

基于响应曲面法的钛精矿共用煤-铁粉的预还原

曾富洪, 周兰花

(钒钛资源综合利用四川省重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

摘要: 这是一篇冶金工程领域的文章。开展了钛精矿粉共同添加煤粉和铁粉的单因素和响应曲面法加热还原实验, 研究了温度、加热时间、铁粉添加量各因素不同水平对钛精矿中铁氧化物还原影响, 构建了铁的金属化率3次回归模型, 探究了各因素对铁的金属化率影响规律。单因素实验表明: 铁粉添加量1.5%~4.0%中, 高于2.5%后, 铁的金属化率能明显得到提高。响应曲面法实验结果分析发现: 在对铁氧化物的还原影响程度中, 温度>加热时间>铁粉添加量, 温度与时间交互作用>加热时间与铁粉添加量的交互作用; 1450℃、33.5 min、4%铁粉添加量优化条件下, 铁的金属化率可达86.79%, 还原产品中金属铁明显呈现。

关键词: 冶金工程; 钛精矿; 铁氧化物; 还原; 响应曲面法; 铁金属化率

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2025.02.024

中图分类号: TD981 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2025)02-0171-07

引用格式: 曾富洪, 周兰花. 基于响应曲面法的钛精矿共用煤-铁粉的预还原[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(2): 171-177.

ZENG Fuhong, ZHOU Lanhua. Pre-reduction of titanium concentrate with pulverized coal and iron power based on response surface methodology method[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(2): 171-177.

我国拥有十分丰富的钒钛铁矿资源, 钒钛铁矿经选取铁精矿后获得的钛精矿可用于制备生铁和钛渣^[1-4]。制备钛渣中铁氧化物的还原以及与TiO₂的分离过程中出现的工艺可以分为: 还原与熔化同炉进行(以下简称一步法)和先还原后熔化不同炉的两步进行(以下简称二步法)的两大类工艺。由文献^[5-11]分析发现, 一步法工艺存在: 熔融氧化铁的腐蚀性强, 对炉衬损坏较大, 极易降低炉衬使用寿命; 碳还原氧化物产生大量的高CO含量煤气难以有效回收, 能耗高等问题。二步法工艺, 先在加热炉内将钛精矿进行预还原, 然后加入终还原炉。在终还原炉内预还原的矿进一步进行还原后被熔化转变为钛渣和铁水。二步法中, 终还原产生的炉气能被有效地用于还原原料的预热, 提高炉气热能利用, 减轻环保问题。

二步法中用料方式包括有块料(如球团)和粉料, 块料制备工艺相对较复杂、成本较高, 国内外一些钛渣生产企业在钛精矿的铁氧化物预还原中选择使用粉料, 但粉料中铁的预还原效果一般都较差, 如何提高粉料中铁预还原效果的研究工作一直在进行。借鉴响应曲面法实验优势^[12], 本工作联合开展钛精矿-煤粉混合料的单因素、响应曲面法实验, 以期获得优化参数及其较高的金属化率。实验原料中配入适量铁粉, 以期在加热过程中能强化铁氧化物还原, 提高铁的金属化率。

1 原料

实验用的钛精矿成分见表1, 粒度为0.1~0.9 mm。煤粉成分见表2, 粒度为0.001~1 mm。

收稿日期: 2022-02-10

基金项目: 钒钛资源综合利用实验室省重点资助项目(035300235)

作者简介: 曾富洪(1969-), 男, 教授, 主要从事冶金资源综合利用研究。

通信作者: 周兰花(1969-), 女, 博士, 教授, 主要从事冶金资源综合利用研究。

表 1 钛精矿成分/%
Table 1 Composition of titanium concentrate

TFe	TiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	CaO	MnO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	V ₂ O ₅	其他
32.2	46.6	35.5	6.5	1.1	0.8	3.2	3.7	1.0	0.5	1.1

表 2 煤粉成分/%
Table 2 Coal composition

固定碳	灰分	挥发分
78.26	11.76	9.98

为减少加热过程中水分蒸发影响，实验时将钛精矿、煤粉等原料在 120 °C 的温度下烘干 6 h。

为促进钛精矿中铁氧化物的还原，考虑使用添加剂。一些研究^[13-15]发现了 Na₂CO₃、Li₂CO₃、NaCl、KCl、铁粉等添加物均具有改善铁氧化物的还原性。借鉴这些成果，为避免碱金属盐对钛精矿还原后将制备的钛渣产品性能产生影响，并考

