

聚焦碳排放

镁冶炼节能减碳新技术研究现状

孟浩杰, 李长勇, 李 峰, 赵秀峰

(中铝郑州有色金属研究院有限公司, 河南 郑州 450001)

[摘 要] 目前我国原镁生产均采用皮江法工艺,存在能源消耗高、资源利用效率低、环境污染严重及碳排放强度高的问题。本文分析了镁冶炼行业碳排放现状,从煅烧炉、还原炉和炼镁新技术3个方面阐述了镁冶炼节能减排的技术和方法。研究表明推动采用 HTAC 技术、富氧燃烧技术等加热方式的新型煅烧炉及采用微波、感应、等离子加热还原炉等新装备的发展与应用,开发短流程绿色炼镁技术、连续冶炼技术、铝热法炼镁技术等高效节能减碳新技术,是实现镁行业碳中和目标及可持续发展的有效途径。

[关键词] 碳中和; 炼镁技术; 煅烧炉; 还原炉; HTAC; 微波加热; 感应加热; 等离子加热

[中图分类号] TF822 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2022)04-0001-07
DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2022.04.001

镁可与多种元素(铝、锰、锌、硅、铅、稀土等)形成合金,是目前最轻的金属结构材料。镁合金具有优良的铸造性能、机加工性能和尺寸稳定性,越来越广泛地被应用于汽车、3C 产品、航空和电子等领域^[1-2]。

我国镁产业自 20 世纪 90 年代以来得到了迅猛发展,原镁产量不断增加。根据中国有色金属工业协会镁业分会统计,2019—2021 年镁产量分别为 96.9 万 t、96.1 万 t 及 94.9 万 t^[3-4]。我国原镁生产均采用皮江法工艺,其设备简单、投资少、成本低,是我国金属镁冶炼最具代表性、应用最广泛的热法炼镁工艺。但该工艺目前存在能源消耗高、资源利用效率低、环境污染严重及碳排放强度高的问题。当前,节能减排目标将持续推动有色金属行业供给侧改革,产业升级、产能转移正加速推进,为我国镁冶炼行业提出了诸多机遇和挑战。本文对国内外镁冶炼节能减碳相关技术进行了介绍,讨论了镁冶炼在碳中和背景下技术发展的方向。

1 皮江法能耗水平及碳排放强度

皮江法由白云石煅烧、配料制球、还原和精炼工序组成,以煅烧白云石为原料、硅铁为还原剂、萤石为催化剂,进行计量配料。粉磨后压制成球,将球团装入还原罐,加热到 1 200 ℃ 以上,内部抽真空至 13.3 Pa 或更高,产生镁蒸气,镁蒸气在还原罐前端的冷凝器中形成结晶镁,再经精炼,产出镁锭。皮江法炼镁技术仍是高能耗、高污染冶金行业,目前皮江法吨镁白云石用量 10.5 ~ 10.9 t,硅铁(Si > 75%)用量 1.04 ~ 1.07 t,标煤消耗量 4.3 ~ 4.7 t^[5]。

此外,原镁冶炼是有色金属行业中碳排放强度最高的产业,碳排放主要来自白云石的分解和煅烧还原工序的能耗,每生产 1 t 金属镁需要排放 CO₂ 约 16.63 t,见表 1。未来应通过能源结构变革改变原镁产能结构、压制存量和新增皮江法炼镁产能,鼓励企业采用能耗更低的冶炼新技术、新装备,淘汰落后的高能耗、高排放皮江法产能。

2 镁行业节能减碳的途径

白云石煅烧炉、炼镁还原炉和原镁精炼炉是目前金属镁厂二氧化碳排放及用能设备中的重点耗能

[收稿日期] 2021-12-20 [修订日期] 2022-02-04

[录用日期] 2022-02-06 [出版日期] 2022-08-28

[作者简介] 孟浩杰(1995—),男,河北石家庄人,硕士研究生,研究方向为镁冶炼技术与装备研发。

[引用格式] 孟浩杰,李长勇,李峰,等. 罐式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.

