热活化磷尾矿制备钙镁硅土壤调理剂实验研究

郑宗雨[1]，李智力[1,2]，何东升[1,2]，唐　远[1,2]，付艳红[1,2]，李万青[1]，潘　超[3]，沈璇炀[3]

（1. 武汉工程大学 资源与安全工程学院，湖北 武汉　430073；2. 磷矿及其共伴生资源绿色高效开发利用全国重点实验室，贵州 贵阳　550014；3. 武汉市秀谷科技有限公司，湖北 武汉　430070）

［摘　要］为全量化利用磷尾矿，以磷尾矿为主要原料，含硅矿物为辅料，采用热活化方式制备土壤调理剂。磷尾矿的物相组成分析结果表明，其主要由白云石、磷灰石、方解石和石英组成，质量分数分别为78.63%、17.34%、1.63%和2.40%。热活化结果表明，磷尾矿在1 000 ℃时活化1.5 h，产物中活性钙、镁、硅质量分数分别为37.05%、24.18%、0.78%。钾长石和硅石能有效活化磷尾矿中的钙、镁元素，并提升土壤调理剂中的活性硅含量。磷尾矿与钾长石按质量比1∶1混合后在1 300 ℃下热活化1.5 h，热活化产物为玻璃态，活性硅质量分数最高，达到36.24%，高于其他混合比的活化率，且该混合比中活性钙、镁元素质量分数达到27.84%、13.58%。该研究可为磷尾矿在农业领域的利用提供借鉴。

［关键词］磷尾矿；热活化；土壤调理剂；综合利用

［中图分类号］S143.5；S511　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2026）01-0026-07

Experimental study on preparation of calcium-magnesium-silicate soil conditioner from thermally activated phosphate tailings

ZHENG Zongyu[1], LI Zhili[1,2], HE Dongsheng[1,2], TANG Yuan[1,2], FU Yanhong[1,2], LI Wanqing[1,2], PAN Chao[3], SHEN Xuanyang[3]

(1. *School of Resources and Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan* 430073, *China*; 2. *State Key Laboratory of Green and Efficient Development of Phosphorus Resources, Guiyang* 550014, *China*; 3. *Wuhan Xiugu Technology Co., Ltd., Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: To fully utilize phosphate tailings, a soil conditioner is prepared using phosphate tailings as the primary raw material and siliceous minerals as supplementary components through thermal activation. The analysis results of phase composition of the phosphate tailings indicate that they are primarily composed of dolomite, apatite, calcite and quartz, with respective contents of 78.63%, 17.34%, 1.63% and 2.40%. The thermal activation results indicate that after 1.5 hours of activation at 1 000 ℃, the product contains 37.05% active calcium, 24.18% active magnesium, and 0.78% active silicon. Potassium feldspar and silica can effectively activate calcium and magnesium in the phosphate tailings, enhancing the active silicon content in the soil conditioner. When phosphate tailings are mixed with potassium feldspar at a mass ratio of 1∶1 and thermally activated at 1 300 ℃ for 1.5 hours, the resulting product exhibits a glassy state. This mixture achieves the highest active silica content at 36.24%, surpassing other mixing ratios, while also yielding active calcium and magnesium contents of 27.84% and 13.58% respectively. This research provides valuable insights for utilizing phosphate tailings within agricultural applications.

Key words: phosphate tailings; thermal activation; soil conditioner; comprehensive utilization

0　引言

受磷矿选矿技术的限制，磷矿浮选必然产出大量磷尾矿。每生产磷精矿1 t产生磷尾矿约0.44 t。磷尾矿作为废弃物大量堆存于尾矿库中，不仅占用

收稿日期：2025-11-20

作者简介：郑宗雨（2003—　），男，安徽安庆人，在读硕士研究生，主要从事矿物加工方面研究工作。

通信作者：李智力（1989—　），男，湖北荆州人，副教授，博士，主要从事矿物加工和固废资源化利用等方面研究。

基金项目：湖北省揭榜制科技项目（2024BEB004）；武汉工程大学荆门化工新材料产业技术研究院开放基金（JM2023002）；湖北省科技创新人才计划项目（2024DJC089）；云南省技术创新中心项目（202305AK340002）

土地，还威胁生态环境[1]。磷尾矿的产生量和堆积量逐年增长，严重限制了磷化工企业的发展，因此磷尾矿的综合利用越来越受到重视。

磷尾矿中富含钙、镁、磷元素，是良好的养分资源[2]。然而，磷尾矿中的钙以白云石和磷灰石形式存在，镁以白云石形式存在，活性很低，需要进行活化以提高元素活性。常见的活化方法包括化学浸出活化[3]、热活化[4]和生物活化[5]。热活化由于可有效活化磷尾矿中的所有元素，且活化效率高，是研究的重点之一。