虑钛精矿还原中促进铁金属形成，本实验的原料中添加铁粉。

2 实验

2.1 实验方案

为使钛精矿-煤粉体系铁氧化物充分还原，按铁完全还原所需碳量的 1.4 倍进行配碳，即得到实验原料配比：钛精矿 170 g，煤粉 21 g。

为探索各因素对钛精矿中铁氧化物还原影响规律，设计了单因素实验方案(表 3)。

表 3 单因素实验方案
Table 3 Test program of single factors

温度/°C	时间/min	钛精矿的铁粉添加比例/%	温度/°C	时间/min	钛精矿的铁粉添加比例/%	温度/°C	时间/min	钛精矿的铁粉添加比例/%
1 250	10	0	1 350	20	0	1 450	30	0
1 300	10	0	1 400	20	0	1 250	35	0
1 350	10	0	1 450	20	0	1 300	35	0
1 400	10	0	1 250	25	0	1 350	35	0
1 450	10	0	1 300	25	0	1 400	35	0
1 250	15	0	1 350	25	0	1 450	35	0
1 300	15	0	1 400	25	0	1 400	30	1.5
1 350	15	0	1 450	25	0	1400	30	2
1 400	15	0	1 250	30	0	1 400	30	2.5
1 450	15	0	1 300	30	0	1 400	30	3
1 250	20	0	1 350	30	0	1 400	30	3.5
1 300	20	0	1 400	30	0	1 400	30	4

在单因素实验基础上，根据响应曲面法设计原理，以铁的金属化率 Y 为响应值，采用 Design

Expert 软件设计三因素三水平下的实验。实验的因素水平与编码见表 4。

表 4 实验因数选取水平与编码值
Table 4 Actual and code value of the variables

水平	温度		时间		钛精矿的铁粉添加比例	
	实际/°C T	编号 A	实际/min t	编号 B	实际/% M	编号 C
1	1 450	1	35	1	4	1
0	1 375	0	22.5	0	2	0
-1	1 300	-1	10	-1	0	-1

2.2 实验过程

实验前将钛精矿、煤粉按方案的配比配料、充分混匀。混匀料 120 °C 下烘烤 6 h，以去除其中水分。按配料方案称取干燥混合料放入 SiC 坩埚

中，再置入温度已达到预设温度值的加热炉内加热。到预定时间后取出坩埚，并用 N₂ 冷却。最后对冷却样品进行金属铁和 TFe 含量（即铁元素含量）分析。以还原后试样中铁的金属化率 Y（还

原产生的金属铁量与还原后试样的 TFe 量之比值) 作为钛精矿加热过程中铁氧化物还原程度评价指标。

3 实验结果与分析

3.1 单因素实验结果与分析

无添加铁粉条件下, 钛精矿用煤粉加热还原得到的铁的金属化率与温度、时间关系见图 1。由图 1 可见, 随温度升高, 铁的金属化率均逐渐增加, 说明温度提高有利于钛精矿还原产生金属铁。这是由于实验所用钛精矿中主要物相为钛铁矿 (FeTiO_3), 加热过程中反应为: $\text{FeTiO}_3 + \text{C} = \text{Fe} + \text{TiO}_2 + \text{CO}$, 采用 HSC 软件计算得到该反应 $\Delta G_1^0 = -0.157 T + 198.1 \text{ kJ/mol}$, 反应右向进行产生金属铁的热力学温度条件为 $T \geq 987.83 \text{ }^\circ\text{C}$, 且反应 $\Delta H_1^0 = 198.1 \text{ kJ/mol}$ 为吸热反应, 温度提高有助于 FeTiO_3 还原。根据阿累尼乌公式^[16]可知, 温度提高有利于加快还原反应速率, 从而有利于钛精矿还原产生金属铁。

