

用黄钠铁矾渣制备复合镍锌铁氧体

阳征会¹, 龚竹青¹, 李宏煦², 陈文汨¹, 龚 胜¹

- (1. 中南大学 冶金科学与工程学院, 湖南 长沙, 410083;
2. 北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京, 100083)

摘要: 对黄钠铁矾渣制备复合镍锌铁氧体进行研究。研究表明: 当黄钠铁矾渣与无烟煤按质量比为 5:1 均匀混合, 在 800 °C 还原焙烧 0.5 h, 焙烧渣用 0.5 mol/L 硫酸溶液按液固比 7:1 在 70 °C 浸出 40 min 时, 渣中 93% 的铁和镍进入浸出液中。浸出液经过净化除杂后得到含镍的硫酸亚铁溶液, 加入计量的硫酸镍和硫酸锌, 采用共沉淀法, 以 NH_4HCO_3 为沉淀剂, 通过改变沉淀剂的用量控制 pH 值制备镍锌铁碳酸盐。将镍锌铁碳酸盐在 800 °C 煅烧 2 h 得到具有尖晶石结构的 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 粉体, 粒径约为 59 nm, 粒度均匀, 呈球形; 煅烧 4 h 时粉体粒径变大, 粒度不均匀, 呈棒状。

关键词: 黄钠铁矾; 浸出; 共沉淀法; 镍锌铁氧体; 纳米粒子

中图分类号: TQ138.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7207(2006)04-0685-07

Preparation of Ni-Zn ferrite from sodium jarosite residue

YANG Zheng-hui¹, GONG Zhu-qing¹, LI Hong-xu², CHEN Wen-mi¹, GONG Sheng¹

- (1. School of Metallurgical Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Metallurgical and Ecological Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: The preparation of Ni-Zn ferrite from sodium jarosite residue was studied. The results show that when the mass ratio of sodium jarosite residue to anthracite is 5:1, reduction roast lasts at 800 °C for 0.5 h, leaching is carried out at 70 °C for 40 min by 0.5 mol/L H_2SO_4 with liquid-solid ratio of 7:1, 93% of both iron and nickel can be leached out. Then appropriate amounts of NiSO_4 and ZnSO_4 are added into the purified leaching solution. When NH_4HCO_3 solution is used as co-precipitated reagent, the precipitation of carbonate is obtained by changing NH_4HCO_3 amount to control the pH value. Uniform spheroidal spinel type $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ powders with size of 59 nm are obtained by calcining the precipitate at 800 °C for 2 h, and disparity rod-like powders with increasing sizes are obtained when calcining time is 4 h.

Key words: sodium jarosite; leaching; co-precipitation method; Ni-Zn ferrite; nanoparticle

在湿法冶金和无机化工生产中, 当有较大量的铁需要除去时, 目前广泛采用具有良好过滤性能的黄钠铁矾除铁工艺。在黄钠铁矾法除铁过程中, 会形成 5%~8% 的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$, 这种胶体沉淀对有色金属离子具有较强的吸附能力, 因而废渣中含有一定量的镍、铜、钴和铜等有色金属及其他贵金属。

大量的黄钠铁矾废渣如果不加以处理和利用而长期堆放, 既占用土地、浪费资源, 又污染环境。随着社会的发展和技术的进步, 金属铁的应用领域得到拓展, 而且各种金属资源越来越紧缺, 含铁废渣的资源化研究和利用金属废渣开发新产品正受到各国科研工作者的广泛关注^[1-9]。目前, 对黄钠铁矾渣的

收稿日期: 2005-11-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50204001)

作者简介: 阳征会(1969-), 男, 湖南邵阳人, 博士研究生, 从事功能材料研究

通讯作者: 阳征会, 男, 博士研究生; 电话: 13054165178(手机); E-mail: oyzhenghui@sina.com

处理, 一般采用烘焙^[10]、酸溶^[11]、热分解^[12]和碱溶等方法。在上述处理方法中, 碱溶产物中铁成分复杂, 主要以 Fe₂O₃, FeOOH 和 Fe₃O₄ 等形式存在, 使有价金属和铁的分选很困难; 直接酸溶虽然能使黄钠铁矾分解, 但硫酸浸工艺, 取高价铁的反应速度慢; 热分解或烘焙虽然能回收其中有价金属和贵金属, 但得到的氧化铁杂质含量过高, 铁的利用困难。在此, 本文作者对某镍冶炼厂黄钠铁矾渣采用还原焙烧—酸浸工艺, 得到浸出液, 其中主要物质是硫酸亚铁和硫酸镍的混合溶液, 经过净化除杂后, 按计量加入硫酸锌并补加硫酸镍, 再通过共沉淀法制备镍锌铁氧体粉体。该工艺过程简单, 工艺条件易于控制, 为黄钠铁矾渣的有效利用提供了新的途径。

1 实验

1.1 原料与试剂

原料为: 黄钠铁矾渣, 取自某镍钴冶炼厂。采用 X 射线荧光光谱法分析渣中元素含量, 结果如表 1 所示。试剂为: 无烟煤, 粉碎后粒度小于 180 μm; 硫酸、硫酸锌、硫酸镍和碳酸氢铵, 均为分析纯试剂。

