文章编号: 1004-0609(2014)11-2943-08

# 富硼渣硫酸法制取硼酸和一水硫酸镁

李杰<sup>1</sup>, 郭学东<sup>1</sup>, 光明<sup>1</sup>, 姜涛<sup>2</sup>

(1. 内蒙古工业大学 材料科学与工程学院,呼和浩特 010051;2. 东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110004)

摘 要:采用富硼渣硫酸法处理富硼渣,通过单因素试验和正交试验确定了富硼渣硫酸浸出的最佳试验条件。针对硫酸浸出液开发了先高温结晶制取一水硫酸镁再低温结晶制备硼酸工艺。结果表明:浸出温度为 99 ℃,酸用量为理论用量的 95%,浸出液固比为 6:1,浸出时间为 90 min 时,B 浸出率为 98.76%,Mg 浸出率达到 74.32%。
 通过灰色关联分析理论对 Mg 的浸出率进行预测,预测值为 75.06%,预测结果和实验结果具有较好的一致性。制得的一水硫酸镁纯度为 95.42%,硼酸的纯度达到 99.27%。
 关键词:富硼渣;硫酸浸出;硼酸;一水硫酸镁;浸出率
 中图分类号:TD 985 文献标志码:A

# Preparation of boric acid and magnesium sulfate monohydrate from boron-rich slag by sulfuric acid leaching method

LI Jie<sup>1</sup>, GUO Xue-dong<sup>1</sup>, GUANG Ming<sup>1</sup>, JIANG Tao<sup>2</sup>

School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;
 School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** The sulfuric acid was used to decomposing boron-rich slag. The best test conditions of the boron-rich slag sulfuric acid leaching were determined by single factor and orthogonal experiments. The high temperature crystallization preparation of magnesium sulfate monohydrate and low temperature crystallization preparation boric acid were developed by sulfuric acid leaching solution. The results show that the optimum parameters are leaching temperature of 99 °C, the sulfuric acid theoretical of 95% dosage, leaching time of 90 min and leaching liquid to solid ratio of 6:1. Under these conditions, the leaching rates of B and Mg are 98.76% and 74.32%, respectively. The leaching rate of Mg predicted by gray relational theory and the predictive value is 75.06%. A good agreement between the actual and predicted results is obtained. The purity of magnesium sulfate monohydrate and boric acid obtained by this method are 95.42% and 99.27%, respectively.

Key words: B-rich slag; sulfuric acid leaching; boric acid; magnesium sulfate monohydrate; leaching rate

我国是世界上硼资源较丰富的国家之一,除青海、 西藏等地的天然硼砂之外,58%的硼资源集中在辽宁 省,以硼铁矿的形式存在<sup>[1-3]</sup>。目前,我国用来生产硼 砂和硼酸的原料主要是硼镁矿,但经多年开采,硼镁 矿储量日趋减少。硼铁矿火法分离工艺技术是具有我 国自主知识产权的核心关键技术,硼铁矿火法分离后 得到合格的含硼生铁和富硼渣两种重要产品,使有价 元素 B 和 Fe 得到了充分的分离<sup>[4-6]</sup>。目前,含硼生铁 已成功应用于生产硼铸铁汽缸套及耐磨衬板和磨球 等<sup>[7-9]</sup>。现阶段正在进行含硼生铁直接冶炼硼钢的实验 研究工作,并取得初步研究成果。但是,富硼渣中硼 的利用还是一个急需解决的问题。如果富硼渣中硼的

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51374052); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2012MS0604)

收稿日期: 2014-03-21; 修订日期: 2014-09-10

通信作者: 李 杰, 副教授, 博士; 电话: 0471-6577297; E-mail: 42069084@qq.com

利用问题能够彻底解决,那么硼铁矿经火法分离所得 的含硼生铁和富硼渣都是可利用资源,整个硼铁矿火 法分离工艺技术路线贯通,为硼铁矿中硼的利用打开 新的局面。因此,富硼渣中硼的利用问题是硼铁矿火 法分离工艺技术能否贯通的关键问题。目前,对于富 硼渣中硼的利用有两种思路:1)将富硼渣进行整体利 用;2)将富硼渣中的B提取出来再进行利用。采用富 硼渣制备陶瓷材料是目前见于报道的富硼渣整体利用 方法。这一方法借鉴现有 Sialon 材料的制备方法和技 术,将富硼渣中 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO 和 MgO 经碳热还 原氮化法合成先进结构陶瓷 α'-Sialon,实现富硼渣多 组分整体转型,制备具有富硼渣资源特点的含硼复合 材料<sup>[10-12]</sup>,此类研究目前处于起步研究阶段。

