



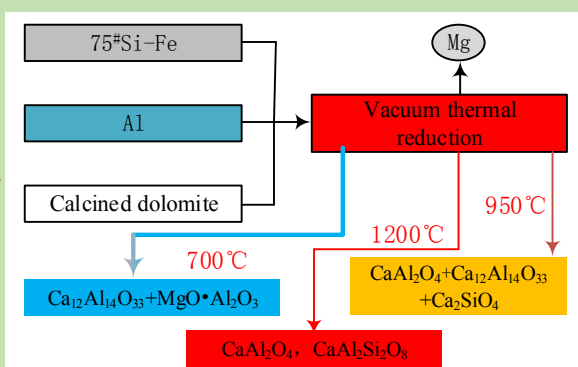
## Reduction of magnesium oxide in calcined dolomite with a mixture of aluminum and ferrosilicon

Yaoning WANG<sup>1,2</sup>, Hongzhou MA<sup>1,2\*</sup>, Zhixian WANG<sup>1,2</sup>, Dingding WANG<sup>1,2</sup>, Bixia WANG<sup>1,2</sup>

1. School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China

2. Key Laboratory of Gold and Resources of Shaanxi Province, Xi'an, Shaanxi 710055, China

**Abstract:** The Pidgeon process is the main process of magnesium production. The higher reduction temperature of the silicothermic process results in high energy consumption in the magnesium reduction process. Improving the reducing performance of reducing agents was one of the ways to reduce the energy consumption of metallic magnesium production. The theoretical and experimental research on the reduction of MgO in calcined dolomite was studied by the mixture of aluminum and ferrosilicon as reducing agents. The effects of aluminum dosage, reduction time and temperature on the



reduction rate of magnesium were discussed. The reduction process of magnesium oxide and the phase transformation of aluminum and ferrosilicon at different temperatures were studied. The results showed that when aluminum was involved in the reduction of magnesium oxide by silicothermic method, the initial reaction temperature of reduction of MgO by silicothermic method was reduced to below 700 °C, and the effect of improving the reduction rate of MgO was obvious in the low-temperature stage. The reduction process of magnesium oxide by aluminum included two aspects. On the one hand, it was directly involved in the reduction of magnesium oxide to MgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. With the increase of temperature, MgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was further reduced by aluminum. On the other hand, aluminum and ferrosilicon from the Al<sub>3</sub>FeSi<sub>2</sub> phase, which promoted the reduction of silicon and reduced the temperature of silicon participating in the reduction of magnesium oxide. In the presence of aluminum, the reduction process of magnesium oxide by ferrosilicon was as follows: at 700~950 °C, silicon participated in a reduction in the form of Al<sub>3</sub>FeSi<sub>2</sub>, and at 1200 °C, the magnesium oxide was reduced in the form of Si and FeSi<sub>2</sub>. Under the experimental conditions, when aluminum participated in the reduction of magnesium by ferrosilicon, the reduction rate of magnesium oxide increased gradually with the increase of aluminum dosage. When the aluminum dosage was 12% and 1000 °C, the reduction rate of magnesium oxide can reach more than 90%. Aluminum participated in the reduction of MgO to produce alumina, which reacted with CaO and SiO<sub>2</sub> in calcined dolomite to produce CaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>.

**Key words:** aluminum; ferrosilicon; magnesium; Pidgeon process; vacuum thermal reduction

收稿: 2020-04-23, 修回: 2020-06-03, 网络发表: 2020-06-30, Received: 2020-04-23, Revised: 2020-06-03, Published online: 2020-06-30

基金项目: 陕西省教育厅专项科研项目(编号: 18JK0480); 陕西省自然科学基金面上项目(编号: 2018JM5171)

作者简介: 王耀宁(1976-), 女, 陕西省凤翔市人, 硕士, 讲师, 材料学专业, E-mail: yaoningwang@126.com; 马红周, 通讯联系人, E-mail: mahongzhou123@126.com.

**引用格式:** 王耀宁, 马红周, 王致娟, 等. 铝与硅铁混合物还原煅烧白云石中氧化镁. 过程工程学报, 2021, 21(4): 440-445.

Wang Y N, Ma H Z, Wang Z X, et al. Reduction of magnesium oxide in calcined dolomite with a mixture of aluminum and ferrosilicon (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2021, 21(4): 440-445, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.220138.

