

文章编号:1674-9669(2026)01-0038-09 DOI:10.13264/j.cnki.ysjskx.2026.01.005

引文格式:王亚杰,章强,相冬文,等.创新镁冶炼技术进展与横罐皮江法革新[J].有色金属科学与工程,2026,17(1):38-46.

创新镁冶炼技术进展与横罐皮江法革新

王亚杰^{*1}, 章强¹, 相冬文¹, 胡华鑫¹, 张青华¹, 李栋¹, 吴国清^{1,2}

(1. 临沂大学材料科学与工程学院, 山东 临沂 276000; 2. 北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要:针对横罐皮江法炼镁工艺高碳排放、低能效与自动化不足等问题,本文提出区域差异化革新路径:针对陕西榆林等兰炭富集区(镁产量>50%),构建尾气净化-余热发电-耐蚀还原罐协同体系,通过余热梯级利用(吨镁能耗降至3.2 t标煤)与CO₂捕集(回收率>85%),实现能效提升与碳减排;针对绿电优势区,开发绿电驱动的高频感应加热工艺(热效率>75%)与智能温控技术(波动<±5 °C),结合多能互补供电(绿电终端电价≤0.2元/kWh),推动吨镁碳排放降低90%。研究表明,新兴技术(复式竖罐法、电内热法等)虽实验室表现优异,但规模化应用受设备寿命低、材料成本高等制约,需优先推进横罐皮江法的渐进式改进,为行业低碳转型提供区域适配方案。

关键词:炼镁;皮江法;横罐;绿色冶炼;低碳

中图分类号:TF822 **文献标志码:**A

Advances in innovative magnesium smelting technology and innovations in the Pidgeon process

WANG Yajie^{*1}, ZHANG Qiang¹, XIANG Dongwen¹, HU Huaxin¹, ZHANG Qinghua¹, LI Dong¹, WU Guoqing^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Linyi University, Linyi 276000, Shandong, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To address the challenges of high carbon emissions, low energy efficiency, and limited automation in the Pidgeon process using horizontal retort, this study proposes region-specific innovation strategies. For semi-coke-rich regions (e.g., Yulin, Shaanxi, which contributes more than 50% of magnesium production), a synergistic system integrating exhaust purification, waste heat power generation, and corrosion-resistant retorts has been developed. Through cascaded waste heat utilization (reducing energy consumption to 3.2 tons of standard coal per ton of Mg) and CO₂ capture (with a recovery ratio exceeding 85%), this system achieves enhanced energy efficiency and carbon reduction. For renewable energy-abundant regions, a high-frequency induction heating process powered by green electricity (with a thermal efficiency of over 75%) is designed, along with intelligent temperature control technology (with a fluctuation of ±5 °C). Coupled with a multi-energy complementary power supply (green electricity terminal price ≤0.2 CNY/kWh), this approach reduces carbon emissions by 90% per ton of magnesium. Research indicates that emerging technologies (e.g., duplex vertical furnaces, electric internal heating methods) demonstrate superior laboratory performance, but they face scalability challenges, including short equipment lifespans and high material costs. Therefore, incremental improvements to the Pidgeon process using horizontal retort should be prioritized to

收稿日期:2024-11-21;修回日期:2025-03-14

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(52105353);北京科技大学绿色低碳钢铁冶金全国重点实验室开放基金资助项目(KF24-17)

通信作者:王亚杰(1993—),博士,讲师,主要从事金属绿色冶炼及再生,铸造工艺模拟与优化等方面的研究。

E-mail: wangyajie@lyu.edu.cn

provide regionally adaptable pathways for the industry's low-carbon transition.

Keywords: magnesium smelting; Pidgeon process; horizontal retort; green smelting; low carbon

金属镁以其超低密度(其密度为铝的2/3、钛的2/5、钢的1/4)和轻量化特性,成为现代工业轻质材料的核心选择。其高比强度、高比刚度、易加工性、低成本与高回收率,奠定了在交通、电子等领域的不可替代性^[1-2]。镁合金的广泛应用不仅实现零部件减重(减重幅度可达30%~50%),直接推动节能减排,还通过以下性能优势拓展新兴领域:

1)工程功能材料性能:高阻尼(损耗因子>0.01)、高热导率(160 W/m·K)、宽频电磁屏蔽(30 dB@1~10 GHz)^[3-5]。

2)生物医疗:可降解植入物(体内降解周期6~12月),力学适配骨组织(弹性模量约为45 GPa)^[6]。

3)新能源:储氢密度质量分数达7.6%、锂镁电池理论容量2205 mAh/g,助力氢能与高能电池发展^[7-8]。

中国镁资源储量全球第一(占比22.5%),涵盖36亿t菱镁矿、40亿t白云石矿及48亿t盐湖镁卤水,支撑全球70%以上的镁供给^[9]。当前皮江法主导国内镁冶炼(市场份额>85%)^[10],其以煅烧白云石、硅铁、萤石为原料,通过真空热还原产出镁锭,虽成本低廉,却面临以下严峻瓶颈^[11-12]:①环保压力:吨镁碳排放23 t,硫氧化物排放>8 kg;②能效低:热损失35%,吨煤耗4.8 t标煤;③自动化不足:机械化率<30%,依赖人工操作。

针对上述问题,本研究提出“区域适配、渐进革新”策略:

1)兰炭富集区(如陕西榆林):构建尾气净化-余热发电-耐蚀材料协同体系,目标吨镁煤耗≤3.2 t,CO₂捕集率>85%。

2)绿电优势区(如四川、云南):开发绿电驱动高频感应加热(热效率>75%)与智能温控(波动<±5℃),耦合多能供电(绿电价≤0.2元/kWh),推动碳排放降低90%。

该路径以皮江法渐进改造为核心,突破传统工艺瓶颈,为行业低碳转型提供可规模化落地的解决方案^[13-18]。

1 皮江法改进工艺现状

1.1 复式竖罐免精炼“两步法”镁冶炼新技术

横罐皮江法以卧式还原罐为核心设备,将煅烧

白云石、硅铁与萤石混合压球后真空加热(10~12 h),通过硅热还原反应($\text{MgO} + \text{Si} \rightarrow \text{Mg} \uparrow + \text{SiO}_2$)产出粗镁。其优势在于设备简单、投资低,但存在罐体寿命短(平均寿命60天)、热效率低(35%热损失)、自动化程度低(机械化率<30%)、结晶镁纯度波动大(±3%)、吨镁能耗高(4.8 t标煤)及还原周期长(10~12 h)等缺陷。为突破瓶颈,郑州大学、五台云海镁业、宝武镁业等机构研发了竖罐炼镁技术,其中郑州大学张少军教授团队的“复式竖罐免精炼两步法”最具代表性^[19-20]。图1^[20]所示为复式竖罐结构及炼镁过程镁蒸气流动状况。

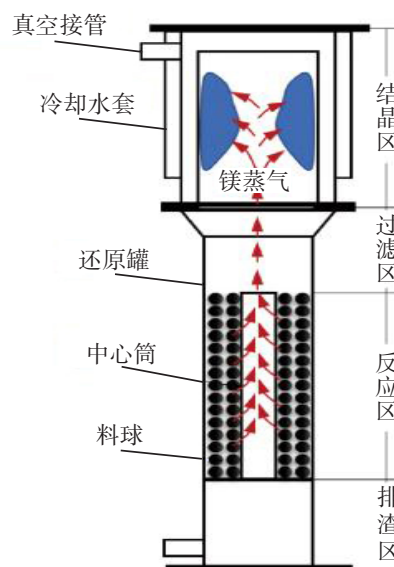


图1 复式竖罐结构及炼镁过程镁蒸气流动状况^[20]

Fig.1 Compound vertical retort structure and magnesium vapor flow in the magnesium smelting process^[20]

该技术的优势是:

1)高效设计。①复式竖罐结构:提升反应空间利用率30%,物料混合效率提高,减少堵塞问题,设备运行稳定性增强;②免精炼工艺:通过优化反应条件,省去传统精炼环节,镁纯度达国标,节能30%~40%,减少废弃物排放。

2)显著效益。①吨镁能耗仅为传统工艺的50%~60%,还原周期缩短至传统工艺周期的2/3;②机械化加料/出渣及自动化运行实现劳动力减少60%,占地面积节约50%;③综合生产成本降低20%以上。

目前,该技术已在多家企业推广(如五台云海、宝武镁业),构建清洁化生产车间,生产效率提升

25%。但该技术仍存在以下几方面的挑战:①加热不均匀导致产品质量波动,料镁比偏高增加原料成本;②还原罐寿命短(平均<6个月),设备投资回收期延长;③依赖行车操作,自动化程度仍有提升空间;④设备结构复杂,初期投资成本高(需降低约15%~20%);⑤车间通风除尘难题导致环境风险,需优化环保配套技术。

该技术未来应聚焦热能均匀分布优化、耐高温材料研发及智能控制系统集成,推动镁冶炼向低碳高效转型。

1.2 电内热法竖式炉快速炼镁新技术与新装备

针对传统真空还原罐间歇式炼镁工艺效率低、能耗高、污染重等问题,西安科技大学王晓刚教授团队通过多年研究,开发出具有自主知识产权的“连续式电内热法竖式大型炼镁炉”,完成从理论计算到半工业试验的全流程验证^[21]。图2和图3所示分别为半连续竖式炼镁炉的系统机构和半连续竖式炼镁炉的形体机构^[21]。

该技术的核心突破是:

1)热效率优化。①内加热+多热源协同:实现炉内三维温度场均匀分布,热效率提升25%,还原时间缩短至3~5 h(对比传统工艺8~12 h);②电加热清洁化:替代燃料燃烧,碳排放减少40%,无硫氧化物排放。

