文章编号: 1004-0609(2013)02-0510-06

## 硫酸氢铵硫酸化焙烧法红土镍矿提取镍钴

石剑锋,王志兴,胡启阳,郭华军,李新海,彭文杰

(中南大学 冶金科学与工程学院, 长沙 410083)

**摘 要:** 针对传统硫酸化焙烧红土镍矿能耗高、设备腐蚀大等缺点,提出硫酸氢铵焙烧循环工艺。以菲律宾红土 镍矿为原料,对焙烧剂添加量、焙烧温度和焙烧时间等工艺参数及焙烧机理进行研究。结果表明: 焙烧温度 300 ℃、 焙烧时间 90 min 的条件下,Ni、Co、Mn、Mg、Fe 的提取率分别为 95%、96%、92%、57%、79%,硫酸氢铵具 有良好的硫酸化能力。该工艺具有效率高、能耗低、环境友好等特点,对低品位红土镍矿的开发利用具有重要 意义。

关键词:红土镍矿;硫酸氢铵;硫酸化焙烧;循环机理 中图分类号:TF815 文献标志码:A

# Recovery of nickel and cobalt from nickel laterite ore by sulfation roasting method using ammonium bisulfate

SHI Jian-feng, WANG Zhi-xing, HU Qi-yang, GUO Hua-jun, LI Xin-hai, PENG Wen-jie

(School of Metallurgical Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The circular technology of sulfation roasting nickel laterite ore using ammonium bisulfate was supposed to overcome the defect of traditional process, such as high power consumption and equipment corrosion. Using Philippines nickel laterite ore as raw material, the roasting mechanism and various parameters including ammonium bisulfate addition, roasting temperature and roasting time were investigated. The results show that, under conditions of 300 °C and 90 min, the extraction rate of Ni, Co, Mn, Mg and Fe are about 95%, 96%, 92%, 57% and 79%, the sulfating ability of ammonium bisulfate is strong. The process is proved to be significant in exploitation and utilization of low-grade nickel laterite ores, which has some advantages, such as high efficiency, low power consumption and good environment.

Key words: nickel laterite ore; ammonium bisulfate; sulfation roasting; circular mechanism

近年来,随着中国经济的迅猛发展,原镍需求量快速增长<sup>[1]</sup>。 2010年,中国原镍消费量达到 60 万 t, 较 1996年增长了 10 倍以上。从世界范围看,开采的 镍资源有硫化矿和红土镍矿两类<sup>[2]</sup>,目前约有 70%的 镍是从硫化镍矿中提取的,然而,随着世界镍硫化矿 资源的日益枯竭,低品位红土镍矿的开发和综合利用 逐渐成为研究热点。

红土镍矿床一般分为3层,上层是褐铁矿层,中 间层为铁、钴含量高,硅、镁、镍含量较低;下层是

收稿日期: 2012-01-10; 修订日期: 2012-05-15

硅镁镍矿,中间层的硅、镁含量较高,铁、钴含量较低,但镍的含量较高;中间是过渡层,各主要金属含量介于上层和下层之间。目前,褐铁矿型、绿脱石型常采用加压酸浸工艺<sup>[3-5]</sup>和 Caron 工艺处理<sup>[6-7]</sup>;硅镁型红土镍矿适用于火法冶炼工艺生产镍铁和镍锍<sup>[8-9]</sup>,但火法工艺难以实现镍钴与铁的分离,无法得到纯金属,故火法和湿法联合冶炼工艺成为研究热点。

硫酸化焙烧工艺是在一定的温度和气氛条件下,利用焙烧剂使矿物原料中目的组分转变为可溶性的硫

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB613607)

通信作者: 王志兴, 教授, 博士; 电话: 0731-88836633; E-mail: zxwang21@163.com

酸盐,实现有价金属提取的过程<sup>[10-11]</sup>。传统硫酸化焙 烧工艺主要采用浓硫酸为焙烧剂,虽然分离效果较好, 但浓硫酸热稳定性差,易沸腾和分解,致使焙烧烟气 对设备腐蚀严重<sup>[12-13]</sup>。本文作者首创性地采用硫酸氢 铵作为焙烧剂,提出一种硫酸化焙烧循环工艺,能实 现红土镍矿中镍、钴的提取及杂质的分离。