富硼渣的第二种利用思路是对富硼渣中的B进行 提取利用。目前,研究人员主要提出了3种富硼渣提 B方法:富硼渣碳碱法<sup>[13]</sup>、富硼渣硫酸法以及富硼渣 熔态钠化-热处理-加压水浸法<sup>[14]</sup>。本研究中富硼渣硫 酸法来提取渣中的B和Mg。富硼渣硫酸法<sup>[15-17]</sup>是用 硫酸酸解富硼渣的湿法提B方法,富硼渣中遂安石相 (2MgO·B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)和镁橄榄石相(2MgO·SiO<sub>2</sub>)与硫酸反应生 成硼酸和硫酸镁,渣中的有价B、Mg资源转移到溶 液中,再对溶液中的B、Mg分别提取。硫酸法对富 硼渣的活性要求低,目前生产的富硼渣用硫酸浸出, B的浸出率可达90%以上,这为获得较高的B的回收 率创造了条件。另外,目前以硼镁矿为原料,用硫酸 法来生产硼酸的企业有很多,这也为富硼渣硫酸法提 B提供了现实基础。

本文作者采用富硼渣硫酸法提取渣中的 B、Mg, 工艺上采用先提 Mg 后提 B 的方式,与传统的先提 B 再提 Mg 的工艺不同。主要是考虑到反应后的溶液经 过除 Fe、Al 步骤后,滤液温度在 60~80 ℃,趁热直 接进入高压釜先高温结晶提 Mg,可充分利用热溶液, 节约能源,提 Mg 后剩余母液再低温结晶硼酸。最终 滤液可打入富硼渣酸解工序,滤液中的硼酸和硫酸镁 可进行重复回收。

# 1 实验

# 1.1 实验原料

实验所用富硼渣取自营口广大实业有限公司,是 硼铁矿石经高炉进行硼铁分离后得到的富硼渣。富硼 渣的主要化学成分(质量分数)见表1。

# 表1 富硼渣的主要化学成分

**Table 1**Main chemical composition of boron-rich slag (massfraction, %)

$B_2O_3$	MgO	$SiO_2$	CaO	$Al_2O_3$
11.91	34.45	26.76	14.82	7.22
S	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		FeO	Others
0.67	2.14		1.16	0.87

#### 1.2 实验方法

将一定量的富硼渣粉末放入三口烧瓶中,向烧瓶 中加入相应液固比的去离子水,将烧瓶放入恒温水浴 锅内,烧瓶上安装回流、搅拌装置。恒温水浴锅加热 到指定温度后,在搅拌的条件下向烧瓶内滴加浓硫酸, 开始时应缓慢加入,富硼渣与硫酸发生剧烈反应,同 时产生大量泡沫,滴加硫酸总量的10%左右硫化物基 本反应完全,再将未加入的全部硫酸尽快投入到烧瓶 中。反应完毕后,反应液趁热过滤,滤饼用90℃热水 洗涤3次,滤液放入烧杯中。滤饼在120℃下烘干, 用碱熔法测滤饼中B含量,滤饼中Ca、Mg含量用X 射线荧光分析仪测得。

# 2 结果与分析

富硼渣硫酸浸出过程中,酸用量、浸出温度、浸 出时间、浸出液固比、搅拌速度等是影响富硼渣中 B、 Mg 浸出率的主要因素。而酸用量、温度、时间、液 固比对富硼渣中 B、Mg 浸出率影响更为显著,试验 中逐一对其研究。

### 2.1 硫酸用量的影响

浸出试验中,除硫酸用量外,其余浸出条件分别为: 富硼渣 20g,浸出温度 95℃,浸出时间 90 min,浸出液固比 5:1,搅拌转速约 200 r/min。硫酸用量对富硼渣中 B、Mg 浸出率影响如图 1 所示,酸的理论用量为富硼渣中能与硫酸作用的金属阳离子完全转变为硫酸盐时所需的硫酸量。

