

## 硫酸铵焙烧法浸出镍磁黄铁矿中有价金属

刘欣伟<sup>1</sup>, 冯雅丽<sup>1</sup>, 李浩然<sup>2</sup>, 蔡震雷<sup>1</sup>, 杨志超<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083;

2. 中国科学院 过程工程研究所 生化工程国家重点实验室, 北京 100190)

**摘要:** 将镍磁黄铁矿与 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 混合后在高温下焙烧, 考察 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 用量、浸出温度、浸出时间和稀硫酸浸出液的 pH 值对焙烧产物中金属元素浸出率的影响, 并在氨水- $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 混合溶液中浸出焙烧产物。结果表明: 在不同情况下, Ni 和 Cu 的浸出率较高, Mg 和 Fe 的浸出率较低; 氨性溶液有利于 Ni 和 Cu 的浸出, 总氨浓度为 7 mol/L 时, Ni 和 Cu 的浸出率分别为 89.56%和 79.35%; 低 pH 值的稀硫酸溶液有利于 Mg 和 Fe 的浸出, pH 值为 0.5 时, Mg 和 Fe 的浸出率分别为 61.39%和 62.56%。由扫描电镜-能谱分析和 XRD 分析可知, 矿样中 Ni 和 Cu 大部分被浸出; 由于焙烧产物中部分 Mg 和 Fe 以铁酸钙和硅酸镁等形态存在, Mg 和 Fe 的浸出率较低。

**关键词:** 镍磁黄铁矿; 硫酸铵; 焙烧; 浸出; 能谱

中图分类号: TD952

文献标志码: A

## Leaching of valuable metals from nickel pyrrhotite by ammonium sulfate roasting method

LIU Xin-wei<sup>1</sup>, FENG Ya-li<sup>1</sup>, LI Hao-ran<sup>2</sup>, CAI Zhen-lei<sup>1</sup>, YANG Zhi-chao<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. National Key State Laboratory of Biochemical Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Nickel pyrrhotite blended with ammonium sulfate was roasted at elevated temperature. The effects of amount of ammonium sulfate, leaching temperature, leaching time and pH value of sulfuric acid leaching solution on leaching rates of metal elements in roasted products were investigated. The roasted products were also leached with a mixed solution containing ammonia and ammonium sulfate. The results show that the leaching rates of Ni and Cu are higher, and the leaching rates of Mg and Fe are lower under different conditions. The ammonia solution is beneficial to leaching Ni and Cu. When the total ammonia concentration is 7 mol/L, the leaching rates of Ni and Cu are 89.56% and 79.35%, respectively. The sulfuric acid solution with low pH value is beneficial to leaching Mg and Fe. When the pH value is 0.5, the leaching rates of Mg and Fe are 61.39% and 62.56%, respectively. The SEM-EDS and XRD analysis shows that most of Ni and Cu are leached out. The leaching rates of Mg and Fe are lower because of undissolved magnesium silicate and calcium ferrite in the roasted products.

**Key words:** nickel pyrrhotite; ammonium sulfate; roast; leaching; power spectrum

随着高品位镍矿资源的减少, 低品位镍矿资源目前进入开发回收阶段<sup>[1]</sup>。从低品位矿中回收镍是我国保证镍资源供应的基础保证<sup>[2-3]</sup>。镍磁黄铁矿是镍矿中

重要的硫化矿物之一, 含镍磁黄铁矿中的镍以类质同象形式取代磁黄铁矿晶格的部分铁存在<sup>[4-5]</sup>。该矿的特点之一是镍含量较低, 镁含量高<sup>[6]</sup>, 因为主要脉石矿

物是嵌布粒度细小、含镁高的硅酸盐矿物, 如蛇纹石、橄榄石、绿泥石等<sup>[7-8]</sup>。用浮选法和磁选法很难得到高品位的硫化镍精矿和磁黄铁矿精矿<sup>[9-10]</sup>。

硫酸铵焙烧<sup>[11]</sup>法是在较低温度(200~600 °C)下, 将(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>与矿物原料混合焙烧, 使金属元素硫酸盐化, 然后用水浸出硫酸盐, 有价金属进入水溶液<sup>[12-13]</sup>, 使金属元素得以提取利用。该方法降低了处理温度, 减少酸耗量, 过程条件较温和, 不会对环境造成二次污染。本文作者采用硫酸铵焙烧法处理金川低品位镍磁黄铁矿, 通过研究焙烧后产物中 Ni、Cu 等元素在水溶液、稀酸溶液及氨性水溶液中的浸出效果, 探讨该方法处理镍磁黄铁矿的可行性。

