

钒钛分离与提取

钒钛磁铁海砂矿还原过程有价值元素变化规律的研究

胡佩伟^{1,2}, 胡超¹, 胡兵^{3,4*}, 谢志诚¹, 郑富强^{3,4}, 刘臣^{3,4}

(1. 武汉科技大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081; 2. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430081; 3. 中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南 长沙 410205; 4. 国家烧结球团装备系统工程技术研究中心, 湖南 长沙 410205)

摘 要:以印尼某钒钛磁铁海砂矿为研究对象, 通过 XRD 分析探明其主要成分和物相组成, 并在热力学分析基础上探讨了该矿的还原特性和有价值元素变化规律。利用微波加热同时以生物质炭作为直接还原的还原剂对海砂矿进行还原-磨选试验, 微波加热有利于强化海砂矿的还原过程。结果表明, 在 C/Fe 为 0.6, 还原焙烧温度 1 200 °C 下还原 150 min, 可获得金属化率为 98.28% 的还原产物; 在矿浆浓度 50%, 磨矿时间为 40 min, 磁场强度为 0.08 T 的条件下, 可获得铁品位为 85.1%、铁回收率 94.01% 的精矿粉, 以及 TiO₂ 品位为 28.95%, 回收率为 71.98%, V₂O₅ 品位为 2.14%, 回收率为 56.82% 的尾矿粉, 有效实现了铁和钒钛的分离富集。

关键词:钒钛磁铁海砂矿; 直接还原-磨矿-磁选法; 微波加热; 生物质炭; 铁; 钛; 钒; 回收率

中图分类号: TF823, TD92 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2021)05-0010-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.05.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Study on the regulation mechanism of valuable elements in the reduction process of vanadium-titanium magnetite marine placer

Hu Peiwei^{1,2}, Hu Chao¹, Hu Bing^{3,4*}, Xie Zhicheng¹, Zheng Fuqiang^{3,4}, Liu Chen^{3,4}

(1. College of Resources and Environment Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China; 2. Hubei Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgical Mineral Resources, Wuhan 430081, Hubei, China; 3. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China; 4. National Engineering Research Center of Sintering and Pelletizing Equipment System, Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: In this paper, a marine placer from Indonesia is used as the testing material. Its chemical composition and mineral composition were analyzed by XRD, and the reduction characteristics and the regulation mechanism of the valuable elements of the ore are discussed on the basis of thermodynamics. The reduction and grinding experiments of marine placer were carried out by microwave heating with biochar as the reducing agent for direct reduction. Microwave heating is beneficial to strengthen the reduction process of marine placer. The results show that the reduction product with 98.28% metallization rate can be obtained with the C/Fe ratio of 0.6 and the reduction temperature of 1 200 °C for 150 min. Under the conditions of 50% pulp concentration, 40 min grinding time and 0.08 T magnetic field

收稿日期: 2021-09-08

基金项目: 湖南省青年基金项目(2019JJ51007); 湖湘青年英才项目(2020RC3092)。

作者简介: 胡佩伟(1983—), 男, 湖南双峰人, 博士, 副教授, 主要从事钢铁冶金等研究, E-mail: pwhu@wust.edu.cn; * 通讯

作者: 胡兵(1983—), 男, 湖南邵阳人, 博士, 高级工程师, 主要从事钢铁冶金和直接还原等研究, E-mail: csu0206@163.com。

intensity, the refined powder with iron grade of 85.1% and iron recovery of 94.01%, tailings powder with TiO₂ grade of 28.95% and recovery of 71.98%, V₂O₅ grade of 2.14% and recovery of 56.82% can be obtained. The separation and enrichment of iron and vanadium-titanium are effectively realized.

Key words: vanadium-titanium magnetite marine placer, direct reduction-grinding-magnetic separation method, microwave heating, biochar, iron, titanium, vanadium, recovery rate

0 引言

钒钛磁铁海砂矿资源储量丰富(超千亿吨), 开采成本低, 其作为获取钒的原料, 极具开发价值和应用前景^[1]。但由于海砂矿物相复杂、结构致密、固相还原难度大, 极大限制了该资源的开发和利用^[2]。目前处理海砂矿的工艺主要分为三类: 选矿法、高炉法和非高炉法, 其中非高炉法又分为预还原-电炉法和直接还原-磨矿-磁选法^[3-6]。与其他方法相比, 直接还原-磨选法用来处理海砂矿的工艺流程短、能耗低, 可获得还原铁粉和富钒钛料产品, 还原铁粉中 Fe 品位高、铁的回收率高, 在一定程度上实现了铁、钒钛分离富集, 达到了铁、钒、钛资源综合利用的目的。但存在铁钛分离效果不佳、富钒钛渣杂质含量高、钒钛回收率低等问题^[7-11]。

笔者采用直接还原-磨矿-磁选法处理钒钛磁铁海砂矿, 并通过微波加热的方式强化海砂矿的还原过程, 分析了铁钒钛氧化物还原热力学行为, 系统研究了还原温度、C/Fe、还原时间等对海砂矿中铁钒钛有价元素还原过程的影响, 查明了海砂矿各物相

