



煤气化渣理化特性及其制备建筑材料研究进展

顾晓薇 葛晓伟 刘少迁 丁学成 王莉 黄冬蔚 王达伟 马以勤

引用本文:

顾晓薇, 葛晓伟, 刘少迁, 等. 煤气化渣理化特性及其制备建筑材料研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 29–45.
GU Xiaowei, GE Xiaowei, LIU Shaoqian. Research progress on physical and chemical properties of coal gasification slag and its preparation of building materials[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 29–45.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0665>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤气化渣资源化利用综述

Review on resource utilization of coal gasification slag
煤炭科学技术. 2024, 52(8): 192–208 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1147>

煤气化渣特性分析及综合利用研究进展

Research progress characteristics analysis and comprehensive utilization of coal gasification slag
煤炭科学技术. 2022, 50(11): 251–257 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/2a495359-0e29-4312-ab2f-8a48f369ec17>

煤气化渣理化特性及其所含重金属迁移规律综述

Review of physical and chemical characteristics and heavy metal migration rules of coal gasification slag
煤炭科学技术. 2025, 53(2): 426–443 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0475>

煤基灰/渣的大宗固废资源化利用现状及发展趋势

Resource utilization status and development trend of bulk solid waste of coal-based ash/slag
煤炭科学技术. 2024, 52(6): 238–252 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1102>

气流床煤气化炉渣特性及综合利用研究进展

Review on characteristics and utilization of entrained-flow coal gasification residue
煤炭科学技术. 2021, 49(4): 227–236 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.04.028>

煤矸石资源化利用现状与进展

Current situation and progress of coal gangue resource utilization
煤炭科学技术. 2024, 52(1): 380–390 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1917>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

顾晓薇, 葛晓伟, 刘少迁, 等. 煤气化渣理化特性及其制备建筑材料研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 29–45.

GU Xiaowei, GE Xiaowei, LIU Shaoqian, et al. Research progress on physical and chemical properties of coal gasification slag and its preparation of building materials[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 29–45.

煤气化渣理化特性及其制备建筑材料研究进展

顾晓薇^{1,2,3}, 葛晓伟^{1,2,3}, 刘少迁^{1,2,3}, 丁学成^{1,2,3}, 王莉^{1,2,3}, 黄冬蔚^{1,2,3}, 王达伟^{1,2,3}, 马以勒^{1,2,3}

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 东北大学智慧水利与资源环境科技创新中心, 辽宁沈阳 110015; 3. 辽宁省固废产业技术创新研究院, 辽宁沈阳 110015)

摘要: 随着现代煤化工产业的快速发展, 煤气化技术在能源清洁高效利用中的地位日益突出, 煤气化渣(Coal Gasification Slag, CGS)作为气化过程所产生的工业副产物排放量不断增加。然而, CGS的综合利用率仍处于较低水平, 绝大多数以填埋或堆存的方式处理, 既占用土地资源, 又可能引发重金属浸出、碱性污染等一系列生态环境问题, 严重制约了煤化工行业的绿色低碳转型和资源可持续发展。近年来, 随着“双碳”目标的推进, CGS的资源属性逐渐被重视, 其潜在的火山灰活性、丰富的残余碳含量、较高的比表面积以及部分玻璃相结构赋予了其巨大的应用潜力。国内外相关研究表明, 通过合适的激发手段和配比优化, CGS可部分或全部替代水泥、作为混凝土掺合料、胶凝材料、制砖原料等, 实现其在建筑建材领域的资源化利用。然而, 现阶段CGS的利用仍存在路径分散、机理不清、理论体系不健全等问题, 制约其进一步推广应用。系统梳理了CGS的产生机理与分类方式, 可分为煤气化粗渣(CGCS)和煤气化细渣(CGFS)2类, 并通过对CGCS与CGFS在化学组成、矿物相构成、微观形貌、颗粒粒径分布及比表面积等方面对比分析, 揭示了其在原始性能上的异同及资源化潜能差异, 评估了对环境影响的风险。同时, 总结了CGS在建材领域的典型应用模式, 包括其在低碳胶凝材料、混凝土掺合料、建筑墙体材料、绿色再生骨料等方面的工程实践与试验研究成果, 证实了其在绿色可持续建筑材料中的应用潜力, 并分析了其在活性激发、残碳去除、界面相容性、长期耐久性等方面存在的技术瓶颈。明确了CGS在不同利用场景下的适用性, 例如, CGCS较低的碳含量更适用于胶凝材料或砖体材料的制备。此外, 结合当前的研究热点与政策导向, 展望了CGS资源化利用的未来发展方向, 重点提出通过多源协同激发、全固废耦合利用、功能材料制备、性能调控机制构建及生命周期评价等手段, 推动其向高性能、低碳化、工程化方向发展。

关键词: 煤气化渣; 工业副产物; 理化特性; 建筑材料; 资源化利用

中图分类号:TQ536.4 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2025)06-0029-17

Research progress on physical and chemical properties of coal gasification slag and its preparation of building materials

GU Xiaowei^{1,2,3}, GE Xiaowei^{1,2,3}, LIU Shaoqian^{1,2,3}, DING Xuecheng^{1,2,3}, WANG Li^{1,2,3}, HUANG Dongwei^{1,2,3},
WANG Dawei^{1,2,3}, MA Yile^{1,2,3}

(1. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Science and Technology Innovation Center of Smart Water and Resource Environment, Northeastern University, Shenyang 110015, China; 3. Liaoning Institute of Technological Innovation in Solid Waste Utilization, Northeastern University, Shenyang 110015, China)

Abstract: With the rapid development of the modern coal chemical industry, coal gasification technology plays an increasingly important role in the clean and efficient utilization of energy. The discharge of coal gasification slag (CGS), an industrial by-product of the gasifica-

收稿日期: 2025-05-15 策划编辑: 常琛 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.12438/cst.2025-0665

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFC3904300); 国家自然科学基金资助项目(52234004)

作者简介: 顾晓薇(1971—), 女, 辽宁凤城人, 教授, 博士生导师。E-mail: guxiaowei@mail.neu.edu.cn

通讯作者: 葛晓伟(1999—), 男, 安徽阜阳人, 博士研究生。E-mail: 1371190985@qq.com

tion process, continues to increase. However, the comprehensive utilization rate of CGS remains low, with most of the material disposed of through landfilling or stockpiling, which not only occupies land resources but also causes a series of ecological and environmental problems, such as heavy metal leaching and alkaline pollution. These issues seriously restrict the green, low-carbon transformation and sustainable development of the coal chemical industry. In recent years, the resource attributes of CGS have gained growing attention under the dual-carbon strategy. Its potential pozzolanic activity, abundant residual carbon content, high specific surface area, and partially glassy phase structure endow it with considerable application potential. Domestic and international studies indicate that, through appropriate activation strategies and mix design optimization, CGS can partially or completely replace cement, serving as a concrete admixture, cementitious material, or brick-making raw material, thereby enabling its resource utilization in the construction material sector. Nevertheless, the current utilization of CGS is limited by fragmented application routes, unclear reaction mechanisms, and an underdeveloped theoretical framework, which hinder its further promotion and application. The formation mechanism and classification of CGS are systematically reviewed, categorizing it into coal gasification coarse slag (CGCS) and coal gasification fine slag (CGFS). A comparative analysis of CGCS and CGFS in terms of chemical composition, mineral phases, microstructure, particle size distribution, and specific surface area reveals differences in their fundamental properties and resource utilization potential, while also assessing environmental impact risks. Typical application models in the field of construction materials are summarized, including CGS use in low-carbon cementitious binders, concrete admixtures, building wall materials, and green recycled aggregates. These applications demonstrate CGS potential in green and sustainable construction. The technical bottlenecks in activity excitation, residual carbon removal, interface compatibility and long-term durability are analyzed. The applicability of CGS in different utilization scenarios is further clarified; for instance, CGCS, with its lower carbon content, is more suitable for cementitious or brick materials. In addition, combined with the current research hotspots and policy orientation, the future development direction of CGS resource utilization is prospected. It is proposed to promote the development of CGS in the direction of high performance, low carbonization and engineering by means of multi-source collaborative excitation, all-solid waste coupling utilization, functional material preparation, performance regulation mechanism construction and life cycle assessment.

Key words: coal gasification slag; industrial by-products; physical and chemical properties; building materials; resource utilization

0 引言

中国是世界上最大的煤炭生产国和消费国^[1-2], 煤炭作为我国能源供应的基石, 在化石能源资源储量中占比高达94%, 长期以来在国家经济发展与社会稳定中发挥着不可替代的作用。根据《中国能源大数据报告(2024)》显示, 2023年全国煤炭消费量同比增长5.6%, 占一次能源消费总量的比重约为55.3%^[3]。尽管近年来风能、太阳能等清洁能源比例持续提升, 但煤炭依然占据着我国能源结构的主导地位, 特别是在电力、钢铁、水泥、化工等高耗能行业中, 其基础性作用短期内难以被替代。习近平总书记在第七十五届联合国大会上发表“中国力争于2030年前二氧化碳排放达到峰值、2060年前实现碳中和”的重要讲话。当前, 面对国内外复杂严峻的发展环境, 国际能源格局深度调整带来的风险和挑战, 我国亟须构建以多元化、清洁化为特征的现代能源体系, 特别是化解煤炭产能过剩和推进煤炭绿色发展转型成为当前的重要目标。

目前, 我国煤炭行业已形成涵盖上游生产设备供应、中游煤炭开采及加工、下游运输与终端利用的全过程产业链条, 构成了结构复杂、环节紧密的多层次能源系统。作为现代煤化工产业的核心与标志性技术^[4-5], 煤气化技术无疑为实现中游环节煤炭的洁

净、高效、多元化利用提供了关键性方案。

煤气化是指以煤或煤焦为原材料, 在高温条件下通过氧气(空气、富氧或纯氧)、水蒸气或氢气等气化剂的作用, 利用化学反应将煤中的可燃组分转化为气体燃料(主要为CO和H₂)的过程^[6-7]。相较于直接燃烧^[8], 煤的加氢液化或气化转化处理不仅能显著提升资源利用率, 而且有助于脱除其中的硫、氮等有害杂质, 从而得到更洁净的液体燃料和化工产品。然而, 煤气化过程不可避免地产生大量固体副产物, 即煤气化渣(Coal Gasification Slag, CGS)。据统计, 每吨煤在气化过程中产生15%~20%的CGS, 我国CGS年产量已超过7000万t^[9], 并呈逐年增长趋势, 但其综合利用率却不足31.6%^[10], 主要面临以下重大挑战: 以CGS制备多孔材料的过程复杂, 尚难实现工业化; CGS残碳含量高, 富集成本大; 气化炉排出的CGS含水率高, 干燥困难, 储存和运输成本高; CGS的物化特性高度依赖气化炉型、工况及原料组成, 波动性强, 导致其下游应用适应性差、稳定性差。目前, 大部分CGS仍以堆存填埋处理方式为主, 不仅占用大量土地资源, 增加运输和处置成本, 还可能因雨水渗透和颗粒扩散等问题导致重金属浸出和粉尘危害, 污染土壤和水体环境^[11-13]。这种传统的处置方式与现代工业绿色发展的目标背道而驰, 已成为制约煤化工行业可持续发展的重要瓶颈。