# 铝与硅铁混合物还原煅烧白云石中氧化镁

王耀宁<sup>1,2</sup>, 马红周<sup>1,2\*</sup>, 王致娴<sup>1,2</sup>, 王丁丁<sup>1,2</sup>, 王碧侠<sup>1,2</sup>

1. 西安建筑科技大学冶金工程学院, 陕西 西安 710055

2. 陕西省黄金与资源重点实验室, 陕西 西安 710055

**摘要:** 皮江法炼镁是金属镁生产的主流工艺, 该工艺的还原温度较高, 导致镁还原过程能耗高, 改进还原剂是降低原镁生产能耗的途径之一。本研究以铝和硅铁的混合物作为还原剂进行了煅烧白云石中氧化镁还原的理论和实验研究, 探讨了铝配入量、还原时间、还原温度对镁还原率的影响, 并对铝与硅铁共同还原氧化镁过程及铝与硅铁在不同温度时的物相转变进行了研究。研究表明, 铝的加入可以使硅热法还原氧化镁的起始反应温度降低至 700℃ 以下, 并且在低温阶段对提高氧化镁的还原率效果明显, 铝还原氧化镁的过程包括两方面, 一方面是直接参与还原氧化镁而转变为  $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ , 随温度升高,  $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  进一步被铝还原; 另一方面铝与硅铁形成  $\text{Al}_3\text{FeSi}_2$  相, 降低了硅参与氧化镁还原反应的温度。硅还原氧化镁的过程为: 温度在 700~950℃ 之间时, 硅以  $\text{Al}_3\text{FeSi}_2$  的形式参与氧化镁还原, 在 1200℃ 时, 以 Si 和  $\text{FeSi}_2$  的形式进行氧化镁还原。在实验条件下, 铝参与硅铁还原镁时, 随着铝配入量的增加, 氧化镁的还原率在逐渐升高, 铝粉添加量为 12%、1000℃ 时, 氧化镁的还原率可达到 90% 以上。铝参与氧化镁的还原可提高镁的还原速率。

**关键词:** 铝; 硅铁; 镁; 皮江法; 真空热还原

中图分类号: TF822

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2021)04-0440-06

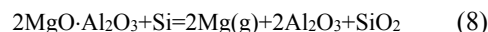
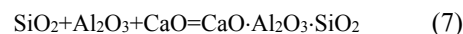
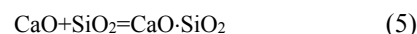
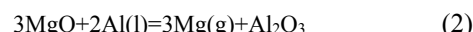
## 1 前言

皮江法是我国原镁生产的主要方法<sup>[1]</sup>, 其以硅铁为还原剂在 1200℃ 真空还原煅烧白云石(以下简称煅白)中的氧化镁生成金属镁<sup>[2,3]</sup>。皮江法炼镁的能耗较高, 探索降低镁能耗的方法尤为必要<sup>[2,4-6]</sup>。通过改变还原剂使氧化镁的还原温度降低是降低镁生产能耗的方法之一, 尤晶等<sup>[7]</sup>和 Fu 等<sup>[8]</sup>以铝和铝铁合金为还原剂对氧化镁进行还原, 以铝为还原剂时, 还原反应温度较皮江法可降低 100℃, 还原反应产物主要物相为  $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ 。以铝铁合金为还原剂、氟化钙为添加剂时, 还原生成稳定的  $11\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaF}_2$ , 大幅提高低温还原阶段氧化镁的还原率, 但对高温阶段氧化镁的还原率影响不大。胡文鑫等<sup>[9]</sup>以 Al-Si-Fe 合金进行了镁还原, 铝硅铁合金在 1373~1413 K 范围内以熔体态与煅白反应, 还原生成  $2\text{CaSiO}_2$  和  $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ 。以上研究表明, 用铝、铝铁及铝硅铁合金为还原剂与用硅铁为还原剂相比较, 可以降低氧化镁的还原温度<sup>[4,10]</sup>。而单独用铝或铝硅铁合金作还原剂, 则生产成本较高<sup>[11]</sup>, 如在皮江法炼镁过程中加入部分铝, 以铝和硅铁共同作为炼镁的还原剂, 理论上既可以降低还原剂成本, 又减少了铝硅铁的合成工序, 同时还可降低氧化镁的还原温度。然而, 目前铝和硅铁混合物在炼镁过程中的反应行为未见报道。本工作

