

镁冶炼工艺研究进展及展望

蔡业堃, 万 萍

(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230051)

摘要: 为了突破传统镁冶炼工艺高能耗、高碳排放及间歇生产等瓶颈, 本文系统综述全球镁冶炼技术进展, 聚焦电解法、热还原法(皮江法、铝热法、碳热法等)的技术特性, 并深入评估 14 项创新工艺的工业化可行性、能耗水平与环境效益。结果表明: 皮江法占全球原镁产量 80% 以上(中国占 90%), 但其煅烧-制球-还原-精炼流程存在高能耗缺陷; 复式反应技术实现吨镁能耗降至 3 tce(降幅 50%)、单炉日产能达 40~50 t; 铝热法副产高值镁铝尖晶石, 反应温度降低 100 °C 以上; 电内加热竖式炉技术提升粗镁纯度至 99.9%; 多数创新技术受限于高温密封稳定性、连续收集防氧化控制等工程化难题。本文成果可为镁冶炼行业低碳转型、工艺升级及战略新兴领域轻量化应用提供关键借鉴与参考。

关键词: 镁; 冶炼工艺; 皮江法; 研究进展

中图分类号: TF822

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)09-0016-07

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.09.109

Research progress and prospect of magnesium smelting technology

CAI Yekun, WAN Ping

(Hefei Cement Research & Design Institute Co., Ltd., Hefei 230051, Anhui, China)

Abstract: In order to break through the bottlenecks of high energy consumption, high carbon emissions and intermittent production of traditional magnesium smelting processes, the global progress of magnesium smelting technology is systematically reviewed, the technical characteristics of electrolysis and heat reduction (Pijiang method, aluminothermy, carbon thermal method, etc.) are focused, and the industrialization feasibility, energy consumption level and environmental benefits of 14 innovative processes are deeply evaluated. The results show that the Pijiang method accounts for more than 80% of the global primary magnesium production (90% in China), but its calcination-pelletizing-reduction-refining process has high energy consumption defects. The compound reaction technology has reduced the energy consumption per ton of magnesium to 3 tce (a decrease of 50%), and the daily production capacity of a single furnace has reached 40~50 t. The high-value magnesium-aluminum spinel produced by the aluminothermy reduces the reaction temperature by more than 100 °C. The electric internal heating vertical furnace technology improves the purity of crude magnesium to 99.9%; most innovative technologies are limited by engineering challenges such as high-temperature seal stability, continuous collection and anti-oxidation control. The results can provide key reference for low-carbon transformation, process upgrading and lightweight application in strategic emerging fields of magnesium smelting industry.

Key words: magnesium; smelting process; Pijiang method; research progress

随着现代工业的快速发展, 能源消耗过度、环境污染严重和资源利用率低已成为当前亟需解决的重要问题^[1]。镁作为地球上最丰富的元素之一, 具有显著的轻量化特性, 其密度比铝低约

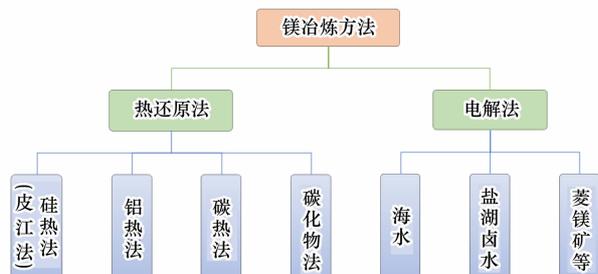
收稿日期: 2024-12-13

作者简介: 蔡业堃(1986—), 男, 高级工程师, 从事材料高温处理及固废资源化利用方面的工作。

33%, 比钢低约 77%。近年来, 随着汽车、航空航天、电子和生物医药等行业的快速发展, 镁合金的轻量化应用得到广泛推广, 镁及其合金已被公认为未来最具发展潜力的绿色轻量化材料。在全球范围内, 从原镁生产到镁合金应用的完整产业链已初步形成。中国是全球最大的金属镁生产国。据中国有色金属工业协会镁业分会统计数据显示, 2024 年全球金属镁总产量达 113 万吨, 其中中国产量占比高达 90.8% (102.6 万吨)。目前, 国内外镁冶炼的主流工艺仍以皮江法为主^[2], 此外还包括其他热还原法、电解法以及创新型原镁冶炼工艺。本文将对诸多镁冶炼工艺的研究进展进行综述, 以期对未来相关研究提供参考。

