

锰锌铁氧体废料的浸出工艺

彭长宏¹, 李景芬¹, 李基森²

(1. 中南大学 冶金科学与工程学院, 湖南 长沙, 410083;
2. 广东风华高新科技股份有限公司, 广东 肇庆, 526020)

摘要:以锰锌铁氧体废磁芯粉料为原料,研究硫酸浸出过程的工艺条件,分析浸出过程的动力学机理。实验结果表明,在液固比为3:1,搅拌速度为300 r/min的条件下,锰锌铁氧体废磁芯粉料硫酸浸出过程的最佳工艺条件是:硫酸用量为其理论量的1.15倍,反应温度为95~100℃,反应时间为4.5 h。在此优化条件下,4次综合实验的Fe、Mn和Zn平均浸出率分别为98.83%、98.80%和98.82%;锰锌铁氧体废磁芯粉料的硫酸浸出过程在动力学上属收缩核模型,受化学反应的控制,反应活化能为85.6 kJ/mol。

关键词:锰锌铁氧体废磁芯粉料;硫酸;浸出;动力学

中图分类号:O642.4;TQ136.1

文献标识码:A

文章编号:1672-7207(2009)01-0019-06

Leaching process of waste Mn-Zn ferrites powder

PENG Chang-hong¹, LI Jing-fen¹, LI Ji-sen²

(1. School of Metallurgical Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Guangdong Fenghua Hi-tech Co. Ltd., Zhaoqing 526020, China)

Abstract: Using waste Mn-Zn magnetic core powders as the raw material, the leaching conditions of sulfuric acid were studied and the leaching kinetics mechanism was also analyzed. The results show that when liquid-solid ratio is 3:1 and the stirring speed is 300 r/min, the optimal leaching conditions can be determined by single factor experimental method and the optimal leaching conditions are as follows: The content of sulfuric acid is 1.15 times of its theoretical content, reaction temperature is 95–100 °C and leaching time is 4.5 h. Under above optimal conditions, four times comprehensive experiments were carried out and the average leaching rates of main metals of Fe, Mn and Zn are 98.83%, 98.80% and 98.82%, respectively. The leaching process with activation energy of 85.6 kJ/mol can be described by the shrinking core model and controlled by chemical reaction.

Key words: waste Mn-Zn ferrite magnetic core powder; sulfuric acid; leaching; kinetics

锰锌铁氧体材料是现代电子工业及信息产业的基础功能材料。随着通讯、计算机和网络等电子信息技术的迅猛发展,锰锌铁氧体的市场需求量以年均20%的速度增长^[1]。在锰锌铁氧体磁芯的制备过程中,难以避免地产生10%~20%的废料(含废器件或抛光料)。2005年国内锰锌铁氧体产量为20~30万t/a,按15%

的废料产生量计算,原料损失3.0~4.5万t/a。原材料价格按12000元/t计算,损失3.6~4.5亿元/a。目前,国内外对锰锌铁氧体废料的处理技术有烧结填埋或闲置堆存或出售给模具公司作配料,不能实现废料的高价值利用。目前,锰锌铁氧体的制备方法有陶瓷法、湿化学法^[2-5]和直接法。直接法技术结合湿法冶金、无机

收稿日期:2008-02-05;修回日期:2008-04-28

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06Z373);广东省一教育部产学研专项基金资助项目(2006D904032);中国博士后科研基金资助项目(20060400884);广东省科技计划项目(2008A080403007)

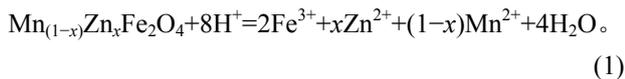
通信作者:彭长宏(1966-),男,湖南长沙人,博士,从事直接法制备锰锌铁氧体功能材料及新型离子液体合成与应用研究;电话:13467609637;E-mail: peng9013@163.com