## 1 实验

### 1.1 试验原料

试验所用含镍磁黄铁矿由金川公司提供, X 射线衍射分析及物相分析表明其主要金属矿物有磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿和磁铁矿; 主要脉石矿物有蛇纹石、橄榄石、滑石、方解石、透闪石及少量的绿泥石。主要化学成分见表 1。试验中所用化学试剂为 98% 的硫酸和分析纯的(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>。

表 1 矿样的化学成分

Table 1 Chemical composition of mineral (mass fraction, %)

MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	CuO	SiO <sub>2</sub>	CaO
20.57	15.79	1.69	0.93	33.85	9.4

### 1.2 试验装置和分析仪器

主要试验设备如下: XMB-70 型三辊四筒棒磨机; AR1140 电子天平; KSW-5-12A 型电炉温度控制器; SHZ-D(III)循环水式真空泵; PH050 电烘干炉。

浸出渣的化学成分采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES, PE Optima 3000 型及 IRIS Intrepid II 型)分析; 浸出渣的物相组成由日本理学电机株式会社 Rigaku D/MAX-rA 型粉晶 X 射线衍射仪(XRD)测定, 用配套的软件分析浸出渣的 XRD 谱, 确定具体的物相组成; 硫酸铵焙烧产物和水浸后滤渣用日本电子 JSM6510 扫描电子显微镜进行扫描电镜-能谱分析。

### 1.3 试验方法

首先将镍磁黄铁矿在棒磨机中磨细至粒径小于 74 μm 占 95%, 每次取 10 g 矿样, 加入一定量的分析纯(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 充分混合后倒入 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 坩埚内, 加盖置

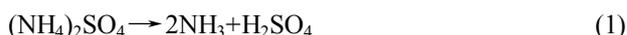
于马弗炉中, 在 400 °C 下焙烧 2 h, 焙烧产生的气体经 5% 稀硫酸溶液吸收。

将焙烧产物称量后放入 500 mL 锥形瓶中, 按液固比为 10:1 放入不同溶液中浸出, 考察不同浸出条件对浸出率的影响。通过分析浸出渣中 Ni、Mg、Fe 和 Cu 元素含量, 计算金属元素的浸出率。

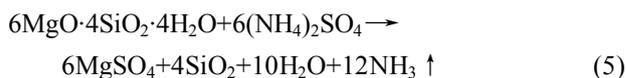
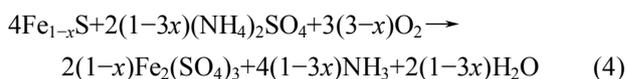
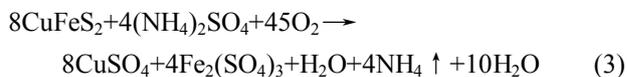
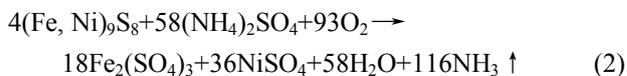
## 2 结果和讨论

### 2.1 焙烧反应

(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 加热时将发生分解反应<sup>[14-15]</sup>:



将(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>与镍磁黄铁矿混合, 焙烧过程中可能存在以下反应:



通过焙烧, 矿物中的 Ni、Mg、Fe 和 Cu 被转化为可溶性的硫酸盐。原矿和焙烧后矿样的 SEM 像如图 1 所示。从图 1 可看出, 原矿样的棱角分明, 晶体形状比较完整; (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>与镍磁黄铁矿混合焙烧后, 矿物颗粒变小且呈疏松状结构, 表面侵蚀较强, 说明(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>与镍磁黄铁矿发生了反应。

### 2.2 硫酸铵用量对浸出率的影响

将不同用量的(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>分别与 10 g 镍磁黄铁矿进行混合, 在 400 °C 焙烧 2 h, 然后将焙烧产物磨细至颗粒度为 74 μm, 按固液比为 1:10 用水溶液浸出焙烧产物。考察(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>用量对 Ni、Mg、Fe 和 Cu 浸出率的影响, 结果见图 2。

