

用综合加权评分法优化高铬型钒钛矿电热熔分工艺

李 峰,储满生,唐 珏,冯 聪
(东北大学 冶金学院,辽宁 沈阳 110819)

摘 要 :以气基竖炉还原得到的金属化率为 95% 的高铬型钒钛磁铁矿球团为原料,在高频感应炉内进行电热熔分深度还原. 设计了三因素三水平正交试验,重点考察熔分温度、熔分时间及二元碱度对熔分效果的影响,并运用综合加权评分法对试验结果进行分析,发现熔分后可获得含钒、铬铁块和高钛渣. 适宜的高铬型钒钛磁铁矿电热熔分参数为:二元碱度 1. 1,熔分温度 1 650 ℃,熔分时间 45 min. 对熔分综合指标影响大小依次为二元碱度>熔分温度>熔分时间. 另外,分析二元碱度对熔分效果的影响规律及作用机理可知,随碱度增大,铁、钒、铬及钛的收得率呈先上升后下降的趋势,在二元碱度为 1. 1 时,高铬型钒钛矿熔分效果最好.

关 键 词 :高铬型钒钛磁铁矿;电热熔分;正交试验;综合加权评分法

中图分类号:TF 557 文献标志码:A 文章编号:1005-3026(2016)08-1327-05

Optimization of High Chromium Vanadium-Titanium Magnetite Electric Melting Process by Comprehensive Weighted Scoring Method

LI Feng , CHU Man-sheng , TANG Jue , FENG Cong
(School of Metallurgy , Northeastern University , Shenyang 110819 , China. Corresponding author : CHU Man-sheng , E-mail : chums@ smm. neu. edu. cn)

Abstract : High chromium vanadium-titanium magnetite pellet with metallization rate of 95% , obtained from gas-based shaft furnace reduction , was used for melting and separation in a high-frequency induction furnace. Through the three factors with three levels orthogonal test , the influences of melting temperature , melting time and binary basicity on the recovery of iron , vanadium , chromium and titanium were studied. Then , the results were analyzed by comprehensive weighted scoring method , and the iron containing V and Cr and the slag bearing Ti are obtained finally. The results show that the optimal parameters of melting and separation for high chromium vanadium-titanium magnetite pellet are the binary basicity of 1. 1 , the temperature of 1 650 ℃ and the time of 45 min. The effect of the melting index are as follows : binary basicity , melting temperature and melting time. Moreover , the effect of binary basicity on the recovery rate was studied. It was indicated that all the recovery rate increases first and then decreases with the rising binary basicity. The rational binary basicity is 1. 1.

Key words : high chromium vanadium-titanium magnetite ; electric melting separation ; orthogonal test ; comprehensive weighted scoring method

高铬型钒钛磁铁矿是一种具有显著综合利用价值的复合矿产资源^[1],其在我国攀西地区储量丰富.目前,传统的“高炉-转炉”流程中,钒、钛及铬元素的有效收得率较低,造成了有价金属元素极大的浪费.针对于此,国内外学者对合理提取和利用高铬型钒钛磁铁矿有价金属元素进行了大量研究^[2-3].韩子文^[4]将气基竖炉直接还原-电热熔分新工艺应用于普通钒钛磁铁矿,得到高钛渣和含钒生铁,实现了钒和钛的高效清洁分离.烟征等^[5]以攀枝花普通钒钛磁铁矿含碳球团为原

料经预还原、电炉熔分,得到适于攀枝花钒钛磁铁矿还原熔分的工艺参数.而高铬型钒钛磁铁矿作为一种物相组成和矿物结构更为复杂的高价值矿物,关于其电热熔分过程参数的研究及优化相对较少.多指标试验的综合加权评分法是根据各项指标在整个试验中的重要性,确定其所占权重,对方案综合选优的一种方法,其分析结果合理、可靠,广泛应用于各领域^[6-7].为此,本文以气基竖炉还原得到的金属化率为 95% 的高铬型钒钛磁铁矿金属化球团为原料,设计电热熔分正交试验,并运用综合加权评分法分析获得适宜的高铬型钒钛磁铁矿电热熔分参数.同时,针对正交试验结果,重点考察了二元碱度对高铬型钒钛矿电热熔分效果的影响规律及作用机理.