表 1 黄钠铁矾渣组成

Table 1 Composition of sodium jarosite residue *w / %*

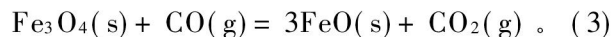
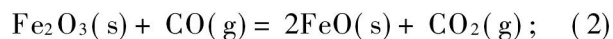
Fe	Ni	Co	Mg	Al	Na
28.750	2.625	0.003	0.031	0.452	4.58
Pb	SiO ₂	As	Ba	Ca	
0.086	0.369	0.450	8.785	0.198	

1.2 仪器

仪器有: 马弗炉(长沙中华电炉厂制造); 日本理学 D/max-rA 型 X 射线衍射仪; PS-6 真空型电感耦合等离子体原子发射光谱仪; 日本 JEOL JSM-6360LV 扫描电镜仪; 飞利浦 2424 X 射线荧光分析仪; Metter Toledo TGA-SDTA 热分析仪。

1.3 实验方法

将烘干后的黄钠铁矾渣与无烟煤按一定比例混合均匀置于坩埚中, 经马弗炉进行高温还原焙烧, 还原温度在 900 °C 以下, 矾渣中的铁被还原为二价铁, 基本上不会生成金属铁。硫酸镍在此条件下不能被还原, 仍然以硫酸镍的形式存在于焙烧渣中, 其基本反应为:



焙烧渣在一定的温度下用硫酸浸取, 经过滤得到含 Na⁺, Fe²⁺ 和 Ni²⁺ 等的硫酸盐溶液, SiO₂, Ba 和 Pb 盐等杂质大部分留在滤渣中。酸浸液经过净化除杂后, 按 Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄ 计量加入硫酸锌并补加硫酸镍, 将镍、锌、铁的硫酸盐溶液缓慢加到有表面活性剂的碳酸氢铵溶液中, 通过控制碳酸氢铵的用量使反应终点 pH 值为 7.2 左右。过滤, 然后将反应得到的沉淀洗涤至无 SO₄²⁻, 干燥粉碎, 于马弗炉中进行高温煅烧得到复合镍锌铁氧体粉末。黄钠铁矾渣制备镍锌铁氧体的工艺流程如图 1 所示。

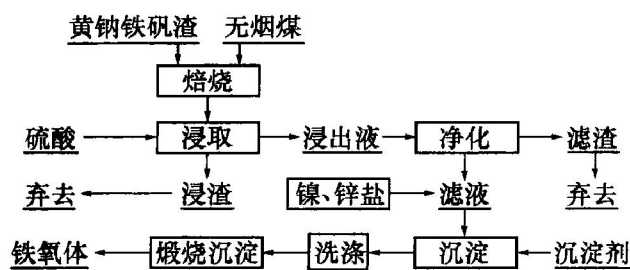


图 1 黄钠铁矾渣制备镍锌铁氧体的流程图

Fig. 1 Flow sheet for preparation of Ni-Zn ferrite from sodium jarosite residue

2 结果与分析

2.1 黄钠铁矾渣的热分析与物相分析

图 2 所示为黄钠铁矾渣的热重-差热(TG-DTA)分析曲线; 图 3 所示为黄钠铁矾渣的 X 射线衍射(XRD)图谱; 图 4 所示为不同温度焙烧后黄钠铁矾渣的 XRD 图谱。在 TG-DTA 曲线上, 于 189.06 °C 出现第 1 个吸热峰, 质量损失率约为 5.6%。比较图 3 和图 4 中 190 °C 时的谱线, 可以发现