### 1 实验

#### 1.1 原料

本研究采用来自菲律宾某矿区的硅镁型红土镍 矿。磨细后矿物平均粒度(*d*<sub>50</sub>)为 7.9µm,其化学成分 见表 1。XRD 物相分析图谱如图 1 所示,红土镍矿的 主要物相为石英 SiO<sub>2</sub>、蛇纹石 Mg<sub>3</sub>[Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>]、橄榄 石 Mg<sub>1.8</sub>Fe<sub>0.2</sub>(SiO<sub>4</sub>)、云母 Mg<sub>3</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>等,Ni、Co 等有价金属含量相对很低,并均匀分布在蛇纹石、橄 榄石等矿石中,因此未见其以单独物相存在。

#### 表1 红土镍矿的化学成分

 Table 1
 Composite of nickel laterite ore (mass fraction, %)

Ni	Со	Fe	Mg	Mn	Ca	$Al_2O_3$	$\mathrm{SiO}_2$
1.50	0.05	11.51	12.97	0.20	0.62	1.88	39.26



图1 红土镍矿的 XRD 谱

Fig. 1 XRD pattern of nickel laterite ores

实验所用试剂硫酸氢铵为分析纯,水为去离子水。

#### 1.2 实验方法

在焙烧阶段利用硫酸氢铵将原矿中有价元素转化 为可溶性硫酸盐,并在浸出过程中溶解进入水相中, 利用黄铵铁矾法除铁,根据金属沉淀 pH 值范围差异, 利用 NH<sub>3</sub> 调节除铁后液 pH 值,实现各金属元素的分 步沉淀,先后得到镍钴锰混合氢氧化物和氢氧化镁, 溶液蒸发结晶产物(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 经过热分解<sup>[14]</sup>可转化为 焙烧剂 NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub>。硫酸化焙烧循环工艺流程如图 2 所示。

将矿粉与焙烧剂混合均匀放入刚玉坩埚后置于马 弗炉中,以 10 ℃/min 的升温速率升至指定温度后保 温一段时间,反应完成后取出冷却至室温后用蒸馏水 浸出,浸出温度 60 ℃,固液质量比为 1:20,搅拌速率 200 r/min,浸出 30 min 后,抽滤料浆,烘干滤渣。通 过络合滴定及 ICP 测定浸出液和浸出渣中的各金属含 量并计算提取率。



图 2 硫酸化焙烧循环工艺流程图

Fig. 2 Technological flow chart of sulfation roasting circular process

## 2 结果与讨论

#### 2.1 TG-DTA 分析

原矿及加入硫酸氢铵(添加量为原矿质量 1.5 倍) 混合生料的 TG-DTA 曲线分别如图 3 所示。由图 3(a) 可知,原矿在 300 ℃以下质量损失率为 6.5%,对应 DTA 曲线上在 50 ℃、250 ℃处有两处吸热峰,分别对 应于物理水和结晶水的脱除。570 ℃处的吸热峰对应 蛇纹石的脱羟基作用,生成了非晶态镁橄榄石(见式 (5)

(1))<sup>[15-16]</sup>, 826 ℃处的放热峰是镁橄榄石(Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>)的 再结晶作用<sup>[17]</sup>。

硫酸氢铵熔点约为 147 ℃,沸点约为 350 ℃,在 图 3(b)DTA 曲线上存在相应的吸热峰。在 200~350 ℃ 的范围内,生料持续发生质量损失,且质量损失(以原 矿质量为基数,生料中原矿质量为 40%)较原矿明显提 高,这是由于硫酸氢铵与矿物反应,产生 NH<sub>3</sub>及 H<sub>2</sub>O。 400 ℃的强吸热峰源于硫酸复盐的分解,气体的产生 带走大量热量(见式(2)和(3))。550~700 ℃的质量损失 及 630 ℃吸热峰源于低稳定性硫酸盐的分解(见式 (4)),当温度高于 800 ℃时,MgSO<sub>4</sub> 开始分解(见式 (5))<sup>[18]</sup>。

 $Mg_{3}[Si_{2}O_{5}(OH)_{4}] \rightarrow Mg_{2}SiO_{4} + MgSiO_{4} + 2H_{2}O\uparrow$ (1)

