

磷石膏复合胶凝材料烧结过程中的矿物相组成研究

朱朋佳¹, 王 喆², 钱 威², 刘海鑫¹, 邓宗昌², 刘瑞刚¹

¹中铁七局集团第五工程有限公司, 河南 郑州

²华北水利水电大学土木与交通学院, 河南 郑州

收稿日期: 2025年9月22日; 录用日期: 2025年10月14日; 发布日期: 2025年10月27日

摘 要

随着全球对碳减排和可持续发展的日益重视, 固碳胶凝材料(CSCM)已成为减少建筑行业碳排放的一种有前途的解决方案。本研究以煤矸石、电石渣和氧化钙(CaO)为主材料, 复配不同硫酸盐(硫酸钙(CaSO₄)、脱硫石膏、磷石膏), 探讨经煅烧后对相组成的影响。利用X射线衍射(XRD)对烧结产物进行分析, 鉴定不同煅烧温度(1200℃、1300℃、1400℃)下形成的矿物相。结果表明, 硫酸根离子()促进硅酸钙(CaSiO₃)和硫酸盐的矿物的生成。研究发现氯离子(Cl⁻)和PO₄³⁻等杂质会抑制目标矿物相的形成, 从而影响材料的结构完整性。本研究为硫酸盐调控优化CSCM组成提供了机理认识, 并在工业固废资源化利用、废物管理及碳封存方面具有潜在应用价值。

关键词

固碳胶凝材料, 硫酸盐调控, 矿物相, XRD分析

Study on the Mineral Phase Composition of Phosphogypsum-Based Composite Cementitious Materials during the Sintering Process

Pengjia Zhu¹, Zhe Wang², Wei Qian², Haixin Liu¹, Zongchang Deng², Ruigang Liu¹

¹Fifth Engineering Co., Ltd., China Railway Seventh Group Co., Ltd., Zhengzhou Henan

²School of Civil Engineering and Transportation, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: September 22, 2025; accepted: October 14, 2025; published: October 27, 2025

文章引用: 朱朋佳, 王喆, 钱威, 刘海鑫, 邓宗昌, 刘瑞刚. 磷石膏复合胶凝材料烧结过程中的矿物相组成研究[J]. 材料科学, 2025, 15(10): 1910-1919. DOI: 10.12677/ms.2025.1510204

Abstract

With the increasing global emphasis on carbon reduction and sustainable development, carbon sequestration cementitious materials (CSCM) have emerged as a promising solution for reducing carbon emissions in the construction industry. This study focuses on the effects of combining coal gangue, carbide slag, and calcium oxide (CaO) with different sulfates—(calcium sulfate (CaSO₄), desulfurized gypsum, and phosphogypsum)—on the phase composition after high-temperature calcination. X-ray diffraction (XRD) was used to analyze the sintered products and to identify mineral phases formed at calcination temperatures of 1200°C, 1300°C, and 1400°C. The results indicate that sulfate ions (SO₄²⁻) promote the formation of calcium silicates (CaSiO₃) and sulfate minerals. However, impurities such as chloride (Cl⁻) and phosphate (PO₄³⁻) ions inhibit the formation of target mineral phases, thereby compromising the structural integrity of the materials. This study provides a better understanding of the role of sulfate regulation in optimizing CSCM composition and suggests potential applications in industrial waste utilization, waste management, and carbon sequestration.

Keywords

Carbon Sequestration Cementitious Materials, Sulfate Regulation, Mineral Phases, XRD Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着工业废弃物的持续排放，煤矸石、电石渣以及石膏类副产物的大规模堆存已成为资源环境领域亟需解决的问题。这类固废往往富含硅、铝和钙等潜在活性组分，如果能够通过合理的热处理和调控措施加以利用，不仅能够缓解环境压力，还可为绿色建材提供新的原料来源[1] [2]。

在“双碳”战略背景下，开发兼具固碳功能和胶凝性能的材料受到越来越多的关注。高温煅烧是一种常用的活化手段，它可以改变原料的矿物结构，促进潜在活性相的形成，从而改善胶凝特性[3] [4]。已有研究表明，石膏类物质在热处理过程中能够分解并释放硫酸根离子，进而影响硅酸钙矿物的生成和稳定[5] [6]。然而，相关研究多集中在 CaO 含量或单一石膏掺量对性能的影响，对于硫酸盐调控下的物相演化规律及杂质离子作用机制仍缺乏系统性认识[7] [8]。

Yuan [9]等系统综述了磷石膏流化床煅烧与分解机理，指出杂质离子是影响煅烧效率和产物活性的关键因素。Ababneh [10]等通过蒸汽煅烧方法实现了磷石膏的高效分解，提出杂质调控与资源回收并行的新路径。El Khessaimi [11]等尝试利用磷矿废石与磷石膏制备 CSA-Belite 复合胶凝材料，验证了 P、Cl 等杂质对相形成的调控作用。在杂质离子作用机理方面，已有研究从固溶体理论、相图、热力学/动力学等多角度展开。Ennaciri 与 Bettach [12]的综述指出，P、Cl、F 等离子在磷石膏中具有复杂的化学行为，会优先与 Ca²⁺结合，从而削弱硅酸盐相的稳定性。Ren [13]等基于热力学预测和实验验证，发现高 Mg 废料中引入 P 可显著改变硫铝酸盐-磷酸盐熟料的相组成。Moundounga [14]则从高温热力学角度研究了 OPC 熟料的相变，为解释杂质离子作用提供了热力学数据支持。在动力学方面，Ghoroi [15]的研究表明，杂质

