铁矿粉高温性能特征数的配合性研究

黄德军，吴 铿，赵路朋，陈小敏，朱春恩，秦喧柯
（北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室，北京 100083）

摘 要：利用“高温性能特征数”对铁矿粉的高温性能进行评价，在对单种铁矿粉的高温性能进行实验分析的基础上，增加了对混合矿高温性能的实验研究。通过对铁矿粉的两两混合、三三混合及四四混合进行实验，以此来揭示混合矿的高温性能与单种矿高温性能之间的关系。经实验研究发现，混合矿的高温性能与单种矿的高温性能近似满足线性相关性，其可用来指导配矿。

关键词：铁矿粉；单种矿；混合矿；高温性能特征数；配合性
中图分类号：TF046.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2016)05－0013－06
doi：10.13403/j.sjqt.2016.05.057

Research on compatibility of high temperature performance characteristic numbers of iron ore fines

Huang Dejun，Wu Keng，Zhao Lupeng，Chen Xiaomin，Zhu Chun'en，Qin Xuanke
（*State Key Laboratory of Advanced Metallurgy*，*University of Science and Technology Beijing*，*Beijing* 100083）

Abstract The “high temperature performance characteristic numbers” were adopted to evaluate the high-temperature performance of iron ore fines. Based on the experimental analysis of high temperature performance of single type of iron ore fines，the experimental study on high temperature performance of mixed ores was added. By experiments of mixing two kinds of iron ore fines，mixing three kinds of iron ore fines and mixing four kinds of iron ore fines，the relationship between high temperature of single type of ores and high temperature of mixed ores was presented. It is found through the experiments that，the high temperature of single type of ores and high temperature of mixed ores are close to meet the linear correlation，which can be used to guide the ore proportioning.

Key words iron ore fines；single type of iron ore fines；mixed ores；high temperature performance characteristic number；compatibility

1 前 言

众所周知，铁矿粉的同化性和流动性是影响铁矿粉高温性能的重要指标。因此，深化对于铁矿粉高温性能的研究，对于配矿及烧结矿产量的提高尤为重要。当前，较多采用最低同化温度[1]和流动性指数[2]对铁矿粉同化性和流动性进行评价，然而，由于缺乏对烧结过程信息的考虑，往往促使评价结果不准确。为此，本实验室对铁矿粉的同化性和流动性做了进一步的研究，提出了可以反应烧结过程信息的高温性能特征数，即同化性能特征数[3]和流动性能特征数[4]。但是，对于高温性能特征数来说，单矿与混合矿之间的关系并不是很清晰。为了使得高温性能特征数可以更加科学的预测烧结中铁矿粉的同化性和流动性，完善烧结配矿理论，本

收稿日期：2016－06－27
基金项目：国家自然科学基金(51474022)
作者简介：黄德军(1991－)，男，汉族，硕士研究生，研究方向：烧结。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

文对此进行了深入研究。

首先，对10种铁矿粉进行了高温性能特征数的测定。然后，将具有不同特性的铁矿粉进行搭配试验研究[5]，测定各个配矿方案得到混矿的同化性能特征数(TH)和流动性能特征数(LD)。对数据进行分析处理，寻找混合矿的高温性能特征数和单种矿的高温性能特征数之间的规律。最后，提出基于铁矿粉高温性能特征数的配矿方法。

2 高温性能特征数

本文采用10种铁矿粉进行“高温性能特征数”的配合性研究，铁矿粉主要化学成分如表1所示。

表1 铁矿粉主要化学成分(%)

矿粉	TFe	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	FeO
1	62.37	5.6	0.25	0.16	1.71	0.013	0.005	0.3
2	63.68	3.05	0.24	0.17	1.73	0.012	0.008	0.23
3	59.75	0.22	0.14	9.5	0.11	1.71	0.02	0.26
4	57.58	5.32	0.22	0.16	1.22	0.005	0.015	0.2
5	63.24	3.65	0.051	0.1	2.17	0.029	0.004	0.32
6	61.7	3.53	0.2	0.31	1.99	0.014	0.021	0.22
7	56.59	9.28	2.04	2.43	1.44	0.38	0.23	9.28
8	67.44	2.37	1.3	0.98	0.34	0.052	0.306	28.2
9	62.55	3.52	0.05	0.1	1.98	0.021	0.009	0.5
10	64.41	4.65	0.31	0.18	1.91	0.240	0.028	0.21