表 1 皮江法吨镁碳排放量

Table 1 Carbon emission per ton of magnesium
by pidgeon process t

项目	单耗指标	CO ₂ 排放
白云石分解	11.5	5.41
标煤	4.5	11.22
合计	—	16.63

注:未计入 75% 硅铁的生产碳排放量

设备^[6]。提高煅烧炉、还原炉能源利用率以及开发炼镁新工艺是金属镁行业开展节能减排、减碳工作的重点方向。

2.1 煅烧炉节能减碳技术

2.1.1 高温空气燃烧技术

高温空气燃烧技术简称 HTAC 技术,又称蓄热式燃烧技术或高温低氧燃烧技术。HTAC 系统由成对的燃烧器、蓄热体和换向阀及控制系统等组成^[7]。

HTAC 技术能最大限度回收炉窑烟气中的物理显热,从而降低能耗,在工业窑炉上有广阔的应用前景。孙超等^[8]讨论了 HTAC 技术在蓄热式加热炉上的应用,表明其可完成窑炉烟气余热的极限回收,获得高温热空气,用于助燃或坯体干燥等。德国 Schaffel-Mancini N 等^[9]研究了 HTAC 技术在以超临界运行为重点的环境友好型燃煤电站锅炉上的适用性,表明 HTAC 技术是一种可实现的、高效的、清洁的煤粉锅炉技术。日本 Kazuhiro K 等^[10]提出了一种利用 HTAC 技术高效燃烧燃料的新概念锅炉,提高了传热效果,降低了燃烧噪声,抑制了 NO_x 的排放。

2.1.2 富氧(或全氧)燃烧技术

富氧(或全氧)燃烧技术的燃烧模式为“氧气或富氧+燃料”,有利于实现清洁生产,并可促进炉内的辐射传热。相比于空气燃烧,纯氧燃烧时的烟气体积减少 3/4,烟气中的 CO₂ 浓度增加,有利于 CO₂ 综合利用或封存,实现清洁生产。该技术被美国能源部认为是一种有前景的高效碳捕获技术,可以大幅减少 NO 和 CO 的排放。目前在国内富氧燃烧技术主要应用于火力发电厂燃煤锅炉、玻璃、水泥炉窑等领域,在富氧度 23% ~ 30% 情况下,可节能 10% ~ 45%^[11]。

李乐意等^[12]将窑内富氧燃烧技术改造,分为烧成系统和制氧供氧系统,用于水泥熟料生产线,采用

新式深冷直送法制取富氧空气,通过窑头多通道燃烧器,以一次风形式将富氧空气引入干法水泥回转窑,单位烧成煤耗降低约 5.0 kgce/t,熟料单位综合电耗降低约 2.0 kWh/t。

在镁冶炼行业,已成功完成了窑内富氧度 25% ~ 27% 的回转窑超音速富氧旋流喷吹和富氧燃烧试生产试验,在 27% 富氧度燃烧时,回转窑内高温区较原工作温度提高 160 ℃,焦比由原 50% 降低至 42%,节约焦炭 2.25 t/h,减少 CO₂ 排放 8.27 t/h,节能碳减排效益明显^[13]。

2.1.3 麦尔兹窑和套筒窑

麦尔兹窑和套筒窑均为世界著名的石灰窑型,可稳定生产高活性优质石灰。麦尔兹窑于 20 世纪 90 年代被引进中国,工艺特点是“并流蓄热”,保证供热,提高热效率。国内已有近百座双膛石灰窑,技术成熟,全自动化控制,操作维护简易。套筒窑又称贝肯巴赫窑,由德国贝肯巴赫公司开发,2009 年引入中国钢铁行业。套筒窑内的气流存在并流和逆流,可有效地解决了生烧、过烧问题,提高了石灰煅烧白云石活性。当前研究主要集中在优化工艺参数、技术改造、降低窑炉能耗方面^[14],在煅烧白云石方面该技术还未达到预期效果。

2.1.4 焦粉微波混合煅烧炉

焦粉微波混合煅烧炉是一种新式节能环保煅烧炉,该技术优势是白云石煅烧均匀、质量好,烟气量大幅度减低,同时二氧化碳浓度高,有利于二氧化碳的回收综合利用或封存,实现清洁生产。

2.2 还原炉节能减碳技术

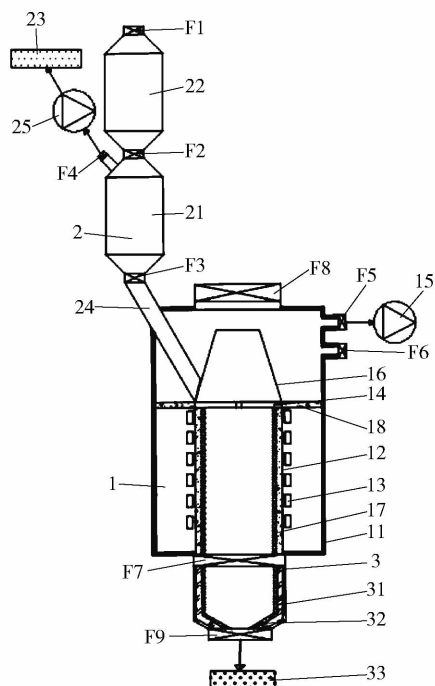
热法还原镁理论能耗并不高,而实际生产能耗却很高,能耗显著增加的主要原因是还原炉的热效率不高。