1 镁冶炼工艺分类概述

金属镁的冶炼工艺主要分为电解法和热还原法两大类(图 1)。20 世纪初, 全球原镁产量的 80% 来自电解法, 20% 来自热还原法。进入 20 世纪 90 年代后, 随着热还原法技术的快速发展及其成本优势的显现, 热还原法产量迅速增长, 而电解法由于生产成本较高, 国内外相关生产企业相继停产。目前, 全球约 80% 的原镁产量采用热还原法生产, 其中皮江法作为热还原法的代表工艺, 占据了 90% 以上的市场份额。



1.1 电解法

电解法是西方国家早期优先采用的镁冶炼工艺, 其工艺流程是通过从含镁原料中制取无水氯化镁, 然后在电解槽中电解熔盐生产金属镁和氯气(图 2)^[3]。根据原料来源不同, 电解法可分为以菱镁矿为原料和以海水或盐湖卤水为原料两种工艺路线, 其中后者更为常见。从历史数据来看, 电解法炼镁的单位能耗约为 16 000 ~ 18 000 kW·h/t。该工艺存在以下主要问题: 原料制备工艺流程复杂、投资成本高, 通常需要依托

海水或盐湖卤水资源建厂; 氯化镁脱水工艺难度大; 电解过程中会产生大量氯气和废渣, 环境污染严重, 且副产物处理系统复杂、投资巨大。这些不利因素严重限制了电解法工艺的规模化应用。

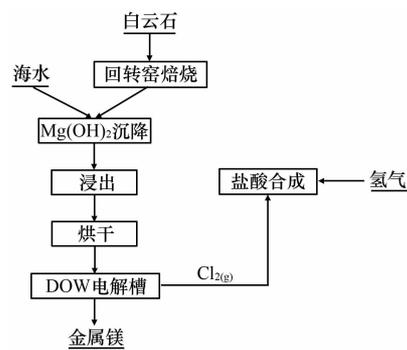


图 2 以海水为原料的电解制镁工艺流程

目前国内仅有青海盐湖一家企业采用盐湖卤水炼镁工艺, 但处于停产状态。此外, 2025 年 5 月美国加州初创公司 Magrathe 在其试点工厂推出了新一代氯化镁电解槽技术。该技术可直接从海水中提取金属镁, 利用低价绿电实现间歇运行。副产品氧化镁可用于碳捕集, 余热则用于预处理工序以降低能耗。根据计划, 该公司将于 2025 年底完成中试数据收集, 预计 2027 年正式投产。目前该公司已获得某汽车巨头订单, 所产镁金属将用于汽车轻量化部件制造^[4]。

1.2 热还原法

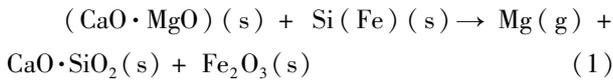
热还原法炼镁工艺是利用还原剂(碳、硅铁、碳化物等)在高温条件下将镁从其化合物中还原出来, 从而制得金属镁的生产工艺。根据不同的分类标准, 热还原法可分为多种类型。按物料形态可分为液态法、固态法和半固态法; 按加热方式可分为外热法和内热法; 按还原剂种类则可分为硅热法、铝热法、碳热法等。本文将重点依据还原剂种类进行详细介绍。

1.2.1 硅热法(皮江法)

以硅(75% 硅铁合金)作为还原剂的硅热法是目前最具经济性和应用最广泛的镁冶炼工艺, 其典型代表为皮江法(卧式干馏硅热法)。全球原镁生产格局显示, 中国贡献了世界 80% 以上的原镁产量, 而国内约 90% 的产能均采用皮江法工艺。该工艺具有投资成本低、工艺流程简单、生产成本低廉等显著优势, 但同时也存在劳动密集度高、间歇性生产等局限性, 这些因素制约了其进一步