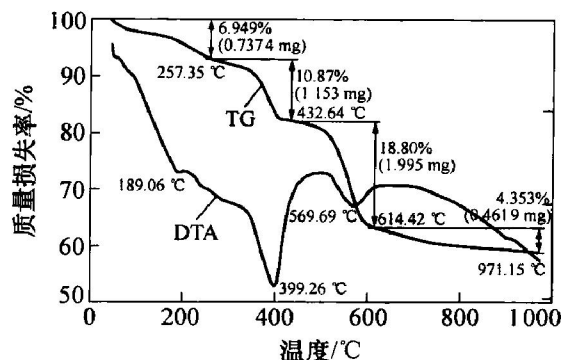


图 2 黄钠铁矾渣的热分析曲线

Fig. 2 TG-DTA curves of sodium jarosite residue

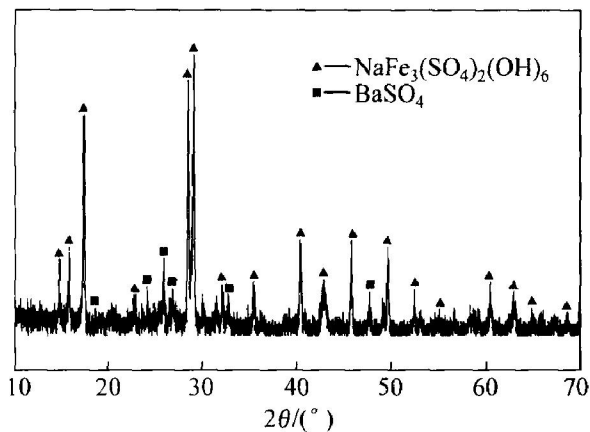


图 3 黄钠铁矾渣的 X 射线衍射图谱

Fig. 3 XRD pattern of sodium jarosite residue

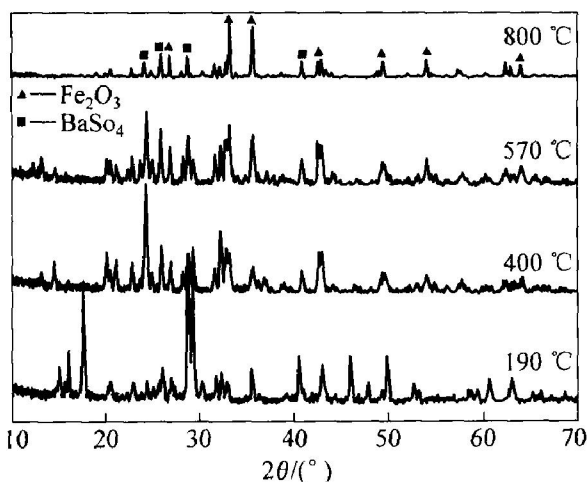
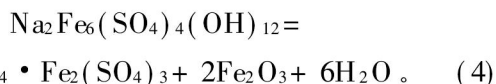


图 4 黄钠铁矾渣在不同焙烧温度的 X 射线衍射图谱

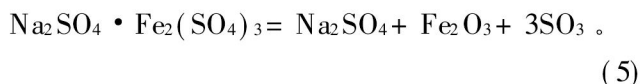
Fig. 4 XRD patterns of sodium jarosite residue roasted at different temperatures

两者没有明显变化, 也就是说, 在此温度下黄钠铁矾没有分解, 渣中的硫酸镍失去结晶水, 根据渣中镍含量可计算得于 100 °C 干燥后渣中镍化合物为七水合硫酸镍。

于 399.26 °C 出现第 2 个吸热峰, 质量损失率约为 10%, 表明黄钠铁矾晶格破坏, 矾结晶水被脱除, 氧化铁开始生成。图 4 中相应的 XRD 谱线也证明黄钠铁矾开始分解, 生成氧化铁。相应的反应如下:



于 569.69 °C 出现第 3 个吸热峰, 质量损失率约为 19%, 图 4 中相应的 XRD 谱线出现明显的氧化铁和硫酸钡的特征谱线, 表明复盐分解加剧, 硫酸钡没有分解, 反应如下:



800 °C 时体系恒重, 无明显热效应, 黄钠铁矾中的铁完全分解成氧化铁, 体系的质量损失率共为 35.6%, 与黄钠铁矾分解和水合硫酸镍失去结晶水的计算结果相符, 说明在此温度下硫酸镍、硫酸钡没有分解。图 4 中相应的 XRD 谱线也证实主要产物为氧化铁和硫酸钡, 即在此温度下, 分解产物是氧化铁和硫酸钡及少量其他金属盐或氧化物的混合物。

2.2 还原焙烧工艺条件对浸出率的影响

还原焙烧的目的是为了得到二价铁, 因此, 焙烧渣中铁的还原浸出率为浸出液中的亚铁量与黄钠铁矾中的总铁质量之比, 而不是浸出液中总铁质量与黄钠铁矾中的总铁质量之比。镍的浸出率则为浸出液中的镍质量与黄钠铁矾中的总镍质量之比。

2.2.1 焙烧温度

用无烟煤作还原剂, 在不同温度条件下进行黄钠铁矾的还原焙烧, 焙烧时间为 1 h, 焙烧渣在固定的酸浸条件下浸出, 考察还原焙烧温度对铁镍浸出率的影响, 实验结果如图 5 所示。可见, 在 800 °C 以下, 随着温度的升高, 铁的还原浸出率不断升高, 这是由于温度升高, 有利于黄钠铁矾渣的分解, 同时也有利于加快 Fe₂O₃ 还原的速率, 当温度高于 800 °C 后, 铁的浸出率增加不明显。800 °C 时黄钠铁矾渣已分解完全, 铁的还原浸出率也超过 90%, 温度再升高已无必要。镍的浸出率随黄钠铁矾渣焙烧温度的升高有类似的规律, 但当焙烧温度超过 800 °C, 镍的浸出率反而有所下降, 可能有难溶于酸的镍铁氧体生成, 使铁、镍的浸出率都降低。因此, 实验中选择还原焙烧温度为 800 °C。

