

# 钛铁矿粗精矿直接还原分离钛铁试验研究<sup>①</sup>

张崇辉, 高晨鑫, 卜显忠, 宛鹤, 王森, 薛季玮

(西安建筑科技大学 资源工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 通过直接还原焙烧-磁选工艺对钛铁矿粗精矿进行铁、钛分离回收利用, 采用单因素实验研究了还原温度、还原时间、煤粉用量、硼砂用量、膨润土用量、磨矿细度、磁场强度对铁精矿和钛精矿品位、回收率的影响, 确定了适宜的工艺参数。结果表明, 在还原温度 1 200 ℃、还原时间 2 h、煤粉用量 40%、硼砂用量 2%、膨润土用量 2%、磨矿细度-38 μm 粒级占 84%、磁选磁场强度 79.62 kA/m 时, 采用直接还原焙烧-磁选工艺可获得铁品位 82.57%、铁回收率 83.59% 的铁精矿和钛品位 49.23%、钛回收率 85.18% 的钛精矿, 选冶指标理想。

**关键词:** 钛铁矿; 还原焙烧; 磁选; 回收率; 铁精矿; 钛精矿

中图分类号: TD951

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.04.022

文章编号: 0253-6099(2023)04-0099-04

## Experimental Study on Separation and Recovery of Iron and Titanium from Ilmenite Rough Concentrate by Direct Reduction

ZHANG Chonghui, GAO Chenxin, BU Xianzhong, WAN He, WANG Sen, XUE Jiwei

(School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

**Abstract:** A process consisting of direct reduction roasting and magnetic separation was adopted to separate and recover iron and titanium from ilmenite rough concentrate. A single factor experiment was conducted to explore effects of several factors, including reduction temperature, reduction time, coal powder dosage, borax dosage, bentonite dosage, grinding fineness, and magnetic field intensity, on the grades and recovery of iron concentrate and titanium concentrate. Then, the optimal processing parameters were finally determined. A reduction roasting runs at 1 200 ℃ for 2 h by adding coal powder at an amount of 40%, borax at 2% and bentonite at 2%, with a grinding fineness of 84% -38 μm, followed by a magnetic separation with field intensity of 79.62 kA/m, resulting in an iron concentrate grading 82.57% Fe at 83.59% recovery, and a titanium concentrate approaching 49.23% Ti grade at 85.18% recovery. It is shown that good beneficiation and smelting indicators are obtained.

**Key words:** ilmenite; reduction roasting; magnetic separation; recovery; iron concentrate; titanium concentrate

直接还原焙烧-磁选是在低于矿石熔融温度下使矿石中的金属矿物直接还原成金属, 然后依次经过磨矿、弱磁选, 使磁性较强的还原金属产品与非磁性组分分离的方法。常用的直接还原焙烧方式有气基直接还原、煤基直接还原和电热直接还原, 目前较常用的为煤基直接还原<sup>[1]</sup>, 它又可分为内配法焙烧和包埋法焙烧<sup>[2-3]</sup>。直接还原焙烧-磁选技术工艺流程短, 在高磷鲕状赤铁矿<sup>[4-5]</sup>、钒钛磁铁矿<sup>[6-7]</sup>、褐铁矿<sup>[8-9]</sup>、硫酸

渣<sup>[10-11]</sup>等复杂难选铁矿中应用较多, 是铁矿资源回收利用的有效方式之一。

本文采用直接还原焙烧-磁选工艺回收某螺旋溜槽重选精矿(钛铁矿)中的铁和钛, 采用单因素实验考察了还原温度、还原时间、煤粉用量、硼砂用量、膨润土用量、磨矿细度、磁场强度对精矿品位和回收率的影响, 探讨并优化工艺参数, 为直接还原焙烧-磁选工艺应用于钛铁矿提供理论支持。

① 收稿日期: 2023-02-08

基金项目: 国家自然科学基金(52074206); 西安建筑科技大学自然科学基金专项(ZR20066); 安徽省重点研发项目(202104a07020012)

作者简介: 张崇辉(1984—), 男, 陕西户县人, 博士, 高级实验师, 主要研究方向为浮选分离技术及资源综合利用。

通信作者: 卜显忠(1977—), 男, 辽宁朝阳人, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为复杂多金属资源高效分离及综合回收利用。