硅石、钾长石是重要的含硅矿物，其中的二氧化硅能够与氧化钙结合形成低共熔物，降低物质的变形、软化、熔融或液化温度，有效加速热反应进行，因此可作为助熔剂，促进磷尾矿的活化[6-8]。同时，磷尾矿中的白云石可作为含硅矿物的活化剂，促进其中硅元素的活化，提升热活化产物活性硅含量。

本文在研究磷尾矿热活化温度和时间对活性钙、镁、硅含量影响的基础上，探究钾长石和硅石的加入对磷尾矿活化规律的影响，以期为磷尾矿的全量化利用提供参考。

1　实验材料与方法

1.1　实验材料

1.1.1　磷尾矿化学组成和物相组成

磷尾矿样品取自湖北某磷化工企业。为了解磷尾矿化学组成、物相组成和粒度组成，对磷尾矿进行了X射线荧光光谱分析（XRF）、重金属含量分析（按照GB/T 23349—2020《肥料中砷、镉、铬、铅、汞含量的测定）、X射线衍射分析（XRD）和筛分分析，结果分别见表1、表2、表3、表4。

表1　磷尾矿化学多元素分析结果

Table 1　Chemical multi-element analysis results of phosphate tailings　%

$w(CaO)$	$w(MgO)$	$w(SiO_2)$	$w(P_2O_5)$	$w(Fe_2O_3)$	$w(Al_2O_3)$
30.93	16.28	3.85	6.28	0.82	0.58

表2　磷尾矿重金属含量

Table 2　Heavy metal content in phosphate tailings mg/kg

w(Cr)	w(As)	w(Cd)	w(Pb)	w(Hg)
15.6	3.5	1.2	13.5	0.6

表3　磷尾矿物相组成

Table 3　Mineralogical composition of phosphate tailings %

w(白云石)	w(磷灰石)	w(方解石)	w(石英)
78.63	17.34	1.63	2.40

表4　磷尾矿粒度分布

Table 4　Particle size distribution of phosphate tailings

粒径/μm	w/%
> 500	3.15
> 74 ~ 500	5.92
> 38 ~ 74	64.82
≤38	26.11

由表1可知，磷尾矿主要由CaO、MgO、SiO_2和P_2O_5组成，质量分数分别为30.93%、16.28%、3.85%和6.28%。此外，还含有少量的Fe_2O_3、Al_2O_3。由表2可知，磷尾矿中w(Cr)、w(As)、w(Cd)、w(Pb)、w(Hg)分别为15.6、3.5、1.2、13.5、0.6 mg/kg，5种重金属元素含量均小于国家标准（参考GB/T 38400—2019《肥料中有毒有害物质的限量要求》中无机肥料限值）对重金属含量的要求。由表3可知，磷尾矿由白云石、磷灰石、方解石和石英组成，质量分数分别为78.63%、17.34%、1.63%和2.40%，与表1中化学多元素分析结果相符。表4粒度分析结果表明，磷尾矿粒径主要分布在≤74 μm粒级，粒度较细。

综上所述，该磷尾矿中CaO和MgO含量很高，同时含有少量的SiO_2和P_2O_5，重金属含量符合国家标准对无机肥料的要求，粒度较细，是制备土壤调理剂的良好原材料。

1.1.2　钾长石和硅石性质

钾长石和硅石均为市售产品，纯度均在92%以上，用于热活化后补充土壤调理剂中的活性硅元素。

1.2　实验方法

1.2.1　磷尾矿热活化实验方法

采用真空升降式气氛电炉对磷尾矿进行热活化。实验时将磷尾矿、钾长石、硅石等按设计质量配比精确称量（总质量50 g），充分混匀后装入99.95%的高纯石墨坩埚。将坩埚置于电炉中央温区，按预设程序进行升温，达到目标温度后恒温反应一定时间。完成热处理后取出热活化产物进行破碎研磨处理，制备得到的样品测试活性钙、镁、硅含量。

1.2.2　化学组成和物相组成分析方法

采用X射线荧光光谱仪（型号ARLPERFORM’X）分析试样化学组成，采用X射线衍射仪（D8ADVANCE）分析试样物相组成。

1.2.3　活性钙、镁、硅元素含量测试方法

按照土壤调理剂标准NY/T 2272—2012《土壤调理剂钙、镁、硅含量的测定》中等离子体发射光

谱法分析活性钙、镁、硅元素含量。

2　结果与讨论

2.1　热活化时间和温度对磷尾矿热活化产物中活性钙、镁、硅含量的影响

800 ℃热活化时磷尾矿中活性钙、镁、硅含量与热活化时间之间的关系见图 1。由图 1 可知，800 ℃下热活化 0.5 h，白云石已经开始分解生成氧化钙和氧化镁。随着热活化时间延长，白云石分解反应持续进行，活性钙、镁质量分数持续增加至 22.72%、10.09%。随着热活化时间延长，活性硅元素质量分数基本保持不变，维持在 0.18%左右，这是因为在 800 ℃下磷尾矿中的石英不能与磷尾矿热分解产生的氧化镁和氧化钙反应形成可溶性硅酸盐。