发展。当前,国内科研机构主要聚焦于皮江法冶炼技术的改进与突破,预计在未来相当长时期内,该工艺仍将保持国内镁冶炼的主流地位。

硅热法的化学反应原理可表示为



皮江法冶炼工艺包含四大关键工序:1)煅烧工序:选取合格白云石原料,在专用煅烧设备中转化为煅白;2)配料制球工艺:将煅白破碎后与球磨处理的硅铁粉、萤石粉按特定比例混合,经球磨机处理成粉状物料后压制成球团;3)还原工序:球团装入还原炉内的还原罐中,在1200℃高温和真空条件下进行热还原反应,最终在结晶器中获得结晶镁;4)精炼工序:结晶镁在精炼坩埚中通过精炼熔剂熔炼后浇铸成镁锭,经表面处理和品质检验合格后入库并销售。工艺流程如图3所示^[5]。

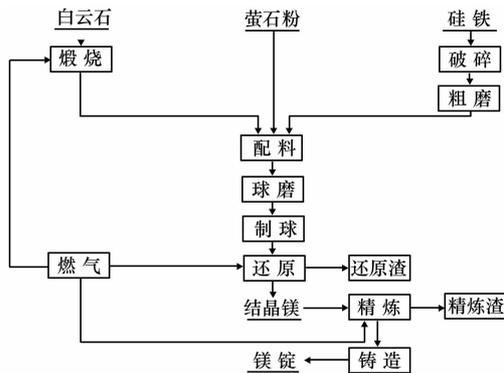


图3 硅热法炼镁生产工艺流程图

1.2.2 铝热法

铝热法炼镁新技术是一种以铝粉作为还原剂的金属热还原工艺,其以白云石或蛇纹石等为原料,在真空条件下通过热还原反应制取金属镁,同时副产刚玉、镁铝尖晶石或铝酸钙等高附加值产品(图4)^[6]。该技术相较于皮江法还原反应温度降低100℃以上,显著提升还原反应速度和效率,且生产过程中实现废渣、废水的零排放,同时碳排放量较低,具有突出的环境友好特性。然而,铝粉作为还原剂的成本较高,较之常用的硅铁还原剂,每生产1t镁需要增加约5000元的原料成本;此外,副产品硅酸铝的纯度将直接影响炼渣的经济价值。基于此,该方法目前尚未实现规模化工业生产。

1.2.3 碳热法

碳热法炼镁工艺是基于焦炭还原氧化镁的反

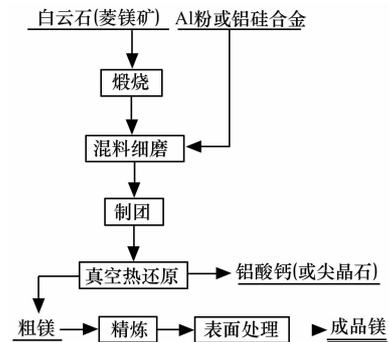
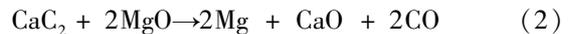


图4 铝热法工艺流程

应体系,需在1500℃高温和真空条件下进行^[7]。该工艺具有显著优势:副产煤气可循环利用作为热源,大幅降低能耗;采用廉价碳质还原剂,原料成本优势突出;理论上可实现低资源能耗和清洁生产。然而,其工业化应用面临逆反应等技术瓶颈。当温度超过1300℃时,镁蒸气与CO的逆反应速率随温度升高急剧加快,镁粉在高温CO环境中存在爆炸风险,另外,高温气体的分离与冷却工程化难度大。这些技术障碍导致20世纪50年代后全球碳热法炼镁企业全面停产。但鉴于碳还原剂的成本优势,该工艺仍具有重要研究价值。

1.2.4 碳化物法

碳化物法炼镁工艺是基于CaC₂作为还原剂,在高温真空条件下将含镁原料中的镁元素还原为单质镁的冶炼方法,其核心反应方程式:



彭建平等^[8]的热力学研究表明,该工艺在常压条件下需要达到1800℃的高温才能实现有效还原,但当系统压力降到100Pa时,还原温度可显著降低至900℃。在1~2Pa的真空度和1150℃条件下保温2h时,镁的还原率可达88%。虽然碳化物法曾实现工业化应用,但由于碳化钙易吸湿、还原活性较低、生产成本高昂,以及冶炼过程中存在镁与CO的可逆反应问题和大量固体废渣的产生,目前该工艺已退出工业化生产领域。除碳化钙外,其他还原剂如液态钙、硅钙、硅铝铁和工业硅等也可用于镁的热还原工艺,其基本原理相似。例如,夏德宏等^[9]从热力学角度论证了液体钙还原镁的可行性。

