

研究论文

碳化钙真空还原硼镁石提取镁

王耀武, 彭建平, 李应龙, 赵坤, 宋阳, 冯乃祥

(东北大学材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 对以硼镁石为原料, 以碳化钙为还原剂的真空热还原炼镁以实现硼镁分离进行了研究, 通过对煅烧后的物料进行物相分析, 对碳化钙还原硼镁石过程中氧化镁还原率较低的原因进行了分析, 并对还原过程中影响氧化镁还原率的因素进行了探讨。研究结果表明: 以硼镁石为原料进行煅烧后获得的煅后硼镁石的氧化镁主要以硼酸镁和硅酸镁化合物的形式存在, 游离的氧化镁较少是导致还原过程中氧化镁还原率较低的主要原因。在煅烧过程中添加氧化钙可使以化合物形式存在的氧化镁游离出来大幅增加氧化镁的还原率。在煅烧过程中配入氧化钙后进行真空热还原炼镁可有效实现硼镁石中的硼镁分离, 其还原过程中的氧化镁还原率可达 85% 以上, 还原后获得的还原渣主要物相为 CaO 和 $3\text{CaO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$, 可作为生产无碱玻璃纤维的原料, 能够实现硼镁石的综合利用。

关键词: 分离; 硼镁石; 还原; 镁; 相变

DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2014.06.025

中图分类号: TF 131.1

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2014) 06—2130—07

Extracting magnesium from ascharite by vacuum thermal reduction using calcium carbide as reductant

WANG Yaowu, PENG Jianping, LI Yinglong, ZHAO Kun, SONG Yang, FENG Naixiang

(School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, Liaoning, China)

Abstract: A method separating magnesium and boron from ascharite by vacuum thermal reduction using calcium carbide as reductant was studied experimentally. The reason that led to low reduction ratio of MgO in the vacuum thermal reduction process was researched by phase analysis of calcined ascharite and the influencing factors were analyzed. The results show that magnesium in the calcined ascharite is mainly involved in magnesium borate and magnesium silicate, reduction of which is difficult and only small amount is free state of MgO , which is the main cause of low reduction ratio. The addition of CaO during calcination of ascharite can promote formation of more free state MgO and reduction of more MgO . As long as enough CaO is added, magnesium and boron can be effectively separated and reduction rate can be over 85%. The main phases in reduction slag are CaO and $3\text{CaO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$. The reduction slag can be used as raw material for production of alkali free glass fiber. So the comprehensive utilization of ascharite ore can be realized.

Key words: separation; ascharite ore; reduction; magnesium; phase change

引 言

我国是硼资源大国, 硼资源储量居世界第 4 位,

主要分布在辽宁、吉林以及青海和西藏等地^[1]。自 20 世纪 50 年代我国最早的硼工业开始, 辽宁和吉林地区的硼镁石就一直是我国硼工业的主要利用对

2013-08-11 收到初稿, 2014-01-28 收到修改稿。

联系人及第一作者: 王耀武 (1980—), 男, 博士, 讲师。

基金项目: 辽宁省镁质材料行业高新技术研发项目(MYF2011-34);

辽宁省工业攻关项目(2011221002)。

Received date: 2013-08-11.

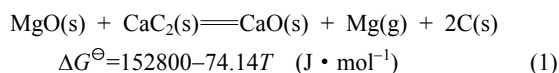
Corresponding author: WANG Yaowu, wangyw113@163.com

象。近年来随着工业的发展, 硼镁石的开采利用量也迅速扩大, 硼资源储量不断减少, 其品位也一降再降, 这已成为制约硼工业发展的主要问题之一^[2]。目前, 辽宁地区的硼镁石主要用于碳碱法生产硼砂。在以硼镁石为原料碳碱法生产硼砂的过程中, 由于矿石中镁含量较高严重影响了硼的提取率, 使该工艺对硼的提取率不到 75%, 提取后除产生硼砂外还产生大量污染严重的碱性硼泥。硼泥的产生不仅造成大量硼资源的浪费, 而且严重污染了当地的环境, 已成为制约硼工业发展的另一个主要问题^[3-4]。

