文章编号: 1004-0609(2010)10-2038-07

盐酸强化还原钛铁矿中金属铁的锈蚀动力学

郭宇峰,刘水石,马晓雯,姜 涛,邱冠周

(中南大学 资源加工与生物工程学院,长沙 410083)

摘 要:研究盐酸对攀枝花还原钛铁矿中金属铁锈蚀反应速率和锈蚀法铁钛分离效果的影响,并对还原钛铁矿中 金属铁的锈蚀反应动力学进行分析。结果表明:盐酸显著提高还原钛铁矿中金属铁的锈蚀反应速率及锈蚀法钛铁 分离的效果;当盐酸用量由0增加到4%时,还原钛铁矿中金属铁的锈蚀率由43%提高到90%以上,锈蚀法钛铁 分离后富钛料中TiO₂的品位由64.92%提高到81.21%,总铁含量(Fe_T)由18.25%降到5.06%;还原钛铁矿中金属铁 的锈蚀反应受内扩散控制,添加4%的盐酸,锈蚀反应的表观活化能由59.26 kJ/mol 降低到38.65 kJ/mol,其作用 机理是盐酸促进金属铁锈蚀过程的阴极反应,从而加快Fe²⁺的生成和扩散速率。

关键词:还原钛铁矿;钛铁分离;富钛料;还原锈蚀;动力学

中图分类号: TF823 文献标志码: A

Rusting kinetics of metallic iron in reduced ilmenite strengthened by hydrochloride

GUO Yu-feng, LIU Shui-shi, MA Xiao-wen, JIANG Tao, QIU Guan-zhou

(School of Resources Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The effect of hydrochloride on the rusting rate of metallic iron in Panzhihua reduced ilmenite and separation efficiency of titanium and iron by rusting process were studied. The rusting kinetic of the metallic iron in reduced ilmenite was analyzed. The results show that hydrochloride can significantly increase the reaction rate and separation efficiency of titanium and iron. As the dosage of hydrochloride increases from 0 to 4%, the rusting rate of the metallic iron in the reduced ilmenite increases from 43% to more than 90%, TiO₂ grade of Ti-rich material increases from 64.92% to 81.21%, while total Fe grade decreases from 18.25% to 5.06%. The rusting reaction is controlled by internal diffusion. Adding 4% hydrochloride, the rusting apparent activation energy of the rusting reaction decreases from 59.26 kJ/mol to 38.65kJ/mol. The mechanism is that hydrochloride promotes the cathodic reaction of the rusting reaction , thus speeding up the formation and the diffusion rate of Fe²⁺.

Key words: reduced ilmenite; titanium-iron separation; Ti-rich material; reduction-rusting; kinetic

目前,世界钛资源中可用于钛工业生产的主要是 天然金红石和钛铁矿^[1]。天然金红石精矿的 TiO₂ 品位 可达 95%~96%(质量分数),是钛工业的优质原料,但 储量较少。随着天然金红石资源的逐渐枯竭和价格上 涨以及钛工业的发展,储量丰富的钛铁矿已经成为钛 工业的主要生产原料。但钛铁矿的 TiO₂品位较低,为 适应钛工业的发展,必须将钛铁矿富集成高品位的富 钛料^[2-3]。因此,有关钛铁矿制取富钛料方法的研究, 一直都是钛工业领域最为活跃的研究课题之一。已研 究和提出的制取富钛料的方法主要有电炉熔炼法、选 择氯化法、酸浸法、还原锈蚀法和还原磁选法等^[4-8], 但目前在工业上获得应用的方法主要是电炉熔炼法、 酸浸法和还原锈蚀法等。还原锈蚀法是一种选择性除 铁的方法,是澳大利亚国立化学研究所开发的,亦称

基金项目:国家自然科学基金委青年科学基金资助项目(50504018);国家基础研究发展计划资助项目(2007CB613606)