2)装备创新。①竖式自动进出料系统:劳动强度降低70%,单炉产能容量提升至6 t;②淘汰合金罐:采用耐高温陶瓷内衬,设备成本下降15%,寿命延长2倍。

3)智能化控制。真空与温度联动调控:生产参数波动率<5%,粗镁纯度稳定达99.90%以上。表1所列5个阶段的技术路线。

但该技术仍存在以下产业化挑战:如大型电热系统稳定性需进一步提升;6 t级装备初期投资较高,

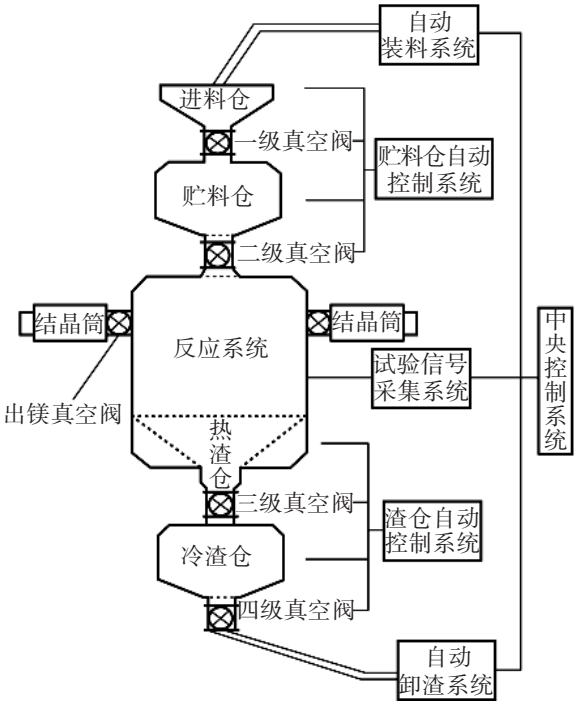


图2 半连续竖式炼镁炉的系统机构^[21]
Fig.2 System structure of semi-continuous vertical magnesium reduction furnace^[21]

表1 五个阶段的技术路线
Table 1 Five-stage technical route

阶段	关键进展	标志性成果
1	理论建模	温度场模拟验证能量利用率提升30%
2	小型实验	还原剂利用率提高10%
3	中试优化	能耗降至皮江法的67%
4	3 t装备应用	半连续进出料实现产能翻倍
5	6 t工业化验证	吨镁综合成本降低28%

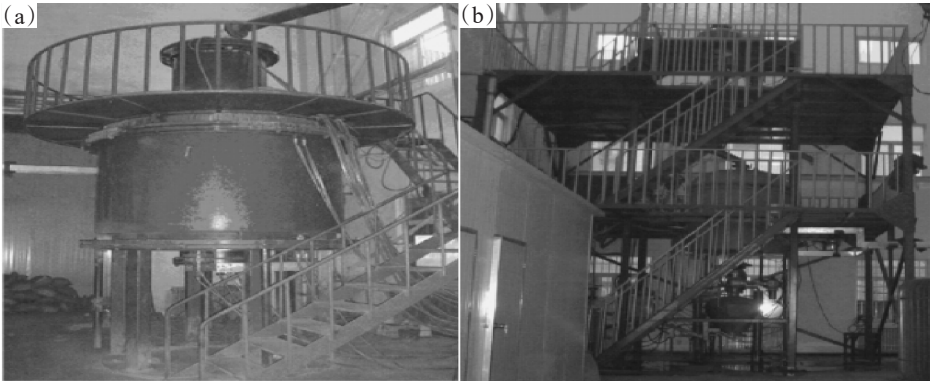


图3 半连续竖式炼镁炉的形体机构^[21]: (a)中试炉; (b)半连续炉
Fig. 3 The configuration of a semi-continuous vertical magnesium reduction furnace^[21]:
(a) Pilot furnace; (b) Semi-continuous furnace

需优化成本结构;连续化生产对原料均匀性要求严苛等。目前,该技术已通过半工业试验验证,有望推动镁冶炼从间歇式向连续化、智能化跨越,为行业碳减排目标贡献关键技术路径。

1.3 铝热法炼镁技术

2016年,河南宝隆镁业联合郑铝研究院推进铝热法炼镁技术半工业化应用,开创以铝粉为还原剂、真空条件下直接还原镁源(菱镁矿/白云石)的新路径,同步产出轻质碳酸钙、镁铝尖晶石等高附加值副产品,推动镁冶炼绿色化升级^[22-24]。其核心优势是:

1) 环保革命。①零排放:近零排放(废气/废渣综合利用率>95%);②低碳节能:每吨镁能耗较皮江法降低20%~25%,碳排放减少35%。

2) 资源增效。①镁还原率为92%~99%(条

件:还原温度为1300℃、还原时间为1h、成型压力为300 MPa),副产品综合利用率超90%;②直接利用低品位镁矿(如白云石),原料适应性增强。

3) 高值联产。副产轻质碳酸钙(建材)、镁铝尖晶石(耐火材料)等高附加值产品,提升经济效益。

图4^[22]所示为以白云石和菱镁矿为原料的铝热法炼镁工艺流程,图5^[22]所示为以菱镁矿为原料的铝热法炼镁工艺流程。其核心步骤是:

1) 原料预处理:破碎、混合镁源(白云石/菱镁矿)与铝粉。

2) 真空还原:内热式反应炉中高温真空还原,生成金属镁蒸气与固体渣。

3) 冷凝分离:镁蒸气冷凝提纯,副产物经处理转化为高值材料。

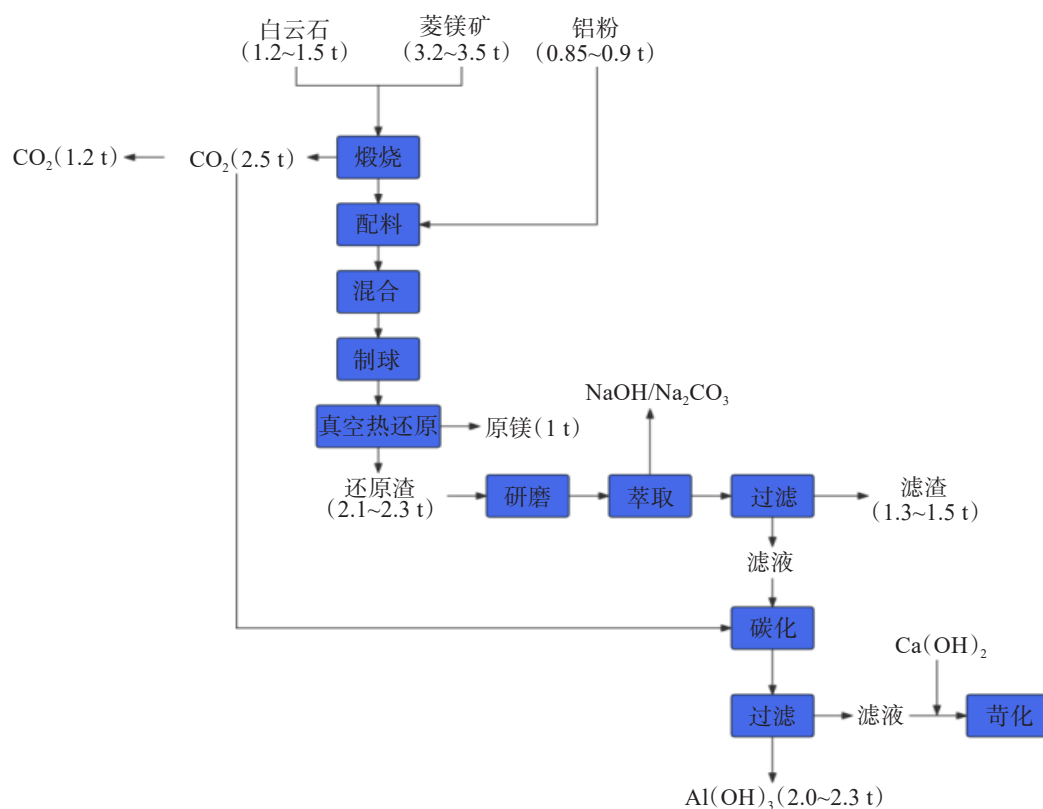


图4 以白云石和菱镁矿为原料的铝热法炼镁工艺流程^[22]

Fig. 4 Magnesium production process using dolomite and magnesite as raw materials by thermite reduction method^[22]

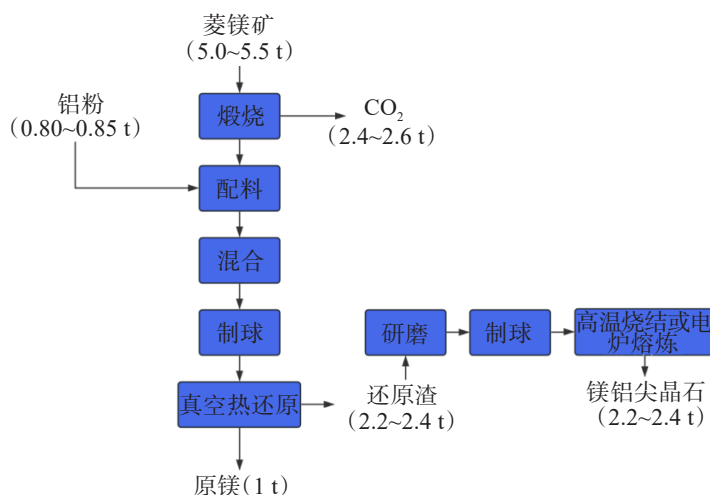
然而,目前该技术仍面临以下工业化挑战:初期直接生产成本高于皮江法10%~15%(主因铝粉消耗),需通过规模化与副产收益对冲;真空系统稳定性要求高,设备维护成本增加;反应炉寿命需提升;需验证联产副产品的长期市场竞争力。虽处半工业化阶段,铝热法已展现“低碳冶炼+循环经济”双驱动潜力。未来通过工艺优化、设备大型化等方式,有望成为镁行业绿色转型标杆技术。

1.4 原镁相对真空连续热还原技术

东北大学张延安团队首创“相对真空”概念^[25-28],定义其为镁蒸气实际压力与平衡蒸气压的差值(见式(1)),通过提高温度与惰性气体流量增强反应动力学。系统维持微正压实现连续进料-出料-冶炼,突破传统真空限制。

$$\text{相对真空度} = P_{\text{平衡}} - P_{\text{实际}} \quad (1)$$

式(1)中: $P_{\text{平衡}}$ 为镁蒸气平衡压力, $P_{\text{实际}}$ 为系统实测压力。

图5 以菱镁矿为原料的铝热法炼镁工艺流程^[22]Fig.5 Magnesium production process using magnesite as raw material by thermit reduction method^[22]

其核心优势如下:

1)流程革新。①取消真空系统,简化流程,实现全连续生产(图6);②还原周期1.0~1.5 h(传统还原周期10~12 h),热效率提升30%。

2)低碳节能。①吨镁能耗2.5~3.5 t标煤(传统近5 t),碳排放11~13 t(传统23 t);②煅烧过程捕集CO₂生成碳酸钙,球团直接升温节能15%~20%。

