

电石渣综合利用现状及展望

王延凤¹, 李智力^{1*}, 何东升¹, 唐 远¹, 刘 立^{2,3}, 陈红兵^{2,3}

(1. 武汉工程大学资源安全与工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 楚源高新科技集团股份有限公司, 湖北 荆州 434400; 3. 湖北金楚染料中间体产业技术研究院有限公司, 湖北 荆州 434400)

摘要:从电石渣基本物理化学性质出发, 系统综述了电石渣除杂方法及电石渣在建筑材料、化工生产、环境治理、土壤修复等领域的应用现状与研究进展, 分析了电石渣在综合利用中的不足, 并指明未来发展方向, 以期电石渣资源化利用提供参考。

关键词:电石渣; 除杂; 综合利用; 规模化; 高值化

中图分类号: X78

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)07-0040-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.07.008

Present situation and prospects of comprehensive utilization of carbide slag

WANG Yan-feng¹, LI Zhi-li^{1*}, HE Dong-sheng¹, TANG Yuan¹, LIU Li^{2,3}, CHEN Hong-bing^{2,3}

(1. School of Resources & Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. Chuyuan High-tech Group Co., Ltd., Jingzhou 434400, China;

3. Hubei Jinchu Dye Intermediate Industry Technology Research Institute Co., Ltd., Jingzhou 434400, China)

Abstract: Based on the basic physical and chemical properties of carbide slag, this paper systematically reviews the application status and research progress of carbide slag in building materials, chemical production, environmental governance, soil remediation and other fields, analyzes the shortcomings of carbide slag in comprehensive utilization, and points out the future development direction, in order to provide a reference for the resource utilization of carbide slag.

Key words: carbide slag; impurity removal; comprehensive utilization; large-scale; high-value

电石渣是电石水解制备乙炔的工业副产物, 主要成分是 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ^[1]。传统工业生产中, 每消耗 1 t 电石产生 1.5 ~ 1.9 t 的电石渣。电石渣成分复杂、资源化利用低, 目前主要采取填埋或露天堆存的处理方式。长期露天堆存不仅占用大量土地, 还因颗粒细小、高碱性, 对周围环境造成危害^[2]。

电石渣是一种富钙资源, 干燥后呈灰白色, 具有颗粒细小、比表面积大、热分解温度低、溶解速度快等特点^[3], 可作为优质钙基资源用于建筑材料生产、化工产品制备、土壤修复和环境治理等方面^[4]。电石渣的资源化利用不仅能有效解决处置难题, 还可推动工业废渣向高附加值产品的转化, 实现环境效益与经济效益双赢。

本文中系统阐述了电石渣的理化特性与综合利用现状, 剖析了现有技术瓶颈, 为电石渣的资源化利用提供理论支撑与技术参考。

1 电石渣基本特性

1.1 电石渣分布及化学组成

随着电石行业的快速发展, 我国已成为全球最

大的电石生产国与消费国。其中, 内蒙古产量约占全国的 31%, 新疆约占 20%。受区域资源条件及生产原料的差异, 不同地区电石渣的化学组成存在差异(详见表 1)。本文中选取新疆、内蒙古、贵州及河南等地的电石渣数据进行对比分析^[5-8]。

表 1 电石渣的化学组成(氧化物计, 质量分数) %

样品	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	MgO	烧失量	其他
内蒙古	67.59	2.12	2.49	1.20	—	0.45	0.12	21.31	4.72
新疆	71.81	2.50	0.95	0.45	0.17	0.20	0.11	23.40	0.34
贵州 1	66.19	2.00	2.56	1.20	—	0.45	0.12	25.94	1.48
贵州 2	64.57	3.16	2.72	1.52	—	0.42	0.72	25.12	1.70
河南	62.68	17.68	15.03	1.31	0.47	1.19	0.44	—	1.20

由表 1 可知, 电石渣主要成分为钙基组分, CaO 含量在 62% ~ 84% 之间, 并含 SiO₂、Al₂O₃、SO₃、Fe₂O₃、MgO 等杂质, 烧失量 21% ~ 25%。其中, 宁夏电石渣 CaO 含量高达 72.66%, SO₃、Fe₂O₃、MgO 等杂质较少, 纯度明显优于其他地区。这种差异主要源于各地制备电石原料(石灰石和煤)中杂质含量不同。