离子会改变硅酸盐生成的多步固相反应路径,降低晶核生长速率。此外,针对磷石膏的综合利用,Zhang J [16]和 Zhang M [17]等分别探讨了以磷石膏制备低碳水泥材料及高含量磷石膏超硫酸盐水泥的水化机理,均强调了杂质离子在反应过程中的双重作用,即既可促进液相形成,加速烧结,又可能导致副相生成、性能劣化。

基于此,本研究以煤矸石、电石渣及不同类型石膏为主要原料,通过高温烧结构建固碳胶凝体系,重点探讨硫酸盐在相组成调控中的作用规律,并分析 PO_4^{3-} 、 Cl^- 等杂质离子对活性相生成的影响。该工作旨在揭示硫酸盐来源对烧结过程中关键矿物相演化的调控机理,为固废高值化利用和绿色胶凝材料的开发提供参考。

2. 材料与实验方法

2.1. 试验原材料

本文试验所用煤矸石来自河南省郑州市新郑市王行山煤矿的天然原状煤矸石,颜色为灰黑色,硬度较高。电石渣均产自于河南焦作市昊华宇航化工有限责任公司;脱硫石膏和磷石膏均产自于河南巩义市中孚电力有限公司;硫酸钙(CaSO_4)均产自于天津市众联化学试剂有限公司;氧化钙(CaO)均产自于天津市众联化学试剂有限公司;水均采用自来水。试验前将煤矸石、电石渣、脱硫石膏和磷石膏破碎放入球磨机中磨细过筛小于0.6 mm。煤矸石、电石渣、脱硫石膏、磷石膏、 CaSO_4 、 CaO 如图1所示,煤矸石、电石渣、脱硫石膏化学成分表如表1所示,磷石膏化学成分表如表2所示。



Figure 1. Sample figure. (a) Coal gangue; (b) Carbide slag; (c) Desulfurization gypsum; (d) Phosphogypsum; (e) Calcium sulfate; (f) Calcium oxide
图1. 样品图。(a) 煤矸石; (b) 电石渣; (c) 脱硫石膏; (d) 磷石膏; (e) 硫酸钙; (f) 氧化钙

Table 1. Chemical composition of coal gangue, carbide slag, and desulfurization gypsum (wt.%)
表1. 煤矸石、电石渣、脱硫石膏化学成分(wt.%)

原料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	Loss
煤矸石	59.62	20.82	3.73	0.67	1.75	1.86	0.18	1.68	—	—	11.55
电石渣	3.23	1.08	0.24	67.9	0.12	1.23	0.13	1.1	0.32	—	25.88

续表

脱硫石膏	5.23	2.33	—	39.63	1.18	1.02	0.79	0.23	0.12	49.35	1.14
------	------	------	---	-------	------	------	------	------	------	-------	------

注：R₂O 表示碱金属氧化物总量(R₂O = Na₂O + K₂O)。Loss 表示灼烧失量。

Table 2. Chemical composition analysis of phosphogypsum
表 2. 磷石膏化学成分分析

样品	化学成分(%)													
	Si	Al	Fe	Ca	Mg	Ti	Na	K	S	F	P	Cl	Sr	Mn
磷石膏	5.587	0.501	0.553	54.66	0.288	0.141	0.297	0.443	33.342	3.083	0.774	0.106	0.126	0.099