3)经济增效。每吨镁成本1.4~1.5万元(传统工艺成本1.7万元),并新增碳酸钙副产品收益。

白云石直接造球强度需优化;连续高温(1 300~1 400 °C)下设备寿命短等。因此,该技术虽具低碳连续化潜力,但需突破材料耐高温性、智能控制集成等关键技术,距离工业化应用预计需较长的研发周期。

表2 相对真空炼镁技术与传统皮江法关键指标比较

Table 2 Comparison of key indicators between relative vacuum magnesium production technology and conventional Pidgeon process

指标	皮江法	相对真空炼镁技术
体系压力	真空	微正压“相对真空”
连续性	不连续	全连续
原料处理	煅烧后造球	直接造球
每吨镁耗量/ 碳排放量	5 t标煤 / 23 t CO ₂	(2.5 ~ 3.5 t)标准煤/ (11 ~ 13 t)CO ₂
扩展应用范围	单一镁生产	可产锂、锆等金属

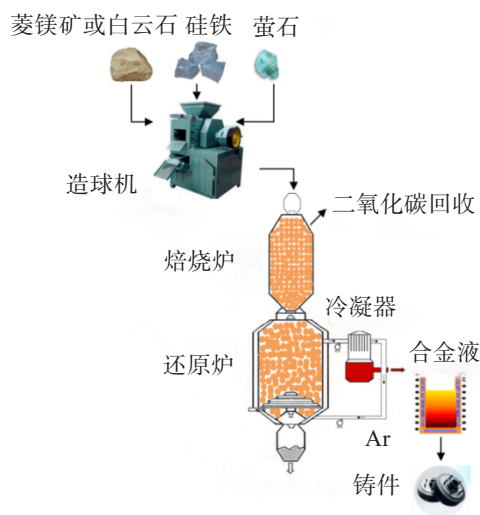


图6 相对真空炼镁技术流程示意

Fig.6 Schematic diagram of the relative vacuum magnesium production technology

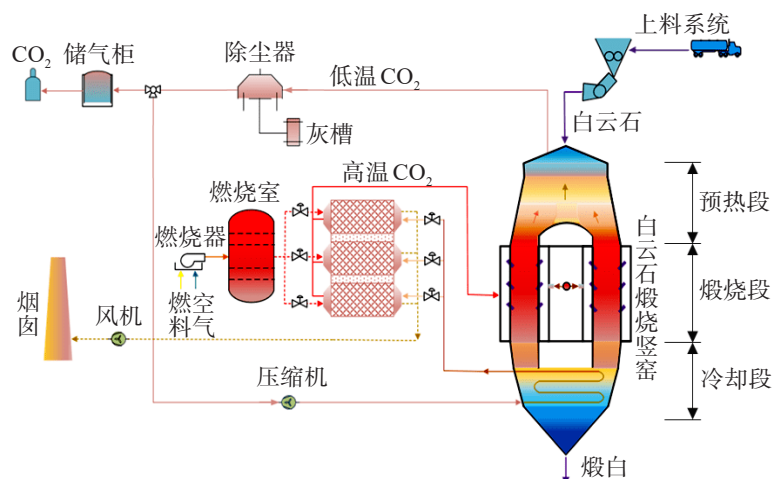
表2所列为相对真空炼镁技术与传统皮江法的对比情况。该技术目前仍存在以下问题:如设备维护成本上升,需精密控制反应条件;菱镁石/

1.5 基于CO₂循环的低碳炼镁新技术

针对白云石煅烧环节高能耗、高CO₂排放(占镁冶炼总排放60%以上)的缺点,北京科技大学夏德宏教授团队提出CO₂循环热载+竖窑分级煅烧创新方案,实现能耗与碳排放双降^[29~32]。该技术的核心创新是:

1)竖窑三区设计。预热区-煅烧区-冷却区垂直集成,物料重力自流。

2)CO₂双重利用。热载体:循环CO₂传递热量,替代传统燃料燃烧(图7^[32]);资源化回收:富集CO₂制成碳酸钙或工业气体产品。

图7 产物气循环煅烧白云石与CO₂资源化回收新工艺^[32]Fig. 7 New process for circulating calcination of dolomite with product gas and CO₂ resource recovery^[32]

如图7所示,白云石煅烧竖窑自上而下分为预热区、煅烧区和冷却区。其关键步骤如下:

1) 煅烧产气。白云石分解生成CO₂(温度 $\geq 900\text{ }^{\circ}\text{C}$),经高温除尘后分流。

2) 余热梯级利用。冷却区预热:循环CO₂吸收煅白余热(温度提升至 $600\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$);蓄热炉强化:加热至 $1\,400\text{ K}$ 成高温热载体。

3) 逆向换热。高温CO₂注入煅烧区供能,同步预热入料白云石(热效率提升40%)。

废气流经预热区完成逆流换热,顶部排出后循环/回收。

该技术的优势是:CO₂回收率 $\geq 85\%$,碳足迹较传统工艺降低50%;煅烧能耗减少30%(余热利用率 $>70\%$);产高纯度CO₂(浓度 $>95\%$)可直接用于合成燃料或建材;竖窑结构支持全天候连续作业,产能提升2~3倍。该技