收稿日期: 2025-09-25; 修回日期: 2026-05-04

基金项目: 湖北省揭榜制科技项目(2024BEB004); 湖北省科技计划项目(2025BCB065); 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)

作者简介: 王延凤(2000-), 女, 硕士生; 李智力(1989-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为固废资源化利用和矿物加工, 通讯联系人, 19079201@wit.edu.cn。

1.2 电石渣粒径分布

各地电石渣粒径分布如表 2 所示^[5-8]。内蒙古、新疆地区的电石渣以细颗粒为主(<100 μm),整体细于其他地区。贵州电石渣粒径主要集中在 100 μm 以上,粒径相对较大,这可能是由于贵州地区湿度较大,长期堆放的渣堆吸收空气中水分,产生大量 CaCO₃ 颗粒,从而导致粒径偏粗。

表 2 各地电石渣粒径分布 %

样品	<50 μm	50~100 μm	100~240 μm	>240 μm
内蒙古	81.36	15.29	3.35	—
新疆	63.46	34.68	6.05	—
贵州 1	3.32	18.08	19.31	58.40
贵州 2	4.79	30.09	23.91	41.21

电石渣的利用途径取决于物化特质。小粒径电石渣,活性较高,综合利用时能发挥较大效能^[2]。高纯度电石渣更适用于作硝石灰生产各种化工制品;杂质较高的电石渣,适用于建材、土壤修复、环境治理等对石灰纯度要求不高的领域。

2 电石渣所含杂质及去除方法

2.1 电石渣所含杂质

由表 1 可知,电石渣主要成分为 Ca(OH)₂,并含少量 C、Si、Fe、Mg 等杂质元素。分级酸解表明,C 为电石制备过程中未反应完全的煤粉和反应生成的副产物 SiC;Si 主要以 SiO₂ 和 MgSiO₃ 的形式存在;Fe 主要以 Fe₃O₄ 的形式存在;Mg 主要以 MgSiO₃ 的形式存在^[1],主要由电石原料不纯导致。此外,因长期堆放,部分 Ca(OH)₂ 会与 CO₂ 反应生成 CaCO₃。电石渣中还含有少量乙炔、硫化物、磷化氢等气体杂质^[9]。这些杂质会影响后续利用,因此需先进行除杂处理。

2.2 电石渣杂质去除方法

目前电石渣的除杂方法主要有化学除杂和物理除杂^[10]。化学除杂通过向电石渣中添加浸出剂,溶解钙质成分,经固液分离获得高钙溶液,为后续制备含钙产品提供原料。物理除杂则利用各组分的密度、粒度、磁性等差异,通过沉降、水力旋流、旋风分离、筛分、磁选等技术实现杂质去除。

2.2.1 化学除杂法

化学除杂工艺中,通常使用酸浸出和盐浸出(反应方程式见表 3)。酸浸出利用盐酸、硝酸等药剂与电石渣中的氢氧化钙反应,将含钙溶液转移至

液相,再经固液分离除去不溶性杂质^[11]。酸浸出存在设备易腐蚀、环保要求高、经济效益差等弊端,工业应用受到限制。为此,学者们开展了铵盐、有机酸盐等盐类浸出研究,可选择性溶解氢氧化钙,并通过固液分离除去杂质。郭琳琳等^[12]采用氯化铵作浸出剂,在未添加额外氯化铵、pH=8 的中性环境中反应 30 min,Ca 浸出率可达 93.31%。盐浸出具有条件温和、设备简单且环境友好等优势,因此有一定工业应用。

表 3 不同化学除杂工艺反应方程式

工艺类型	除杂反应式
酸浸出	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+ = \text{Ca}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$
盐浸出	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{NH}_4^+ \longrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$