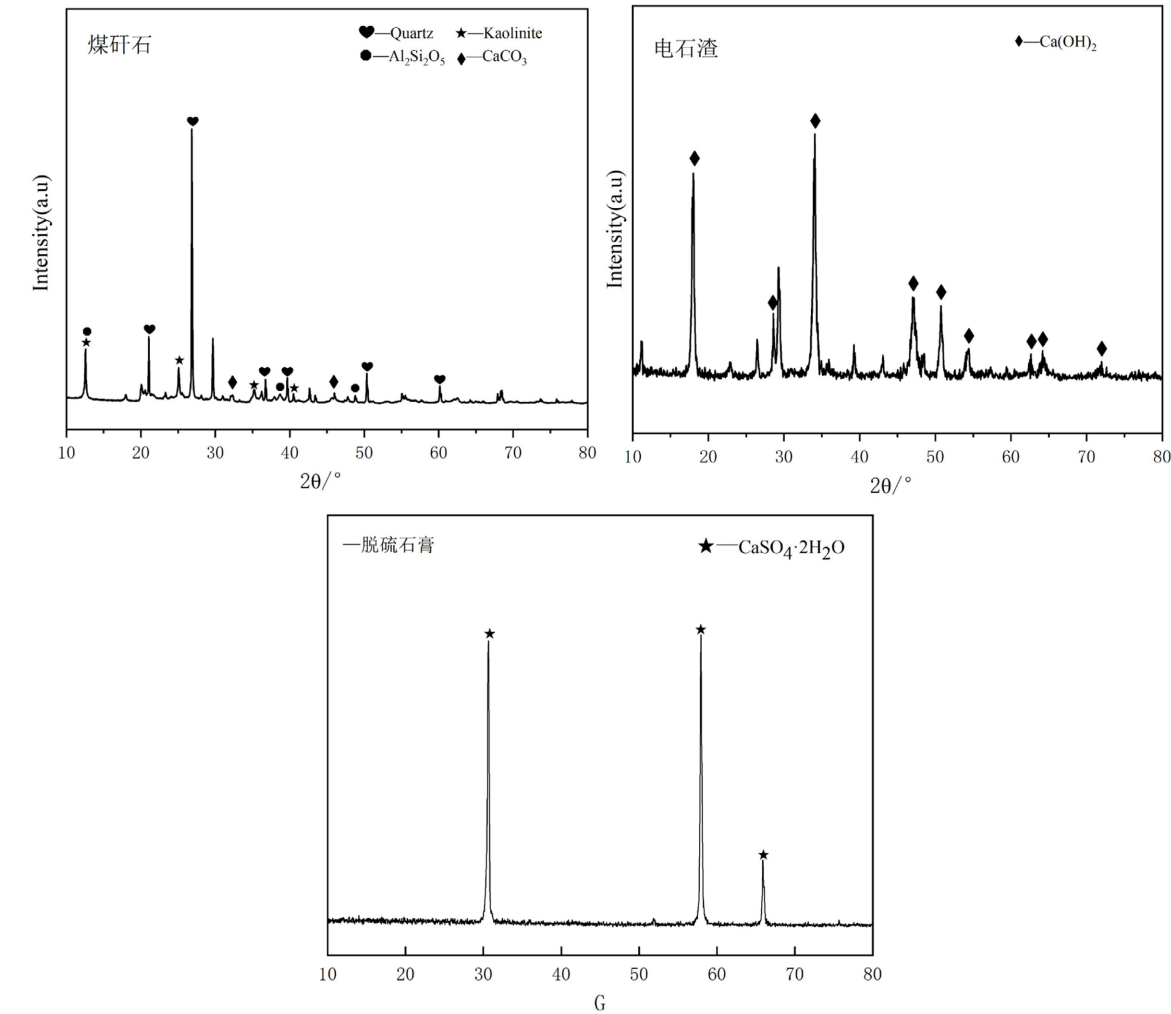


Figure 2. XRD patterns of coal gangue, carbide slag, and desulfurization gypsum
图 2. 煤矸石、电石渣、脱硫石膏的 XRD 谱图

由表 1 和图 2 知，煤矸石中主要矿物成分是石英(Quartz)、高岭石(Kaolinite)和一定量的方解石(CaCO₃)，石英提供惰性骨架，高岭石在高温下分解为莫来石并释放二氧化硅(SiO₂)和氧化铝(Al₂O₃) [18]。电石渣主要矿物是氢氧化钙(Ca(OH)₂)，碱性强，能在高温下参与硅酸盐和铝酸盐反应[19]。脱硫石膏主要矿物为二水石膏(CaSO₄·2H₂O)。在高温下逐步脱水生成半水石膏与无水石膏，参与形成硫铝酸盐(AFt 相)

或硫酸盐矿物[20]。

2.2. 试验设备

颚式破碎机(PEF100 × 600, 江西维克多国际矿业装备有限公司)、水泥试验磨(SM500 × 500, 河北大宏试验仪器有限公司)、电磁制样粉碎机(DF-4, 上虞市道墟伟晨仪器厂)、手动压片机(SYP-15T, 河南诺巴迪材料科技有限公司)、高温炉(NBD-M1500-50IT2F, 诺巴迪材料科技有限公司)、水泥净浆搅拌机(NJ-160 A, 河北大宏试验仪器有限公司), X 射线衍射仪(X 射线衍射(XRD)测试采用日本理学公司(Rigaku) Smart Lab 型 X 射线衍射仪, Cu K α 辐射($\lambda = 0.15406$ nm), 扫描范围 $2\theta = 5^{\circ}\sim 80^{\circ}$, 步长 0.02° , 扫描速度 $4^{\circ}/\text{min}$)。

2.3. 试验配比设计

配合比采用碱度(Cm)、铝硫比(P)和铝硅比(N)三模量法计算材料比例[21]。如式(1)~(3)所示。

$$Cm = \frac{\omega(\text{CaO})}{\omega(\text{SiO}_2) + \omega(\text{Al}_2\text{O}_3)} \tag{1}$$

$$P = \frac{\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)}{\omega(\text{SO}_3)} \tag{2}$$

$$N = \frac{\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)}{\omega(\text{SiO}_2)} \tag{3}$$