对铝和硅铁混合物还原镁在热力学分析的基础上进行了混合物还原煅白及混合物高温相转变规律研究, 确定了铝与硅铁混合物在还原镁过程中铝和硅的反应行为。

## 2 铝和硅铁在真空条件下还原镁的热力学研究

铝与硅铁混合物料还原煅白中氧化镁时可能发生的反应如下<sup>[7,12-15]</sup>:



由于镁的熔点为 650℃, 铝的熔点为 660.4℃, 在真空条件下, 镁的蒸发需要在其熔点以上进行, 依据皮江法炼镁的加热温度, 选择热力学计算的温度范围 700~1200℃, 真空度设定为 10 Pa, 计算所采用的热力学数据来自 HSC Chemistry 6.0 软件所带的数据库。热力学计算结果见图 1。

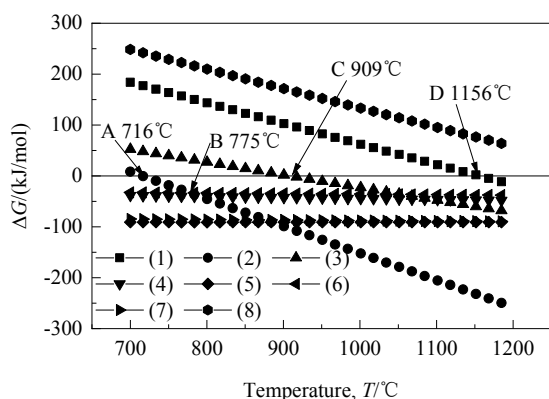


图 1 真空度 10 Pa 时铝与硅铁混合物还原镁过程可能反应的  $\Delta G-T$  图

Fig.1  $\Delta G-T$  diagram of the possible reactions in the reduction of magnesium by the mixture of aluminum and ferrosilicon at a vacuum of 10 Pa

由图 1 可得, 铝还原氧化镁的反应[反应式(2)]初始反应温度为 716 °C(图 1 中 A 点), 还原产物为镁和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与原料中  $\text{MgO}$  反应生成  $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  的反应[反应式(6)]在所计算的温度范围内  $\Delta G < 0$ , 即在有  $\text{Al}_2\text{O}_3$  生成时即可发生生成  $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  的反应, 在 775 °C 之前(图 1

中 B 点), 因生成  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的吉布斯自由能大于生成  $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  的吉布斯自由能, 因此在温度低于 775 °C 时生成的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  将转变为  $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ , 温度高于 775 °C 时将会生成  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。铝还原  $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  中  $\text{MgO}$  的反应的初始反应温度为 909 °C(图 1 中 C 点)。硅还原煅白中  $\text{MgO}$  的初始还原温度为 1156 °C(图 1 中 D 点), 在计算温度范围内, 硅不能还原  $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  中的  $\text{MgO}$ 。

### 3 实验

#### 3.1 实验原料

煅白、75#硅铁均采自镁冶炼厂, 根据《石灰石及白云石化学分析方法》(GB/T 3286-2012)中的络合滴定法测定氧化钙、氧化镁和氧化铝含量, 硅钼蓝分光光度法测定二氧化硅含量, 火焰原子吸收光谱法测定铁、钾及钠的含量, 煅白成分见表 1, 煅白 XRD 物相检测结果见图 2。由图 2 可知, 煅白中主要存在的物相为  $\text{MgO}$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ,  $\text{CaCO}_3$ , 煅白中氢氧化物主要是煅白在存放过程中发生吸潮所致,  $\text{CaCO}_3$  是由于白云石煅烧不彻底造成。硅铁中硅含量为 75.1%, 铝粉为市售铝粉, 煅白、铝粉与硅铁分粒度均在 178  $\mu\text{m}$  以下。

表 1 煅白的化学成分

Table 1 Chemical composition of calcined dolomite

| Composition | CaO   | MgO  | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{K}_2\text{O}$ |
|-------------|-------|------|-------------------------|----------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| Content/wt% | 56.73 | 30.5 | 0.13                    | 0.40           | 0.12                    | 0.04                  | 0.03                 |