收稿日期: 2009-11-11; 修订日期: 2010-03-21

通信作者: 郭宇峰, 副教授; 电话: 13975894856; E-mail: guo.yf@126.com

Becher 法、亚钛法和水相氧化法。其基本过程是先将 钛铁矿其中的铁氧化物还原为金属铁, 钛以氧化物形 态存在,然后再将还原产品于 NH4Cl 溶液介质中鼓入 空气使其中的金属铁锈蚀,利用锈蚀后生成的水合铁 氧化物和富钛料因其粒度和密度的不同,采用物理分 选的方法实现铁钛分离,得到富钛料和副产品水合铁 氧化物(赤泥)。还原锈蚀法具有环境友好、投资少且 生产成本低等优点而得到世界的普遍认可^[9]。然而, 还原锈蚀法的锈蚀反应速率很低,在某些情况下,工 业上锈蚀反应需要 22h 才能完成^[10]。为加快锈蚀反应 速率、提高生产效率,国内外学者开展了大量研究。 最初的研究表明[11],还原钛铁矿在锈蚀过程中添加一 定数量的无机酸能加快锈蚀反应速率。近年来的研究 表明,还原钛铁矿在锈蚀过程中添加一定数量的有机 酸或有机物也能加快锈蚀反应速率,如 KUMARI 和 MOHAN^[12]的研究表明,加入丙酮+甲酸和甲醇+甲酸 后,还原钛铁矿锈蚀反应基本在 3 h 内完成,甲醇+ 甲酸可以使锈蚀率提高到 86%, 丙酮+甲酸则可以将 锈蚀率提高到 90%。MARINOVICH 等^[13-14]的研究表 明,加入1.5%铵盐反应8h仅能除去54%的金属铁, 加入2%乙二醛反应8h可除去80%的铁, 蔗糖、葡萄 糖的效果略低于乙二醛的,该研究证明乙二醛、蔗糖、 葡萄糖在锈蚀反应过程中由于氧化反应生成相应的羧 酸。由此可见,酸具有加快还原钛铁矿锈蚀反应速率 的作用。

本文作者通过研究盐酸对还原钛铁矿锈蚀反应速 率的影响,证实盐酸具有加快还原钛铁矿锈蚀反应速 率过程的作用,在此基础上,为揭示盐酸在还原钛铁 矿锈蚀过程中加快锈蚀反应速率过程的动力学机理, 对盐酸强化还原钛铁矿的锈蚀动力学进行研究。

1 实验

试验用还原钛铁矿采用攀枝花钛精矿(主要化学成分见表 1)经固态还原制备的,所制备的还原钛铁矿 金属化率为 93.65%,金属铁含量为 31.98%,总铁含 量为 34.12%, TiO₂含量为 51.18%。将还原钛铁矿破 碎至粒径小于 0.1 mm,作为锈蚀试验研究的原料。

锈蚀反应选用 1 L 烧杯作为锈蚀反应器,采用恒 温水浴锅控制体系温度。每次试验先将水加热到一定 温度并恒温 15 min 后,根据试验要求,加入氯化铵或 氯化铵和盐酸,随后再加入还原钛铁矿,按照试验要 求对矿浆通气、搅拌。每次试验加入 20g的还原钛铁 矿,每 30 min 向溶液中添加 20 mL 蒸馏水,补充因加 表1 钛铁矿精矿的主要化学成分

Table 1Chemical compositions of ilmenite concentrate (massfraction, %)

TiO ₂	Fe _T	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO
47.58	30.59	34.84	3.11	1.33	0.64
MgO	MnO	V2	O ₅	S	Р
5.94	0.12	0.4	46	0.11	0.015

热和通气蒸发损失的水。试验完成后,采用摇床重选 将铁红和富钛料分离。

用锈蚀率 y 和富钛料中铁品位、TiO₂的品位来衡 量锈蚀反应进程及铁钛分离效果,即

$$\gamma = 1 - \frac{w_1 m_1}{w_0 m_0} \times 100\%$$
 (1)

式中: w_0 为还原钛铁矿中金属铁的含量,%; w_1 为锈 蚀所得产物中金属铁的含量,%; m_0 为反应前加入的 还原钛铁矿的质量,g; m_1 为反应后得到的产物的质 量,g;y为锈蚀率,%。

2 结果与讨论

2.1 盐酸对锈蚀反应速率的影响

在 70 ℃、原料粒度小于 0.1 mm、氯化铵添加量 为 1.6%、搅拌速率为 600 r/min、通气速率为 5×10³ L·min⁻¹·m⁻³、液固质量比为 10:1 的条件下,研究盐酸 对还原钛铁矿中金属铁锈蚀反应速率的影响,试验结 果如图 1 和 2 所示。

由图 1 可知:锈蚀反应速率随着盐酸浓度的提高 而增加;当盐酸量由 0%增加到 4%,还原钛铁矿的锈



图1 盐酸对还原钛铁矿锈蚀反应速率的影响

Fig.1 Effect of hydrochloric acid content on rusting rate of reduced ilmenite



图 2 盐酸添加量对锈蚀产品(8 h)指标影响 Fig.2 Effect of hydrochloric acid addition on rusted product

