

分类号：
学号：20222307223

密级：
单位代码：10759

石河子大学

博士学位论文



电石渣芒硝协同激发的碱激发材料 性能调控和机理研究

学位申请人	闫仕杰
指导教师	雷志刚 教授 王金玉 副教授
申请学位门类级别	工学博士
学科、专业名称	化学工程与技术
研究方向	固废资源化
所在学院	化学化工学院

中国·新疆·石河子

2025年06月

分类号:
学号: 20222307223

密级:
单位代码: 10759

石河子大学

博士学位论文



电石渣芒硝协同激发的碱激发材料 性能调控和机理研究

学位申请人	闫仕杰
指导教师	雷志刚 教授
	王金玉 副教授
申请学位门类级别	工学博士
学科、专业名称	化学工程与技术
研究方向	固废资源化
所在学院	化学化工学院

中国·新疆·石河子
2025年06月

**Performance Optimization and Mechanistic Study of Alkali-Activated
Materials Activated by Calcium Carbide Residue and Glauber's Salt**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Doctor of Engineering

By

Yan Shi-jie

Recycling of solid waste

Dissertation Supervisor: Prof. Lei Zhi-gang

Prof. Wang Jin-yu

June, 2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：

时间： 2025 年 05 月 28 日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：

时间： 2025 年 05 月 28 日

导师签名：

时间： 2025 年 05 月 28 日

摘要

随着燃煤电厂和化工等行业的发展，粉煤灰等工业副产物不断增多，而当前固废多采用填埋处置，不仅导致重金属渗滤及扬尘污染，还造成硅铝质资源大量闲置。同时，我国建材行业的 CO₂ 排放量高居不下，不利于循环经济的发展。粉煤灰等固废替代传统建材原料的技术推广不足，也致使固废处理与碳减排形成双重压力。因此，迫切需要一种既可以高效处理工业副产物又能降低建材行业碳排放的方法。目前，利用工业固废制备碱激发材料可以促进固废的高效利用，且生产过程绿色环保。本文根据碱激发材料的特点，提出电石渣和芒硝协同激发粉煤灰制备碱激发材料的创新技术路线，建立材料组成与性能之间的宏观关系。之后，分析浸出机理和水化反应过程，揭示其强度发展机制和调控机制。针对在养护过程中出现的泛碱情况进行详细分析并提出相应的防止措施，最后计算电石渣芒硝协同激发的碱激发材料在制备过程中的碳排放和成本，为产业化的推广提供理论技术支持。全文的主要工作如下：

首先，证实电石渣芒硝协同激发粉煤灰制备碱激发材料的可行性，研究不同条件对材料性能的影响，分析水化过程中的物相变化和结构发展。实验发现电石渣芒硝含量为 10%，比例为 1:1，水固比为 21%，粉煤灰和电石渣粒度 < 75 μm，在 50°C 养护下制备的碱激发材料力学性能最佳，14 d 抗压强度 > 35 MPa，抗折强度 > 5 MPa。粉煤灰在电石渣和芒硝的共同作用下发生溶解，之后水化生成钙矾石、C-S-H、C-A-S-H 和 N-A-S-H 胶凝材料。在最佳条件下碱激发材料的结构较为致密，孔隙率较低。

其次，研究外加剂和前驱体类型对粉煤灰电石渣芒硝碱激发材料性能的影响，建立相关模型来预测碱激发材料的性能发展。实验发现萘系减水剂在粉煤灰体系中能够引起粉煤灰颗粒表面电荷分布变化，增加离子浸出，促进 N-A-S-H 和 C-S-H 的形成，使微观结构更加致密，力学性能显著提升。而萘系减水剂在粉煤灰微硅粉体系中会干扰 C-S-H 的形成，导致机械强度降低。对粉煤灰脱硫石膏体系影响则较小。此外，建立萘系减水剂、水固比和粉煤灰含量之间流动性和抗压强度的预测模型，且预测偏差小于 10%。