化工和磁性材料等学科理论,由矿物原料直接制备锰锌铁氧体材料^[6]。该技术已用于共沉淀粉 500 t/a 工业试验,制备出性能指标与 PC30 铁氧体的相同^[7]。但是,由于矿物原料成分复杂,目前未见采用直接法制备高性能铁氧体的研究报道。鉴于锰锌铁氧体产品中杂质成分含量低,以锰锌铁氧体废料为原料,有望制备高性能锰锌铁氧体材料。但是,锰锌铁氧体尖晶石结构非常稳定,实现锰锌铁氧体废料中各有价成分的有效溶出,是锰锌铁氧体废料制备高性能锰锌铁氧体的前提和基础。为此,本文作者在热力学分析的基础上,研究锰锌铁氧体废料硫酸浸出过程的工艺条件,探索浸出过程的动力学机理。

1 实验基本原理

1.1 反应原理

锰锌铁氧体废磁芯粉料浸出过程的基本反应为:



在 Fe, Mn 和 Zn 3 种主成分进入浸出液的同时, Si, Ca, Mg, Al, Pb, Ni 和 Cr 等杂质元素也进入溶液中。

1.2 热力学分析

在此反应过程中无电子迁移,仅消耗 H^+ 的化学反应,可表达为^[8]:



该反应的吉布斯自由能方程为:

$$\Delta_r G_T = \Delta_r G_T^\ominus + RT \ln \frac{a_B^b}{a_A^a \times a_{\text{H}^+}^n} \quad (3)$$

其中: T 为热力学温度; $\Delta_r G_T$ 为反应在 T 时的吉布斯自由能变化值; $\Delta_r G_T^\ominus$ 为物质在 T 时的标准摩尔吉布斯自由能; R 为摩尔气体常数; a_A , a_B 和 a_{H^+} 分别为反应平衡时 A, B 和 H^+ 的活度。

当反应处于平衡状态时, $\Delta_r G_T = 0$, 则有:

$$\text{pH}_T = \frac{-\Delta_r G_T^\ominus}{2.303nRT} - \frac{1}{n} \lg \frac{a_B^b}{a_A^a} \quad (4)$$

在实际操作中,常用 pH_T^\ominus 来判断反应所需的酸度。当活度 $a_A = a_B = 1.0$ 时, pH_T 定义为 pH_T^\ominus , 即:

$$\text{pH}_T^\ominus = \frac{-\Delta_r G_T^\ominus}{2.303nRT} \quad (5)$$

以 $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 为例,进行反应式(1)所需酸度的相

关计算。

依据文献[9]可查出在 100 °C 时的有关热力学数据,有:

$$\Delta_r G_T^\ominus = 2\Delta_r G_T^\ominus(\text{Fe}^{3+}) + \Delta_r G_T^\ominus(\text{Zn}^{2+}) + 4\Delta_r G_T^\ominus(\text{H}_2\text{O}) - \Delta_r G_T^\ominus(\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3) - 8\Delta_r G_T^\ominus(\text{H}^+) = 6.653 \text{ kJ/mol}.$$

根据式(5),可以计算在 100 °C 时,溶解 $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 所需酸度:

$$\text{pH}_T^\ominus = \frac{-\Delta_r G_T^\ominus}{2.303nRT} = \frac{-6.653 \times 10^3}{2.303 \times 8 \times 8.314 \times 373} = -0.15.$$

即: $c(\text{H}^+) = 1.412 \text{ mol/L}$ 。

同理,可计算出溶解 $\text{MnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 Fe_3O_4 所需的 pH_T^\ominus 值分别为 -0.38 和 0.043,换算成浸出剂所需的酸度,分别为 2.415 和 0.905 mol/L。

pH_T^\ominus 在热力学上是用来衡量反应(2)的酸浸出难易程度, pH_T^\ominus 越大,酸浸出越易,锰锌铁氧体废料中各组分溶出先后顺序是 Fe_3O_4 , $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\text{MnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 。即当 $c(\text{H}^+) \geq 2.415 \text{ mol/L}$ 时,可以实现锰锌铁氧体废料中 Fe, Mn 和 Zn 3 种成分的有效溶出;当 $0.905 \leq c(\text{H}^+) \leq 2.415 \text{ mol/L}$ 时,只能实现部分成分的溶出。