2.2.1 微波加热还原炉

微波加热依靠物体吸收微波能将其转换成热能,通过被加热体内部偶极分子高频往复运动,均匀加热物料。彭金辉等^[15]将微波能应用于冶金单元,利用微波选择性加热、内部加热和非接触加热等特点强化冶金技术反应过程,推动了我国微波冶金技术及装备的产业化应用。随着微波加热技术的发展,其在相关工业领域的应用越来越多,包括陶瓷材料烧结、铁矿石碳热还原、低阶次烟煤微波烘干及矿石预处理等^[16-19]。

作为一种高效、节能和环保的新技术,微波加热

技术在镁冶炼中具有广阔的应用前景。黄奕闵等^[20]研发了一种真空微波炼镁装置(图1),将微波加热引入原镁冶炼,可使煅烧工艺和还原工艺在同一坩埚内连续进行,坩埚内球团受热均匀,还原时间明显缩短,能耗大幅下降,能源效率提升,达到节能减排的目标。于洪喜等^[21]充分利用微波具有选择性加热物料、升温快、效率高的特点研发了一种微波加热炉,炉内设置有微孔陶瓷管,既可使微波穿透微孔陶瓷管对镁球加热,又可使镁蒸气逸出。设置微波功率1~500 kW、频率300~3 000 MHz,控制温度1 200~1 350 ℃,镁还原冶炼可在15~60 min完成。



1—冶炼炉(11—炉壳; 12—坩埚; 13—微波发生器; 14—隔热挡板; 15—第一真空泵系统; 16—结晶器; 17—第一保温层; 18—隔热层); 2—加料装置(21—预热罐; 22—进料罐; 23—CO₂气体收集装置; 24—进料管; 25—第二真空泵系统); 3—出渣仓(31—第二保温层; 32—耐热材料层; 33—余热回收装置); F1~F9—阀门

图1 真空微波炼镁装置

Fig.1 Vacuum microwave magnesium smelting device

2.2.2 新式高效感应加热还原炉

感应加热技术主要原理是通过加热体电磁感应自热实现加热,节能效率更高,具有较大应用价值。目前,高精尖设备以及电子工业所需要的合金和特殊钢,如弹性合金、不锈钢、膨胀合金等,其冶炼均采用真空感应加热冶炼炉^[22]。

对于镁冶炼行业,感应加热炼镁也是一种值得大力研发的节能减碳技术,是还原炉节能减碳发展方向之一。禹健等^[23]研究了炼镁还原系统的能量传输、热损耗和激励线圈电阻损耗的影响因素及相互关系,提出了一种高温激励线圈镁还原罐电磁感应加热装置的设计方法,该方法减少了炼镁还原系统的总损耗,提高了能量利用效率,为镁还原罐电磁感应加热装置的设计提供了新思路。李长勇等^[24]开发了一种用于还原金属镁的真空冶炼炉,内设感应加热器位于炉体内上部,微波加热器位于炉体外下部,用内加热代替外加热,具有热效率高、电耗低、加热速度快、可控性强等优点,降低了工人在高温条件下的劳动强度,提高了工作效率。

中铝郑州有色金属研究院与山东金聚源冶金设备有限公司联合开发了一种感应加热真空竖式还原罐,内部设置高效快速导热板,底部配置自动出渣器,可使还原渣顺利排出。该还原炉的热利用率由传统炉的8%~10%提高至65%以上,具有良好的节能减碳效果,经济效益和环保效益均较明显。

2.2.3 等离子加热还原炉

等离子加热技术为一种高效、节能和环境友好的加热技术,原理是利用工作气体电离形成等离子体的高温,等离子体中自由电子与正离子复合时释放的能量进行电加热。等离子加热温度高、功率密度大、热量集中,可在真空或控制气氛中加热,适合于与其他加热方法(如感应加热、燃烧加热等)配合。采用等离子直接加热的方式,可解决还原罐间接加热和传质传热差的问题,有利于金属镁还原过程的进行,具有较好的节能效果^[25]。

2.3 热法炼镁还原新工艺

2.3.1 传统皮江法冶炼还原技术的改进

由于传统皮江法炼镁技术的高能耗高排放,在碳中和背景下,必须对其进行技术改进。GUO Liejin等^[26]开发了一种高效的一步法炼镁工艺(图2),将白云石分解和镁还原2个工序结合起来,避免了这2个工序之间的热损失,同时缩短了白云石分解阶段和镁还原阶段的时间。张少军等^[27]开发的复式竖罐免精炼“两步法”镁冶炼新型技术工艺吨镁综合能耗仅为皮江法的50%~60%,还原时间约6 h,仅为皮江法的2/3左右,实现了镁冶炼工艺的机械化加料、机械化出渣及还原炉自动化运行。此外,