再者，考察粉煤灰在电石渣和芒硝体系下的浸出特性，分析碱浓度和温度对粉煤灰中 Si 和 Al 浸出的影响。浸出动力学表明：浸出过程主要受内扩散控制，高浓度浸出下的线性关系较高。粉煤灰在 3.25 mol/L OH⁻ 浓度下 Si 和 Al 的活化能分别为 69.42 kJ/mol 和 83.68 kJ/mol。采用化学组成分析法对粉煤灰类型进行分析，在 $nCa/(nSi+nAl)$ 和宏观性质间建立经验性公式。研究原材料特性对碱激发材料水化过程中放热的影响，实验发现 Krstulovic-Dabic 模型不适应于粉煤灰电石渣芒硝碱激发材料的前期反应，而后期反应的水化过程是：相边界反应 → 扩散过程。基于以上研究结果为指导，提出外加 Al 源的方法来提高样品早期放热，缩短诱导时间，优化硅铝酸盐凝胶网络的成核过程，加速反应，提升早期强度。

接着，设计四点式半浸泡法、水饱和湿沙基法和全浸泡法评估泛碱程度，明确泛碱成分和路径。泛碱是在湿度差异下，孔隙中的可溶性盐随着水分迁移的过程，成分主要是 Na_2SO_4 、 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 和 CaSO_4 。电石渣含量的增加、矿渣的加入以及芒硝的减少可以调控水化产物的生成，有效防止试块的泛碱和开裂。有机硅憎水剂阻碍体系中的水分迁移，降低泛碱程度；沸石的高比表面积和离子交换性质使得泛碱面积降低 69.86%；硼砂的加入改变泛碱的结晶性质，提升试块的强度并降低泛碱脱落度；聚丙烯纤维的连结作用和摩擦作用改善试块的强度，但是对抑制泛碱效果较差；炉渣骨料的加入同时改善泛碱程度、试块强度和脱落度。通过分析， Na^+ 的浸出直接关系泛碱的程度，材料组成和改性物质优化可以使游离碱浓度减少，提升反应速率，生成较多的水化产物，降低材料的孔隙率，使微观结构更加致密，泛碱程度降低。

最后，开展电石渣芒硝协同激发的碱激发材料生产过程中全生命周期评价。采用碳排放系数法，计算其碳排放和成本，并与相同等级的水泥基辅助胶凝材料和普通碱激发材料进行对比。阐明电石渣芒硝协同激发的碱激发材料在碳排放和经济方面的优势，在 20°C 养护工艺中电石渣芒硝协同激发的碱激发材料相比较于水泥基辅助胶凝材料和普通碱激发材料，碳排放降低 88.95% 和 89.93%，成本降低 33.64% 和 71.06%。在 50°C 养护工艺中电石渣芒硝协同激发的碱激发材料相比较于水泥基辅助胶凝材料和普通碱激发材料，碳排放降低 65.96% 和 77.01%，成本降低 26.91% 和 75.27%。之后，在工厂中进行实验初试，为电石渣芒硝协同激发的碱激发材料的工程化应用提供完整的方案。

关键词：粉煤灰基碱激发材料；电石渣；芒硝；性能调控；反应机理

Abstract

With the proliferation of coal-fired power plants and chemical industries, there has been a continuous accumulation of industrial by-products such as fly ash. Current disposal methods predominantly rely on landfilling, which presents significant environmental challenges including heavy metal leaching, dust pollution, and the underutilization of valuable silicon-aluminum resources. Furthermore, the construction materials sector contributes substantially to CO₂ emissions, creating dual challenges in solid waste management and carbon reduction that hinder circular economy development. Therefore, there is an urgent need for a method that can efficiently deal with industrial by-products and also reduce the carbon emissions of the building materials industry. At present, the preparation of alkali activated materials from industrial solid waste can promote the efficient use of solid waste and the production process is green and environmentally friendly. Based on the characteristics of alkali activated materials, an innovative technical route was proposed for the preparation of alkali activated materials by the co-activation of calcium carbide residue and Glauber's salt. The relationship between material composition and properties was established, the dissolution mechanism and hydration reaction process of fly ash were analyzed. The mechanism of strength development and regulation has been revealed. A detailed investigation is conducted on the alkali efflorescence observed during the curing process, with corresponding preventive measures proposed. The carbon emission and cost of alkali activated material in the complete preparation process were calculated to provide theoretical and technical support for industrialization. Listed below are the main results:

Firstly, the feasibility of synergistic activation of fly ash by calcium carbide residue and Glauber's salt for the preparation of alkali activated materials was confirmed, and influence in the properties of the materials under different conditions were investigated, and the changes in the physical phase and the structural development during the hydration process were analyzed. It was found that the best mechanical properties of alkali activated materials were prepared with 10% activator content, 1:1 calcium carbide residue: Glauber's salt, 21% water-solid ratio, and raw material particle size less than 75 μm , and the best mechanical properties of alkali activated materials were prepared under the maintenance of 50°C, with the compressive strength of > 35 MPa and the flexural strength of > 5 MPa at 14 d. The coal fly ash was dissolved rapidly under the joint action of calcium carbide residue and Glauber's salt, and then hydrated to produce ettringite, C-S-H, C-A-S-H and N-A-S-H cementing materials. Under optimal conditions, the alkali activated materials exhibit a denser microstructure and significantly reduced porosity.

Secondly, the effects of admixtures and precursor types on the properties of fly ash-calcium carbide residue-Glauber's salt alkali activated materials were investigated, and a relevant model was established to predict the development of the properties of the cementitious materials. It is found that naphthene

superplasticizer in fly ash system can change the charge distribution on the surface of fly ash particles, increase ion leaching, promote the formation of N-A-S-H and C-S-H, make the microstructure denser, and significantly improve the mechanical properties. The formation of C-S-H will be interfered with in the fly ash silica fume system, resulting in a decrease in mechanical strength. In fly ash desulfurization gypsum system has little effect. In addition, the prediction model of fluidity and compressive strength among naphthalene superplasticizer, water-solid ratio and fly ash content was established, and the prediction deviation was less than 10%.

Furthermore, the dissolution characteristics of fly ash under calcium carbide residue and Glauber's salt were investigated, and the effects of alkali concentration and temperature on the leaching of Si and Al from fly ash were analysed. The dissolution kinetics showed that the dissolution process was mainly controlled by internal diffusion, and the linear relationship was higher in the reaction of high concentration. The activation energies of Si and Al were 69.42 kJ/mol and 83.68 kJ/mol, respectively, for fly ash at a concentration of 3.25 mol/L OH⁻. The type of fly ash was analysed by chemical composition analysis, and empirical formulas were established between $nCa/(nSi+nAl)$ and the alkali activated materials properties; the effect of raw material properties on the heat release of the alkali activated materials in the hydration process was studied, and it was experimentally found that the Krstulovic-Dabic model was not adapted to the early reaction of fly ash- Calcium carbide residue-Glauber's salt alkali activated materials, and that the hydration process of the samples in late-stage reaction was: phase boundary reaction → diffusion process. Based on the above findings as a guide, the method of adding an external Al source was proposed to increase the early exotherm of the sample, shorten the induction time, accelerate the reaction process, and thus improve the early strength.