碳碱法生产的硼砂中很大一部分被用于生产无碱玻璃纤维。无碱玻璃纤维是一种性能优异的无机非金属材料, 通常作为复合材料中的增强材料, 电绝缘材料和绝热保温材料, 电路基板等, 广泛应用于国民经济各个领域^[5-7]。无碱玻璃纤维也可以以天然矿石或含硼物料为原料, 按设计的配方进行配比后制取^[8-9], 但由于硼镁石中氧化镁含量过高(氧化镁含量 40%以上), 制取无碱玻璃纤维过程中添加量稀少, 一般不作为制取无碱玻璃纤维的原料。如果以硼镁石为原料先进行热还原炼镁实现硼镁分离, 然后以炼镁还原渣为原料配料制取无碱玻璃纤维, 则不仅可实现硼镁石资源的综合利用, 而且无任何废渣产生^[10]。

武小雷等^[11]对以硼镁石为原料以硅粉为还原剂的真空热还原炼镁过程进行了研究, 但由于还原过程中生成低熔点的 $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 等多元化合物造成氧化镁还原率低, 难以实现硼镁的有效分离。徐冬等^[12]对以硅铝合金为还原剂还原硼镁石进行硼镁分离进行了研究, 同样由于氧化镁还原率低没有达到硼镁的有效分离。彭建平等^[13]以铝粉为还原剂进行还原实现了硼镁石中硼镁的有效分离, 但由于铝粉价格较高阻碍了该方法的进一步应用。

以碳化钙为还原剂进行还原[式(1)], 还原后高温的还原渣在空气中放置即可将还原过程中产生的碳和未反应的碳化钙中的碳燃烧去除, 所获得的还原渣可直接作为制取无碱玻璃纤维的原料。但 Wu 等^[14-15]的实验结果表明, 以碳化钙为还原剂还原过程中的氧化镁还原率只有 60%左右, 同样难以实现硼镁有效分离。本文对以硼镁石为原料, 以碳化钙为还原剂的真空热还原炼镁还原率较低的原因进行了分析, 并对影响炼镁过程的主要因素进行了探讨以获得较佳的硼镁分离效果, 实现硼镁石的综合利用。



1 实验

1.1 实验原料

本实验所用的原料为产自辽宁省宽甸地区的硼镁石, 其主要化学成分见表 1, 通过物相分析(图 1)可知, 其主要物相为 $2\text{MgO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgBO}_2(\text{OH})$ 、 $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ 和 MgCO_3 等^[16]。

表 1 硼镁石的主要化学成分

Components	Ascharite
MgO	44.67
B_2O_3	26.08
SiO_2	6.18
CaO	3.19
Al_2O_3	1.43
others	18.65

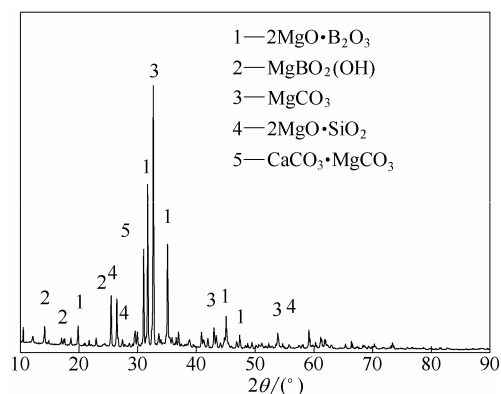


图 1 硼镁石的 X 射线衍射物相分析

Fig.1 X-ray diffraction pattern of raw ascharite ore

1.2 实验方法

还原实验前, 首先将硼镁石磨细后与氧化钙配料, 然后制团进行煅烧, 煅烧后将煅后团块磨细到粒度 0.1 mm 以下, 并与一定量的粒度为 0.074 mm 以下的碳化钙粉混合后在实验室模压机上压制成 $\Phi 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的团块, 将制取的团块放入还原炉中进行真空热还原。还原实验在一个外部加热、横放于炉内的真空管式还原罐内进行, 还原罐分还原区和结晶区, 其结构与目前工业炼镁应用的皮江法真空还原罐结构相同。还原过程中, 还原罐内的剩余压力为 4 Pa 左右, 还原后生成的金属镁在结晶器上结晶, 还原物料中的其他成分留在还原渣中从而实现硼镁分离。称取结晶器上获得的金属镁的质量 m_{Mg} , 根据还原物料中所含镁的总质量 M_{Mg} , 通

过式(2)计算还原过程中氧化镁的还原率 η_{Mg} ,通过氧化镁还原率来衡量硼镁分离情况。

$$\eta_{\text{Mg}} = \frac{m_{\text{Mg}}}{M_{\text{Mg}}} \times 100\% \quad (2)$$