在政策层面,国家先后出台《“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》等政策文件,鼓励推动固废源头减量、资源化利用和无害化处置,强化全链条治理,着力解决突出矛盾和问题,助力生态文明建设,为经济社会高质量发展提供有力支撑。因此,如何实现CGS的资源化、高值化、规模化利用成为当前亟须突破的技术瓶颈。

随着固废处理技术和材料科学的不断进步,CGS跨领域协同和资源整合已成为新的趋势。笔者系统梳理了CGS的理化特性,归纳了其在建筑建材领域的利用路径,重点分析了各类技术的发展现状、核心优势及其面临的瓶颈与挑战。通过对相关理论与工程实践的综合探讨,可为我国CGS的循环利用和绿色处置提供可行的理论依据与技术指导。

1 煤气化渣理化特性

CGS受煤种、原料处理方法以及气化炉类型等因素的显著影响,存在较大的差异性,这种复杂多变的性质为其资源化利用带来了严峻的挑战。根据粒径和排放位置的不同,CGS通常可分为粗渣(CGCS)和细渣(CGFS)^[14]。CGCS主要由气化炉底部锁斗排出,在高温高压条件下熔融后经水淬冷却获得,含水量较高,但残碳含量较低,占总排放量的60%~80%^[15]。相比之下,CGFS以飞灰形式由炉顶排出,经初步洗涤和沉降处理获得,具有较高的残碳含量,占总量的20%~40%^[16]。因此,在资源化利用过程中,有必要基于粒度、残碳含量等指标对CGS进行合理分级与针对性调控,以适应不同应用领域的性能需求。

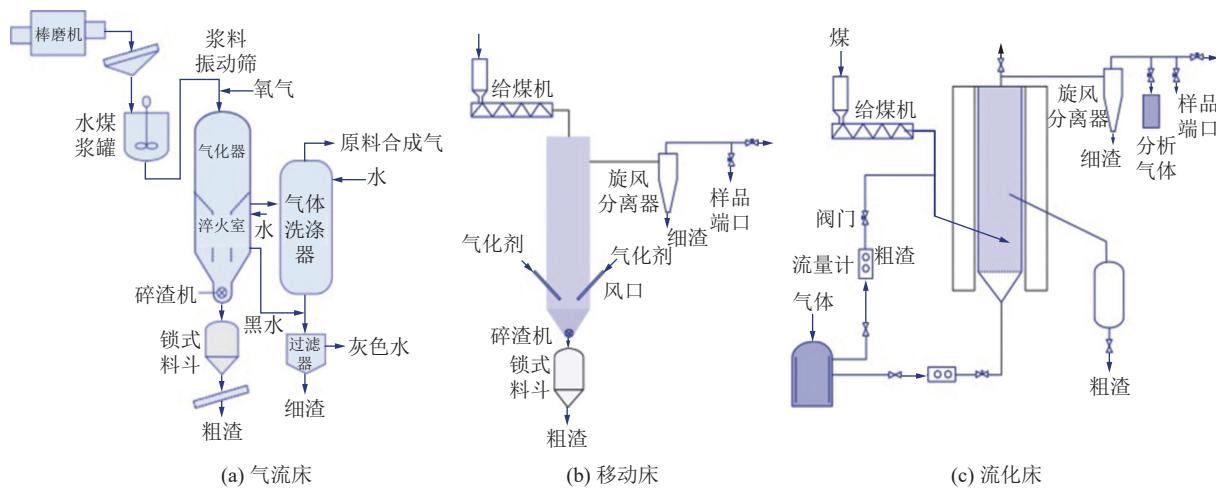


图1 不同气化炉的主要工艺^[1]
Fig.1 Main processes of different gasifiers^[1]

1.1 化学组成

目前,商业化煤气化技术主要分为3类:气流床、流化床和固定床^[17]。图1为上述3类煤气化炉的典型工艺流程。不同类型的气化炉在操作温度、反应气氛、煤种适应性及产物特性等方面各具特点,广泛应用于现代煤化工领域。典型的气流床气化炉包括Texaco、Shell和GS等,具有气化效率高、产气量大的优点,适用于粉煤原料;流化床气化炉如HTW、U-Gas和HT-L航天气化炉,则具有良好的煤种适应性和负荷调节能力,适合中等粒径煤;固定床气化炉如BGL和Lurgi,主要处理块煤,结构简单、运行稳定,但对煤质要求较高。

表1和表2为不同炉型和地区的CGS样品的主要化学组成。整体来看,尽管CGS的来源地域和生产工艺不同,但其主要成分均以SiO₂、Al₂O₃、CaO和Fe₂O₃为主^[20],评价矿物组成的指标主要包括碱度系数(M_0)、质量系数(K)、活性系数(M_c)。式(1)~式(3)为三者的计算式:

$$M_0 = m(\text{CaO}) + m(\text{MgO}) / m(\text{SiO}_2) + m(\text{Al}_2\text{O}_3) \quad (1)$$

$$K = m(\text{CaO}) + m(\text{MgO}) + m(\text{Al}_2\text{O}_3) / m(\text{SiO}_2) + m(\text{TiO}_2) \quad (2)$$

$$M_c = m(\text{Al}_2\text{O}_3) / m(\text{SiO}_2) \quad (3)$$

CGS的碱度系数在0.14~0.80内属于酸性矿物,质量系数在0.59~1.40,活性系数在0.27~0.80,使CGS与天然火山灰材料的化学组成高度相似,为其在建筑材料中的应用奠定了基础。需要指出的是,不同气化工艺参数会导致各组分的相对含量产生显著波动。例如,即使来自同一气化工艺系统,CGCS与CGFS在Si/Al质量比上差异较小,但通常前者的Si、Al和Fe元素的相对含量明显高于后者,这在很大程度上影响了其后续活化处理与利用路径的选择。

表1 不同气化炉炉型的 CGS 样品的主要化学组成^[11,18]Table 1 Main chemical compositions of CGS samples from different gasifiers^[11,18]

%

气化炉型	类型	组分质量分数							烧失量
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	TiO ₂	
神化宁夏Texaco气化炉	CGFS	43.09	19.23	8.20	0.84	6.39	2.72	0.95	15.18
	CGCS	41.07	17.52	12.11	1.53	9.27	1.65	1.12	11.70
陕西焦化Texaco气化炉	CGFS	32.59	16.04	8.56	1.01	3.62	1.43	1.02	33.40
神华四喷嘴对置式气化炉	CGFS	32.70	9.61	9.68	5.00	9.78	—	1.28	20.61
神华宁夏GSP气化炉	CGFS	35.79	9.84	8.14	4.18	8.52	—	1.26	21.44
兗州Texaco气化炉	CGCS	28.84	9.96	28.37	2.91	20.32	1.54	0.61	13.47
	CGFS	29.15	16.10	20.03	4.30	17.99	1.27	0.88	41.03
鲁西化工集团航天炉 ¹	CGCS	32.82	12.25	15.04	0.90	5.41	0.66	0.44	30.67
榆阳Shell炉 ¹	CGCS	38.85	19.46	21.84	1.91	14.68	1.08	—	32.03
	CGFS	48.09	28.31	8.93	1.47	8.91	2.76	—	41.72
山西固定床间歇式煤气发生炉 ¹	CGCS	39.11	31.55	7.79	0.99	3.34	1.87	1.05	12.28
上海单喷嘴冷壁式(SE)炉	CGCS	43.98	25.58	11.00	0.82	9.93	0.91	0.97	4.90
	CGFS	34.80	16.57	6.77	0.66	4.80	1.06	0.77	32.80
日本气化炉	CGFS	46.20	21.60	6.30	3.60	8.70	1.90	0.80	—

表2 不同地区来源的 CGS 样品的主要化学组成^[19]Table 2 Main chemical composition of CGS samples from different regions^[19]

%

来源及类型	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	SO ₃	C
鄂尔多斯CGCS	15.30	42.98	3.38	1.83	10.72	2.86	1.05	1.23	18.52
鄂尔多斯CGFS	15.10	30.91	10.06	0.27	5.83	4.77	0.97	2.31	28.32
天津CGCS	14.43	27.33	19.04	0.49	23.90	2.13	0.94	1.46	5.53
天津CGFS	12.88	32.01	11.19	1.05	11.48	3.22	0.86	4.00	21.39
茂名CGCS	10.10	22.58	24.40	0.37	17.61	4.11	0.68	2.79	13.51
茂名CGFS	14.74	29.81	9.71	0.25	5.57	4.56	0.99	2.38	30.46
枝江CGCS	12.80	23.98	9.34	0.63	15.88	1.42	0.90	1.34	29.61
枝江CGFS	16.20	29.85	3.84	0.57	5.59	1.65	0.70	2.02	37.82
安庆CGCS	24.25	42.60	15.06	0.50	9.01	0.67	1.33	2.42	1.58
安庆CGFS	15.56	24.09	5.88	0.98	9.59	1.42	0.59	3.66	36.78
岳阳CGCS	12.21	24.19	13.60	0.67	9.14	1.36	1.19	1.58	32.03
岳阳CGFS	15.38	26.21	4.85	0.83	4.84	1.50	0.80	2.07	41.72

1.2 矿物组成

表3和图2为不同炉型和地区的 CGS 样品的矿物组成。可以看出, CGCS 与 CGFS 在矿物结构上高度一致, 均呈现出无机矿物与残碳复合构成的多相体系^[22]。无定形玻璃相与残碳含量显著高于结晶矿物, 是 CGS 的典型结构特征^[19]。在结晶矿物方面, CGS 主要由石英、方解石、莫来石、赤铁矿和磁铁矿

等组成^[20,23]。这些矿物既有源于原煤中的耐高温矿物杂质在气化过程中未被完全熔融的残留, 也可能来自高温气化条件下原位反应生成的结晶转化产物^[24]。例如, 莫来石是由原煤中高岭石在 1 000 ℃左右经过偏高岭石→Al-Si 尖晶石→莫来石连续转化生成, 且含量在 1 000 ~ 1 400 ℃ 随温度升高而增加。尽管 CGCS 与 CGFS 在矿物种类上大致相同,

但在矿物相含量及结构发育程度方面仍存在差异，其根本原因在于形成机制与工艺参数的不同^[8]。CGCS 在气化炉底部停留较长的时间，经历了更高的温度和更缓慢的冷却速率，其晶体结构发育更为充

分,如石英和莫来石的晶型更加完整,晶粒尺寸较大,结晶程度更高。相反,CGFS 在急冷条件下形成,冷却速率快,晶体结构发育不足,保留了较多的无定形相和未反应残碳^[25]。

表 3 不同气化炉炉型的 CGS 样品的矿物组成^[18,20]

Table 3 Mineral composition of CGS samples from different gasifier types^[18,20]

气化炉型	类型	矿物组成
Shell气化炉	CGCS	基本呈玻璃态结构、含有部分石英、
GE水煤浆气化炉	CGCS	石英、方解石、无定形非晶相
煤粉气流床	CGFS	莫来石、石英、无定形非晶相
	CGCS	FeS、硬石膏、石英、无定形非晶相
宁煤GSP气化炉	CGCS	基本呈玻璃态结构，含有部分石英晶体、部分钙铝长石
	CGFS	基本呈玻璃态结构，含有部分石英晶体，含有机质
宁煤Texaco气化炉	CGCS	基本呈玻璃态结构、含有部分石英晶体、镁铝柱石
	CGFS	基本呈玻璃态结构、含有部分石英晶体、少量 Fe_2O_3