1 试验内容

1.1 试验原料

本试验采用的原料是气基竖炉直接还原得到的金属化率 95% 的高铬型钒钛磁铁矿球团,其成分(质量分数,%)为 TFe 77.07, MFe 73.09, V₂O₅ 1.28, TiO₂ 8.19, Cr₂O₃ 0.91, CaO 0.34, SiO₂ 3.16, MgO 1.55, Al₂O₃ 4.25. 通过 XRD 分析其物相组成可知,铁主要以单质 Fe 形式存在,钒、铬、钛分别赋存于钒铁反式尖晶石 Fe₂VO₄、铬铁矿 FeCr₂O₄ 及钛铁矿 FeTiO₃ 中.整个试验过程为保证还原剂充足,配入碳量为理论碳量的 1.2 倍.同时考虑渣的良好流动性和 CaF₂ 的侵蚀作用, CaF₂ 配入 2%.

1.2 试验设备及方法

采用 ZRS-200 感应炉进行高铬型钒钛磁铁矿电热熔分试验,试验过程采用标智 GM1850 红外测温仪测取样品温度,选取高纯石墨坩埚作为反应容器.试验开始前从炉底通入 Ar 气.试验过程中,连续调节振荡频率,使料温快速达到试验温度,然后恒温.试验结束后,在冷却杯通入大气量 Ar 气,使试样急冷至室温,然后分析熔分铁块和渣样的化学成分.三因素三水平正交试验的具体方案如表 1 所示.

2 试验结果及分析

深还原熔分后,由于表面张力及密度等差异,渣相在上部,而铁块在坩埚底部,渣铁分层明显.化验分析可得,钛大部分进入渣中得到高钛渣,而钒、铬则进入铁中形成含钒、铬的铁块.

2.1 正交试验分析

测定分析 9 个熔分试样得到的铁块中铁、钒、铬收得率(η_{Fe} , η_{V} , η_{Cr})和渣中钛的收得率 η_{TiO_2} ,结果列于表 2.对各组数据进行正交极差分析(见表 3),确定各因素(熔分温度、熔分时间、二元碱度)对高铬型钒钛磁铁矿熔分效果影响的主次及因子水平的最优选择,同时分析了熔分技术指标随各因子水平的变化规律.

表 1 正交试验方案 Table 1 Orthogonal test scheme			
编号	A	B	C
1 [#]	1 600(1)	45(1)	1. 0(1)
2 [#]	1 600(1)	50(2)	1. 1(2)
3 [#]	1 600(1)	55(3)	1. 2(3)
4 [#]	1 625(2)	45(1)	1. 1(2)
5 [#]	1 625(2)	50(2)	1. 2(3)
6 [#]	1 625(2)	55(3)	1. 0(1)
7 [#]	1 650(3)	45(1)	1. 2(3)
8 [#]	1 650(3)	50(2)	1. 0(1)
9 [#]	1 650(3)	55(3)	1. 1(2)

注:A 为熔分温度,℃;B 为熔分时间,min;C 为二元碱度,括号内数字为因素水平.

表 2 正交试验结果 Table 2 Results of the orthogonal test							
编号	因素			元素收得率/%			
	A	B	C	η_{Fe}	η_{V}	η_{Cr}	η_{TiO_2}
1 [#]	1	1	1	99.58	95.03	86.41	91.61
2 [#]	1	2	2	99.14	93.32	86.02	95.91
3 [#]	1	3	3	99.78	94.96	87.44	93.97
4 [#]	2	1	2	99.96	96.17	92.50	94.74
5 [#]	2	2	3	99.13	96.04	91.75	94.29
6 [#]	2	3	1	98.83	93.16	86.84	95.55
7 [#]	3	1	3	99.02	96.67	92.70	91.89
8 [#]	3	2	1	97.69	95.77	90.02	90.91
9 [#]	3	3	2	98.68	98.12	94.38	93.65

由表 3 可知各因素对各元素收得率的影响程度及因素最优组合为:① η_{Fe} ,熔分温度>熔分时间>二元碱度,熔分温度 1 600℃,熔分时间 45 min,二元碱度 1.2;② η_{V} ,熔分温度>二元碱度>熔分时间,熔分温度 1 625℃,熔分时间 50 min,二元碱度 1.0;③ η_{Cr} ,熔分温度>二元碱度>熔分时间,熔分温度 1 650℃,熔分时间 55 min,二元碱度 1.1;④ η_{TiO_2} ,熔分温度>二元碱度>熔分时间,熔分温度 1 625℃,熔分时间 55 min,二元碱度 1.1.