通过新型半连续电内热法竖式炼镁炉代替传统还原罐，降低了皮江法炼镁热量损失，从而降低能耗^[28]。

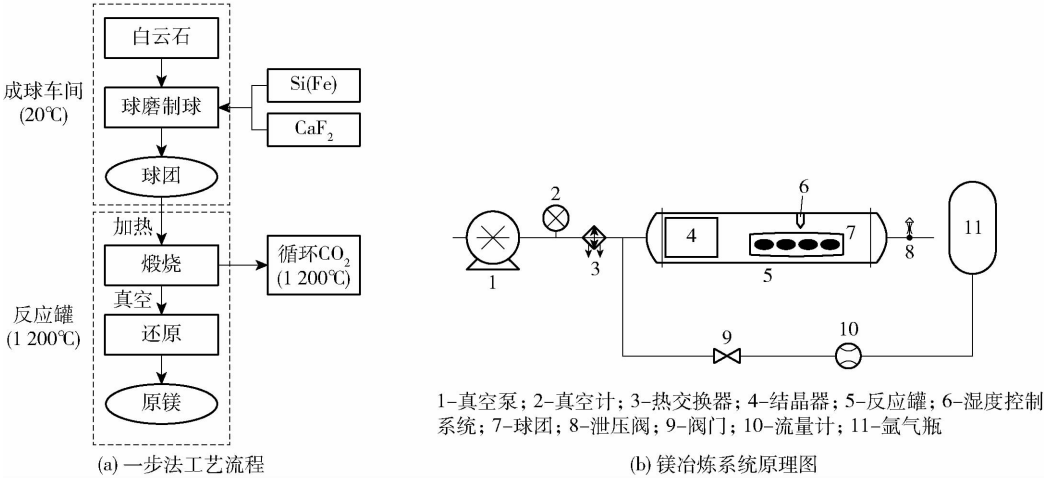


图 2 一步法炼镁工艺流程

Fig. 2 Flowcharts of one-step method for the production of Mg

2. 3. 2 非真空热法炼镁还原新工艺

以镁平衡分压为基准的相对真空连续炼镁新技术与装备,可以实现镁在实际微正压的相对真空而非绝对真空条件下快速连续冶炼,还原时间由皮江法的 10 h 缩短至 1 ~ 1.5 h,镁的综合回收率由 75% 提高至 90% 以上^[29-30]。夏德宏等^[31]开展了液态钙作还原剂的炼镁新工艺研究,先加热一定量的固体钙使之熔化,将固体钙与氧化镁磨碎按比例混合,由于氧化镁完全浸在液态钙中,反应速度快,生产效率高,常压下 1 090 ℃ 以上即可完成反应,产生镁蒸气,不需要还原罐。南非 MINTEK 公司、Anglo American 公司和 ESKom 公司共同开发了利用直流电弧熔炼技术的

热法炼镁技术,该技术可在常压非真空下连续生产,劳动生产率高,生产成本较低^[32]。

2. 3. 3 铝热法炼镁新技术

铝热法炼镁工艺是以铝为还原剂还原物料中氧化镁,生成镁蒸气。根据原料(白云石、菱镁矿)及配比不同,铝热法还原后获得的还原渣的主要物相不同,主要有 12CaO·7Al₂O₃、CaO·Al₂O₃、CaO·2Al₂O₃、CaO·6Al₂O₃ 和 MgAl₂O₄ 等 5 种化合物。皮江法与铝热法反应机理及热力学数据如表 2 所示。铝热法冶炼镁能在还原产物再利用上产生效益,使吨镁总成本低于传统皮江法,但还原产物再处理也会产生部分 CO₂。

表 2 真空还原炼镁不同状态下的热力学数据

Table 2 Thermodynamic data of magnesium smelting under different vacuum conditions

镁冶炼工艺	反应式	标准吉布斯自由能计算式	标准状态下 反应温度/ K	1.33 Pa 反应温 度/K	13.3 Pa 反应温 度/K
皮江法	2CaO·MgO + Si = 2Mg + Ca ₂ SiO ₄	$\Delta G^\theta = 439\,500 - 247.55T$	1 775.40	1 011.58	1 109.34
	3CaO·MgO + 2Al = 3Mg + 3CaO·Al ₂ O ₃	$\Delta G^\theta = 502\,599.9 - 319.29T$	1 574.12	838.09	926.91
	12CaO·MgO + 9MgO + 14Al = 21Mg + 12CaO·7Al ₂ O ₃	$\Delta G^\theta = 3\,559\,090 - 2\,268.55T$	1 568.88	841.16	929.50
铝热还原法	CaO·MgO + 2MgO + 2Al = 3Mg + CaO·Al ₂ O ₃	$\Delta G^\theta = 497\,200 - 313.56T$	1 585.66	837.14	926.75
	CaO·MgO + 5MgO + 4Al = 6Mg + CaO·2Al ₂ O ₃	$\Delta G^\theta = 1\,013\,700 - 614.98T$	1 648.35	862.19	955.54
	CaO·MgO + 18MgO + 12Al = 18Mg + CaO·6Al ₂ O ₃	$\Delta G^\theta = 3\,074\,820 - 1\,805.96T$	1 702.60	881.49	978.12
	4MgO + 2Al = 3Mg + MgAl ₂ O ₄	$\Delta G^\theta = 479\,599.9 - 296.77T$	1 616.45	831.09	922.95