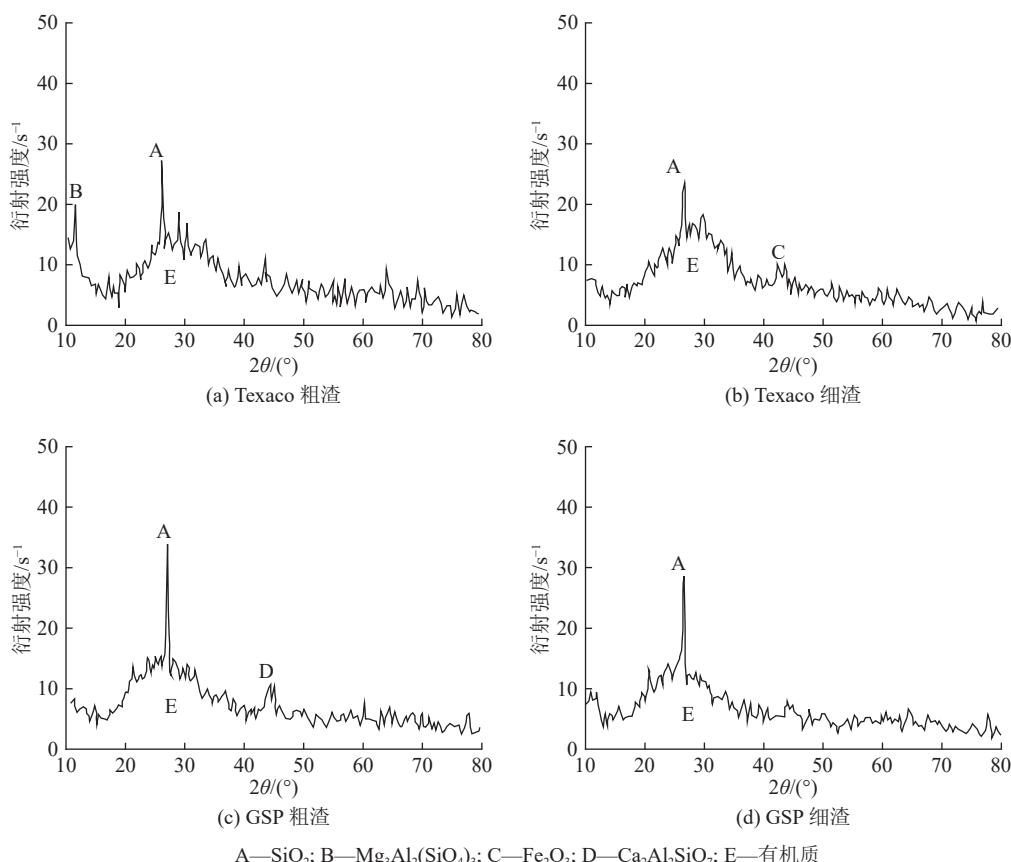


图 2 不同类型的 CGS 样品 XRD 分析结果^[21]
Fig.2 XRD analysis results of different types of CGS samples^[21]

在高温气化过程中,原煤中的脂肪族、芳香族以及碳氢化合物等官能团经过复杂的氧化与裂解反应,转化为更稳定的含氧官能团,如酸酐、酚羟基、醛类结构、杂环芳香族化合物及碳酸盐矿物等^[26],显著改

变了 CGS 的表面化学稳定性与再活化潜力。

图3为不同类型的CGS样品的傅里叶变换红外光谱(FTIR)和²⁹Si固态核磁共振(NMR)分析结果,用于揭示其官能团类型及硅的配位结构特征。如

图3a所示,CGCS在 $3\ 436\text{ cm}^{-1}$ 处出现强烈宽峰,对应O—H键的伸缩振动,反映了结合水及表面羟基的存在;465 cm^{-1} 处的吸收带由Si—O—Si键弯曲振动所引起的,代表了硅氧网络结构的存在;同时,1 426 cm^{-1} 和877 cm^{-1} 的特征峰标志着方解石矿物的存在。图3b反映了CGFS在3 447 cm^{-1} 和1 639 cm^{-1} 处分别表现出O—H键的伸缩振动峰及C=C石墨结构的特征峰,这可能与CGFS快速冷却、

反应不充分有关,导致部分有机基团未能彻底分解。同时,葛晓东等^[30]指出,高温气化过程改变了CGS表面的官能团组成,C—C/C—H和C—O—C/C—O具有最大的强度和面积,反映出其碳结构的复杂性。对于不同的气化工艺(如Texaco与GSP),CGS化学键容易发生裂解或者与其他键重组生成新的化合键,导致有机物官能团存在明显差异,其中具有亲水性的官能团富集可能会导致后续浮选脱碳过程效率下降^[21]。

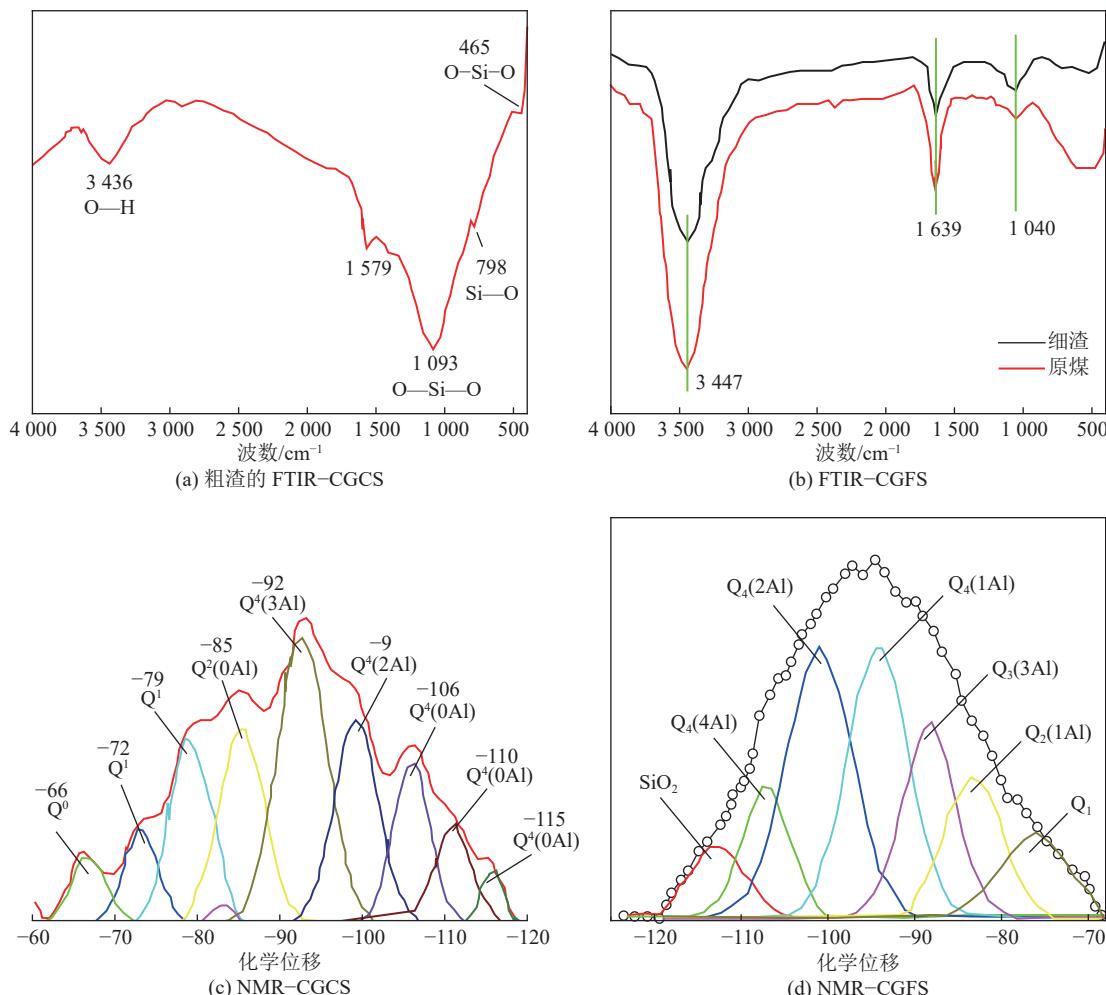


图3 不同类型的CGS样品的FTIR和 ^{29}Si NMR分析结果^[27-29]
Fig.3 Results of FTIR and ^{29}Si NMR of different types of CGS samples^[27-29]

在硅配位结构方面,图3c反映了CGCS在-115、-110和-106处均呈现Q⁴(0Al)配位结构,表明其主要由无定形的二氧化硅和石英组成的三维网状结构构成^[27]。-99和-92处的峰归因于被Q⁴(2Al)和Q⁴(3Al)环境包围的硅。然而,CGCS中通常含有Ca、Fe等杂质离子,这些离子对Si—O结构具有破坏作用,促使Q²、Q¹甚至Q⁰等低聚合度结构的形成,该类结构通常具有较低的反应活性和较高的热稳定性。图3d进一步展示了CGFS的配位结构,其在-95附

近呈现宽泛的信号谱带,表现出硅氧四面体配位的对称特征,进一步印证其晶体结构发育不完全、非晶含量较高的特点。

1.3 颗粒形貌

在煤气化过程中,气化剂与原煤发生一系列氧化还原反应,伴随着焦油与非碳化组分的剥离,使原煤颗粒表面的封闭孔隙逐步扩展甚至塌陷,最终形成具有发达孔隙结构的残渣^[31]。与此同时,在高温与表面张力共同作用下,熔融态无机物趋于收缩为

表面光滑的球形颗粒,而未充分燃烧的残碳则以无序絮状结构散布其间,呈现出高度异质性的微观结构^[32]。

图4为不同类型的CGS样品的扫描电镜(SEM)分析结果。CGCS主要由完全或部分熔融的无机矿物相构成,表现为致密、结构规整的块状颗粒,颗粒间孔隙极少,反映其在气化炉底部长时间高温熔融与缓冷过程中的致密化特征^[34]。相比之下,CGFS由球形的无机矿物或絮状结构的残碳构成,颗粒表面粗糙,表现出较高的比表面积与多孔特性^[35-36],导致在标准稠度下,需水量的增加将进一步影响其工作性能和力学性能。

CGS存在显著的颗粒尺度差异,粒径分布(PSD)分析结果如表4和图5所示。CGFS粒径分布较为均匀,主要集中在0.125~0.250 mm,而CGCS具有更大的粒径,分布主要集中在+0.250 mm,反映出其形成过程中的团聚行为和颗粒结构更为复杂,尺度异质性更强。

表4 不同气化炉炉型的GCS的粒度分布^[37]

Table 4 Particle size distribution of GCS in different gasifiers^[37]