蚀率可由 43%提高到 90%以上,显著提高金属铁的锈 蚀率。对锈蚀 8 h 产品的分析也证明了盐酸能有效提 高钛铁的分离效果,不加盐酸时,锈蚀产品中 Fe_T 为 18.25%,而加入 2%HCl 可使 Fe_T含量降为 12.82%, 盐酸用量增至 4%后,还原钛铁矿中 Fe_T 降为 5.06%, 并且随着盐酸用量的增加,TiO₂品位由 63.43%提高到 81.21%。

为进一步验证盐酸对还原钛铁矿铁钛分离的强化 效果,采用 JSM-56600LV 型扫描电镜分析仪,对还 原钛铁矿添加 4%盐酸和不加盐酸两种条件下锈蚀 8 h 所得富钛料的微观结构进行分析。图 3 所示为添加 4% 盐酸处理得到的富钛料的 SEM 像,图 4 所示为不加 盐酸处理所得富钛料的 SEM 像。由图 3 和 4 可知, 加盐酸处理后的富钛料金属铁的残余量远小于不加盐 酸处理的富钛料。可见,盐酸能显著提高金属铁锈蚀 反应速率和钛铁分离效率锈蚀产品的品位。

为查明盐酸中 H⁺和 Cl⁻在锈蚀反应中的作用,进 行了以下对比实验,试验方案及结果如表 2 所列。其



图 3 添加 4%盐酸处理所得富钛料的 SEM 像

Fig.3 SEM image of Ti-rich material with hydrochloride treatment: 1—Metal iron (white zone); 2—Ilmenite (gray zone)



图 4 不加盐酸处理所得富钛料的 SEM 像

Fig.4 SEM image of Ti-rich material without hydrochloride treatment: 1—Metal iron (white zone); 2—Ilmenite (grey zone)

表2 不同实验条件下 TiO₂ 的品位和总铁含量

Table 2 Grade of TiO_2 and Fe_T under different experimental conditions

Experiment No.	Addition agent	TiO ₂ grade/%	Fe _T /%
1	NH ₄ Cl	64.92	11.13
2	HCl+NH ₄ Cl	81.20	5.06
3	NaCl+NH ₄ Cl	65.94	10.34
4	H ₂ SO ₄ +NH ₄ Cl	79.23	5.49

中盐酸和氯化钠的氯离子摩尔浓度相同;硫酸和盐酸的氢离子摩尔浓度相同。各试验条件如下:原料粒径小于 0.1 mm、氯化铵添加量为 1.6%、搅拌速率为 600 r/min、温度为 70 °C、通气速率为 5×10^3 L·min⁻¹·m⁻³,反应为 6 h。由表 2 中实验 3 与实验 1、实验 2 的对比可知,NaCl 对锈蚀中钛铁的分离效果远低于盐酸,这说明盐酸中的 Cl 对还原钛铁矿中金属铁的锈蚀反应没有明显的促进作用。实验 4 与实验 1、实验 2 对比可知,相同 H⁺浓度的 H₂SO₄代替 HCl 后,锈蚀反应钛铁分离效果相差不大。由此可以推断,盐酸对锈蚀反应的促进作用应主要是源于其中的 H⁺。

2.2 盐酸对锈蚀过程动力学的影响

2.2.1 不加盐酸时的锈蚀动力学

图 5 所示为在 1.6%的 NH₄Cl 溶液中、搅拌速率 600 r/min、通气速率 5×10³ L·min⁻¹·m⁻³、液固质量比 10:1、粒度小于 0.1 mm、盐酸添加量为 0 条件下,攀 枝花还原钛铁矿中金属铁等温锈蚀试验结果。

应用未反应核模型^[8]对还原钛铁矿中金属铁锈蚀 反应的等温试验结果进行分析^[15-19]。对图 5 中锈蚀率 y(浸出分数 x)与时间 t 的关系分别以 1-(1-x^{1/3})对时间 t、1-3(1-x)^{2/3}+2(1-x)对时间 t 作图。在试验温度范围 内,1-3(1-x)²³+2(1-x)对时间 *t* 的线性关系最好,结 果如图 6 所示,这表明在试验温度范围内,该反应过 程受内扩散控制。由图 6 中各直线的斜率可得出各温 度下的速率常数 *k* 值。采用 Arrhenius 方程可求出还原 钛铁矿中铁锈蚀反应的活化能,即

$$k = k_0 \exp[-E/(RT)] \tag{2}$$

对式(2)两边取对数,可得

$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E}{RT} \tag{3}$$

式中: E 为活化能, kJ/mol; k_0 为系数, $h\cdot L^{-1}$; k 为 速率常数, $h\cdot L^{-1}$; R 为摩尔气体常数, 8.314×10^{-3} $kJ\cdot mol^{-1}\cdot K^{-1}$; T 为温度, K。