实验采用的设备主要有可视卧式高温炉(型号：CI16－DIL，额定功率为8 kW)、摄像及记录系统、压片机、供气系统等，其装置示意图如图1所示。

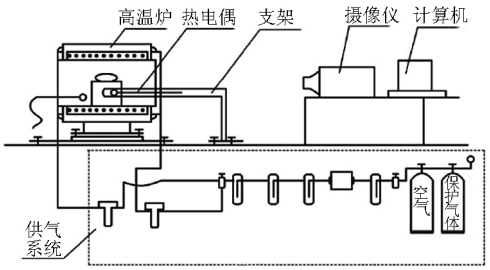


图1 实验装置示意图

2.1 同化性能特征数

铁矿粉的同化性表示的是与CaO反应生成液相的能力，其可反映液相生成的难易程度。目前，企业较多采用“最低同化温度”[6]对铁矿粉的同化性进行评价。然而，使用“最低同化温度”存在弊端：①过高的升温速率，容易产生热滞后现象，难以准确判断最低同化温度。同时，需要改变目标温度进行多次试验，并且试验过程繁琐。②“最低同化温度”仅考虑同化过程的始末，缺乏对过程信息的考虑，评价结果缺乏准确性。

为改善以上状况，本文利用“同化性能特征数”[5]来评价铁矿粉的同化性。考虑了同化时间、流动温度等烧结过程信息，并定量的给出了温度对同化反应速度的影响关系。同时，实验采取信息采集技术促使实验可以更准确地获得烧结过程信息。因此，“同化性能特征数”可以更加客观、准确地区分出不同矿粉的同化性差异，可对铁矿粉的同化性能进行较合理地评价。此外，采用“同化性能特征数”可以很好的减少烧结杯的实验量，从而节省实验成本。

2.1.1 实验方法

用电子天平称取0.8 g铁矿粉和2.0 g CaO，分别用压片机在10 MPa的压力下压制3 min，所得8 mm×5.5 mm的铁矿粉圆柱试样和直径25 mm×4 mm的CaO垫片试样。然后，将铁矿粉试样置于CaO垫片试样之上，放入带有记录系统的高温炉内按设定的升温制度在一定的气氛中进行焙烧。实验中升温制度为：25～600 ℃升温速度为15 ℃/min；600～1 200 ℃升温速度为10 ℃/min；1 200 ℃以上升温速度为5 ℃/min。

2.1.2 计算方法及结果分析

TH计算方式如下：

$$TH=\frac{2''\left(\frac{\theta}{t}\right)\left(\frac{T}{1\ 000}\right)}{\beta} \tag{1}$$

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中: TH 为同化反应特征数，其量纲为 1; θ 为同化反应的体积分数，%; t 为同化反应时间，即同化反应起点到同化反应终点所需要的时间($t_2 - t_1$) ，s; n 为同化温度与烧结温度(1 290 ℃) 比较所得参数，每大于 10 K 增加 1，不足 10 K 的部分取分数，同化温度小于烧结温度取正值，大于烧结温度取负值; T 为同化温度，即同化反应起点与同化反应终点温度平均值($T_2 + T_1$) / 2，K; β 为升温速率(试验中在 1 200 ℃以上的升温速率) ，K/s。

基于上述研究，进行了同化性实验，其中铁矿粉熔融过程和测得的 TH 结果分别如图 2 及表 2 所示。

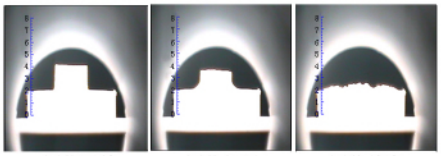


图 2　铁矿粉熔融过程示意图

表 2　铁矿粉 TH 实验数据

矿粉	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TH	5. 12	6. 23	4. 32	14. 82	8. 1	14. 44	6. 23	10. 43	6. 08	12. 46

2. 2　流动性能特征数

铁矿粉的流动性表示的是铁矿粉与 CaO 反应生成液相的流动能力，表征的是烧结形成的液相固结周围未熔物的有效粘结范围。当前企业较多使用“流动性指数”[2] 对铁矿粉的流动性进行评价。然而，使用“流动性指数”亦存在不足: ①其仅考虑流动面积这一单一因素，对于流动温度、流动时间及升温速率均未加以考虑，指标反映流动性不准确。②对于高品位铁矿粉来说，较多在 1 280 ℃以上才会熔化，可见“流动性指数”无法体现这类矿粉的流动性。

