

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2024.12.007

# 新型碳还原炼镁工艺热力学分析及可行性研究

李晓峰<sup>1</sup>, 刘金辉<sup>2</sup>, 张少军<sup>2</sup>

(1. 中国宝武钢铁集团宝钢金属有限公司技术中心, 上海 200940;  
2. 郑州大学材料科学与工程学院, 郑州 450001)

**摘要:** 碳热法炼镁工艺具有能耗低和碳排放低的优点, 但由于混合气发生逆反应的问题导致其并未工业化应用。提出一种新型碳还原炼镁工艺, 并运用热力学计算软件 FactSage8.2 进行热力学分析。第一阶段炼镁工艺的合适温度和系统真空度区间分别为 1 250~1 350 °C 和 2 000~4 000 Pa; 第二阶段电石冶炼工艺的合适温度和系统真空度区间分别为 1 650~1 800 °C 和 3 000~10 000 Pa。相关试验结果表明: 随着系统压强的增大, 第一阶段副反应发生程度减弱; 在 1 350 °C、4 000 Pa 和反应时间 2 h 的条件下, 第一阶段炼镁还原率达 90% 以上且副反应发生程度微弱; 在 1 800 °C、5 000 Pa 和反应时间 0.5 h 的条件下, 第二阶段反应所得电石品质可达到市场优等品(发气量  $\geq 300$  L/kg) 的标准。

**关键词:** 镁冶炼; 碳热法; 副反应; 电石

**中图分类号:** TF822 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-7545(2024)12-0050-08

## Thermodynamic Analysis and Feasibility Study of a Novel Carbothermal Reduction of Magnesium Smelting

LI Xiaofeng<sup>1</sup>, LIU Jinhui<sup>2</sup>, ZHANG Shaojun<sup>2</sup>

(1. Technology Center, Baosteel Metal Co., Ltd., China Baowu Steel Group Corporation, Shanghai 200940, China;  
2. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The carbothermal process of magnesium smelting has the advantages of low energy consumption and low carbon emissions. However, it has not been used industrially due to the problem of reverse reaction in the mixed gas. A new type of carbothermal reduction of magnesium smelting was proposed and thermodynamic calculation was carried out by FactSage8.2 software. The suitable temperature and system vacuum degree for the first stage magnesium refining process are 1 250—1 350 °C and 2 000—4 000 Pa, respectively, while for the second stage carbothermic smelting process they are 1 650—1 800 °C and 3 000—10 000 Pa, respectively. The experimental results show that with the increase of system pressure, the degree of occurrence of side reactions in the first stage decreases. Under the conditions of 1 350 °C, 4 000 Pa and a reaction time of two hours, the reduction rate of magnesium refining in the first stage is over 90% and the occurrence of secondary reactions is weak. Under the conditions of 1 800 °C, 5 000 Pa and a reaction time of half hour, the quality of calcium carbide obtained in the second stage reaction can meet market standards for superior grade (gas yield  $\geq 300$  L/kg).

**Key words:** magnesium smelting; carbothermal method; side reaction; calcium carbide

收稿日期: 2024-05-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3701102, 2023YFB3710900)

作者简介: 李晓峰(1979-), 男, 硕士, 工程师; 通信作者: 刘金辉(1991-), 男, 博士, 副教授

20世纪后期以来,全球能源、环境、资源问题日趋严重,可持续发展需求的提高以及电子信息产业的发展,镁及镁合金的应用逐渐被关注,并在近十年来的时间里,镁及镁合金在产品开发、应用以及基础研究方面取得了令人瞩目的进展<sup>[1-3]</sup>。目前镁合金材料已成为航空航天、汽车、电子、通信、化工、储氢、制氢及燃料电池等行业的热门材料,具有明显的减重、节能、环保效果,被誉为“21世纪绿色工程金属材料”<sup>[4-6]</sup>。

我国属于镁资源大国,含镁矿石品类齐全,储量居世界首位,符合炼镁要求的镁矿占78%,具备大力发展镁产业的资源优势<sup>[7-8]</sup>。此外,我国拥有丰富的煤炭资源、以及充裕的劳动力优势。因此,我国原镁冶炼行业具有良好的基础和发展条件,原镁产量在最近十几年内迅速增长,一跃成为世界原镁生产大国,原镁产品在2006年后的全球市场份额达到75%以上,处于主导地位。

虽然我国在世界原镁市场中的作用举足轻重,但我国主流原镁冶炼工艺皮江法的能耗和碳排放、劳动强度、机械化和自动化水平、还原渣处理和车间操作环境等都仍有很大的进步空间<sup>[9-12]</sup>。电解法单位产能投资大,工艺复杂且生产能耗大,生产过程中产生大量的HCl废气和以氯化物为主的废渣,对设备的防腐蚀性能要求高,所以电解法并不是我国原镁冶炼行业的方向。