在 30 ℃~70 ℃范围内,以 ln*k* 对 *T*⁻¹ 作图,如图 7 所示。ln*k* 与 *T*⁻¹ 成线性关系,该直线的斜率为-*E*/*R*。





Fig.5 Isothermal rusting curves of metallic iron in reduced ilmenite



图 6 不加盐酸时 $t 与 1+2(1-x)-3(1-x)^{2/3}$ 的关系 Fig.6 Relationship between t and $1+2(1-x)-3(1-x)^{2/3}$ without hydrochloric acid



图 7 不加盐酸时的 Arrhenius 图

Fig.7 Plot of Arrhenius without hydrochloric acid

由图 7 直线的斜率可求出还原钛铁矿中金属铁锈蚀反应表观活化能为 59.26 kJ/mol。

2.2.2 加盐酸时的锈蚀动力学

图 8 所示为在 1.6%的 NH₄Cl 溶液,搅拌速率为 600 r/min、通气速率为 5×10³ L·min⁻¹·m⁻³、液固质量 比为 10:1、粒度小于 0.1 mm 的条件下,盐酸添加量 为 4%的条件下,攀枝花还原钛铁矿中金属铁的等温 锈蚀试验结果。

采用未反应核模型对图 8 进行分析,对锈蚀率 y(浸出分数 x)与时间 t 的关系分别以 1-(1-x^{1/3})对时间 t、1-3(1-x)^{2/3}+2(1-x)对时间 t 作图。在试验温度范围 内,1-3(1-x)^{2/3}+2(1-x)对时间 t 的线性关系最好,所 得结果如图 9 所示。这表明攀枝花还原钛铁矿中金属 铁在盐酸-氯化铵体系中锈蚀反应过程受内扩散控 制。由图 9 中各直线的斜率可得出各温度下的速率常



图 8 加盐酸时攀枝花还原钛铁矿中金属铁锈蚀等温曲线 Fig.8 Isothermal rusting curves of metallic iron in reduced ilmenite adding hydrochloric

(5)



图 9 加盐酸时 t 与 1+2(1-x)-3(1-x)^{2/3} 的关系

Fig.9 Relationship between of t and $1+2(1-x)-3(1-x)^{2/3}$ adding hydrochloric acid



图 10 加盐酸时的 Arrhenius 图

Fig.10 Plot of Arrhenius with hydrochloric acid

数 k 值。利用 Arrhenius 图(见图 10),可求出盐酸强化还原钛铁矿中金属铁的锈蚀反应的表观活化能为 38.65 kJ/mol。

通过对比氯化铵锈蚀反应体系中有、无盐酸两种 条件下锈蚀反应活化能可知,添加 4%的盐酸使得金 属铁锈蚀反应的表观活化能由 59.26 kJ/mol 降低到 38.65 kJ/mol。

2.3 盐酸强化锈蚀过程动力学的微观机理

还原钛铁矿在锈蚀过程中,颗粒内的金属铁微晶 相当于原电池的阳极,颗粒外表面相当于阴极,在阳 极,Fe 失去电子转换为 Fe²⁺进入溶液^[8]:

$$2Fe(s) \longrightarrow 2Fe^{2+}(aq) + 4e \tag{4}$$

在阴极区,溶液中的氧接受电子生成OH-离子:

$$O_2 + 2H_2O + 4e \rightarrow 4OH^-$$

颗粒内溶解下来的 Fe²⁺沿着微孔扩散到颗粒外表 面的电解质溶液中,在溶液中进一步氧化生成水合氧 化物铁细粒沉淀:

$$2Fe^{2+}+2OH^{-}+1/2O_2 = Fe_2O_3 \cdot H_2O\downarrow + H_2O$$
 (6)