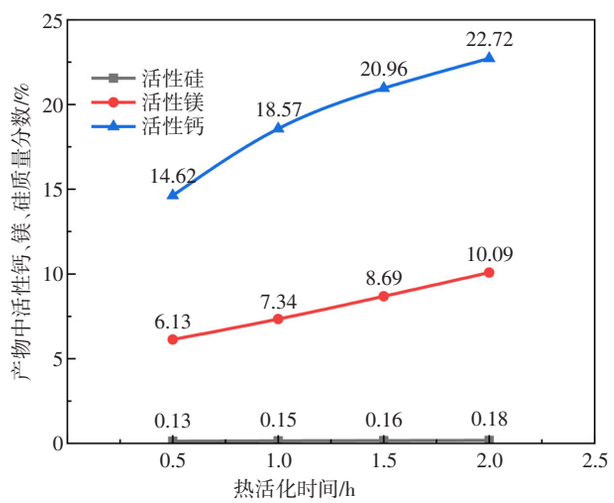


图 1　磷尾矿中活性钙、镁、硅含量与热活化时间之间的关系（800 ℃）

Fig. 1　Relationship between active calcium, magnesium and silicon content in phosphate tailings and thermal activation time （800 ℃）

1 000 ℃热活化时磷尾矿中活性钙、镁、硅含量与热活化时间之间的关系见图 2。由图 2 可知，随着热活化时间延长，白云石分解反应持续进行，活性钙、镁含量先增加后基本保持不变，活性钙、镁质量分数最高分别为 38.94%、25.06%。随着热活化时间延长，活性硅质量分数缓慢上升，2 h 时上升至 1.15%。

1 200 ℃热活化时磷尾矿中活性钙、镁、硅含量与热活化时间之间的关系见图 3。由图 3 可知，随着热活化时间延长，白云石分解反应持续进行，活性钙、镁和硅含量先增加后趋于稳定，在热活化时间为 1.5 h 时后基本保持不变。随着热活化时间延长，活性硅元素含量持续缓慢上升。对比图 1 和

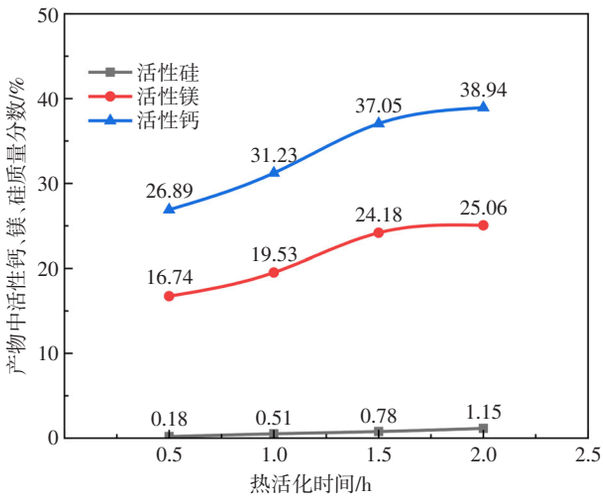


图 2　磷尾矿中活性钙、镁、硅含量与热活化时间之间的关系（1 000 ℃）

Fig. 2　Relationship between active calcium, magnesium and silicon content in phosphate tailings and thermal activation time （1 000 ℃）

图 2 可知，当热活化温度为 1 000 ℃，活性钙、镁质量分数最大值为 38.94%、25.06%。当热活化温度为 1 200 ℃时，活性钙、镁质量分数最大值为 39.25%、25.31%。两者数值相近，说明在温度为 1 000 ℃时，磷尾矿中白云石可以较完全的分解。而 800 ℃时，热活化温度较低，白云石分解不充分，反应 2.0 h 时，活性钙、镁质量分数分别为 22.72%、10.09%。随着温度升高，活性硅含量有一定程度提升，说明高温有利于激发磷尾矿中硅的活性。

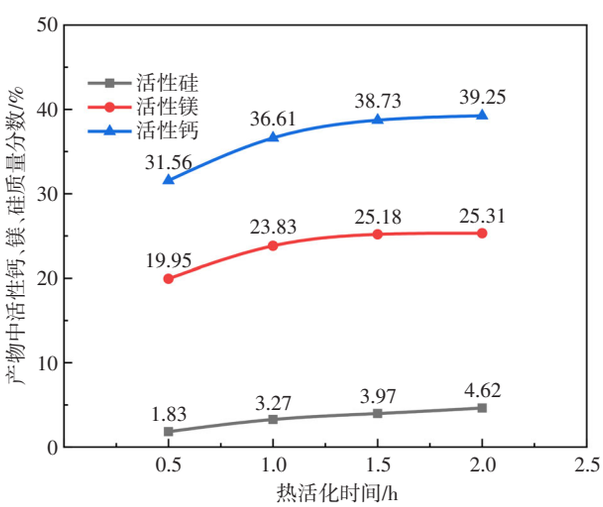


图 3　磷尾矿中活性钙、镁、硅含量与热活化时间之间的关系（1 200 ℃）

Fig. 3　Relationship between active calcium, magnesium and silicon content in phosphate tailings and thermal activation time （1 200 ℃）