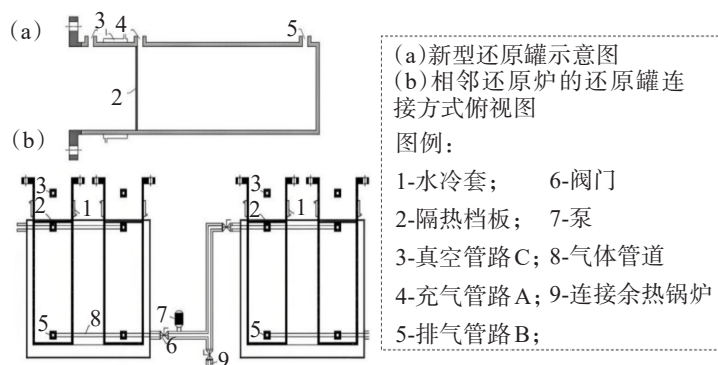
术虽处于实验室验证阶段,但契合全球碳税政策趋势,若突破材料与能效瓶颈,有望实现产业化。

1.6 煅烧—还原一体化炼镁新技术

东北大学张延安团队突破传统皮江法分步工艺限制,首创煅烧—还原一体化技术(图8^[33]),通过预制复合球团(白云石/硅铁/萤石)在单一设备内同步完成煅烧与还原,实现全流程集成优化。其核心创新是:

1) 工艺革命。双步骤合一:取消独立煅烧环节(省去回转窑),缩短流程,降低能耗;预制球团设计:多组分协同反应,提升还原效率。

2) 能源闭环。余热梯级利用:煅烧CO₂余热直接驱动还原反应,提升热能利用率。封闭式系统:高浓度CO₂集中捕集,支持矿化或化工利用。

图8 集煅烧与还原于一体的热还原炼镁方法装置示意^[33]Fig. 8 Schematic diagram of the equipment used in the calcination-reduction integration process^[33]

该技术虽处实验室试验阶段,但其短流程+低碳特性契合行业转型需求。若突破反应器寿命与球团强度难题,有望实现工业化推广。

2 未来的发展趋势与建议

尽管横罐皮江法仍占据中国镁冶炼市场的主导

地位,但其碳排放量高(吨镁排放 23 t CO₂)、低能效(热损失 35%)与人工依赖度高(机械化率<30%)等问题已无法适应“双碳”目标的要求。表 3 的对比分析显示,新兴技术仍面临着关键工业化瓶颈。因此,短期内对横罐皮江法的渐进式技术革新更具现实意义。本文针对不同资源禀赋区域提出差异化技术升级路径。

表 3 新型镁冶炼技术工业化瓶颈对比分析

Table 3 Comparative analysis of bottlenecks in the industrialization of new magnesium smelting technology

技术类型	核心工业化障碍	理论改进方向
复式竖罐法	加热不均匀(轴向温差>50 ℃)、料镁质量比偏高(1.4:1)	多级电热补偿+梯度孔隙球团设计
电内热法	电极寿命短(<6个月)、绿电成本敏感性高	绿电耦合+电极材料改性
铝热法	铝粉成本占比>40%、副产品高值化路径不足	铝渣协同冶金+钙铝酸盐建材开发
相对真空连续法	微正压控制精度(±5 Pa)、还原渣利用率低	智能压力调节+渣基固碳技术

1) 兰炭尾气高效洁净转化与镁冶炼绿色升级工艺

适用区域:陕西榆林等兰炭资源富集区(镁产量占比>50%)。

技术瓶颈:兰炭尾气直接燃烧导致热效率低(<50%)、还原罐寿命短(平均寿命 60 d)、SO_x排放高(吨镁 SO_x排放>8 kg)。

针对这些技术瓶颈,提出以下革新方案:①尾气

预处理:干法脱硫(H₂S脱除率>99%)联合稳压装置(压力稳定至 5~8 kPa),提升燃烧稳定性;②余热梯级利用:集成余热发电系统(热效率提升 20%),将吨镁能耗从 4.8 t 标煤降至 3.2 t;③耐蚀材料优化:采用 Fe-Cr-Al-Y 涂层还原罐(寿命延长至 90 d),降低设备更换频率;④CO₂集中捕集:结合化学吸收法(CO₂回收率>85%),实现尾气碳汇资源化;工艺流程如图 9 所示。

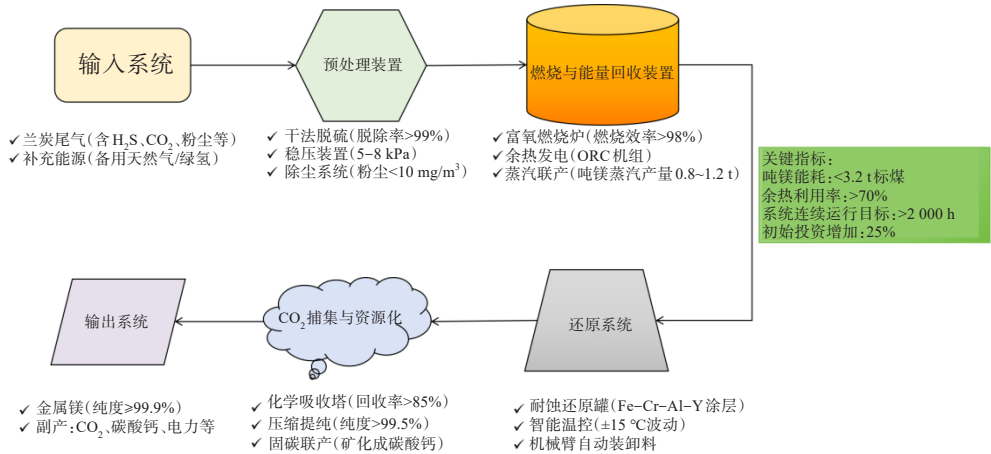


图 9 兰炭尾气高效洁净转化与镁冶炼绿色升级工艺示意

Fig. 9 Schematic diagram of efficient and clean conversion of semi-coke exhaust gas and green upgrading process for magnesium smelting