由于还原钛铁矿由离析的铁晶粒和富钛相组成, 铁晶粒通过复杂网状微孔连通到还原钛铁矿颗粒外 部,因此,在锈蚀反应中还原钛铁矿中的金属铁氧化 后可以以 Fe²⁺形式会从还原钛铁矿颗粒中扩散分离出 来^[20]。研究发现^[21]:如果还原钛铁矿中的金属铁在还 原钛铁矿颗粒内部被氧化为氢氧化亚铁(II)并在矿物 颗粒内部沉淀,沉淀后的铁氧化物或氢氧化物很难再 从钛铁矿颗粒内部分离出来,锈蚀过程中出现的这种 现象称为"原位锈蚀"。"原位锈蚀"会直接影响钛铁分 离效果。

根据前面的实验结果可知,还原钛铁矿中金属铁 的锈蚀过程符合未反应核模型,且受内扩散控制,由 此可以推测其模型可用图 11 来表示。金属铁失去电子 转化为 Fe²⁺,溶液中的氧接受电子生成 OH⁻,生成的 Fe²⁺从金属铁颗粒内部扩散出来被氧化生成铁红,金 属铁和富钛层分离,金属铁固体颗粒转化为铁红。



图 11 锈蚀反应的未反应核模型

Fig.11 Unreacted core model of rusting reaction

在本实验中,添加盐酸后,体系值降低,有利于 反应(5)向正方向进行,使其得到电子速度加快,从而 促进了反应(4),加快 Fe²⁺的生成,使金属铁颗粒表面 Fe²⁺浓度增加,而还原钛铁矿颗粒外部 Fe²⁺因反应(6) 的消耗使其浓度降低,导致还原钛铁矿颗粒内外 Fe²⁺ 的浓度梯度增大,其结果是加快了 Fe²⁺的扩散速率。 由此可见,还原钛铁矿锈蚀体系中添加盐酸使 Fe²⁺的 生成及其扩散速率加快是降低锈蚀反应表观活化能的 根本原因。

3 结论

1) 盐酸能显著加快还原钛铁矿中金属铁的锈蚀 反应速率,提高钛铁分离效果。在原料粒度小于 0.1 mm、温度为 70 ℃、氯化铵添加量为 1.6%、盐酸为 4%、搅拌速率为 600 r/min、通空气速率为 5×10³ L·min⁻¹·m⁻³、液固质量比为 10:1、锈蚀反应时间 8 h 的条件下,盐酸用量由 0 提高到 4%,还原钛铁矿中 金属铁的锈蚀率可由 43%提高到 90%以上,富钛料中 TiO₂ 品位由 64.92%提高到 81.21%,锈蚀产品中总铁 含量由 18.25%降到 5.06%。

2) 锈蚀反应的动力学研究表明,有、无盐酸条件下,锈蚀反应都受内扩散控制。无盐酸体系下锈蚀反应的表观活化能为 59.26 kJ/mol,加盐酸后锈蚀反应的表观活化能降低到 38.65 kJ/mol。

3) 在还原钛铁矿锈蚀反应过程中,盐酸促进还原 钛铁矿中金属铁锈蚀过程的阴极反应,使 Fe²⁺的生成 和其扩散速率加快是降低锈蚀反应表观活化能的根本 原因。

REFERENCES

- 刘椒清,彭 毅. 钛原料的供需趋势分析及前景展望[J]. 钛 工业进展, 2000, 4(1): 6-11.
 LIU Jiao-qing, PENG Yi. Analysis of titanium raw material supply and demand trends and prospects[J]. Titanium Industry Progress, 2000, 4(1): 6-11.
 韩明堂. 如何发展我国的富钛料生产[J]. 钛工业进展, 2001,
- [2] 韩明星. 如何友展找国的晶钛科生产[J]. 钛工业进展, 2001, 11(1): 4-7.

HAN Ming-tang. How to develop China's production of Ti-rich material[J]. Titanium Industry Progress, 2001, 11(1): 4–7.

 [3] 孙朝晖.攀枝花钛铁矿精矿制备高品质富钛料的比较[J]. 矿 产保护与利用, 2007(6): 32-36.
 SUN Zhao-hui. Preparation of high quality titanium material for boiling chlorination from Panzhihua ilmenite[J]. Conservation

and Utilization of Mineral Resources, 2007(6): 32-36. [4] 胡克俊,锡 淦,姚 娟,席 歆. 还原-锈蚀法生产人造金

红石技术现状及攀钢采用该工艺可行性分析[J]. 钛工业进展, 2006, 23(9): 17-22.

HU Ke-jun, XI Gan, YAO Juan, XI Xin. The feasibility analysis of Becher process used in Panzhihua[J]. Titanium Industry Progress, 2006, 23(9): 17–22.