2.2 适宜熔分工艺参数的确定

多指标试验综合加权评分法首先根据各项指标在整个试验中的重要性确定其所占权重,然后

将多指标试验结果化为单指标试验结果,再按单指标分析方法,对方案进行综合选优.为了兼顾分析者对指标重要性的主观认知,又充分利用试验结果提供的指标重要性的客观信息,使得对指标

的赋权达到主观与客观的统一,进而使评价客观、真实、有效,本文采用综合权重赋值法,以优化理论为依据,建立了指标综合权重的优化模型,最终求解出适宜的高铬型钒钛磁铁矿电热熔分参数^[7].

表 3 正交极差分析
Table 3 Range analyses of orthogonal test

极差	$\eta_{\text{Fe}}/\%$			$\eta_{\text{V}}/\%$			$\eta_{\text{Cr}}/\%$			$\eta_{\text{TiO}_2}/\%$		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
K_1	99.5	99.5	98.7	94.4	95.9	94.7	86.6	90.5	87.8	93.8	92.8	92.7
K_2	99.3	98.7	99.3	99.3	95.0	95.8	90.4	89.3	90.9	94.9	93.7	94.8
K_3	98.4	99.1	99.4	98.5	95.4	95.9	92.4	89.6	90.6	92.2	94.4	93.4
R	1.1	0.9	0.6	4.9	0.9	1.2	5.7	1.3	3.2	2.7	1.6	2.1
显著性	$A > B > C$			$A > C > B$			$A > C > B$			$A > C > B$		
最优条件	A_1	B_1	C_3	A_2	B_1	C_2	A_3	B_3	C_2	A_2	B_3	C_2

2.2.1 确定标准化评价矩阵

设多指标试验问题有 n 个试验方案,有 m 个试验指标,试验方案 i 对指标 j 试验值为 x_{ij} ,称矩阵 $X=(x_{ij})_{n \times m}$ 为方案集对指标集的评价矩阵.在本研究中,设计了 9 组试验,铁、钒、铬和钛的收得率 4 个指标,即 $n=9, m=4$.为了统一各指标的趋势要求,消除各指标间的不可公度性,将评价矩阵 X 进行标准化处理.本研究要求铁、钒、铬、钛收得率越高越好,现按综合加权评分值越大越好的评判准则^[7]将 X 标准化,得到最终的评价矩阵 Z .

$$X = \begin{bmatrix} 99.58 & 95.03 & 86.41 & 91.61 \\ 99.14 & 93.32 & 86.02 & 95.91 \\ 99.78 & 94.96 & 87.44 & 93.97 \\ 99.96 & 96.17 & 92.50 & 94.74 \\ 99.13 & 96.04 & 91.75 & 94.29 \\ 98.83 & 93.16 & 86.84 & 95.55 \\ 99.02 & 96.67 & 92.70 & 91.89 \\ 97.69 & 95.77 & 90.02 & 90.91 \\ 98.68 & 98.12 & 94.38 & 93.65 \end{bmatrix},$$

$$Z = \begin{bmatrix} 17.83 & 72.97 & 96.28 & 86.00 \\ 35.78 & 100 & 100 & 0 \\ 6.86 & 72.44 & 86.35 & 38.87 \\ 0 & 35.60 & 37.48 & 23.44 \\ 35.41 & 36.33 & 44.71 & 32.46 \\ 45.92 & 71.29 & 92.12 & 7.29 \\ 40.42 & 20.71 & 35.56 & 80.49 \\ 100 & 37.92 & 61.37 & 100 \\ 56.50 & 0 & 0 & 45.12 \end{bmatrix}.$$

2.2.2 确定各项指标综合权重

首先,在高铬型钒钛磁铁矿电热熔分工艺优化的试验中,根据以往的经验和技术要求,采用专

家调查法得到各项指标的主观权重:铁收得率 $\alpha_1=0.3$,钒收得率 $\alpha_2=0.3$,铬收得率 $\alpha_3=0.3$,钛收得率 $\alpha_4=0.3$,即 $\alpha=[0.3 \ 0.3 \ 0.3 \ 0.1]^T$.