粒级/mm	CGCS质量分数/%			CGFS质量分数/%			
	宁煤Texaco	宁煤GSP	陕西水煤浆	宁煤Texaco	宁煤GSP	陕西水煤浆	榆林气流床
≥1.000	69.06	9.45	49.10	18.75	13.59	3.46	1.03
0.800~<1.000	10.67	17.37	49.10	18.75	13.59	3.46	1.03
0.500~<0.800	5.23	23.44	49.10	18.75	13.59	3.46	1.03
0.250~<0.500	2.58	19.6	24.46	23.87	11.97	18.29	14.27
0.125~<0.250	2.46	20.77	13.17	28.85	40.07	20.99	32.36
0.074~<0.125	2.46	5.33	7.03	4.47	24.87	13.62	9.25
<0.074	2.46	4.04	6.25	14.06	9.50	43.65	43.09

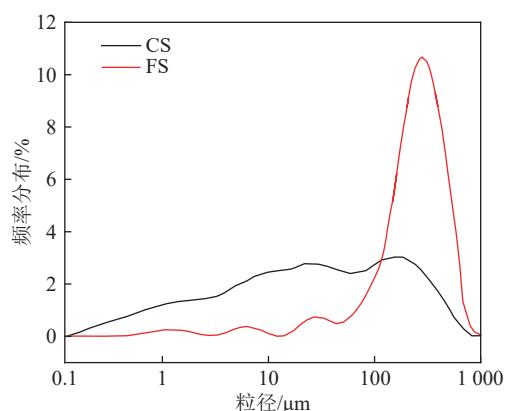


图5 不同类型的CGS样品的PSD分析结果^[33]
Fig.5 PSD analysis results of different types of CGS samples^[33]

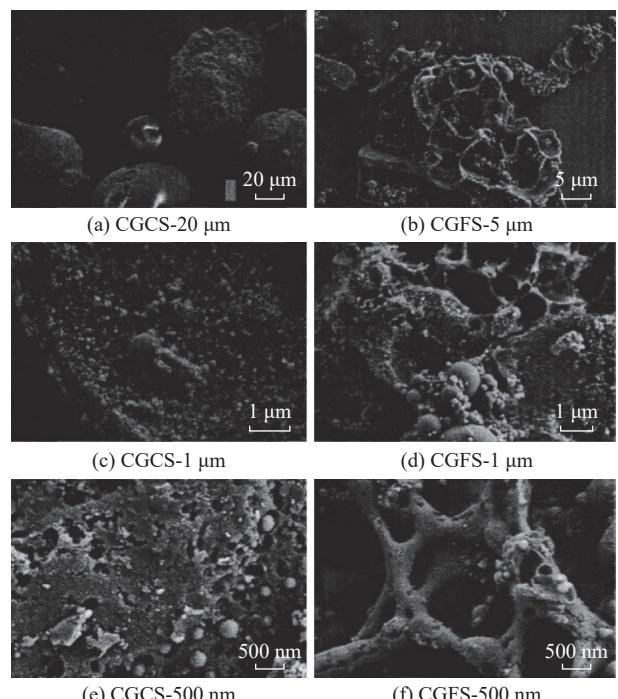


图4 不同类型的CGS样品的SEM分析结果^[33]

Fig.4 SEM analysis results of different types of CGS samples^[33]

在比表面积与孔隙结构方面,CGFS的平均比表面积高达122.20 m²/g,远高于CGCS的41.07 m²/g,表明其具有更丰富的表面活性位点与潜在的反应活性区域(图6)。CGFS的孔容达到0.16 cm³/g,显著高于CGCS的0.03 cm³/g,且其平均孔径为5.12 nm,属于典型的介孔结构;相比之下,CGCS的平均孔径为3.05 nm,孔径分布相对较窄,微孔比例较高。进一步吸附等温线测试结果表明(图7),CGCS与CGFS均呈现典型倒S型吸附等温线,表现出微孔-介孔-大孔共存的多尺度孔隙结构特征^[39]。但两者对无机矿物质去除处理的响应存在明显差异:CGFS在酸洗或浮选脱除无机物后,其比表面积与孔容变

化不大,表明其孔隙主要由残碳骨架决定,结构稳定性高;而CGS在相同处理下其比表面积和孔容显

著下降,说明其孔隙中存在较多聚集态的无机矿物,如Ca、Fe、Mg等,参与了孔隙结构的构建与填充。

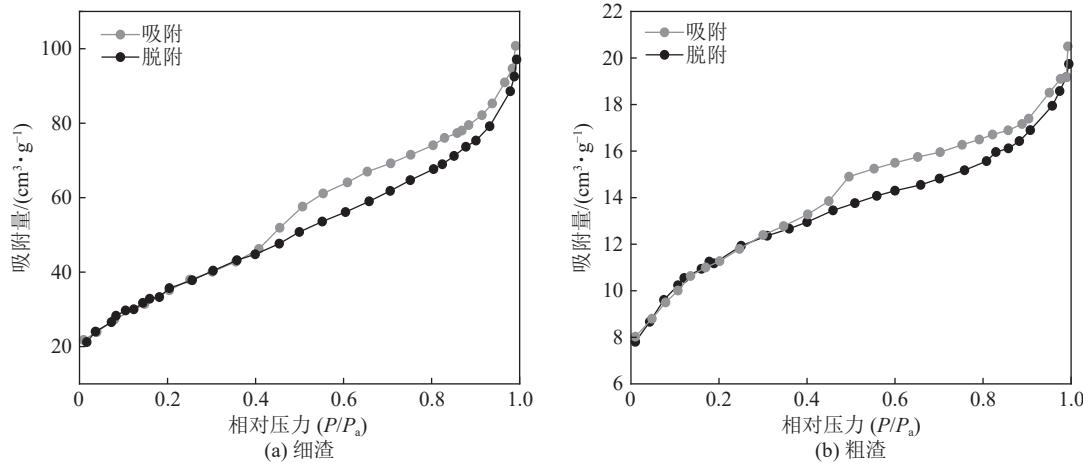


图6 不同类型的CGS样品的吸脱附等温线和孔径分布^[38]

Fig.6 Adsorption/desorption isotherms and pore size distribution of different types of CGS samples^[38]

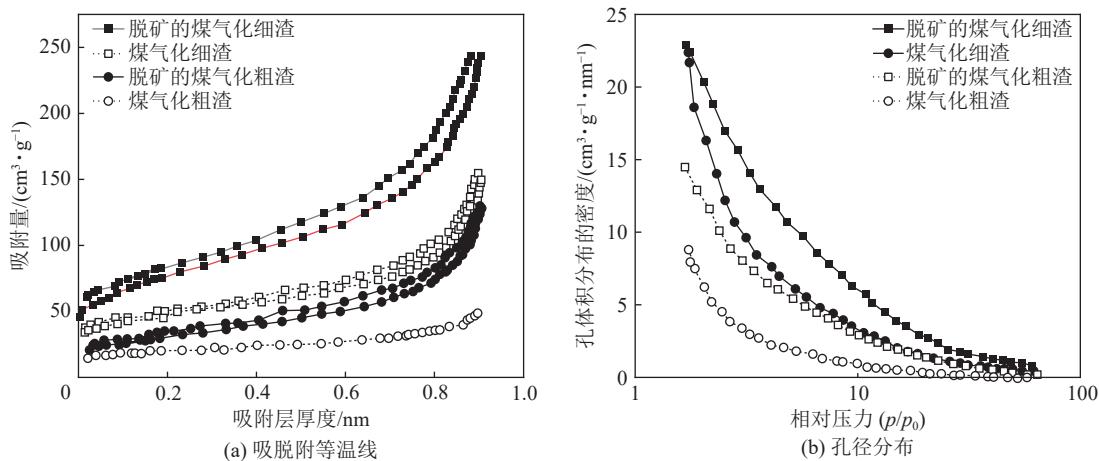


图7 不同类型CGS样品的吸脱附等温线和孔径分布^[39]

Fig.7 Adsorption/desorption isotherms and pore size distribution of different types of CGS samples^[39]

1.4 环境风险

刘艳丽等^[15]对CGS的环境风险进行了评估,选取了放射性核素活度、重金属含量以及有机污染物苯并芘作为主要指标。相应的测试方法分别采用伽马能谱仪法、火焰原子吸收光谱法和液相色谱法进行测定。由表5可见,与对照样本黄土相比,CGS中U-238、Th-232和Ra-226等放射性核素的活度处

于相同数量级,未表现出明显的放射性增强效应。同时表6结果表明,CGS中重金属元素和苯并芘的含量均未超出相关风险限值,表明其在重金属与有机污染物方面的环境风险较低。然而,GUO等^[40]对中国宁东地区的CGS颗粒的测试结果表明,Cr、Mn、Ni、Zn和Ba的浸出浓度超过中国地下水标准限值,具有中等环境风险。此外,GUO等^[41]还发现,CGS中的残留碳颗粒具有高芳香性与丰富的含氧官能团,可能增强重金属的迁移能力,提升环境暴露风险。因此,在推进CGS中Si、C等成分的资源化利用过程中,必须充分评估其重金属元素的赋存形态、分布特征与迁移潜力。只有在确保环境安全的前提下,才能实现CGS的规模化、稳定化再利用,避免次生污染风险。

表5 CGS放射性元素活度^[15]

Table 5 Activity of radioactive elements in CGS^[15]

指标	U-238活度/(Bq · kg⁻¹)	Th-232活度/(Bq · kg⁻¹)	Ra-226活度/(Bq · kg⁻¹)
气化渣	29.30±2.99	30.27±0.91	27.88±0.68
黄绵土	37.06±4.49	48.72±1.49	39.72±1.02

表 6 CGS 重金属和苯并芘质量分数^[15]
Table 6 Content of heavy metal elements and Benzopyrene in CGS^[15]

元素	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pd	苯并芘	%
检测	32.55	19.76	33.61	95.76	16.07	0.39	0.07	51.31	—	
标准	≤90	≤40	≤35	≤100	≤15	≤0.20	≤0.15	≤35	—	

2 煤气化渣在建筑材料领域中的应用

目前, CGS 的资源化利用尚处于探索和起步阶段。随着“双碳”目标的持续推进以及煤化工产业绿色低碳转型的迫切需求, 国内外学者对 CGS 的高值化、多元化利用展开了大量研究, 研究焦点逐步从单一方向转向多路径协同推进。考虑到 CGS 由丰富的 CaO、SiO₂、Al₂O₃ 和 MgO 组成, 故可作为建筑材料进行使用。现阶段, 围绕 CGS 制备胶凝材料、人工骨料及墙体砖等建材产品, 构建了较为系统的技术体系。基于物理分选、多动力源耦合活化、化学激发等关键工艺, 实现 CGS 组分功能的精准调控与再利用, 使其在建筑材料中的功能性能得以有效发挥。通过该路径, 有望实现 CGS 在建筑领域中的分级利用、功能转化与价值提升, 推动其由低值处置向高值利用转型。

2.1 胶凝材料

作为全球最广泛使用的建筑材料之一, 普通波特兰水泥(OPC)的生产过程被认为是能源密集型和重污染产业。据统计, 每生产 1 t 传统硅酸盐水泥熟料约排放 760 kg CO₂, 占全球人为 CO₂ 排放总量的 7%^[42-43]。此外, OPC 的生产还伴随高能耗和资源消耗, 如熟料煅烧过程中的高温需求进一步加剧了能源负担。因此, 推动水泥行业的低碳转型已成为实现“双碳”目标的关键路径之一。在此背景下, CGS 因其潜在活性被视为胶凝材料的替代资源。目前, CGS 在胶凝材料中的研究主要集中于以下 2 个领域。