其中, Cm 表示在水泥熟料中形成所需相的原料中钙的充足性。Cm 值大于 1 表示 CaO 过量, 导致熟料中存在游离 CaO, 这在水泥生产中是不利的。相反, Cm 值低于 1 表示 CaO 不足以满足相形成要求。铝硫比(P)由 Al₂O₃ 与 SO₃ 的比例决定。如果 P 超过 3.82, 则意味着 AFt 相的形成缺乏 SO₃ 铝硅比(N)是反映主要相平衡的关键因素, 对水泥熟料的质量有显著的影响。

Table 3. Mix proportion design of composite cementitious materials
表 3. 复合胶凝材料配比方案

编号	原材料量(g)						水胶比 (%)	养护方式
	煤矸石	脱硫石膏	电石渣	硫酸钙	磷石膏	氧化钙		
N-A0	59.4	24.7	15.9	-	-	-	0.3	自然
N-A1	51.3	-	35.6	13.1	-	-		
N-A2	40.6	-	23.7	-	35.7	-		
N-A3	48.6	-	-	21.5	-	29.9		
N-A4	55.6	-	-	-	5.6	38.8		
N-A5	42.1	20.6	-	-	-	37.3		

2.4. 烧结和养护条件

本试验制备的固碳胶凝材料是由煤矸石为主, 再使用电石渣, CaO, CaSO₄, 脱硫石膏和磷石膏复配制成, 具体配合比如表 3 所示。N-A0、N-A1、N-A2、N-A3、N-A4 和 N-A5 的 6 组配比分别 1200℃、1300℃和 1400℃煅烧并保温 60 min, 自然冷却至室温, 再分别磨成粉, 以水胶比 0.3 制成 20 mm × 20 mm × 20 mm 立方体试块。试块填入模养护 24 小时后脱模, 自然条件下养护。

2.5. 性能测试及表征

在试块养护完成后,选择硬化体进行破碎后并用无水乙醇浸泡 1 h 终止水化,以刚玉粉与原料 1:4 的比例制备样品,利用 XRD 衍射试验仪进行 XRD 物相分析。

3. 结果与分析

本章基于不同温度下的烧结矿物组成变化以及力学性能测试结果,对实验样品的结构与性能进行了系统分析。通过 XRD 分析了不同煅烧温度(1200℃、1300℃、1400℃)下各配比试样的物相演化规律,探讨了硫酸盐种类及掺量对硅酸盐、硫铝酸盐等主要活性相生成的影响,为优化配比与工艺参数提供依据。

3.1. 不同温度下烧结产物物相变化

3.1.1. 1200℃相分析

图 3 和图 4 反映了在 1200℃煅烧后自然养护的 XRD 定性与定量分析,在 1200℃的煅烧温度下,硫酸盐的存在促进了 AFt 相的生成,同时抑制了铝酸三钙(C₃A)的形成。脱硫石膏有效地生成了 AFt 相,增加了材料的早期强度。电石渣通过提供高活性 CaO,促进了 AFt 相的形成,但 CaO 的局部团聚易造成游离 CaO 富集,从而稍微降低了 AFt 相的转化率。此外,磷石膏中的五氧化二磷(P₂O₅)与 Al₂O₃ 结合,形成磷酸钙(3CaO·P₂O₅),抑制硫铝酸钙(3CaO·Al₂O₃·CaSO₄)的生成,降低了 AFt 相的比例。

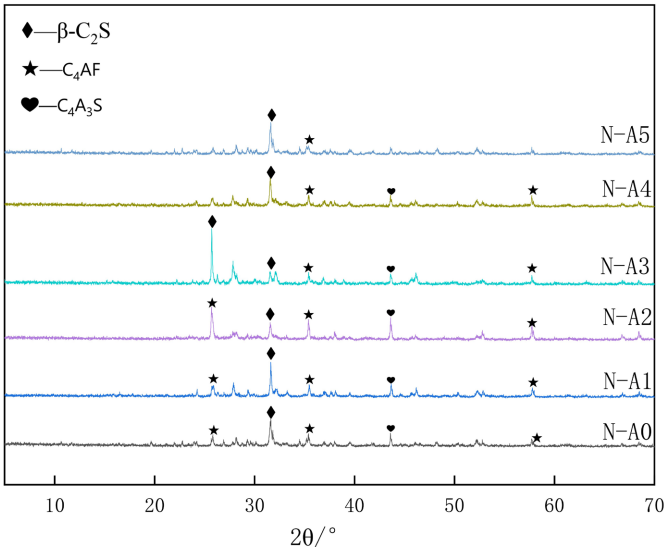
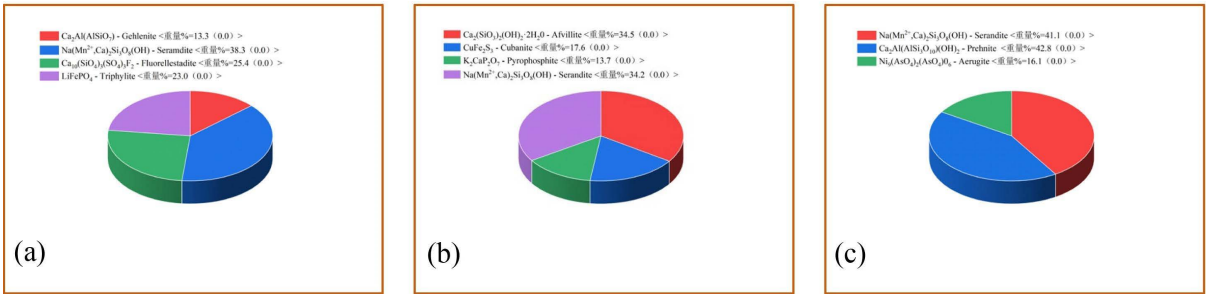