化学除杂法虽然效率高、产物品相好、纯度高,但化学反应时需添加多种药剂,工艺流程复杂,成本高并伴有副产物产生,可能会造成安全隐患和环境污染。

2.2.2 物理除杂法

现有物理除杂技术主要以筛分、水力旋流、旋风分离、磁选技术为主。筛分技术主要针对杂质与氢氧化钙颗粒在粒径分布上的差异,使物料依次经过不同孔径的筛子,实现杂质分离的目的。然而,传统的筛分技术适用于去除大颗粒杂质,无法有效分离电石渣中的细小颗粒杂质。为此,研究人员提出水力旋流技术作为替代方案。水选技术是基于电石渣中杂质与氢氧化钙密度差异由水力旋流器分离的方法,但该技术存在耗水量大、动力消耗大等问题。针对上述问题,研究人员又分别提出旋风分离技术和磁选技术。旋风分离技术基于物料各组分的密度差异,在旋风处理器中实现杂质的有效分离。旋风分离技术既可分离出细小颗粒又可减少水资源浪费、降低生产成本和周期。磁选技术是基于物料中各组分磁性差异,物料在磁选设备中,受力及运动轨迹不同,实现磁性杂质的高效分离。

现有物理除杂技术存在分离精度低、误差率高、耗能大且仅适用于单一或双组分颗粒除杂的问题,因此实际生产中需采用多种技术协同除杂。

3 电石渣建材化利用

电石渣因反应活性高,浓缩后可替代石灰石作碱催化剂,与水泥、煤渣等协同制备胶凝材料,是生产新型环保建材的重要原料,广泛用于石膏砌块、加气混凝土砌块、蒸压泡沫混凝土砌块及轻炉渣砖

等^[13-15]建筑砌块。

电石渣制备蒸气加压混凝土砌块时,因 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶解度低,导致发泡速度慢、发泡不均匀、空隙大等问题,造成粗胚易坍塌、固化周期长。为此, Sun 等^[16]提出电石渣溶解时添加碳酸钠与 0.1% ~

0.3% 铝粉,优化发泡和水化过程,显著增强了砌块强度和砌块干燥收缩性能,增强砌块尺寸稳定性。韩福强^[17]通过对工艺流程改进(图 1),提出“外补热、外加剂”强化生产工艺,提高了砌块的环保性与经济性。

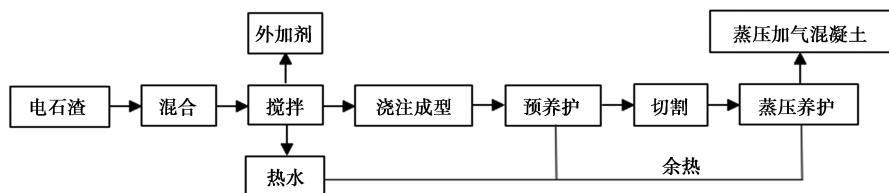


图 1 蒸气加压混凝土砌块工艺流程

目前,电石渣制备砌块不仅能减少石灰石用量,还可降低经济成本、降碳减排,实现工业固废的资源化利用,与我国“碳达峰、碳中和”的战略目标相契合。然而,电石渣制备的建筑砌块因含水量较高生产时需蒸发大量水分,导致耗能大大增加。同时该工艺还存在重金属浸出等问题,这就需要从工艺生产方面进行完善,降低运行成本及危害。

电石渣中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 因反应活性高、分解温度低,在水泥烧结时能显著促进硅酸盐矿物生成,是生产水泥的优质二次资源。目前,电石渣与粉煤灰、甘蔗渣灰、赤泥^[18-19]等工业固废,按一定比例混合可制备出性能优良的水泥产品(详见表 4)。

表 4 电石渣制备水泥力学性能对比 MPa

项目	3 d	7 d	28 d
电石渣+粉煤灰	9.50	10.60	22.00
电石渣+甘蔗渣灰	—	—	32.70
电石渣+赤泥	8.30	8.50	12.40