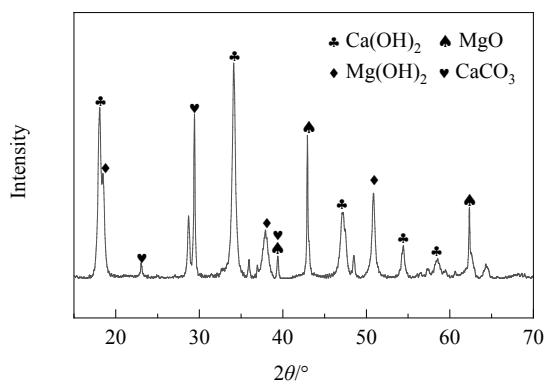


图 2 煅白的 XRD 谱

Fig.2 XRD pattern of calcined dolomite

#### 3.2 实验程序

##### 3.2.1 铝与硅铁共同还原煅白

将干燥后煅白、硅铁及铝粉按设定比例称取、混匀, 压成  $\phi 1 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm}$  的圆柱, 将压好的团块置于石墨坩锅中, 并送入真空加热炉内, 抽真空至炉内压力小于 10

Pa 后开始升温, 待炉温升至设定温度后按设定时间保温, 保温结束后保持炉内真空度, 使物料随炉冷却至室温, 破真空后取出物料, 经破碎、研磨, 用 XRD 检测物料中物相组成, 并测定渣中镁含量, 计算镁的挥发率。

##### 3.2.2 铝与硅铁混合物加热过程相转变

将铝粉与硅铁粉按比例混合后进行压块, 加热程序与检测方法同 3.2.1。

### 4 结果与讨论

#### 4.1 铝与硅铁共同还原煅烧白云石过程分析

混合配料中硅铁的配入量为煅白中镁能够充分还原所需理论硅量的 1.3 倍。根据实验所用煅白中镁含量, 确定煅白与硅铁的混合配料比为: 煅白+硅铁(质量)=84%+16%, 以下实验研究中所所述的添加铝粉量均是以此配比为基础, 用等质量的铝粉替代等质量的硅铁。

##### 4.1.1 铝粉添加量对镁还原率的影响

改变配料中铝粉的添加量, 起始真空度为 10 Pa,

在 1000 °C 保温 2 h, 铝粉添加量与镁还原率之间的关系见图 3。由图 3 可知, 随铝粉添加量增加, 镁的还原率逐渐升高, 铝粉添加量达 12% 时, 1000 °C 下镁的还原率可达 90% 以上。文献[14]中在实验室还原条件下, 硅铁添加量为理论量, 1000 °C 下, 还原罐内剩余压力为 2 Pa, 还原 2 h 时镁的还原率约为 7.7%, 1200 °C 时镁的还原率约为 87%。与文献[14]的研究结果对比可得, 在有铝粉参与还原时, 在 1000 °C 可使镁的还原率达到 90%。表明铝粉的参与降低了氧化镁的还原温度。铝粉添加量为 2% 时, 镁的还原率约为 63%; 铝粉添加量为 4% 时, 镁的还原率约 81%; 当铝粉添加量在 4% 以上时, 尽管镁还原率在逐步提升, 但提升幅度较小, 考虑铝粉的价格较高, 在保证还原速率的基础上需要降低还原剂的成本, 因此选用铝粉添加量为 4% 进行镁还原。根据 4% 的铝粉添加量, 由反应式(2)计算出铝对氧化镁的理论还原率为 34.7%, 比较实验结果可得, 在混合还原剂还原镁过程中, 有较多的硅铁参与了氧化镁的还原。