为改善以上状况，本文利用“流动性能特征数”[4] 来评价铁矿粉的流动性，充分考虑了烧结过程信息，并定量给出了温度对流动速度的影响关系。因此，可以更加客观、准确地区分出不同矿粉的流动性差异，可以比较合理地对铁矿粉的流动性能进行评价。

2. 2. 1　实验方法

用电子秤分别称取 0. 6 g 铁矿粉(按照碱度 R = 4 均匀混入 CaO) 和 3. 0 g 铁矿粉分别用压片机在 10 MPa 的压力下压制 3 min，所得 8 mm × 5. 2 mm 的铁矿粉圆柱试样和直径 25 mm × 3. 5 mm 的铁矿粉垫片试样。然后，将铁矿粉圆柱试样置于铁矿粉垫片试样之上，放入带有记录系统的高温炉内按设定的升温制度在一定的气氛中进行焙烧。实验中升温制度为: 25 ~ 600 ℃ 升温速度为 15 ℃/min; 600 ~ 1 200 ℃ 升温速度为 10 ℃/min; 1 200 ℃ 以上升温速度为 5 ℃/min。

2. 2. 2　计算方法及结果分析

LD 综合了铁矿粉烧结液相过程中的各种重要信息，如升温速率、液相流动温度、流动时间等参数。且定义了烧结液相有效流动的起点和终点分别为流动性实验中试样高度下降了 30% 和 75% 处时的位置。对应的起点时间为 t_1、温度为 T_1、试样面积为 S_1 和终点时间为 t_2、温度为 T_2、试样面积为 S_2。由此得到的特征数的计算方式如下:

$$LD = \frac{v_z\left(\frac{T}{100}\right)}{H} \tag{2}$$

式中: LD 为流动性特征数; v_z 为烧结液相自身流动速度，即液相流动面积增长率与流动时间之比，S/(t_s) ; T 为流动温度，即流动起点与终点温度平均值，K; S 为面积增长率，即流动起点到终点液相流动面积增长率(SP30 - SP75) / SP75，%; H 为升温速率，K/s。基于上述研究，进行流动性实验。其中铁矿粉熔融过程和测得的 LD 结果分别如图 3 和表 3 所示。

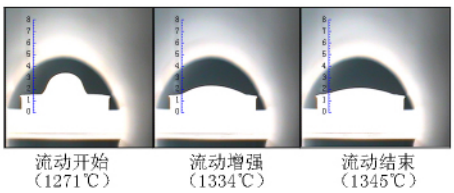


图 3　铁矿粉熔融过程示意图

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表3 铁矿粉LD实验数据

矿粉	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
LD	7.24	6.18	1.08	6.32	2.98	1.34	8.75	3.59	0.77	3.7

3 混合矿高温性能特征数的研究

3.1 TH的配合性

3.1.1 两种铁矿粉的配合性

利用同化性实验，继续深入研究单矿的TH与两种矿粉混矿的TH之间的关系。基于文中所示的10种矿粉，实验设计了10大组不同矿粉搭配方案，即“矿粉1+矿粉2”~“矿粉9+矿粉10”~“矿粉1+矿粉3”，且配比设计分别为“1∶4”、“2∶3”、“3∶2”、“4∶1”，共计40小组实验。图4与图5分别为40小组实验结果数据处理后的效果图。