 $2(NH_4)3Fe(SO_4)_3 \triangleq Fe_2(SO_4)_3 + 3SO_3 \uparrow + 6NH_3 \uparrow + 3H_2O (2)$ 

 $(NH_4)_2Mg_2(SO_4)_3 \triangleq 2MgSO_4 + SO_3 \uparrow + 2NH_3 \uparrow + H_2O$ (3)

 $Fe_2(SO_4)_3 \triangleq Fe_2O_3 + 3SO_4 \tag{4}$ 



图 3 原矿及生料的 TG-DTA 曲线

Fig. 3 TG-DTA curves of raw ores (a) and raw materials (b)

#### 2.2 焙烧过程分析

#### 2.2.1 焙烧剂添加量对各金属提取率的影响

图 4 所示为焙烧温度 300 ℃、焙烧时间 90 min 时,不同 (NH<sub>4</sub>)HSO<sub>4</sub> 添加量(原矿质量的 0.25~2 倍) 对各金属提取率的影响。由图 4 可看出,随(NH<sub>4</sub>)HSO<sub>4</sub> 添加量的增加,各金属提取率均呈现上升趋势且变化 趋缓,当添加量达到 1.5 倍后,Ni、Co、Mn 提取率 几乎不变,此时Ni、Co、Mn、Fe、Mg 提取率分别达 到 95%、96%、92%、79%、57%,可见硫酸氢铵具有 良好的硫酸化性能。相同实验条件下不同金属的浸出 率有显著差异,反映出不同矿物的硫酸化难易程度不 同,Ni、Co、Mn 较 Fe、Mg 活性较高。前三者由于 性质接近,浸出率变化趋势基本一致,另一方面,这 3 种金属在整个矿样中含量较低,体现出较高浸出率。

在浸出过程中,预焙烧硫酸氢铵使用量越大,浸 出料浆粘度越大,这是因为 SiO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度升高所致。在 浸出搅拌过程中,一部分的 SiO<sub>4</sub><sup>2-</sup>水解产生 H<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, 浸出料浆过滤性能下降。基于以上情况考虑,在预焙 烧过程中,硫酸氢铵的使用量也并非越大越好。实验 选取(NH<sub>4</sub>)HSO<sub>4</sub>添加量为原矿质量 1.5 倍较为合理。 硫酸氢铵理论反应率(θ):

$$\theta = \frac{115 \times \sum \left(\frac{m_i}{M_i} \cdot \sigma_i \cdot \eta_i\right)}{m_{(\mathrm{NH}_4)\mathrm{HSO}_4}} \times 100\%$$
(6)

式中: $m_i$ 为原矿金属元素质量分数; $M_i$ 为金属元素摩 尔质量; $\eta_i$ 为金属元素提取率; $\sigma_i$ 为每摩尔金属元素 (NH<sub>4</sub>)HSO<sub>4</sub>消耗量,Ni、Co、Mn、Mg 以(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>Mg<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 计, $\sigma$ 值为 1.5,Fe 以(NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>计, $\sigma$ 值为 3.0。 若忽略其他金属元素的影响,当(NH<sub>4</sub>)HSO<sub>4</sub>添加量为



图 4 (NH<sub>4</sub>)HSO<sub>4</sub> 添加量对各金属提取率的影响

Fig. 4 Effect of dosage of (NH<sub>4</sub>)HSO<sub>4</sub> addition on metal extractions

原矿质量 1.5 倍时,硫酸氢铵的反应率 θ 为 75.69%。 2.2.2 焙烧温度对各金属提取率的影响

(NH<sub>4</sub>)HSO<sub>4</sub>添加量为原矿质量的 1.5 倍,预焙烧时间 90 min,考察 200~450 ℃范围内焙烧温度对各金属提取率的影响,其结果如图 5 所示。由图 5 可看出,300 ℃以下提高温度可增大平衡常数,加快反应速率、提高熔盐翻滚强度和加快传质速率均有利于有价金属的硫酸化;但进一步提高温度各金属提取率陆续出现拐点,原因可能是由于硫酸氢铵的沸点为 350℃,提高温度将加快其蒸发,降低有效反应率,但由于矿物中各金属反应活性不一致使其拐点位置不同。同时,温度较高时,(NH<sub>4</sub>)HSO<sub>4</sub> 分解加剧,降低(NH<sub>4</sub>)HSO<sub>4</sub> 使用率,且尾气难以处理。为保证 Ni、Co 等具有较高提取率及较低 Fe 提取率,焙烧温度选取 300℃较为适宜。