2.1.1 辅助胶凝材料

大量研究证实, CGS 可作为辅助胶凝材料在水泥基材料中应用^[44-45]。FU 等^[31]系统研究了 CGCS 部分替代水泥的水化反应机理和微观结构演化过程。结果表明, 当 CGCS 摊量为 10% 时, 抗压强度显著提高(图 8), 主要归因于其火山灰反应活性以及细颗粒提供的成核位点, 促进更多水化产物的生成, 填充孔隙并提高基体致密性(图 9)。然而, 随着摊量进一步增加, 样品结构趋于疏松, 导致强度下降, 说明控制合理摊量是优化力学性能的关键。

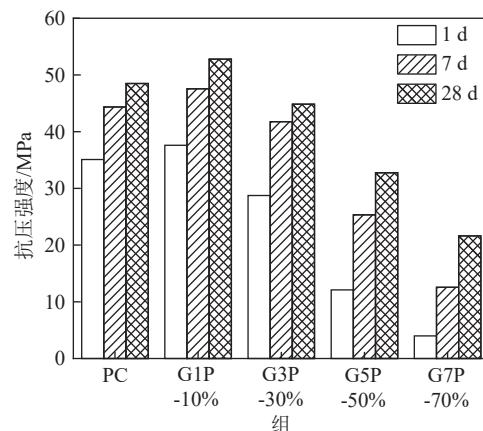


图 8 CGCS 含量对样品力学性能的影响^[29]
Fig.8 Effect of CGCS content on mechanical properties of samples^[29]

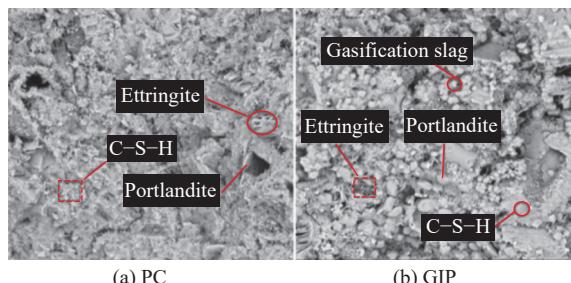


图 9 CGCS 含量对样品微观性能的影响^[29]
Fig.9 Effect of CGCS content on microscopic properties of the samples^[29]

ZHU 等^[46]进一步验证了 CGCS 在混凝土中的应用潜力, 使用 30% 摊量的 CGCS 分别替代粉煤灰与高炉矿渣作为辅助胶凝材料, 发现 28 d 抗压强度优于对照组, 这主要得益于碱性环境下 CGCS 活性被激发, 形成胶凝产物有效填充孔隙、降低孔隙率, 从而提高力学性能。LI 等^[47]对 CGCS 和 CGFS 2 类气化渣在水泥体系中的反应机制进行了研究。微观分析结果表明(图 10), 含 CGFS 砂浆的微观结构主要由表面光滑的球状颗粒(D1)和分布松散的絮凝状团聚体(D2)组成。此外, 大量的残碳介于在水化产物和矿物颗粒之间, 形成不连续的界面层, 阻碍了水泥水化产物与 CGFS 表面的有效结合, 进而抑制了水化反应的持续进行, 导致水化产物生成量显著减少, 界面过渡区松散, 最终表现为砂浆力学性能的降低。相比之下, CCGS 残碳含量较低, 有利于形成致

密且连续的水化产物层。固化后 CGCS 砂浆内部生成了大量 C-S-H 凝胶和钙矾石等水化产物, 形态上表现为片状与棒状晶体相互交织成致密网络结构, 不仅增强了骨料-体界面的黏结性, 还提高了整体结构的致密性与稳定性, 从而显著提升了砂浆的抗压

强度与力学性能。该研究证实了残碳含量是影响 CGS 胶凝材料性能的关键因素之一, 通过除碳处理减少有机杂质含量、优化颗粒界面特性, 将有助于激发其潜在活性, 为其在高性能胶凝材料中的应用提供理论基础与技术支持。

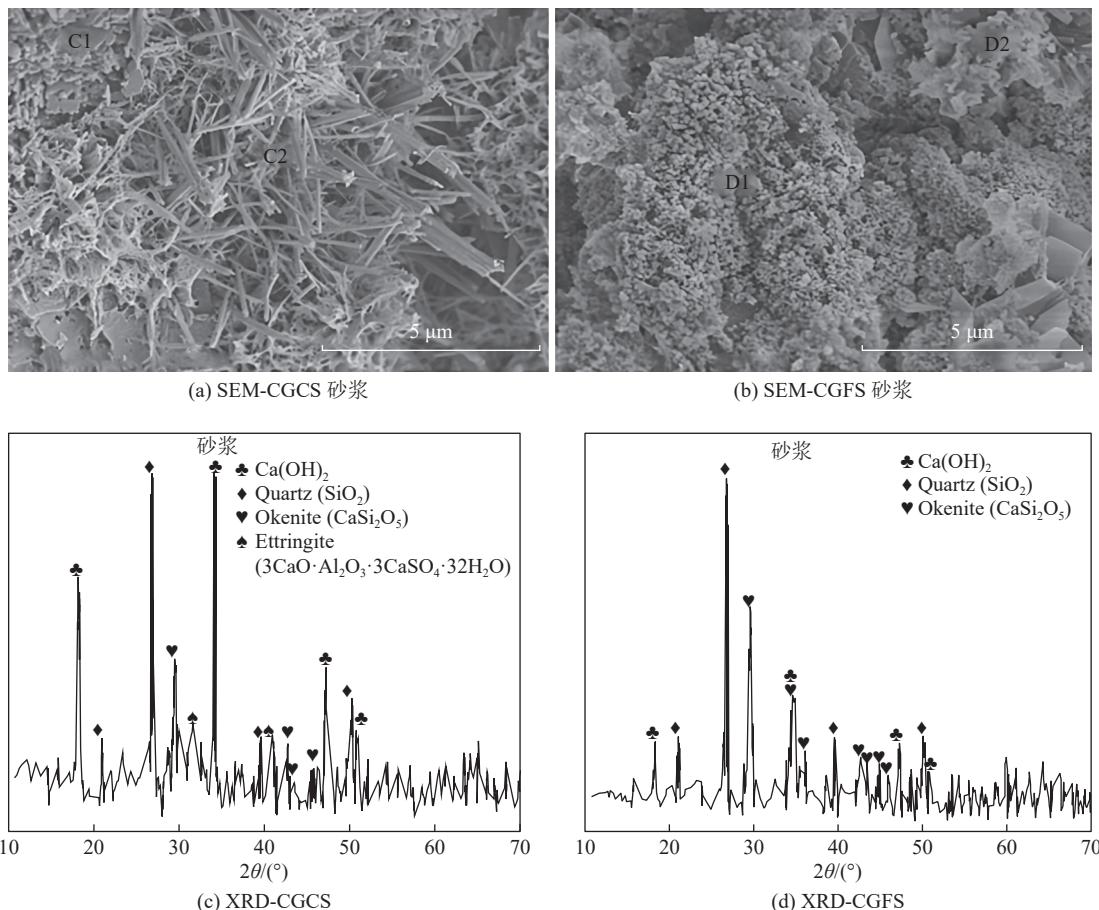


图 10 含 CCGS 和 CGFS 砂浆的微观分析结果^[47]

Fig.10 Micro-analysis results of mortar containing CCGS and CGFS^[47]

值得注意的是, CGS 自身的活性有限, 主要归因于部分矿物相如莫来石、石英等相对稳定, 难以在常温常压下发生水化反应, 这无疑制约了其在高性能建材中的推广应用。为了充分挖掘 CGS 的潜在胶凝活性, 研究学者尝试开展机械活化、化学活化及复合活化等手段的探索。机械活化是指通过撞击、切削、摩擦、挤压等机械力作用, 引起 CGS 物料的断裂和破碎, 产生晶格畸变或表面悬空化学键, 改变颗粒的理化性能和晶体结构, 从而提升其反应速率和水化产物生成量。HANG 等^[48] 研究了不同球磨时间(70、80、90 min)对 CGCS 活性的影响。当 CGCS 球磨 80 min 后, 中值粒径降低至 6.604 μm, 比表面积增加至 524.0 m²/kg, 其反应活性得到显著增强。LI 等^[49] 研究发现经湿法机械研磨 CGS 的石英相和

莫来石相半高宽(FWHM)逐渐减小, Si—O—Al、OH—键的红外吸收峰发生伸缩振动、弯曲振动, 无定形成分增强, 颗粒表面活性位点增多。

此外, 部分研究尝试引入外添加剂增强 CGS 中惰性相的反应能力, 实现协同反应。在机械-化学协同活化方面, CHANG 等^[50] 提出采用机械球磨+硫酸协同的活化方法。在 300 r/min 转速下球磨 1 h 可破坏 CGCS 原始结构, 提高比表面积; 同时, 通过 65% 浓度硫酸的酸解作用打破 Si—O 和 Al—O 键, 诱导玻璃体结构解聚, 形成更易反应的结构单元, 从而大幅提升水化反应活性。在机械-硫酸盐复合活化方面, YANG 等^[51] 通过机械球磨+无水硫酸钠协同活化的方式对 CGS 进行改性。结果表明, 在 CGS 球磨 50 min 的基础上掺入 4% 掺量的硫酸钠, 能够促

进铝硅酸盐玻璃体解聚,生成C-S-H、C-A-H和C-A-S-H等水化产物,提升样品的力学性能。

2.1.2 低碳胶凝材料

除作为辅助胶凝材料外,CGS在低碳胶凝材料领域同样展现出显著的应用潜力,尤其在碱激发体系中,其潜在的火山灰活性可被有效激发,表现出优异的胶凝性能。CHEN等^[52]将CGFS与钢渣、偏高岭土复配,制备了一种新型地聚合物胶凝体系。研究表明,在强碱激发条件下,该体系通过火山灰反应与硅铝酸盐聚合反应,构建致密的三维网状凝胶结构,显著增强材料致密性与强度,样品7 d和28 d抗压强度分别达到37.4 MPa与65.6 MPa,表现出优异的早期与后期力学性能。在此基础上,LEE等^[53]进一步探讨了CGFS基地聚合物制备高强混凝土的可行性。研究发现,当采用含55%硅酸钠的NaOH溶液作为激发剂时,体系内部生成了纳米级(<100 nm)的板状晶体结构,28 d抗压强度高达77 MPa,远超韩国高强混凝土设计标准(40 MPa),显示出良好的工程应用前景。

尽管强碱激发体系提高了CGS活性与力学性能,但其所产生高碳排放和高能耗的问题也不容忽视。例如,NaOH和水玻璃的碳排放量分别高达1 915 kg/t和1 514 kg/t,且生产工艺较为复杂,无疑限制了其在大规模工程中的实际应用。因此,近年来大量学者聚焦于更加绿色、可持续的激发体系。窦占双等^[54]研究了CGCS部分替代矿渣制备超疏

酸盐水泥的可行性。结果表明,CGCS掺量对样品的抗折强度具有显著影响,在替代率为20%时,28 d抗折强度最高,主要归因于其促进了AFt与C-S-H凝胶的协同生成,增强了材料的密实程度和力学性能(图11)。