电石渣与粉煤灰、赤泥等混合制备新型复合胶凝砌块,在强度和抗渗性能方面均高于普通混凝土。电石渣与 Na_2CO_3 协同激发碱性复合材料,促进水化硅(铝)酸钙 $[\text{C}-(\text{A})-\text{S}-\text{H}]$ 凝胶生成,使结构更紧密,进而优化胶凝材料性能与微观结构^[20]。由此可知,电石渣可替代水泥作碱催化剂,制备水化硅酸钙、水化铝酸钙、水化硅铝酸钙 $(\text{C}-\text{S}-\text{H}, \text{C}-\text{A}-\text{H}, \text{C}-\text{A}-\text{S}-\text{H})$ 等复合胶凝材料。为促进 $\text{C}-\text{S}-\text{H}$ 凝胶形成, Namarak 等^[21]提出高温养护促进水化反应,可有效促进 $\text{C}-\text{S}-\text{H}$ 凝胶形成,从而提高混凝土力学性能。综上所述,电石渣作水泥碱催化剂,不仅增加水泥强度与耐久性,还能提高固废利用价值。

4 以电石渣为原料制备化工产品

电石渣富含大量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 其应用已延伸至精细化工领域,用于生产高纯度氧化钙、纳米碳酸钙、硫酸钙等无机化工产品。

4.1 氧化钙

采用电石渣替代石灰石制备氧化钙,既能实现钙资源循环利用,又具备良好的环境效益。目前,电石渣提纯工艺主要有物理法和化学法。物理法通过离心分离、烘干、煅烧等工序获得氧化钙,工艺流程简单但能耗高、产品附加值低,限制了工业发展。化学法则是向电石渣中加入化学药剂,通过固液分离除去杂质,经过碳化、结晶、固液分离,最后煅烧得到高纯度氧化钙,但工艺流程复杂,存在运行成本高、滤渣难以处理的问题(表 5)。针对上述问题,刘菁等^[22]提出电石渣制备氧化钙的循环利用技术:首先对电石渣浆液进行固液分离,湿渣经电石炉气和兰炭炉气烘干、破碎和煅烧,分解为氧化钙,再进行分级除杂制成脱硫剂,精粉通过压球工艺制成球团(图 2)。该技术显著提高了电石渣的利用价值,符合循环利用政策,具有良好的推广价值。

表 5 氧化钙不同制备方法对比

方法	工艺	优点	缺点
物理方法	离心分离→煅烧	工艺简单、产量高	高能耗、低纯度、产品附加值低
化学方法	电石渣+浸出剂→过滤→固液分离→煅烧	产品纯度高、价值高	工艺复杂、生产成本高、有滤渣产生

电石渣制备氧化钙工艺具有成本低、碳排放量少等优势,但实际应用中存在原料成分波动大、废弃物易造成二次污染等问题。因此,需建立原料标准

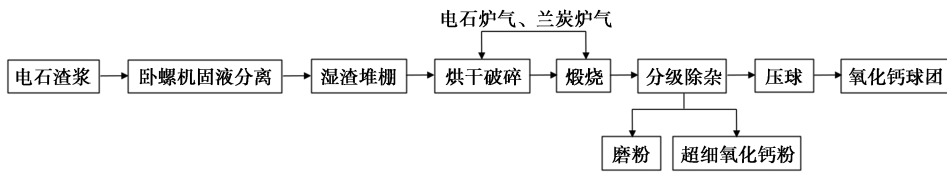


图 2 电石渣制备氧化钙循环利用技术

化的处理体系、优化煅烧工艺,将工艺环境提升至工业化水平。

4.2 纳米碳酸钙

纳米碳酸钙因经济、高效性,广泛应用于油墨、纸张、塑料、医药、化妆品等多个领域。基于电石渣制备纳米碳酸钙,可通过调控反应参数定向合成方解石型(热稳定性)、球霏石型(亚稳态)、文石型(特殊形态)3 种不同的晶型,其中方解石型最为常见。目前工业化生产主要采用浸出-碳化法:通常使用化学药剂 NH_4Cl 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 等铵盐或柠檬酸钠、葡萄糖酸钠等有机浸出剂浸出电石渣,得到高钙溶液;随后加入碳化剂(CO_2),通过控制溶液 pH、碳化时间、碳化温度、 CO_2 流速,实现对产品晶型和粒径的精准调控,得到各种类型的碳酸钙产品,具体工艺优化参数如表 6 所示。