2 实验结果与讨论

2.1 煅烧过程对氧化镁还原率的影响

硼镁石在进行还原前首先要进行煅烧,使硼镁石中的碳酸镁变为氧化镁。一般来说,较佳的煅烧条件就是使煅后料的烧损率最高,水化活性度最好,在此条件下获得的煅后料的氧化镁还原率最高^[17-18]。硼镁石烧损率是指煅烧前后质量减少的比率,其质量减少主要是由硼镁石中碳酸盐和 $\text{MgBO}_2(\text{OH})$ 等物相受热分解放出 CO_2 和 H_2O 所致。水化活性度测量的是煅后硼镁石中游离 MgO 、 CaO 等物相的吸水能力,在硼镁石中由于 CaO 含量很少,因此水化活性度主要表征的是 MgO 的吸水能力,水化活性度越高说明游离 MgO 越多,则其中的 MgO 越容易被还原。

煅烧过程中影响氧化镁还原率的最主要因素是煅烧温度,其次是煅烧时间。在实验室条件下,一般煅烧时间超过 60 min 后,煅后料的烧损率即可达到稳定。煅烧时间为 60 min 时,煅烧温度对煅后硼镁石烧损率和水化活性度的影响如图 2 所示。图 3 给出了煅烧温度对还原过程中氧化镁还原率的影响。

由图 2 可知,在煅烧温度低于 800°C 时,硼镁石的烧损率随着煅烧温度的升高而升高,当煅烧温度达到 800°C 以后,煅烧温度升高,硼镁石的烧损率变化不大;煅后硼镁石的水化活性度同样在 800°C 达到最大,然后随着煅烧温度的升高而下降。由

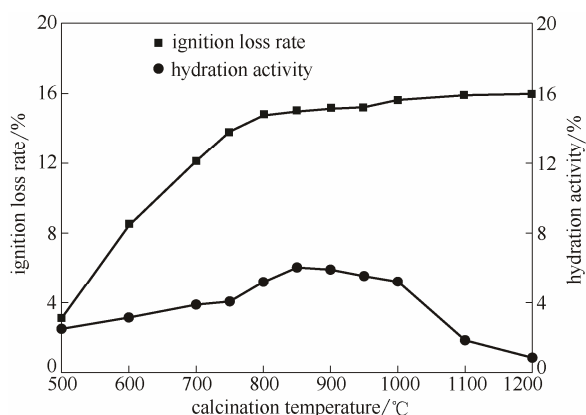


图 2 煅烧温度对煅后硼镁石烧损率和水化活性度的影响

Fig.2 Effect of calcination temperature on ignition loss rate and hydration activity

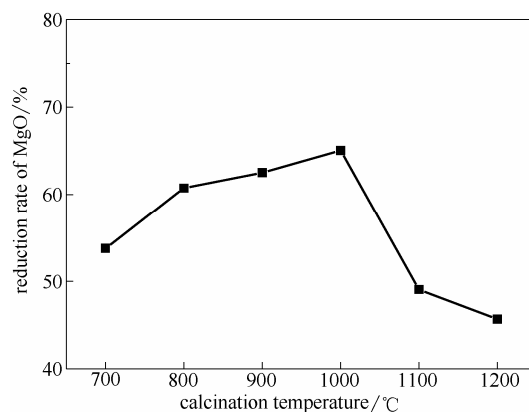


图 3 煅烧温度对还原率的影响

Fig.3 Effect of calcination temperature on reduction rate of MgO (reduction temperature 1200°C , reduction time 2 h, CaC_2 125%)

图 3 可知,煅烧温度对炼镁过程中氧化镁的还原率影响规律与其对烧损率和水化活性度的影响规律相似,在水化活性度较高的 $800\sim 1000^\circ\text{C}$ 时氧化镁的还原率最高,水化活性度降低后,其氧化镁还原率也降低。另外,以煅烧后的硼镁石为原料以碳化钙为还原剂真空热还原炼镁,还原过程的氧化镁还原率最高才到 65%,这与以白云石为原料以碳化钙为还原剂真空热还原炼镁的 $85\%\sim 90\%$ 的氧化镁还原率相去甚远。结合图 2,煅后硼镁石的水化活性度只有 4%,这与煅后硼镁石的理论水化活性度(理论值为 25%)差距也很大,这说明煅后硼镁石中的游离氧化镁很少,大部分的氧化镁是以化合物形式存在的。