的演变规律, 揭示了钒钛磁铁海砂矿还原过程有价元素调控机制, 最终实现了海砂矿铁钒钛等有用金属的高效分离。

1 试验

1.1 原料

本试验原料为印尼某海滨钒钛磁铁矿(简称海砂矿), 其中 120 ~ 230 μm 粒级的颗粒占比为 69.09%。海砂矿主要化学成分如表 1 所示, X 射线衍射图谱 (XRD) 如图 1 所示, 海砂矿中各矿物含量如表 2 所示。由表 1 可知, 该海砂矿全铁品位为 54.27%, 铁氧化物以磁铁矿为主, FeO 和 Fe₂O₃ 质量分数分别为 29.08% 和 45.27%, TiO₂ 含量为 10.88%, V₂O₅ 含量为 0.68%, (CaO+MgO)/(SiO₂+Al₂O₃)=0.54, 该矿属于半自熔性酸性矿, 有害杂质 P、S 含量很低。由图 1 及表 2 可知海砂矿中的主要矿物为钛磁铁矿 (Fe²⁺_(1+x)Fe³⁺_(2-2x)Ti_xO₄), 含量约为 83.21%, 还含有约 6.93% 的钛赤铁矿 (Fe_{2-y}Ti_yO₃), 另外, 还存在少量的钛铁矿, 含量约 1.87%, 海砂矿中钙、镁、铝、硅氧化物以辉石形式存在, 含量约 5.61%。

表 1 海砂矿的主要化学成分
Table 1 Main chemical compositions of marine placer

Table 1 Main chemical compositions of marine placer												%
TFe	FeO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	P	
54.27	29.08	45.27	10.88	0.68	4.01	3.67	0.48	3.68	0.44	0.06	0.03	

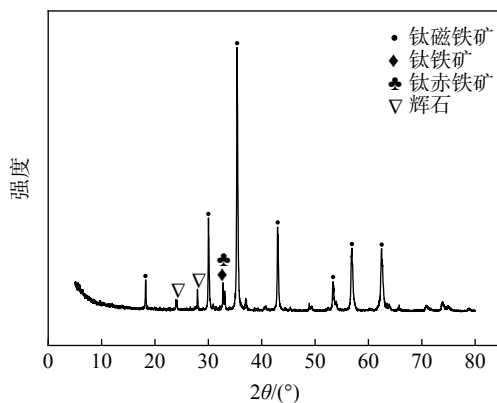


图 1 海砂矿 XRD 图谱
Fig. 1 XRD diagram of marine placer

本试验还原阶段采用的还原剂为硬木高温裂解得到的生物质炭, 其工业分析如表 3 所示。由表 3

可知, 生物质炭中含有 80.81% 的固定碳与 15.65% 的挥发分。与传统焦煤做还原剂相比, 较高的挥发分在高温焙烧过程中会分解出 H₂ 等强还原性气体, 可以有效提高还原效率, 同时对环境污染较小。

表 2 海砂矿主要矿物含量
Table 2 Main mineral content of marine placer

Table 2 Main mineral content of marine placer				%
钛磁铁矿	钛赤铁矿	钛铁矿	辉石	
83.21	6.93	1.87	5.61	

表 3 生物质炭工业分析
Table 3 Content analysis of the biochar

Table 3 Content analysis of the biochar				%
水分	固定碳	挥发分	灰分	
6.51	80.81	15.65	3.54	

1.2 试验方法

本研究采用的海砂矿直接还原-磨矿-磁选流程包括:原料微波预氧化、煤基选择性直接还原、磨选分离。预氧化与还原焙烧阶段均采用微波加热。具体试验流程如图2所示。

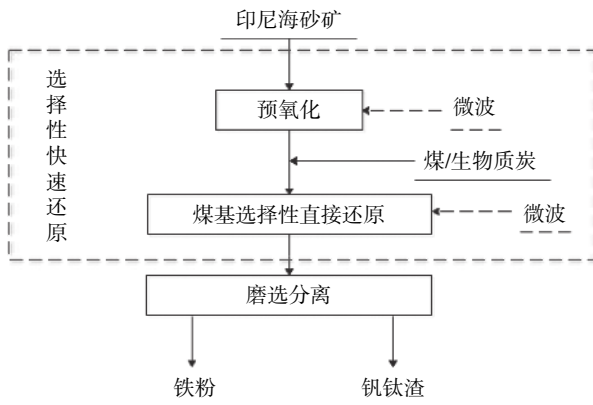
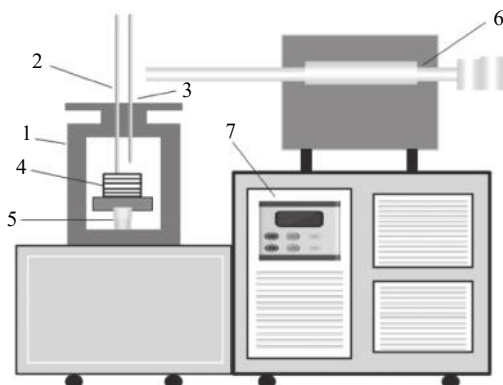


图2 试验工艺流程

Fig. 2 Experimental process flow chart

试验设备为卧式电炉-竖式微波炉联合加热炉,如图3所示,由湖南长沙华冶微波公司生产制造。首先将海砂矿置于微波竖炉内进行预氧化,固定微波功率为7 kW,加热90 min,试验期间通入1 L/min的空气,再将完成预氧化的海砂矿与还原剂混合后从进料端加入到回转电炉中,通过回转炉外的电加热器升温实现预还原,其次再将预还原后的物料通过顶升装置倒入微波竖炉中后密封顶盖进一步还原焙烧,固定微波功率为8 kW,利用微波的“非热效应”实现铁的快速还原和铁晶粒聚集长大,计算焙烧后的还原物料的金属化率,由式(1)计算得到。