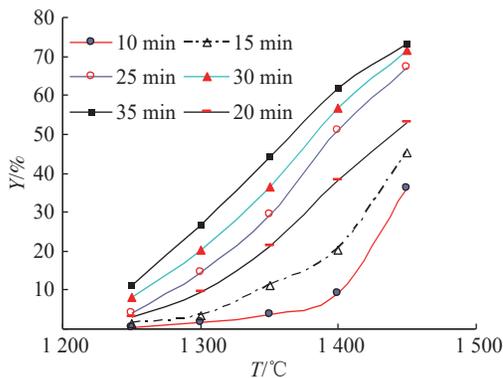


图 1 铁的金属化率与时间、温度关系

Fig.1 Relationship between iron metallization, time and temperature

比较图 1 中不同铁的金属化率线可见, 加热温度提高到 $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ 才有较高的铁的金属化率; 时间低于 15 min 、温度高于 $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 随温度提高铁的金属化率明显提高; 时间高于 25 min 、温度高于 $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 随温度提高铁的金属化率

提高缓慢。说明: 钛精矿采用煤粉还原时, 得到比较高的铁的金属化率温度需高于 $1400 \text{ }^\circ\text{C}$; 在高温 (如 $1450 \text{ }^\circ\text{C}$) 下, 加热时间 35 min 下试样的金属化率较 10 min 下试样的金属化率明显增加, 但在 $25 \sim 35 \text{ min}$ 范围内, 随加热时间增加, 铁的金属化率增加较为缓慢。这是由于, 钛铁矿还原反应在高温下加热时间较短时, 试样中达到钛铁矿还原反应条件点位较少, 还原产生 Fe 量较少; 随加热时间增加, 通过炉料间的传热使试样中达到钛铁矿还原反应温度条件的点位快速增加, 还原产生 Fe 量明显增加; 当时间再增加, 已经历一段时期的还原反应, 试样中剩余钛铁矿可参与还原反应的点位较少, 从而使钛铁矿还原产生的 Fe 量相对较少^[16]。

钛精矿中添加铁粉进行煤粉还原的实验结果见图 2。由图 2 可见, $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 30 min 、铁粉添加量 $1.5\% \sim 4.0\%$ 条件下, 钛精矿还原中铁的金属化率由 62% 增加到 70.1% ; 随铁粉添加量增加, 铁的金属化率增加, 同时铁粉添加量低于 2.5% 时, 铁的金属化率增加幅度小, 铁粉添加量高于 2.5% 时, 铁的金属化率增加幅度较大。说明, 铁粉添加量高于 2.5% 可强化铁氧化物的还原。

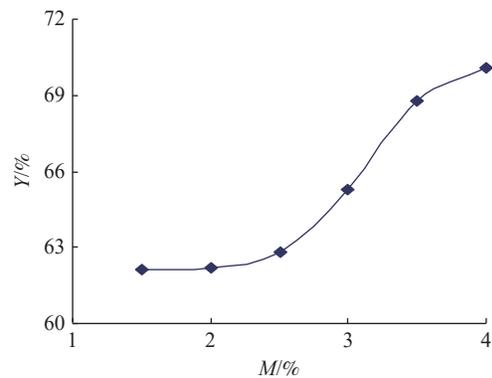


图 2 $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ 下铁的金属化率与金属铁粉添加量关系

Fig.2 Relationship between iron metallization and iron powder addition at $1400 \text{ }^\circ\text{C}$

3.2 响应曲面法实验结果与分析

响应曲面法实验方案及其实验结果见表 5。

表 5 响应面法实验结果

Table 5 Program and results of RSM test

A	B	C	Y/%	A	B	C	Y/%	A	B	C	Y/%	A	B	C	Y/%	A	B	C	Y/%
1	-1	0	17.1	0	1	-1	53.2	1	0	-1	64.4	-1	0	1	22.4	1	1	0	75.3
0	1	1	64.3	0	0	0	43.3	-1	1	0	42.2	0	0	0	49.3	-	-	-	-
-1	-1	0	8.8	0	0	0	43.2	1	0	1	73.4	0	0	0	42.2	-	-	-	-
-1	0	-1	17.5	0	-1	-1	31.5	0	0	0	45.5	0	-1	1	24.5	-	-	-	-