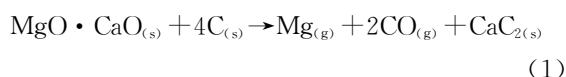
针对以上这些问题,国内外专家进行了大量的研究<sup>[13-16]</sup>。其中碳热法炼镁工艺引起了大家的关注,并被一些行业内专家认为是镁冶炼未来的发展方向。碳热法炼镁具有如下优点:还原剂成本低;能耗和碳排放低;生成的CO能够燃烧再利用,进而达到无废渣、无废气排放。昆明理工大学在充分掌握镁蒸气和CO气体发生逆反应规律的基础上,提出通过控制冷凝区温度、温度梯度和镁蒸气浓度、CO分压,获得大块的金属镁<sup>[17-19]</sup>。澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)开发了“镁音速”的镁冶炼技术,使用一种类似于火箭发动机喷嘴的“超音速喷嘴”装置,使碳热还原反应产生的镁蒸气和CO以4倍于音速的速度通过喷嘴,达到镁蒸气立即凝固成镁粉的效果,这可以很大程度上抑制逆反应的发生<sup>[20-21]</sup>。美国科罗拉多大学和Bigblue公司通过引入冷凝介质颗粒,使混合气中的镁附着在该固体颗粒表面,从而达到分离的目的<sup>[22-23]</sup>。

但截止到目前,碳热法炼镁工艺仍没有大规模的成功应用到工业化生产,其根本难点在于如何从产生的混合气体(镁蒸气和CO气体的混合气)中分

离得到纯度较高的金属镁。郑州大学张少军教授提出一种新型碳还原炼镁工艺:在传统碳热法炼镁的原料基础上,配入适量添加剂,通过控制反应的温度和真空度,将反应分为两个阶段进行,并分别产生镁蒸气和CO气体,从源头上避免镁蒸气和CO接触,从而达到收集金属镁的目的<sup>[24-25]</sup>。本文从热力学角度分析该工艺的可行性并设计试验进行验证。

## 1 反应机理的热力学分析

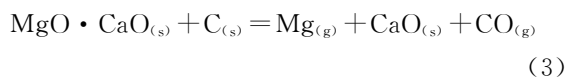
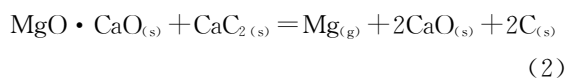
催化碳还原炼镁工艺以煅烧白云石(简称煅白,  $\text{MgO} \cdot \text{CaO}$ )、C(石墨、焦炭、木炭、无烟煤等)以及电石为原料,在可控真空度的反应炉内发生如下还原反应:



该总包反应分为两个阶段进行,分别是第一阶段镁冶炼和第二阶段电石冶炼。

### 1.1 第一阶段反应的热力学

第一阶段为镁冶炼阶段,发生以下两个化学反应:



其中,反应(2)为第一阶段的目标主反应,反应(3)为需要抑制的副反应。通过FactSage8.2热力学软件计算得到反应(2)和(3)的系统压力 $P$ (Pa)和温度 $T$ (K)的关系,计算结果如图1所示。

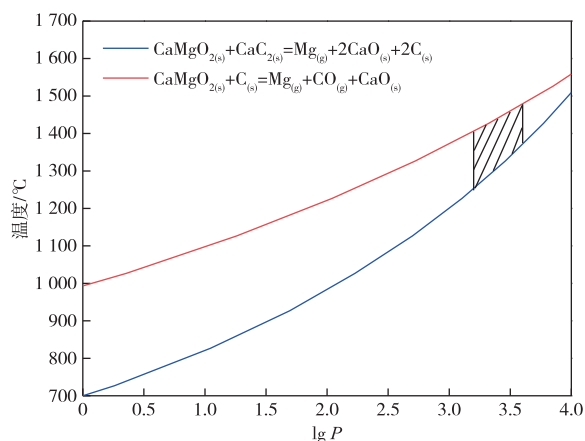


图1 第一阶段反应的热力学计算结果

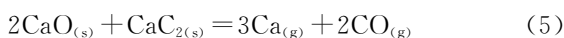
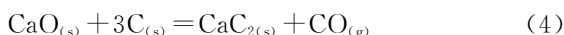
Fig. 1 Thermodynamic calculation result of the first stage reaction

由图1可知,随着系统压力的降低,反应(2)和(3)

的临界反应温度都降低。当系统压力小于10 000 Pa,其他条件相同时,副反应(3)比主反应(2)更难发生,因此只需要将系统真空度和反应温度控制在两条曲线之间即可达到抑制副反应(3)的发生,考虑到反应速率随着温度的升高而增大且系统压力超过4 000 Pa时工艺控制难度急剧上升,结合实验室内真空烧结炉可控真空度为2 000~8 000 Pa,故认为第一阶段镁冶炼合适工艺条件为:温度1 250~1 350 °C、真空度2 000~4 000 Pa。

### 1.2 第二阶段反应的热力学

第二阶段电石冶炼主要包括以下三个反应:



其中反应(4)为第二阶段电石冶炼的主反应,反应(5)和(6)为需要抑制的副反应。通过 FactSage8.2 热力学软件计算得到反应(4)~(6)的系统压力  $P$  和温度  $T$  的关系,计算结果如图 2 所示。

由图 2 可以看出,理论上将第二阶段电石冶炼的反应温度和系统压力控制在绿色阴影方框内时,能够有效抑制第二阶段副反应(5)和(6),促进主反应(4)的发生,即认为第二阶段电石冶炼的合适真空度为3 000~10 000 Pa,温度为1 650~1 800 °C。