由图 4 不同煅烧温度下获得的煅后硼镁石的物相分析可知,煅后硼镁石的主要物相为 MgO 、 $2\text{MgO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$ 、 $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $3\text{MgO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$ 等。在

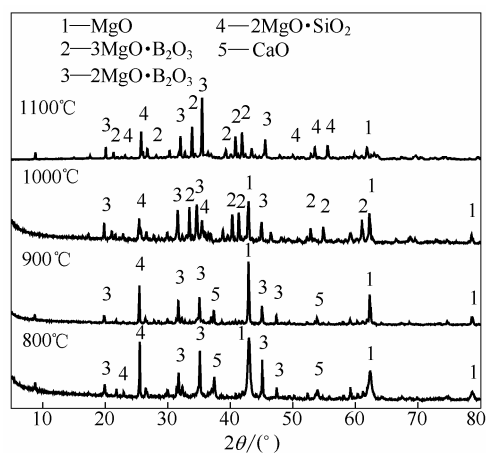
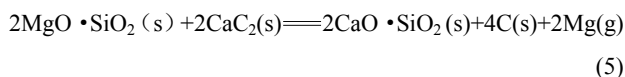
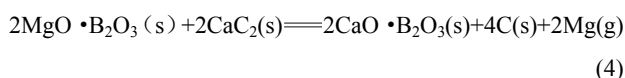
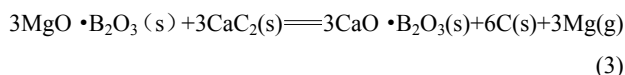


图 4 煅烧温度对煅后硼镁石物相的影响

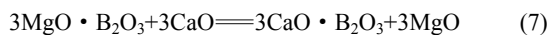
Fig.4 Effect of calcination temperature on phase of calcined ascharite

煅烧温度低于 1000℃ 时, 游离 MgO 的含量较高, 此时煅后硼镁石的活性较高, 随着煅烧温度的升高, 煅后硼镁石中游离的 MgO 与 $2\text{MgO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$ 反应生成了 $3\text{MgO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$, 硼镁石中游离的 MgO 减少, 煅后硼镁石活性降低, 还原过程的氧化镁还原率降低。由此可知, 直接将硼镁石煅烧, 煅后硼镁石中的 MgO 主要是硼酸镁和硅酸镁的形式存在, 游离 MgO 很少, 而硼酸镁和硅酸镁非常稳定, 碳化钙还原硼酸镁和硅酸镁的反应[式(3)~式(5)]温度很高, 即使在真空条件下也要高于 1300℃, 这是造成氧化镁还原率较低的主要原因。



2.2 煅烧过程中氧化钙添加量对氧化镁还原率的影响

为了使硼镁石中的硼镁实现有效分离, 必须要使还原物料中以化合物形式存在的 MgO 游离出来, 即使硼酸镁和硅酸镁分解, 这就需要在煅烧过程中添加 CaO 使氧化硼和氧化硅与 CaO 形成更加稳定的化合物, 其原理如下



因此煅烧过程中 CaO 加入量会直接影响还原物料中 MgO 的存在形式, 对 MgO 的还原率产生较大影响。图 5 为在煅烧过程中加入不同量的 CaO 后煅烧物料的物相分析, 图 6 为煅烧过程 CaO 加入量对还原过程氧化镁还原率的影响。其中加入氧化钙