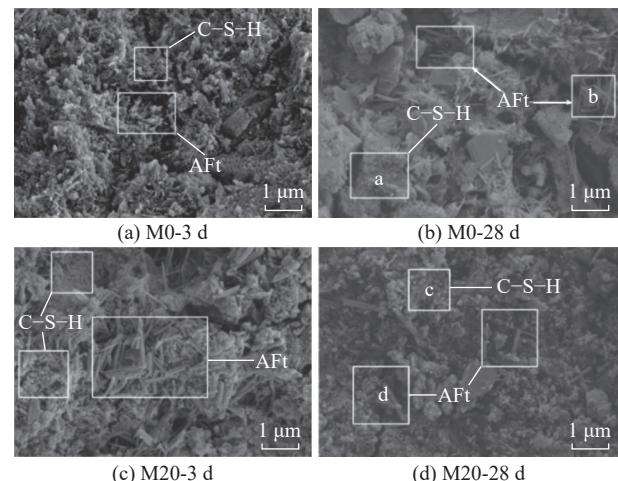


图11 CCGS对样品的微观结构的改善^[54]
Fig.11 Improvement of microstructure of sample by CCGS^[54]

XIANG等^[55]采用赤泥、电石渣与磷石膏协同激发CGCS制备全固废胶凝材料,系统研究了前驱体细度与激发剂掺量对水化反应过程的影响。结果显示,粒径更细的CGCS具有更高的Zeta电位,能够释放更多活性离子,有效促进AFt和C-(A)-S-H等水化产物的生成,进而提升样品的力学性能,其反应机理如图12所示。

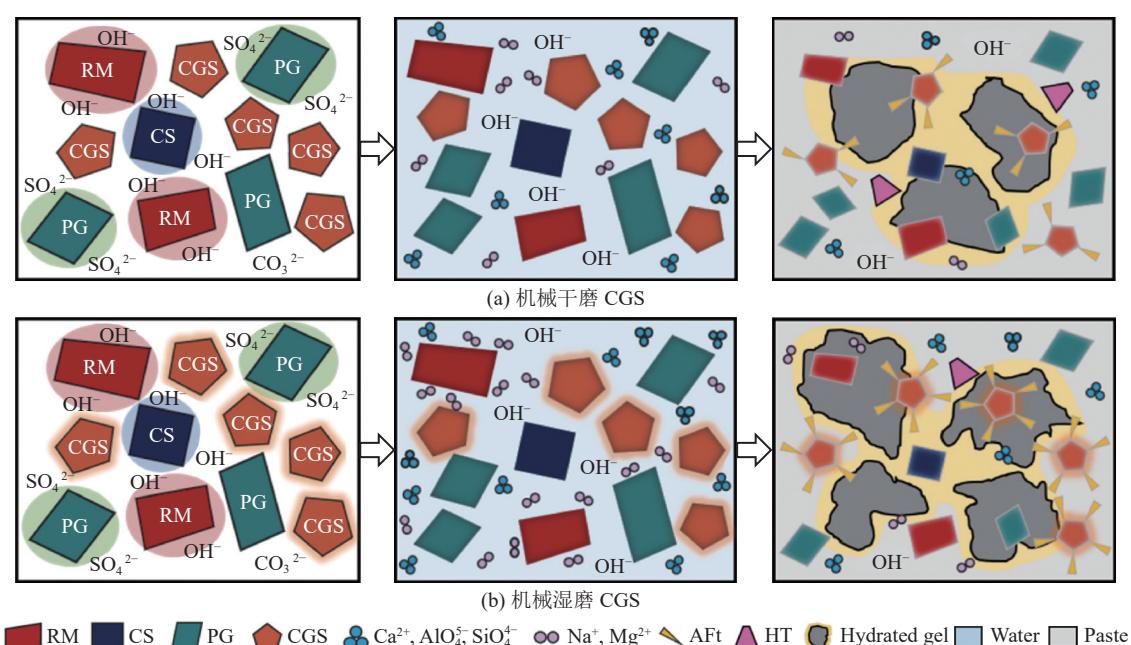


图12 赤泥、电石渣和磷石膏对CGCS的激活机制^[55]
Fig.12 Activation mechanism of red mud, carbide slag and phosphogypsum on CGCS^[55]

值得关注的是, CGS 中的残碳已成为制约其水化活性和胶凝性能的重要瓶颈。具体而言, 残碳主要通过以下方面对水化过程产生不利影响: 首先, 残碳在颗粒表面形成物理屏障, 阻碍水分及活性离子的有效扩散; 其次, 残碳具有较强的吸附能力, 可吸附体系中的 Ca^{2+} 和 OH^- 等关键离子, 进一步降低水化反应速率; 此外, 高碳含量还可能破坏体系的碱度稳定性, 抑制 C-S-H 凝胶和 AFt 晶体的正常生成, 最终导致材料强度增长受限^[56-58]。为提升 CGCS 的胶凝性能, ZHAO 等^[59] 研究了不同煅烧温度(300~700 °C)对其活性的影响, 发现 400 °C 煅烧条件下可有效激活 CGCS 中的铝硅酸盐相, 同时显著降低残碳含量, 从而提升其在水泥基体系中的反应活性。GU 等^[60] 进一步指出, 550 °C 煅烧处理几乎可完全去除 CGCS 中的残碳, 其固定碳含量由 9.51% 降至 0.05%, 不仅极大改善了反应性, 还使结构聚合度降低约 25%, 从而更有利于碱激发条件下水化产物的生成。

综上所述, 在工程实践中应优先选用残碳含量较低的 CGCS, 对于 CGFS 可通过浮选、筛分、热处理等预处理技术有效降低残碳含量, 从而提高其反应活性与胶凝性能, 为其在低碳胶凝材料体系中的高值化应用奠定坚实基础。

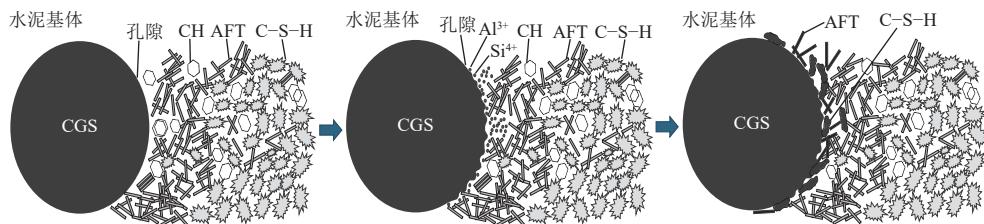


图 13 CGS 增强水泥砂浆界面过渡区作用机理^[63]

Fig.13 Mechanism of CGS reinforced cement mortar interfacial transition zone^[63]

此外, 利用 CGS 制备免烧陶粒在固废资源化与功能材料开发方面展现出巨大潜力。ZHAO 等^[65] 以 CGCS 为主原料, 复配水泥和石英砂(质量比为 73:15:12), 制备出球形免烧陶粒, 其抗压强度达到 5 MPa。重金属浸出测试结果显示, 陶粒中 Cr 的浸出浓度最高, 仅为 16.45 μg/L, 占 GB 3838—2002《地表水水质标准》IV类限值的 32.9%, 其余元素如 Be、Cd、As、Pb 等浸出浓度均远低于限值, 表明材料具备良好的环境安全性。张祎旸等^[66] 以内蒙古地区 CGS、水泥、生石灰和 CaSO_4 为原料, 通过免烧工艺制备轻质陶粒。当各组分质量比为 70:30:2.5:5 时, 所得陶粒综合性能最优, 比表面积达 51.7 m^2/g , 堆积密度 809 kg/m^3 , 颗粒破碎强度为

2.2 再生骨料

CGS 作为一种新型建筑再生骨料, 凭借其稳定的晶体结构与良好的力学性能, 在混凝土应用中展现出显著的环保优势与技术可行性。经适当磨碎处理的 CGCS 细骨料不仅能够完全替代天然砂, 还能显著提升混凝土的后期强度, 其强化机制主要源于 CGCS 的潜在活性可促进更多水化产物的生成^[61]。YOSHITAKA 等^[62] 采用粒径范围为 0.075~4.750 mm 的 CGCS 细骨料替代天然河砂制备混凝土并进行性能测试, 发现替代后的混凝土在力学强度与耐久性方面与天然砂组接近, 验证了其在实际工程中的可替代性。张跃宏等^[63] 研究了 CGS 部分或全部替代天然砂制备水泥砂浆的性能变化, 结果发现, 掺加 CGS 的水泥砂浆在 28 d 抗压强度方面优于天然砂对照组。微观结构分析表明, CGS 在水泥碱性环境下发生二次水化反应, 形成更多 C-S-H 凝胶及 AFt 等水化产物。这一过程不仅有效优化了孔隙结构(孔隙率降低 15%~20%), 还增强了骨料-浆体界面过渡区(ITZ)的致密性与黏结强度(图 13)。AINETO 等^[64] 使用 CGFS 和 CGCS 制备轻质骨料。结果表明, 在 750 °C 和 1150~1175 °C 的 2 步热处理条件下, 可以获得具有良好的堆积密度、吸水性、抗冻性、机械性能和环境性能的轻质骨料。

6.61 MPa。其在反硝化生物滤池中表现出较普通市售陶粒更快的挂膜速度, 具有良好的水处理应用潜力。孙浩等^[67] 通过调控 CGS、偏高岭土和固体碱激发剂的配比, 成功制备出免烧陶粒滤料, 筒压强度达 25.72 MPa, 堆积密度为 1 160 kg/m^3 , 兼具高强度与低吸水率, 适用于高要求的水处理或过滤介质应用场景。

然而, 当前对于 CGS 作为骨料的长期耐久性、骨料-浆体界面结构演化机制的研究仍较为薄弱, 亟需系统深入的探索与机制阐释, 以支撑其在绿色建材领域的广泛推广与工程化应用。

2.3 砖体材料

砖体材料多采用挤压成型-烧结工艺, 该技术相

对成熟, CGS 资源化利用的关键路径之一。CGS 中富含无定形 $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ 组分, 在烧结过程中可在坯体内形成大量封闭微孔结构, 从而显著降低制品的体积密度并提升其保温性能^[68-69]。此外, 残碳的存在可在一定程度上增强砖体的隔热与隔音性能。ACOSTA 等^[70] 将 CGS 与黏土按不同比例混合, 经压制成型并在 930 ℃ 条件下烧结, CGS 在 50% 掺量下, 所得建筑砖具备高达 45 MPa 的抗压强度, 表现出良好的力学性能和耐久性。冯银平等^[71] 以 CGS 为主要原料制备了轻质隔热墙体材料, 系统考察了黏土掺量对其物理力学性能的影响。当黏土掺量为 20% 时, 所得材料在 1 000 ℃ 烧成后表现出优异的轻质与保温性能, 其体积密度为 1.00 g/cm³, 导热系数为 0.19 W/(m · K), 抗压强度达到 5.3 MPa; 随着黏土掺量增至 30%, 材料密实度明显提升, 体积密度上升至 1.20 g/cm³, 导热系数略增至 0.23 W/(m · K), 抗压强度显著提高至 20.1 MPa, 可满足承重墙体的结构性能要求; 当掺量进一步提高至 40% 时, 材料的抗压强度略有下降至 16.6 MPa, 但仍具良好承载能力, 体积密度为 1.18 g/cm³, 导热系数为 0.26 W/(m · K)。