两个阶段中不同反应吉布斯自由能以及  $\lg P \sim T$  的函数关系的计算和对比,从热力学的角度证明了该工艺流程的理论可行性,并且给出了合理的温度

和真空度范围,为后续试验指明了方向。

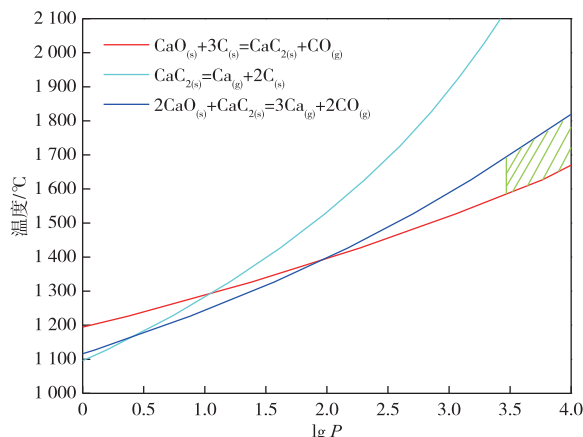


图 2 第二阶段反应的热力学计算结果  
Fig. 2 Thermodynamic calculation result of the second stage reaction

## 2 试验

### 2.1 原料

考虑到在实验室条件下,无法在高温下进行开炉操作以及确定第一阶段镁冶炼加入的电石是否完全消耗,导致干扰第二阶段电石冶炼的结果。故将第一阶段和第二阶段试验分开进行。第一阶段反应的原料为白云石、分析纯石墨和电石;第二阶段反应的原料为氧化钙和分析纯的石墨。原料详细参数见表 1 和表 2。

表 1 白云石成分及煅烧指标

成分	MgO	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	其他	CO <sub>2</sub>
质量分数	22.31	31.22	0.05	0.05	0.02	0.82	47.02

表 2 原料性质

原料名称	分子式	纯度	尺寸	产地/厂家
白云石	CaCO <sub>3</sub> · MgCO <sub>3</sub>	矿石	块状	山西榆林
石墨粉	C	≥99.8%	0.15~0.074 mm	阿拉丁有限公司
氧化钙	CaO	≥99.8%	0.15~0.074 mm	麦克林化学有限公司
添加剂	CaC <sub>2</sub>	≥80%	块状	麦克林试剂有限公司

### 2.2 试验方法

第一阶段反应选取 CaC<sub>2</sub> : MgO · CaO : C = 1.2 : 1 : 4(摩尔比),使用压片机(CIP-30M,沈阳科晶自动化设备有限公司)将混合均匀的原料压制直径 50 mm、厚度 10 mm 的圆柱型团块,制团压力为 60 MPa。将压制好的团块分别置于管式真空炉(KSL-1700X,合肥科晶材料技术有限公司)和真空烧结炉(ZT-40-21,上海晨华科技股份有限公司)

中进行还原试验。反应结束后使用扫描电子显微镜(Helios G4 CX,美国赛默飞世尔科技公司)观察微观形貌及元素分布,分析天平(BSA124S-CW,赛多利斯科学仪器(北京有限公司))对料球称重,根据失重结果计算得到第一阶段失重镁还原率  $\alpha_w$  :

$$\alpha_w = \frac{(W_0 - W_1) \times 96.3}{24.3 \times W_0 \times W_2} \times 100\% \quad (7)$$

式中,  $W_0$  为反应前料球质量(g);  $W_1$  为反应后料球

质量(g); $W_2$ 为反应前料球中煅白的质量分数(%)。

利用电感耦合等离子发射光谱仪(iCPA-7000, 美国赛默飞世尔科技公司)测试还原渣中镁元素剩余含量,根据下列公式计算得到 ICP 测定镁还原率  $\alpha_{ICP}$  :

$$\alpha_{ICP} = \frac{W_3 - W_4}{W_3} \times 100\% \quad (8)$$

式中, $W_3$ 为反应前料球中镁元素质量(g); $W_4$ 为 ICP 测试得到还原渣中镁元素质量(g)。

通过对比  $\alpha_w$  与  $\alpha_{ICP}$  可判断副反应(3)的发生程度: $\alpha_w$  与  $\alpha_{ICP}$  差值越小,副反应(3)发生程度越小,差值越大,则发生副反应(3)程度越大。

第二阶段反应选取  $n(C) : n(CaO) = 3 : 1$  (摩尔比),采用 60 MPa 压力将原料压制成直径 50 mm、厚度 10 mm 的圆柱型团块。将料球置于真空烧结炉中,在不同温度、真空度、保温时间的条件下,进行还原反应。待反应结束后,对料球进行失重计算,使用碳化钙发气量测定装置(LJT-19,丹东市曙光计量仪器有限公司)进行有效成分检测,X 射线衍射仪(XRD-6100,岛津中国有限公司)进行物相分析。

### 3 试验结果与讨论

#### 3.1 第一阶段镁冶炼

第一阶段在不同还原温度和真空度条件下,计算所得失重还原率  $\alpha_w$  和测试所得还原率  $\alpha_{ICP}$  如表 3 所示。

表 3 不同温度和真空度下的镁还原率

Table 3 Magnesium reduction rates at different temperatures and vacuum degree

碳化钙/ 煅白	还原温度/ ℃	还原时间/ h	真空/ Pa	$\alpha_w$ / %	$\alpha_{ICP}$ / %
1.2	1 250	2	2 000	80.73	72.68
1.2	1 250	2	3 000	76.13	71.00
1.2	1 250	2	4 000	67.80	65.63
1.2	1 300	2	2 000	97.02	87.10
1.2	1 300	2	3 000	91.84	83.08
1.2	1 300	2	4 000	77.67	73.43
1.2	1 350	2	2 000	104.9	95.94
1.2	1 350	2	3 000	98.32	94.10
1.2	1 350	2	4 000	94.45	92.18