2 实验

2.1 原材料、试剂及仪器

a. 实验原料:锰锌铁氧体废磁芯粉料,取自浙江横店集团东磁股份有限公司,其化学成分见表 1。

表 1 锰锌铁氧体废磁芯粉料(WMZF)的化学成分

Table 1 Chemical composition of waste Mn-Zn ferrite powder				
ferrite powder				w/%
Fe	Mn	Zn	CaO	MgO
49.560	16.010	5.750	0.160	0.031
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO	MoO ₃
0.015	0.061	0.078	0.039	0.011

b. 实验试剂:浓硫酸(工业纯, 17.73 mol/L, 产自株洲冶炼厂);蒸馏水(25 °C, 电导率为 10 kΩ·m, 自制)。

c. 实验仪器: JHS-1/90 电子恒速搅拌器(杭州仪表电机厂制造); 1 000 W 数字控温万用电炉(DK-98 II 型, 天津市泰斯特仪器有限公司制造)。

2.2 实验方法

固定液固比为 3:1, 搅拌速度为 300 r/min, 采用

单因素实验方法, 分别考察硫酸用量、反应温度和反应时间等对锰锌铁氧体废磁芯粉料中 Fe, Mn 和 Zn 浸出率的影响规律。工艺条件实验研究的规模为 100 g/次, 综合条件实验研究的规模为 1 kg/次, 实验完毕过滤, 量取浸出液体积, 测定浸出液中主金属 Fe, Mn 和 Zn 的含量, 计算主金属的浸出率。反应在 500 mL 或 5 L 的三口烧瓶中进行, 工艺条件实验采用磁力搅拌, 综合实验采用机械搅拌。

2.3 分析检测

Mn²⁺采用硫酸亚铁铵滴定法检测, 以过硫酸铵作氧化剂; Zn²⁺采用 EDTA 滴定法, 并辅以萃取法检测; Fe³⁺采用重铬酸钾滴定法检测。

3 结果与讨论

3.1 浸出过程工艺条件研究

3.1.1 硫酸用量对 Fe, Mn 和 Zn 浸出率的影响

固定液固比为 3:1, 搅拌速度为 300 r/min, 反应时间为 3.0 h, 温度为 90 °C, 考察硫酸用量对锰锌铁氧体废磁芯粉料中 Fe, Mn 和 Zn 浸出率的影响规律, 浸出过程有关结果见表 2。以浓硫酸实际用量与硫酸理论量的比值即硫酸的过量系数为横坐标, Fe, Mn 和 Zn 的浸出率为纵坐标, 绘制硫酸用量与主金属浸出率的关系图, 见图 1。

经计算, 每 100 g 锰锌铁氧体废料中 Fe, Mn 和 Zn 完全浸出需要浓硫酸的理论量为 96 mL。从表 2 和图 1 可以看出:

a. 当硫酸用量为理论用量时, 反应初始浓度 $c(\text{H}^+) = 11.40 \text{ mol/L}$, 达到锰锌铁氧体中 Fe, Mn 和 Zn 溶出所需的酸度, Fe, Mn 和 Zn 都可以有效浸出; 随着反应的进行, 剩余硫酸量逐渐减少, 溶液中 $c(\text{H}^+)$ 不断降低, 经检测, 反应终点的 $c(\text{H}^+) = 1.60 \text{ mol/L}$, 低

于 $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\text{MnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 溶出所需的酸度, 所以, 在此条件下, 不能实现 Fe, Mn 和 Zn 的完全浸出。