其次,由熵值法 $h_j=(\ln n)^{-1} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}$,
 $\beta_j=(1-h_j) \bigvee_{k=1}^m (1-h_k) \chi_{j=1 \ 2 \ \dots \ m}$ 确定出各项指标的客观权重: $\beta=[0.297 \ 0.216 \ 0.185 \ 0.302]^T$.其中, $p_{ij}=z_{ij} / \sum_{i=1}^n z_{ij}$,且当 $p_{ij}=0$ 时,规定 $p_{ij} \ln p_{ij} = 0 (i=1 \ 2 \ \dots \ n \ j=1 \ 2 \ \dots \ m)$.

最后,由优化决策模型得到各项指标的综合权重.

$$\min F(w) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \{ \mu [(w_j - \alpha_j) z_{ij}]^2 + (1 - \mu) [(w_j - \beta_j) z_{ij}]^2 \};$$

s. t.
$$\begin{cases} \sum_{j=1}^m w_j = 1, \\ w_j \geq 0 \ j = 1 \ 2 \ \dots \ m. \end{cases}$$

式中 $0 < \mu < 1$ 为偏好系数,反映分析者对主观权重和客观权重的偏好程度.取 $\mu=0.5$,得到各项指标的综合权重 $w=[0.29 \ 0.26 \ 0.24 \ 0.20]^T$.

2.2.3 计算综合加权评分值

由综合加权评分公式 $f_i = \sum_{j=1}^m z_{ij} w_j$ 计算得各项试验指标的综合加权评分值为 $f=[93.61 \ 93.81 \ 94.38 \ 96.12 \ 95.57 \ 93.80 \ 95.45 \ 93.97 \ 96.48]^T$.

2.2.4 基于单指标试验评价方法的分析

代入综合加权评分值,根据单指标试验评价方法优化分析电热熔分工艺,结果见表 4.可知,

适宜的电热熔分工艺参数为 :熔分温度 1 650 ℃ ,熔分时间 45 min ,二元碱度 1.1 ;对综合指标影响程度为 :二元碱度 > 熔分温度 > 熔分时间.

在主观权重不变的前提下 ,改变偏好系数 μ 值 ,即主观权重和客观权重的偏好程度 ,可以得到不同偏好系数对电热熔分工艺优化的影响 ,如表 5 所示.当 $\mu < 0.5$ 时 ,最优组合为 $A_2B_3C_2$,即熔分温度 1 625 ℃ ,熔分时间 55 min ,二元碱度 1.1 ;当 $\mu = 0.5$ 时 ,最优组合为 $A_3B_1C_2$,即熔分温度 1 650 ℃ ,熔分时间 45 min ,二元碱度 1.1 ;当 $0.5 < \mu < 1.0$ 时 ,最优组合为 $A_3B_3C_2$,即熔分温度 1 650 ℃ ,熔分时间 55 min ,二元碱度 1.1. 但无论偏好系数取何值 ,对综合指标影响程度大小均为 $C \rightarrow A \rightarrow B$,即二元碱度 > 熔分温度 > 熔分时间.