图 5 焙烧温度对各金属提取率的影响

Fig. 5 Effect of roasting temperature on metal extractions

#### 2.2.3 焙烧时间对各金属提取率的影响

(NH<sub>4</sub>)HSO<sub>4</sub>添加量为原矿质量的 1.5 倍、焙烧温 度 300 ℃时焙烧时间对各金属提取率的影响如图 6 所 示。由图 6 可知,反应在 90 min 内基本完成,继续增 加焙烧时间提取率变化不明显,在保证较高金属提取 率的前提下,应尽可能降低反应时间,故选取 90 min 为最佳焙烧时间。

焙烧过程为液固反应体系,且反应产物为固态, 适用与收缩未反应核模型。红土镍矿样品颗粒较细, 内扩散速率较快,固体颗粒被液膜包裹着,气体产物 扩散受阻,故反应受外扩散控制。硅镁型红土镍矿中 Ni、Co、Mn、Mg等有价成分主要存在于蛇纹石同一 矿相中,故其浸出动力学规律近似,提取率均与时间 呈线性相关,也符合外扩散控制特点<sup>[19]</sup>。由于反应物 硫酸氢铵为纯相,产物硫酸复盐亦为固相,其活度均



图 6 预焙烧时间对各金属提取率的影响 Fig. 6 Effect of roasting time on metal extractions

近似为 1,反应主要受产物 NH<sub>3</sub> 和 H<sub>2</sub>O 等气体的外扩 散影响。根据 Fick 第一定律,单位时间通过外扩散层 转出的产物量:

$$J = (c_{(D)S} - c_{(D)0})DA/\delta$$
<sup>(7)</sup>

式中:  $c_{(D)S}$ 和  $c_{(D)0}$ 分别为反应产物的初始浓度和达平衡后的界面浓度; D 为气体的扩散参数; A 为有效接触面积;  $\delta$  为扩散层厚度。

由于产物生成量与固体反应的量成正比,设其比 例为 α,则固体反应速率:

$$-\frac{d_{\rm m}}{d_{\rm t}} = (c_{\rm (D)S} - c_{\rm (D)0})DA/(\alpha\delta)$$
(8)

焙烧过程为开放体系,故可认为产物气体本体浓度 c<sub>(D)0</sub>=0;反应平衡后界面层浓度 c<sub>(D)8</sub>恒定不变;反应生成固体膜,并且膜与未反应核一起构成的颗粒半径在反应过程中基本不变,界面面积 *A* 可视为常数,同时扩散层厚度 δ 及扩散系数 *D* 也可视为不变,则:

$$-\frac{d_{\rm m}}{d_{\rm t}} = K \tag{9}$$

式中: K为常数。

可见单位时间内反应的量不变,反应分数 R 与时间呈正比,即

#### 2.3 焙烧机理分析

R=k't

焙烧前后的红土镍矿样品 XRD 谱如图 7 所示。 由图 7 可知,焙烧后 Mg 和 Fe 主要以硫酸复盐 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>Mg<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和(NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 形态存在,结合原矿 中的物相形态,反应方程式如(11)和(12)所示,反应ΔG 在反应温度下为负,且数值较大,表明反应易于进行。 少部分 Fe 以 Fe<sub>4</sub>(OH)<sub>10</sub>SO<sub>4</sub> 形态存在,由于焙烧过程 中有水蒸汽产生,致使少部分铁盐水解,生成 Fe<sub>4</sub>(OH)<sub>10</sub>SO<sub>4</sub>(8)。