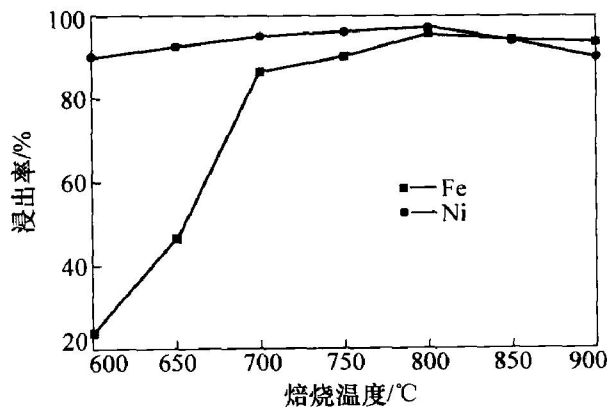


图 5 还原焙烧温度对浸出率的影响

Fig. 5 Effect of roast temperature on leaching rate

2.2.2 无烟煤的用量

控制其他反应条件不变, 改变无烟煤的加入量, 即改变黄钠铁矾渣与无烟煤的质量比, 考察还

原剂用量对浸出率的影响, 实验结果如图 6 所示。可见, 还原剂的用量对镍的浸出率没有明显的影响, 但当黄钠铁矾渣与无烟煤的质量比大于 5: 1 时, 铁的还原浸出率呈现明显的下降趋势。其原因是镍在铁矾渣焙烧前、后都以硫酸镍形式存在, 而铁在黄钠铁矾中为三价铁, 还原焙烧时 Fe(III) 被还原为 Fe(II), 随着黄钠铁矾渣与煤的质量比增大, 无烟煤用量减少, Fe(III) 被还原的量减少, 铁的还原浸出率降低, 当黄钠铁矾渣与无烟煤的质量比为 5: 1 时, Fe(III) 已基本上被还原为 Fe(II), 减少黄钠铁矾渣与煤的质量比即增加无烟煤用量, 铁的浸出率变化不大, 因此, 实验中选择黄钠铁矾渣与煤的质量比为 5: 1。

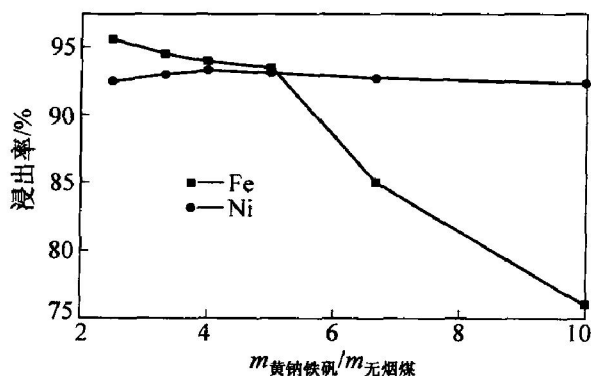


图 6 无烟煤用量对浸出率的影响

Fig. 6 Effect of anthracite amount on leaching rate

2.2.3 焙烧时间

控制其他条件不变, 改变焙烧时间, 考察焙烧时间对浸出率的影响, 实验结果如图 7 所示。可见, 焙烧时间对铁的还原浸出率和镍的浸出率有很大的影响。这是由于焙烧时间太短, 黄钠铁矾分解不彻底, Fe(III) 还原率低, 镍的浸出率也低, 0.5 h 基本

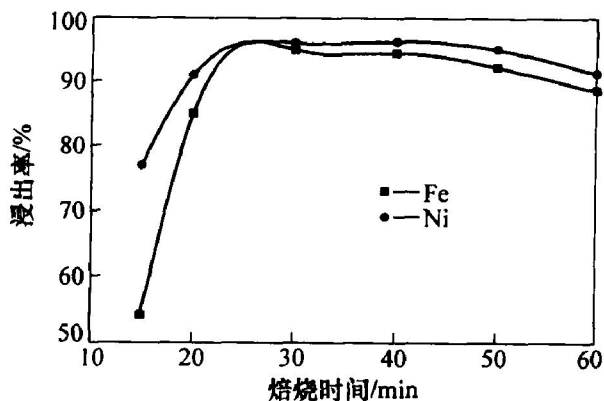


图 7 焙烧时间对浸出率的影响

Fig. 7 Effect of roast time on leaching rate

还原完全; 还原时间过长, 铁镍生成难溶于酸的镍铁氧体, 反而使浸出率下降。

综合上述条件实验可知, 黄钠铁矾的还原焙烧条件如下: 黄钠铁矾渣与无烟煤的质量比为 5: 1, 温度为 800 °C, 焙烧时间为 30 min。

2.3 硫酸浸取工艺对浸出率的影响

2.3.1 硫酸浓度

浸出液中 Fe²⁺ 浓度过高或过低都不利于铁氧体的制备^[13], 因此, 浸出实验中恒定硫酸溶液与焙烧渣的液固比 7: 1。焙烧渣在 80 °C 酸浸 1 h, 研究硫酸用量对浸出率的影响, 实验结果如图 8 所示。由于铁矾渣中镍含量低, 且硫酸镍易溶, 因此, 其浸出率几乎与硫酸浓度无关, 可达 95%; 而 Fe²⁺ 的浸出率随着硫酸浓度的增加而增加, 当硫酸的浓度为 0.7 mol/L 时, Fe²⁺ 的浸出率达到 95%; 继续增加硫酸的用量, 亚铁的浸出率呈下降趋势。这是由于大量硫酸的加入, 导致还原的亚铁离子被氧化, 可能发生的化学反应如下^[14]:

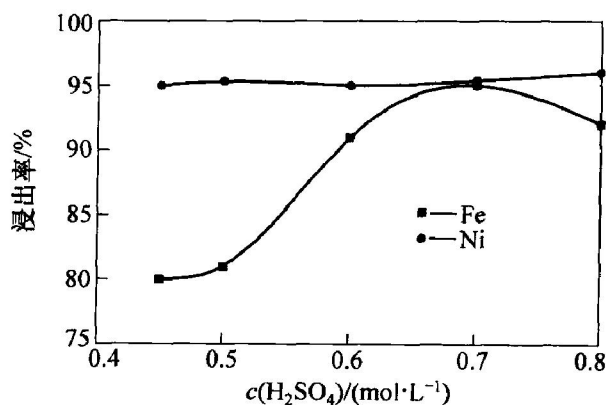
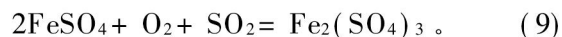
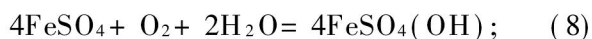
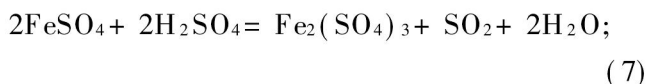


图 8 硫酸浓度对浸出率的影响

Fig. 8 Effect of concentration of H₂SO₄ on leaching rate

2.3.2 酸浸温度

在其他参数已确定的条件下, 研究酸浸温度对浸出率的影响, 实验结果如图 9 所示。可见, 浸出温度对镍的浸出率影响不大, 但对亚铁的浸出率影响很明显, 温度低时, 反应速度慢, 其浸出率低; 当酸浸温度达到 80 °C 时, 铁的浸出率达到 92% 以上。实验结果表明, 继续升温反而会使亚铁氧化, 亚铁的浸出率降低。

2.3.3 酸浸时间

固定其他浸出条件, 研究酸浸时间对浸出率的影响, 结果如图 10 所示。可见, 随酸浸时间的增加, 浸出率开始增加, 但当反应时间超过 40 min 后, 亚铁的浸出率反而下降。这是由于浸出温度较高, 时间过长, 会使部分亚铁离子氧化。

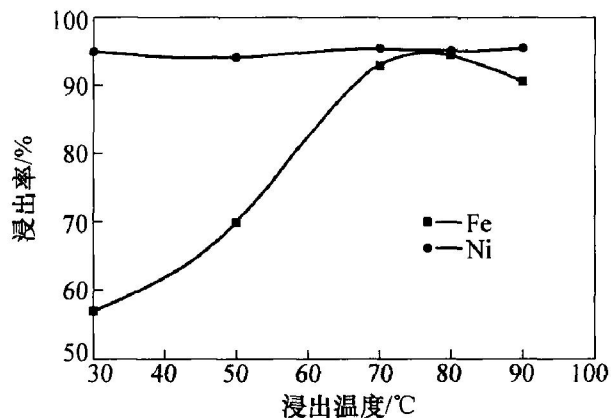


图 9 浸出温度对浸出率的影响

Fig. 9 Effect of leaching temperature on leaching rate

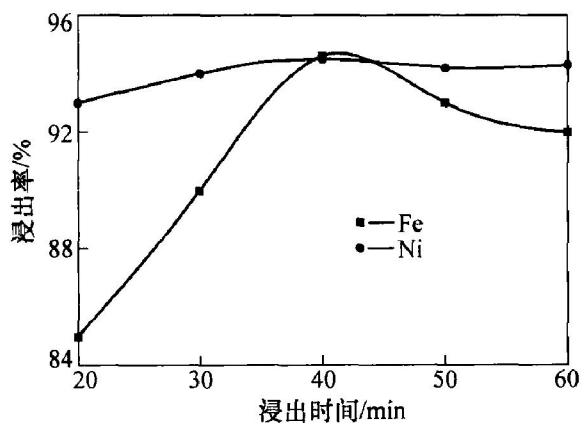


图 10 浸出时间对浸出率的影响

Fig. 10 Effect of leaching time on leaching rate

2.4 浸出液的净化

浸出液含有一定量的杂质, 实验中采用氧化絮凝方法除杂, 即先用氨水将浸出液的 pH 调节为 5.4, 然后通空气氧化使浸出液的 pH 降为 5.0, 再加入絮凝剂陈化一段时间, 过滤得到含 Na^+ , Fe^{2+} 和 Ni^{2+} 的硫酸盐溶液, 实验结果如表 2 所示。由表 2 可知, 净化后的溶液中杂质离子的含量低, 这说

表 2 浸出液净化前、后各元素含量

Table 2 Compositions of leaching solution before and after purification $\rho(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$