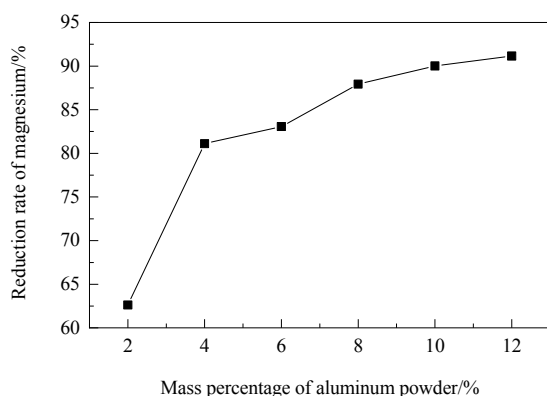


图3 镁还原率与铝粉含量之间的关系

Fig.3 Relationship between magnesium reduction rate and aluminum powder content

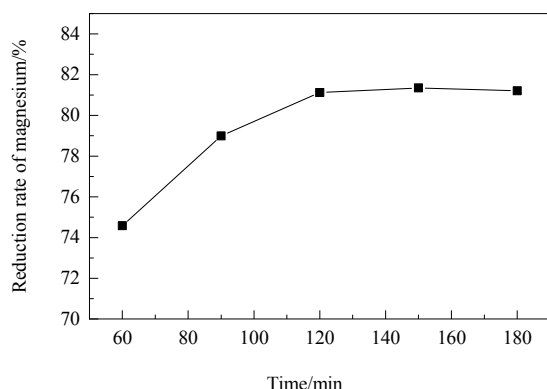


图4 镁还原率与还原时间之间的关系

Fig.4 Relationship between magnesium reduction rate and reduction time

#### 4.1.2 还原时间对镁还原率的影响

物料配比: 煅白+硅铁+铝粉(质量)=84%+12%+4%, 起始真空度 10 Pa, 加热温度 1000 °C, 保温不同时间, 镁的还原结果见图 4。由图 4 可得, 镁还原率在保温 2 h 后, 还原率趋于平稳, 可认为在所选实验条件下经 2 h 保温, 还原反应已达到平衡。

#### 4.1.3 还原温度对镁还原率的影响

物料配比: 煅白+硅铁+铝粉(质量)=84%+12%+4%, 起始真空度 10 Pa, 加热温度升高至设定温度时, 保温 2 h。还原温度与镁还原率之间的关系见图 5。由图 5 可得, 镁的还原率随温度升高而增加。特别是在铝与硅铁理论起始还原温度 716, 909 及 1156 °C 附近, 镁的还原率均有较明显变化, 分别见图 5 中 A, B, C 点。在 700~850 °C 之间, 镁的还原率升高较快, 在 850 °C 时, 镁的还原率远高于铝理论还原的镁量(34.7%), 表明硅铁在此温度范围内已参与了氧化镁的还原。单用硅铁做还原剂时, 还原镁的起始温度在 900~950 °C 之间, 镁的还原率低于 5%<sup>[14]</sup>, 而本实验结果在较低温度实现了硅铁还原氧化镁, 表明有铝添加剂时, 可以促进硅铁在较低温度下参与镁的还原。

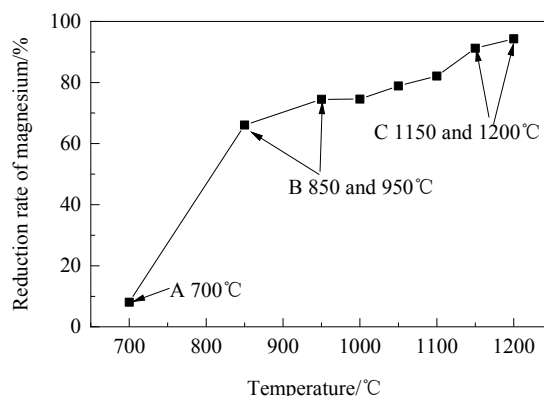


图5 镁还原率与还原温度之间的关系

Fig.5 Relationship between magnesium reduction rate and reduction temperature

#### 4.1.4 镁还原渣物相与温度之间的关系

根据还原温度对镁还原率的影响实验及热力学计算结果, 将加热温度控制在热力学反应临界温度附近, 选择加热温度分别为 700, 950, 1200 °C, 物料配比: 煅白+硅铁+铝粉(质量)=84%+12%+4%, 起始真空度 10 Pa, 将炉料压块后分别加热到设定温度保温 2 h, 保温结束后物料随炉冷却至室温, 炉渣经 X 衍射检测结果见图 6。煅白中主要物相为 MgO, Ca(OH)<sub>2</sub>, Mg(OH)<sub>2</sub>, CaCO<sub>3</sub>(图 2)。煅白与硅铁, 铝粉混合物经 700 °C 真空加

热后, 炉渣中主要物相有  $\text{Al}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_3\text{FeSi}_2$ ,  $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{MgAlO}_4$  和  $\text{Si}$ 。950℃加热时炉渣中的主要物相为  $\text{Si}$ ,  $\text{FeSi}_2$ ,  $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ ,  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ,  $\text{SiC}$ 。1200℃加热时炉渣中主要物相为  $\text{Si}$ ,  $\text{FeSi}_2$ ,  $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ 。