## 1 试验原料与方法

### 1.1 试验原料

试验原料为螺旋溜槽重选精矿(以下称原矿),其化学多元素分析结果见表1,主要矿物含量分析结果见表2。从表1~2可以看出,该矿石中可供利用的元素为铁和钛;矿石中主要金属矿物为钛铁矿,是主要含铁、钛矿物,主要脉石矿物为顽火辉石。

表1 原矿化学多元素分析结果(质量分数) %

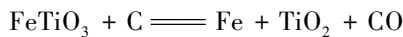
TFe	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	S	P
42.36	33.27	14.25	2.84	3.44	0.14	0.24	3.22	0.04	0.06

表2 原矿主要矿物含量分析结果(质量分数) %

钛铁矿	赤铁矿	顽火辉石	菱铁矿	角闪石	未检出
60.80	3.20	21.70	6.10	6.20	2.00

### 1.2 试验方法

目前,钛铁矿冶炼采用电炉熔融还原,还原温度在1700℃左右,还原温度较高,且工艺条件复杂,成本较高。有研究表明,采用煤基还原工艺可在较低温度下实现钛铁矿还原<sup>[12]</sup>,主要存在以下反应:



本文将试验原料与硼砂、膨润土按一定比例混匀后进行球团化处理,然后将球团烘干;烘干后的球团放入900℃马弗炉中预氧化处理20min,再将预氧化产品与煤粉按一定比例混合后进行还原焙烧,还原焙烧产品经球磨后进行磁选分离,所得磁性产品为铁精矿、非磁性产品为钛精矿,实现铁、钛分离。试验流程见图1,其中添加剂用量为添加剂与矿样的质量比。

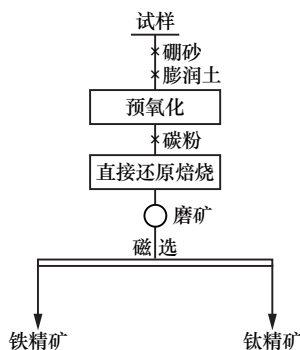


图1 试验流程

## 2 结果与讨论

### 2.1 还原温度试验

硼砂用量2%、膨润土用量3%、预氧化温度900℃、

预氧化时间20min、煤粉用量50%、还原时间2h、磨矿时间2.5h、磁选磁场强度79.62kA/m条件下,按照图1所示流程进行了还原温度条件试验,结果见图2。由图2可知,随着还原温度升高,铁精矿中铁品位、回收率及钛精矿中钛品位、回收率均先升高后降低,还原焙烧温度1200℃时,铁精矿中铁品位、回收率及钛精矿中钛品位、回收率均达到峰值,分别为78.66%、82.19%及50.35%、84.67%。

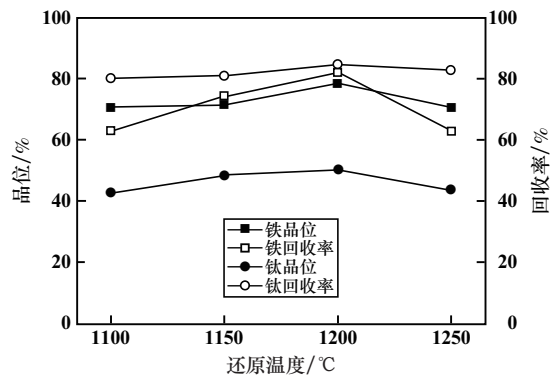


图2 还原温度试验结果

还原温度对铁精矿和钛精矿的回收影响显著。温度较低时,还原程度不够;温度较高时,还原剂煤粉消耗过快,副反应、矿样板结严重,这些都会对后续铁、钛磁选分离产生不利影响。综合考虑,确定适宜的还原温度为1200℃。

### 2.2 还原时间试验

还原温度1200℃,其他条件不变,进行了还原时间条件试验,结果见图3。由图3可知,随着还原焙烧时间增加,铁精矿中铁品位、回收率以及钛精矿钛品位均先升高后降低,还原焙烧时间2h时,铁精矿中铁品位、回收率及钛精矿中钛品位均达到峰值,分别为78.66%、82.19%及50.35%;钛精矿中钛回收率总体呈下降趋势,但降幅有限,在还原焙烧时间2~3h时趋于平稳,约85%。