	Fe^{2+}	Ni^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	Mn^{2+}	Ca^{2+}	Ba^{2+}	Pb^{2+}	SiO_2
净化前	42.75	3.81	0.665	0.314	0.217	0.173	0.031	0.056	0.035
净化后	40.13	3.75	0.013	0.007	0.006	0.003	0.002	0.002	0.001

2.5 镍、锌、铁碳酸盐的制备

在镍、锌、铁碳酸盐沉淀制备过程中, 分析测定滤液中 Zn^{2+} , Fe^{2+} 和 Ni^{2+} 含量, 得到滤液中损失离子浓度与 pH 值的关系曲线, 如图 11 所示。可见, pH=6.9 时 Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 损失量最小, 而 Fe^{2+} 损失量最小时 pH 值为 7.5。这是因为 Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 与 NH_3 在较高的 pH 值易形成配离子, 损失量较大。为了获得符合 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 组成的共沉淀物, 适宜反应终点 pH 值约为 7.2。实验中控制碳酸氢铵的用量使反应终点 pH 值为 7.2, 碳酸氢铵用量与反应终点 pH 值的关系如图 12 所示。可见, 当碳酸氢铵用量是理论用量的 2 倍时, 反应终点 pH 值满足实验要求。

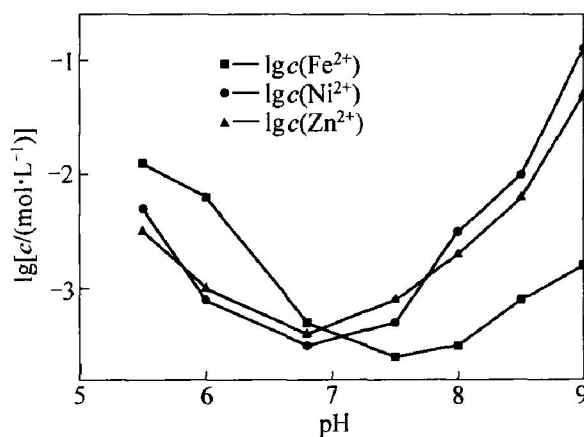


图 11 滤液中离子浓度与 pH 值关系

Fig. 11 Relationship between ion concentration of percolate and pH value

2.6 镍锌铁氧体粉体表征

将镍锌铁碳酸盐沉淀洗涤干燥后经过 800 °C 煅烧, 不同煅烧时间的产物 X 射线衍射分析结果如图 13 所示。与标准 JCPDS 对照可知, 图中所有产物的

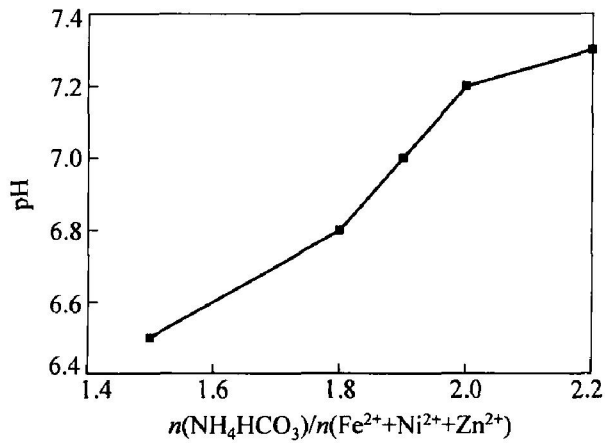


图 12 碳酸氢铵用量与 pH 值关系

Fig. 12 Relationship between amount of NH_4HCO_3 and pH value

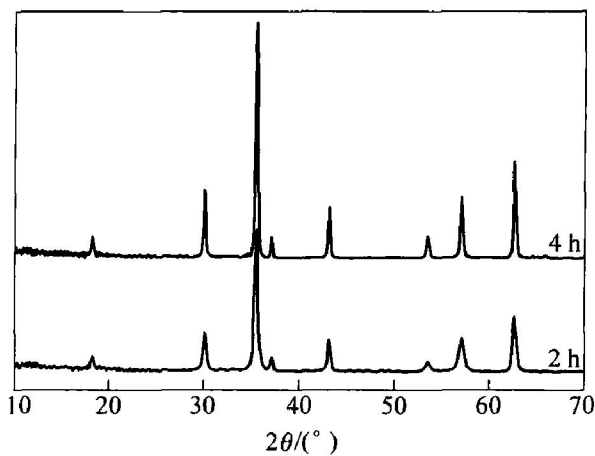


图 13 经 800 °C 煅烧的镍锌铁氧体 XRD 图谱

Fig. 13 XRD patterns of NiZn ferrite calcined at 800 °C for different times