Figure 3. Qualitative XRD analysis of the sample calcined at 1200℃
图 3. 1200℃煅烧后的 XRD 定性分析



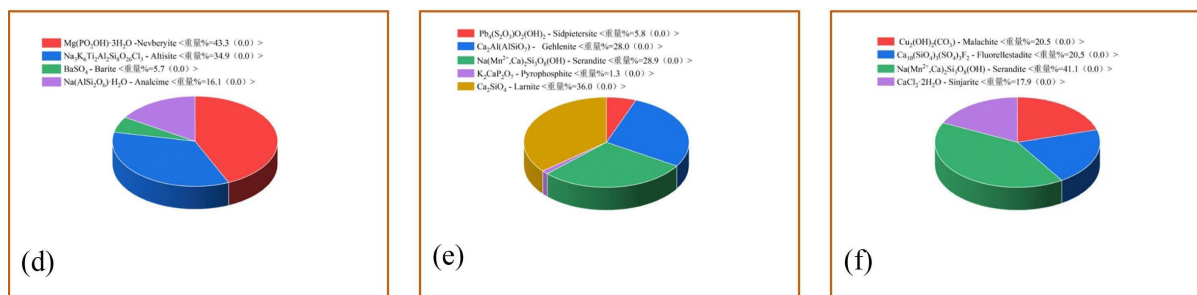


Figure 4. Quantitative XRD analysis of samples calcined at 1200°C. (a) NA-0; (b) NA-1; (c) NA-2; (d) NA-3; (e) NA-4; (f) NA-5

图 4. 1200°C 煅烧后的 XRD 定量分析。(a) NA-0; (b) NA-1; (c) NA-2; (d) NA-3; (e) NA-4; (f) NA-5

3.1.2. 1300°C 相分析

图 5 和图 6 显示, 1300°C 煅烧后各配比的物相有明显差异。N-A3 中, CaSO₄ 与煤矸石中的 SiO₂、Al₂O₃ 反应生成硅酸三钙(C₃S), 该相是高强度胶结相 N-A0 和 N-A5 中, 脱硫石膏中的 CaSO₄ 部分分解为 CaO, 并与 SiO₂ 反应生成硅酸二钙(C₂S), 有助于增强材料强度。N-A2 和 N-A4 中, PO₄³⁻ 与 CaO 优先反应生成磷酸钙, 挤压了 C₂S、C₃S 的生成区, 同时 SO₄²⁻ 与 PO₄³⁻ 竞争结合 CaO, 形成硫酸盐 - 磷酸盐复合相, 或与 C₂S 形成固溶体, 降低硅酸盐相的稳定性。这些矿物相可能降低材料的整体力学性能。N-A1 中, 电石渣中的 SiO₂ 与 CaO 反应生成钙硅石(wollastonite, CaSiO₃), 但该相为非胶凝性矿物, 因此不利于强度提升。

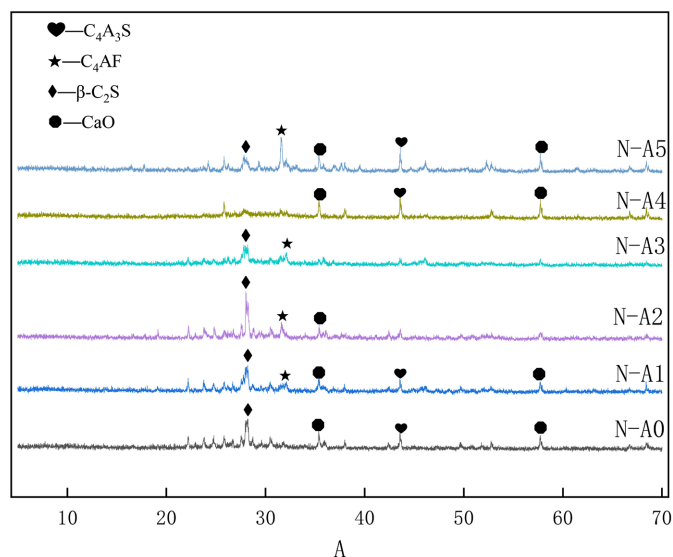
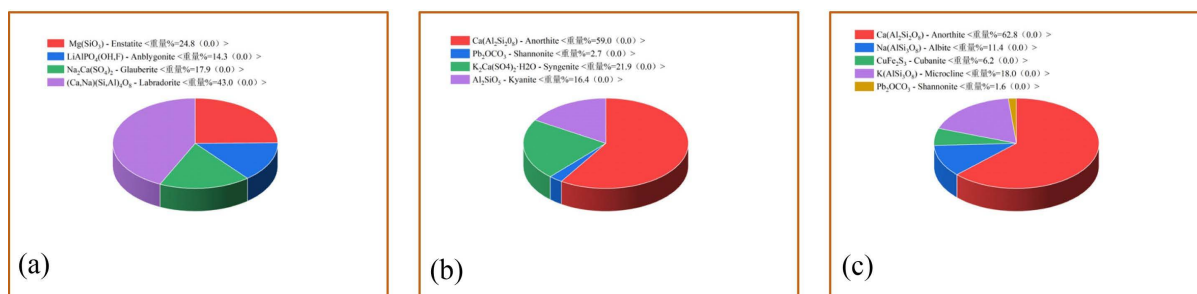