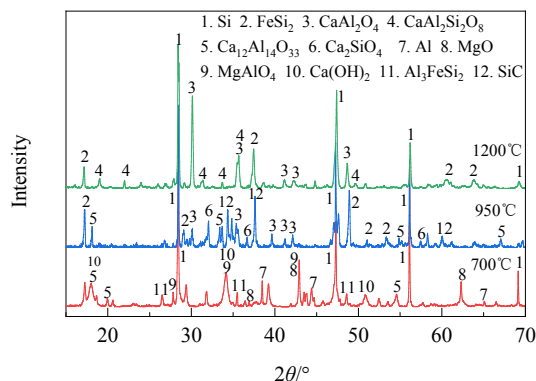


图 6 不同温度下真空还原煅白所得炉渣的 XRD 衍射图

Fig.6 XRD diffraction patterns of slag from vacuum reduction calcination at different temperatures

#### 4.1.5 铝与硅铁在真空加热过程中的相转变

为了区分还原过程与纯金属相变之间的差异, 对铝与硅铁在不同温度时的相转变进行了研究。根据还原过程原料配比: 煅白+硅铁+铝粉(质量)=84%+12%+4%, 去掉煅白后铝与硅铁混合物的配比为硅铁+铝粉=12%+4%, 折算为两者的混合物则硅铁与铝粉的配比(质量)为 75%+25%, 对此混合物压块进行真空加热保温 2 h, 对加热产物进行 XRD 检测, 检测结果见图 7。由图 7 可得, 铝粉与硅铁混合物在升温过程中, 700℃加热产物中主要物相为  $\text{Al}$ ,  $\text{Al}_3\text{FeSi}_2$  和  $\text{Si}$ , 950℃时物相为  $\text{Si}$  和  $\text{Al}_3\text{FeSi}_2$ , 1200℃时物相为  $\text{Si}$ ,  $\text{Fe}_3\text{Si}$  和  $\text{Al}_3\text{FeSi}_2$ 。

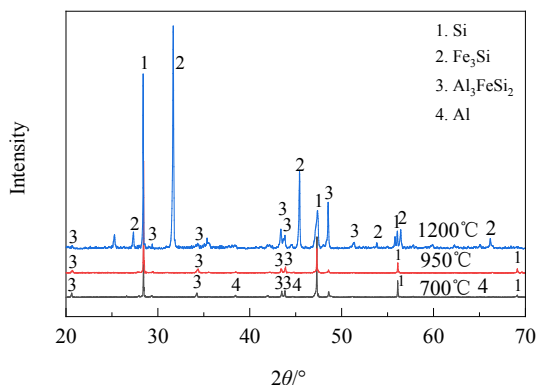


图 7 不同温度下铝硅铁混合物加热产物的 XRD 衍射图

Fig.7 XRD diffraction patterns of heating products of Al, Si, Fe mixture at different temperatures

## 4.2 铝在镁还原过程中的转变规律

由图 6 可知, 在 700℃时还原产物中的主要物相为  $\text{Al}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_3\text{FeSi}_2$ ,  $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{MgAlO}_4$  和  $\text{Si}$ ,

结合图 7 中 700℃铝与硅铁加热产物的物相可得, 铝参与了煅白中  $\text{MgO}$  还原, 并且起始还原温度低于理论起始反应温度(低于 700℃), 实际的起始反应温度较理论起始反应温度低的原因是铝还原氧化镁所生成的还原产物  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与煅白中的  $\text{MgO}$  和  $\text{CaO}$  分别生成了  $\text{MgAlO}_4$  和  $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$  更稳定的化合物, 从而降低了反应温度。铝在低温下因还原反应速度较慢, 在还原  $\text{MgO}$  的同时, 有部分铝与硅铁形成了  $\text{Al}_3\text{FeSi}_2$ 。75#硅铁中的主要物相为  $\text{FeSi}_2$  和  $\text{Si}$ <sup>[14]</sup>, 液态的铝在与硅铁接触过程中熔入  $\text{FeSi}_2$  相中, 生成富铝相<sup>[16]</sup>。