该方案的潜在挑战:需验证脱硫-燃烧-捕集系统的长期协同稳定性(目标连续运行>2 000 h),且初始投资增加约 25%。

2) 全流程电动化的洁净镁绿色冶炼工艺

适用区域:四川、云南等可再生能源富集区(绿电占比>80%)。

技术瓶颈:绿电波动性影响温度控制($\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 偏差导致镁纯度下降2%)、电解镁成本高(吨成本 > 2.5 万元)。

针对这些技术瓶颈,提出以下革新方案:①多能互补供电:构建“水电-储能-虚拟电厂”协同系统,绿电终端电价降至0.2元/kWh;②电磁加热优化:高频

感应加热(热效率 $> 75\%$),还原周期缩短至8 h;③智能化控制:部署数字孪生系统(温度波动 $< \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$);④渣资源化:开发还原渣制备 MgO-SiO_2 微晶玻璃(附加值提升300%);如图10所示。该方案的潜在挑战:需突破高温电解槽寿命(目标 > 5 年)与绿电季节性波动适应性(负荷调节响应时间 $< 10\text{ ms}$)。

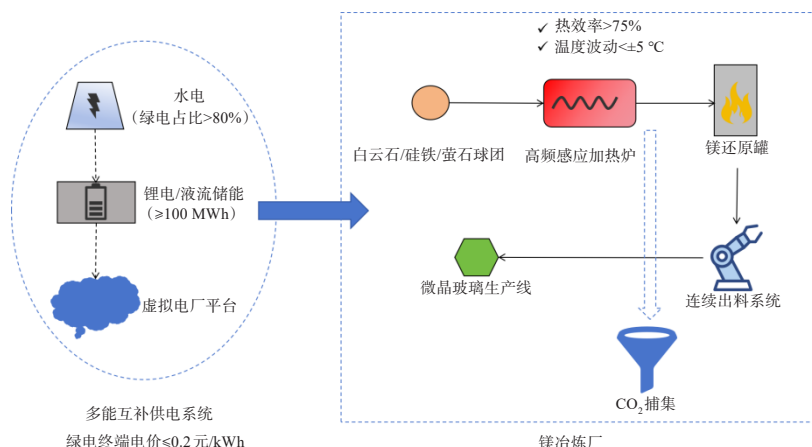


图 10 全流程电动化的洁净镁绿色冶炼工艺示意

Fig. 10 Schematic diagram of a full-process electrified clean magnesium green smelting process

3 结 论

本文系统剖析了横罐皮江法炼镁工艺的高碳排放(吨镁排放 23 t CO_2)、低能效(热损失35%)与自动化瓶颈(机械化率 $< 30\%$)等核心问题,提出以下关键结论:

1)新兴技术工业化瓶颈分析。复式竖罐法、电内热法等技术虽实验室能效提升显著(竖罐法吨煤耗降低30%,电内热法还原周期缩短至3~5 h),但规模化应用存在设备寿命短(电极寿命 < 6 个月)、材料成本高(铝热法铝粉占比 $> 40\%$)等核心障碍,短期内难以替代皮江法的主导地位。

2)区域适配性革新路径验证。①兰炭富集区:尾气净化-余热发电协同体系(吨镁能耗降至 3.2 t 标煤, CO_2 捕集率 $> 85\%$)可解决热效率低($< 50\%$)、罐体寿命短(平均寿命60 d)等传统问题;②绿电优势区:通过高频感应加热(热效率 $> 75\%$)与智能温控(波动 $< \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$)优化能耗结构,结合绿电耦合(终端电价 ≤ 0.2 元/kWh)降低碳强度。

3)渐进式改进的必要性。在欧盟碳关税政策(2034年90欧元/ t CO_2)的倒逼下,优先推进皮江法设备耐蚀性优化(Fe-Cr-Al-Y 涂层延长罐寿命至90 d)、尾气碳汇资源化(回收率 $> 85\%$)等低成本改造,可为行

业低碳转型抓住关键窗口期。

未来研究需聚焦技术耦合创新(如电内热法联合绿电驱动)、渣资源化高值利用(微晶玻璃附加值提升300%)及规模化中试验证(目标连续运行 $> 2\text{ 000 h}$),以突破工业化应用瓶颈,构建零碳炼镁产业体系。

参考文献:

- [1] WADA Y, FUJII S, SUZUKI E, et al. Smelting magnesium metal using a microwave pidgeon method[J]. Scientific Reports, 2017(7):46512.
- [2] 刘正,王越,王中光,等. 镁基轻质材料的研究与应用[J]. 材料研究学报, 2000, 14(5):449-456.
- [3] 万迪庆,胡莹琳,叶舒婷,等. 镁基高阻尼材料加工工艺研究现状及展望[J]. 功能材料, 2018, 49(5):5035-5040.
- [4] 曾小勤,王杰,应韬,等. 镁及其合金导热研究进展[J]. 金属学报, 2022, 58(4):400-411.
- [5] 郭政佑,贾昊阳,王佳豪,等. 镁合金及其复合材料电磁屏蔽性能研究进展[J]. 精密成形工程, 2023, 15(4):9-24.
- [6] 刘安宏,蔡萌萌,韩笑,等. 医用镁合金元素选择的研究现状[J]. 中国组织工程研究, 2024, 28(5):777-782.
- [7] 武晓娟,薛华庆,彭涌,等. 镁及镁合金储氢材料的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(2):727-734.
- [8] 张秋雨,任莉,李映辉,等. 镁基固态储氢材料研究进展[J]. 科技导报, 2022, 40(23):6-23.