1-竖式微波炉;2-测温热电偶;3-导气管;4-坩埚;
5-称重装置;6-还原回转电炉;7-控制器

图3 设备示意

Fig. 3 Schematic diagram of the equipment

$$\eta = \frac{M_{Fe}}{T_{Fe}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, η 为金属化率,%;MFe为金属铁的含量,%;TFe为全铁的含量,%。

最后对还原矿样进行磨选分离,磨选过程中主要评价指标为钒钛渣中的TiO₂、V₂O₅含量及回收率。TiO₂、V₂O₅含量由化学分析得出,回收率由式(2)计算。

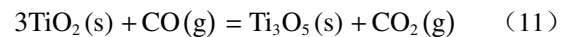
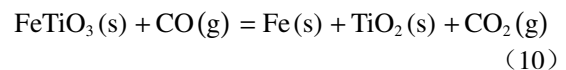
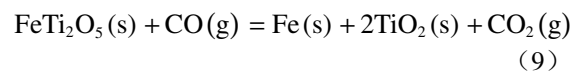
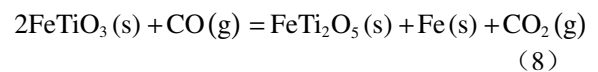
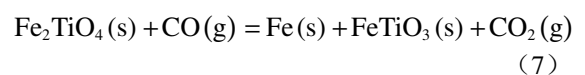
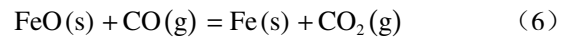
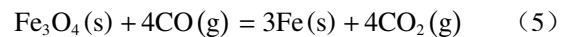
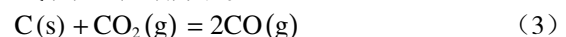
$$\xi = \frac{m \times \alpha}{m_0 \times \delta} \times 100\% \quad (2)$$

式中, ξ 为钒钛渣中TiO₂、V₂O₅回收率,%;m为钒钛渣中TiO₂、V₂O₅的质量,g; α 为钒钛渣中TiO₂、V₂O₅的含量,%; δ 为还原料中的TiO₂、V₂O₅的含量,%; m_0 为磨选还原料质量,g。

2 结果与讨论

2.1 钛铁氧化物的还原理论

海砂矿的主要矿物为钛磁铁矿、钛赤铁矿和钛铁矿,在直接还原过程中,海砂矿主要发生的气固反应如式(3)~(11)所示。



根据上述各反应的平衡常数及阿伦尼乌斯公式可得铁氧化物和含钛铁氧化物还原的CO平衡气相关系,结果见图4。由图4可知,当温度低于400℃,CO分压趋近于0,碳气化反应几乎不能进行;当温度高于980℃,CO分压趋近于1,碳气化反应趋于完全反应。因此,以固体碳为还原剂,当温度高于980℃,还原体系气相组成可近似为纯CO。根据铁氧化物和含钛铁氧化物的还原特性,其还原过程都是逐级进行的。含钛铁氧化物还原所需的CO平衡分压远高于铁氧化物还原所需的CO平衡分压,这

表明钒铁氧化物更难于被 CO 还原。这表明通过煤基直接还原可以选择性还原铁氧化物为金属铁, 实现铁与钒的分离。

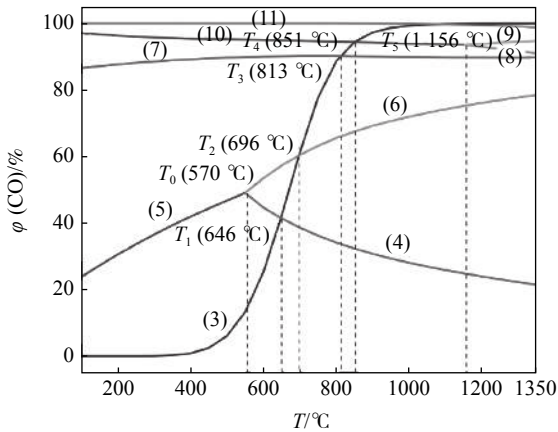
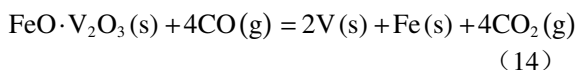
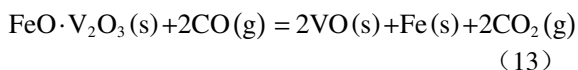
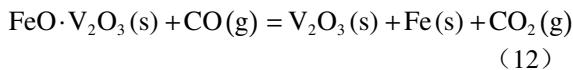


图 4 固体碳还原铁氧化物及含钒铁氧化物的气相平衡关系
Fig. 4 Gas phase equilibrium diagram for reduction of iron oxide and ferrotitanium oxide by solid carbon

2.2 钒铁氧化物的还原理论

在海砂矿中, 钒元素主要以三价阳离子的氧化物状态取代磁铁矿中三价铁离子, 以 $\text{FeO} \cdot (\text{Fe}, \text{V})_2\text{O}_3$ 为主要存在形式, 固溶于磁铁矿中。为方便热力学计算, 在直接还原过程中, 默认海砂矿中钒铁氧化物为 $\text{FeO} \cdot \text{V}_2\text{O}_3$, 发生的主要气固反应如式(12)~(14)所示。