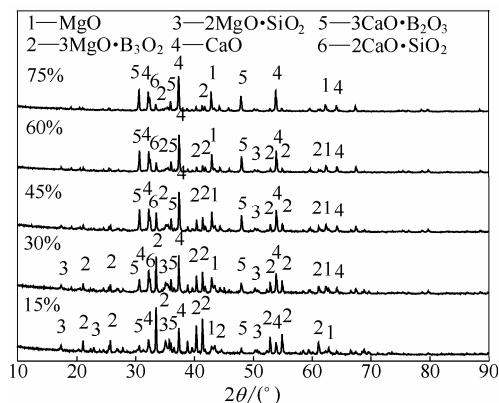


图 5 CaO 添加量对煅后料物相的影响

Fig.5 Effect of addition of CaO on phase of calcined ascharite

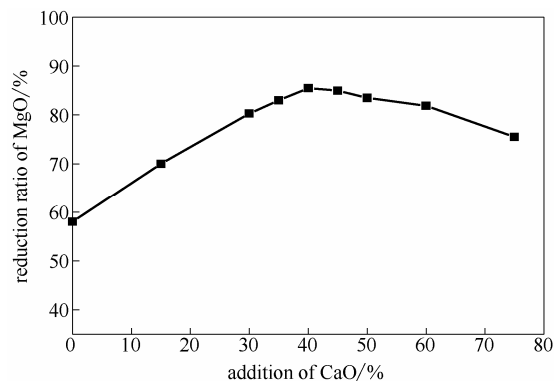


图 6 氧化钙添加量对氧化镁还原率的影响

Fig.6 Effect of addition of CaO on reduction ratio of MgO (reduction temperature 1200℃, reduction time 2 h, CaC_2 125%, CaF_2 3%)

后硼镁石的煅烧温度为 1000℃, 煅烧时间为 1.5 h。

由图 5 和图 6 可知, 随着煅烧过程中 CaO 加入量的增加, 煅烧后物料中的硼酸镁和硅酸镁逐渐分解, 氧化硼和氧化硅与氧化钙结合成为更稳定的硼酸钙和硅酸钙, 从而释放出游离的 MgO, 使还原过程中氧化镁的还原率直线上升。根据实验结果可知, 当煅烧过程中氧化钙加入量达到 30% 以上时, 氧化镁的还原率即达到了 80% 以上, 氧化钙加入量为 40% 时氧化镁的还原率达到最大, 继续增加 CaO 的加入量虽然可使硼酸镁和硅酸镁分解率继续增加, 但也降低了还原物料中 MgO 的浓度, 降低了 MgO 与碳化钙的接触概率, 造成氧化镁还原率下降。

2.3 还原条件对氧化镁还原率的影响

一般来说, 影响氧化镁还原率的主要因素是还原温度和还原时间, 还原温度越高还原时间越长, 还原过程中氧化镁的还原率越高。

由图 7 和图 8 可知, 随着还原温度的升高和还

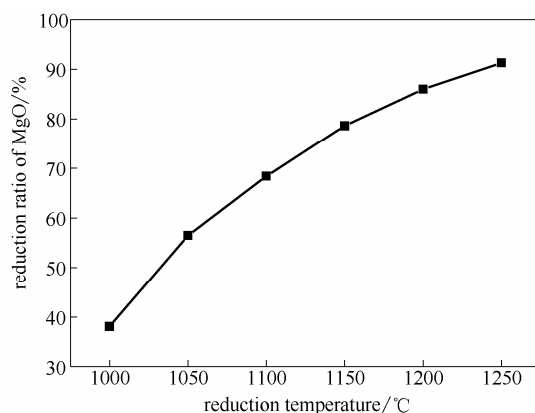


图 7 还原温度对氧化镁还原率的影响

Fig.7 Effect of reduction temperature on reduction ratio of MgO (reduction time 2 h, CaC_2 125%, CaO 40%, CaF_2 3%)

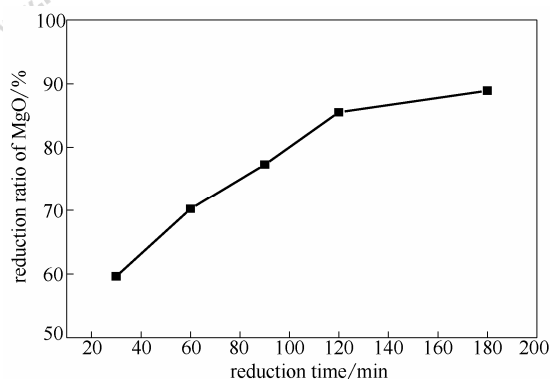


图 8 还原时间对氧化镁还原率的影响

Fig.8 Effect of reduction time on reduction ratio of MgO (reduction temperature 1200℃, CaC_2 125%, CaO 40%, CaF_2 3%)

原时间的延长, 氧化镁的还原率升高, 当还原温度为 1200℃, 还原时间为 2 h 时, 氧化镁的还原率可达到 85%以上。进一步延长时间, 氧化镁还原率升高缓慢。进一步升高温度虽然对提高氧化镁的还原率很有利, 但就目前工业炼镁的还原罐来说, 当罐壁温度超过 1230℃(物料温度约 1200~1220℃)后, 其使用寿命会大幅度降低, 得不偿失。