(1) 方差分析
通过 Design Expert 8.0.6 软件对实验结果施行

三次多元回归拟合, 在显著性水平 $\alpha=0.05$ 条件下
对表 6 中数据方差分析, 结果见表 6。

表 6 未手动处理的方差分析
Table 6 ANOVA without manual operation

来源	平方和	df	均方	F 值	P 值	显著程度
模型	6 378	12	531.5	65.9	0.000 5	*
A	2 396.1	1	2 396.1	297.1	< 0.000 1	**
B	945.56	1	945.56	117.24	0.000 4	*
C	4.2	1	4.2	0.52	0.510 3	
AB	153.76	1	153.76	19.07	0.012	*
AC	4.2	1	4.2	0.52	0.510 3	
BC	81.9	1	81.9	10.16	0.033 3	*
A ²	64.04	1	64.04	7.94	0.047 9	*
B ²	103.17	1	103.17	12.79	0.023 2	*
C ²	55.33	1	55.33	6.86	0.058 8	
A ² B	113.25	1	113.25	14.04	0.02	*
A ² C	12.01	1	12.01	1.49	0.289 5	
AB ²	399.03	1	399.03	49.48	0.002 2	*
Pure Error	32.26	4	8.06			
Cor Total	6 410.26	16				

注: $P \leq 0.000 1$, 为非常显著, 用**表示; $P \leq 0.05$, 为显著, 用*表示; $P > 0.05$, 为不显著。

由表 6 可见, 模型的 $P=0.000 5 < 0.05$, 表明拟合模型显著; A 项 $P < 0.000 1$, 表明温度对 Y 影响非常显著; B、AB、BC、A²、B²、A²B、AB² 等项目的 P 均小于 0.05, 表明这些项对 Y 的影响显著; C、AC、C²、A²C 等项目的 P 值均大于 0.05, 表明 C、AC、C²、A²C 等项目对 Y 的影响不显著。

(2) 响应值回归模型的优化

使用软件对 Y 影响不显著项进行手动优化, 结果见表 7。手动优化后得到响应值 Y 与各影响因素之间的 3 次回归模型为:

$$Y = 44.70 + 24.48A + 15.38B + 6.20AB + 4.52BC - 3.90A^2 - 4.95B^2 + 3.62C^2 + 7.53A^2B + 3.48A^2C - 14.13AB^2$$

表 7 手动处理的方差分析
Table 7 ANOVA analysis with manual operation

来源	平方和	df	均方	F 值	P 值	显著程度
模型	6 369.6	10	636.96	93.98	< 0.000 1	**
A	2 396.1	1	2 396.1	353.54	< 0.000 1	**
B	945.56	1	945.56	139.51	< 0.000 1	**
AB	153.76	1	153.76	22.69	0.003 1	*
BC	81.9	1	81.9	12.08	0.013 2	*
A ²	64.04	1	64.04	9.45	0.021 8	*
B ²	103.17	1	103.17	15.22	0.008	*
C ²	55.33	1	55.33	8.16	0.028 9	*
A ² B	113.25	1	113.25	16.71	0.006 4	*
A ² C	48.3	1	48.3	7.13	0.037	*
AB ²	399.03	1	399.03	58.88	0.000 3	*
Residual	40.66	6	6.78			
Lack of Fit	8.41	2	4.2	0.52	0.629 3	not significant
Pure Error	32.26	4	8.06			
Cor Total	6 410.26	16				

注: $P \leq 0.000 1$, 为非常显著, 用**表示; $P \leq 0.05$, 为显著, 用*表示; $P > 0.05$, 为不显著。

由上式中各项系数可知，温度和时间因数、对 Y（铁的金属化率）有显著正的影响，且对 Y 影响重要程度为：A（温度）>B（时间）>C（铁粉添加量），AB（温度与加热时间交互作用）>BC（加热时间与铁粉添加量的交互作用）。

由表 7 可见，方差分析得到的失拟项的 $P=0.6293>0.05$ 、模型的 $P<0.0001$ ，失拟项不显著，模型非常显著，表明建立的模型数据可行。绘制由模型预测的 Y 与实验 Y 值之间关系（见图 3），两者的相关系数 R 为 0.997。可见，模型预测 Y 值与实验 Y 值拟合程度良好，建立的模型可用于对钛精矿-煤基体系加热中铁还原进行分析与预测。