由上述各反应的平衡常数结合阿伦尼乌斯公式可得出含钒氧化物还原的 CO 平衡气相关系, 结果见图 5。由图 5 可以看出, 碳气化平衡曲线分别与 $\text{FeO} \cdot \text{V}_2\text{O}_3$ 的还原平衡曲线相交于 T_1 、 T_2 和 T_3 。其中 T_1 为 855 °C、 T_2 为 1 022 °C、 T_3 为 1 312 °C, 当温度低于 855 °C 时, $\text{FeO} \cdot \text{V}_2\text{O}_3$ 不能被 CO 还原为金属铁和 V_2O_3 ; 当温度为 855 ~ 1 022 °C, $\text{FeO} \cdot \text{V}_2\text{O}_3$ 被 CO 还原为金属铁和 V_2O_3 ; 当温度为 1 022 ~ 1 312 °C, $\text{FeO} \cdot \text{V}_2\text{O}_3$ 被 CO 还原为金属铁和 VO; 当温度高于 1 312 °C, $\text{FeO} \cdot \text{V}_2\text{O}_3$ 被 CO 还原为金属铁和 V。综上所述, 在含钒铁氧化物的还原过程中, $\text{FeO} \cdot \text{V}_2\text{O}_3$ 被还原成 VO、V 所需要的温度与 CO 分压均远高于还原成 V_2O_3 的温度与 CO 分压, 因此海砂矿钒铁氧化物还原所得产物主要为 V_2O_3 。

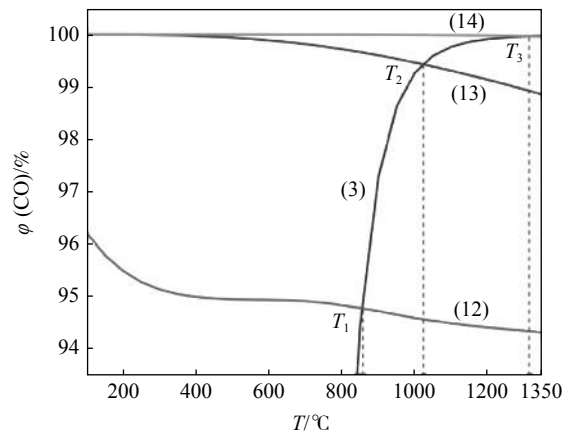


图 5 海砂矿中固体碳还原含钒氧化物的气相平衡关系
Fig. 5 Gas phase equilibrium diagram for the reduction of vanadium-containing oxides by solid carbon in sea sand ore

由图 5 还可以看出, 在含钒铁氧化物中, 铁氧化物先于钒氧化物被 CO 还原, 这表明通过煤基直接还原可以选择性还原铁氧化物为金属铁, 实现钒与铁的分离。

2.3 还原温度对铁、钒钛分离富集的影响

在 C/Fe 为 0.6(即还原剂固定碳含量与海滨砂矿中全铁含量的质量比为 0.6), 还原时间为 150 min 的条件下, 探究还原温度对海砂矿还原产物金属化率的影响, 试验结果如图 6 所示。在矿浆浓度 50%, 磨矿时间为 40 min, 磁场强度为 0.08 T 的条件下对还原产物进行球磨-磁选分离试验, 探究还原温度对还原产物分离富集的影响, 试验结果如图 7 所示。

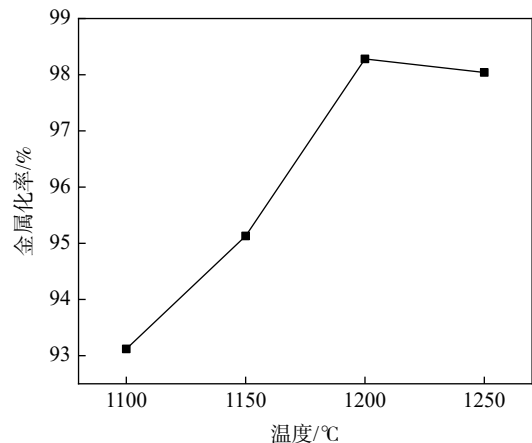


图 6 温度对还原产物金属化率的影响
Fig. 6 Effect of temperature on the metallization ratio of reduced products

由图 6 可知, 在深还原温度为 1 100 °C 即可取得 93.12% 的金属化率, 且随着深还原温度的升高,

还原产物的金属化率继续升高。当深还原温度升高到 1 200 ℃ 时, 还原产物金属化率高达 98.28%, 但

继续升高温度至 1 250 ℃ 时, 还原产物的金属化率无明显变化。

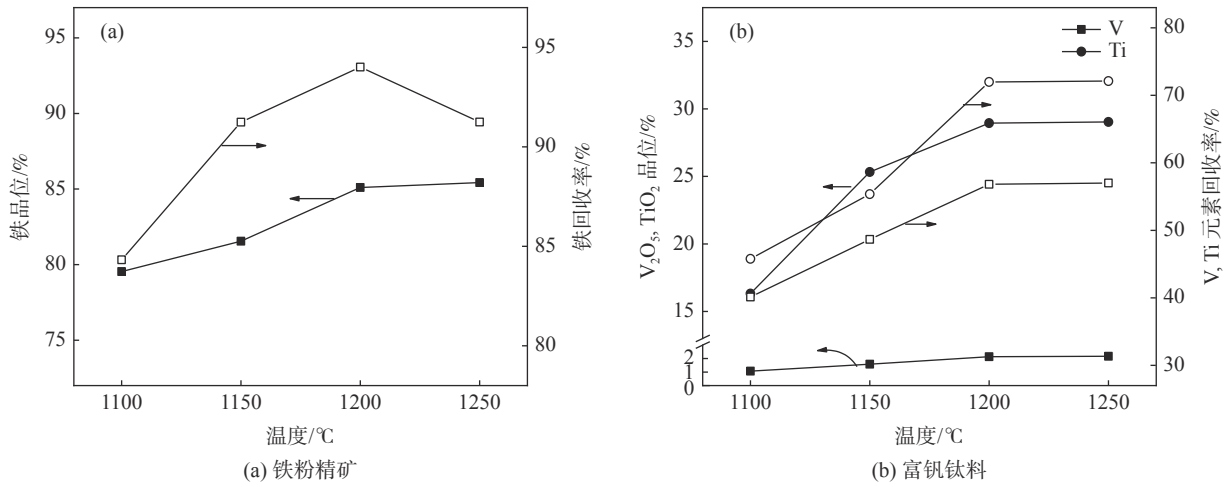


图 7 温度对还原产物分离富集的影响
Fig. 7 Effect of the temperature on the separation and enrichment of reduced products