从表 3 的结果可以看出,在相同温度下,反应炉内系统压强从 2 000 Pa 分别提高至 3 000、4 000 Pa 时,镁还原率降低, $\alpha_{ICP}$  与  $\alpha_w$  差距越来越小,副反应发生比例减少,说明增大反应炉内系统压强能够有效抑制副反应(3)的发生。并且随着温度的提高, $\alpha_{ICP}$  与  $\alpha_w$  的数值整体呈上升趋势,说明温度的提高有利于反应的进行。

图 3 为第一阶段反应前后料球的 XRD 谱。由图 3 可以看出,在 1 350 ℃,系统真空度 4 000 Pa,保温 2 h 后,已基本看不到料球内氧化镁的峰,与表 3 中镁的还原率  $\alpha_{ICP} = 92.18\%$  对应。

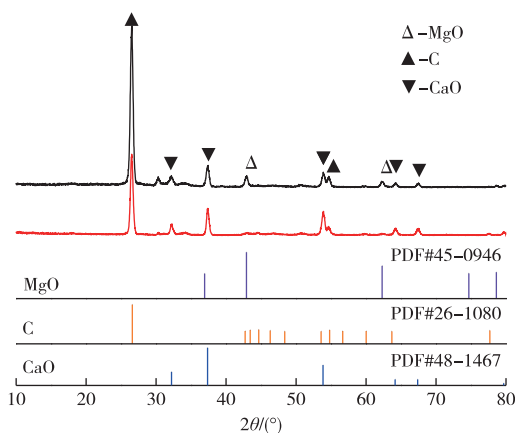
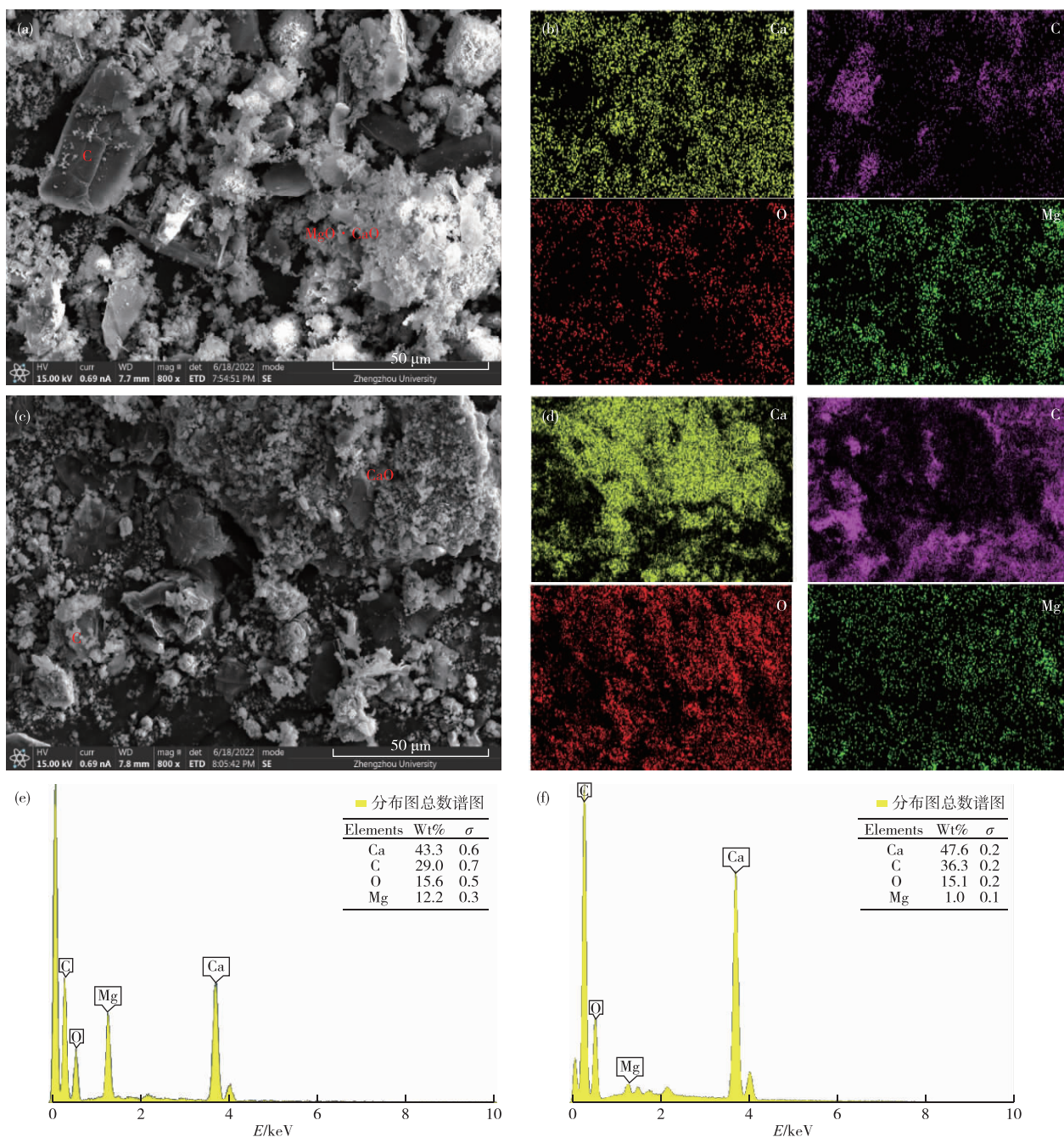