表 6 电石渣制备纳米碳酸钙现状

原料	浸出剂	碳化剂	结论
电石渣	NH_4Cl [23]	CO_2	38 nm 的方解石型碳酸钙
电石渣	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ [3]	CO_2	106 nm 且纯度接近 93% 的超细文石
电石渣	柠檬酸钠 [24]	CO_2	10~30 nm 的方解石型碳酸钙

制备纳米碳酸钙的关键在于合成方法、添加剂、反应条件及表面改性等。该工艺目前存在流程复杂、工艺耗能高等技术瓶颈。因此需开发低成本、高效率的绿色制备工艺,并建立精准的晶型调控体系,实现碳酸钙产品的高值化。

4.3 硫酸钙

硫酸钙是一种环境友好型无机材料,广泛用于复合材料、医疗、环保、建筑等领域。电石渣可制备无水硫酸钙(CaSO_4 ,硬石膏)和半水硫酸钙($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$,熟石灰)2 种晶型。其中,无水硫酸钙晶须因热稳定性高、力学性能好得到广泛应用。

电石渣制备硫酸钙的核心工艺包括反应温度、pH 和添加剂等。李强等 [25] 提出强化晶须工艺(工艺流程见图 3),微波强化下反应 10 min 即可获得长径比 70、形貌规整且尺寸均匀的硫酸钙晶须。

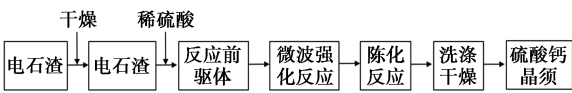


图 3 电石渣制备硫酸钙晶须工艺

电石渣制备硫酸钙的工艺优势在于固废资源化利用率高、反应效率好、应用范围广等。然而,该工艺存在杂质干扰、工艺复杂、产率低等问题。未来需深度优化电石渣除杂技术,推进低能耗工艺的研发,为企业创造更多经济效益。

5 以电石渣为原料进行环境治理

5.1 处理酸性废水

电石渣在处理酸性废水中具有显著优势,主要体现在中和反应、重金属去除及硫酸根固定等方面。电石渣中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 为强碱性,可有效提高废水的 pH,使废水中的重金属沉淀,达到废水中和、重金属去除的目的。

研究表明,电石渣对废水中铜、铁、锌等重金属的去除率可达 99% 以上。叶旭润等 [26] 采用电石渣-碳酸钠协同处理脱硫酸废水,对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 去除率达 99%,出水浓度降低至 1 mg/L,显著降低处理成本和澄清池占地面积。Karim 等 [27] 研究表明,电石渣与酸性废水接触时间 60 min 后,可将溶液 pH 由 2.5 提升至 12.8,铁离子去除率达 99.73%。

综上所述,废弃电石渣在酸性废水处理领域展现出较好的应用前景。但局限性在于,生成的沉淀物难以资源化利用,导致固体废弃物堆积及二次环境污染。

5.2 处理酸性废气

电石渣作烟气脱硫剂,不仅能减少传统方法对石灰石、 CaCO_3 、 MgO 、液氮等化学药剂的依赖,还能有效降低运行成本,实现资源循环利用,从而达到“以废治废”的目的。

研究表明,电石渣渣粒(<75 μm)在适宜条件下脱硫率高达 97%。通过将电石渣中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与烟气中 SO_2 进行中和反应,生成 CaSO_4 或其他较为稳定的化合物,可使排放烟气中 SO_2 含量降为 20 mg/m^3 。

与传统石灰石脱硫剂相比,电石渣钙含量高、比表面积大,可显著提高固硫反应速率,脱硫效率为99.15%,消耗量仅为石灰石的一半^[28]。

综上所述,电石渣替代石灰石进行烟气脱硫,既能实现工业固废的资源化,减少对石灰石等脱硫产品的消耗,又能有效降低脱硫成本,经济效益显著,践行了“以废治废”和“资源循环利用”的理念。需要注意的是,电石渣在处理酸性废气时产生的硫酸钙、脱硫石膏,目前还没有经济、有效的处理方法,未来需加强此类问题的研究。