由图 7 可知, 随着还原温度升高, 铁粉的铁品位逐渐升高, 但回收率先增加后减小, 当还原温度从 1 100 ℃ 升高到 1 250 ℃, 铁品位由 79.54% 增加到 85.43%, 当温度从 1 100 ℃ 升高到 1 200 ℃ 时, 铁回收率由 84.32% 增加到 94.01%, 而当温度继续升高到 1 250 ℃ 时, 铁回收率下降了 2.76%。当还原温度从 1 100 ℃ 升高到 1 250 ℃, 富钒钛料中的 TiO₂ 和 V₂O₅ 回收率及品位增加较为显著, 钛元素回收率由 45.78% 增加到 72.11%, TiO₂ 品位由 16.32% 增加到 29.03%, 钒元素回收率由 30.11% 增加到 57.01%, 品位由 1.07% 增加到 2.17%, 综上可知, 还原温度的升高能够有效促进还原产物中铁与钒钛的分离, 最佳的还原温度为 1 200 ℃。

2.4 C/Fe 对铁、钒钛分离富集的影响

在还原温度为 1 200 ℃, 还原时间为 60 min 的条件下, 探究 C/Fe 对海砂矿还原产物金属化率的影响, 试验结果如图 8 所示。在矿浆浓度为 50%, 磨矿时间为 40 min, 磁场强度为 0.8 T 的条件下, 探究 C/Fe 对还原产物分离富集的影响, 试验结果如图 9 所示。

由图 8 可知, 随着 C/Fe 的提高, 还原产物金属化率先升高后降低。当 C/Fe 由 0.3 提高到 0.6 时, 还原产物金属化率由 89.76% 提高到 98.28%; 继续提高至 C/Fe 为 0.7 时, 还原产物金属化率却由 98.28% 降低至 97.1%。这是因为当 C/Fe 过高时, 生物质炭用量增加, 还原焙烧后灰分含量增加, 导致

还原产物中杂质含量升高, 还原产物金属化率有所降低。

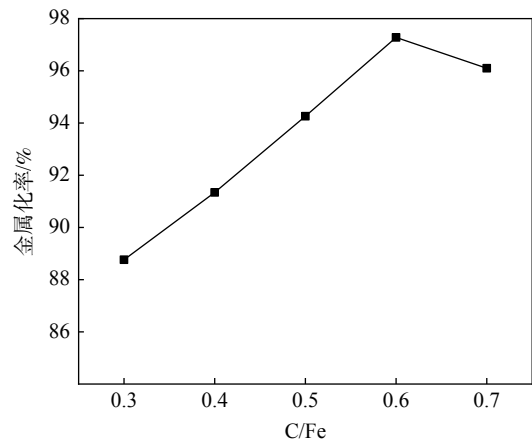


图 8 C/Fe 对还原产物金属化率的影响
Fig. 8 Effect of C/Fe on the metallization ratio of reduced products

由图 9 可知, 随着 C/Fe 的提高, 铁粉中 TFe 品位和回收率先升高后降低, TFe 品位和回收率在 C/Fe 为 0.6 时达到最大值为 85.1%、94.01%; 富钒钛渣中 TiO₂ 品位和回收率先升高后降低, 当 C/Fe 由 0.3 提高至 0.6 时, TiO₂ 品位和回收率分别由 19.33% 和 60.11% 提高至 28.95% 和 71.98%, 继续提高 C/Fe 至 0.7, TiO₂ 品位和回收率分别降低至 27.66% 和 70.11%; V₂O₅ 品位和回收率与 TiO₂ 变化趋势大致一致, 当 C/Fe 由 0.3 提高至 0.6 时, V₂O₅ 品位和回收率分别由 1.55% 和 30.11% 提高至 2.14% 和 56.82%, 因此最佳的 C/Fe 为 0.6。