表 4 高铬型钒钛磁铁矿电热熔分工艺优化结果

Table 4 Results of melting separation optimization for high chromium vanadium-titanium magnetite

编号	因素			收得率/%				F
	A/℃	B/min	C	η_{Fe}	η_{V}	η_{Cr}	η_{TiO_2}	
1 [#]	1 600	45	1.0	99.58	95.03	86.41	91.6	93.61
2 [#]	1 600	50	1.1	99.14	93.32	86.02	95.9	93.81
3 [#]	1 600	55	1.2	99.78	94.96	87.44	93.9	94.38
4 [#]	1 625	45	1.1	99.96	96.17	92.50	94.7	96.12
5 [#]	1 625	50	1.2	99.13	96.04	91.75	94.3	95.57
6 [#]	1 625	55	1.0	98.83	93.16	86.84	95.6	93.80
7 [#]	1 650	45	1.2	99.02	96.67	92.70	91.9	95.45
8 [#]	1 650	50	1.0	97.69	95.77	90.02	90.9	93.97
9 [#]	1 650	55	1.1	98.68	98.12	94.38	93.7	96.48
K_1	93.93	94.96	93.82	$w_1 = 0.29$, $w_2 = 0.26$,				
K_2	95.29	94.51	95.52	$w_3 = 0.24$, $w_4 = 0.20$;				
K_3	95.33	94.91	94.16	因素主次 $C \rightarrow A \rightarrow B$;				
R	1.4	0.45	1.7	水平优劣 $C_2 \quad A_3 \quad B_1$;				
				最优组合 $A_3 \quad B_1 \quad C_2$.				

表 5 不同偏好系数所对应的最优工艺参数组合

Table 5 Optimal combination of process parameters with the different preference coefficients

μ	A				B				C				最优组合	影响主次
	K_1	K_2	K_3	R	K_1	K_2	K_3	R	K_1	K_2	K_3	R		
0	94.31	95.41	95.08	0.77	95.04	94.64	95.11	0.47	93.99	95.64	95.18	1.65	$A_2B_3C_2$	$C \rightarrow A \rightarrow B$
0.3	93.74	94.99	94.83	1.09	94.65	94.23	94.70	0.46	93.51	95.27	94.79	1.76	$A_2B_3C_2$	$C \rightarrow A \rightarrow B$
0.5	93.37	94.724	94.679	1.30	94.382	93.960	94.42	0.46	93.19	95.02	94.54	1.83	$A_3B_1C_2$	$C \rightarrow A \rightarrow B$
0.7	92.99	94.45	94.50	1.52	94.12	93.68	94.14	0.45	92.88	94.78	94.28	1.90	$A_3B_3C_2$	$C \rightarrow A \rightarrow B$
0.8	92.80	94.31	94.42	1.63	93.99	93.54	94.00	0.45	92.72	94.65	94.16	1.94	$A_3B_3C_2$	$C \rightarrow A \rightarrow B$
0.9	92.61	94.17	94.34	1.73	93.86	93.41	93.87	0.45	92.56	94.53	94.03	1.97	$A_3B_3C_2$	$C \rightarrow A \rightarrow B$
1.0	92.42	94.03	94.26	1.84	93.71	93.27	93.72	0.45	92.40	94.41	93.90	2.01	$A_3B_3C_2$	$C \rightarrow A \rightarrow B$

2.3 二元碱度对熔分技术指标的影响

由多指标试验的综合加权评分法分析可知 ,二元碱度对电热熔分过程影响最大.为了进一步探索二元碱度对熔分工艺的影响规律及作用机理 ,设定熔分试验条件为 :熔分温度 1 600 ℃ ,熔分时间 40 min ,碱度为 0.13(初始碱度) ,0.6 ,0.8 ,1.0 ,1.1 ,1.2. 试验结果如图 1 所示.可见 ,当高铬型钒钛矿金属化球团保持原始碱度 0.13 进行熔分时 ,试样在 1 600 ℃ 时未能熔化 ,渣形成较多的小铁珠 ,但由于渣黏度过大 ,流动性较差 ,渣铁分离现象不明显.因此 ,碱度为 0.13 和 0.6 的试验数据无法给出.当碱度大于 0.8 以后 ,渣铁分离较好 ,且随碱度的增加 ,铁品位及收得率均达到较高值.生铁中钒、铬含量及收得率均呈现先上升后降低趋势 ,在碱度为 1.1 时达到最大 ,分别为 97.02% 和 89.93% .渣中钛的收得率也呈现同样的规律 ,在二元碱度为 1.1 时达到峰值 95.63% .