b. 随着浓硫酸用量的增加, 溶液中 $c(\text{H}^+)$ 增大, 主金属的浸出率也随之增大, 且浸出液终点 $c(\text{H}^+)$ 也逐渐升高。当硫酸实际用量与理论用量之比 ≥ 1.15 时, 反应终点的 $c(\text{H}^+) \geq 2.39 \text{ mol/L}$, 接近或达到 Fe, Mn 和 Zn 3 种主金属完全溶出所需的酸度, 但是, 3 种主金属最大浸出率为 94.46%, 而不是 100%。产生此现象的原因是: 反应过程中的温度控制为 90 °C, 低于 100 °C 时 3 种金属溶出最低 $c(\text{H}^+)$ 的热力学计算结果; 热力学理论计算时, 设定了金属离子活度为 1.0, 这与实验中各离子的实际浓度也有一定差距; 本研究中硫酸理论用量的计算仅以 Fe, Mn 和 Zn 3 种主金属为依据, 而锰锌铁氧体废料中的少量其他杂质(如 CaO, MgO, Al₂O₃ 和 Cr₂O₃ 等)也将消耗一定量的硫酸。

c. 分析图 1 中 3 种主金属浸出率随硫酸用量的变化趋势可见, 随着硫酸用量的增加, 锰锌铁氧体废磁芯粉料中 Fe, Mn 和 Zn 的浸出率逐步增大, 当硫酸用量为其理论量的 1.15 倍时, 3 种主成分的平均浸出率为 94.02%; 再将硫酸用量提高到其理论量的 1.2 倍时, Fe, Mn 和 Zn 的平均浸出率为 94.43%, 仅提高 0.41%, 据此确定硫酸用量的优化条件为其理论量 1.15 倍。

3.1.2 反应温度对 Fe, Mn 和 Zn 浸出率的影响

固定液固比为 3:1, 搅拌速度为 300 r/min, 硫酸用量为其理论量 1.15 倍和反应时间为 3.0 h, 考察不同反应温度对锰锌铁氧体废磁芯粉料中 Fe, Mn 和 Zn 浸出率的影响规律, 结果见图 2。

由图 2 可看出, Fe, Mn 和 Zn 的浸出率在温度从 85 °C 升高到 100 °C 时, 浸出率提高 14% 左右, 说明反应温度对锰锌铁氧体废磁芯中 Fe, Mn 和 Zn 的浸出率影响很大; 当反应温度达到 100 °C 时, Fe, Mn 和 Zn 的浸出率均不低于 98%; 但当反应温度为 100~105 °C 时, Fe, Mn 和 Zn 的浸出率增加的幅度不大。

表 2 浸出过程实验数据和结果

Table 2 Experimental data and results in leaching process

序号	m (锰锌废料)/ g	$V(\text{H}_2\text{SO}_4)$ / mL	$c(\text{H}^+)/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$		主金属元素浸出率/%			
			开始浓度	最终浓度	Fe	Mn	Zn	平均值
1	100	96.0	11.40	1.60	82.12	81.63	81.18	81.64
2	100	100.8	11.97	1.90	91.62	90.39	90.89	90.97
3	100	105.6	12.54	2.09	93.81	92.90	93.30	93.34
4	100	110.4	13.11	2.39	94.46	93.50	94.10	94.02
5	100	115.2	13.68	2.92	94.80	93.90	94.60	94.43

注: 浓硫酸理论用量计算公式: $V(\text{H}_2\text{SO}_4) = \frac{3/2n(\text{Fe}) + n(\text{Mn}) + n(\text{Zn})}{17.73}$; $n(\text{Fe})$, $n(\text{Mn})$ 和 $n(\text{Zn})$ 分别代表 Fe, Mn 和 Zn 的量, mol。

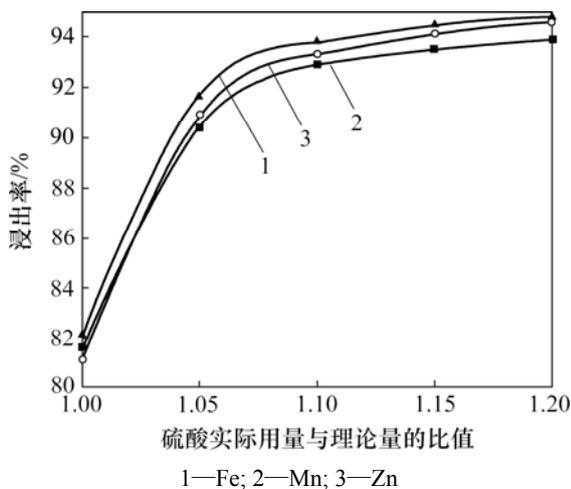


图 1 Fe, Mn 和 Zn 浸出率与硫酸用量的关系

Fig.1 Relationships between leaching rates of Fe, Mn, Zn and sulfuric acid content