注:基础数据来源于《无机物热力学数据手册》^[33]

与传统皮江法炼镁相比,铝热还原法可降低还原反应温度 100 K 以上,具有还原速度快、还原率高的优点,可降低 CO₂ 排放,具有发展潜力。采用白云

石和菱镁石为原料进行真空铝热还原炼镁,与传统皮江法相比,还原过程能耗降低 45% 以上,镁还原率提高 5% 以上,同时还原渣可用来提取氢氧化铝,

实现了还原渣的综合利用,工艺流程见图 3。FU D X 等^[34-36]对铝热法还原镁的机理和动力学进行了详细研究,将还原反应分为 3 个阶段: $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{MgO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 形成阶段,其反应速率由化学反应控制; $\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 形成阶段,其反应速率由 Ca^{2+} 扩散和化学反应控制; $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ 形成阶段,其反应速率由 Ca^{2+} 扩散控制。对于菱镁矿的冶炼,采用真空铝热法比传统皮江法生产效率提高 100% 以上,节能 50% 以上,煅烧及还原阶段减少二氧化碳排放量高达 60%,同时还还原渣可用来制备镁铝尖晶石,可实现废渣零排放^[37],工艺流程见图 4。铝热法炼镁作为一种高效、节能、环保的炼镁技术,是未来真空热法炼镁的发展方向之一。

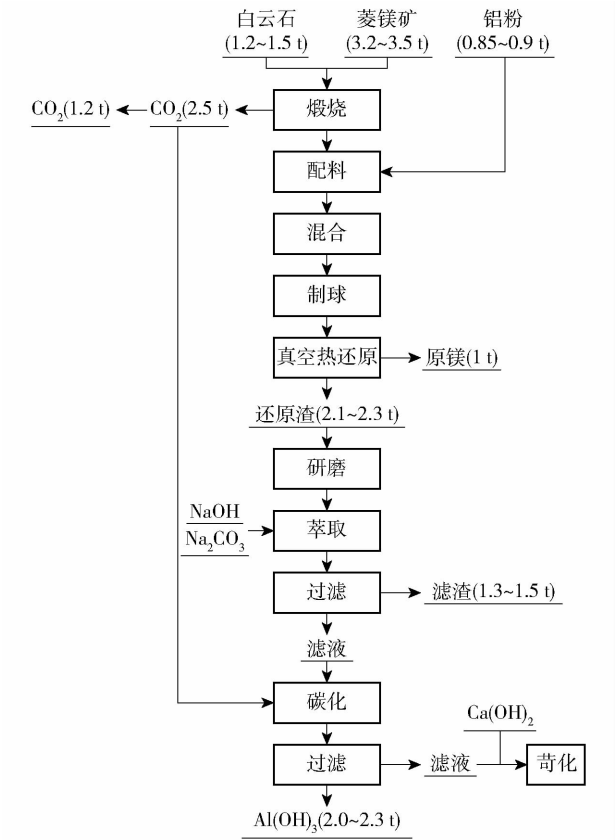


图 3 铝热法炼镁工艺流程(原料:白云石、菱镁矿)
Fig. 3 Flowchart of aluminothermy for production of Mg with dolomite and magnesite as raw materials

3 结束语

镁冶炼作为高碳排放行业,传统皮江法炼镁工艺及装备必将被逐步淘汰。在当前碳中和背景下,

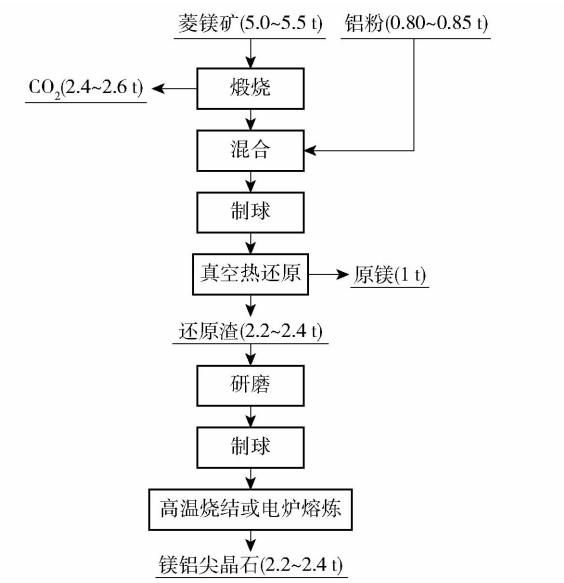


图 4 铝热法炼镁工艺流程(原料:菱镁矿)
Fig. 4 Flowchart of aluminothermy for production of Mg with magnesite as raw material