采用 Factsage 6.4 绘制了 1 600 ℃ 下不同碱度的 CaO - SiO₂ - MgO - Al₂O₃ - TiO₂ 五元渣系液相情况 ,如图 2 所示.可见 ,随碱度增大 ,液相面积增大 ,且 Al₂O₃ 在渣中的溶解度增大 ,这使得与渣中 MgO 及 Cr₂O₃ 形成高熔点镁铝尖晶石 (MgAl₂O₄) 及铬镁铝尖晶石 (MgCrAlO₄) 的 Al₂O₃ 量减少 ,渣相黏度较低 ,性能较好 ,有利于熔分.另外 ,高温条件下 CaO 可以向高温熔渣提供自由 O²⁻ ,使渣中复杂硅氧复合阴离子 Si_xO_y^{z-} 解体 ,在一定程度上降低渣的黏度 ,改善渣流动性^[8].同时 ,根据炉渣分子理论可知 ,CaO 的碱性比 FeO 强 ,能置换出 FeO · SiO₂ 中的 FeO ,提高 FeO 的活度 ,而置换出的 FeO 为反应提供了更多的反应物 ,从而提高铁收得率^[9].但由于 CaO 本身熔点较高 ,且在高温下会形成钙钛矿 CaTiO₃ 等高熔点物质 ,炉渣中容易产生非均匀相 ,使炉渣流动性变差^[10] ,熔分动力学条件恶化 ,各有价值组元收得率小幅下降.因此 ,根据以上结果及分析可知 ,高铬型钒钛磁铁矿电热熔分的适宜碱度为 1.1.

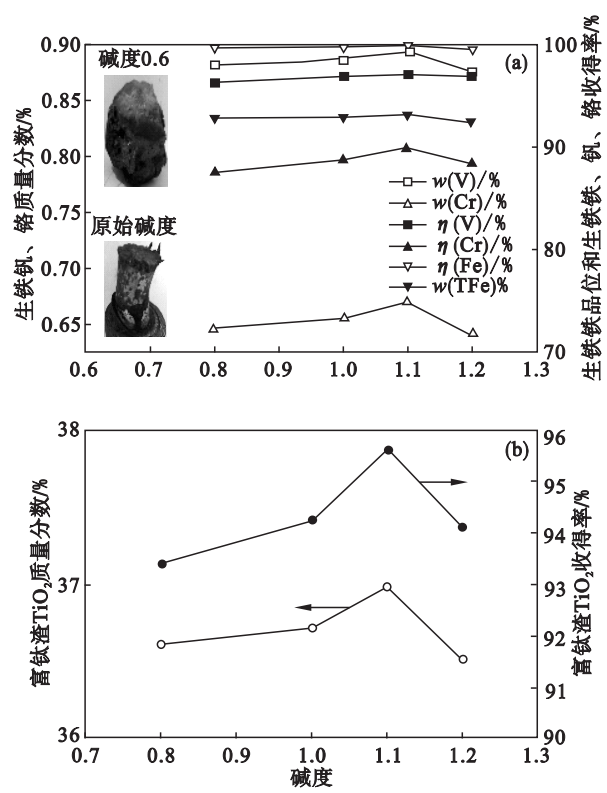


图 1 二元碱度对电热熔分技术指标的影响
Fig. 1 Effect of binary basicity on melting separation indexes

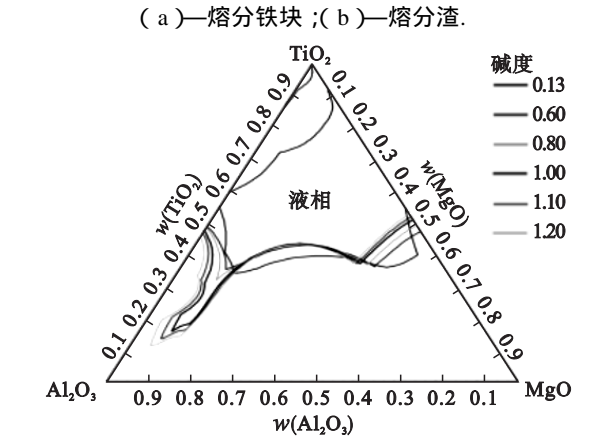


图 2 碱度对 $CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3-TiO_2$ 渣系的液相影响
Fig. 2 Effect of binary basicity on the liquid of $CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3-TiO_2$ slag system