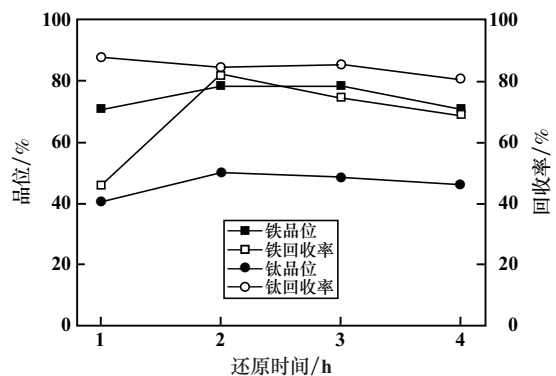


图3 还原时间试验结果

还原焙烧时间对铁精矿和钛精矿的回收影响显著,还原焙烧时间较短时,还原程度不够;还原焙烧时间较长时,还原剂煤粉消耗过大,会对铁、钛分离产生不利影响。综合考虑,确定适宜的还原时间为2 h。

### 2.3 硼砂用量试验

还原时间2 h,其他条件不变,进行了硼砂用量条件试验,结果见图4。由图4可知,随着硼砂用量增加,铁精矿中铁品位、回收率以及钛精矿中钛品位均先升高后降低,硼砂用量2%时,铁精矿中铁品位、回收率以及钛精矿中钛品位均达到峰值,分别为78.66%、82.19%以及50.35%;钛精矿中钛回收率总体呈上升趋势,硼砂用量2%~3%时钛回收率趋于平稳,为84.50%。

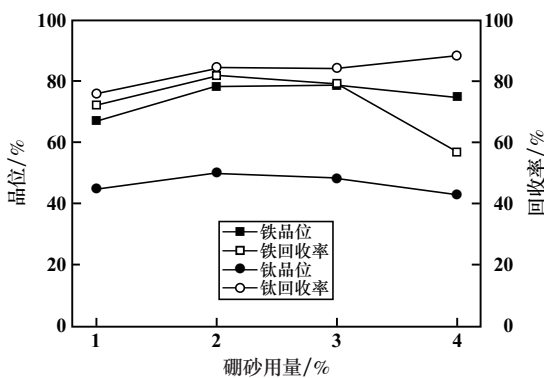


图4 硼砂用量试验结果

硼砂的添加有助于铁、钛的分离,但硼砂用量较大时,发生了其他相变反应,生成了其他固溶物质,从而影响分选效果。综合考虑铁精矿和钛精矿回收指标,适宜的硼砂用量为2%。

### 2.4 膨润土用量试验

该试验样品为螺旋溜槽重选精矿,黏土矿物含量极少,自身可塑性较差,自成团强度极差,试验通过添加一定量膨润土来增加矿样的黏性,确保矿样能顺利球团。硼砂用量2%,其他条件不变,进行了膨润土用量条件试验,结果见图5。由图5可知,随着膨润土用量增加,铁精矿中铁品位、回收率以及钛精矿回收率均