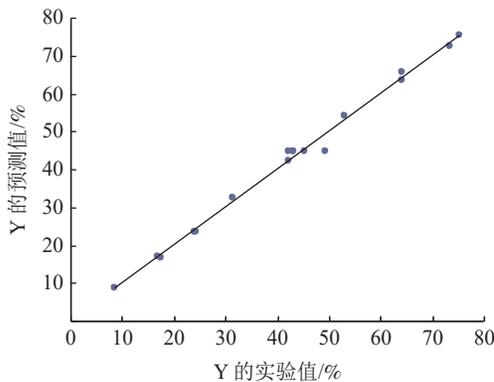


图 3 模型预测的 Y 与实验值 Y 之间关系
Fig.3 Relationship between predicted value of Y by the model and test value of Y

(3) 铁氧化物还原优化的预测与验证

由软件对回归方程（1）优化求解，得到铁氧化

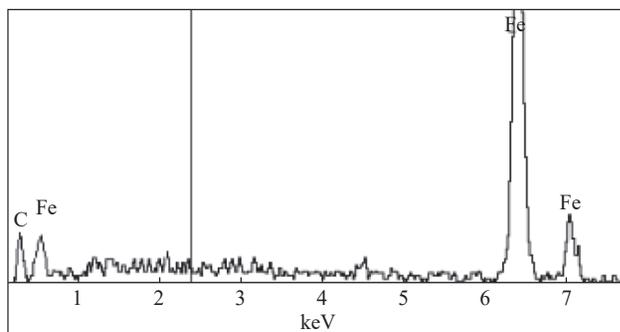


图 5 图 4 中点 1 处扫描能谱分析
Fig.5 SEM spectrum of point 1 in the Fig.4

4 结 论

(1) 加热时间高于 15 min、温度低于 1 400 °C 条件下，随加热时间增加，铁的金属化率增加缓慢；高于 1 400 °C 条件下，随加热时间增加，铁的金属化率增加非常显著；1 400 °C、30 min、1.5%~

物还原较佳条件为：温度 1 450 °C、时间 33.5 min、铁粉添加量 4%，响应 Y 值最大为 87.2%。按较佳条件进行三次实验，得到铁金属化率分别为 87.10%、86.46%、86.82%，平均为 86.79%，与预测响应 Y 值误差小，表明经手动回归的模型（1）是可靠的。取本次实验中一个产品进行电镜扫描，结果见图 4~7。分析图 4 可见，还原产品主要由白色区域组成，其次为灰白色区域，还有少量灰黑色区域以及黑色区域。图 5~7 能谱分析可知，白色区域以 Fe 为主，还包含极少量的 C；灰白色区域边缘为 Fe，内部为钛、铁氧化物组成的固溶体，钛、铁氧化物包裹于内核中；灰黑色区域主要由 C 组成。结果表明，在优化实验条件下，金属铁明显出现于钛精矿-煤粉体系还原产物中。

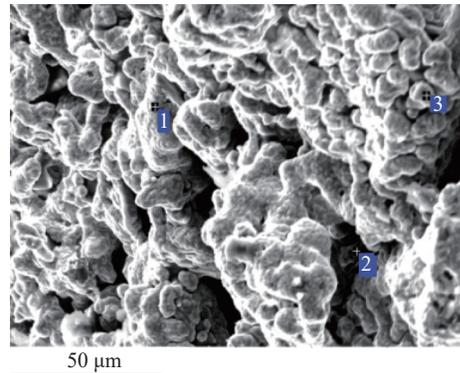


图 4 钛精矿-煤粉体系 1 450 °C 下加热 33.5 min 产物的 SEM
Fig.4 SEM of ilmenite concentrate-coalsystem heated in 33.5 min at 1 450 °C