2 镁冶炼改进工艺及新技术

2.1 波尔扎诺法(意大利)

波尔扎诺法(图5)是20世纪30年代意大利开

发的一种基于皮江法改进的内热还原工艺^[10-11]。该工艺的核心技术创新在于采用双段式冷凝系统: 镁蒸汽先在高温区预凝, 再于低温区高效结晶。这一改进显著提升了镁的回收率和冷凝效率, 同时缩短反应周期, 提高了设备产能。该工艺所得结晶镁纯度高、操作更可靠, 适合中小规模生产, 曾用于工业生产, 缺点则是设备更复杂、投资较大且仍为间歇操作, 最终于 1993 年停产。

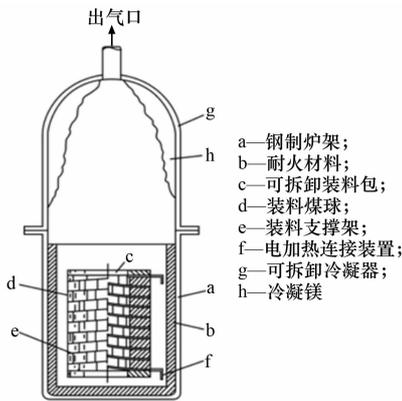


图 5 波尔扎诺还原室示意

2.2 马格内姆法 (法国)

马格内姆法(图 6)是 20 世纪 50 年代法国研发的一种外热式硅热还原炼镁工艺, 作为波尔扎诺法的升级技术^[6]。该工艺的核心创新体现在 3 个方面: 1) 采用熔融炉渣电阻加热原理, 将煅烧白云石、硅铁与铝土矿混合料在密闭还原炉内形成导电熔渣层, 通过通电使其自热至 $1\ 550\ ^\circ\text{C} \sim 1\ 600\ ^\circ\text{C}$ 实现氧化镁的高效还原; 2) 首次实现半连续化生产模式, 可连续加料和排渣, 单炉年产能达万吨级规模; 3) 优化冷凝系统, 镁蒸气通过高效水冷结晶器转化为高纯结晶镁。虽然该工艺解决了波尔扎诺法的发热体腐蚀问题并提高了自动化水平, 但因能耗极高 $11\ 000 \sim 13\ 000\ \text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ 和炉衬寿命短等缺陷, 工业应用受到限制, 最终随着 2001 年法国马利纳镁厂的关闭而退出历史舞台。

2.3 MTMP 法 (南非、英美)

20 世纪 80 年代, 南非 MINTEK 公司与英美资源集团旗下 Eskom Mintek 公司联合开发了 MTMP 法(图 7)(mintek thermal magnesium process)^[12]。该工艺的核心技术突破体现在 3 个方面: 1) 首创采用直流电弧炉系统, 在常压环境下实现镁的连续化生产; 2) 将煅烧白云石置于电弧炉中熔炼,

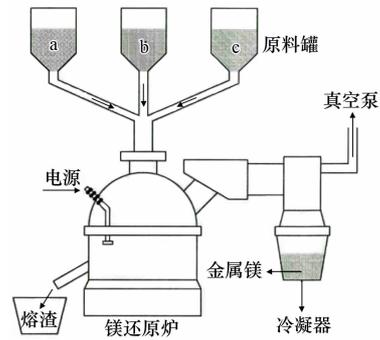


图 6 马格内姆法生产设备

直接生成镁蒸汽并在冷凝器中凝结为液态镁水; 3) 实现了常压条件下的连续放镁与自动排渣操作。尽管该工艺于 2009 年成功完成中试验证, 但截至目前尚未见其工业化规模应用的公开报道。

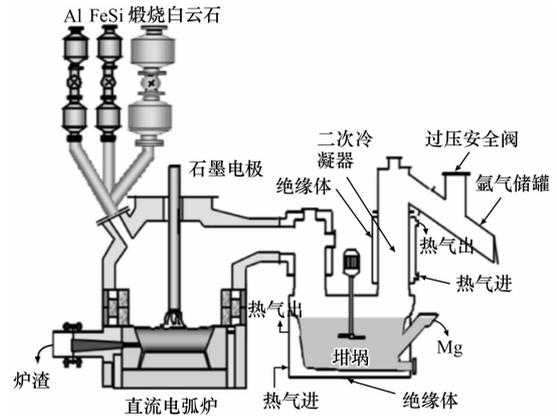


图 7 MTMP 工艺示意

2.4 真空液态喷吹法 (中国五矿集团)