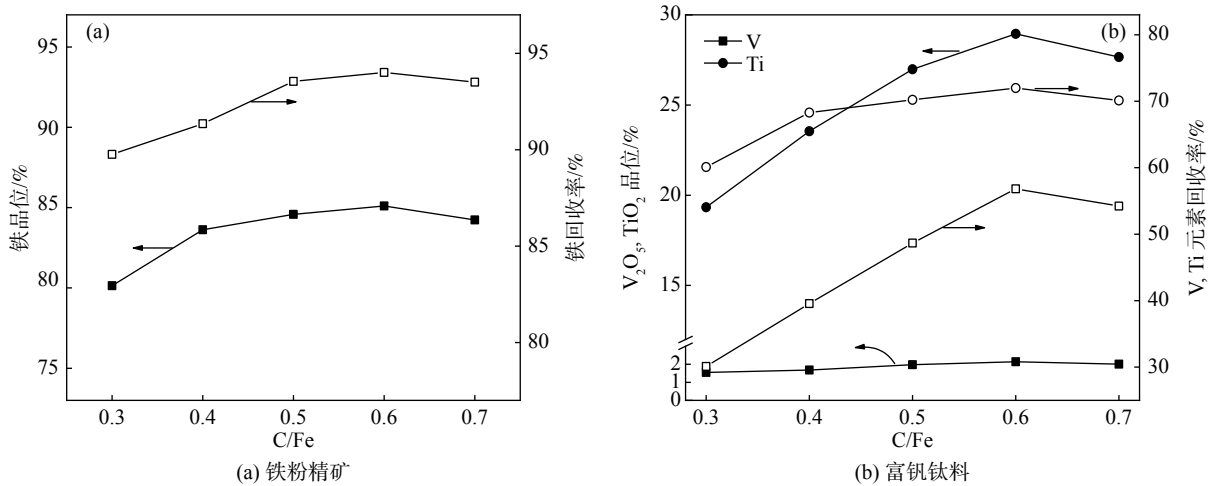


图 9 C/Fe 对还原产物分离富集的影响
Fig. 9 Effect of C/Fe on the separation and enrichment of reduced products

2.5 还原时间对铁、钒钛分离富集的影响

在还原温度为 1 200 °C, C/Fe 为 0.6 的条件下, 探究还原时间对海砂矿还原产物金属化率的影响, 试验结果如图 10 所示。在矿浆浓度 50%, 磨矿时间为 40 min, 磁场强度为 0.8 T 的条件下对还原产物进行球磨-磁选分离试验, 探究还原时间对还原产物分离富集的影响, 试验结果如图 11 所示。

由图 10 可知, 海砂矿的还原效果较好, 随着还原时间的延长, 还原产物金属化率先升高后降低, 当还原时间从 120 min 延长到 150 min 时, 金属化率由 92.47% 提高到 98.28%, 从 150 min 延长到 190 min 时, 金属化率保持稳定, 继续延长时间至 250 min 时, 金属化率下降至 95.25%, 这可能是随着还原时间延长, 加入的还原剂消耗殆尽, 炉内有少量的氧气介入导致被还原的金属铁又重新被氧化。

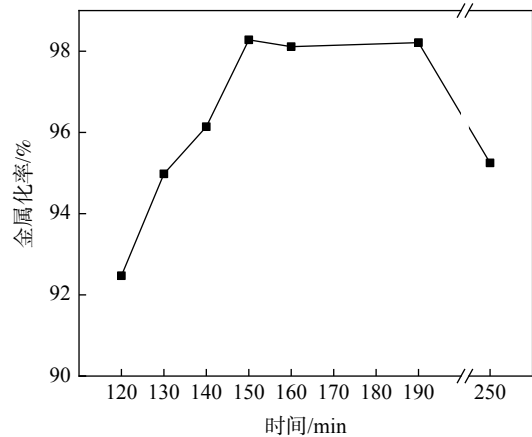


图 10 时间对还原产物金属化率的影响
Fig. 10 Effect of the time on the metallization ratio of reduced products

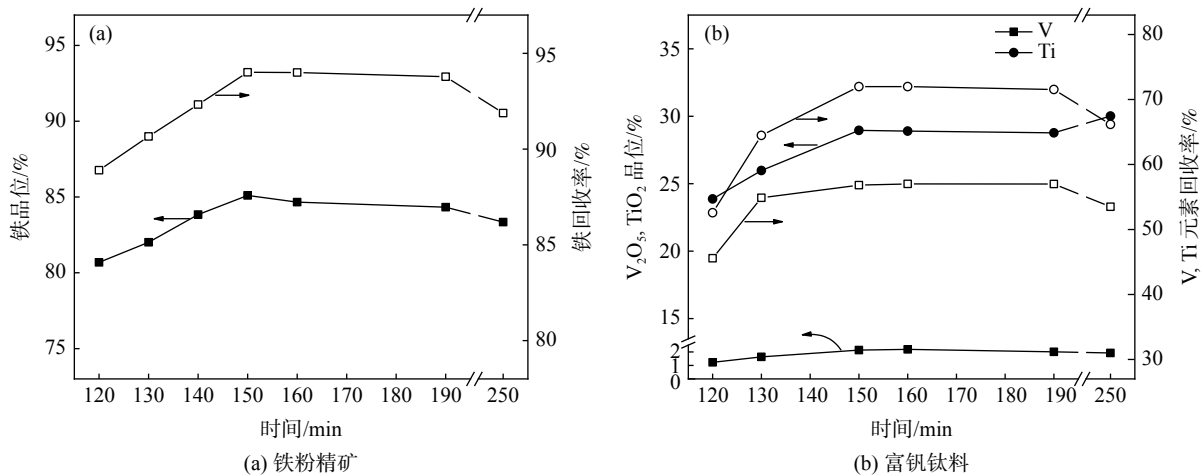


图 11 时间对还原产物分离富集的影响
Fig. 11 Effect of the time on the separation and enrichment of reduced products

由图 11 可知, 延长还原时间, 铁粉中 TFe 品位和回收率先升高后降低, 当时间由 120 min 延长至 150 min, TFe 品位由 88.90% 提高到 94.01%, 回收率由 80.69% 提高到 85.10%。继续延长时间至 190 min, TFe 品位与回收率无明显的变化, 富钒钛料 TiO₂ 品位和回收率先升高后平稳。当时间由 120 min 延长到 150 min 时, TiO₂ 品位和回收率分别由 23.87% 和 52.57% 提高到 28.95% 和 71.98%。继续延长时间至 190 min, TiO₂ 品位和回收率维持稳定不再增加, 富钒钛渣中 V₂O₅ 品位和回收率先升高后降低。当时间由 120 min 延长到 150 min 时, V₂O₅ 品位和回收率分别由 1.23% 和 45.57% 提高到 2.14% 和 56.82%。继续延长时间到 250 min, V₂O₅ 品位和回收率分别降低至 1.96% 和 53.49%, 这可能是因为还原时间过长防氧化的煤消耗完, 还原产物有所氧化, 因此最佳的还原时间为 150 min。

