知，白云石不再是大块颗粒，它被分成许多小块叠在一起，其表面大部分被硅酸钠和碳酸钠覆盖，磷尾矿反应发生在内部，且与图 (a)、(b) 相比反应较弱，没有明显被腐蚀状。由图 11 (d) 可知，白云石表面基本被硅酸钠和碳酸钠覆盖，反应



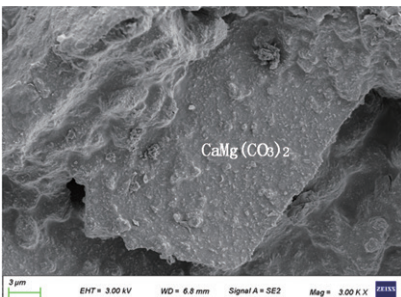
(a) PTSS2-1



(b) PTSS2-2



(c) PTSS2-4



(d) PTSS2-5

图 11 28 d PTSS 样品的 SEM 显微照片

Fig. 11 SEM micrographs of 28-day PTSS sample

结果显示不出。从微观角度来看，随着碳酸钠的掺量减少，磷尾矿反应面积减少，空间结构更加致密，孔隙间隙变小，这也能够解释抗压强度在碳酸钠小掺量下，强度升高的原因。

通过 SEM 分析表明，PTSC 和 PTSS 碱激发反应程度相比，PTSS 配合比更有助于磷尾矿对碱激发反应。

### 2.6 水化热

在水化反应早期阶段，无水相快速溶解导致热快速放出几分钟。这种热爆发之后是诱导期（或休眠期），在此期间，水合作用几乎处于停止状态，其特征在于持续低放热。由图 12、13 可知，磷尾矿通过碱激发反应后，会吸收热量，反应时间极短，在约 1 h 之后开始持续极低放热，并且水化热的峰值极小，这说明磷尾矿会极大地抑制水化热的发生，且没有新物质生成。由图 12 可知，NaOH 掺量越高，水化热反应越早，随着 NaOH 含量的减少，放热速率呈现先减少再增加再减少的波动，在 PTSC2-10 配比下吸收热量达到峰值。

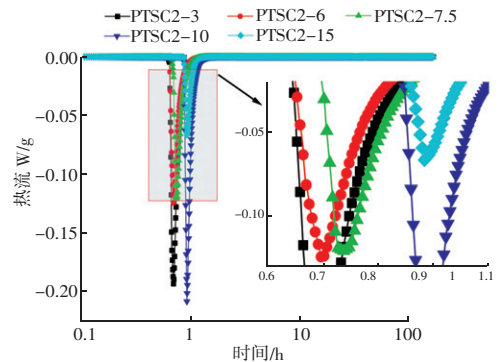


图 12 PTSC 样品的放热速率

Fig. 12 Heat release rate of PTSC samples

由图 13 可知，随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  掺量减少，水化热反应时间先慢后快，PTSS2-7.5 最慢，PTSS2-10 最

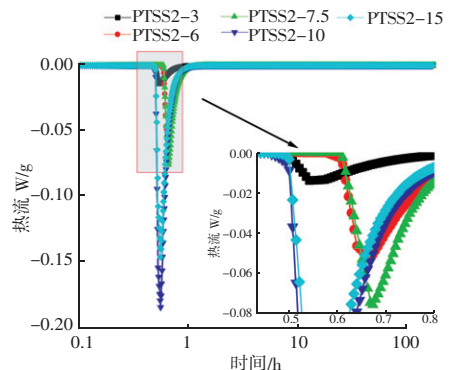


图 13 PTSS 样品放热速率

Fig. 13 Heat release rate of PTSS samples

## 材料科学

快。随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  掺量的减少放热速率呈现增加趋势, PTSS2-10 吸热效率最高。图 12、13 均验证了磷尾矿胶凝材料会抑制水化热的发生, 但在碱激发效果下还是促进了磷尾矿的活性。

### 3 结论

通过研究磷尾矿碱激发, 可以得出以下结论:

(1) 单一硅酸钠对磷尾矿有一定的激发作用, 但总体激发效果较差, 尚难满足工程需要, 需考虑采用复合激发。

(2) 复合碱激发剂的类型及掺量对磷尾矿凝结时间有很大影响, 对于初凝时间 PTSC 是优于 PTSS, 平均时间缩短 92 min。对于终凝时间起到主要作用的是硅酸钠, 而 NaOH 起到了延长作用。

(3) 提升磷尾矿细度可以显著改善碱激发磷尾矿胶凝材料的激发效果。磷尾矿在球磨前后被 2.0 模数硅酸钠激发后抗压强度为: 45.8、186 kPa, 抗压强度相差了 4 倍。相较于单一碱激发剂, 复合激发体系的强度大幅提高。PTSC 配比 28 d 的抗压强度随着 NaOH 掺量的减少呈现先增加后减少, PTSC2-2 在 28 d 可以提升到 681 kPa 达到最高强度; PTSS 配比 28 d 的抗压强度随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  掺量的减少呈现先减少后增加, 强度最高为 PTSS2-5 配比为 367 kPa。混合激发相较于之前单碱激发剂激发强度大幅提升。

(4) 通过 XRD、SEM 和水化热分析, 复合激发更有利于促进磷尾矿胶凝材料水化反应的发生, 产物更丰富、结构更致密, 宏观力学性能更好。

### 参 考 文 献

[1] SU C X, RANA N M, EVANS S G, et al, Tailings storage facilities in China: Historical failure incidents, existing status, and database-driven quantitative risk assessment [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2024, 114: 104973.

[2] HU S T, XIONG X H, LI X, et al, Spatial distribution characteristics, risk assessment and management strategies of tailings

ponds in china [J]. Science of the Total Environment, 2024, 912: 169069.

[3] 余晶. 尾矿综合利用和尾矿污染防治政策研究与探索 [J]. 世界有色金属, 2023, (22): 172-174.

[4] 张浩, 王辉, 汤红妍, 等. 铅锌尾矿库土壤和蔬菜重金属污染特征及健康风险评估 [J]. 环境科学学报, 2020, 40 (3): 1085-1094.

[5] 朱秀雯, 唐远, 裴丰, 等. 磷尾矿在农业领域的应用研究 状及展望 [J]. 化学与生物工程, 2024, 41 (1): 1-7.

[6] LUAN C W, LIU J, ZHAO S, et al, Enhancing the properties of UHPC with recycled concrete powder and iron ore tailings sand, and evaluating the environmental impact [J]. Construction and Building Materials, 2024. 452: 138769.

[7] HUANG G D, ZHANG X K, LIU M, et al, Compatibility of sodium hydroxide, sodium silicate and calcium-enriched additives in alkali-activated materials: From the perspectives of flowability, strength and microstructure [J]. Construction and Building Materials, 2023. 403: 133102.

[8] HUANG G D, JI Y S, ZHANG L L, et al, Influence of calcium content on structure and strength of MSWI bottom ash-based geopolymer [J]. Magazine of Concrete Research, 2019. 71 (7): 362-372.

[9] JIANG L L, LI J Q, ZHANG Q G, et al, Influence of phosphorus tailings fineness on the hydration process and physical properties of ordinary portland cement [J]. Construction and Building Materials, 2024. 417: 135349.

[10] MARUTHUPANDIAN S, CHALIASOU A, KANELLOPOULOS A. Recycling mine tailings as precursors for cementitious binders - methods, challenges and future outlook [J]. Construction and Building Materials, 2021. 312: 125333.

[11] 刘东, 崔孝炜, 狄燕清, 等. 机械活化-碱激发制备钒尾矿基地聚物 [J]. 矿产保护与利用, 2025, 45 (5): 102-109.

[12] 路学军, 吕子健, 卢中宝, 等. 锦屏磷尾矿砂综合利用探讨 [J]. 化工矿物与加工, 2005 (5): 28-30.

[13] 王保明, 王兴龙, 杨英, 等. 磷尾矿综合利用现状及研究进展 [J]. 无机盐工业, 2024, 56 (10): 1-11.

[14] 王生晴. 磷石膏-高炉矿渣-磷尾矿制备砌块及其力学性能研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2024.

[15] 王春雪, 郭永杰, 刘丽芬, 等. 磷尾矿资源化利用研究综述及展望 [J]. 云南化工, 2023, 50 (4): 1-6.