Then, four-point semi-immersion method, water-saturated wet sand base method and full immersion method were designed to evaluate the degree of efflorescence, and to clarify the composition and path of efflorescence. Efflorescence is a process in which soluble salts in pores migrate with water under the difference of humidity, and the components are mainly Na₂SO₄, Na₂CO₃·H₂O and CaSO₄. The increase of calcium carbide residue content, the addition of slag and the reduction of Glauber's salt can effectively prevent the cracking and efflorescence of the samples; the organosilicon hydrophobic agent impedes the migration of moisture in the system, which reduces the degree of efflorescence. The high specific surface area and ion exchange properties of zeolite reduce efflorescence area by 69.86%; the addition of borax changed the crystalline nature of efflorescence, improved the strength of the specimen and reduced the degree of efflorescence shedding; the linking and friction effect of polypropylene fiber improved the strength of the specimen, but the effect of inhibiting efflorescence was not good; the addition of blast furnace slag aggregate reduces the degree of efflorescence and the degree of shedding, and enhances the strength of the specimen. Through the analysis, the leaching of Na⁺ is directly related to the degree of

efflorescence. The optimization of material composition and modified substances can reduce the concentration of free alkali, increase the reaction rate, generate more hydration products, reduce the porosity of the material, make the microstructure more denser, and reduce the degree of efflorescence.

Finally, a full life cycle evaluation of the production process of alkali activated materials with the synergistic activation of calcium carbide residue and Glauber's salt was carried out. Its carbon emission and cost were calculated by using the carbon emission factor method, and compared with the same grade of cement-based supplementary cementing material and traditional alkali activated materials. Under the 20°C curing process, Alkali activated materials activated by calcium carbide residue and Glauber's salt reduce carbon emissions by 88.95% and 89.93%, and lower costs by 33.64% and 71.06%, compared to cement-based supplementary cementitious materials and traditional alkali activated materials, respectively. Under the 50°C curing process, Alkali activated materials activated by calcium carbide residue and Glauber's salt achieve 65.96% and 77.01% reductions in carbon emissions, alongside 26.91% and 75.27% cost reductions, relative to the same reference materials. Afterwards, experiments were carried out in the factory, which provide a complete solution for the engineering application of alkali activated materials.

Key words: Fly ash-based alkali activated materials; Calcium carbide residue; Glauber's salt; Performance optimization; Reaction mechanism.

目录

摘要	I
Abstract	III
目录	VI
第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.1.1 水泥行业碳排放概况	1
1.1.2 固体废弃物概况	2
1.2 碱激发材料研究现状	3
1.2.1 碱激发材料	4
1.2.2 碱激发材料前驱体	9
1.2.3 激发剂	12
1.3 碱激发材料水化调控、泛碱抑制和环境影响研究现状	17
1.3.1 碱激发材料的水化调控	17
1.3.2 碱激发材料的泛碱抑制	18
1.3.3 碱激发材料的环境影响	20
1.4 本文的选题意义和研究内容	21
1.4.1 选题意义	21
1.4.2 关键问题	21
1.4.3 研究思路与内容	22
第 2 章 原材料和实验方法	24
2.1 原材料及设备	24
2.1.1 碱激发材料前驱体	24
2.1.2 碱激发剂	26
2.1.3 其他试剂	27
2.1.4 实验设备	28
2.2 宏观测试	28
2.2.1 标准稠度和凝结时间	29
2.2.2 力学性能	29
2.2.3 流动度	29
2.2.4 干燥收缩	29
2.2.5 泛碱测试	29