2.6 海砂矿还原质量平衡及化学计算路径

以 100 g 海砂矿为试验原料, 在最佳的还原条件: 还原温度为 1 200 ℃, C/Fe 为 0.6, 还原时间为 150 min, 可以得出海砂矿固态还原质量平衡关系如图 12 所示, 结合热力学计算可以得出海砂矿具体化学计算路径如图 13 所示。

100 g 海砂矿中 TFe 质量为 54.27 g, TiO₂ 质量为 10.88 g, V₂O₅ 质量为 0.68 g, 经过微波预氧化后可以得到预氧化矿, 预氧化矿与生物质炭混匀还原焙烧可以得到还原料, 还原料金属化率为 98.28%, 经过磨选分离后得到两种产物: 精矿粉、尾矿粉, 精

矿粉中 TFe 质量为 43.42 g, 尾矿粉中 TiO₂ 与 V₂O₅ 的质量分别为 2.27 g 与 8.3 mg。

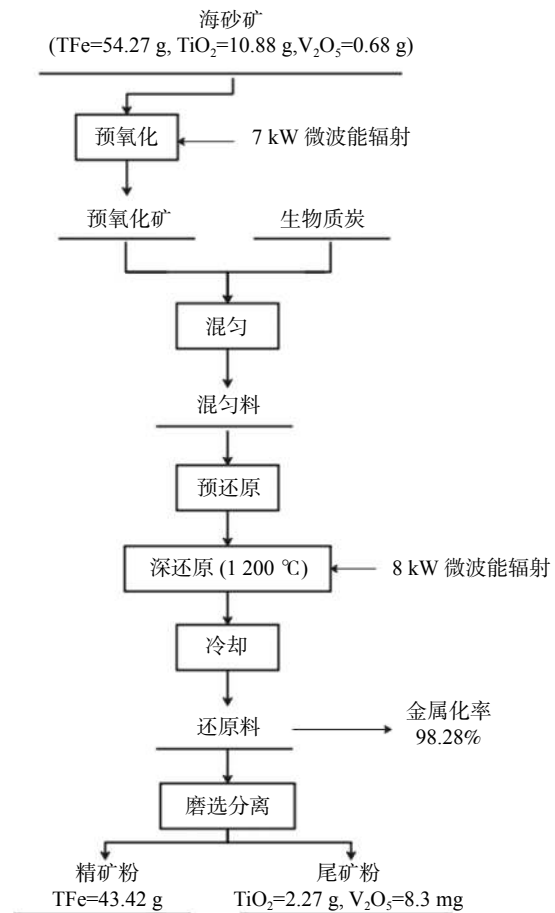


图 12 海砂矿还原质量平衡

Fig. 12 Reduction mass balance diagram of marine sand ore

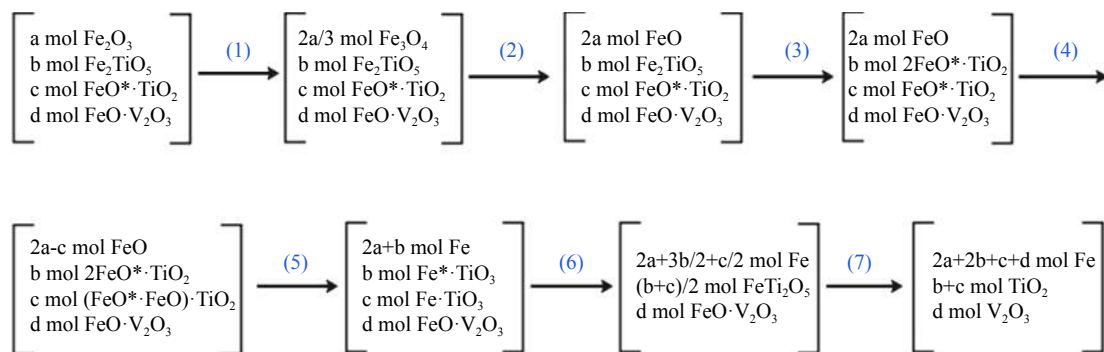


图 13 海砂矿固态还原化学计算路径

Fig. 13 Chemical calculation path for the solid reduction of marine sand ore

海砂矿固态还原化学计算路径如图 13 所示。第(1)步: 当温度低于 646 ℃ 时, 主要的还原反应为赤铁矿还原为磁铁矿(Fe₃O₄); 第(2)步: 当温度高于 646 ℃ 时磁铁矿还原成方铁矿(FeO); 第(3)步: 铁板钛矿还原为钛铁尖晶石; 第(4)步: 游离态的 FeO

与钛铁矿相结合转化为钛铁尖晶石^[12]; 第(5)步: 游离态 FeO 还原为 Fe, 钛铁尖晶石还原为钛铁矿, FeO 是由预氧化矿中的 Fe₂O₃ (未与 TiO₂ 结合成 Fe₂TiO₅) 还原所得; 第(6)步: 钛铁矿分解成亚铁假板钛矿(FeTi₂O₅)与 Fe; 最后一步, 亚铁假板钛矿分