- [9] 吴晓阳. 我国镁资源开发利用现状及发展对策[J]. 现代矿业, 2023, 39(9): 33-38, 48.
- [10] HOU D Z, LIU L, KE Y P, et al. Thermodynamic study of magnesium (Mg) production by the pidgeon process: the distribution of MgO and axial thermal field[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236: 121885.
- [11] 王伟, 阎守义. 镁冶炼工艺概述[J]. 轻金属, 2022(10): 47-51.
- [12] 高利宁. 硅热法镁冶炼过程镁渣的应用研究[J]. 工业加热, 2019, 48(5): 27-29.
- [13] 周鹏, 刘磊, 袁彦婷, 等. 推进我国金属镁冶炼行业绿色转型发展的对策建议[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(6): 24-29.
- [14] 傅大学, 狄跃忠, 王耀武. 基于床层传热的皮江法炼镁过程优化[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2024, 45(4): 523-529.
- [15] 郭军华, 丁天然, 李培艳, 等. 加强炼镁传热效率的研究进展[J]. 有色金属科学与工程, 2023, 14(6): 756-763, 772.
- [16] 邵瑞. 皮江法炼镁的工艺现状及节能优化分析[J]. 中国高新区, 2018(10): 162-163.
- [17] 车玉思, 李玉哲, 宋建勋, 等. 皮江法炼镁工艺在我国的新进步与发展[J]. 世界有色金属, 2021(16): 5-9.
- [18] 梁冬梅. 皮江法炼镁还原炉节能技术的现状与发展[J]. 有色冶金节能, 2018, 34(5): 15-19.
- [19] 张少军. 短流程绿色炼镁--复式竖罐免精炼"两步法"镁冶炼新型技术工艺[C]//中国有色金属工业协会. 2015年中国有色金属工业协会镁业分会第十八届年会暨全国镁行业大会论文集. 北京: 中国有色金属工业协会, 2015: 35-46.
- [20] 陈毛, 张少军, 李荣斌, 等. 竖罐炼镁过程中镁蒸气流动相变规律[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(4): 88-93.
- [21] 易大伟, 王晓刚, 樊子民, 等. 新型半连续电内热法竖式炼镁炉的研制[J]. 中国有色冶金, 2014, 43(5): 57-59, 82.
- [22] 孟浩杰, 李长勇, 李峰, 等. 镁冶炼节能减碳新技术研究现状[J]. 中国有色冶金, 2022, 51(4): 1-7.
- [23] 王耀武, 狄跃忠, 尤晶, 等. "碳中和、碳达峰"背景下真空铝热还原炼镁的未来发展[J]. 真空, 2022, 59(4): 64-69.
- [24] 刘占起, 刘家祥, 江兵, 等. 白云石真空铝热法提炼金属镁[J]. 有色金属, 2010(2): 56-58.
- [25] XU J Z, ZHANG T A, LIU H X. Study on the condensation behavior of magnesium vapor by flow field disturbance under relative vacuum[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2025, 13(3): 1116-1132.
- [26] 郭军华. 预制球团相对真空炼镁过程研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.
- [27] LI X L, ZHANG T A, LIU Y, et al. Relative vacuum reduction innovative processes applied in primary magnesium production—comprehensive analysis of thermodynamics, resource, energy flow, and carbon emission[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2025, 13(7): 3134-3149.
- [28] LIU H X, ZHANG T A, XU J Z. Influence of temperature on the process of preparing homogenised magnesium-zinc alloy spherical powders using the relative vacuum method[J]. Vacuum, 2024, 225: 113249.
- [29] 房玉, 蒋滨繁, 夏德宏. $\text{CH}_4\text{-O}_2/\text{H}_2\text{O(g)}$ 白云石煅烧与 CO_2 富集系统研究[J]. 轻金属, 2023(1): 47-53.
- [30] 蒋滨繁, 夏德宏, 安苛苛, 等. 基于 CO_2 循环的低碳高效白云石煅烧新工艺[J]. 化工学报, 2020, 71(8): 3699-3709.
- [31] 刘川浩, 蒋滨繁, 夏德宏. 高浓度 CO_2 气氛下白云石强化煅烧工艺研究[J]. 化学工程, 2022, 50(8): 73-78.
- [32] JIANG B F, XIA D H, YU B, et al. An environment-friendly process for limestone calcination with CO_2 looping and recovery[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 240: 118147.
- [33] 傅大学, 张延安, 豆志河, 等. 煅烧-还原一体化炼镁新技术研究进展[J]. 材料与冶金学报, 2017, 16(2): 110-115.

(责任编辑: 赵中波)