中国五矿集团于 2024 年牵头启动国家级“揭榜挂帅”专项, 联合高校及装备企业共同攻关真空液态喷吹法工程化难题。真空液态喷吹法^[7]炼镁工艺是通过液态硅铁熔池连续还原机制, 在真空或惰性气氛保护条件下运行, 将煅烧白云石粉通过氩气载流方式喷入 $1\ 600\ ^\circ\text{C}$ 的液态硅铁熔体, 直接生成镁蒸汽并经冷凝系统收集。其优势主要体现在 3 个方面: 1) 实现全流程连续化操作(喷吹加料-虹吸排渣-自动收镁的完整闭环); 2) 能耗较传统皮江法降低 40% 以上; 3) 在绿电耦合模式下碳排放可控制在 $5\ \text{kg}\ \text{CO}_2/\text{kg}\ \text{Mg}$ 以下, 具备显著的减碳潜力。目前该技术仍处于实验室小规模试验阶段, 尚未具备中试条件, 主要技术瓶颈包括高温熔体密封系统的长期稳定性、液态镁连续收集过程的防氧化控制等关键装备的可靠性验证。

2.5 复式反应新型原镁冶炼技术（郑州大学）

榆林市镁及镁合金科技创新有限公司联合郑州大学于 2019 年共同研发的复式反应新型原镁冶炼技术^[13]，是针对传统皮江法高能耗和环境污染问题提出的突破性解决方案。该技术基于竖罐皮江法进行革命性创新，首创“复式反应器”系统，配合连续出镁设计，将还原周期缩短至 6 h 以内；采用“煅烧 + 还原”两步法工艺，直接产出纯度达 Mg9995B 标准的原镁，省去传统精炼环节；实现烟气余热和还原渣余热的高效梯级回收。2020 年建成首台年产 1 000 t 的还原炉示范模块。2024 年，该技术在开泰镁业成功实现工业化应用，建成示范产线实现单台反应炉日产镁 40 ~ 50 t（横罐技术的 40 倍），吨镁综合能耗降至 3 t 标煤（仅为传统方法的 1/2），年节能超两万吨标煤。

2.6 相对真空连续镁冶炼技术（东北大学）

东北大学张延安团队提出的“相对真空”理论^[3]突破了传统皮江法高真空技术限制。该技术的核心在于利用惰性气体构建相对真空环境，在微正压条件下实现镁蒸汽的快速连续还原，将传统 10 h 的反应时间大幅缩短至 0.5 h，同时镁回收率提升至 90% 以上。该工艺的另一重大突破是实现了化学反应过程中碳排放的 100% 回收利用，这一创新使其荣获 2022 年国际镁学会创新工艺奖。目前，该技术正处于工程化应用推进阶段，但氩气等惰性气体的高成本可能成为制约其大规模工业化应用的主要因素。

2.7 电内加热竖式炉镁冶炼技术（西安科技大学）

西安科技大学王晓刚等研发的电内加热法竖式炉快速炼镁技术（图 8）^[14-15]，通过在重力作用下实现球料团和还原渣的“上进下出”连续输送，结合多工位交替操作模式，既保证了炉内连续加热还原，又实现了粗镁的间歇式提取，最终达到连续性生产的效果。该技术自 2008 年启动中试并建成 1.5 t 装料量的竖式炉，至 2017 年工业化试验时已将装料量提升至 4 t。尽管万吨级产线的建设进展尚未见后续报道，但实际运行数据表明，该技术可降低能耗 30%、将镁纯度提升至 99.9%，并实现半自动化生产，为传统炼镁工艺的转型升级提供了切实可行的技术路径。