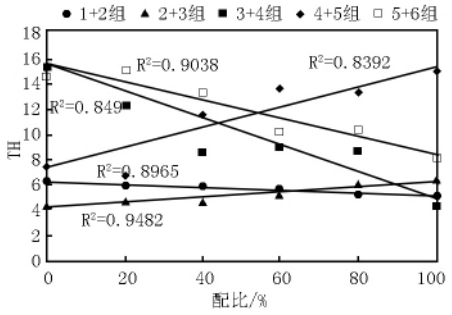


图4 (矿粉1+矿粉2)组~(矿粉5+矿粉6)组TH值

由两图可以看出：随着单矿配比的增加，混矿的TH值呈现明显的线性关系。因此，可以根据单矿的TH值预测两种矿粉混矿的TH值。

3.1.2 三种铁矿粉的配合性

在研究了两种矿粉配合性后，继续研究了

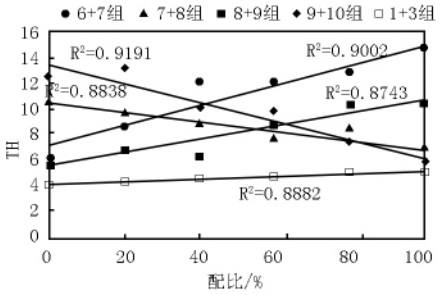


图5 (矿粉6+矿粉7)组~(矿粉1+矿粉3)组TH值

三种矿粉搭配使用的配合性。实验设计了8大组实验，即 “$l_{矿粉1}$”+“$l_{矿粉2}$”+“$l_{矿粉3}$”、“$l_{矿粉2}$”+“$l_{矿粉3}$”+“$l_{矿粉4}$”、“$l_{矿粉3}$”+“$l_{矿粉4}$”+“$l_{矿粉5}$”、“$l_{矿粉4}$”+“$l_{矿粉5}$”+“$l_{矿粉6}$”、“$l_{矿粉5}$”+“$l_{矿粉6}$”+“$l_{矿粉7}$”、“$l_{矿粉6}$”+“$l_{矿粉7}$”+“$l_{矿粉8}$”、“$l_{矿粉7}$”+“$l_{矿粉8}$”+“$l_{矿粉9}$”、“$l_{矿粉8}$”+“$l_{矿粉9}$”+“$l_{矿粉10}$”。每大组对应三组不同配比的实验，配比设置分别为“1∶2∶2”、“2∶1∶2”、“2∶2∶1”。由此进行实验获得三种矿粉混矿的实测TH值。考虑到两种矿粉的配合性近似满足线性关系。因此，本文假设三种矿粉亦满足线性关系，由此根据配比及单矿的TH值计算得到三种铁矿粉混合矿的理论TH值。将理论值和实测值进行比较(如表4所示)。对比数据，我们发现理论值与实测值的误差几乎都在7%左右。因此，我们可以近似认为三种铁矿粉搭配使用时，其混合矿的同化性与对应单矿的同化性也呈现线性关系。

表4 三种铁矿粉搭配TH值

矿粉名称	搭配比例								
	1∶2∶2			2∶1∶2			2∶2∶1		
	理论值	实测值	误差/%	理论值	实测值	误差/%	理论值	实测值	误差/%
1+2+3	5.24	5.59	6.68	5.18	4.98	3.86	5.40	5.55	2.78
2+3+4	8.90	9.32	4.72	9.53	8.98	5.77	7.18	6.87	4.32
3+4+5	10.03	10.26	2.3	8.07	8.45	4.71	9.28	9.82	5.82
4+5+6	11.98	12.65	5.6	13.41	12.54	6.49	12.06	11.45	5.06
5+6+7	9.89	10.57	6.88	8.82	9.01	2.15	10.26	10.91	6.34
6+7+8	9.55	10.01	4.82	11.43	12.14	6.21	10.35	10.78	4.15
7+8+9	7.85	7.48	4.71	7.23	7.14	1.24	7.88	8.34	5.84
8+9+10	9.5	9.75	2.63	10.21	11.05	8.23	9.1	9.04	0.66

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.1.3　四种铁矿粉的配合性

由上述结果可知，两种与三种矿粉搭配使用时，混矿与单矿的同化性呈现线性相关性。从而假设四种铁矿粉搭配使用时，混矿的同化性与对应单矿的同化性也呈现线性关系。实验设计了 7 大组实验，即 “$l_{矿粉1}+l_{矿粉2}+l_{矿粉3}+l_{矿粉4}$”、“$l_{矿粉2}+l_{矿粉3}+l_{矿粉4}+l_{矿粉5}$”、“$l_{矿粉3}+l_{矿粉4}+l_{矿粉5}+l_{矿粉6}$”、“$l_{矿粉4}+l_{矿粉5}+l_{矿粉6}+l_{矿粉7}$”、“$l_{矿粉5}+l_{矿粉6}+l_{矿粉7}+l_{矿粉8}$”、“$l_{矿粉6}+l_{矿粉7}+l_{矿粉8}+l_{矿粉9}$”、“$l_{矿粉7}+l_{矿粉8}+l_{矿粉9}+l_{矿粉10}$”。每大组对应三组不同配比的实验，比例分别为 “2∶3∶2∶3”、“1∶1∶1∶1”、“3∶2∶3∶2”。由此进行了 21 组矿粉搭配实验，其实测值与理论值的对比结果如表 5 所示。