应推动采用 HTAC 技术、富氧燃烧技术等加热方式的新型立式煅烧炉及微波、感应、等离子加热还原炉等新装备的应用,提高煅烧窑、还原炉能源利用率;开发短流程绿色炼镁技术、连续冶炼技术、铝热法炼镁技术等高效节能减碳新技术,同时将二氧化碳捕集、封存和利用技术应用到镁冶炼中,实现镁行业碳中和目标及可持续发展。

[参考文献]

[1] 李芳,管仁国,铁镛,等.我国先进镁合金材料产业 2035 发展战略研究[J].中国工程科学,2020,22(5):76-83.
LI Fang, GUAN Renguo, TIE Di, et al. Tie development strategies for China's advanced magnesium alloy industry toward 2035[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 76-83.

[2] 林如海,孙前.走向新时代的中国镁工业中国有色金属,2019(3):38-41.
LIN Ruhai, SUN Qian. Towards the new era of Chinese magnesium industry Chinese non-ferrous metals[J]. China Nonferrous Metals, 2019, (3): 38-41.

[3] 张晶扬.能耗“双控”政策加码,原料成本上涨,镁价高位坚挺——2021 年镁市场回顾及后市展望[EB/OL]. [2022-01-14]. <https://mp.weixin.qq.com/s/15y17ogA38GILEBpAV5mNg>.
ZHANG Jingyang. The policy of “dual control” of energy consumption is overweight, the cost of raw materials is rising, and the high level of magnesium price is strong: Review and outlook of magnesium market in 2021. [EB/OL]. [2022-01-14]. <https://mp.weixin.qq.com/s/15y17ogA38GILEBpAV5mNg>.