2.3 微观测试	30
2.3.1 激光粒度分析	30
2.3.2 X 射线荧光光谱分析 (XRF)	30
2.3.3 X 射线衍射 (XRD)	30
2.3.4 傅里叶变换红外光谱 (FTIR)	30
2.3.5 热重分析 (TGA)	30
2.3.6 压汞法 (MIP)	30
2.3.7 扫描电子显微镜与能谱分析 (SEM-EDS)	31
2.3.8 电感耦合测试 (ICP-OES)	31
2.3.9 水化热测试	31
第 3 章 粉煤灰电石渣芒硝碱激发材料的组成设计研究	32
3.1 引言	32
3.2 粉煤灰电石渣芒硝碱激发材料的制备	32
3.2.1 原材料及配合比	32
3.2.2 样品的制备、测试与表征	32
3.3 粉煤灰电石渣芒硝碱激发材料的性能变化及分析	34
3.3.1 标准稠度和凝结时间	34
3.3.2 激发剂比例和含量	35
3.3.3 水固比	36
3.3.4 原材料粒度	37
3.3.5 养护温度	38
3.3.6 胶砂比	39
3.3.7 干燥收缩	40
3.4 粉煤灰电石渣芒硝碱激发材料的机理分析	41
3.4.1 水化产物相及含量分析	41
3.4.2 水化产物的化学键分析	43
3.4.3 微观结构和孔结构分析	44
3.4.4 粉煤灰电石渣芒硝碱激发材料反应机理分析	49
3.5 本章小结	50
第 4 章 外加剂和前驱体对粉煤灰电石渣芒硝碱激发材料性能的调控	51
4.1 引言	51
4.2 材料的制备和测试	51
4.2.1 原材料及配合比	51
4.2.2 样品的制备、测试与表征	51

4.3	早强剂对粉煤灰电石渣芒硝碱激发材料的调控	52
4.4	减水剂对粉煤灰电石渣芒硝碱激发材料的调控	53
4.5	前驱体对粉煤灰电石渣芒硝碱激发材料的调控	56
4.6	萘系减水剂对不同体系碱激发材料的影响及分析	57
4.7	萘系减水剂对粉煤灰电石渣芒硝碱激发材料的优化及预测分析	63
4.8	本章小结	66
第 5 章	粉煤灰电石渣芒硝碱激发材料的浸出和水化过程研究	68
5.1	引言	68
5.2	粉煤灰的浸出和碱激发材料的水化实验流程	68
5.3	粉煤灰在电石渣芒硝碱激发下的浸出过程分析	69
5.3.1	碱溶液浓度对粉煤灰的浸出过程的分析	70
5.3.2	温度对粉煤灰的浸出过程的分析	71
5.3.3	粉煤灰浸出过程机理分析	74
5.4	原材料特性对粉煤灰电石渣芒硝碱激发材料的力学性能影响及分析	75
5.4.1	力学性能分析	75
5.4.2	微观结构分析	78
5.4.3	水化机理分析	79
5.5	外加 Al 源对粉煤灰电石渣芒硝碱激发材料的力学性能、浸出过程和水化机理分析	80
5.5.1	力学性能分析	80
5.5.2	微观结构分析	83
5.5.3	浸出特性分析	85
5.5.4	水化机理分析	86
5.6	本章小结	90
第 6 章	电石渣芒硝协同激发的碱激发材料泛碱抑制的研究	91
6.1	引言	91
6.2	泛碱测试方法及成分分析	91
6.3	材料组成对粉煤灰基碱激发材料泛碱的影响	93
6.3.1	电石渣对粉煤灰基碱激发材料泛碱的影响和分析	94
6.3.2	矿渣对粉煤灰基碱激发材料泛碱的影响和分析	96
6.3.3	芒硝对粉煤灰矿渣基碱激发材料泛碱的影响和分析	97
6.4	改性材料对粉煤灰矿渣基碱激发材料泛碱的影响	98
6.4.1	有机硅憎水剂对粉煤灰矿渣基碱激发材料泛碱的影响和分析	98
6.4.2	沸石对粉煤灰矿渣基碱激发材料泛碱的影响和分析	100
6.4.3	硼砂对粉煤灰矿渣基碱激发材料泛碱的影响和分析	101