时间延长而增大, 晶化较完全, 生成的晶体结构较完整。这也说明镍、锌、铁碳酸盐分解完成后就进入镍锌铁氧体晶粒长大过程, 煅烧时间延长, 晶粒变大。这是因为当煅烧时间延长时, 小颗粒逐渐扩散, 熔合成大颗粒。从图 14 所示的扫描电镜照片也将得到证实。对于 1~ 100 nm 的微粒, 若忽略其他方面的影响, 只考虑粒子的超细化和仪器宽化对衍射峰的影响, 则可利用 Scherrer 公式计算晶粒尺寸, 经计算得于 800 °C 热处理 2 h 后粉体平均粒径约为 59 nm。于 800 °C 煅烧 2 h 的粉体, 其杂质含量为: SiO_2 , 0.004%; Al_2O_3 , 0.005%; CaO , 0.01%; MgO , 0.01%; NaO , 0.001%; MnO , 0.01%; BaO , 0.000 1%; PbO , 0.000 1%; 主成分 Fe_2O_3 , 67.11%; ZnO , 17.13%; NiO , 15.68%。符合计算配方 $\text{Ni}_{10.5}\text{Zn}_{10.5}\text{Fe}_{20.4}$ 。

图 14 所示为煅烧不同时间的产物 $\text{Ni}_{10.5}\text{Zn}_{10.5}$

Fe_2O_4 粉体的扫描电镜(SEM)照片, 可见, 在 800 °C 下煅烧 2 h 的粉体, 颗粒近似球形, 分布较均匀, 有团聚现象, 颗粒尺寸为 50~ 80 nm; 煅烧 4 h 的粉体颗粒分布已经很不均匀, 颗粒形状不规则, 且颗粒与颗粒之间互相粘接成块。由此可见, 煅烧时间对颗粒大小影响很大。这是由于随着时间的延长, 小颗粒会熔解再结晶, 其微小球形颗粒相互粘接于一体, 球形粒子不再各自单一, 再结晶形成的颗粒也越大。所以, 随着煅烧时间的延长, 镍锌铁氧体的粒度变大。

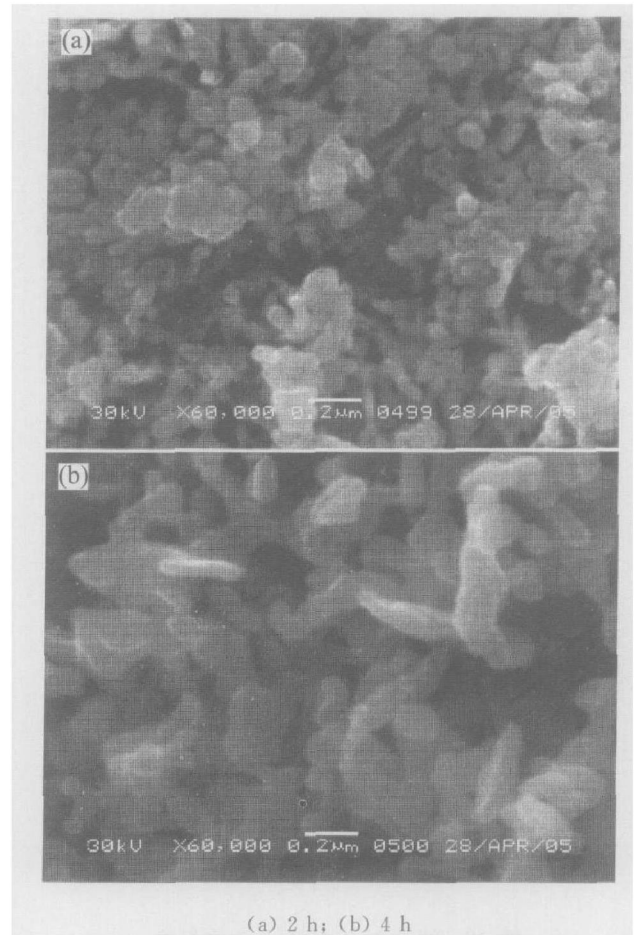


图 14 经 800 °C 煅烧不同时间的镍锌铁氧体扫描电镜照片

Fig. 14 SEM images of NiZn ferrite calcined at 800 °C for different times

3 结 论

a. 含镍黄钠铁矾渣在热分解过程中, 首先是镍的结晶水合物失去结晶水, 然后黄钠铁矾晶格被破坏, 矾结晶水被脱除, 生成氧化铁。

b. 黄钠铁矾与无烟煤均匀混合后经过还原焙烧, 可以使渣中 92% 以上的 $\text{Fe}(\text{III})$ 还原成 $\text{Fe}(\text{II})$ 并酸浸出来, 93% 左右的镍进入酸浸液。适宜的还原焙烧-酸浸条件是: 黄钠铁矾与无烟煤的质量比为

5: 1, 于 800 °C 焙烧 0.5 h; 焙烧渣酸浸条件是: 恒定硫酸溶液与焙烧渣的液固比 7: 1, 硫酸浓度为 0.5 mol/L, 浸出温度为 70 °C, 浸出时间为 40 min。

c. 将浸出液经过净化除杂后, 按 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 计量加入硫酸锌并补加硫酸镍, 用碳酸氢铵作沉淀剂, 并通过碳酸氢铵的用量控制反应终点 pH 值为 7.2 左右。然后, 将反应得到的沉淀洗涤至无 SO_4^{2-} , 干燥粉碎, 在 800 °C 煅烧 2 h 得到平均粒径约为 59 nm 的复合镍锌铁氧体粉体; 煅烧时间延长, 颗粒粒径增大。