 $2Mg_3[Si_2O_5(OH)_4] + 9NH_4HSO_4 \triangleq 3(NH_4)_2Mg_2(SO_4)_3 +$ 

$$2\mathrm{SiO}_2 + 3\mathrm{NH}_3 \uparrow + 10\mathrm{H}_2\mathrm{O} \uparrow \tag{11}$$

$$\Delta_{\rm r} H_{\rm m}^{\Theta} = -1\ 807\ 071 - 29.35T + 14.81 \times 10^{-3}T^2 -$$

$$151.03 \times 10^5 T^{-1}$$

$$\Delta_{\rm r} G_{\rm m}^{\Theta} = -1\ 807\ 071 + 29.357 \ln T - 14.81 \times 10^{-3} T^2 -$$

$$75.51 \times 10^5 T^{-1} - 478.81 T$$

Mg<sub>1.8</sub>Fe<sub>0.2</sub>(SiO<sub>4</sub>)+3.3NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub>+0.050 2≜

 $0.9(NH_4)_2Mg_2(SO_4)_3+0.2(NH_4)_3Fe(SO_4)_3+$ 

 $SiO_2 + 0.9NH_3 \uparrow + 2.1H_2O \uparrow$ (12)

$$\Delta_{\rm r} H_{\rm m}^{\Theta} = -554\ 862 - 12.47T + 17.41 \times 10^{-3}T^2 -$$

 $37.58 \times 10^5 T^{-1}$ 

$$\Delta_{\rm r} G_{\rm m}^{\Theta} = -554\ 862 + 12.47\ T\ln T - 17.41 \times 10^{-3}\ T^2 -$$

 $18.79 \times 10^5 T^{-1} + 1\,196.99T$ 

 $4(NH_4)_3Fe(SO_4)_3+10H_2O=$ 

$$Fe_4(OH)_{10}SO_4 + 6(NH_4)_2SO_4 + 5H_2SO_4$$
 (13)



图 7 焙烧熟料的 XRD 谱 Fig. 7 XRD pattern of roasted clinker

红土镍矿及焙烧熟料的 SEM 像如图 8 所示。由 图 8 可知,焙烧后矿物形貌仍保持为鳞片变晶结构<sup>[20]</sup>, 液态硫酸氢铵在固态矿石表面浸润并与之反应,因此, 结构未发生根本变化。同时,小颗粒与硫酸氢铵反应 的反应产物不断扩散至大颗粒表面并沉积,使得矿物 表面结构更加清晰完整,这种侵蚀作用也导致矿物孔 隙度增加,更有利于扩散进行,这也是反应速度快的 原因之一。



图 8 红土镍矿和焙烧熟料的 SEM 像 Fig. 8 SEM images of nickel laterite ores (a) and roasted clinker (b)

## 3 结论

1) 采用硫酸氢铵焙烧红土镍矿,焙烧过程为固液 反应体系,反应受产物外扩散控制,焙烧产物主要为 (NH4)<sub>2</sub>Mg<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>和(NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>。

 2)确定了焙烧最佳条件:(NH4)HSO4添加量为原 矿质量的 1.5 倍,焙烧温度 300 ℃,焙烧时间 90 min。 此时,Ni、Co、Mn、Mg 和 Fe 的提取率分别为 95%、 96%、92%、57%和 79%,硫酸氢铵作为焙烧剂具有 良好的硫酸化能力。

3) 硫酸氢铵硫酸化焙烧循环工艺能实现物料闭 路循环,金属提取率高、能耗低,对低品位红土镍矿 的开发利用具有重要意义。

#### REFERENCES

 刘继军,胡国荣,彭忠东. 红土镍矿处理工艺的现状及发展 方向[J]. 稀有金属与硬质合金,2011,39(3):62-66.
 LIU Ji-jun, HU Guo-rong, PENG Zhong-dong. The latest and future development of laterite nickel ore processing technology[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2011, 39(3): 62–66.