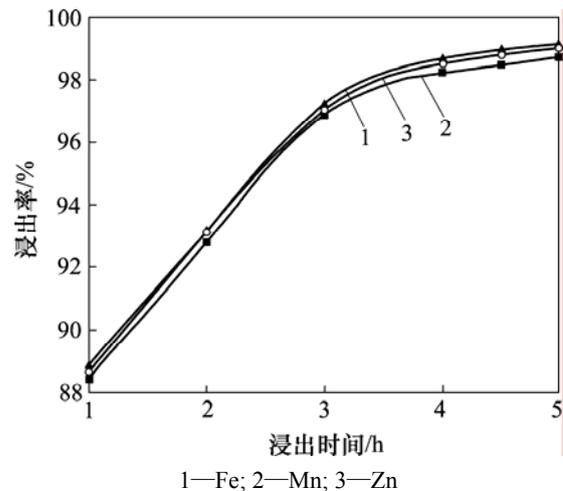


图 3 Fe, Mn 和 Zn 浸出率与浸出时间的关系

Fig.3 Relationships between leaching rates of Fe, Mn, Zn and reaction time

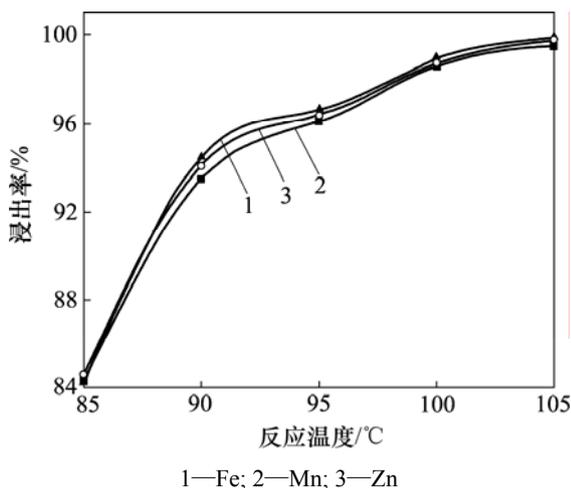


图 2 Fe, Mn 和 Zn 的浸出率与反应温度的关系

Fig.2 Relationships between leaching rates of Fe, Mn, Zn and reaction temperature

3.1.3 反应时间对 Fe, Mn 和 Zn 浸出率的影响

固定液固比为 3:1, 搅拌速度为 300 r/min, 反应温度为 95~100 °C, 硫酸用量为其理论量的 1.15 倍, 考察反应时间对锰锌铁氧体废磁芯粉料中 Fe, Mn 和 Zn 浸出率的影响, 结果见图 3。

从图 3 可知, 反应时间对锰锌铁氧体废磁芯粉料中 Fe, Mn 和 Zn 3 种主成分的浸出率随浸出时间的延长而增大, 当反应时间由 1.0 h 增加到 4.0 h 时, 这 3 种主成分的浸出率由 88% 增大到 98%; 当反应时间延长到 5.0 h 时, Fe, Mn 和 Zn 的浸出率都达到 99% 以上, 几乎是完全浸出。但考虑到生产效率, 取最优时间为 4.5 h。

3.1.4 浸出过程综合条件实验

考虑设备材质和生产效率等因素, 确定锰锌铁氧

体废料硫酸浸出的优化工艺条件如下: 硫酸用量为其理论量 1.15 倍, 反应温度为 95~100 °C, 反应时间为 4.5 h。在此优化条件下, 进行 4 次综合实验, 结果见表 3。

由表 3 可知, 在上述优化工艺条件下, 锰锌铁氧体废料中的 3 种主金属均具有较高的浸出率, Fe, Mn 和 Zn 的浸出率平均值分别为 98.83%, 98.80% 和 98.82%, 4 次综合实验中, 主金属的平均浸出率分别为 98.83%, 98.80% 和 98.82%, 为实现锰锌铁氧体废料的资源化利用提供了依据。