从图 1 可知,富硼渣中 B 浸出率随着酸用量的增加呈先增大后减小的趋势。增大阶段是由于酸量增加起主要作用,酸量增加使得有足够的酸与硼酸镁反应,将 B 转移到溶液中,但当酸用量超过酸理论用量的90%时,反应液过滤难度随酸用量的增加逐渐增大,过滤困难。这主要是由于酸量增加,与渣中 Ca 组分的反应增多,生成大量的细小的 CaSO4·2H<sub>2</sub>O 晶体,阻碍过滤<sup>[18]</sup>,这也使得部分硼酸残留在滤饼中,这也



图1 硫酸用量与富硼渣中B和Mg浸出率关系

**Fig. 1** Influence of sulfuric acid on leaching rates of B and Mg (Temperature: 95 °C; liquid-solid ratio: 5:1; time: 90 min; stirring rate: 200 r/min)

是 B 浸出率随着酸用量的增加先增大后减小的原因。 而 Mg 浸出率随着酸用量的增加而增加,从 B 和 Mg 浸出率和过滤难易程度上考虑,酸用量不宜超过硫酸 理论用量的 95%。

## 2.2 浸出温度的影响

除温度外,其余浸出条件分别为: 富硼渣 20 g, 硫酸用量为理论用量的 85%,浸出时间为 90 min,浸 出液固比为 5:1,搅拌转速约 200 r/min。

图 2 所示为常压下温度与 B、Mg 浸出率的关系。 由图 2 可知,反应温度从 80 ℃提高到 99 ℃时,B的 浸出率变化不大,而且均在 95%以上,说明反应温度 为 80 ℃时,酸解富硼渣就能得到较高的 B 浸出率。



**Fig. 2** Relationship between leaching rate of B and Mg in B-rich slag and temperature (Theoretical dosage of  $H_2SO_4$ : 85%; liquid-solid ratio: 5:1; time: 90 min; stirring rate: 200 r/min)

Mg 浸出率随着温度的提高而增大,提高温度使酸浸 反应速度加快,在有限的时间内增加了反应速度会使 Mg 的浸出率逐渐升高。99 ℃为常压下所能达到的最 高水浴温度,若考虑加压浸出,进一步提高浸出温度, Mg 浸出率还能进一步升高。

# 2.3 浸出时间的影响

试验中,除浸出时间外,其余浸出条件分别为富 硼渣 20g,硫酸用量为理论用量的 85%,浸出温度为 95℃,浸出液固比 5:1,搅拌转速约为 200 r/min。



图3 富硼渣中B、Mg浸出率与时间的关系

Fig. 3 Relationship between leaching rate of B and Mg in B-rich slag and time (Theoretical dosage of  $H_2SO_4$ : 85%; liquid-solid ratio: 6:1; temperature: 95°C; stirring rate: 200 r/min)

试验分别在 60、80、90、100 和 120 min 进行浸 出试验,考察浸出时间对 B 和 Mg 浸出率的影响。从 图 3 可以看出, B 和 Mg 浸出率随着时间的增加均先 升高后降低。在 100 min 内,随着时间的延长,反应 更大限度的正向进行,B、Mg 浸出率升高。但当浸出 时间增加至 120 min 时,B、Mg 浸出率迅速下降。这 主要是因为浸出时间过长,富硼渣中的 Ca 组分也被 浸取出来,溶液中形成大量难过滤的细小的 CaSO4·2H<sub>2</sub>O 晶体,部分 B、Mg 残留在滤饼内,导致 B、Mg 浸出率下降。若单独考虑B 浸出率,反应时间 为 60 min 时,B 浸出率就达到 93.4%,但综合考虑 B、 Mg 浸出率时,反应时间以 80~100 min 为宜。

## 2.4 浸出液固比的影响

浸出试验中,除反应液固比外,其余浸出条件分 别为富硼渣 20 g,硫酸用量为理论用量的 85%,浸出 温度为 95 ℃,浸出时间为 90 min,搅拌转速约为 200 r/min.