2.8 白云石钙镁分离技术（中南大学）

中南大学柴立元院士团队于 2021 年取得重大

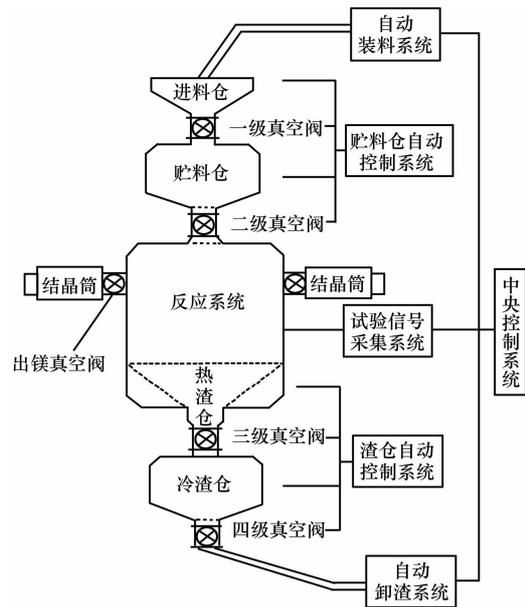


图 8 新型半连续电内热法竖式炼镁炉的研制

技术突破^[16]，成功开发出白云石钙镁高效分离与二氧化碳协同回收的新型冶炼工艺。该技术具有三大核心创新：1) 首创双胆结构反应器（不锈钢外胆 + 钛/钨内胆），实现高纯镁（纯度 > 99.95%）的产业化生产；2) 开发无添加剂冶炼工艺，避免铁、硅等杂质引入；3) 实现二氧化碳资源化利用，显著降低碳排放。2024 年，该技术已在湖南镁基科技有限公司建成首条年产 1 000 t 高纯镁基材料生产线，并启动年产 2 万吨冶金级镁产品的扩产计划。

2.9 镁音速超音速冷凝技术（澳大利亚）

澳大利亚联邦科学与工业研究组织于 2016 年首创的镁音速超音速冷凝技术，代表了镁冶炼领域的前沿突破。该技术的核心创新在于：1) 利用碳热还原反应处理镁矿；2) 通过仿火箭发动机设计的超音速喷嘴装置，使反应生成的镁蒸汽与一氧化碳以 4 倍音速（约 1 360 m/s）通过冷凝室；3) 实现毫秒级瞬间凝固的镁蒸汽固化过程。据测算，该技术可降低能耗 80%、减少一氧化碳排放 60%。虽然截至 2025 年仍处于工程开发阶段，尚未实现大规模工业应用，但其创新的毫秒级冷凝机制，为镁冶炼连续化收集技术提供了新思路。

2.10 阻热梯凝器镁冷凝技术（西安交通大学）

西安交通大学单智伟团队针对硅热法罐口低温区反应率低、粗镁杂质高等行业难题，创新性地开发出“阻热梯凝器”装置^[17]。该技术通过以

下创新实现了重大突破: 1) 采用热辐射阻隔设计, 将罐口低温区温度提升至有效反应区间, 使料球还原率从不足 50% 显著提高到工艺要求水平; 2) 通过梯度冷凝技术实现杂质元素的选择性分离, 粗镁纯度从 Mg9980 以下提升至 Mg9995A 级 (Si、Al、Mn 等关键杂质质量分数降幅超 90%); 3) 优化工艺参数后, 料镁比从 6.59 降至 5.95。2024 年, 该团队与府谷泰达煤化公司合作, 通过优化“阻热梯凝”装置结构, 在吨级试验中成功制备出纯度接近 4N 级 (99.99%) 的高纯镁产品。

2.11 多级真空蒸馏短流程工艺 (昆明理工大学)

昆明理工大学田阳团队在镁冶炼领域取得重要突破, 其研究成果主要涵盖两大方向: 在真空碳热还原炼镁技术方面, 团队通过深入探究 Mg-CO-CO₂ 混合气体冷凝机理^[18], 首次明确了 923 ~ 1 062 K 的最佳冷凝温度区间和 0.5 K/mm 的温度梯度等关键参数, 为连续化冷凝装备设计提供了理论支撑, 该技术已于 2025 年 1 月与陕西榆林镁业集团开展产业化合作; 在高纯镁提纯技术方面, 团队创新开发出“真空蒸馏-蒸汽净化-定向冷凝”一体化短流程工艺^[19], 成功研制专用提纯设备并实现 13 种杂质元素的有效分离, 可制备 5 N 级高纯镁产品, 该技术已于 2023 年在府谷县建成全国首条年产千吨级高品质镁示范生产线。