6.4.4 PP 纤维对粉煤灰矿渣基碱激发材料泛碱的影响和分析	103
6.4.5 骨料对粉煤灰矿渣基碱激发材料泛碱的影响和分析	104
6.5 电石渣芒硝协同激发的碱激发材料的抑制泛碱过程分析	105
6.5.1 泛碱试块分析	105
6.5.2 微观结构	106
6.5.3 Na ⁺ 迁移过程	107
6.6 本章小结	108
第 7 章 电石渣芒硝协同激发的碱激发材料碳排放分析及经济性评价	109
7.1 引言	109
7.2 不同胶凝材料的制备	109
7.3 电石渣芒硝协同激发的碱激发材料的全生命周期评价	111
7.3.1 研究目标与系统边界	111
7.3.2 原料单元及清单	112
7.3.3 球磨单元及清单	113
7.3.4 运输单元及清单	114
7.3.5 生产单元及清单	115
7.4 电石渣芒硝协同激发的碱激发材料的碳排放和经济性分析	116
7.4.1 全生命周期影响分析	116
7.4.2 敏感性分析	118
7.5 电石渣芒硝协同激发的碱激发材料制备实心砖的应用	123
7.5.1 原材料的选取	123
7.5.2 碱激发材料的制备及养护流程	124
7.5.3 性能测试和效益分析	124
7.6 本章小结	125
第 8 章 结论与展望	126
8.1 主要结论	126
8.2 创新点	127
8.3 展望	128
参考文献	129
致谢	147
作者简介	148

第 1 章 绪论

1.1 引言

2020 年 9 月 22 日,我国明确提出“3060”双碳目标,即中国在 2030 年前力争 CO₂ 排放量到峰值,2060 年争取实现碳中和。2021 年 7 月 16 日,全国碳排放权交易市场正式上线,同年《2030 年前碳达峰行动方案》中详细规划了中国在 2030 年前实现碳达峰的行动路线。方案中,关于建材方面,明确强调要推动水泥错峰生产、鼓励使用当地固废、加快新型胶凝材料研发等;关于循环经济方面,要加大固废利用,以粉煤灰、石膏等为主,推进资源循环利用。“双碳”目标的实行可以更好地促进我国能源结构的优化,推动经济高质量发展,有效降低碳排放,恢复良好生态环境。目前,建材行业正处于市场需求波动、产业结构调整、高质量发展的新阶段,以可再生资源 and 能源为主,开发环境友好和高质量发展的可持续发展模式是一种趋势。

1.1.1 水泥行业碳排放概况

图 1-1 展示了近些年全球碳排放情况^[1],由图可知,全球的年碳排在 350 亿吨左右。根据《中华人民共和国气候变化第一次双年透明度报告》,中国的年碳排放约占全球碳排放的 30%。由图 1-2 可知,我国水泥产量约 20 亿吨/年,水泥生产过程中的碳排放占全国碳排放的 12%左右,高于全球 7-8%的平均水平^[2]。

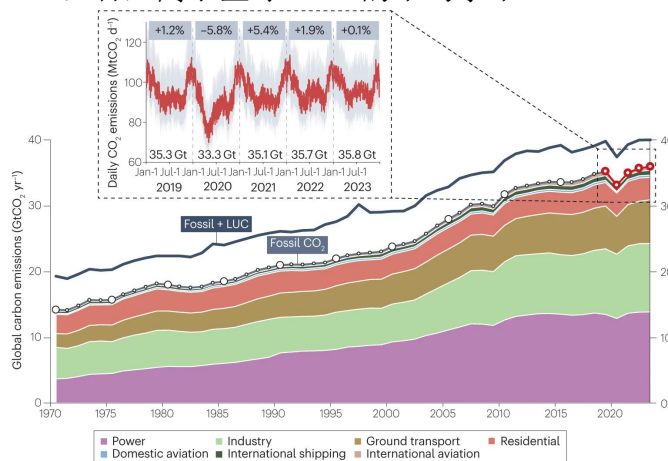


图 1-1 全球二氧化碳排放量^[1]

Figure 1-1 Global CO₂ emissions^[1]

控制水泥基材料向低碳胶凝材料转型,对该行业实现碳达峰和碳中和至关重要。对于水泥行业的节能减排措施,我国的技术路线主要为三个阶段^[3]: (1) 2020-2025 年为