从图 4 可以看出,液固比在 7:1 之前时,随着液 固比的增大,B 浸出率变化不大,且均在 95%以上。 而 Mg 浸出率在浸出液固比由 4:1 增加到 6:1 时,逐渐 增大,液固比的增加使得反应浆液流动性变好,有利 于反应进行,提高了 Mg 的浸出率。当反应液固比继 续增大时,B 和 Mg 的浸出率都在减小,这主要是由 于随着液固比的增大,酸浓度降低。此时酸浓度在浸 出过程中起到了主导作用,酸浓度低导致富硼渣反应 不完全,B和 Mg 浸出率也随之降低。同时,由于酸 浓度的降低,反应生成物硅酸形成胶状物,溶液过滤 困难。当液固比为 9:1 和 10:1 时,在减压条件下抽滤 也不能将反应液过滤出来。考虑到 B 和 Mg 浸出率以 及过滤操作的难易程度,反应液固比为 6:1 较为适宜。



图4 富硼渣中B、Mg浸出率与液固比的关系

**Fig. 4** Relationship between leaching rate of B and Mg and in B-rich slag liquid-solid ratio (Amount of  $H_2SO_4$ : 85% theoretical amount; temperature: 95 °C; time: 90 min; stirring rate: 200 r/min)

# 2.5 正交试验

试验中发现,酸浸过程中浸出时间、浸出温度、 硫酸用量及反应液固比等都对富硼渣 B、Mg 浸出率 有影响,尤其是对 Mg 浸出率影响较大。为了选择较 适宜的硫酸浸出条件,进行了酸用量、浸出时间、浸 出温度、液固比四因素三水平正交试验。所用正交表为 L<sub>g</sub>(3<sup>4</sup>),因素水平表见表 2,试验结果见表 3(1*i*表示正交表

表2 富硼渣硫酸法正交试验因素水平表

中第 *i* 列的 1 水平所对应的数据之和, I *i*/3 为其平均值; II *i* 表示正交表中第 *i* 列的 2 水平所对应的数据之和, II *i*/3 为其 平均值; III *i* 表示正交表中第 *i* 列的 3 水平所对应的数据之 和, III*i*/3 为其平均值。浸出条件: 富硼渣 20 g, 搅拌速度 约为 200 r/min)。

由表 3 试验结果数据可以看出,随着各因素水平的改变,B 的浸出率变化不大。所以,本试验结果分析中以富硼渣中 Mg 的浸出率试验结果进行正交试验 极差分析。分析表明:酸用量、浸出时间、浸出温度 和液固比对 Mg 浸出率都有很大影响。极差值 R 的大 小顺序为 R<sub>C</sub>>R<sub>A</sub>>R<sub>D</sub>>R<sub>B</sub>,由此可知,影响 Mg 浸出 率的因素由主到次顺序为浸出温度、酸用量、液固比 和浸出时间。本试验中最高 Mg 浸出率条件为 A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>C<sub>3</sub>D<sub>2</sub>,即酸用量为理论用量的 95%,浸出时间为 90 min,浸出温度为 99 ℃,反应液固比为 6:1。99 ℃ 是常压下水浴所能达到的最高温度,若考虑加压浸出 的话,温度进一步提高,Mg 浸出率还有提高空间。

预测和验证:最佳水平被选择后,可通过灰色关 联分析理论对实验结果进行预测和验证<sup>[19]</sup>。通过下面 的公式来预测 Mg 浸出率的最优值:

$$\hat{\gamma} = \gamma_{\rm m} + \sum_{i=1}^{q} (\gamma_i - \gamma_{\rm m}) \tag{1}$$

式中: y<sub>m</sub>为 Mg 浸出率的总体平均值; y<sub>i</sub>为最优水平 下 Mg 浸出率的平均值; q 为所考察影响因素数量。 通过计算,得到灰色关联度的计算值为 75.06%。同时, 在实验所确定的最佳富硼渣常压浸出工艺条件下进行 验证,即在浸出温度 99 ℃、硫酸用量为理论用量的 95%、浸出液固比为 6:1、浸出时间为 90 min、搅拌速 度约 200 r/min 条件下,取富硼渣 20 g 进行浸出试验, Mg 浸出率为 74.32%。实验结果和预测结果具有较好 的一致性。

### 2.6 浸出液综合利用试验

富硼渣通过硫酸浸出得到的浸出液中主要成分为 MgSO<sub>4</sub>和 H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>,其中 MgSO<sub>4</sub>含量约为 20%~25%, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>含量约为 6%~8%。另外,还有少量的 Fe<sup>3+</sup>、Fe<sup>2+</sup>、 Al<sup>3+</sup>离子。图 5 所示为浸出液综合利用工艺的流程图。