从图 2 可看出, 当(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>用量少于 8 g 时, Ni、Mg、Fe 和 Cu 的浸出率随(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>用量的增加而增加。而用量超过 8 g 时, Ni、Mg 和 Cu 的浸出率基本上不再增加, 分别为 83.62%、60.58%和 76.32%, 而 Fe 的浸出率有所下降。这是因为(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>用量过多时, 水溶液浸出时 pH 较低, 在 2~4 之间, Fe<sup>3+</sup>水解形成 Fe(OH)<sub>3</sub> 沉淀。此外, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>用量超过 8 g 时,

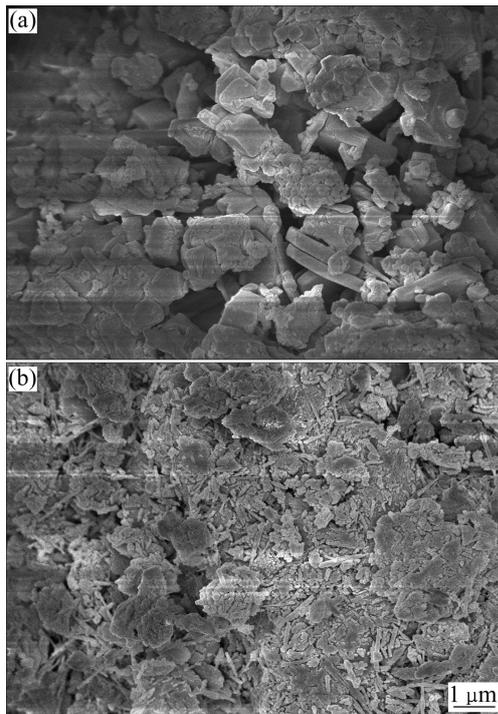


图1 原矿和焙烧后矿样的SEM像

Fig. 1 SEM images of raw ore (a) and roasted ore (b)

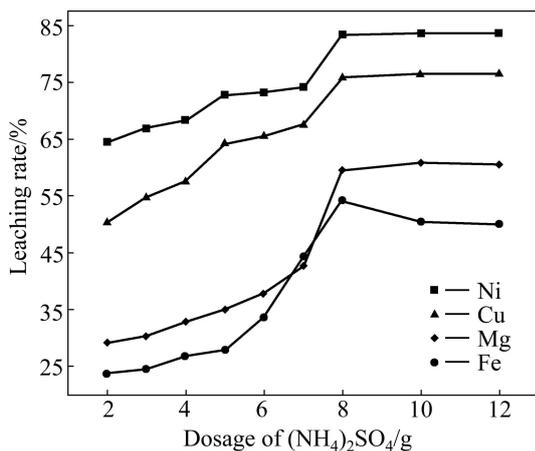


图2 硫酸铵用量对浸出率的影响

Fig. 2 Effect of dosage of ammonium sulphate on leaching rate

焙烧渣中含有大量的黄色物质, 这可能是 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 与金属硫化矿反应生成单质S的原因。因此, 确定 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 最佳用量为 $m((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4):m(\text{镍磁黄铁矿})=4:5$ 。

### 2.3 浸出温度的影响

分别将8 g  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 与10 g的镍磁黄铁矿混合焙烧, 焙烧温度为400 °C, 时间2 h, 然后用水溶液在

不同温度下浸出焙烧产物1 h。比较浸出温度对Ni、Mg、Fe和Cu浸出率的影响, 结果见图3。

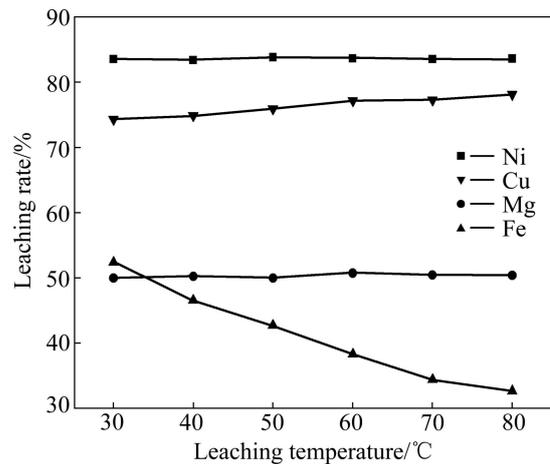
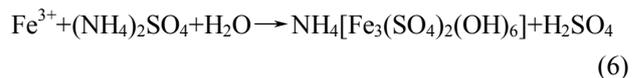