峰值期，此时期主要是保证水泥行业稳定、以节能减排为主；（2）2026-2035 年为稳定期，此时期提高能源效率、原料替代、燃料替代、低碳水泥技术和碳捕获、利用与封存技术（CCUS）技术的减排量分别为 27%、8%、11%、15%和 39%；（3）2036-2060 年为碳中和期，此时期提高能源效率、原料替代、燃料替代、低碳水泥技术和 CCUS 技术的减排量分别为 8%、4%、27%、28%和 33%。控制水泥基材料碳排放是实现碳减排目标的重要环节，是决定高能耗产业绿色转型的关键。同时，其低碳化还可以推动传统建材产业技术革新，为可持续化发展提供产业路径。

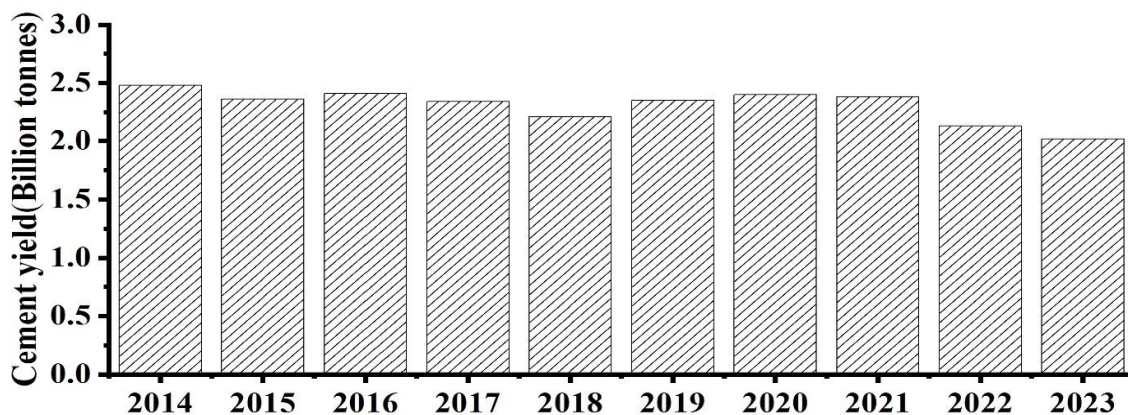


图 1-2 中国历年水泥产量

Figure 1-2 Cement production in China over the years

1.1.2 固体废弃物概况

固体废弃物通常指生产、生活或其他活动中产生的固体、半固体废弃物。按照产生类型可以分为以下四类：城市生活垃圾、工业废弃物、农业废弃物和其他废弃物。工业固体废物可分为一般工业固体废物（粉煤灰、脱硫石膏等）和危险工业固体废物（如铝灰、城市垃圾焚烧废物等）^[4]。