950℃加热时炉渣中的主要物相为  $\text{Si}$ ,  $\text{FeSi}_2$ ,  $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ ,  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ,  $\text{SiC}$ , 其中的  $\text{Al}_3\text{FeSi}_2$  相和  $\text{MgAlO}_4$  相消失, 同时生成了  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  相, 表明随加热温度升高, 铝全部参与了氧化镁的还原, 并且将  $\text{MgAlO}_4$  相中的  $\text{MgO}$  也实现了还原, 氧化铝转变为较稳定的  $\text{CaAl}_2\text{O}_4$  和  $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$  相。  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  相的出现, 表明有硅参与了  $\text{MgO}$  的还原, 结合图 7 中 950℃时混合物的物相可知, 参与  $\text{MgO}$  还原的硅是  $\text{Al}_3\text{FeSi}_2$  相中的硅, 表明铝的存在能降低硅还原  $\text{MgO}$  的起始反应温度。由图 6 中 1200℃加热时炉渣中主要物相为  $\text{Si}$ ,  $\text{FeSi}_2$ ,  $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  可知, 铝被氧化后的产物  $\text{Al}_2\text{O}_3$  在高温时与  $\text{CaO}$  及  $\text{SiO}_2$  结合生成  $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ 。

## 4.3 硅在铝参与还原过程时的转变规律

在 700℃铝与硅铁混合物还原氧化镁时, 硅及  $\text{FeSi}_2$  均不参与  $\text{MgO}$  的还原, 硅铁中的  $\text{FeSi}_2$  相与  $\text{Al}$  形成  $\text{Al}_3\text{FeSi}_2$ 。在 950℃还原时, 硅铁中  $\text{FeSi}_2$  相中硅首先转变为  $\text{Al}_3\text{FeSi}_2$ , 而后参与  $\text{MgO}$  的还原, 还原产生的  $\text{SiO}_2$  与煅白中的  $\text{CaO}$  形成  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ 。由图 7 中 1200℃时铝与硅铁混合物的物相与图 6 中 1200℃加热时炉渣的 XRD 谱比较可得, 有铝存在时, 硅铁中的  $\text{FeSi}_2$  相倾向于形成  $\text{Al}_3\text{FeSi}_2$ , 高温时硅铁中以  $\text{Si}$  存在的相与  $\text{Fe}$  形成了  $\text{Fe}_3\text{Si}$ , 而在煅白还原过程中由于  $\text{Al}$  单独参与  $\text{MgO}$  还原及部分形成的  $\text{Al}_3\text{FeSi}_2$  进行  $\text{MgO}$  还原,  $\text{FeSi}_2$  还原  $\text{MgO}$  的反应温度较高, 在 950℃时未参与反应。在 1200℃时, 由于铝已全部参与  $\text{MgO}$  还原, 所以  $\text{Al}_3\text{FeSi}_2$  相消失, 因此在该温度下进行的是  $\text{Si}$  及  $\text{FeSi}_2$  相还原  $\text{MgO}$ 。

## 5 结 论

通过对铝与硅铁混合物还原煅白中氧化镁的理论

及实验研究, 分析比较了煅白还原渣及铝硅铁混合物在不同温度加热后物料的物相, 得到以下结论:

(1) 铝参与皮江法还原镁, 可降低硅铁中硅的起始还原反应温度, 在低温阶段铝对镁的还原效果较明显。

(2) 铝在镁还原过程中的历程包括两方面, 一方面是铝直接还原煅白中的  $\text{MgO}$ ; 另一方面是铝与硅铁形成  $\text{Al}_3\text{FeSi}_2$  相参与氧化镁还原。

(3) 有铝参与硅铁还原镁时, 在低温( $950^\circ\text{C}$ )时硅铁与铝形成  $\text{Al}_3\text{FeSi}_2$  相参与氧化镁还原, 降低了硅铁还原镁的反应温度, 在高温( $1200^\circ\text{C}$ )时以  $\text{Si}$  与  $\text{FeSi}_2$  进行镁还原。混合还原剂生成的还原渣中  $\text{SiO}_2$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  形成  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ 。