图 3 1 350 ℃/4 000 Pa 条件下反应前后料球的 XRD 谱

Fig. 3 XRD patterns of the pellets before and after the reaction at 1 350 ℃/4 000 Pa

图 4(a)、4(b)和 4(e)为反应前混合粉料的扫描电镜形貌及 EDS 面扫结果。通过对照面扫结果,可以看出 Ca 和 Mg 重合区域为煅白,煅白为网状结构;C 的分布区域为石墨。面扫元素含量显示 Mg、Ca 和 C 的元素含量基本与原料配比相一致。图 4(c)、4(d)和 4(f)为料球在 4 000 Pa 系统压力下,1 350 ℃保温 2 h 后的扫描电镜形貌及其面扫结果。可以看出 Mg 元素分布区域及含量大幅降低,反应后料球主要含有 Ca、C 和 O,这与 XRD 结果相吻合。通过元素含量计算,镁还原率超过了 92% 以上,与前面失重和 ICP 测试镁还原率结果一致。





(a)、(b)和(e)为原始料球;(c)、(d)和(f)为反应后料球

图4 1350 °C/4 000 Pa条件下反应前后料球的SEM形貌及其对应的EDS能谱

Fig. 4 SEM morphologies of the material balls before and after the reaction at 1350 °C/4 000 Pa and its corresponding EDS energy spectrum analysis

### 3.2 第二阶段电石冶炼

选取反应温度1800 °C,系统真空度5000 Pa,保温时间0.5 h,在该反应条件下进行第二阶段还原试验,试验结果如图5所示。由图5可以看出,在该条件下,反应后的料球表面产生多个气孔,掰开料球可见,内部中心区域生成孔洞状棕黄色物

质,被外层黑色壳层所包裹,且界面分层明显。分析认为:这是因为第二阶段三个反应均有气体生成,气体由内而外扩散,透过料球表面留下气孔;外层黑色物质为发生副反应(6)时生成的C;料球内部棕黄色孔洞位置为原料白色CaO发生还原反应的位置。

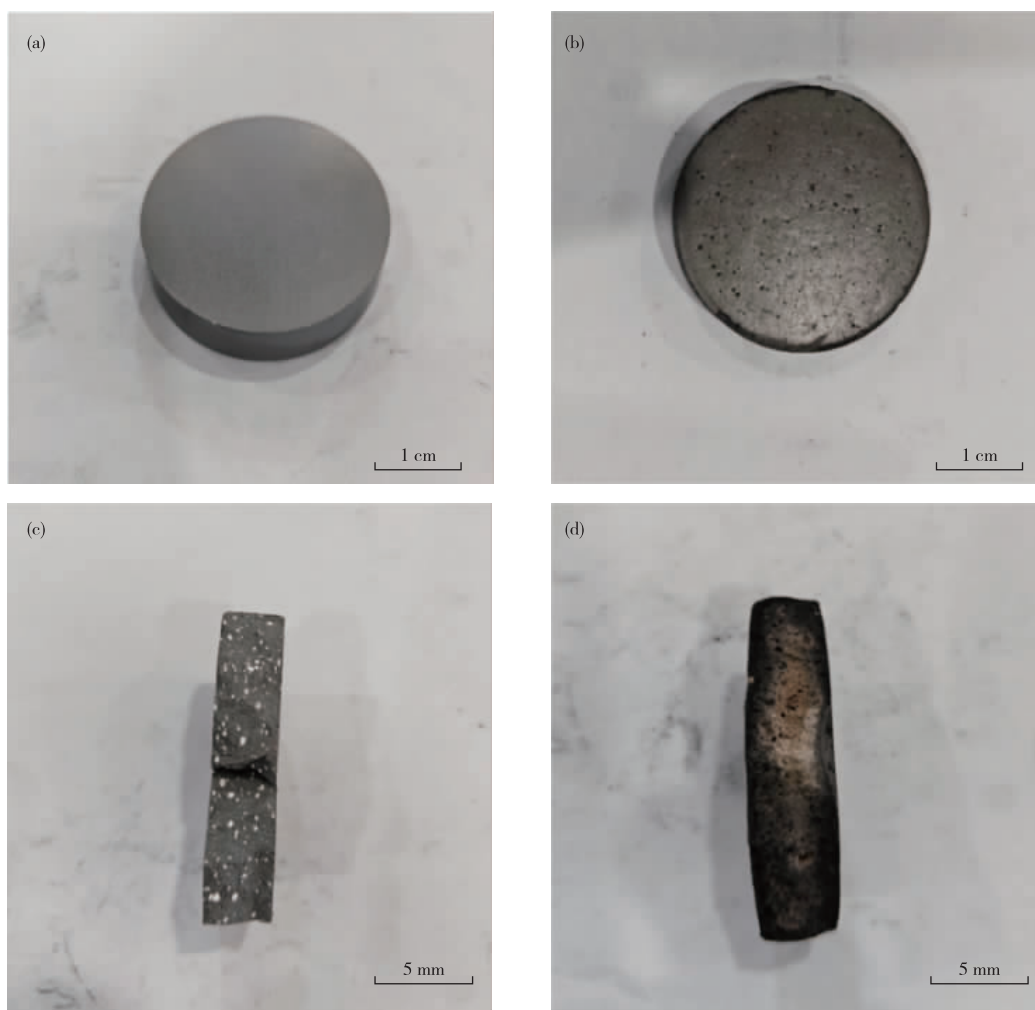


图5 1 800 °C/5 000 Pa/0.5 h 反应前(a,c)和反应后(b,d)料球形貌

Fig. 5 Morphologies of the pellets before reaction (a,c) and after reaction (b,d) at 1 800 °C/5 000 Pa/0.5 h