Figure 5. Qualitative XRD analysis of the samples calcined at 1300°C

图 5. 1300°C 煅烧后的 XRD 定性分析



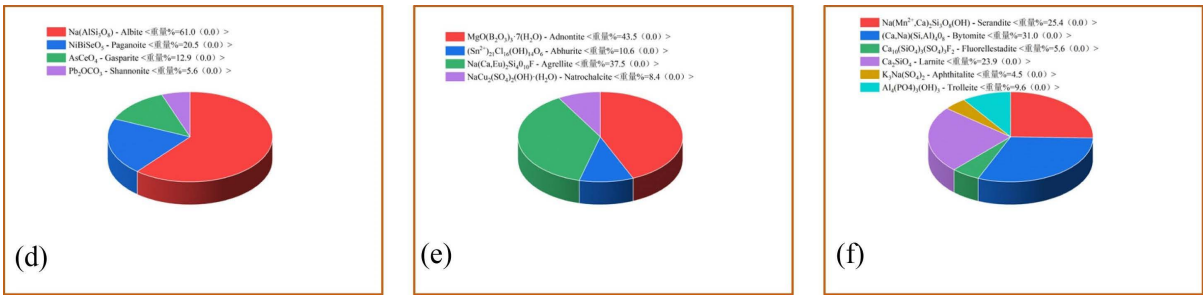


Figure 6. Quantitative XRD analysis of the samples calcined at 1300°C. (a) NA-0; (b) NA-1; (c) NA-2; (d) NA-3; (e) NA-4; (f) NA-5

图 6. 1300°C 煅烧后的 XRD 定量分析。(a) NA-0; (b) NA-1; (c) NA-2; (d) NA-3; (e) NA-4; (f) NA-5

3.1.3. 1400°C 相分析

图 7 和图 8 表明，在 1400°C 高温下，硫酸盐和磷石膏的影响更加显著。N-A3 中，硫酸盐与煤矸石中的金属离子(如 Cu、Na)结合形成复合硫酸盐矿物，部分 CaSO_4 在高温下仍保留结构，其余分解生成 CaO 和 SO_3 ， CaO 进一步参与硅酸盐反应，生成高活性矿物。N-A4 中， PO_4^{3-} 的存在抑制了硅酸盐生成，磷酸盐与硫酸盐的竞争反应生成磷酸钙，消耗了有效 CaO ，从而减少硅酸盐矿物的产量，降低材料性能。N-A5 中，脱硫石膏中的 Cl^- 与 CaO 反应生成 CaCl_2 ，抑制硅酸盐生成并降低致密性，并可能导致 CaCl_2 在晶格边界析出，增加脆性。尽管硫酸盐仍是物相组成的主导因素，但 Cl^- 会导致杂相增加，在高温下与 CaO 、 Al_2O_3 反应形成低熔点盐类，导致液相区提前出现，加快烧结，降低最终矿物相的稳定性。N-A0 中，未燃碳在煅烧中完全氧化产生 CO_2 孔隙，同时 Cl^- 与 CaO 生成 CaCl_2 ，最终形成非活性钙硅石，使强度降低。N-A1 中，电石渣中的 SiO_2 生成钙硅石，未燃碳氧化导致孔隙率升高， CaSO_4 未能有效促进硅酸盐生成，性能下降。N-A2 中， PO_4^{3-} 与 CaO 反应生成磷酸钙，同时 SiO_2 与 CaO 生成钙硅石，双重杂质作用使物相复杂且缺乏胶凝性，降低材料强度。总体来说，高温煅烧下各配比的物相生成主要受硫酸盐类型与杂质离子的共同影响： $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 基本转化为 C_3S ； AFt 相残留极少； PO_4^{3-} 的存在抑制 C_3S 晶核的成核速率，降低硅酸盐相的晶体生长速率。 Cl^- 会促进液相提前出现，使得扩散速率增加，但生成的晶体缺乏有序性，最终表现为非活性相。