2.2　钾长石和硅石对热活化产物中活性钙、镁、硅含量的影响

经过上述探究发现，在热活化时间小于 1.5 h 时反应并不充分，而在 1.5 h 后活性钙、镁、硅含量变化不大，故后续实验在热活化时间 1.5 h 的条件下进行。由于该磷尾矿中硅含量较低，导致热活化产物中活性硅含量不高，因此考虑在磷尾矿中混入含硅矿物钾长石或硅石。实验选取磷尾矿、磷尾矿与钾长石质量比为 3∶1 和 1∶1 的混合物、磷尾矿与硅石质量比为 3∶1 和 1∶1 的混合物，在不同温度下热活化 1.5 h，自然冷却后制样测定产品活性钙、镁、硅组分含量。

2.2.1　对热活化产物中活性钙含量的影响

磷尾矿、磷尾矿与含硅矿物不同混合比时热活化产物活性钙含量见图 4。由图 4 可知，随着热活化温度升高（800 ~ 1 300 ℃），磷尾矿中的白云石热分解效率提高，钾长石的加入促进了分解反应，因此磷尾矿、磷尾矿与钾长石质量比为 3∶1 和 1∶1 混合物的活性钙含量逐渐增加。磷尾矿与硅石质量比为 3∶1 和 1∶1 混合物的活性钙质量分数先增加后减小，在温度为 1 200 ℃时达到极大值 31.93%、23.65%，可能由于高温下（1 300 ℃）硅石与白云石分解产生的氧化钙反应产生了部分不溶于水的硅酸钙，导致活性钙含量减小。对比磷尾矿及其与不同含硅矿物的混合物，热活化产物中活性钙含量大小顺序为：磷尾矿 > 磷尾矿与钾长石质量比 3∶1 的混合物 > 磷尾矿与硅石质量比 3∶1 的混合物 > 磷尾矿与钾长石质量比 1∶1 的混合物 > 磷尾矿与硅石质量比 1∶1 的混合物。磷尾矿热活化后活性钙含量最高，磷尾矿与钾长石质量比 3∶1 的混合物次之，磷尾矿与硅石质量比 1∶1 的混合物最低，和物料中白云石含量变化规律一致。

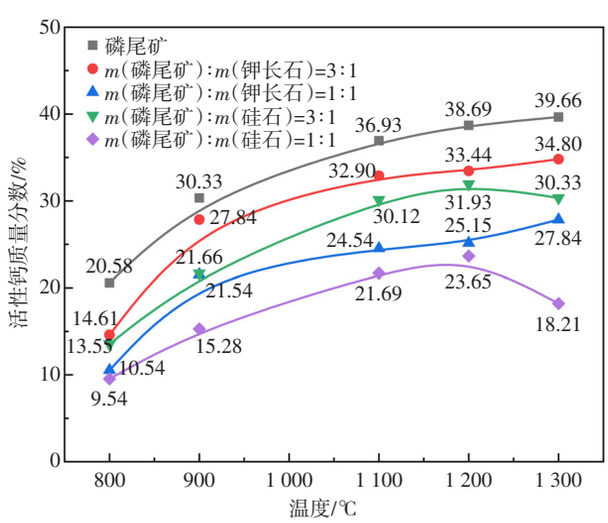


图 4　不同温度下活性钙含量变化

Fig. 4　Variation in active calcium content at different temperatures

钾长石的加入能促进白云石的分解[9]，因此，在相同比例下，磷尾矿与钾长石混合物热活化产物中活性钙含量比磷尾矿与硅石混合物热活化产物高。

2.2.2　对热活化产物中活性镁含量的影响

磷尾矿、磷尾矿与含硅矿物不同混合比时热活化产物活性镁含量见图 5。由图 5 可知，随着热活化温度升高（800 ~ 1 300 ℃），磷尾矿中的白云石热分解效率提高，钾长石的加入促进了分解反应，并未产生镁橄榄石等难溶产物，因此磷尾矿、磷尾矿与钾长石质量比为 3∶1 和 1∶1 混合物、磷尾矿与硅石质量比为 3∶1 和 1∶1 混合物的热活性产物中活性镁含量均逐渐增加。