对反应后的料球进行 XRD 物相分析检测,得到的结果如图 6 所示。图 6 的结果显示,在还原温度 1 800 °C,系统真空度 5 000 Pa,保温 0.5 h 的条件下,料球中心位置生成了纯度较高的棕黄色  $\text{CaC}_2$ 。电石的颜色可以一定程度上反应其中  $\text{CaC}_2$  的含量,高纯度的电石呈现为紫黑色,纯度较高的电石为棕黄色或土黄色,纯度更低的电石为灰黑色,本试验产生的棕黄色电石说明纯度较高<sup>[26]</sup>。料球表面黑色壳层绝大部分为 C,其来源于生产电石的分

解,如反应(6)所示,原因是该条件下系统空间内 Ca 蒸气分压较小,该反应的起始反应温度很低。反应产物的发气量测试及料球失重结果如表 4 所示,结果表明,在该工艺条件下能够制得品质达到市场优等品(发气量  $\geq 300$  L/kg)的电石。同时注意到,通过失重测得的  $\text{CaC}_2$  生成量明显大于实际  $\text{CaC}_2$  的生成量,这是副反应发生引起的,由于副反应(5)和(6)都有气体的产生,目前还不能判断各自在总失重中的占比<sup>[27-28]</sup>。

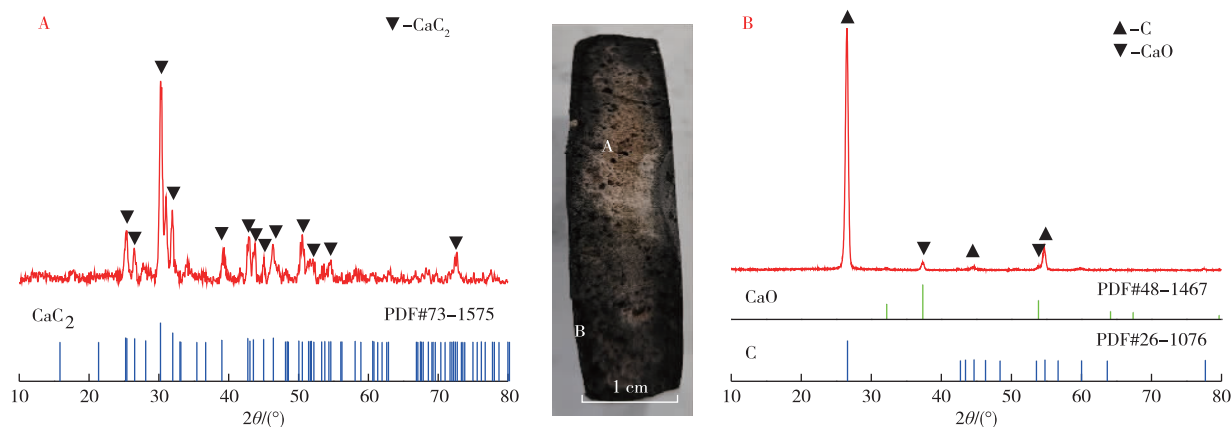


图 6 1 800 °C/5 000 Pa/0.5 h 反应后料球截面的 XRD 谱

Fig. 6 XRD patterns of cross section of the pellet after 1 800 °C/5 000 Pa/0.5 h reaction

表 4 反应产物的乙炔发气量

Table 4 Acetylene gas generation from reaction products

反应温度/°C	真空度/Pa	保温时间/h	发气量/(L·kg <sup>-1</sup> )	失重测得 CaC <sub>2</sub> 生成量/mol	实际 CaC <sub>2</sub> 生成量/mol
1 800	5 000	0.5	329.6	0.451	0.255

## 4 结论

1) 催化碳还原炼镁工艺第一阶段合适的温度为 1 250~1 350 °C, 系统真空度为 2 000~4 000 Pa, 第二阶段电石冶炼的合适温度和真空度分别为 1 650~1 800 °C、3 000~10 000 Pa。

2) 第一阶段镁冶炼过程中, 随着系统压力增大, 副反应发生程度减弱。在反应温度 1 350 °C, 系统真空度 4 000 Pa, 反应时间 2 h 的条件下, 第一阶段镁冶炼还原率达到 90% 以上, 且副反应发生程度微弱。

3) 在反应温度 1 800 °C, 系统真空度 5 000 Pa, 反应时间 0.5 h 的条件下, 第二阶段电石冶炼所得电石的乙炔发气量为 329.6 L/kg, 达到市场优等品电石(发气量 ≥ 300 L/kg) 标准。

### 参考文献

[1] 丁文江, 吴玉娟, 彭立明, 等. 高性能镁合金研究及应用的新进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(8): 37-45.  
DING W J, WU Y J, PENG L M, et al. New progress in the research and application of high-performance magnesium alloys[J]. Progress of Materials in China, 2010, 29(8): 37-45.