3 结 论

1) 在考察的三个因素中,熔分时间对铁收得率影响最大,二元碱度对钒、铬收得率影响最大,熔分温度对钛收得率影响最大。

2) 采用正交试验综合加权评分法获得适宜的高铬型钒钛磁铁矿电热熔分工艺参数:熔分温度 $1650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、熔分时间 45 min、二元碱度 1.1。不同偏好系数下,对熔分综合指标影响程度排序均为

二元碱度 > 熔分温度 > 熔分时间。

3) 随碱度增大,生铁中钒、铬和渣中 TiO_2 的收得率均呈现先上升后降低趋势,碱度为 1.1 时达到最大,分别为 97.02%、89.93% 和 95.63%。适宜的二元碱度为 1.1。

参考文献：

[1] Chen D S, Song B, Wang L N. Solid state reduction of Panzhihua titanomagnetite concentrates with pulverized coal [J]. *Minerals Engineering* 2011 24(8): 864–869.

[2] Paunova R. Thermodynamic study of the reduction of titanium magnetite concentrate with solid carbon [J]. *Metallurgical and Materials Transactions :B* 2002 33(8): 633–638.

[3] Samanta S, Goswami M C, Baidya T K, et al. Mineralogy and carbothermal reduction behavior of vanadium-bearing titaniferous magnetite ore in Eastern India [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials* 2013, 20(10): 917–924.

[4] 韩子文. 钒钛磁铁矿气基竖炉直接还原-电炉熔分新工艺的实验研究 [D]. 沈阳: 东北大学 2012.

(Han Zi-wen. Experimental study on new process of gas-based direct reduction-electric furnace smelting separation for vanadium-titanium magnetite [D]. Shenyang: Northeastern University 2012.)

[5] 烟征, 张国华, 张梅, 等. 攀枝花钒钛磁铁矿还原熔分规律初步研究 [J]. 中国稀土学报 2010 28(专辑): 360–364.

(Yan Zheng, Zhang Guo-hua, Zhang Mei, et al. Preliminary research on law of Panzhihua vanadium-titanium magnetite reduction-melting [J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society* 2010 28(spec. issue): 360–364.)

[6] 宋之杰, 高晓红. 一种多指标综合评价中确定指标权重的方法 [J]. 燕山大学学报 2002 26(1): 20–21.

(Song Zhi-jie, Gao Xiao-hong. A method of index weight setting in multi-criteria synthetical evaluation [J]. *Journal of Yanshan University* 2002 26(1): 20–21.)

[7] 陶菊春, 吴建民. 综合加权评分法的综合权重确定新探 [J]. 系统工程理论与实践 2001 10(8): 43–48.

(Tao Ju-chun, Wu Jian-min. New study on determining the weight of index in synthetic weighted mark method [J]. *Systems Engineering—Theory & Practice* 2001 10(8): 43–48.)

[8] Tang X L, Zhang Z T, Guo M, et al. Viscosities behavior of $CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3$ slag with low mass ratio of CaO to SiO_2 and wide range of Al_2O_3 content [J]. *Journal of Iron and Steel Research International* 2011 18(2): 1–6, 17.

[9] 张宗旺, 吴轩, 陈士朝, 等. 优化钒钛磁铁矿金属化球团熔分还原工艺铁回收率的研究 [J]. 钢铁钒钛 2012 34(2): 39–45.

(Zhang Zong-wang, Wu Xuan, Chen Shi-zhao, et al. Research on increase of iron recovery during smelting and reduction of metallized pellet of vanadium-bearing titaniferous magnetite [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium* 2012 34(2): 39–45.)

[10] Shankar A, Gomerup M, Lahiri A K, et al. Experimental investigation of the viscosities in $CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3$ and $CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3-TiO_2$ slags [J]. *Metallurgical and Materials Transactions :B* 2007 38(6): 911–915.