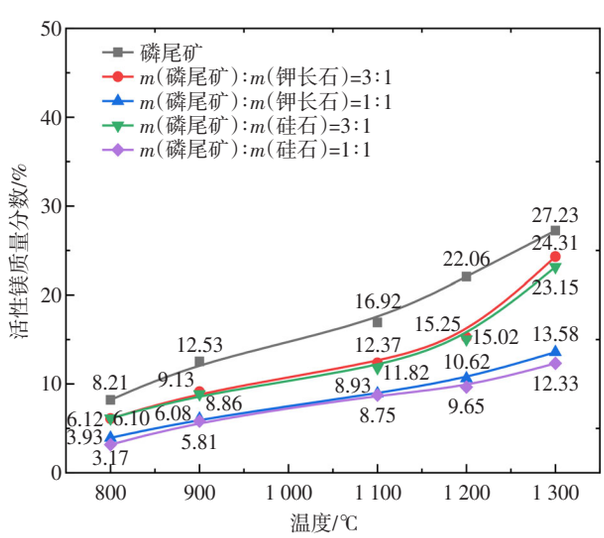


图 5　不同温度下活性镁含量变化

Fig. 5　Variation in active magnesium content at different temperatures

对比磷尾矿及其与不同含硅矿物的混合物，热活化产物中活性镁含量顺序为：磷尾矿 > 磷尾矿与钾长石质量比 3∶1 的混合物 > 磷尾矿与硅石质量比 3∶1 的混合物 > 磷尾矿与钾长石质量比 1∶1 的混合物 > 磷尾矿与硅石质量比 1∶1 的混合物。磷尾矿热活化后活性镁含量最高，磷尾矿与钾长石质量比 3∶1 的混合物次之，磷尾矿与硅石质量比 1∶1 的混合物最低，和物料中白云石含量变化规律一致。

2.2.3　对热活化产物中活性硅含量的影响

磷尾矿、磷尾矿与含硅矿物不同混合比时热活

化产物活性硅含量见图6。由图6可知，随着热活化温度升高（800～1 100 ℃），磷尾矿、磷尾矿与钾长石质量比为3:1和1:1混合物、磷尾矿与硅石质量比为3:1和1:1混合物的热活化产物中活性硅含量均逐渐增加，超过1 100 ℃后，活性硅含量急剧增加，可能是此时磷尾矿分解产生的氧化钙和氧化镁与硅石、钾长石发生了化学反应[10]，生成了活性高的$MgSiO_3$、$MgSiO_3$、$Ca_2Al_2SiO_7$、$Mg_2Al_2SiO_7$、$MgCa_2Si_2O_7$。尤其在1 300 ℃时，热活化产物为玻璃态，各元素活性较高。钾长石存在时，磷尾矿中的白云石能高效活化钾长石中的硅，因此磷尾矿与钾长石的混合物热活化后活性硅含量较磷尾矿与硅石的混合物热活化后高。在只采用磷尾矿为原料进行煅烧时，1 300 ℃和1 200 ℃相比活性钙含量只有微弱的增加，考虑到1 300 ℃时已经大大增加能耗，故没有采用更高的温度。原料中硅含量对热活化后产物中活性硅含量有重要的影响，因此热活化产物活性硅含量大小顺序为：磷尾矿与含硅物料质量比1:1的混合物 > 磷尾矿与含硅物料质量比3:1的混合物 > 磷尾矿。单纯的磷尾矿中硅含量低，因此热活化后活性硅含量低。

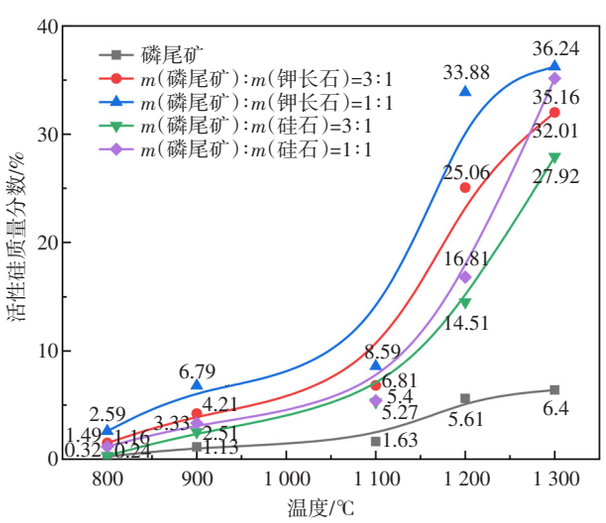


图6　不同温度下活性硅含量变化

Fig. 6　Variation in active silicon content at different temperatures

2.3　土壤调理剂的应用效果

在水稻大田试验中，667 m^2施用该土壤调理剂（磷尾矿与钾长石质量比1:1的混合物在1 300 ℃活化1.5 h制得）150 kg可显著改善土壤理化性质并促进作物生长。处理后，土壤pH由5.31升至6.15，阳离子交换量（CEC）从5.35 cmol/kg提高至7.72 cmol/kg。同时，糙米镉质量分数由0.25 mg/kg降低至0.06 mg/kg，降幅显著。此外，水稻产量提升25.93%。结果表明，该调理剂对改良土壤环境、降低稻米镉积累及增产均有良好效果。通过上述应用说明：在磷尾矿中加入含硅矿物，高温热活化生成玻璃态物质可以有效活化磷尾矿中的钙、镁元素，提升活性硅含量，制得土壤调理剂。