 Table 2
 Variables levels of orthogonal experiment during sulfuric acid leaching in B-rich slag

	ê 1	2	° °	
Level No.	Theoretical dosage of $H_2SO_4$ , A/%	Leaching time, B/min	Leaching temperature, C/°C	Liquid-solid ratio, D
1	85	80	90	5
2	90	90	95	6
3	95	100	99	7

#### 表3 富硼渣硫酸浸出正交试验结果

Table 3 Orthogonal experiment results of sulfuric acid leaching of B-rich sla
---

Test No.	Experimental factor				D loo ching rate/0/	Malaashina rata/0/
Test Ind. –	А	В	С	D	B leaching rate/% Mg le	Mg reaching rate/ /6
1	1	1	1	1	96.85	59.47
2	1	2	2	2	96.76	64.51
3	1	3	3	3	95.60	66.38
4	2	1	2	3	97.10	60.82
5	2	2	3	1	99.13	71.39
6	2	3	1	2	95.23	61.60
7	3	1	3	2	98.98	73.09
8	3	2	1	3	94.81	63.39
9	3	3	2	1	96.33	67.94
I i	190.36	193.38	184.46	198.80		
II i	193.81	199.29	193.27	199.20		
IIIi	204.42	195.92	210.86	190.59		
I <i>i</i> /3	63.45	64.46	61.49	66.27		
II <i>i</i> /3	64.60	66.43	64.42	66.40		
III <i>i</i> /3	68.14	65.31	70.29	63.53		
Range	4.69	1.97	8.80	2.87		



图 5 富硼渣硫酸浸出液综合利用工艺流程

Fig. 5 Flowchart of utilizing sulfuric acid leaching solution of boron-rich slag

## 表4 Mg浸出率的理论预测和实验结果

**Table 4** Theoretical prediction and experimental results ofMg extraction rate

Factor	Leaching rate of Mg/%
Predicted A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub> D <sub>2</sub>	75.06
Experiment A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub> D <sub>2</sub>	74.32

实验发现,在酸浸过程中富硼渣中 70%~80%的铝 以 AI<sup>3+</sup>形式进入到溶液里,富硼渣中的 FeO 有 80%~90%以 Fe<sup>2+</sup>转移到溶液中。Fe<sup>3</sup>、Fe<sup>2+</sup>、AI<sup>3+</sup>离子 的存在影响硼酸及一水硫酸镁产品的纯度,同时 AI<sup>3+</sup> 离子的存在也影响溶液中硼酸含量的测定。所以,这 3 种离子必须要除去。用双氧水将滤液中 Fe<sup>2+</sup>氧化成 在 Fe<sup>3+</sup>,双氧水加入量为氧化富硼渣中全部 Fe<sup>2+</sup>所需 双氧水量的 90%。加入时伴以缓慢搅拌,使反应完全。 然后,在搅拌的条件下,向溶液中加入氧化镁调节滤 液的 pH 值,将滤液 pH 值调至 4~5, Fe<sup>3+</sup>以 Fe(OH)<sub>3</sub> 形式沉淀, AI<sup>3+</sup>以 Al(OH)<sub>3</sub> 形式沉淀,过滤除去得到 二次滤液,该过程中发生的主要化学反应为

 $MgO+H_2SO_4 = MgSO_4 + H_2O$ (2)

 $Fe^{3+}+3H_2O = Fe(OH)_3 \downarrow +3H^+$ (3)

 $Al^{3+}+H_2O = Al(OH)_3 \downarrow + 3H^+$ (4)

利用硫酸镁和硼酸溶解度的差异性进行 B、Mg 分离。得到的二次滤液温度在 60~80 ℃之间,可直接 将二次滤液打入高压釜进行提 Mg 试验。本试验将高 压釜升温至 180 ℃,并在此温度下恒温 4 h,使一水硫 酸镁充分结晶。为了过饱和溶液快速产生晶核,恒温 过程中的前 30 min 对溶液进行搅拌,搅拌速度约为 100 r/min。反应完毕后,反应液过滤,滤饼即为一水 硫酸镁产品。所得滤液为三次滤液,图 6 所示为一水