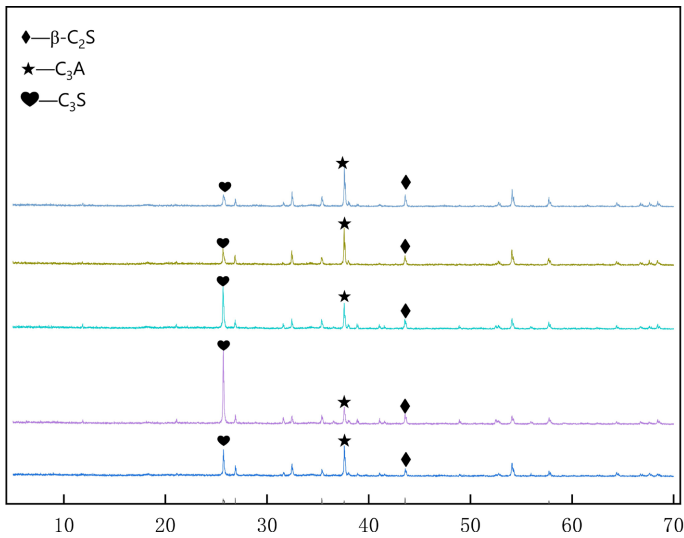


Figure 7. Qualitative XRD analysis of the samples calcined at 1400°C

图 7. 1400°C 煅烧后的 XRD 定性分析

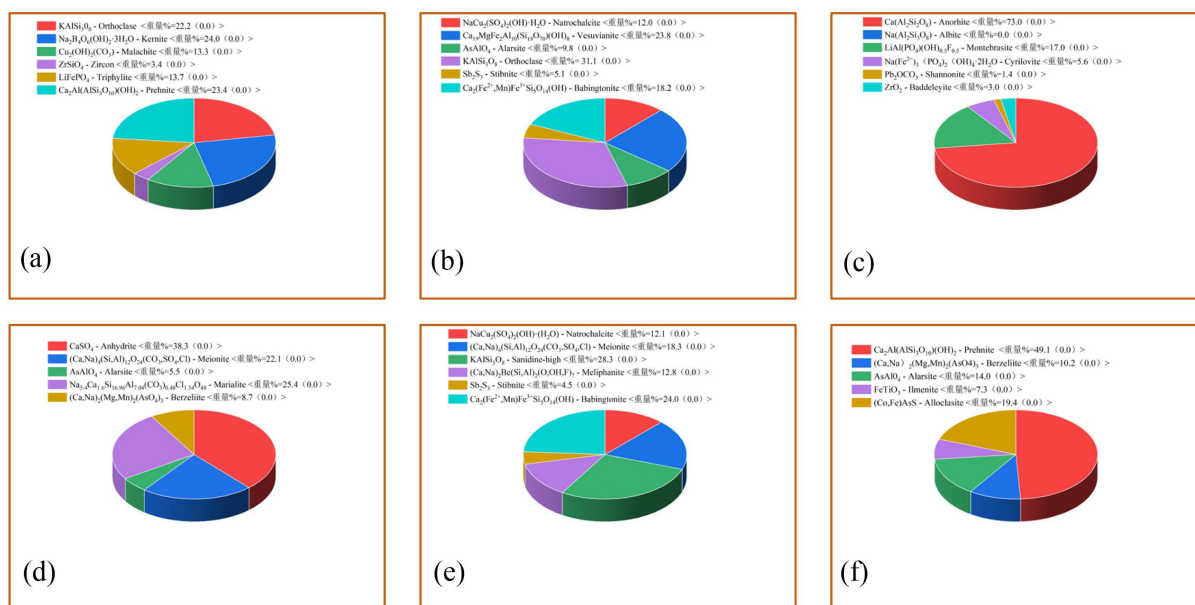


Figure 8. Quantitative XRD analysis of the samples calcined at 1400°C. (a) NA-0; (b) NA-1; (c) NA-2; (d) NA-3; (e) NA-4; (f) NA-5

图 8. 1400°C 煅烧后的 XRD 定量分析。(a) NA-0; (b) NA-1; (c) NA-2; (d) NA-3; (e) NA-4; (f) NA-5