3.2 浸出过程动力学分析

多相反应的速度主要由化学反应或反应物扩散决定。锰锌铁氧体废磁芯粉料的浸出过程就是固相的锰锌铁氧体废磁芯粉料与硫酸溶液所组成的固-液多相反应, 主要有 2 个阶段: 反应物之间化学反应和反应产物进入溶液扩散。锰锌铁氧体废磁芯粉料的硫酸浸出速率可能受液膜扩散控制或化学反应控制, 但是, 究竟是哪个控制步骤为主导, 可通过对相关实验结果的分析加以确定。

当固-液多相浸出反应的控制步骤为液膜扩散控制时, 搅拌速度对浸出率影响非常大。为此, 在反应时间分别为 2.0 h 和 3.0 h, 温度为 95~100 °C 及硫酸用量为其理论量的 1.10 倍时, 研究搅拌速度对锰锌铁氧体废磁芯粉料硫酸浸出过程中主金属总浸出率的影响规律, 结果见图 4。

依据湿法冶金动力学原理^[10], 提高搅拌强度, 扩散控制反应的浸出率可提高 40%~70%。分析图 4 可知, 当搅拌速度由 200 r/min 提高到 400 r/min 时, 总浸出率分别提高 6%(反应时间为 2.0 h)和 9%(反应时间

表3 浸出液化学成分及 Fe, Mn 和 Zn 浸出率

Table 3 Leached solution composition and the leached rate of Fe, Mn and Zn

序号	V(浸出液)/L	ρ (主金属元素)/(g·L ⁻¹)			主金属元素浸出率/%			平均值
		Fe	Mn	Zn	Fe	Mn	Zn	
1	2.40	204.1	65.9	23.6	98.84	98.79	98.81	98.81
2	2.35	208.4	67.3	24.1	98.83	98.80	98.82	98.82
3	2.43	201.6	65.1	23.4	98.85	98.81	98.83	98.83
4	2.50	195.9	63.3	22.7	98.83	98.80	98.82	98.82
平均值	—	—	—	—	98.83	98.80	98.82	98.82

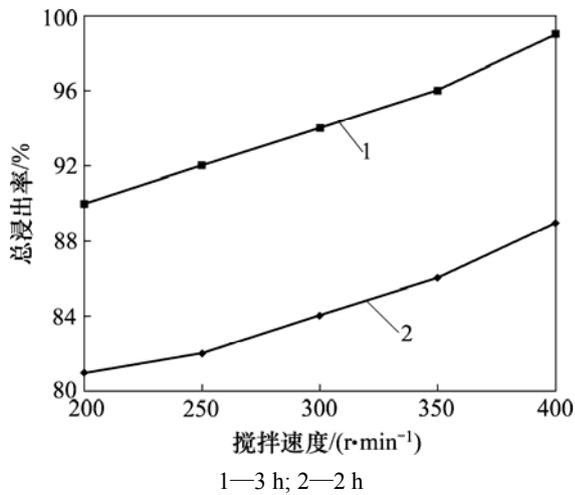


图4 搅拌速度与总浸出率的关系

Fig.4 Relationships between average leaching rate of main metals and stirring speed

为 3.0 h), 只体现出一一般固相在液相中充分分散所产生的浸出率提高的效果。据此, 判断锰锌铁氧体废磁芯粉料硫酸浸出反应的控制步骤不是液膜扩散控制。

当化学反应为控制步骤, 且没有生成新固相时, 该反应的动力学模型可用收缩核模型描述, 符合下列速度方程^[11]:

$$1 - (1 - \alpha_t)^{1/3} = \frac{kc^n t}{r_0 \rho} \quad (6)$$

式中: α_t 为锰锌铁氧体废磁芯粉料中主金属浸出的平均浸出率; k 为反应速度常数; c 为反应流体浓度; t 为反应时间; r_0 为颗粒初始粒径; ρ 为固体颗粒密度; n 为反应级数。