相比之下, 免烧砖作为一种更具绿色低碳潜力的建材产品, 其研究尚处于起步阶段, 尚未实现规模化工程应用, 但受到广泛关注。例如, ZHANG 等^[72] 研究表明, 在砖材中掺入 35.6% 的 CGS 并经 100 ℃ 蒸养 18 h, 可获得满足 JC/T 422—2007 与 GB 11945—1999 标准要求的免烧砖。YUN 等^[73] 采用 20% 的 CGS 替代原料制备墙体砖, 所得产品密度低于 1.45 g/cm³, 且抗压强度超过 30 MPa, 兼具轻质与高强特性。WANG 等^[6] 采用 CGS 替代粉煤灰制备免烧砖, 研究了固化条件和 CGS 用量对样品物理力学性能的影响。结果表明, 随着 CGS 替代率的增加, 静电絮凝的发生和活性物质的富集增加了浆料的屈服应力, 表现为宏观层面的流动性降低。由于 CGS 理想的反应活性, CGS 的增加促进了二次生水化反应, 有助于水化产物和强度的发展。

综上所述, CGS 在砖体材料中的应用展现出良好的技术可行性和广阔的发展前景。无论是通过传统的烧结成型技术制备轻质隔热与承重型墙体材料, 还是在免烧砖方向的初步探索, 均验证了 CGS 优异的成分特性和潜在活性对产品性能的积极贡献。尤其在“双碳”目标背景下, 结合低能耗、低排放的免烧技术路径, 有望进一步推动 CGS 基砖材的绿色化、规模化应用, 为固废资源化利用与建筑材料低碳转型提供有力支撑。

3 结论及展望

1) CGS 资源化的理论基础与技术瓶颈分析。CGS 作为现代煤化工过程的固体副产物, 年排放总量在我国部分煤气化产能集中区域已超过 7 000 万 t, 具有迫切的资源化需求。其独特的化学组成和矿物结构, 使其具备潜在的火山灰活性和吸附能力, 构成了其作为胶凝材料和功能材料的重要物质基础。然而, 与粉煤灰、钢渣等传统固废相比, CGS 表现出更高的成分复杂性和性能波动性, 其粒径异质性大、组分含杂质高、活性响应差异明显等问题显著制约了其大规模资源化利用进程。目前, CGS 在建筑材料领域的应用多处于实验室研究和中试阶段, 整体产业化水平偏低, 亟需突破材料提质、改性和高值利用等关键技术瓶颈。

2) CGS 多元化利用路径与反应机制耦合研究。提升 CGS 资源化利用水平的核心在于构建系统性的“成分-结构-性能”关联机制模型。为此, 本研究提出采用多路径并行的提质改性策略, 如机械磨细提高比表面积、热处理调控玻璃相重构、氧化气氛下活化残碳等手段, 有效提升其潜在活性。同时, 通过 XRD-SEM-EDS 等手段揭示玻璃相含量与铝硅酸盐结构对水化反应的影响, 进一步构建其与胶凝活性和重金属固定能力的协同作用机制。在实际应用层面, 结合粒径分级与磁选分离工艺, 可获得不同性能等级的 CGS 级配产品, 用于混凝土掺合料、预制砌块、低碳砂浆等用途, 并拓展至制备吸波陶瓷、碳-硅复合材料等功能化方向。通过引入 LCA(生命周期评估)模型, 评估资源化利用 CGS 的碳排放和能源消耗, 为绿色低碳建材体系构建提供了重要路径支撑。

3) 面向规模化应用的挑战与展望。展望未来, 实现 CGS 资源价值最大化不仅是推动煤化工行业绿色低碳转型的重要路径, 更是我国固废治理能力现代化的重要体现。这一过程不应仅限于“废物再利用”的层面, 更应上升为“材料再定义”的模式转变。实现这一目标, 需政策引导与制度保障协同发力, 制定 CGS 在建材领域应用的原料、产品和环境风险评价标准, 推动其纳入绿色建材评价目录。依托先进技术的持续突破和全产业链的深度协同, 加强示范工程建设与区域应用推广, 逐步构建覆盖源头分类、绿色处置、高值转化与终端应用的全流程资源化利用体系, 完成 CGS 从环境负担向资源资产的根本转变。

参考文献(References):

- [1] LYU B, DENG X W, JIAO F S, et al. Enrichment and utilization of residual carbon from coal gasification slag: A review[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 171: 859–873.
- [2] LI X G, CHEN Q B, MA B G, et al. Utilization of modified CFBC desulfurization ash as an admixture in blended cements: Physico-mechanical and hydration characteristics[J]. *Fuel*, 2012, 102: 674–680.
- [3] HE G, LIN J, ZHANG Y, et al. Enabling a rapid and just transition away from coal in China[J]. *One Earth*, 2020, 3(2): 187–194.
- [4] 付春龙, 王松江, 李国智. 煤气化细渣燃烧技术研究进展[J]. 化工进展, 2022, 41(S1): 516–523.
- FU Chunlong, WANG Songjiang, LI Guozhi. Research progress on combustion technology of coal gasification fine slag[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(S1): 516–523.
- [5] SHEN Z J, NIKOLIC H, CAUDILL L S, et al. A deep insight on the coal ash-to-slag transformation behavior during the entrained flow gasification process[J]. *Fuel*, 2021, 289: 119953.
- [6] WANG S Y, GU X W, LIU J P, et al. Physical properties and hydration behaviors of paste casting brick containing coal gasification slag (CGS): Effect of curing condition and CGS dosage[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 450: 138764.
- [7] QIN S Y, ZHANG X Z, WANG M, et al. Comparison of BGL and Lurgi gasification for coal to liquid fuels (CTL): Process modeling, simulation and thermodynamic analysis[J]. *Energy*, 2021, 229: 120697.
- [8] PAN C C, LIANG Q F, GUO X L, et al. Characteristics of different sized slag particles from entrained-flow coal gasification[J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30(2): 1487–1495.
- [9] ZHU Y K, WU J J, ZHANG Y X, et al. Preparation of hierarchically porous carbon ash composite material from fine slag of coal gasification and ash slag of biomass combustion for CO₂ capture[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 330: 125452.
- [10] 张吉雄, 顾晓薇, 周楠, 等. 煤气化灰渣规模化分质梯级利用与高效处置技术研究 [J/OL]. 中国矿业大学学报, 2025: 1–14 [2025–04–15]. <https://link.cnki.net/doi/10.13247/j.cnki.jcumt.20240595>.
- ZHANG Jixiong, GU Xiaowei, ZHOU Nan, et al. Research on the technology for large-scale and hierarchical utilization of coal gasification slag[J/OL]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2025: 1–14 [2025–04–15]. <https://link.cnki.net/doi/10.13247/j.cnki.jcumt.20240595>.
- [11] YAN S Y, XUAN W W, CAO C Y, et al. A review of sustainable utilization and prospect of coal gasification slag[J]. *Environmentalal Research*, 2023, 238: 117186.
- [12] GUO F H, ZHAO X, GUO Y, et al. Fractal analysis and pore structure of gasification fine slag and its flotation residual carbon[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, 585: 124148.
- [13] 史兆臣, 王贵山, 王学斌, 等. 煤气化细渣预热脱碳工艺燃烧特性研究[J]. *洁净煤技术*, 2021, 27(4): 105–110.
- SHI Zhaochen, WANG Guishan, WANG Xuebin, et al. Study on combustion characteristics of preheating decarburization process for fine slag in coal gasification[J]. *Clean Coal Technology*, 2021, 27(4): 105–110.
- [14] 商晓甫, 马建立, 张剑, 等. 煤气化炉渣研究现状及利用技术展望[J]. *环境工程技术学报*, 2017, 7(6): 712–717.
- SHANG Xiaofu, MA Jianli, ZHANG Jian, et al. Research status and prospects of utilization technologies of slag from coal gasification[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2017, 7(6): 712–717.
- [15] 刘艳丽, 李强, 陈占飞, 等. 煤气化渣特性分析及综合利用研究进展[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(11): 251–257.
- LIU Yanli, LI Qiang, CHEN Zhanfei, et al. Research progress characteristics analysis and comprehensive utilization of coal gasification slag[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(11): 251–257.
- [16] LIU X D, JIN Z W, JING Y H, et al. Review of the characteristics and graded utilisation of coal gasification slag[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2021, 35: 92–106.
- [17] CHEN X D, KONG L X, BAI J, et al. The key for sodium-rich coal utilization in entrained flow gasifier: The role of sodium on slag viscosity-temperature behavior at high temperatures[J]. *Applied Energy*, 2017, 206: 1241–1249.
- [18] 吴平川, 刘治兵, 黄天勇, 等. 煤气化渣胶凝活性激发及机理研究进展 [J/OL]. 材料导报, 2024: 1–19 [2025–04–15]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=CLDB2024073002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- WU Pingchuan, LIU Zhibing, HUANG Tianyong, et al. Research progress on excitation and mechanism of coal gasification slag cementitious reactivity[J/OL]. *Materials Reports*, 2024: 1–19 [2025–04–15]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=CLDB20240730002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [19] 胡文豪. 煤气化渣铝硅组分活化分离与资源化利用基础研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院过程工程研究所), 2019.
- HU Wenhao. Basic study on activation separation and resource utilization of Al-Si components in coal gasification residue[D]. Beijing: Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [20] SU S F, TAHIR M H, CHENG X X, et al. Modification and resource utilization of coal gasification slag-based material: A review[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(2): 112112.
- [21] 吴阳, 赵世永, 李博. 宁东煤气流床气化残渣特性研究[J]. *煤炭工程*, 2017, 49(3): 115–118.
- WU Yang, ZHAO Shiyong, LI Bo. Study on the residue features of Ningdong coal in entrained flow gasifiers[J]. *Coal Engineering*, 2017, 49(3): 115–118.
- [22] 李涛, 王红星, 张西标. 煤气化渣怎样变废为宝[J]. *中国石油和*