- [2] JANKOVIC Z, PAPANGELAKIS VG. Measurement of pH in high-temperature nickel laterite pressure acid leach process solutions[J]. Hydrometallurgy, 2010, 105: 155–160.
- [3] RUBISOVDH, KROWINKEL J M, PAPANGELAKIS V G. Sulphuric acid pressure leaching of laterites-universal kinetics of nickel dissolution for limonite and limonitic/saprolitic blends[J]. Hydrometallurgy, 2000, 58: 1–11.
- [4] GUO Xue-yi, SHI Wen-tang, LI Dong, TIAN Qing-hua. Leaching behavior of metals from limonitic laterite ore by high pressure acid leaching[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21: 191–195.
- [5] WHITTINGTON B I, MCDONALD R G, JOHNSON J A, MUIR D M. Pressure acid leaching of arid-region nickel laterite ore: Part I: Effect of water quality[J]. Hydrometallurgy, 2003, 70: 31–46.
- [6] PANDA S C, SUKLAL B, JENAP K. Extraction of nickel through reduction roasting and ammoniacal leaching of lateritic nickel ores[J]. Transactions Indian Institute of Metals, 1980, 33: 161–165.
- [7] MU Wen-ning, ZHAI Yu-chun, LIU Yan, Leaching of magnesium from desiliconization slag of nickel laterite ores by carbonation process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20: 87–91.
- [8] MONHEMIUS A J. Treatment of laterite ores of nickel to produce ferronickel, matte or precipitated sulphide[J]. Extractive Metallurgy of Nickel, 1987: 51–75.
- [9] ZHAI Xiu-jing, FU Yan,ZHANG Xu, MA Lin-zhi, XIE Feng. Intensification of sulphation and pressure acid leaching of nickel laterite by microwave radiation[J]. Hydrometallurgy, 2010, 99: 189–193.
- [10] SWAMY Y V, KASIPATIK V. Extraction of nickel and cobalt from reduced chromite overburden by dilute sulphuric acid leaching[J]. Trans Indian Inst Met, 1994, 47(6): 409–411.
- [11] KARB B, SWAMY Y V. Some aspects of nickel extraction from chromitiferous overburden by sulphatization roasting[J]. Miner Eng, 2000, 13(14/15): 1635–1640.
- [12] 邱 沙, 车小奎, 郑 其, 段 锦. 红土镍矿硫酸化焙烧-水

浸实验研究[J]. 稀有金属, 2010, 34(3): 406-411.

QIU Sha, CHE Xiao-kui, ZHENG Qi, DUAN Jin. Experimental study on laterite-nickel ore with sulfating roasting-water immersion methods[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2010, 34(3): 406–411.

[13] 刘万里,王学文,王明玉,胡 健,张力萍.石煤提钒低温硫 酸化焙烧矿物分解工艺[J].中国有色金属学报,2009,19(5): 943-948.

LIU Wan-li, WANG Xue-wen, WANG Ming-yu, HU Jian, ZHANG Li-ping. Mineral decomposition process of vanadium recovery from stone coal by low temperature sulphating roasting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(5): 943–948.

- [14] JARIWALA M, CRAWFORD J, LECAPTAIND J. In situ Raman spectroscopic analysis of the regeneration of ammonium hydrogen sulfate from ammonium sulfate[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46(14): 4900–4905.
- [15] TARTAJ P, CERPA A, GARCIA-GONZALEZM T, SERNAC J. Surface instability of serpentine in aqueous suspensions[J]. J Colloid Interface Sci, 2000, 231(1): 176–181.
- [16] LI Jin-hui, LI Xin-hai, HU Qi-yang. Effect of pre-roasting on leaching of laterite[J]. Hydrometallurgy, 2009, 99: 84–88.
- [17] LUO Wei, FENG Qi-ming, OU Le-ming, ZHANG Guo-fan, LU Yi-ping. Fast dissolution of nickel from a lizardite-rich saprolitic laterite by sulphuric acid at atmospheric pressure[J]. Hydrometallurgy, 2008, 96(1/2): 171–175.
- [18] TAGAWA H. Thermal decomposition temperatures of metal sulfates[J]. Thermochimica Acta, 1984, 80: 23–33.
- [19] 李 博,魏永刚,王 华. 红土镍矿的固相还原动力学[J]. 过程工程学报, 2011, 11(5): 767-771.
  LI Bo, WEI Yong-gang, WANG Hua. Solid state deoxidization kinetics of nickel laterite ore[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2011, 11(5): 767-771.
- [20] 周晓文. 常压酸浸法从含镍红土矿中提取镍的研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2008: 18-19.

ZHOU Xiao-wen. The study of the process and technology of constant-pressured acid leaching of nickel extraction from laterite-nickel ore[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2008: 18–19.

(编辑 李艳红)