2.12 微波加热炼镁技术

微波加热技术 (图 9) 在镁冶炼领域的应用研究取得了系列进展: 2010 年, 梁莉等^[20]通过热力学分析和实验验证, 首次证实微波加热白云石煅烧可实现 30%~35% 的节能效果; 2023 年, 郑州大学陈勇强团队^[21]研发吸波陶瓷内胆微波炉, 利用罐体与中心筒作为发热源, 将还原周期从 12 h 缩短至 3 h, 解决了原料吸波性差的技术难题; 2024 年, 湖南中晟热能进一步开发多发生器集成装置专利技术^[22], 采用 10 组 25 kW 微波源与氮化硅炉管协同工作, 通过波导裂缝天线实现精准加热, 并利用高纯氧化铝纤维约束微波路径, 显著提升了单次处理能力。然而, 当前微波炼镁技术整体仍处于实验室向工程化过渡阶段, 尚未突破中试门槛。未来需突破材料寿命与连续化生产瓶颈, 方有望替代传统皮江法。

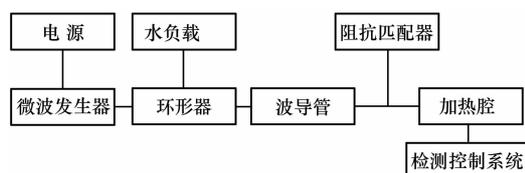


图 9 微波炉机构简图

2.13 炼镁技术 (中铝郑州研究院)

中铝郑州有色金属研究院有限公司在镁冶炼领域取得重大技术突破, 形成三大创新方向: 在铝热法工艺方面, 开发的内加热铝热还原技术实现金属镁与镁铝尖晶石同步连续生产, 使物耗能耗降低 50% 以上、吨镁成本减半且实现零“三废”排放, 该技术于 2022 年与罗马尼亚企业合作开展工业化试验; 在盐湖镁资源高值化方向, 2023 年首创“水氯镁石氨化-铝热还原”短流程工艺^[23], 通过氨化沉淀结合铝粉还原直接制取金属镁与镁铝尖晶石, 有效规避电解法脱水难题并显著降低碳排放; 在白云石低碳分离与废料循环方向, 2024 年申请的二氧化碳分离煅烧白云石专利^[24]实现钙镁高效分离 (品位 > 98%), 2025 年开发的废铝电解质资源化技术^[25]可从冶炼废料中提取锂镁钠合金。目前这些技术正通过鹤壁“镁基新材料工业试验项目” (2024 年启动) 加速产业化, 并依托淇河实验室研发中心推动技术转化。

2.14 炼镁技术 (美国大蓝科技公司)

美国大蓝科技公司自 2015 年成立以来, 先后探索了碳热还原及铝热还原两大技术路线。在碳热还原领域, 公司于 2019 年完成实验室验证, 2021 年在丹佛建成产能为 2 kg Mg/h 的中试系统。该工艺采用 1 600 °C 以上真空环境下的碳还原氧化镁技术, 配合专有介质冷凝装置实现 91% 以上的镁锭回收率。虽然该技术 2022 年启动了怀俄明州模块化示范厂建设, 但受限于工程化瓶颈 (如液态镁收集稳定性) 及经济性挑战, 2023 年后该技术工业化进程停滞。目前公司重点发展铝热还原技术。采用约 1 000 °C 的铝还原氧化镁反应, 大幅降低操作温度, 创新采用熔盐冷却系统精准控制冷凝条件, 实现全自动化连续生产, 能耗降至 8 kW·h/kg Mg (较皮江法低 40% 以上), 碳排放降至 3.3 kg CO₂/kg Mg。2023 年公司启动年产 2 000 t 的示范工厂建设, 计划通过废铝利用进一步降低成本。

3 结论及展望

皮江法作为当前镁冶炼的主流工艺,虽经持续改进在能耗方面有所降低,但其单位生产能耗和碳足迹仍处于较高水平。从国内主要科研机构的研究进展来看,尽管对传统冶炼方法的改良取得了一定成效,也涌现出诸多创新冶炼技术,但这些新技术普遍存在工艺条件苛刻的问题,大多仍停留在实验室阶段,尚未达到中试或工业化生产的成熟度,距离实际应用还有较长的产业化进程。