- [4] 中国有色金属工业协会. 关于发布 2021 年中国原镁、镁合金、镁粉产量的通报 [EB/OL]. [2022 - 03 - 15]. https://mp.weixin.qq.com/s/JswAz0I0uB3hA4_XWCzOmA.
China Non-Ferrous Metals Industry Association. Notice on the release of the output of raw magnesium, magnesium alloy and magnesium powder in China in 2021 [EB/OL]. [2022 - 03 - 15]. https://mp.weixin.qq.com/s/JswAz0I0uB3hA4_XWCzOmA.
- [5] 车玉思, 李玉哲, 宋建勋, 等. 皮江法炼镁工艺在我国创新进步与发展[J]. 世界有色金属, 2021, (16): 5 - 9.
CHE Yusi, LI Yuzhe, SONG Jianxun, et al. Innovation process and development of magnesium production by Pidgeon process in China [J]. World Nonferrous Metals, 2021, (16): 5 - 9.
- [6] 李荣斌, 成雪, 钟晶晶, 等. 硅热法炼镁还原罐结构设计和参数优化[J]. 轻金属, 2020, (12): 34 - 39.
LI Rongbin, CHENG Xue, ZHONG Jingjing, et al. Structure design and parameters optimization of retorts for magnesium smelting via silicothermic process [J]. Light Metals, 2020, (12): 34 - 39.
- [7] 杨钧, 秦朝葵. 高温空气燃烧 (HTAC) 关键技术概述[J]. 城市燃气, 2019, (5): 9 - 12.
YANG Jun, QIN Zhaokui. The key technology of high temperature air combustion (HTAC) [J]. Urban Gas, 2019, (5): 9 - 12.
- [8] 孙超, 胡菁菁, 李茂, 等. 浅析高温空气燃烧 (HTAC) 技术——以及其在蓄热式加热炉上的应用[J]. 科技资讯, 2011, (31): 99.
SUN Chao, HU Qingqing, LI Mao, et al. A brief analysis of high temperature air combustion (HTAC) technology and its application in regenerative furnace [J]. Science & Technology Information, 2011, (31): 99.
- [9] SCHAFFEL-MANCINI N, MANCINI M, Szlek A, et al. Novel conceptual design of a supercritical pulverized coal boiler utilizing high temperature air combustion (HTAC) technology [J]. Energy, 2010, 35(7): 2752 - 2760.
- [10] KAZUHIRO K, KUNIO Y, HIROMICHI K, et al. High temperature air combustion boiler for low BTU gas [J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43(9): 1563 - 1570.
- [11] 郭勇. 全氧燃烧技术在玻璃行业的应用与发展[J]. 玻璃搪瓷与眼镜, 2021, 49(2): 46 - 52.
GUO Yong. Application and development of oxy-fuel combustion technology in glass industry [J]. Glass Enamel & Ophthalmic Optics, 2021, 49(2): 46 - 52.
- [12] 李乐意, 轩红钟, 刘守信. 水泥窑富氧燃烧技术的应用及分析[J]. 新世纪水泥导报, 2021, 27(2): 34 - 35.
LI Leyi, XUAN Hongzhong, LIU Shouxin. Application and analysis of oxygen-enriched combustion technology in cement kiln [J]. Cement Guide for New Epoch, 2021, 27(2): 34 - 35.
- [13] 华志宇, 杨云冬, 王斌. 富氧燃烧技术和有色火法冶金“碳达峰”[J]. 有色金属设计, 2021, 48(2): 41 - 43, 56.
HUA Zhiyu, YANG Yundong, WANG Bin. Oxygen-enriched combustion technology and “peaking carbon emissions” in non-ferrous pyrometallurgy [J]. Nonferrous Metals Design, 2021, 48(2): 41 - 43, 56.
- [14] 李磊. 麦尔兹窑降低能耗的措施及实践[J]. 工业炉, 2015, 37(4): 48 - 50.
LI Lei. Measures and practice for energy consumption reduced of maerz kiln [J]. Industrial Furnace, 2015, 37(4): 48 - 50.
- [15] 彭金辉. 微波冶金 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
PENG Jinhui. Microwave Metallurgy [M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [16] CESÁRIO M R, SAVARY E, MARINEL S, et al. Synthesis and electrochemical performance of $Ce_{1-x}Yb_xO_{2-x/2}$ solid electrolytes; the potential of microwave sintering [J]. Solid State Ionics, 2016, 294: 67 - 72.
- [17] PICKLES C A, GAO F, KELEBEK S. Microwave drying of a low-rank sub-bituminous coal [J]. Minerals Engineering, 2014, 62: 31 - 42.
- [18] 佟志芳, 毕诗文, 杨毅宏. 微波加热在冶金领域中应用研究现状[J]. 材料与冶金学报, 2004, (2): 117 - 120.
TONG Zhifang, BI Shiwen, YANG Yihong. Present situation of study on microwave heating application in metallurgy [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2004, (2): 117 - 120.
- [19] 刘挺. 以非接触式温度传感器为载体的工业微波炉控制系统设计与实践[J]. 工业加热, 2019, 48(5): 43 - 46.
LIU Ting. Design and implementation of industrial microwave oven control system based on non-contact temperature sensor [J]. Industrial Heating, 2019, 48(5): 43 - 46.
- [20] 黄奕闽, 李杰. 一种真空微波炼镁装置: CN106756107A [P]. 2017 - 9 - 1 [2021 - 10 - 25].
HUANG Yimin, LI Jie. A vacuum microwave magnesium smelting device: CN106756107A [P]. 2017 - 9 - 1 [2021 - 10 - 25].
- [21] 于洪喜, 何叶青, 李华梅. 微波加热炼镁炉: CN201420170346.1 [P]. 2014 - 8 - 20 [2021 - 10 - 25].
YU Hongxi, HE Yeqing, LI Huamei. Microwave heating magnesium smelting furnace: CN201420170346.1 [P]. 2014 - 8 - 20 [2021 - 10 - 25].
- [22] 孙光, 李伯超, 宋斌. 真空感应炉冶炼技术[J]. 冶金与材料, 2020, 40(4): 96, 98.
SUN Guang, LI Bochao, SONG Bin. Vacuum induction furnace smelting technology [J]. Metallurgy and Materials, 2020, 40(4): 96, 98.
- [23] 禹健, 张亚彬, 贺成杰. 镁还原罐电磁感应加热装置的能量损耗分析[J]. 机电工程, 2018, 35(2): 175 - 180.
YU Jian, ZHANG Yabin, HE Chengjie. Energy loss analysis of electromagnetic induction heating device for magnesium reduction tank [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018, 35(2): 175 - 180.
- [24] 李长勇, 李峰, 李哈钰, 等. 一种用于还原金属镁的真空冶炼炉: CN110408797A [P]. 2019 - 11 - 05.
LI Changyong, LI Feng, LI Hanyu, et al. A vacuum smelting furnace for reducing metallic magnesium: CN110408797A [P]. 2019 - 11 - 05.
- [25] 黄耕, 马志. 采用等离子体炬加热技术的金属镁冶炼方法及装置: CN201310583795.9 [P]. 2014 - 2 - 19 [2021 - 10 - 25].
HUANG Geng, MA Zhi. Smelting method and device of magnesium metal using plasma torch heating technology: CN201310583795.9 [P]. 2014 - 2 - 19 [2021 - 10 - 25].