6 以电石渣为原料进行土壤修复

电石渣渣液(pH>12)是碱性土壤修复材料,优势在于将酸性土壤pH调节至适宜范围、通过离子交换或沉淀固化土壤中的重金属,为土壤提供丰富的钙元素等。

Han等^[29]通过电石渣中和反应提高土壤中的pH,添加20%的电石渣可使酸性铜矿土壤的pH由4.5提升至6.0,能有效抑制铅、铁等重金属的浸出。Sun等^[30]采用离子交换技术修复铜污染土壤,使钙离子竞争土壤胶体的吸附位点,当电石渣含量为15%时,体系pH从6.2逐渐升高至10.5,该法使可交换铜含量减少85%,残渣态铜则提升至65%。由此可知,电石渣中的碱性物质和钙组分能够提高酸性土壤pH,有效稳定土壤中的重金属(Cd、Pb、Zn等)等污染成分。

鉴于此,电石渣是低成本的环境友好型修复材料。使用过程中需合理用量,既要充分发挥改良作用,又要避免因用量过度导致土壤碱化,以及重金属杂质累积造成土壤二次污染。另外,需建立精准监测系统,以便实施高效、安全的土壤改良。

7 结语与展望

电石渣本质上是富含钙资源的碱性固体废物。以往,大量电石渣多采用堆存或填埋的方式处理,此举不仅占用土地资源,同时对环境造成严重威胁。电石渣作为富钙二次资源,可用于建筑材料、化工生产、环境治理、土壤修复等领域。电石渣资源化利用兼具经济效益和环保效益。

电石渣的综合利用发展方向如下:①从“低端”走向“高端”,从生产水泥、砌块等大宗建材,向合成高附加值化工产品、功能材料迈进;②从“单一”走向“协同”,从单一企业、单一技术的利用,走向跨行业、多技术的产业生态融合,分级利用不同品质电石

渣,兼具高值化和规模化利用;③从“成本中心”走向“利润中心”,在政策和市场的双重驱动下,电石渣处理将从一项环保负担转变为新的经济增长点。最终目标是构建一个技术先进、经济可行、环境友好的电石渣资源化利用体系,使其成为我国绿色低碳循环发展经济体系中不可或缺的重要一环。

参考文献

- [1] Yang H, Cao J W, Wang Z, *et al.* Discovery of impurities existing state in carbide slag by chemical dissociation [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2014, 130: 66-73.
- [2] 邵岚, 马丽萍, 杨杰, 等. 电石渣的资源化利用现状 [J]. *现代化工*, 2024, 44(3): 79-83.
- [3] Li W, Huang Y, Wang T, *et al.* Preparation of calcium carbonate nanoparticles from waste carbide slag based on CO₂ mineralization [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 363: 132463.
- [4] 冯冬梅, 刘渊, 汤升亮, 等. 电石渣制备轻质碳酸钙循环工艺条件的优化 [J]. *现代化工*, 2014, 34(5): 117-121.
- [5] 李彦鑫, 张金山, 曹永丹, 等. 电石渣的理化性质表征及其应用研究 [J]. *无机盐工业*, 2018, 50(4): 49-52.
- [6] 胡迪飞, 毛明春, 刘学炎, 等. 工业电石渣在新疆地区的资源化应用现状及前景 [J]. *环境工程*, 2023, 41(S1): 420-424.
- [7] 董永刚, 曹建新, 刘飞, 等. 电石渣理化性质的分析与表征 [J]. *环境科学与技术*, 2008, (9): 95-98.
- [8] 史海宁, 邓建民. 电石渣生产高效脱硫剂的技术研究 [J]. *中国氯碱*, 2024, (11): 47-51.
- [9] 牟秀娟, 朱干宇, 颜坤, 等. 干法电石渣性质分析及乙炔气逸出行为研究 [J]. *化工学报*, 2021, 72(2): 1107-1115.
- [10] 李雅茹, 于波, 陆生贵, 等. 电石渣除杂方法研究进展 [J]. *耐火与石灰*, 2022, 47(2): 17-18.
- [11] 张峰杰. 电石渣杂质去除工艺及矿化 CO₂ 制备高纯纳米碳酸钙研究 [D]. 太原: 山西大学, 2024.
- [12] 郭琳琳, 徐美, 刘博静, 等. 氯化铵浸取电石渣制备碳酸钙研究 [J]. *应用化工*, 2017, 46(9): 1757-1760.
- [13] 张宇, 王银生. 利用粉煤灰、电石渣制备 B05 级加气混凝土砌块研究 [J]. *粉煤灰综合利用*, 2021, 35(5): 99-102.
- [14] 韩福强, 檀星, 赵风清. 粉煤灰-电石渣加气混凝土砌块工艺参数优化 [J]. *混凝土*, 2019, (7): 116-119, 124.
- [15] Yuan B, Straub C, Segers S, *et al.* Sodium carbonate activated slag as cement replacement in autoclaved aerated concrete [J]. *Ceramics International*, 2017, 43(8): 6039-6047.
- [16] Sun D, Yin F, Deng Y, *et al.* Utilization of carbide slag in autoclaved aerated concrete (CS-AAC) and optimization: Foaming, hydration process, and physic-mechanical properties [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 19: e02354.
- [17] 韩福强. 电石渣代替部分石灰生产蒸压加气混凝土砌块 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2019.
- [18] Rattanashotinunt C, Thairit P, Tangchirapat W, *et al.* Use of calcium carbide residue and bagasse ash mixtures as a new cementitious material in concrete [J]. *Materials & Design (1980-2015)*, 2013, 46: 106-111.