上述模型的使用条件是: c 必须恒定不变。但在实验过程中, 硫酸用量并未远远超过其理论量, 随着反应进行, c 不断减小。为消除浓度 c 的影响, 李洪桂等^[12]对式(6)进行了修订:

$$(1 - \alpha_t)^{-(n-1/3)} - 1 = \frac{kmc_0^n}{r_0 \rho} \times t \quad (7)$$

式中: c_0 为反应流体初始浓度; m 为物质的质量。由于锰锌铁氧体废磁芯粉料硫酸浸出反应属于一级反应, 故式(7)变为:

$$(1 - \alpha_t)^{-2/3} - 1 = \frac{kmc_0^n}{r_0 \rho} \times t \quad (8)$$

令 $K = kMc_0 / (r_0 \rho)$, 则有:

$$(1 - \alpha_t)^{-2/3} - 1 = Kt \quad (9)$$

可见, 受化学反应控制的浸出率与反应时间呈比例关系, 根据时间对浸出率影响的实验结果, 按 $(1 - \alpha_t)^{-2/3} - 1$ 对时间 t 作图, 结果见图 5。

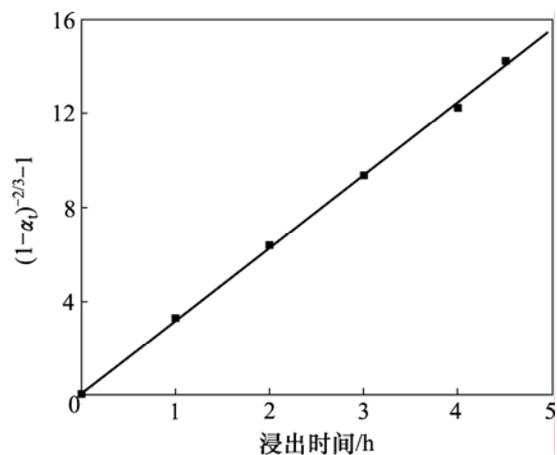


图5 $(1 - \alpha_t)^{-2/3} - 1$ 与 t 的关系

Fig.5 Relationship between $(1 - \alpha_t)^{-2/3} - 1$ and leaching time

结合图 2 和图 3, 可绘制出速率常数对数 $\lg k$ 与反应温度 $1/T$ 的关系曲线, 见图 6。从图 6 可见, $\lg k$ 与 $1/T$ 呈线性关系, 依据阿伦尼乌斯方程:

$$\lg k = \frac{-E}{2.303RT} + \lg A \quad (10)$$

得出锰锌铁氧体废料硫酸浸出反应的活化能为 85.6 kJ/mol, 大于 41.8 kJ/mol, 符合化学反应控制理论的

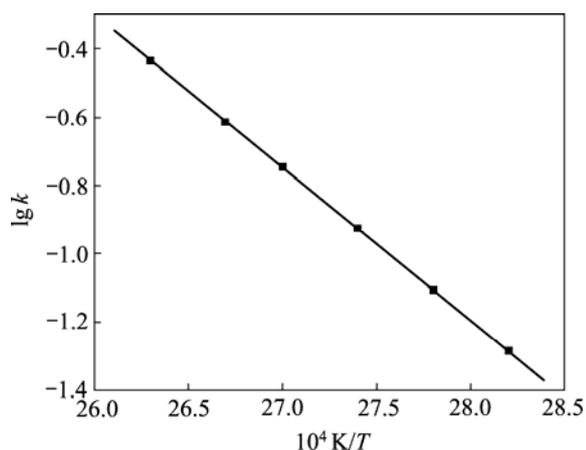


图 6 速率常数对数 $\lg k$ 与 $1/T$ 的关系

Fig.6 Relationship between $\lg k$ and $1/T$

反应特征。式(10)中: E 为反应活化能; A 为指前因子; k 为速率常数; R 为摩尔气体常数; T 为热力学温度。

所以, 本研究中影响锰锌铁氧体废磁芯粉料浸出率的主要因素有反应温度、反应时间和浓硫酸用量。这一理论推断与本文的实验结果相吻合。

4 结 论

a. 硫酸浸出锰锌铁氧体废磁芯粉料的最佳工艺条件如下: 硫酸用量为其理论量 1.15 倍, 反应温度为 95~100 °C, 反应时间为 4.5 h。在此优化条件下, 3 种主金属 Fe, Mn 和 Zn 的平均浸出率分别为 98.83%, 98.80% 和 98.82%。