2.4 碳化钙添加量对氧化镁还原率的影响

碳化钙作为还原剂, 其加入量对还原过程中氧化镁的还原率影响也比较大, 碳化钙加入量越大, 其与氧化镁的接触面积越大, 越有利于还原反应的进行, 氧化镁的还原率越高。图 9 为在还原温度 1200℃, 还原时间 2 h, 氧化钙加入量 40%时, 碳化钙加入量(实际加入量与理论需要量的百分比值)对氧化镁还原率和碳化钙利用率的影响。

从图 9 可以看出, 增大碳化钙加入量可显著提高氧化镁的还原率, 当碳化钙加入量达到 50%后,

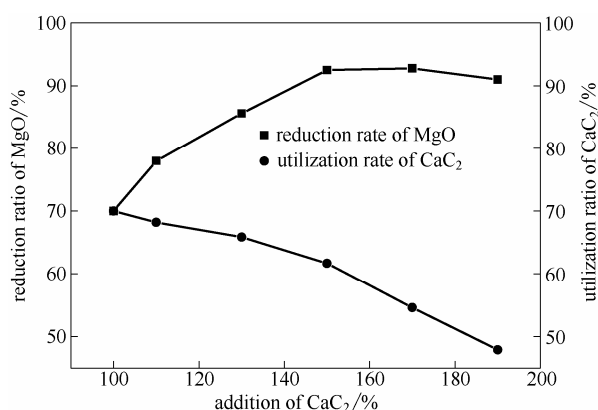


图 9 碳化钙添加量对氧化镁还原率和碳化钙利用率的影响
Fig.9 Effect of reduction time on reduction ratio of MgO and utilization ratio of CaC_2

氧化镁的还原率趋于稳定。虽然增大碳化钙的加入量可以提高氧化镁的还原率, 但是也会造成还原剂利用率降低, 增大碳化钙的消耗量, 从而增加生产成本。因此碳化钙的配入量应由所需还原渣中氧化镁的含量决定。如果需要的还原渣允许较高的氧化镁含量, 则碳化钙的配入量可降低, 反之则要提高碳化钙的配入量。

2.5 氟化钙添加量对氧化镁还原率的影响

在真空热还原炼镁的过程中, 往往向还原物料中添加少量的氟化钙作为矿化剂, 矿化剂的加入可显著提高还原反应速率, 改善还原过程氧化镁的还原率。 CaF_2 添加量对氧化镁还原率的影响如图 10 所示。

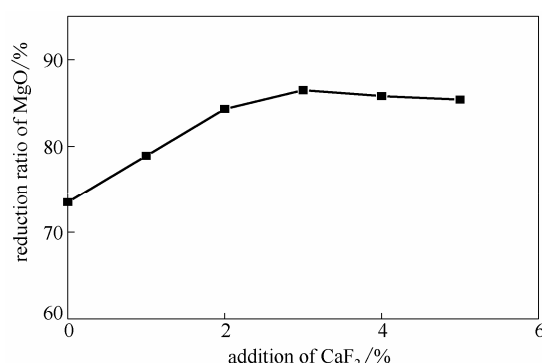
图 10 CaF_2 添加量对氧化镁还原率的影响

Fig.10 Effect of addition of CaF_2 on reduction ratio of MgO (reduction temperature 1200℃, reduction time 2 h, CaO 40%, CaC_2 125%)

由图 10 可以看出, CaF_2 是影响氧化镁还原率的另一个主要因素, CaF_2 的添加可大幅度地提高还原过程中氧化镁还原率, 添加氟化盐后, 1200℃的氧化镁还原率从未加氟盐时的 73%提高到 85%以上。尽管在煅烧过程中添加 CaO 后, 煅烧后物料中大部分的硼酸镁和硅酸镁分解释放出游离的氧化镁, 但可能还会有少量的氧化镁以化合物(硼酸镁和硅酸镁)形式存在, 在真空热还原炼镁过程中添加 CaF_2 后, CaF_2 可活化煅后产物中氧化镁和氧化钙的表面, 一方面氧化钙活性提高有利于进一步分解剩余含镁化合物释放游离氧化镁, 另一方面氧化镁活性的提高加快了还原反应的速率^[19-20], 因此氟化钙的加入使还原过程中的氧化镁还原率获得了较大的提高。但氟化钙的加入量存在一个较佳值, 当超过该值时其对还原过程影响变小。通过实验可知, 较佳的氟盐添加量为 2%~3%。