解成 TiO_2 与 Fe , $\text{FeO} \cdot \text{V}_2\text{O}_5$ 分解成 V_2O_5 与 Fe 。

3 结论

1)海砂矿是一种铁、钒、钛紧密共生的多组元复杂铁矿,其中 TFe、 TiO_2 品位及 V_2O_5 分别为 54.27%、10.88% 和 0.68%,主要物相为钛磁铁矿,还含有钛赤铁矿、钛铁矿、辉石,分布率分别为 83.21%、6.93%、1.87%、5.61%。

2)升高还原温度可以提高还原产物的金属化率,提高铁粉中的 TFe 品位和回收率,可以提高富钒钛渣中 TiO_2 、 V_2O_5 品位和回收率。当还原温度为 1 200 °C 时,海砂矿还原产物金属化率为 98.28%,该温度条件下能够实现还原过程中铁与钒钛的高效分离。

3)随着 C/Fe 的提高,还原产物金属化率先升高

后降低,最佳的 C/Fe 为 0.6,当 C/Fe 过高时,生物质炭用量增加,还原焙烧后灰分含量增加,导致还原产物中杂质含量升高,不利于磨选分离。

4)延长还原时间能有效地促进铁晶粒长大,提高金属化率,但当还原时间大于 150 min 时,存在部分金属铁被氧化,不利于磨选分离。

5)海砂矿经过微波预氧化后,以 C/Fe 为 0.6 的条件,在 1 200 °C 温度下还原 150 min 所得的还原产物金属化率为 98.28%;铁粉中铁品位为 85.1%、铁回收率为 94.01%;富钒钛料中 TiO_2 品位为 28.95%,回收率 $\zeta(\text{TiO}_2)=71.98\%$, V_2O_5 品位为 2.14%,回收率 $\zeta(\text{V}_2\text{O}_5)=56.82\%$ 。有利于后续进一步回收钒钛的试验研究。

参考文献

- [1] Liu S S, Guo Y F, Qiu G Z, *et al.* Solid-state reduction kinetics and mechanism of pre-oxidized vanadium-titanium magnetite concentrate[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(10): 3372-3377.
- [2] Yang Tao, Chen Hanyu, Song Fumei, *et al.* Research on developing and utilizing an indonesia beach iron sand[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2016, (2): 29-33.
(杨涛,陈汉宇,宋复梅,等.对印尼某海滨铁砂矿的开发利用研究[J].*矿产综合利用*, 2016, (2): 29-33.)
- [3] Sui Y L, Guo Y F, Travyanov A Y, *et al.* Reduction roasting-magnetic separation of vanadium tailings in presence of sodium sulfate and its mechanisms[J]. *Rare Metals*, 2016, (35): 954-960.
- [4] Yang S P, Wang J, Du X, *et al.* Study on melting separation for metalized pellet of vanadium-titanium magnetite and TiO_2 enrichment[J]. *Mining & Metallurgical Engineering*, 2014, (34): 87-88.
- [5] Guo Y F, Tang M J, Jiang T, *et al.* Research on the slag phase type of vanadium-titanium magnetite in pre-reduction/electric furnace smelting[C]//Processing in: 4th International Symposium on High-temperature Metallurgical Processing, TMS Annual Meeting, San Antonio, Texas, USA, 2013: 87-94.
- [6] Jena M S, Tripathy H K, Mohanty J K, *et al.* Roasting followed by magnetic separation: A process for beneficiation of titanomagnetite ore[J]. *Separation Science & Technology*, 2015, 50(8): 1221-1229.
- [7] Wang Wei, Dong Hui, Zhao Liang, *et al.* Review on vanadium extraction from vanadium-titanium magnetite[C]//The 10th National Conference on Energy and Thermal Engineering. Energy and Thermal Engineering Branch of China Metal Society, Hangzhou: 2019.
(王伟,董辉,赵亮,等.钒钛磁铁矿提钒工艺综述[C]//第十届全国能源与热工学术年会.中国金属学会能源与热工分会,杭州:2019.)
- [8] Xi Gan, Lei Ying, Hu Kejun, *et al.* Application of vanadium abroad[J]. *World Nonferrous Metals*, 2000, (2): 13-21.
(锡淦,雷鹰,胡克俊,等.国外钒的应用概况[J].*世界有色金属*, 2000, (2): 13-21.)
- [9] Fan Xing. Hydrothermal synthesis of nano- V_2O_5 doped with Rare earth and its application in vanadium sulfate catalyst[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.
(范鑫.稀土掺杂改性水热合成纳米 V_2O_5 及在硫酸钒催化剂中的应用[D].贵阳:贵州大学,2019.)
- [10] Qu Mingjun, Zhu Quanfang. Analysis of vanadium catalyst heating up and blowing in sulphuric acid plant[J]. *Sulfuric Acid Industry*, 2018, (11): 20-22.
(瞿明军,朱全芳.浅谈硫酸装置钒催化剂的升温 and 吹除[J].*硫酸工业*, 2018, (11): 20-22.)
- [11] Gao Yongzhang. Analysis of vanadium ore resources and supply and demand situation in China[J]. *China Mining*, 2019, 28(z2): 5-10.
(高永璋.中国钒矿资源及供需形势分析[J].*中国矿业*, 2019, 28(z2): 5-10.)
- [12] Sun H Y, Adetoro A A, Pan F, *et al.* Effects of high-temperature preoxidation on the titanomagnetite ore structure and reduction behaviors in fluidized bed[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2017, 48(3): 1898-1907.