Element	Wt/%	At/%
CK	2.07	8.98
FeK	97.93	91.02

4.0% 铁粉添加量条件下，钛精矿还原中铁的金属化率由 62% 增加到 70.1%；铁粉添加量高于 2.5% 后，铁的金属化率明显提高。

(2) 在钛精矿-煤体系加热过程中，温度、时间、温度与时间交互作用以及铁添加量交互作用对铁氧化物还原的金属化率有显著正的影响，其

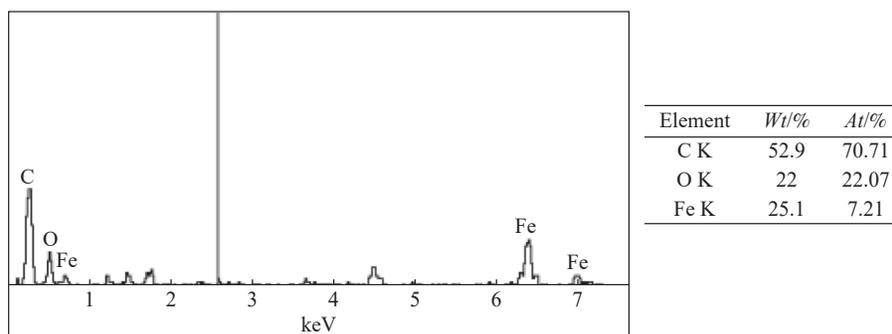


图6 图4中点2处扫描能谱分析
Fig.6 SEM spectrum of point 2 in Fig.4

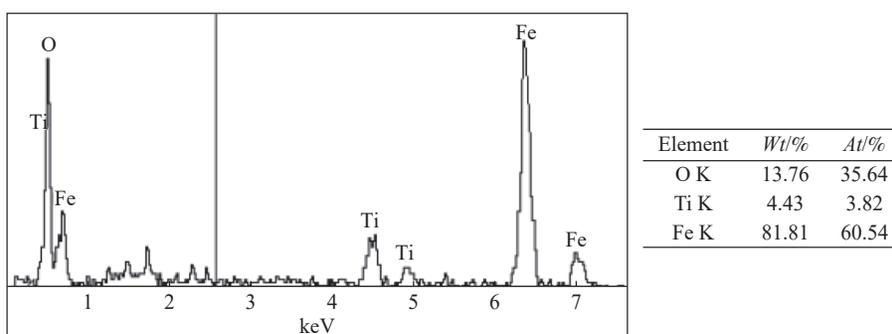


图7 图4中点3处扫描能谱分析
Fig.7 SEM spectrum of point 3 in the Fig.4

影响程度中，温度>加热时间>铁粉添加量，温度与加热时间的交互作用>加热时间与铁粉添加量交互作用。

(3) 建立的铁金属化率与因素间回归模型具有良好拟合度和可靠性，并由此得到 1450 °C、33.5 min、4% 铁粉添加量优化条件；由优化条件开展实验得到精矿-煤基体系加热过程中铁氧化物还原的金属化率最高可达 86.79%，且还原产品中金属铁明显存在。

参考文献：

[1] 刘立伟, 赵礼兵, 李国峰, 等. 某钒钛磁铁精矿深度还原-磁选试验研究[J]. 矿产综合利用, 2020(6): 56-63.
LIU L W , ZHAO L B , LI G F, et al. Study on coal-based reduction followed by magnetic separation of a vanadium-titanium magnetite concentrate[J]. Multipurpose Utilization of Mineral, 2020(6): 56-63.

[2] 范兴祥, 余宇楠, 袁威, 等. 利用云南钛铁精矿制备还原铁粉及富钛料的试验研究[J]. 矿产综合利用, 2018(2):52-56.
FAN X X, YU Y N, YUAN W, et al. Experimental research on preparation of reduced iron powder and rich titanium materials from Yunnan titanium ore concentrate[J]. Multipurpose

Utilization of Mineral, 2018(2):52-56.

[3] 付贵勤, 薛逊, 汪锋, 等. 钒钛酸性渣还原过程中钒钛赋存状态的研究[J]. 矿产资源综合利用, 2009(2):40-44.
FU G Q, XUE X, WANG F, et al. Study on the occurrence of Ti during reduction process of the acidic vanadium -titanium[J]. Multipurpose Utilization of Mineral, 2009(2):40-44.

[4] 张世敏, 黄孟阳, 彭金辉, 等. 微波还原越南钛精矿制备初级富钛料新工艺研究[J]. 矿产资源综合利用, 2007(3):17-20.
ZHANG S M, HUANG M Y, PENG J H, et al. Study on preparing primary titanium materials from self-reduced pellet of vietnam ilmenite concentrate by microwave reduction[J]. Multipurpose Utilization of Mineral, 2007(3):17-20.

[5] 刘云龙, 郭培民, 庞建明, 等. 高杂质钛铁矿固态催化还原动力学研究[J]. 钢铁钒钛, 2013, 34(6):1-5.
LIU Y L, GUO P M, PANG J M, et al. Kinetics study on solid-phase catalytic reduction of highly impure ilmenite by thermal analysis[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2013, 34(6):1-5.