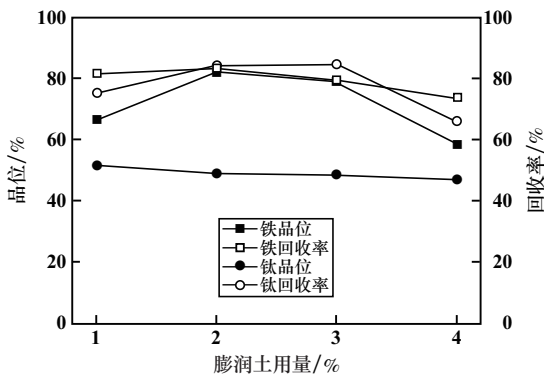


图5 膨润土用量试验结果

先升高后降低,钛精矿中钛品位逐渐降低,膨润土用量2%时,铁精矿及钛精矿指标较好,品位、回收率分别为82.07%、83.29%及49.05%、84.24%。

膨润土的添加有助于铁、钛的分离,但膨润土用量过大时,会影响球团空隙度、降低还原焙烧效果。综合考虑铁精矿和钛精矿回收指标,适宜的膨润土用量为2%。

### 2.5 煤粉用量试验

煤粉用量决定了还原焙烧的反应气氛。煤粉用量不足,还原气氛不能保证,矿样不能被充分还原;煤粉过量,又会造成资源浪费。膨润土用量2%,其他条件不变,进行了煤粉用量条件试验,结果见图6。由图6可知,随着煤粉用量增加,铁精矿中铁品位先增加后趋于平稳,铁回收率先升高后下降;钛精矿中钛品位先升高后降低,钛回收率先升高后趋于平稳。煤粉用量40%时,铁精矿和钛精矿指标较好,品位、回收率分别为84.50%、83.72%和48.74%、85.36%。综合考虑铁精矿和钛精矿回收指标,适宜的煤粉用量为40%。

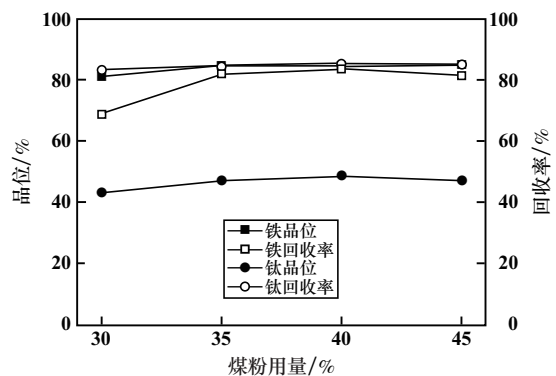


图6 煤粉用量试验结果

### 2.6 磨矿细度试验

矿石分选的前提条件是矿物单体解离。合适的磨矿细度是在保证矿物单体解离的前提下不出现矿样过磨,是提高有用矿物选别效率的关键因素。硼砂用量2%、膨润土用量2%、预氧化温度900℃、预氧化时间20 min、煤粉用量40%、还原焙烧温度1200℃、还原时间2 h、磁选磁场强度79.62 kA/m,考察了磨矿细度对铁、钛回收的影响,结果见图7。由图7可知,随着磨矿时间增加,铁精矿及钛精矿指标均先升高后趋于平稳。综合考虑铁精矿和钛精矿回收指标,适宜的磨矿时间为2 h,此时磨矿细度为-38 μm 粒级含量84%。

### 2.7 磁场强度试验

磨矿时间2 h(磨矿细度-38 μm 粒级含量84%),其他条件不变,进行了磁选磁场强度条件试验,结果见图8。由图8可知,随着磁场强度增加,铁精矿中铁品位及钛精矿中钛品位均逐渐降低,铁回收率先升高后