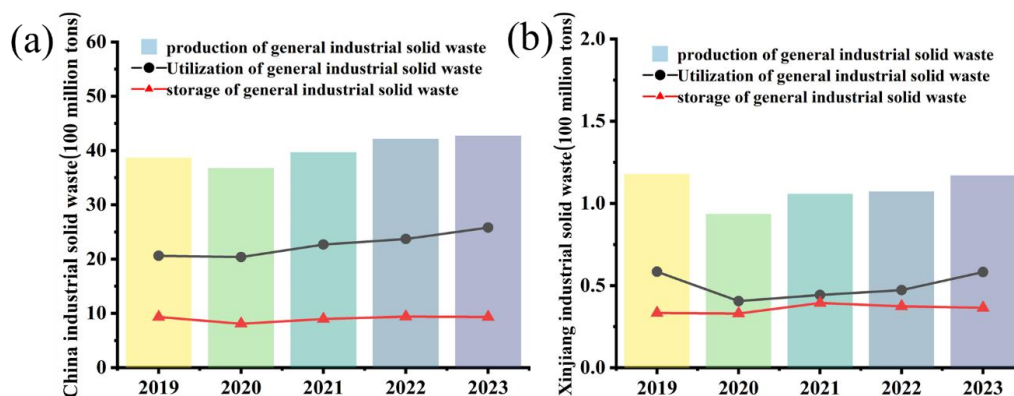


图 1-3 一般工业固废：(a) 中国和 (b) 新疆

Figure 1-3 General industrial solid waste: (a) China and (b) Xinjiang

工业固体废物是指工业企业在日常生产中产生的各种废渣、粉尘和其他废物。根

据国家数据，从图 1-3 中可以看出，近年来，我国一般工业固废产生量约在 42 亿吨，利用量为 25 亿吨，储存量为 9.3 亿吨。其中新疆的一般工业固废产生量约在 1.1 亿吨，利用量为 6000 万吨，储存量为 3600 万吨。当前，我国工业固体废弃物的总量呈上升趋势，但利用率较低，仅 55%左右^[5]，每年会有一定数量的固废被搁置。未处理的固废通常会被堆积或填埋，不仅占用大量的土地，而且其中的有害物质会渗入地下水中，污染土地和水源。尤其要注意的是，堆放中的工业废弃物，也会在空气中传播，对人体健康产生影响。因此，将工业固废制备成建筑材料可以大规模消纳堆积的固废，缓解环境压力，制备的材料还具有安全环保，成本低廉等优势，兼具资源循环和经济效益。

1.2 碱激发材料研究现状

碱激发材料是一类通过碱性溶液化学激活硅铝质前驱体形成的无机胶凝材料，其组分主要包括两个方面^[6]：激发剂（如 NaOH、 Na_2SiO_3 、 Na_2CO_3 等）和碱激发前驱体（如粉煤灰、矿渣、偏高岭土等）。相比较于水泥，碱激发材料的碳排放更低，较为环保。首先，生产过程不需要煅烧，能耗低，碳排放低，制备过程简单。其次，碱激发材料具有更好的耐酸性能、耐腐蚀性能等，如 C-S-H 在高温条件下的结构不稳定，而三维铝硅酸盐凝胶具有优异的耐火性^[7]。最后，制备过程可以利用现存的固体废弃物作为前驱体，解决大宗固废难处理问题，并减少固废处理的经济压力。如图 1-4 所示，据统计，实验用碱激发材料以工业废料和副产物（例如，粉煤灰、硅灰、炉渣、水泥窑粉尘等）为前驱体材料的占比可以达到 78.7%。

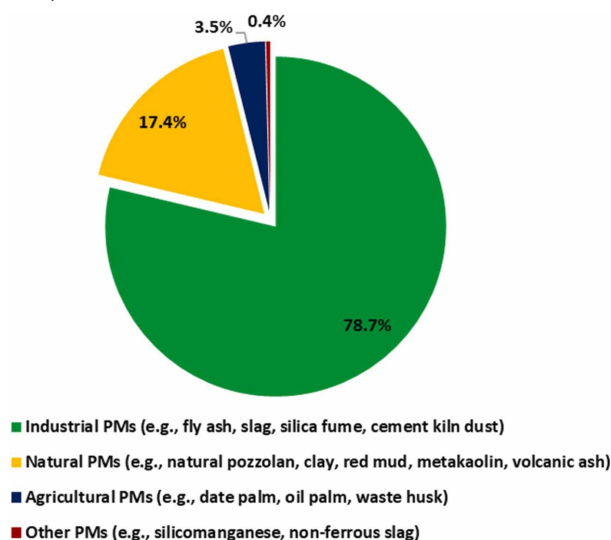


图 1-4 每种前驱体材料主要类别（工业、天然、农业等）的出版物比例（2000 年至 2024 年）^[8]

Figure 1-4 The proportion of publications (from 2000 to 2024) per precursor materials main categories (industrial, natural, agricultural, and others)^[8]