- 化工产业观察,2021(S1): 72–73.
- LI Tao, WANG Hongxing, ZHANG Xibiao. How to turn coal gasification slag into treasure[J]. China Petrochemical Industry Observer, 2021(S1): 72–73.
- [23] 房奎坤. 煤气化渣结构、活性与反应机理及其复合胶凝材料性能 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2023.
- FANG Kuizhen. Structure, activity and reaction mechanism of coal gasification slag and its performance as a composite cementitious material[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2023.
- [24] 赵永彬, 吴辉, 蔡晓亮, 等. 煤气化残渣的基本特性研究[J]. 清净煤技术, 2015, 21(3): 110–113, 74.
- ZHAO Yongbin, WU Hui, CAI Xiaoliang, et al. Basic characteristics of coal gasification residual[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(3): 110–113, 74.
- [25] 马晶, 马玉龙, 朱莉, 等. 煤气化渣结构组成及其主要金属元素赋存形态[J]. 化工进展, 2024, 43(10): 5857–5866.
- MA Jing, MA Yulong, ZHU Li, et al. Structure composition of coal gasification slag and speciation of main metals in coal gasification slag[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(10): 5857–5866.
- [26] LI Y T, WEI C, LIU X M, et al. Application of gasification slag in construction materials and high value-added materials: A review[J]. Construction and Building Materials, 2023, 402: 133013.
- [27] QU J S, ZHANG J B, LI H Q, et al. A high value utilization process for coal gasification slag: Preparation of high modulus sodium silicate by mechano-chemical synergistic activation[J]. Science of The Total Environment, 2021, 801: 149761.
- [28] GAO S T, ZHANG Y C, LI H X, et al. The microwave absorption properties of residual carbon from coal gasification fine slag[J]. Fuel, 2021, 290: 120050.
- [29] MIAO Z K, CHEN L Q, CHEN K N, et al. Physical properties and microstructures of residual carbon and slag particles present in fine slag from entrained-flow coal gasification[J]. Advanced Powder Technology, 2020, 31(9): 3781–3789.
- [30] 葛晓东. 煤气化细渣表面性质分析及浮选提质研究[J]. 中国煤炭, 2019, 45(1): 107–112.
- GE Xiaodong. Surface properties analysis of coal gasification coal cinder and flotation extraction research[J]. China Coal, 2019, 45(1): 107–112.
- [31] FU B, CHENG Z Y, WANG D Z, et al. Investigation on the utilization of coal gasification slag in Portland cement: Reaction kinetics and microstructure[J]. Construction and Building Materials, 2022, 323: 126587.
- [32] NIE C C, JIANG S Q, SHI S X, et al. Energy recovery from concentrate in waste gasification fine slag by clean flotation assisted by waste oil collector[J]. Energy, 2023, 273: 127285.
- [33] 马晶. 煤气化渣矿相组成及硅铝物种活化的研究 [D]. 银川: 宁夏大学, 2024.
- MA Jing. Study on the mineralogical phase components and activation of silica-aluminium species of coal gasification slag[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2024.
- [34] JI W X, ZHANG S Y, ZHAO P D, et al. Green synthesis method and application of NaP zeolite prepared by coal gasification coarse slag from ningdong, China[J]. Applied Sciences, 2020, 10(8): 2694.
- [35] HU Z , GU X , LI Z , et al. Sustainable valorization of coal gasification slag through optimized grinding kinetics: Composite cement compressive strength enhancement and environmental assessment. [J]. Environmental Research, 2025, 277121601.
- [36] REN L, GONG Y, WANG X J, et al. Study on recovery of residual carbon from coal gasification fine slag and the influence of oxidation on its characteristics[J]. Energy, 2023, 279: 128099.
- [37] 高海洋, 梁龙, 斯开宇, 等. 煤气化渣资源化利用综述[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(8): 192–208.
- GAO Haiyang, LIANG Long, JIN Kaiyu, et al. Review on resource utilization of coal gasification slag[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(8): 192–208.
- [38] 何丽君, 杨汉钊, 卫中宽, 等. 煤气化渣分选前后物理化学特性研究[J]. 煤炭加工与综合利用, 2024(9): 33–37.
- HE Lijun, YANG Hanzhao, WEI Zhongkuan, et al. Research on the physical and chemical properties and sorting effect of coal gasification residue[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2024(9): 33–37.
- [39] WU S , HUANG S , JI L , et al. Structure characteristics and gasification activity of residual carbon from entrained-flow coal gasification slag[J]. Fuel, 2014: 112267–12275.
- [40] LIU S Q, QI C, JIANG Z, et al. Mineralogy and geochemistry of ash and slag from coal gasification in China: A review[J]. International Geology Review, 2018, 60(5–6): 717–735.
- [41] GUO Y, LI H C, QIU G F, et al. Processing of coal gasification fine slag by different physical separation methods: Fate of typical heavy metals and comparison analysis on products[J]. Separation and Purification Technology, 2023, 306: 122675.
- [42] LIU H Q, BAI G L, GU Y, et al. The influence of coal gangue coarse aggregate on the mechanical properties of concrete columns[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: e01315.
- [43] 张吉雄, 张强, 周楠, 等. 煤基固废充填开采技术研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4167–4181.
- ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, ZHOU Nan, et al. Research progress and prospect of coal based solid waste backfilling mining technology[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4167–4181.
- [44] HU Z , GU X , LI Z , et al. A novel solid waste activator for coal gasification slag-based geopolymers: Sodium-based desulfurization ash and carbide slag[J]. Construction and Building Materials, 2025, 470140655-140655.
- [45] LI Z Z, LI F, XIE H W, et al. Effect of alkali and sulfate on the hydration characteristic of cement-based materials containing coal

- gasification slag[J]. *Materials*, 2022, 15(24): 8868.
- [46] ZHU X L, GUO Z H, YANG W, et al. Durability of concrete with coal gasification slag and coal gangue powder[J]. *Frontiers in Materials*, 2022, 8: 791178.
- [47] LI Z Z, ZHANG Y Y, ZHAO H Y, et al. Structure characteristics and composition of hydration products of coal gasification slag mixed cement and lime[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 213: 265–274.
- [48] HAN Y J, QI W Y, PANG H T, et al. A novel coal gasification coarse slag-based geopolymers: Influences of physico-chemical coupling activation on its properties, microstructure, and hazardous material immobilization[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 420: 135591.
- [49] YU M, HUANG R Z, HE C X, et al. Hybrid composites from wheat straw, inorganic filler, and recycled polypropylene: Morphology and mechanical and thermal expansion performance[J]. *International Journal of Polymer Science*, 2016, 2016(1): 2520670.
- [50] CHANG R Q, ZHANG J B, LI H Q, et al. Preparation and characterization of cementitious materials based on sulfuric-acid-activated coal gasification coarse slag[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 426: 136164.
- [51] YANG P, SUO Y L, LIU L, et al. Study on the curing mechanism of cemented backfill materials prepared from sodium sulfate modified coal gasification slag[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 62: 105318.
- [52] CHEN Y C, ZHOU X, WAN S, et al. Synthesis and characterization of geopolymers based on gasification coal fly ash and steel slag[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 211: 646–658.
- [53] LEE Y N, BANG J J, KANG S. Study on a nano-microstructure and properties of geopolymers by recycling integrated gasification combined cycle coal ash slag[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2019, 19(4): 2193–2197.
- [54] 窦占双, 魏力, 王梦梦, 等. 煤气化渣替代矿渣制备超硫酸盐水泥的可行性研究[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(8): 2952–2960.
DOU Zhanshuang, WEI Li, WANG Mengmeng, et al. Feasibility study on using coal gasification slag as a substitute for blast furnace slag to prepare super sulphated cement[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2024, 43(8): 2952–2960.
- [55] XIANG J C, QIU J P, ZHAO Y Q, et al. Rheology, mechanical properties, and hydration of synergistically activated coal gasification slag with three typical solid wastes[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2024, 147: 105418.
- [56] WU T, GONG M, LESTER E, et al. Characterisation of residual carbon from entrained-bed coal water slurry gasifiers[J]. *Fuel*, 2007, 86(7-8): 972–982.
- [57] LUO F, WEI C D. Effects of decarbonized coal gasification coarse slag and fine ash on properties of cement paste as supplementary cementitious materials[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2022, 34(11): 04022281.
- [58] POMYKALA R, MAZURKIEWICZ M. Properties of coal gasification wastes essential to determining their impact on the environment[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2015, 24: 2147–2155.
- [59] ZHAO Y Q, GU X W, XU X C. Physical-chemical performance of coal gasification slag with calcination activation utilized as supplementary cementitious material[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 451: 138776.
- [60] GU X W, HU Z H, HU Z Y, et al. Optimizing calcination temperature to improve the compressive strength of coal gasification slag-based alkali-activated materials by reducing carbon content and adjusting polymerization degree[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 456: 139284.
- [61] LIU P, ZHAO Z, LI Z, et al. Influence of coal gasification slag on cement concrete performance[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2017, 34: 190–195.
- [62] ISHIKAWA Y. Utilization of coal gasification slag collected from IGCC as fine aggregate for concrete[C]. Proceedings of the EUROCOALASH 2012 Conference, Thessaloniki, Greece. 2012: 25–27.
- [63] 张跃宏, 刘松辉, 王上, 等. 煤气化炉渣骨料对水泥砂浆力学性能的影响机理[J]. 功能材料, 2021, 52(5): 5091–5096, 5104.
ZHANG Yuehong, LIU Songhui, WANG Shang, et al. The influence mechanism of coal gasification slag aggregate on the mechanical properties of cement mortar[J]. *Journal of Functional Materials*, 2021, 52(5): 5091–5096, 5104.
- [64] AINETO M, ACOSTA A, RINCON J M, et al. Production of lightweight aggregates from coal gasification fly ash and slag[J]. 2005.
- [65] ZHAO S W, YAO L Y, HE H B, et al. Preparation and environmental toxicity of non-sintered ceramsite using coal gasification coarse slag[J]. *Archives of Environmental Protection*, 2023, 45(2): 84–90. .
- [66] 张祎旸, 武陈, 曹宗伦, 等. 煤气化炉渣免烧陶粒的制备及其在反硝化滤池中的应用[J]. 现代化工, 2024, 44(S1): 213–217.
ZHANG Yiyang, WU Chen, CAO Zonglun, et al. Preparation of non-sintering coal gasification slag ceramsite and its application in denitrification filter[J]. *Modern Chemical Industry*, 2024, 44(S1): 213–217.
- [67] 孙浩, 蒋林亮, 常新卓, 等. 煤气化渣免烧陶粒滤料强度和孔结构的调控研究 [J/OL]. 煤炭科学技术, 2025: 1–11 [2025–04–15]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=MTKJ20250507005&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
SUN Hao, JIANG Linliang, CHANG Xinzhuo, et al. Regulation on strength and pore structure of non-sintered ceramsite filter material derived from coal gasification slag[J/OL]. *Coal Science and Technology*, 2025: 1–11 [2025–04–15]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=MTKJ20250507005&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [68] 范宁, 张逸群, 樊盼盼, 等. 煤气化渣特性分析及资源化利用研究进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(8): 145–154.

- FAN Ning, ZHANG Yiqun, FAN Panpan, et al. Research progress on characteristic analysis and resource utilization of coal gasification slag[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(8): 145–154.
- [69] YIN H, TANG Y, REN Y, et al. Study on the characteristic and application of gasification slag from Texaco gasifier[J]. Coal conversion, 2009, 32: 30–33.
- [70] ACOSTA A, IGLESIAS I, AINETO M, et al. Utilisation of IG-CC slag and clay steriles in soft mud bricks (by pressing) for use in building bricks manufacturing[J]. Waste Management, 2002, 22(8): 887–891.
- [71] 冯银平, 尹洪峰, 袁蝴蝶, 等. 利用气化炉渣制备轻质隔热墙体材料的研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(3): 497–501, 510.
- FENG Yinping, YIN Hongfeng, YUAN Hudie, et al. Study on the preparation of lightweight heat-insulation wall materials using gasification slag[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(3): 497–501, 510.
- [72] 章丽萍, 温晓东, 史云天, 等. 煤间接液化灰渣制备免烧砖研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(2): 354–358.
- ZHANG Liping, WEN Xiaodong, SHI Yuntian, et al. Research on making non-burnt brick from indirect coal liquefaction residues[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(2): 354–358.
- [73] 云正, 于鹏超, 尹洪峰. 气化炉渣对铁尾矿烧结墙体材料性能的影响[J]. 金属矿山, 2010(11): 183–186.
- YUN Zheng, YU Pengchao, YIN Hongfeng. Effect of gasification slag on the properties of sintered wall materials with iron ore tailings[J]. Metal Mine, 2010(11): 183–186.