2.4　磷尾矿热活化制备土壤调理剂过程中的物理化学变化及产品化学组成

2.4.1　热活化过程中的物理化学变化

磷尾矿中的主要成分是白云石，此外还含有一定量的磷灰石、方解石和石英。磷尾矿在加热过程中，发生的化学反应包括式（1）和（2），即白云石分解，生成氧化钙、氧化镁和二氧化碳，以及方解石分解成为氧化钙和二氧化碳，这两个反应可在1 000 ℃反应完全。在此温度下，石英和氟磷灰石没有参与化学反应。在温度区间为1 000～1 250 ℃，白云石分解产生的氧化镁和氧化钙与钾长石、硅石、石英等含硅物料发生式（3）至（11）的化学反应[11]，生成$MgSiO_3$、$CaSiO_3$、$Ca_2Al_2SiO_7$、$Mg_2Al_2SiO_7$、$MgCa_2Si_2O_7$等高活性物料，使得钙、镁、硅元素得到活化。

温度区间800～950 ℃：

$$CaMg(CO_3)_2 \longrightarrow CaCO_3 + MgO + CO_2\uparrow; \quad (1)$$

$$CaCO_3 \longrightarrow CaO + CO_2\uparrow。 \quad (2)$$

温度区间1 000～1 250 ℃：

$$MgO + SiO_2 \longrightarrow MgSiO_3; \quad (3)$$

$$CaO + SiO_2 \longrightarrow CaSiO_3; \quad (4)$$

$$KAlSi_3O_8 + MgO \longrightarrow KAlSi_2O_6 + MgSiO_3; \quad (5)$$

$$KAlSi_3O_8 + CaO \longrightarrow KAlSi_2O_6 + CaSiO_3; \quad (6)$$

$$KAlSi_2O_6 + MgO \longrightarrow KAlSiO_4 + MgSiO_3; \quad (7)$$

$$KAlSi_2O_6 + CaO \longrightarrow KAlSiO_4 + CaSiO_3; \quad (8)$$

$$Al_2O_3 + SiO_2 + 2CaO \longrightarrow Ca_2Al_2SiO_7; \quad (9)$$

$$Al_2O_3 + SiO_2 + 2MgO \longrightarrow Mg_2Al_2SiO_7; \quad (10)$$

$$2CaO + 2SiO_2 + MgO \longrightarrow MgCa_2Si_2O_7。 \quad (11)$$

当反应温度上升至1 300 ℃时，氟磷灰石、石英以及碳酸盐矿物分解产生的氧化钙和氧化镁发生复杂的化学反应，物料不能保留原有的矿相结构，生成了一定量的玻璃态产物，大大提高了热活化产物中钙、镁、硅、磷的活性。

当磷尾矿和硅石或钾长石的混合物热活化时，该过程是一个高温固相反应–熔融–冷却玻璃化过程。在温度为1 000 ℃时，硅石或钾长石较少参与化学反应，涉及的主要化学反应为白云石和方解石的分解，和磷尾矿单独热活化时类似。温度升至1 000～1 250 ℃时，体系中低熔点的组分开始形成初始液相，钾长石作为助熔剂，其熔点约1 150 ℃，

是初始液相的主要来源。当温度上升至1 300 ℃时，磷尾矿和硅石或钾长石发生了复杂的化学反应，在高温下的反应是一个硅酸盐熔体形成与结构重组的过程，生成了非晶玻璃态物质。磷尾矿中钙、镁、硅、磷活性大大提升[12-14]。玻璃态物质之所以能显著提升钙、镁、硅、磷的活性，根源在于其亚稳态、高自由能、无定形结构的特性。在玻璃态中，硅从最稳定的晶体石英形态，转变为了最易溶解的无定形玻璃态硅酸盐。磷尾矿及其与含硅矿物热活化过程中的外观形貌变化见图7，温度为1 000 ℃时，没有形成玻璃态，温度为1 300 ℃时，大量的玻璃态物质生成。