(下转第50页)

- [9] Zhao W Y, Wang S M, Zhao W X, *et al.* Continuous flow nitration of nitrobenzene; Kinetic modeling and bayesian optimization [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2025, 64(20): 9881–9889.
- [10] Jobdeedamrong A, Crespy D. Redox-responsive polyprodrugs: Recent innovations in reduction- and oxidation-responsive drug delivery systems [J]. Chemistry of Materials, 2025, 37(6): 2073–2086.
- [11] Zhang H R, Xu F, Zhou X, *et al.* Continuous flow synthesis and kinetic study of diphenyl sulfoxide in a microreactor [J]. Organic Process Research & Development, 2025, 29: 1279–1290.
- [12] Xu Y Y, Zhao S N, Yang L X, *et al.* Continuous flow synthesis of di-tert-butyl peroxide in microreactors and kinetic study [J]. AIChE J, 2025, 71: e18727.
- [13] Lan Z, Lu Y. An intensified chlorination process of 4-nitroaniline in a liquid-liquid microflow system [J]. Reaction Chemistry & Engineering, 2021, 6(12): 2259–2265.
- [14] Zhao H, Xiao X, Hao R Q, *et al.* Continuous flow synthesis of prenyl chloride on demand through surface mediated hydrochlorination [J]. Journal of Flow Chemistry, 2025, 15: 39–46.
- [15] 王法军, 陈安, 徐建鸿. 微反应器内颜料红 57 连续化合成工艺研究 [J]. 化工学报, 2024, 75(10): 3600–3609.
- [16] Shi Z P, Wang X D, Yin D F, *et al.* High-flux continuous-flow synthesis of C.I. pigment yellow 12 from clear alkaline solutions of the Coupling Component [J]. Organic Process Research & Development, 2022, 26, 3: 661–669.
- [17] Feng B C, Hou X C, Wang T L, *et al.* Synthesis of bicyclic esters in a continuous-flow microreactor [J]. Chemistry Select, 2020, 5(3): 952–956.
- [18] Li H, Liu X, Xiao Y, *et al.* One-pot synthesis of 5-norbornene-2,3-dicarboxylic anhydride with high exo/endo ratio in a microreactor under high temperature and appropriate pressure [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 498: 155561.
- [19] Sagmeister P, Prieschl M, Kaldre D. Continuous flow-facilitated CB2 agonist synthesis, Part 1: Azidation and [3+2] cycloaddition [J]. Organic Process Research & Development, 2023, 27(4): 592–600.
- [20] Kinkutu G K, Roy L C. C₃-Alkylation of furfural derivatives by continuous flow homogeneous catalysis [J]. Beilstein Journal of Organic Chemistry, 2023, 19: 582–592.
- [21] Ishitani H, Yu Z, Ichitsuka T, *et al.* Two-step continuous-flow synthesis of fungicide metalaxyl through catalytic C—N bond-formation processes [J]. Advanced Synthesis & Catalysis, 2022, 364(1): 18–23.
- [22] Xu Y M, Liu S L, Meng W J, *et al.* Continuous sulfonation of hexadecylbenzene in a microreactor [J]. Green Processing and Synthesis, 2021, 10(2): 219–229.
- [23] Geng Y H, Huang J P, Tan B, *et al.* Efficient synthesis of dodecylbenzene sulfonic acid in microreaction systems [J]. Chemical Engineering and Processing, 2020, 149: 107858.
- [24] Wang S J, Zhang J, Peng F, *et al.* Enhanced hydroformylation in a continuous flow microreactor system [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(1): 88–98.
- [25] Xu F, Chen J L, Xie X X, *et al.* Synthesis of a crizotinib intermediate via highly efficient catalytic hydrogenation in continuous flow [J]. Organic Process Research & Development, 2020, 24(10): 2252–2259.
- [26] 宋璟, 王玉军, 邓建, 等. 微反应器内芳烃硝化反应研究进展 [J]. 化工学报, 2024, 75(11): 3911–3922.
- [27] Liu L X, Zhao S N, Yao C Q, *et al.* A novel approach to intensify fluid mixing by introducing a “pre-cavitation” stage in an ultrasonic microreactor [J]. AIChE J, 2025, 71: e18810.
- [28] Liang J, Xu H T, Zhang Z X, *et al.* Enzymatic reaction in a capillary microreactor with surface-immobilized enzyme [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2024, 63: 8542–8552.
- [29] Liu Y X, Wang D R, Chen Y, *et al.* Development of a new synthetic process for triflumezopyrim and continuous flow attempts [J]. Organic Process Research & Development, 2025, 29: 909–919. ■