[2] YANG Y, XIONG X M, CHEN J, et al. Research advances of magnesium and magnesium alloys worldwide in 2022[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2023, 11(8): 2611-2654.

[3] ZHU Q C, LI Y X, CAO F Y, et al. Towards

development of a high-strength stainless Mg alloy with Al-assisted growth of passive film [J]. Nature Communications, 2022, 13 (1): 5838. DOI: 10. 1038/s41467-022-33480-w.

[4] 杨波, 邹建新, 曾小勤, 等. 改善镁/氢化镁水解放氢性能研究进展[J]. 有色金属工程, 2019, 9(9): 10-16.  
YANG B, ZOU J X, ZENG X Q, et al. Recent advances in improving the hydrolysis performance of magnesium/magnesium hydride[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2019, 9(9): 10-16.

[5] 王中霆, 邓容锐, 李荣, 等. 镁二次电池负极材料的研究综述[J]. 稀有金属, 2024, 48(1): 79-89.  
WANG Z T, DENG R R, LI R, et al. Review of research on anode materials for secondary magnesium batteries[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2024, 48(1): 79-89.

[6] 丁朝, 李宇庭, 侯全会, 等. 金属有机骨架材料在镁基储氢材料中的应用[J]. 稀有金属, 2023, 47 (12): 1603-1613.  
DING Z, LI Y T, HOU Q H, et al. Application of metal-organic frameworks on magnesium-based hydrogen storage materials[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2023, 47(12): 1603-1613.

[7] 章佳豪, 郁青春, 杨斌, 等. 白云石热分解动力学机理探究[J]. 有色金属工程, 2020, 10(12): 55-61.  
ZHANG J H, YU Q C, YANG B, et al. Inquiry into decomposition kinetics mechanism of dolomite [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(12): 55-61.

[8] 刘阅兵. 辽宁海城菱镁矿选矿厂设计[J]. 矿冶, 2019,

- 28(2):28-31,51.
- LIU Y B, Design of concentrator for Haicheng baudisserite in Liaoning[J]. *Mining and Metallurgy*, 2019, 28(2): 28-31, 51.
- [9] 刘红湘, 田阳, 杨斌, 等. 皮江法炼镁与真空碳热还原法炼镁生命周期评价比较研究[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2021(11): 37-45.
- LIU H X, TIAN Y, YANG B, et al. Comparison on life cycle assessment of magnesium smelt by Pidgeon process and vacuum carbothermal reduction method[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2021(11): 37-45.
- [10] 杨沛胥, 刘金辉, 王一飞, 等. 硅热法镁冶炼球导热系数研究[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2019(12): 17-22.
- YANG P X, LIU J H, WANG Y F, et al. Study on thermal conductivity of pellet for Mg extraction by siliconthermal process[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2019(12): 17-22.
- [11] 高峰, 聂祚仁, 王志宏, 等. 中国皮江法炼镁的资源消耗和环境影响分析[J]. *中国有色金属学报*, 2006, 16(8): 1456-1461.
- GAO F, NIE Z R, WANG Z H, et al. Research depletion and environmental impact analysis of magnesium produced using Pidgeon process in China [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006, 16(8): 1456-1461.
- [12] 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.
- LIANG W Y, SUN X L, LI F S, et al. Research progress on magnesium smelting methods [J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2020, 49(4): 36-44, 53.
- [13] 车玉思, 杜胜敏, 宋建勋, 等. 金属镁生产新工艺研究现状与进展[J]. *中国有色金属学报*, 2022, 32(6): 1719-1733.
- CHE Y S, DU S M, SONG J X, et al. Research status and progress of novel technology for magnesium production [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2022, 32(6): 1719-1733.
- [14] 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.
- ZHOU P, LIU L, YUAN Y T, et al. Countermeasures to promote green transformation development of metal magnesium smelting industry in China [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2020(6): 24-29.
- [15] 邓军平, 王晓刚. 内热式炼镁工艺实验研究[J]. *材料导报*, 2014, 28(增刊 2): 179-181, 204.
- DENG J P, WANG X G. Experimental research on the inner thermal magnesium reduction process [J]. *Materials Review*, 2014, 28(Suppl. 2): 179-181, 204.
- [16] 戴永年, 杨斌. 有色金属材料的真空冶金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- DAI Y N, YANG B. *Vacuum metallurgy of nonferrous metal materials* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000.
- [17] 杨成博, 田阳, 曲涛, 等. 真空碳热还原煅白制取金属镁的冷凝实验研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2013, 33(10): 1051-1056.
- YANG C B, TIAN Y, QU T, et al. Experimental study of condensation in the production of magnesium metal by vacuum carbothermal reduction calcined white [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2013, 33(10): 1051-1056.
- [18] YANG C, TIAN Y, QU T, et al. Analysis of the behavior of magnesium and CO vapor in the carbothermic reduction of magnesia in a vacuum [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2014, 2(1): 50-58.
- [19] 李康. CO气氛下镁蒸冷凝的机理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- LI K. Mechanistic study of magnesium vapor condensation under CO atmosphere [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [20] 澳科学家开发出金属镁冶炼新技术[J]. *中国有色冶金*, 2016, 45(5): 33.
- Australian scientists develop new technology for magnesium metal smelting [J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2016, 45(5): 33.
- [21] PRENTICE L H, NAGLE M W, BARTON T R, et al. Carbothermal production of magnesium: CSLRO's magsonic™ process [M]. Cham: Springer International Publishing, 2012. DOI:10.1007/978-3-319-48203-3\_6.
- [22] CHUBUKOV B A, ROWE S C, PALUMBO A W, et al. Investigation of continuous carbothermal reduction of magnesia by magnesium vapor condensation onto a moving bed of solid particles [J]. *Powder Technology*, 2020, 365: 2-11.
- [23] SHI W, KOBASHI M, CHOH T. Wetting of alumina, iron and stainless steel substrates by molten magnesium [J]. *International Journal of Materials Research*, 2022, 92(4): 382-385.
- [24] 张少军. 一种碳热法炼镁联产碳化钙的方法: PCT, WO2021/121312 A1 [P]. 2020-12-17.
- ZHANG S J. A carbothermal method of refining magnesium for co-production of calcium carbide: PCT, WO2021/121312 A1 [P]. 2020-12-17.