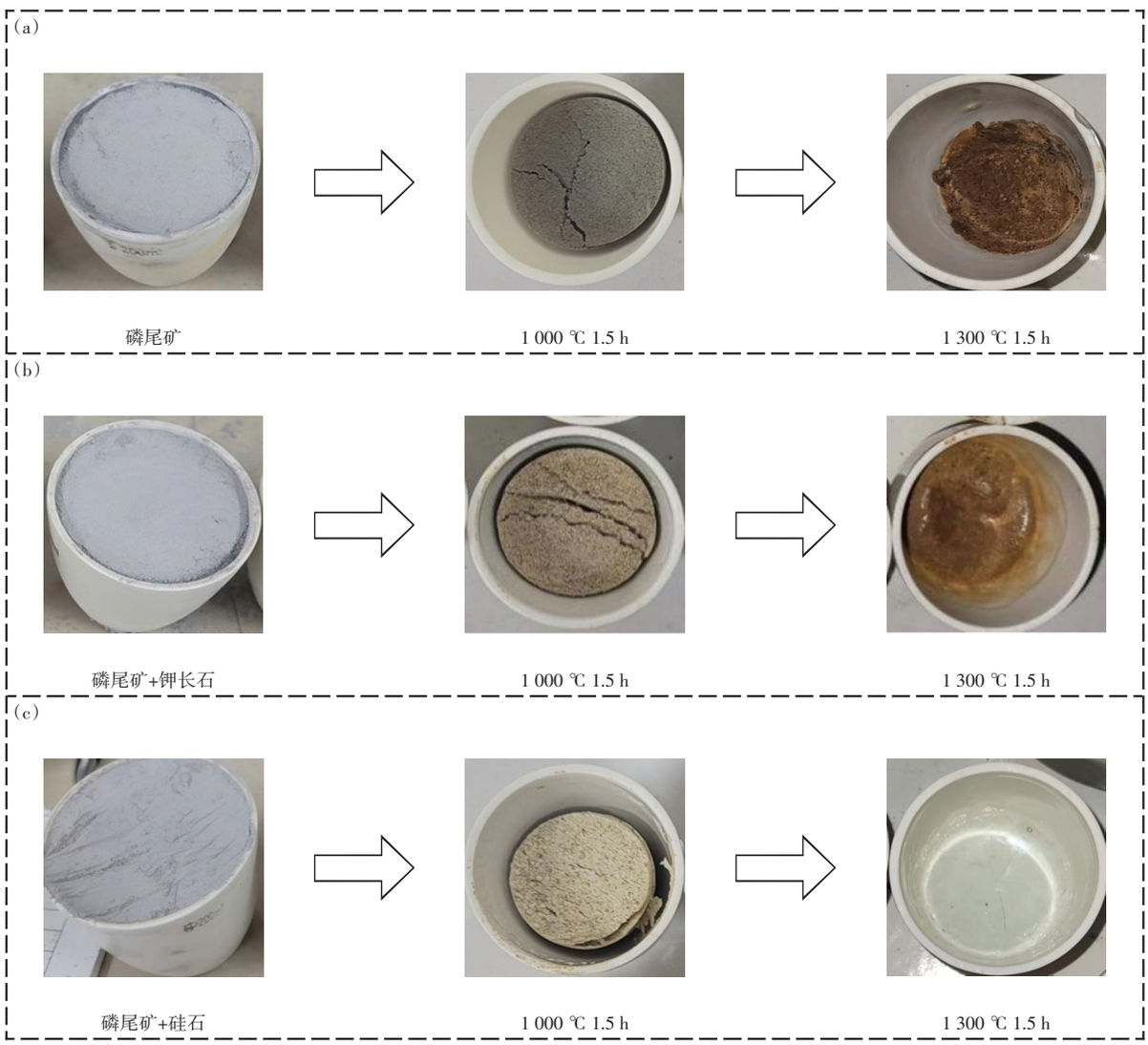


图7　磷尾矿及其与含硅矿物混合物热活化过程中的外观形貌变化

Fig. 7　Morphological changes in phosphate tailings and their interaction with siliceous minerals during thermal activation

2.4.2　土壤调理剂产品化学组成

磷尾矿与钾长石质量比1∶1的混合物在1 300 ℃活化1.5 h后的产物中活性钙、镁、硅质量分数分别为27.84%、13.58%、36.24%，活性较高。对该土壤调理剂产品进行了化学多元素分析，P_2O_5和K_2O质量分数分别为8.71%和6.63%。土壤调理剂重金属测试分析结果见表5。由表5可知，土壤调理剂中Cr、As、Cd、Pb、Hg的质量分数分别为0.8、0.1、0、1.2、0 mg/kg，不超过国家标准（参考GB/T 38400—2019《肥料中有毒有害物质的限量要求》中无机肥料限值）对土壤调理剂重金属含量的要求。

表5　土壤调理剂中重金属含量

Table 5　Heavy metal content in soil conditioners　mg/kg

w(Cr)	w(As)	w(Cd)	w(Pb)	w(Hg)
0.8	0.1	0	1.2	0

3 结论

（1）磷尾矿由白云石、磷灰石、方解石和石英组成，质量分数分别为78.63%、17.34%、1.63%和2.40%，钙镁硅活性很低，且重金属元素含量低于国家标准限值。磷尾矿在1 000 ℃时活化1.5 h，产物中活性钙、镁、硅质量分数分别为37.05%、24.18%、0.78%。

（2）含硅矿物钾长石和硅石的加入能有效活化磷尾矿中的钙、镁元素，并补充土壤调理剂中的活性硅。磷尾矿与钾长石质量比1:1混合后在1 300 ℃下热活化1.5 h，热活化产物为玻璃态，活性硅质量分数最高，达到36.24%，高于其他混合比的活化率，且该混合比中活性钙、镁元素质量分数达到27.84%、13.58%，制得的土壤调理剂产品钙、镁、硅活化效率较佳。

[参考文献]

[1] 张汉泉，许鑫，胡超杰，等.磷化工固体废弃物综合利用技术现状[J].中国矿业，2021，30(4)：50-55，63.
ZHANG H Q，XU X，HU C J，et al. Current situation of comprehensive utilization technology of solid waste of phosphorus chemical[J]. China Mining Magazine，2021，30(4)：50-55，63.