参考文献:

- [1] Oborn I, Berggren D. Characterization of jarosite natrojarosite in two northern Scandinavian soils [J]. *Geoderma*, 1995, 66: 213 - 225.
- [2] Hage J L T, Schuiling R D, Vriend S P. Production of magnetite sodium jarosite under reducing hydrothermal conditions: the reduction of Fe^{3+} to Fe^{2+} with cellulose [J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 1999, 36(4): 267 - 276.
- [3] Agrawal A, Sahu K K, Pandey B D. Solid waste management in nonferrous industries in India [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2004, 42: 99 - 120.
- [4] Ding M, Schuiling R D, vander Sloot H A. Self-sealing isolation and immobilization: a geochemical approach to solve the environmental problem of waste acidic jarosite [J]. *Applied Geochemistry*, 2002, 17: 93 - 103.
- [5] 罗道成, 易平贵, 刘俊峰. 硫铁矿烧渣综合利用研究进展[J]. *工业安全与环保*, 2003, 29(4): 10 - 12.
LUO Dao-cheng, YI Ping-gui, LIU Jun-feng. Study and development on the comprehensive utilization of iron pyrite cinder [J]. *Industry Safety and Environmental Protection*, 2003, 29(4): 10 - 12.
- [6] 郑晓虹, 何晓云, 苏爱勤, 等. 用熟化法从硫铁矿烧渣中提取铁[J]. *环境工程*, 2003, 21(3): 49 - 51.
ZHENG Xiao-hong, HE Xiao-yun, SU Ai-qin, et al. Extracting iron from pyrite cinder by maturation [J]. *Environmental Engineering*, 2003, 21(3): 49 - 51.
- [7] 陶颖. 硫酸烧渣中铁浸取条件的研究及应用[J]. *无机盐工业*, 2003, 35(6): 42 - 43.
TAO Ying. The research and application of leaching condition of Fe in the sulphuric acid residue [J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2003, 35(6): 42 - 43.
- [8] 朱云贵, 施善友, 李学良, 等. 硫铁矿水热法合成纳米球形 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ [J]. *合肥工业大学学报*, 2003, 26(2): 264 - 267.
ZHU Yun-gui, SHI Shan-you, LI Xue-liang, et al. Nano sphere shaped $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ synthesized hydrothermally from pyrite slag [J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 2003, 26(2): 264 - 267.
- [9] 郑晓红, 陈力勤, 沈霖霖, 等. 硫铁矿渣中提取铁及在纳米 $\alpha\text{-FeOOH}$ 制备中的应用[J]. *应用化学*, 2003, 20(9): 871 - 874.
ZHENG Xiao-hong, CHEN Li-qin, SHEN Lin-lin, et al. Preparation of nanocrystalline $\alpha\text{-FeOOH}$ from Fe^{2+} extracted from pyrite cinder by reduction roasting method [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2003, 20(9): 871 - 874.
- [10] 沈奕林, 覃庶宏, 熊志军. 铁矾渣的处理及萃取提钢新工艺研究[J]. *有色金属: 冶炼部分*, 2001(4): 33 - 35.
SHEN Yi-ling, QIN Shu-hong, XIONG Zhi-jun. Handle with carphosiderite and natrojarosite and new technology of extractive In [J]. *Nonferrous Metals: Extractive Metallurgy*, 2001(4): 33 - 35.
- [11] 蔡继权, 方建铃. 黄钠铁矾除铁废渣的回收利用[J]. *化工环保*, 1992, 12(3): 186 - 187.
CAI Ji-quan, FANG Jian-ling. Recupere and utilize of carphosiderite and natrojarosite' waste [J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 1992, 12(3): 186 - 187.
- [12] 宁顺明, 陈志飞. 从黄钾铁矾渣中回收锌镉[J]. *中国有色金属学报*, 1997, 7(3): 56 - 58.
NING shun-ming, CHEN Zhi-fei. Recovery of zinc and indium from jarosite residues [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1997, 7(3): 56 - 58.
- [13] 陈吉春, 陈永亮. 硫铁矿烧渣还原酸浸制取硫酸亚铁[J]. *矿产综合利用*, 2004, 3(6): 42 - 45.
CHEN Ji-chun, CHEN Yong-liang. The preparation of ferrous sulfate from pyrite cinder by reduction roasting method [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2004, 3(6): 42 - 45.
- [14] 郑晓虹, 林智虹, 杨乔平, 等. 用还原焙烧法从硫铁矿烧渣中提取铁的研究[J]. *河南科学*, 2003, 21(6): 713 - 716.
ZHENG Xiao-hong, LIN Zhi-hong, YANG Qiao-ping, et al. Investigation of extracting iron from pyrite cinder by reductive roasting [J]. *Henan Science*, 2003, 21(6): 713 - 716.