## 参考文献

- [1] 杨沛霄, 刘金辉, 王一飞, 等. 硅热法镁冶炼料球导热系数研究 [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 silicothermic process [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019, (12): 17–22.
- [2] 董书恒, 逯承鹏, 邢冉, 等. 中国镁产业生态系统物质流与价值流的生命周期分析 [J]. 中国环境管理, 2019, 11(6): 50–56.  
Dong S H, Lu C P, Xing R, et al. Life cycle analysis on material and value flows of magnesium industry ecosystem in China [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2019, 11(6): 50–56.
- [3] 尤晶, 王耀武, 冯乃祥. 新法真空铝热还原炼镁的研究 [J]. 真空科学与技术学报, 2012, (4): 312–317.  
You J, Wang Y W, Fen N X. Magnesium production by aluminothermic reduction in vacuum [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2012, (4): 312–317.
- [4] Bugdayci M A, Turan M, Alkan O, et al. Effect of reductant type on the metallothermic magnesium production process [J]. High Temperature Materials and Processes, 2018, 37(1): 1–8.
- [5] Li R B, Zhang S J, Guo L J, et al. Numerical study of magnesium (Mg) production by the Pidgeon process: impact of heat transfer on Mg reduction process [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 59: 328–337.
- [6] 毕信鹏, 赵俊学, 李红伟, 等. 从金属镁厂热平衡来看硅热法炼镁节能方向 [J]. 甘肃冶金, 2012, (2): 22–24, 33.  
Bi X P, Zhao J X, Li H W, et al. Discussion on energy saving in magnesium production based on thermal-balance [J]. Gansu Metallurgy, 2012, (2): 22–24, 33.
- [7] 尤晶, 王耀武, 邓信忠, 等. 以铝铁合金为还原剂的真空热还原炼镁实验研究 [J]. 真空科学与技术学报, 2016, (4): 436–441.  
You J, Wang Y W, Zheng X Z, et al. Magnesium extraction from calcined dolomite by vacuum thermal reduction with solid–waste of Al–Fe alloy [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2016, (4): 436–441.
- [8] Fu D X, Yao W W, Peng J J, et al. Mechanism of extracting magnesium from mixture of calcined magnesite and calcined dolomite by vacuum aluminothermic reduction [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, (3): 839–847.
- [9] 胡文鑫, 刘建, 冯乃祥, 等. Al–Si–Fe 合金真空热法炼镁过程动力学 [J]. 过程工程学报, 2010, 10(1): 127–132.  
Hu W X, Liu J, Feng N X, et al. Vacuum thermal reduction kinetics of calcined dolomite with Al–Si–Fe alloy [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2010, 10(1): 127–132.
- [10] Fu D, Zhang T A, Dou Z, et al. A new energy-efficient and environmentally friendly process to produce magnesium [J]. Taylor & Francis, 2017, 56(4): 418–425.
- [11] Wang Y W, Zhao K, Peng J P, et al. Process of producing magnesium by thermal vacuum reduction using silicocalcium as reductant [J]. Rare Metals, 2016, 35(7): 571–575.
- [12] 张超, 付瑾. 硅热法炼镁动力学的数学模型分析及数值模拟 [J]. 化工进展, 2019, 38(9): 4155–4163.  
Zhang C, Fu J. Analysis of the kinetic models of the silicothermic reduction process and their numerical simulation [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(9): 4155–4163.
- [13] 徐祥斌, 曹慧君, 徐佳. 镁渣热容的理论计算及实验测定 [J]. 有色金属工程, 2018, 8(5): 31–33.  
Xu X B, Cao H J, Xu J. Theoretical calculation and experimental determination of heat capacity of magnesium slag [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2018, 8(5): 31–33.
- [14] 尤晶, 王耀武. 皮江法炼镁还原机理 [J]. 过程工程学报, 2019, 19(3): 560–566.  
Jing Y, Wang Y W. Reduction mechanism of Pidgeon process of magnesium metal [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2019, 19(3): 560–566.
- [15] 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.  
Liu Z Q, Liu J X, Jiang B, et al. Process for preparing magnesium from dolomite by vacuum aluminothermic reduction [J]. Nonferrous Metals, 2010, (2): 56–58.
- [16] 喇培清, 王小翠, 李贤明, 等. 铝热反应合成法制备  $\beta\text{-FeSi}_2$  及 Al 元素对其相变的影响 [J]. 粉末冶金技术, 2015, 33(6): 417–425.  
La P Q, Wang X C, Li X M, et al. Effect of Al content on phase transition of  $\beta\text{-FeSi}_2$  prepared by aluminothermic reaction [J]. Powder Metallurgy Technology, 2015, 33(6): 417–425.