2.6 还原渣的物相分析

对 1200℃温度下还原 2 h, CaO 加入量为 40%,

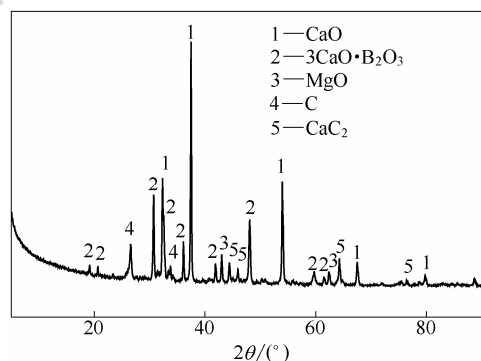


图 11 炼镁还原渣的 X 射线衍射光谱

Fig.11 XRD pattern of reduction slag

碳化钙加入量为 125% 的还原渣进行 X 射线衍射物相分析 (XRD), 其结果如图 11 所示。

由图 11 可以看出, 还原渣的主要成分是 CaO 和 $3\text{CaO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$, 另外含有少量的 MgO 、C 和 CaC_2 。该还原渣经低温煅烧后, C 燃烧挥发, CaC_2 燃烧变为 CaO , 煅烧后还原渣经配料调整成分后可直接用于生产无碱玻璃纤维。

3 讨论

以硼镁石为原料, 以碳化钙为还原剂真空热还原可实现硼镁石中硼和镁的有效分离, 镁的提取效率可达 90% 以上, 热还原提镁后的还原渣可作为生产无碱玻璃纤维的原料直接参与配料。直接采用硼镁石为原料进行配料生产无碱玻璃纤维也可以, 但由于其氧化镁含量过高导致其应用量不足 10%, 先还原后再配料生产无碱玻璃纤维可提高还原渣的配入量, 实现硼镁石的综合利用。但真空热还原过程中并不是氧化镁还原率越高越好。通过上述的实验可知, 氧化镁还原率高意味着氧化钙的配入量大, 碳化钙的添加量高, 这不仅增加了热还原过程的能耗和成本, 而且会稀释还原渣中氧化硼的浓度, 增加还原渣中氧化钙的含量, 降低还原渣在生产无碱玻璃纤维原料中的配入量。因此实际生产中应根据生产的无碱玻璃纤维的成分确定还原渣中氧化镁允许的最高含量, 进而确定 CaO 和碳化钙的加入量^[21], 以实现硼镁石应用效益的最大化。

4 结论

(1) 直接以硼镁石为原料进行煅烧后获得的煅后料中的氧化镁主要以硼酸镁和硅酸镁化合物的形式存在, 游离的氧化镁较少, 这是导致还原过程中氧化镁还原率较低的主要原因, 在煅烧过程中增加

氧化钙的配入量可使以化合物形式存在的氧化镁游离出来大幅增加氧化镁的还原率。

(2) 以硼镁石为原料, 以碳化钙为还原剂进行真空热还原炼镁可有效实现硼镁石中的硼镁分离, 其还原过程中的氧化镁还原率可达 85% 以上。还原后获得的还原渣主要物相为 CaO 和 $3\text{CaO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$, 可作为生产无碱玻璃纤维的原料。