(上接第44页)

- [19] 李钰佳, 段思宇, 吴浩, 等. 赤泥-粉煤灰-电石渣复合胶凝材料的力学性能及水化机理 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44(3): 1041–1049.
- [20] 陈友治, 吴修齐, 殷伟淞, 等. 电石渣对复合胶凝材料力学性能和微观结构的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(9): 3196–3203.
- [21] Namarak C, Satching P, Tangchirapat W, *et al.* Improving the compressive strength of mortar from a binder of fly ash-calcium carbide residue [J]. Construction and Building Materials, 2017, 147: 713–719.
- [22] 刘菁, 王记孝, 赵驰峰. 电石渣制氧化钙循环利用技术研究与应 [J]. 中国氯碱, 2025, (2): 43–48.
- [23] Yan K, Zhou K G. Preparation of nano calcium carbonate from calcium carbide residue by liquid phase process [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2008, 28(6): 535–537.
- [24] Wang Y, Ye B, Hong Z, *et al.* Uniform calcite micro/nanorods preparation from carbide slag using recyclable citrate extractant [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 253: 119930.
- [25] 李强, 刘福立, 尚超, 等. 微波外场强化电石渣制备硫酸钙晶须及其机理分析 [J]. 人工晶体学报, 2020, 49(1): 125–130.
- [26] 叶旭润, 李进, 黄忠源, 等. 电石渣-碳酸钠法脱硫废水预处理试验研究 [J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(6): 124–130.
- [27] Karim M A, Nasir S, Rachman S A, *et al.* Reduction of iron (II) ions in synthetic acidic wastewater containing ferro sulphate using calcium carbide residue [C]. AIP Conference Proceedings; AIP Publishing LLC, 2019, 2085(1): 020025.
- [28] Zhu G, Meng Z, Li S, *et al.* High efficiency desulfurization behavior by the sustainable low carbon utilization of carbide slag [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 159: 809–818.
- [29] Han H, Xue J, Zhang X, *et al.* Effect of carbide slag combined with biochar on improving acidic soil of copper sulfide mines [J]. Sustainability, 2023, 15(4): 3206.
- [30] Sun Y J, Ma J, Chen Y G, *et al.* Mechanical behavior of copper-contaminated soil solidified/stabilized with carbide slag and metakaolin [J]. Environmental Earth Sciences, 2020, 79(18): 423. ■