[5] 温旺光. 钛铁矿选择氯化法制取人造金红石的热力学与动力 学[J]. 钢铁钒钛, 2003, 24(1): 8-15. WENF Wang-guang. Thermodynamics and kinetics of the ilmenite selective chlorination produce synthetic rutile[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2003, 24(1): 8–15.

- [6] 王曾洁,张利华,王海北,蒋训雄,薛济来,扈维明,王 舰. 盐酸常压直接浸出攀西地区钛铁矿制备人造金红石[J].有色 金属,2007,59(4):108-111.
 WANG Zeng-jie, ZHANG Li-hua, WANG Hai-bei, JIANG Xun-xiong, XUE Ji-lai, HU Wei-ming, WANG Jian. Ilmenite hydrochloric acid leaching for synthetic rutile preparation[J]. Nonferrous Metals, 2007, 59(4): 108-111.
- [7] 杨绍利,盛继孚. 钛铁矿熔炼钛渣与生铁技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 42-44.
 YANG Shao-li, SHENG Ji-fu. Technology of titanium slag and iron metallurgy by ilmerite titanium slag and iron[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006: 42-44.
- [8] 莫 畏, 邓国珠, 罗方承. 钛冶金[M]. 第二版. 北京: 冶金工 业出版社, 2007: 188-189.
 MO Wei, DENG Guo-zhu, LUO Fang-cheng. Metallurgy of titanium[M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007: 188-189.
- [9] MAHMOUD M H, AFIFI A I, IBRAHIM I A, Reductive leaching of ilmenite ore in hydrochloric acid for preparation of synthetic rutile[J]. Hydrometallurgy, 2004, 73(4): 99–109.
- [10] WARD C B, GIBBONS S L, RITCHIE I M. and MUIR D M, Transformations of iron oxide by-products during the Becher process[C]//Proc AuslMM Annu Conf, Institution of Mining and Metallurgy, 1989: 209–215.
- [11] BENJAMIN S E, SYKES J M. Chloride-induced pitting corrosion of Swedish iron in ordinary Portland cement mortars and alkaline solutions: the effect of temperature[J]. Elsevier Applied Science, 1990, 5(2): 234–239.
- [12] JAYA KUMARI, MOHAN P N. A structural model for the rusting of reduced ilmenite[J]. Hydrometallurgy, 2004, 43(9): 13–20.
- [13] MARINOVICH Y, BAILEY S, AVRAAMIDES J, JAYASEKERA S. An electrochemical study of reduced ilmenite carbon paste electrodes[J]. Appl Electrochem, 1995, 23(11): 34–35.
- [14] MARINOVICH Y, BAILEY S. A structural model for the rusting of reduced ilmenite[J]. Acta Metallurgica Slovaca, 2002, 35(14): 13–20.
- [15] 黄希祜. 钢铁冶金原理[M]. 第三版. 北京: 冶金工业出版社, 2005: 82-87.
 HUANG Xi-hu. Principles of iron and steel metallurgy[M]. 3rd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 82-87.
- [16] 刘玉民,齐 涛,张 懿. KOH 亚熔盐法分解钛铁矿的动力
 学分析[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(6): 1142-1147.
 LIU Yu-min, QI Tao, ZHANG Yi. Kinetics analysis of

decomposition of ilmenite by KOH sub-molten salt method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(6): 1142–1147.

- FARROW J B, RITCHIE I M. The reaction between reduced ilmenite and oxygen in ammonium chloride solutions[J].
 Hydrometallurgy, 2000, 39(8): 21–39.
- [18] LI Chun, LIANG Bin, GUO Ling-hong, WU Zi-bin. Effect of mechanical activation on the dissolution of Panzhihua ilmenite [J]. Minerals Engineering, 2006, 19(14): 1430–1438.
- [19] LIU Xiao-hua, GAI Guo-sheng, YAN Yu-fen. Kinetics of the leaching of TiO₂ from Ti-bearing blast furnace slag[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 18(6):

275-278.

- [20] JAYASEKERA S, AVRAAMIDES J. Rotating disc electrode apparatus for aqueous electrochemical studies at elevated temperatures and pressures application to the Becher process[C]//Proceeding 6th AusIMM Extractive Metallurgy Conference, Brisbane: Aust Inst Min Metall Parkville, 1994: 123–126.
- [21] JAYA KUMARI E, BERCKMAN E. An electrochemical investigation of the rusting reaction of ilmenite using cyclic voltammetry[J]. Hydrometallurgy, 1987, 12(3): 217–221.

(编辑 龙怀中)