Fig. 6 XRD pattern of  $MgSO_4$ · $H_2O$  obtained from sulfuric acid leaching of B-rich slag

硫酸镁的 XRD 谱。经化学分析,其纯度达到 95.42%。 三次滤液在室温下结晶,得到硼酸。剩余的最终 滤液含有少量的硼酸和硫酸 Mg,可打入酸解工序或 经蒸发浓缩进入高压釜提 Mg。图 7 为所得硼酸产品 XRD 谱。图 8 所示为富硼渣硫酸法制得的硼酸的 SEM 像。由图 8 可见,硼酸结构为片层结构,由此方法制 得的硼酸纯度为 99.27%。





Fig. 7 XRD pattern of boric acid obtained from sulfuric acid leaching of B-rich slag





本试验采用的工艺不同于一般先进行低温结晶制 备硼酸,再回收利用硼酸母液的工艺。考虑到反应后 的溶液经过除铁、铝步骤后,滤液温度在 60~80 ℃, 趁热直接进入高压釜先高温结晶提 Mg,可充分利用 热溶液,节约能源,若浸出液中硫酸镁浓度在 25%以 上,则硫酸镁一次性收率达到 49.6%。提 Mg 后剩余 母液再低温结晶硼酸,硼酸一次收率可达 65.8%。最 终滤液可打入富硼渣酸解体系,滤液中的硼酸和硫酸 镁可进行重复回收利用。整个工艺形成闭路循环,没 有废液排放。

# 3 结论

1) 富硼渣硫酸浸出的最佳酸解条件为:浸出温度 为 99 ℃,酸用量为理论用量的 95%,浸出液固比为 6:1,浸出时间为 90 min。在此最佳条件下进行试验, B浸出率为 98.76%, Mg浸出率达到 74.32%。Mg浸 出率的实验结果和灰色关联分析预测的结果具有较好 的一致性。

2) 极差分析表明:影响 Mg 浸出率的因素由主到 次顺序依次为浸出温度、酸用量、液固比和浸出时间。

3) 开发了富硼渣硫酸浸出液先高温结晶制取一 水硫酸镁再低温结晶制备硼酸工艺,此工艺能够有效 地回收富硼渣中的 B、Mg 资源,由此方法制得的一 水硫酸镁纯度达到 95.42%,硼酸纯度达 99.27%。

## REFERENCES

[1] 张丽清,袁本福,周华峰,刘志国.乙醇结晶法提取硼铁矿酸
 浸液中的硫酸镁[J].中南大学学报:自然科学版,2013,44(7):
 2681-2687.

ZHANG Li-qing, YUAN Ben-fu, ZHOU Hua-feng, LIU Zhi-guo. Extracting magnesium sulfate from acid-leaching solution of ludwigite by ethanol crystallization[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(7): 2681–2687.

- [2] 龚殿婷,李凤华,刘素兰,樊占国. 硼酸的生产应用现状及市场前景[J]. 化学工业与工程技术,2007,28(6):50-53.
  GONG Dian-ting, LI Feng-hua, LIU Su-lan, FAN Zhan-guo.
  Production and application status and market prospects of boric acid[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2007, 28(6): 50-53.
- [3] 曹 钊,曹永丹,桂 富.硼铁矿资源开发利用研究现状及 进展[J]. 矿产综合利用, 2013(2): 17-19.
   CAO Zhao, CAO Yong-dan, GUI Fu. Research status and progress of the exploitation and utilization of paigeite ore[J].
   Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2013(2): 17-19.
- [4] 刘 然,薛向欣,姜 涛,张淑会,黄大威.硼铁矿综合利用 概况与展望[J]. 矿产综合利用,2006(2):33-38.
  LIU Ran, XUE Xiang-xin, JIANG Tao, ZHANG Shu-hui, HUANG Da-wei. Comprehensive utilization of ludwigite and its prospect[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2006(2):33-38.
- [5] DING Y G, WANG J S, WANG G, MA S, XUE Q G. Comprehensive utilization of paigeite ore using iron nugget making process[J]. Journal of Iron and Steel Research,

International, 2012, 19(6): 9-13.

[6] 战洪仁,樊占国,姜晓峰,李 杰,姜 涛. 富硼高炉渣中遂 安石相的析出行为[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2011, 32(1):47-50.