[2] 杨效家，漆增连，李志兵，等.磷尾矿资源肥料化利用途径研究进展[J].应用化工，2024，53(8)：1932-1936.
YANG X J，QI Z L，LI Z B，et al. Research progress on fertilizer utilization of phosphorus tailings resources[J]. Applied Chemical Industry，2024，53(8)：1932-1936.

[3] 黄丽华.高镁磷尾矿制备磷镁二元复合肥料的初步研究[J].化工技术与开发，2007(8)：47-48.
HUANG L H. Preparation of P-Mg Mixed Fertilizer with High-Mg Phosphate Gangue[J]. Technology & Development of Chemical Industry，2007(8)：47-48.

[4] 周雪娜，关洪亮，何东升，等.磷尾矿综合利用研究进展[J].广州化工，2021，49(5)：24-27.
ZHOU X N，GUAN H L，HE D S，et al. Research Progress on Comprehensive Utilization by Phosphate Tailings[J]. Guangzhou Chemical Industry，2021，49(5)：24-27.

[5] 范志平，王修俊，程艳波，等.高效分解磷尾矿粉复合微生物菌剂的制备[J].河南农业科学，2013，42(11)：72-75.
FAN Z P，WANG X J，CHENG Y B，et al. Preparation of compound microorganisms with efficient decomposition of phosphate tailings powder[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences，2013，42(11)：72-75.

[6] GENG R X，CHEN Z J，XIA J P，et al. Experimental study of various fluxing agents in a phosphorus furnace[J]. Phosphorus，Sulfur，and Silicon and the Related Elements，2017，192(9)：1048-1053.

[7] QIN L，BAO S X，ZHANG Y M，et al. Effect of two thermal activation methods on shale residue based geopolymer[J]. Materials Letters，2021，298：130005.

[8] GENG R X，XIA J P，CHEN Z J，et al. Effects of potassium feldspar on slagging and fluxing in phosphorus produced via electric furnace[J]. Phosphorus，Sulfur，and Silicon and the Related Elements，2017，192(4)：475-480.

[9] 宋一涵，李洪枚，马淑花，等.钾长石提钾及制备复合肥料的研究进展[J].过程工程学报，2018，18(2)：241-257.
SONG Y H，LI H M，MA S H，et al. Research Progress on Extracting Potassium and Preparing Compound Fertilizer from Potassium Feldspar[J]. The Chinese Journal of Process Engineering，2018，18(2)：241-257.

[10] 吴秋生，梁世栋，李小燕，等.钾长石高温分解制备硅钙钾镁肥工艺优化研究[J].非金属矿，2019，42(5)：24-27.
WU Q S，LIANG S D，LI X Y，et al. Study on Preparation Technology Process Optimization of Silicon-Calcium-Potassium-Magnesium Fertilizer Made by Decomposition of Potassium Feldspar[J]. Non-Metallic Mines，2019，42(5)：24-27.

[11] ZHAO Q F，LI X Y，WU Q S，et al. Evolution of mineral phases and microstructure of high efficiency Si-Ca-K-Mg fertilizer prepared by water-insoluble K-feldspar[J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology，2020，94(1)：1-8.

[12] 范钧翔.磷尾矿制备矿山复垦基质土及高温活化研究[D].郑州：郑州大学，2022.
FAN J X. Study on Preparation of Matrix Soil for Reclamation in Mining Area and High-Temperature Activation from Phosphate Tailings[D]. Zhengzhou：Zhengzhou University，2022.

[13] 李银，夏举佩，刘海浪，等.硅石、钾长石助熔磷矿碳热还原反应机理研究[J].高校化学工程学报，2017，31(5)：1120-1126.
LI Y，XIA J P，LIU H L，et al. Mechanism of Silica and K-feldspar as Flux Agents in Phosphate Ore Carbothermic Reduction[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities，2017，31(5)：1120-1126.

[14] 易龙生，夏晋，米宏成，等.尾矿活化方法的研究进展综述[J].矿业科学学报，2022，7(5)：529-537.
YI L S，XIA J，MI H C，et al. A review on the research progress of tailings activation methods[J]. Journal of Mining Science and Technology，2022，7(5)：529-537.