- [26] ZHANG C, WANG C, ZHANG S, et al. Experimental and numerical studies on a one-step method for the production of Mg in the silicothermic reduction process [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, 54(36): 8883–8892.
- [27] 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]. 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.
- ZHANG Shaojun. Short process green magnesium smelting: a new “two-step” magnesium smelting process without refining in double vertical tank [C]. 2015 Proceedings of the 18th annual meeting of the magnesium industry branch of China Nonferrous Metals Industry Association and the national Magnesium Industry Conference. Beijing, China Nonferrous Metals Industry Association, 2015, 35–46.
- [28] 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.
- FAN Zimin, WANG Xiaogang. Development of new shaft semi-continuous magnesium smelting furnace with internal electro-thermal process [J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2012, 41(4): 49–51.
- [29] FU D X, ZHANG T A, GUAN L K, et al. Magnesium production by silicothermic reduction of dolime in pre-prepared dolomite pellets [J]. *JOM*, 2016, 68(12): 3208–3213.
- [30] 张廷安, 豆志河, 张子木, 等. 一种快速连续炼镁的方法: CN104120282B [P]. 2014–10–29 [2021–10–25].
- ZHANG Tingan, DOU Zhihe, ZHANG Zimu, et al. Method for rapid continuous magnesium smelting: CN104120282B [P]. 2014–10–29 [2021–10–25].
- [31] 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.
- XIA Dehong, SHANG Yingchun. A new style magnesium reduction process deoxidizing by liquid calcium [J]. *Light Metals*, 2008(2): 45–47.
- [32] 苏鸿英. 南非热法炼镁工艺技术 [J]. *中国有色金属*, 2006, (1): 86–86.
- SU Hongying. South African thermal magnesium smelting technology [J]. *China Nonferrous Metals* 2006, (1): 86–86.
- [33] 梁英教, 车荫昌. 无机物热力学数据手册 [M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1993.
- LIANG Yingjiao, CHE Mengchang. Inorganic thermodynamics data manual [M]. Shenyang: Northeastern University Press, 1993.
- [34] FU D X, FENG N X, WANG Y W, et al. Kinetics of extracting magnesium from mixture of calcined magnesite and calcined dolomite by vacuum aluminothermic reduction [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(3): 839–847.
- [35] FU D X, WANG Y W, PENG J P, et al. Mechanism of extracting magnesium from mixture of calcined magnesite and calcined dolomite by vacuum aluminothermic reduction-ScienceDirect [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(8): 2677–2686.
- [36] 冯乃祥, 王耀武. 一种以菱镁石和白云石混合矿物为原料的真空热还原法炼镁技术 [J]. *中国有色金属学报*, 2011(10): 376–384.
- FENG Naixiang, WANG Yaowu. A method of producing magnesium by vacuum thermal reduction using magnesite and dolomite as materials [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011(10): 376–384.
- [37] WANG Y, YOU J, PENG J, et al. Production of magnesium by vacuum aluminothermic reduction with magnesium aluminate spinel as a by-product [J]. *JOM*, 2016, 68(6): 1728–1736.

Research status of new technology for energy saving and carbon reduction in magnesium smelting

MENG Hao-jie, LI Chang-yong, LI Feng, ZHAO Xiu-feng

(Zhengzhou Non-ferrous Metal Research Institute Co. Ltd. of CHALCO, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: At present, Pidgeon process is used in magnesium production, which has high energy consumption, low resource utilization efficiency, serious environmental pollution and high carbon emission intensity. This paper analyzed the carbon emission status of magnesium smelting industry, and pointed out the ways of energy saving and emission reduction in magnesium smelting under the background of carbon neutralization from three aspects: calcining furnace, reduction furnace and new magnesium smelting technology. This paper promotes the development and application of new calcining furnace using heating ways of HTAC technology, oxygen-enriched combustion technology, etc., microwave, induction, plasma heating reduction furnaces and other new equipment, and develops new technologies with high efficiency, energy saving and carbon reduction, such as short-process green magnesium smelting technology, continuous smelting technology and alumino-thermic magnesium smelting technology, so as to finally achieve the goal of carbon neutrality and sustainable development of magnesium industry.

Key words: carbon neutrality; magnesium smelting technology; calcining furnace; reduction furnace; HTAC; microwave heating; induction heating; plasma heating