图3 浸出温度对浸出率的影响

Fig. 3 Effect of leaching temperature on leaching rate

从图3可看出, 浸出温度对Ni、Cu和Mg的浸出率影响较小, Fe的浸出率随温度升高而降低, 这可能是因为随着温度升高过程中,  $\text{Fe}^{3+}$ 与溶液中的 $\text{NH}_4^+$ 离子发生了以下反应:



由于 $\text{NH}_4[\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6]$ 微溶于水, 沉淀到滤渣中造成铁浸出率的下降。浸出温度为30 °C时, Ni、Cu、Mg和Fe的浸出率分别为83.49%、74.29%、49.93%和52.33%。

### 2.4 浸出时间的影响

将 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 与镍磁黄铁矿在400 °C焙烧2 h的产物放入烧杯中, 考察水溶液浸出时间对Ni、Mg、Fe和Cu浸出率的影响, 结果见图4。

从图4可看出, Ni、Mg和Cu浸出率开始随浸出时间的延长而增大, 当浸出时间为1 h时, 其浸出率分别为82.43%、49.13%和75.26%, 且随浸出时间的继续延长, 浸出率变化不大。Fe的浸出率在开始时随浸出时间的延长而增大, 当浸出时间为1 h时, Fe的浸出率最大为51.16%, 且随浸出时间的继续延长, 浸出率不断下降, 这可能是因为 $\text{Fe}^{3+}$ 形成 $\text{NH}_4[\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6]$ 沉淀进入滤渣, 造成铁浸出率的下降。因此, 确定浸出时间为1 h。

### 2.5 氨溶液浸出影响

将 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 与镍磁黄铁矿400 °C焙烧2 h的产物

放入烧杯中, 加入氨-硫酸铵溶液进行浸出。图 5 所示为溶液中总氨浓度对焙烧产物中 Ni、Mg、Fe 和 Cu 浸出率的影响。

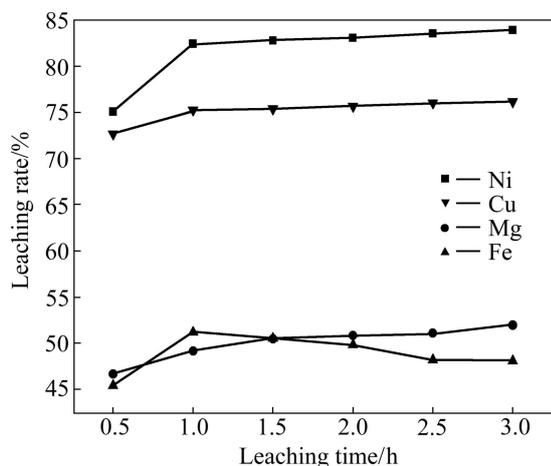


图 4 浸出时间对浸出率的影响

Fig. 4 Effect of leaching time on leaching rate

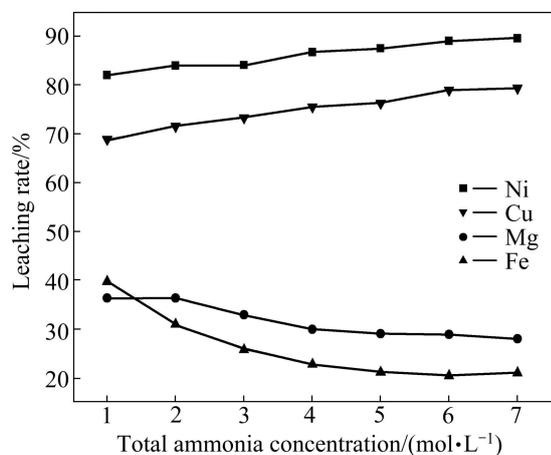
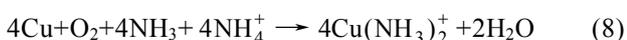
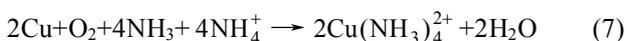


图 5 总氨浓度对浸出率的影响

Fig. 5 Effect of total ammonia concentration on leaching rate

从图 5 可看出, Mg 和 Fe 的浸出率随总氨浓度的增大而降低, 这主要是因为随总氨浓度增大, 溶液 pH 增大, Mg<sup>2+</sup>和 Fe<sup>2+</sup>水解沉淀, 浸出率下降。焙烧渣中未与硫酸铵反应的金属铜在氨性溶液中发生以下反应:



从而将剩余的金属铜溶解, 因此, Cu 的浸出率随总氨浓度增大而增大。Ni 的浸出率与 Cu 的浸出率变化大致相同, 这可能是因为 Cu 的络合物 Cu(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub><sup>2+</sup>和 Cu(NH<sub>3</sub>)<sub>2</sub><sup>+</sup> 在溶液中形成氧化还原电对, 而 φ[Cu(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub><sup>2+</sup>/Cu(NH<sub>3</sub>)<sub>2</sub><sup>+</sup>] 高达 0.2 V, 可将矿样中残留

的金属镍氧化浸出, Ni 的浸出率不断增大。总氨浓度为 7 mol/L 时, Ni 和 Cu 的浸出率分别为 89.56%和 79.35%。

## 2.6 浸出液 pH 值的影响

将(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>与镍磁黄铁矿 400 °C焙烧 2 h 后的产物放入烧杯中, 加入用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>调节至指定 pH 值的水溶液进行浸出。图 6 所示为浸出液 pH 值对焙烧产物中 Ni、Mg、Fe 和 Cu 浸出率的影响。由图 6 可看出, 在实验浸出液 pH 值范围内, 焙烧产物中的 Ni 和 Cu 的浸出率较高, 当 pH 为 0.5 时, Ni 和 Cu 浸出率分别为 83.10%和 75.39%, 且随 pH 值的增大, 浸出率变化不大; 而 Mg 和 Fe 的浸出率均较低, 当 pH 为 0.5 时, Mg 和 Fe 浸出率分别为 61.39%和 62.56%, 其中 Mg 的浸出率随 pH 值的增大而降低, 这主要是因为镍磁黄铁矿中含镁脉石矿物有蛇纹石、橄榄石、滑石、透闪石以及少量的绿泥石, 其中滑石和透闪石不溶于酸, 绿泥石溶于强酸; 蛇纹石和橄榄石的溶解度与溶液的酸度有关, 酸度越高, 溶解度越大。因此, 浸出液的酸度对镁的浸出率影响较大<sup>[16]</sup>。

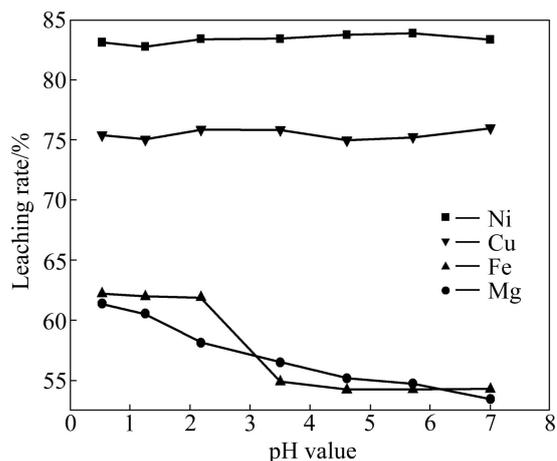


图 6 浸出液 pH 值对浸出率的影响

Fig. 6 Effect of pH value of leaching solution on leaching rate

Fe 的浸出率在 pH 值较低时变化较小, 当 pH 值大于 2.7 时, 由于 Fe<sup>3+</sup>在 pH 值 3.7 时就沉淀完全, 因此, Fe 的浸出率随 pH 值的增大而下降。

## 3 讨论

为了进一步对硫酸铵焙烧浸出镍磁黄铁矿的机理进行研究, 本研究对硫酸铵焙烧后矿样和水浸后滤渣

分别进行了扫描电镜-能谱分析。试验中硫酸铵用量为 8 g, 焙烧温度为 400 °C, 浸出水溶液 pH 值为 0.5。图 7 和 8 所示分别为硫酸铵焙烧后矿样和水浸后滤渣的 SEM 像和 EDS 谱。