b. 锰锌铁氧体废磁芯粉料的硫酸浸出过程符合液-固反应的收缩核模型, 浸出速率受浸出剂浓度、温度和时间的影响, 为化学反应步骤控制, 反应的活化能为 85.6 kJ/mol。

参考文献:

[1] 戴志云, 徐辉宇. 锰锌软磁铁氧体粉料市场的现状及发展趋势[J]. 磁性材料及器件, 2006, 37(5): 15-17.
DAI Zhi-yun, XU Hui-yu. The current status and development trend of Mn-Zn soft ferrite powder market[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2006, 37(5): 15-17.

[2] 胡少明, 王 军, 任俊峰, 等. 高磁导率低损耗锰锌铁氧体的生产[J]. 电子工艺技术, 2005, 26(5): 289-291.
HU Shao-ming, WANG Jun, REN Jun-feng, et al. Production of high permeability and low attrition Mn-Zn ferrite[J]. Electronics Process Technology, 2005, 26(5): 289-291.

[3] Keluska S H. High permeability of low loss Mn-Zn ferrite obtained by sintering nanoparticle Mn-Zn ferrite[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2006, 305(2): 296-303.

[4] Etsuo O. Development of low loss Mn-Zn ferrites[J]. Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, 1996, 43(12): 1386-1392.

[5] Ott G. Recent developments of Mn-Zn ferrites for high permeability applications[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2003, 254/255: 535-537.

[6] 唐谟堂, 杨声海, 彭长宏, 等. 矿物共沉法制取低功耗软磁铁氧体扩大试验研究[J]. 磁性材料及器件, 2004, 34(6): 23-26.
TANG Mo-tang, YANG Sheng-hai, PENG Chang-hong, et al. The enlarged experiment study on low-power loss soft ferrite made by coprecipitation[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2004, 34(6): 23-26.

[7] 彭长宏, 陈艺锋, 唐谟堂. 直接法制备铁锰锌共沉淀粉的工业试验[J]. 湿法冶金, 2007, 26(1): 30-39.
PENG Chang-hong, CHEN Yi-feng, TANG Mo-tang. Industrial experiment of Fe-Mn-Zn co-precipitation powders prepared by direct method[J]. Hydrometallurgy of China, 2007, 26(1): 30-39.

[8] 马玉天, 龚竹青, 武 俊, 等. 从高铅碲渣中浸出碲的热力学分析及实验[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2006, 37(3): 498-504.
MA Yu-tian, GONG Zhu-qing, WU Jun. Thermodynamic analysis and experimental studies of leaching lead-rich tellurium slag[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2006, 37(3): 498-504.

[9] 杨显万, 何蔼平, 袁宝州. 高温水溶液热力学数据计算手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1983: 10-148.
YANG Xian-wan, HE Ai-ping, YUAN Bao-zhou. The calculates handbook of high temperature aqueous solution thermodynamics data[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1983: 10-148.

[10] 胡天觉, 曾光明, 袁兴中. 湿法炼锌废渣中硫脲浸出银的动力学[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(5): 933-937.
HU Tian-jue, ZENG Guang-min, YUAN Xing-zhong. Leaching kinetics of silver extracted by thiourea from residue in hydrometallurgy of zinc[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(5): 933-937.

[11] 杨显万, 邱定潘. 湿法冶金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998: 169-174.
YANG Xian-wan, QIU Ding-pan. Hydrometallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1998: 169-174.

[12] 李洪桂. 湿法冶金学[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2002: 83-85.
LI Hong-gui. Hydrometallurgy[M]. Changsha: Central South University Press, 2002: 83-85.