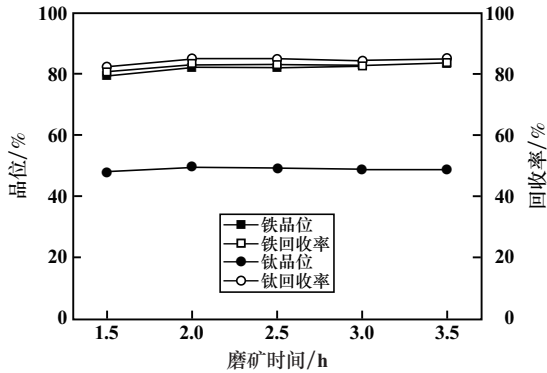


图7 磨矿细度试验结果

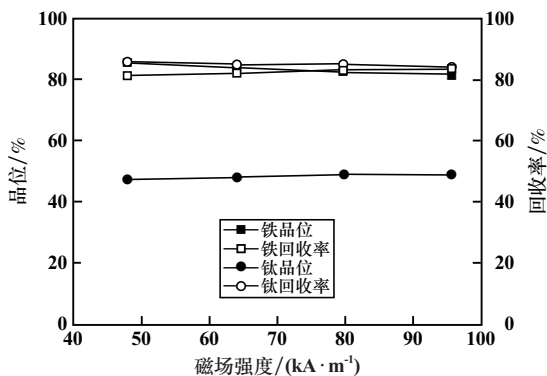


图8 磁场强度试验结果

趋于平稳,钛回收率逐渐降低。综合考虑铁精矿和钛精矿回收指标,适宜的磁场强度为 79.62 kA/m。

### 2.8 优化试验

通过单因素实验,确定直接还原焙烧-磁选的优化条件为:硼砂用量 2%,膨润土用量 2%,预氧化温度 900 ℃,预氧化时间 20 min,煤粉用量 40%,还原温度 1 200 ℃,还原时间 2 h,磨矿时间 2 h(磨矿细度-38 μm 粒级含量 84%),磁选磁场强度 79.62 kA/m。在该条件下开展了 2 组优化试验,结果见表 3。结果表明,2 组优化试验获得平均指标为:铁精矿铁品位 82.57%、铁回收率 83.59%,钛精矿钛品位 49.23%、钛回收率 85.18%,说明工艺参数合理,优化方案重复性良好,结果稳定,选冶指标理想。

表3 优化试验结果

批次	铁品位/%	铁回收率/%	钛品位/%	钛回收率/%
1	82.76	83.77	49.39	85.29
2	82.38	83.40	49.06	85.07
平均	82.57	83.59	49.23	85.18

## 3 结 论

1) 螺旋溜槽重选精矿中主要矿物为钛铁矿,采用直接还原焙烧技术可使其中的钛和铁发生质的变化,通过磨矿处理可使还原产品有效解离,再通过磁选可使钛、铁有效分离,处理成本大幅降低。

2) 经过单因素实验,得到直接还原焙烧-磁选的适宜工艺条件为:硼砂用量 2%,膨润土用量 2%,预氧化温度 900 ℃,预氧化时间 20 min,煤粉用量 40%,还原焙烧温度 1 200 ℃,还原时间 2 h,磨矿时间 2 h(磨矿细度-38 μm 粒级含量 84%),磁选磁场强度 79.62 kA/m。该条件下获得了铁精矿铁品位 82.57%、铁回收率 83.59%和钛精矿钛品位 49.23%、钛回收率 85.18%的指标。

### 参考文献:

- [1] 冯燕波,曹维成,杨双平,等. 中国直接还原技术的发展现状及展望[J]. 中国冶金, 2006(5):10-13.
- [2] 高恩霞,孙体昌,徐承焱,等. 基于还原焙烧的某海滨钛磁铁矿的钛铁分离[J]. 金属矿山, 2013(11):46-48.
- [3] GENG C, SUN T C, MA Y W, et al. Effects of embedding direct reduction followed by magnetic separation on recovering titanium and iron of beach titanomagnetite concentrate[J]. Journal of Iron and Steel Research (International), 2017,24(2):156-164.
- [4] 吴世超,孙体昌,寇 珏,等. 高磷鲕状铁矿直接还原-磁选提铁降磷扩大试验研究[J]. 工程科学学报, 2022,44(5):849-856.
- [5] 彭 程,曹志成,刘长正,等. 高磷鲕状赤铁矿转底炉直接还原中试研究[J]. 矿产保护与利用, 2020,40(2):119-124.
- [6] 胡 兵,谢志诚,黄柱成,等. 钒钛磁铁矿海砂矿低温快速直接还原新工艺[J]. 烧结球团, 2020,45(6):16-22.
- [7] 谢志诚,胡 兵,胡佩伟. 钒钛磁铁矿高效综合利用新工艺研究[J]. 钢铁钒钛, 2020,41(5):14-21.
- [8] 陈伟鹏,张天睿,李光卫,等. 添加剂对褐铁矿煤基直接还原强化作用研究[J]. 矿冶工程, 2018,38(1):76-80.
- [9] 陈伟鹏,李光卫,赵增武,等. 褐铁矿的煤泥球团直接还原[J]. 过程工程学报, 2015,15(6):1029-1033.
- [10] 高恩霞,钟国万,蒋 曼,等. 硫酸渣与高炉灰共还原-磁选回收铁试验研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(4):95-99.
- [11] 蒋 曼,李俊达,张 乐,等. 硫酸渣煤基直接还原焙烧制备直接还原铁[J]. 矿产保护与利用, 2019,39(3):58-62.
- [12] 张 涛,宋 兵. 钛铁矿还原-磨选法分离铁钛制备人造金红石研究现状[J]. 轻金属, 2020(8):42-44.

引用本文: 张崇辉,高晨鑫,卜显忠,等. 钛铁矿粗精矿直接还原分离钛铁试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):99-102.