由图 7 看出, 硫酸铵焙烧后矿样中主要含有的元

素为 Ni、Cu、Mg、Fe、Si 和 S。焙烧产物经水溶液浸出后, 溶于水的  $\text{NiSO}_4$  和  $\text{CuSO}_4$  等硫酸盐进入水溶液, 由图 8 所示面扫描能谱分析看出, 滤渣中的元素主要是 Si 元素, 金属元素 Ni 和 Cu 大部分被浸出, 滤渣中仅含有少量的 Ni 和 Cu 元素; 而 Mg 和 Fe 还有

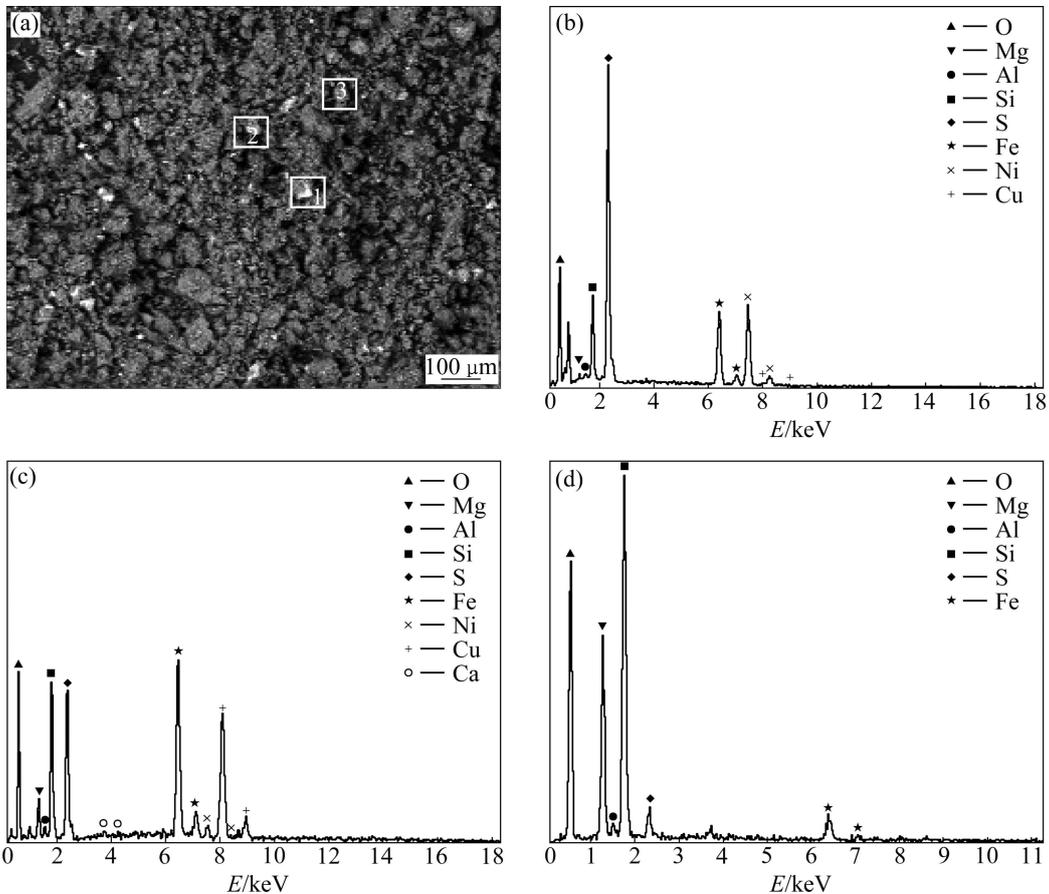


图 7 硫酸铵焙烧后矿样的 SEM 像和 EDS 谱

**Fig. 7** SEM image and EDS spectra of roasted ore: (a) SEM image; (b) EDS spectrum of pot 1 in Fig. 7(a); (c) EDS spectrum of pot 2 in Fig. 7(a); (d) EDS spectrum of pot 3 in Fig. 7(a)