[6] Y. Zhao, F. Shadman. Kinetics and mechanism of ilmenite reduction with carbon monoxide[J]. *AIChE Journal*, 1990, 36(9):1433-1438.

[7] J. Pešl, R. H. Eric. High temperature carbothermic reduction of Fe₂O₃-TiO₂-MxOy oxide mixtures[J]. *Minerals Engineering*, 2002(15):971-984.

- [8] WANG Yu-ming, YUAN Zhang-fu, GUO Zhan-cheng, et al. Reduction mechanism of natural ilmenite with graphite[J]. *Transaction. Nonferrous Metals Society of China*, 2008, 180:962-968.
- [9] C. S. Kucukkaragoz, R. H. Eric. Solid state reduction of a nature ilmenite[J]. *Miners Engineering*, 2006, 19:334-337.
- [10] Hai-peng GOU, Guo-hua ZHANG, Xiao-jun HU, et al. Kinetic study on carbothermicreduction of ilmenite with activated carbon[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(8):1856-1861.
- [11] 韩可喜. 钛精矿预还原球团冶炼钛渣的电耗水平分析[J]. *钢铁钒钛*, 2014, 35(2):51-55.
- HAN K X. Analysis on electricity consumption for titanium slag smelting with pre-reduced concentrate pellets[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2014, 35(2):51-55.
- [12] 信晓飞, 张晋霞, 冯洪均. 响应曲面法优化含锌尘泥选择性浸出工艺[J]. *矿产综合利用*, 2021(2):146-151.
- XIN X F, ZHANG J X, FENG H J. Optimization of selective leaching technology from zinc-bearing dust using response surface methodology[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral*, 2021(2):146-151.
- [13] 吕学伟, 张凯, 黄润, 等. 添加剂对钛精矿固相碳热还原强化作用的比较[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2013, 34(11):1601-1605.
- LU X W, ZHANG K, HUANG R. Comparison of the effects of different additives on the solid phase carbon thermal reduction of ilmenite[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2013, 34(11):1601-1605.
- [14] 郭兴敏, 唐洪福, 张圣弼. Li_2CO_3 在含碳球团中催化机理的研究[J]. *金属学报*, 2000, 36(6):638-641.
- GUO X M, TANG H F, ZHANG S B. Study on the catalysis mechanism of Li_2CO_3 for reduction of iron ore pellet with carbon[J]. *Acta Metallurgical Sinica*, 2000, 36(6):638-641.
- [15] 刘牡丹, 姜涛, 李光辉. 硫酸钠和碳酸钠对高铝铁矿钠化还原动力学规律的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(1):220-226.
- LIU M D, JIANG T, LI G H. Effects of Na_2SO_4 and Na_2CO_3 on sodium-reduction dynamics law of high aluminum iron ores[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(1):220-226.
- [16] 黄希祐. 钢铁冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.
- HUANG X G. Principles of iron and steel metallurgy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013.

Pre-reduction of Titanium Concentrate with Pulverized Coal and Iron Power Based on Response Surface Methodology Method

ZENG Fuhong, ZHOU Lanhua

(Vanadium and Titanium Resource Comprehensive Utilization Key Laboratory of Sichuan Province, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: This is an article in the field of metallurgical engineering. The single factor and response surface experiments of heating reduction of titanium concentrate powder adding pulverized coal and iron powder were carried out, respectively so as to study the effects of temperature, heating time and iron powder addition on iron oxide reduction in titanium concentrate. The three regression model of iron metallization rate was constructed, and the influence law of various influencing factors on iron metallization rate was explored. The single factor test shows that the iron metallization rate can be significantly improved above 2.5% in the range of 1.5% ~ 4.0% of the addition amount of iron powder. The response surface method experiment shows that temperature is the most important factor, followed by time and then amount of iron powder, and the interaction between temperature and time is greater than that between heating time and the amount of iron powder added in the degree of influence on the reduction of iron. The iron metallization rate can reach 86.79%, and metallic iron obviously appears in the reduced product at the optimized conditions of 1 450 °C, 33.5 min and 4% of iron power addition.

Keywords: Metallurgical engineering; Titanium concentrate; Iron oxide; reduction; Response surface methodology; Iron metallization rate