- [2] 包海宁,熊杰,张超艳,等. 污染地块土壤砷与苯并[a]芘生物可给性影响因素研究与模型预测[J]. 环境工程学报,2023,17(10):3392-3398.  
BAO H N, XIONG J, ZHANG C Y, et al. Effect factors and model prediction of arsenic and benzo[a]pyrene bioaccessibility in the soil of contaminated sites[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(10):3392-3398.
- [3] 陈阳,杨志辉,司梦莹,等. 基于层次分析法的矿区场地风险管控与治理技术综合评估体系构建[J]. 有色金属(冶炼部分),2024(4):48-54.  
CHEN Y, YANG Z H, SI M Y, et al. Construction of comprehensive evaluation system of mining site risk control management technology based on analytic hierarchy process[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2024(4):48-54.
- [4] 涂玉伦. 东北重工业区重点行业场地土壤污染特征与环境风险研究[D]. 长春:吉林大学,2023.  
TU Y L. Study on soil contamination characteristics and environmental risks of key industrial sites in heavy industrial zone of Northeast China[D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [5] 古小超,王子璐,赵兴华,等. 河流生态环境健康评价技术体系构建及应用[J]. 中国环境监测,2023,39(3):87-96.  
GU X C, WANG Z L, ZHAO X H, et al. Establishment and application of the index system for river ecosystem health assessment [J]. Environmental Monitoring in China, 2023, 39(3):87-96.
- [6] 李娟,吕宁馨,杨洋,等. 典型场地地下水污染源强分级评价方法研究 [J]. 环境工程学报, 2014, 8 (11): 4726-4734.  
LI J, LÜ N X, YANG Y, et al. Study on groundwater pollution source intensity rating assessment method of typical contaminated sites [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(11):4726-4734.
- [7] SAATY T L. A scaling method for priorities in hierarchical structures [J]. Journal of Mathematical Psychology, 2000, 15(3):234-281.
- [8] 胡星路,熊杰,张超艳,等. 基于层次分析法-熵权法的污染地块异味污染物优先度评价方法:以农药类污染地块为例[J]. 环境工程学报,2023,17(6):1923-1936.  
HU X L, XIONG J, ZHANG C Y, et al. Priority evaluation method of odor pollutants in contaminated sites based on analytic hierarchy process and entropy weight method: a case study of pesticide contaminated sites [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(6):1923-1936.
- [9] 翟增秀,孟洁,刘绿叶,等. 某复合化工污染场地不同介质有机物污染特征层次分析[J]. 环境化学,2022,41(5):1603-1615.  
ZHAI Z X, MENG J, LIU L Y, et al. Hierarchical analysis of the pollution characteristics of organic matter in different media in a compound chemical contaminated site [J]. Environmental Chemistry, 2022, 41 (5): 1603-1615.
- [10] JABBAR F K, GROTE K, TUCKER E. A novel approach for assessing watershed susceptibility using weighted overlay and analytical hierarchy process (AHP) methodology: a case study in Eagle Creek Watershed, USA [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019, 26(31):31981-31997.

### (上接第 57 页)

- [25] 张少军. 一种碳热法炼镁联产碳化钙的方法: ZL202080087519. 1[P]. 2023-06-13.  
ZHANG S J. A carbothermal method of refining magnesium for co-production of calcium carbide: ZL202080087519. 1[P]. 2023-06-13.
- [26] 熊漠远,岳宏亮. 电石生产加工与产品开发利用及污染防治整改新技术新工艺实用手册[M]. 北京:化学工业出版社,2005.  
XIONG M Y, YUE H L. Practical handbook on new technologies and processes for production, processing, product development, utilization, and pollution control improvement in calcium carbide industry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [27] 李国栋. 粉状焦炭和粉状氧化钙制备碳化钙新工艺的基础研究[D]. 北京:北京化工大学,2011.  
LI G D. Fundamental study on a novel technology of CaC<sub>2</sub> production from fine coke and fine CaO[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2011.
- [28] 李正科. 低温电石生产新技术与电石渣转化的基础研究[D]. 北京:北京化工大学,2018.  
LI Z K. Fundamental study on a novel low temperature production of calcium carbide and conversion of calcium carbide residue [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018.