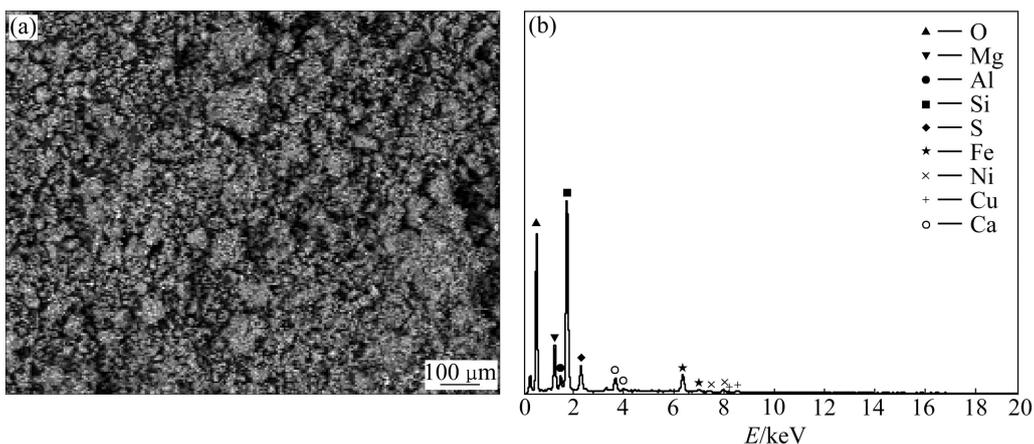


图 8 水浸后滤渣的 SEM 像(a)和面 EDS 谱(b)

**Fig. 8** SEM image of leaching residue (a) and EDS spectrum of surface scanning (b)

一部分未被浸出, 由浸出渣的 XRD 谱(见图 9)看出, Mg 和 Fe 与矿石中的蛇纹石和橄榄石等脉石矿物在高温下生成铁酸钙和硅酸镁等物质, 而铁酸钙和硅酸镁等较难与硫酸反应, 因此, Mg 和 Fe 的浸出率较低。

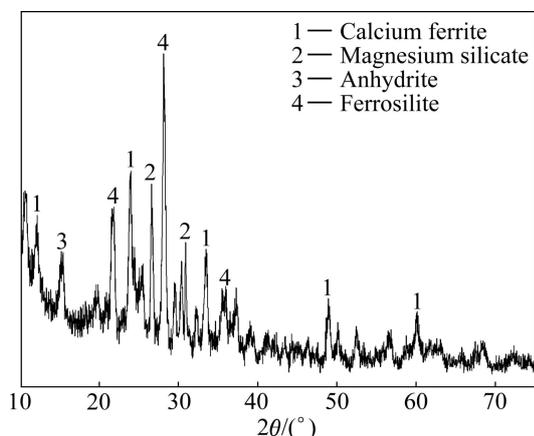


图 9 浸出后滤渣的 XRD 谱

Fig. 9 XRD pattern of leaching residue

## 4 结论

1) 镍磁黄铁矿与 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 的混合物焙烧后, 采用水溶液、稀硫酸溶液和氨性溶液浸出, 在不同情况下, Ni 和 Cu 的浸出率都较高, Mg 和 Fe 的浸出率都较低。

2) 氨性溶液更有利于 Ni 和 Cu 的浸出, 且金属铜的存在促进了 Ni 元素的溶解浸出。在总氨浓度为 7 mol/L 时, Ni 和 Cu 的浸出率分别为 89.56% 和 79.35%。

3) 在低 pH 值下, Mg 和 Fe 的浸出率较高, 且浸出率随 pH 值的升高而降低。在 pH 值为 0.5 时, Mg 和 Fe 的浸出率分别为 58.12% 和 62.56%。

4) 由扫描电镜-能谱分析可知, Ni 和 Cu 大部分被浸出, 浸出渣中主要含有 Si、Mg 和 Fe。由 XRD 分析可知, Mg 和 Fe 与矿石中的蛇纹石和橄榄石等脉石矿物在高温下生成铁酸钙和硅酸镁等物质, 较难与硫酸反应, 造成 Mg 和 Fe 的浸出率较低。

## REFERENCES

[1] ZHEN Shi-jie, QIN Wen-qing, YAN Zhong-qiang, ZHANG Yan-sheng, WANG Jun, REN Liu-yi. Bioleaching of low grade nickel sulfide mineral in column reactor [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(6): 1480-1484.

[2] 孙彦峰. 氧化亚铁硫杆菌浸出金川低品位镍黄铁矿的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2007: 15-18.  
SUN Yan-feng. Study on bioleaching of low-grade nicopyrite in Jinchuan by *Thiobacillus ferrooxidans* [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007: 15-18.

[3] 甄世杰. 金川高镁型低品位硫化镍矿生物浸出的应用基础与技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010: 6-12.  
ZHEN Shi-jie. Application basis and technology research on the bioleaching of Jinchuan low grade nickel-bearing sulfide ore containing high magnesium [D]. Changsha: Central South University, 2010: 6-12.