ZHAN Hong-ren, FAN Zhan-guo, JIANG Xiao-feng, LI Jie, JIANG Tao. Study on phase separation of suanite from boron-rich blast furnace slag[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2011, 32(1): 47–50.

- [7] YANG Z D, LIU S L, LI Z F, XUE X X. Oxidation of silicon and boron in boron containing molten iron[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2007, 14(6): 32–36.
- [8] 安 静,薛向欣,姜 涛.硼铁矿火法分离工艺生态压力研究[J].东北大学学报:自然科学版,2010,31(4):542-545. AN Jing, XUE Xiang-xin, JIANG Tao. Ecological pressure analysis of thermometallurgical separation process of paigeite ore[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2010, 31(4): 542-545.
- [9] 安庆龙,牛秋林,明伟伟,陈 明. 高强度合金硼铸铁组织成 分与切削性能研究[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46 (7): 1049-1058.

AN Qing-long, NIU Qiu-lin, MING Wei-wei, CHEN Ming. Study on microstructure, chemical gradient and machinablity of high-strength alloy boron cast iron[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46 (7): 1049–1058.

- [10] 巫俊斌,姜 涛,薛向欣,李 江. 配料组成对富硼渣合成 (Ca,Mg)α'-Sialon/BN 陶瓷粉体的影响[J]. 东北大学学报:自 然科学版, 2009, 30(20): 221-237.
  WU Jun-bin, JIANG Tao, XUE Xiang-xin, LI Jiang. Effect of initial composition on(Ca,Mg)α'-Sialon/BN powder synthesized from boron-rich slag[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2009, 30(20): 221-237.
- [11] JIANG T, WU J B, XUE X X, DUAN P N, CHU M S. Carbothermal formation and microstructural evolution of ά-Sialon-AlN-BN powders from boron-rich blast furnace slag[J]. Advanced Powder Technology, 2012, 23(3): 406–413.
- [12] JIANG T, XUE X X. Synthesis of (Ca, Mg)-α'-Sialon-AIN-BN powders from boron-rich blast furnace slag by microwave carbothermal reduction-nitridation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(12): 2984–2990.
- [13] 安 静,薛向欣,姜 涛. 硼铁矿火法分离过程的生命周期 环境影响评价[J].过程工程学报,2010,10(2):321-326.
   AN Jing, XUE Xiang-xin, JIANG Tao. Life cycle environmental impact assessment of pyrometallurgical separation process of paigeite ore[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2010,10(2):321-326.
- [14] 李 杰, 樊占国. 富硼渣钠化法制备硼硼砂的实验研究[J]. 材料科学与工艺, 2011, 19(1): 144-148.
  LI Jie, FAN Zhan-guo. Experimental study on preparation of borax from boron-rich slag by adding sodium carbonate[J]. Materials Science and Technology, 2011, 19(1): 144-148.

- [15] 刘素兰,陈 吉,张显鹏. 富硼渣硫酸浸出试验研究[J]. 东北 大学学报: 自然科学版, 1996, 17(4): 378-380.
  LIU Su-lan, CHEN Ji, ZHANG Xian-peng. Sdudy on leaching boron-rich slag with H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 1996, 17(4): 378-380.
- [16] 李 杰,许哲峰,李 岩,李英楠,姜 涛. 富硼渣盐酸法制 取硼酸和氢氧化镁[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(11): 4171-4176.
  LI Jie, XU Zhe-feng, LI Yan, LI Ying-nan, JIANG Tao.
  Preparation of boric acid and magnesium hydroxide from boron-rich slag by hydrochloric acid leaching method[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(11): 4171-4176.
- [17] LI Jie, FAN Zhan-guo, LIU Yan-li, LIU Su-lan, JIANG Tao, XI

Zheng-ping. Preparation of boric acid from low-grade ascharite and recovery of magnesium sulfate[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(6): 1161–1165.

- [18] 尹书青. 富硼渣和硬硼钙石酸解制硼酸工艺的研究. [D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
  YIN Shu-qing. Research on leaching process of boron-rich slag and colemanite by acid[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [19] SUBBAYA K M, SURESHA B, RAJENDRA N, VARADARAJAN Y S. Grey-based Taguchi approach for wear assessment of SiC Filled carbon-epoxy composites[J]. Materials and Design, 2012, 41:124–130.

(编辑 李艳红)