References

- [1] Liu Ran(刘然), Xue Xiangxin(薛向欣), Liu Xin(刘欣), Wang Dongshan(王东山), Zha Feng(查峰). Progress on Chinese boron resource and the current situation of boron-bearing materials [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*(硅酸盐通报), 2006, **25**(6): 102-106
- [2] Qian Hongwei(钱洪伟), Xue Xiangxin(薛向欣), An Jing(安静). Status and prospect of key process technology in boron resource exploitation process [J]. *Modern Chemical Industry*(现代化工), 2008, **28**(4): 28-32
- [3] Chen Yanwen(陈彦文), Ding Xiangqun(丁向群), Hu Yingze(胡英泽). Experimental study on optimizing the preparation process of boron sludge ceramics [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*(硅酸盐通报), 2012, **31**(1): 193-196
- [4] Guo Dayu(郭大字). Fabrication of porous forsterite ceramics using boron tailings as raw material [J]. *China Ceramic Industry*(中国陶瓷工业), 2013, **20**(2):1-5
- [5] Meng Zhang, Jukka Pekka Matinlinna. E-glass fiber reinforced composites in dental applications [J]. *Silicon*, 2012(4): 73-78
- [6] Kudryavtsev M Yu, Kolesov Yu I, Mikhailenko N Yu. Boron-free, alkali-free glass fibre for production of fibreglass-reinforced plastics [J]. *Fibre Chemistry*, 2001, **33**(3): 242-246
- [7] Kolesov Yu I, Kudryavtsev M Yu, Mikhailenko N Yu. Types and compositions of glass for production of continuous glass fiber (review) [J]. *Glass and Ceramics*, 2001, **58**(5): 197-202
- [8] Yaping Liu, Manabu Tanaka, Sooseok Choi, Takayuki Watanabe. In-flight particle measurement of alkali-free glass raw materials in 12-phase AC arc plasma [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2012, **21**(5): 863-867
- [9] Antonin Smrček. *Fiberglass and Glass Technology*[M]. New York: Springer, 2010: 229-250
- [10] Wu Xiaolei(武小雷). Study of separation magnesium and boron from szaibelyite mineral and boron mud by vacuum thermal process[D]. Shenyang: Northeastern University of China, 2012: 55-70
- [11] Wu Xiaolei(武小雷), Feng Naixiang(冯乃祥), Peng Jianping(彭建平), Wang Zhihui(王智慧), Cheng Enqing(程恩庆). Experimental study on vacuum thermal reduction of ascharite mineral with silicon as reductant [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*(过程工程学报), 2011, **11**(2):294-298
- [12] Xu Dong(徐冬), Zhang Xianpeng(张显鹏), Li Gang(李刚), Cheng Enqing(程恩庆). Experimental investigation on vacuum-thermal reduction of ascharite with silicon-aluminum alloy as reductant [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*(东北大学学报: 自然科学版), 2008, **29**(10): 1455-1460
- [13] Peng Jianping(彭建平), Feng Naixiang(冯乃祥), Wu Xiaolei(武小雷), Zhou Shigang(周时刚), Di Yuezhong(狄跃忠). Experiments study on

- magnesium extracted from ascharite by aluminothermic method [J]. *Lightmetals*(轻金属), 2012(1): 49-53
- [14] Peng Jianping, Wu Xiaolei, Feng Naixiang, *et al.* Experimental study on vacuum thermal reduction of ascharite mineral with calcium carbide as reductant//Vacuum Technology and Surface Engineering - Proceeding of the 10th Vacuum Metallurgy and Surface Engineering Conference[C]. Shenyang: 2011:8-12
- [15] Xu Dong, Zhang Xianpeng, Li Gang, Cheng Enqing, Shi Chunhui. Research on vacuum thermal reduction of ascharite with calcium carbide as reductant [J]. *Ming & Metallurgy*(矿冶), 2008, **17**(2): 39-43
- [16] Wörterbuch GeoTechnik. Dictionary Geotechnical Engineering[M]. New York: Springer, 2013:106
- [17] Minic D, Manasijevic D, Dokic Jelena, *et al.* Silicothermic reduction process in magnesium production [J]. *Journal of Thermal Analysisi and Calorimetry*, 2008(2): 411-415
- [18] Francesco Cherubini, Marco Raugei, Sergio Ulgiati. LCA of magnesium production technological overview and worldwide estimation of environmental burdens [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2008, **52**: 1093-1100
- [19] Hu Wenxin(胡文鑫), Liu Jian(刘建), Feng Naixiang(冯乃祥), Peng Jianping(彭建平). The effect of villiaumite on magnesium production by Al - Si - Fe alloy thermal reduction of dolime [J]. *Lightmetals*(轻金属), 2010(5): 42-45
- [20] Wang Yaowu(王耀武), Feng Naixiang(冯乃祥), You Jing(尤晶), Hu Wenxin(胡文鑫). Study on the effect of CaF₂ addition on the process of vacuum aluminothermic reduction [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*(真空科学与技术学报), 2012, **32**(10): 889-905
- [21] Frederick T Wallenberger. Fiberglass and Glass Technology[M]. New York: Springer, 2010:1-107