[4] 李洪枚, 柯家骏. 细菌浸出磁黄铁矿机制的研究[J]. 稀有金属, 2005, 29(6): 880-884.  
LI Hong-mei, KE Jia-jun. Mechanism of leaching pyrrhotite by *Acidithiobacillus ferrooxidans* [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2005, 29(6): 880-884.

[5] 马建青. 金川硫化镍贫矿矿物组成对细菌浸出的适应性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2005: 14-18.  
MA Jian-qing. Adaptation of bacterial leaching on poor mineral composition of Jinchuan nickel sulfide [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2005: 14-18.

[6] KE J J, LI H M. Bacterial leaching of nickel-bearing pyrrhotite [J]. Hydrometallurgy, 2006, 82: 172-175.

[7] QIN W Q, ZHEN S J, YAN Z Q, CAMPBELL M, WANG J. Heap bioleaching of a low-grade nickel-bearing sulfide ore containing high levels of magnesium as olivine, chlorite and antigorite [J]. Hydrometallurgy, 2009, 98: 58-65.

[8] ZHEN S J, YAN Z Q, ZHANG Y S, WANG J, CAMPBELL M, QIN W Q. Column bioleaching of a low grade nickel-bearing sulfide ore containing high magnesium as olivine, chlorite and antigorite [J]. Hydrometallurgy, 2009, 96: 337-341.

[9] 李洪枚, 柯家骏. 细菌浸出金川含镍磁黄铁矿混合精矿的研究[J]. 矿冶, 2002, 11(S): 157-160.  
LI Hong-mei, KE Jia-jun. Bioleaching Jinchuan nickel pyrrhotite mixed concentrate [J]. Mining and Metallurgy, 2002, 11(S): 157-160.

[10] 廖乾. 金川低品位镍矿矿物学特性及选矿工艺技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010: 3-6.  
LIAO Qian. Study on mineralogy process and beneficiation technology of nickel ore with low-grade in Jinchuan [D]. Changsha: Central South University, 2010: 3-6.

[11] 王伟, 顾惠敏, 翟玉春, 戴永年. 硫酸铵焙烧法从低品位菱镁矿提取镁及其反应动力学研究[J]. 分子科学学报, 2009, 25(5): 305-310.  
WANG Wei, GU Hui-min, ZHAI Yu-chun, DAI Yong-nian. The research of magnesium extracted from low-grade magnesite by ammonium sulfate calcining method and the reaction kinetics [J]. Journal of Molecular Science, 2009, 25(5): 305-310.

[12] WANG M Y, WANG X W. Extraction of molybdenum and nickel from carbonaceous shale by oxidation roasting sulphation

- roasting and water leaching [J]. *Hydrometallurgy*, 2010, 102: 50–54.
- [13] GUO X Y, LI D, PARK K H, TIAN Q H, WU Z. Leaching behavior of metals from a limonitic nickel laterite using a sulfation- roasting-leaching process [J]. *Hydrometallurgy*, 2009, 99: 144–150.
- [14] 杨仲平, 靳晓珠, 朱国才. 铵盐焙烧法处理低品位锰矿的工艺研究[J]. *中国锰业*, 2006, 24(3): 12–14.
- YANG Zhong-ping, JIN Xiao-zhu, ZHU Guo-cai. Process of techniques researches on low-grade manganese ore by roasting with ammonium salt [J]. *China's Manganese Industry*, 2006, 24(3): 12–14.
- [15] 朱国才, 李赋屏, 肖明贵. 采用硫酸铵焙烧方法从低品位碳酸锰矿中富集回收锰[J]. *桂林工学院学报*, 2005, 25(4): 534–537.
- ZHU Guo-cai, LI Bing-ping, XIAO Ming-gui. Process of enriching and recovering Mn by roasting the low-grade manganese carbonate ore with ammonium sulfate [J]. *Journal of Guilin University Technology*, 2005, 25(4): 534–537.
- [16] 胡显智. 高镁矿石酸浸降镁及浸出液综合利用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2001: 56–60.
- HU Xian-zhi. Removal of magnesium oxide from high MgO content ores using sulfuric acid method and comprehensive utilization of the leaching solution [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2001: 56–60.

(编辑 何学锋)