随着镁合金在储氢材料、新能源汽车、航空航天和电子器件等战略新兴领域的应用需求快速增长,叠加全球碳中和目标的持续推进,当前高能耗、间歇式的皮江法工艺正面临转型升级的迫切需求。未来镁冶炼技术的发展将聚焦于热还原法的三大技术路线——硅热法、铝热法和碳热法的持续优化,重点通过缩短还原反应时间、提升产线自动化水平、增加单位设备产能等技术创新路径,实现节能降碳、提质提效和降低劳动强度的多重目标。这一技术演进方向将使镁冶炼工艺更加成熟环保,并通过规模化生产进一步降低原料成本,从而增强镁产品的市场竞争力,推动其在各应用领域的广泛普及。

参考文献:

- [1] LIU BY, LIU F, YANG N, et al. Large plasticity in magnesium mediated by pyramidal dislocations[J]. *Science*, 2019, 365(6448): 73–75.
- [2] LI R B, LIU F Q, ZHONG J J, et al. Experimental study of magnesium (Mg) production by an integrated calcination and silicothermic reduction short process[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2021, 52(1): 558–569.
- [3] 韩继标. 相对真空连续炼镁过程金属镁蒸发冷凝行为的基础研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2025.
- [4] SUN Q, LUO S H, HUANG R, et al. Recent progress of magnesium electrolytes for rechargeable magnesium batteries[J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2024, 515(15): 215956.
- [5] 王伟, 阎守义. 镁冶炼工艺概述[J]. *轻金属*, 2022(10): 47–51.
- [6] 胡文鑫. 以白云石和菱镁石为原料真空金属热还原制取金属镁的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [7] 梁文玉, 孙晓林, 李凤善, 等. 金属镁冶炼工艺研究进展[J]. *中国有色冶金*, 2020, 49(4): 36–44; 53.
- [8] 彭建平, 陈世栋, 武小雷, 等. 碳化钙热法炼镁试验研究[J]. *轻金属*, 2009(3): 47–49.
- [9] 夏德宏, 尚迎春. 基于钙还原剂的金属镁生产新工艺[J]. *轻金属*, 2008(2): 45–47.
- [10] 于旭光, 邱竹贤. 镁工业生产及应用的现状和展望[J]. *材料与冶金学报*, 2003, 2(3): 189–192.
- [11] 邓军平, 王晓刚, 田欣伟, 等. 热还原法炼镁的技术现状及进展[J]. *中国有色冶金*, 2006, 35(5): 15–18.
- [12] ABDELLATIF M. Review of the development work on the mintek thermal magnesium process (MTMP)[J]. *Journal of the Southern African Institute of Mining Metallurgy*, 2011, 111(6): 393–399.
- [13] 榆林原镁“两步法”冶炼工艺达国际领先水平[Z]. 榆林日报, 2022.
- [14] 樊子民, 王晓刚. 新型竖式电内热法半连续炼镁炉的研发[J]. *中国有色冶金*, 2012, 41(4): 49–51.
- [15] 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.
- [16] 刘燕龙, 刘怀熙, 张培平. 一种高纯镁的制备装置及方法: CN115161485B[P]. 2011–12–28.
- [17] 郑芮, 杨博, 王安, 等. 硅热法炼镁增产提质的原理探索与应用[J]. *中国有色金属学报*, 2023, 33(7): 2347–2355.
- [18] 熊能, 田阳, 杨斌, 等. 真空下 CO₂/CO 对镁蒸气冷凝的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(4): 851–857.
- [19] 田阳, 梁栋, 杨斌, 等. 一种半连续制备不同纯度高纯镁的设备与方法: CN112195348B[P]. 2021–04–06.
- [20] 梁莉, 蒋汉祥. 微波加热白云石生产煅白的实验研究[J]. *湖南有色金属*, 2010, 26(4): 38–42.
- [21] 陈勇强, 张锐, 范冰冰, 等. 一种微波镁冶炼装置及冶炼方法: CN116574926B[P]. 2024–03–15.
- [22] 李方, 徐助要, 王平. 一种基于微波加热的镁冶炼的装置: CN119307748A[P]. 2025–04–22.
- [23] 白洋, 王鑫健, 孟浩杰, 等. 一种用水氯镁石为原料生产金属镁的方法: CN117535527A[P]. 2004–12–14.
- [24] 陈炳旭, 孟浩杰, 炊英锋, 等. 一种基于二氧化碳分离煅烧白云石的钙镁组分的方法: CN117490217A[P]. 2024–02–23.
- [25] 孟浩杰, 李峰, 陈炳旭, 等. 一种废铝电解质的资源利用的方法: CN119614868A[P]. 2025–03–14.