4. 结论

(1) 本研究表明, 煤矸石与电石渣在高温作用下能够共同促进硅酸钙类矿物的生成, 而硫酸盐组分在调控矿物相演化方面发挥了关键作用。

(2) 适量 SO_4^{2-} 可加速反应进程并促进 AFt 相的形成, 但当含量过高时, 会引入额外的副相, 削弱活性相的稳定性。

(3) 杂质离子(如 PO_4^{3-} 、 Cl^-)在体系中表现为竞争效应, 会阻碍高活性矿物的形成, 说明其对烧结反应路径具有显著影响。

(4) 综合结果表明, 不同来源的硫酸盐在烧结过程中的作用机制存在差异, 这为固废胶凝材料设计提供了新的调控思路。

参考文献

- [1] 陈平, 王伟, 李强. 钙硅比对硅酸钙矿相烧结行为和固碳能力的影响[J]. 硅酸盐通报, 2025, 44(1): 297-304.
- [2] Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y. and Jullien, A. (2010) Environmental Impact of Cement Production: Detail of the Different Processes and Cement Plant Variability Evaluation. *Journal of Cleaner Production*, **18**, 478-485. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.12.014>
- [3] Scrivener, K.L., John, V.M. and Gartner, E.M. (2018) Eco-Efficient Cements: Potential Economically Viable Solutions for a Low- CO_2 Cement-Based Materials Industry. *Cement and Concrete Research*, **114**, 2-26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- [4] Juenger, M.C.G., Winnefeld, F., Provis, J.L. and Ideker, J.H. (2011) Advances in Alternative Cementitious Binders. *Cement and Concrete Research*, **41**, 1232-1243. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.012>
- [5] 李红轩, 张晓, 赵丽. 铁铝酸盐、硫铝酸盐和硅酸盐水泥的水化进程对比研究[J]. 硅酸盐通报, 2024, 40(2): 267-274.
- [6] Winnefeld, F. and Lothenbach, B. (2010) Hydration of Calcium Sulfoaluminate Cements—Experimental Findings and Thermodynamic Modelling. *Cement and Concrete Research*, **40**, 1239-1247. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.014>
- [7] 余舟, 刘伟, 孙健. 典型硫酸盐固废复合胶凝材料制备与微观特性研究[J]. 无机盐工业, 2024, 55(6): 77-83.

-
- [8] Matschei, T., Lothenbach, B. and Glasser, F.P. (2007) Thermodynamic Properties of Portland Cement Hydrates in the System $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$. *Cement and Concrete Research*, **37**, 1379-1410. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.06.002>
- [9] Yuan, P., Li, M., Chen, S. and Xiang, W. (2024) Advances in Phosphogypsum Calcination and Decomposition Processes in Circulating Fluidized Beds. *ACS Omega*, **9**, 39307-39325. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c05475>
- [10] Ababneh, H., Xu, C. and Dally, B. (2024) Unlocking the Value of Phosphogypsum Waste: Steam Calcination for Efficient Decomposition and Resource Recovery. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, **2024**, 1-15. <https://doi.org/10.1080/08827508.2024.2426148>
- [11] El Khessaimi, Y., Taha, Y., El Mahdi Safhi, A., Hakkou, R. and Benzaazoua, M. (2022) Synthesis of MgO-Belite Calcium Sulfoaluminate Cement from Phosphate Mine Waste Rock and Phosphogypsum. *Materials Today: Proceedings*, **58**, 1081-1090. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.136>
- [12] Ennaciri, Y. and Bettach, M. (2023) The Chemical Behavior of the Different Impurities Present in Phosphogypsum: A Review. *Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements*, **199**, 129-148. <https://doi.org/10.1080/10426507.2023.2281489>
- [13] Ren, C., Zhao, Y., Wu, K., Wu, S., Wang, W. and Chen, L. (2025) Thermodynamic Prediction of and Synthesis of Sulfoaluminate-Phosphate Cementitious Material Clinker Using High Magnesium Solid Waste. *Ceramics International*, **51**, 12711-12720. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.01.110>
- [14] Moundounga, C.M. (2022) Contribution to the High Temperature Thermodynamics of OPC Clinker Phases. Université Grenoble Alpes.
- [15] Ghoroi, C. (2007) Kinetics of Cement Clinkerization: A Study of Multi-Step Solid Phase Reactions. Indian Institute of Technology.
- [16] Zhang, J., Cui, K., Yang, Y. and Chang, J. (2024) Investigation on the Preparation of Low Carbon Cement Materials from Industrial Solid Waste Phosphogypsum: Clinker Preparation, Cement Properties, and Hydration Mechanism. *Journal of Cleaner Production*, **452**, Article ID: 142203. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142203>
- [17] Zhang, M., Chen, B. and Zhu, W. (2025) Performance and Hydration Mechanisms of Ultrafine Iron Ore Tailings Enhanced Supersulfated Cement with High Phosphogypsum Content. *Cement and Concrete Composites*, **157**, Article ID: 105891. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105891>
- [18] 张荣, 刘宁, 王超. 煤矸石煅烧活化机理及其在胶凝材料中的应用[J]. 工业建筑, 2019, 49(6): 109-115.
- [19] 王立, 李洪涛, 陈斌. 电石渣在建筑材料中的利用研究进展[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(3): 1-7.
- [20] Yao, Z.T., Ji, X.S., Sarker, P.K., Tang, J.H., Ge, L.Q., Xia, M.S., *et al.* (2015) A Comprehensive Review on the Applications of Coal Fly Ash. *Earth-Science Reviews*, **141**, 105-121. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.016>
- [21] 陈家富, 周静, 李伟. 水泥熟料三模量配比设计方法及应用[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(12): 3892-3899.