表 5　四种铁矿粉搭配 TH 值

矿粉名称	搭配比例								
	2∶3∶2∶3			1∶1∶1∶1			3∶2∶3∶2		
	理论值	实测值	误差/%	理论值	实测值	误差/%	理论值	实测值	误差/%
1+2+3+4	8.2	8.67	5.73	8.01	5.12	2.59	7.04	7.34	4.26
2+3+4+5	7.94	7.45	6.17	8.66	3.46	1.22	8.8	9.2	4.55
3+4+5+6	11.26	11.78	4.62	10.88	4.41	0.779	9.58	9.11	4.91
4+5+6+7	10.15	10.01	1.38	10.23	6.15	0.3	11.64	11.23	3.52
5+6+7+8	10.33	10.98	6.29	10.05	2.55	0.2	9.27	9.78	5.50
6+7+8+9	8.67	8.79	1.38	9.56	2.79	0.48	9.92	9.96	0.40
7+8+9+10	9.33	9.67	3.64	8.67	1.48	1.48	8.27	8.73	5.56

由表 5 可以看出，四种矿粉搭配的混矿同化性的理论值与实测值亦相差不大。因此，近似认为四种矿粉搭配亦满足线性关系。从而验证了若干种铁矿粉搭配使用时，混合矿的同化性与对应单矿的配比也呈现线性关系的假设。

3.2　LD 的配合性

3.2.1　两种铁矿粉的配合性

参照 TH 的研究方法，进行了 LD 的两种矿粉搭配实验。其实验结果分别如图 5 与图 6 所示。显然，LD 亦满足线性关系。

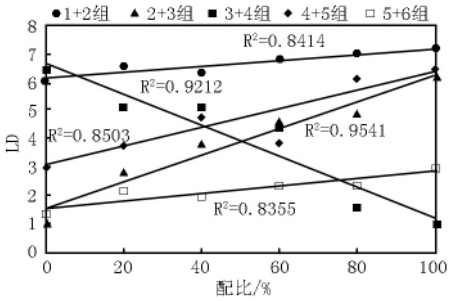


图 6　(矿粉 1 + 矿粉 2) 组 ~ (矿粉 5 + 矿粉 6) 组 LD 值

3.2.2　三种铁矿粉的配合性

参照 TH 的研究方法，进行了 LD 的三种矿粉搭配实验。其实验结果如表 6 所示。显然，三种矿粉搭配得到混矿的 LD 亦近似满足线性关系。

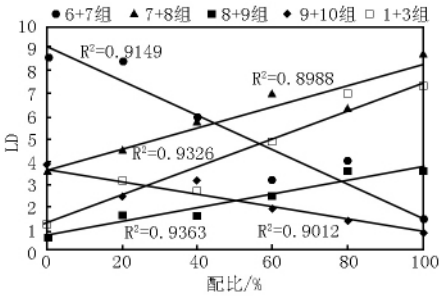


图 7　(矿粉 6 + 矿粉 7) 组 ~ (矿粉 1 + 矿粉 3) 组 LD 值

3.2.3　四种铁矿粉的配合性

参照 TH 的研究方法，进行了 LD 的四种矿粉搭配实验。其实验结果如表 7 所示。

由表 7 可知，四种矿粉搭配得到混矿的 LD 亦近似满足线性关系。由此推断，多种矿粉组成的混矿依然与对应单矿的配比呈现线性关系。

4　基于铁矿粉高温性能特征数的配矿探索

上述配合性的研究显示，铁矿粉的高温性能特征数满足:

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表6 三种铁矿粉搭配LD值

矿粉名称	搭配比例								
	1∶2∶2			2∶1∶2			2∶2∶1		
	理论值	实测值	误差/%	理论值	实测值	误差/%	理论值	实测值	误差/%
1+2+3	4.35	4.64	6.67	4.56	4.84	6.14	5.58	5.77	3.41
2+3+4	4.2	4.01	4.52	5.22	5.57	6.70	4.17	4.45	6.71
3+4+5	3.94	3.74	5.08	2.89	2.97	2.77	3.56	3.33	6.46
4+5+6	2.99	3.11	4.01	3.66	3.91	6.83	3.99	4.08	2.26
5+6+7	4.63	4.89	5.62	4.96	4.67	5.85	3.48	3.66	5.17
6+7+8	5.20	5.55	6.73	3.72	3.98	6.99	4.75	4.81	1.26
7+8+9	3.49	3.67	5.16	4.53	4.65	2.65	5.09	5.43	6.68
8+9+10	2.51	2.34	6.77	3.07	3.24	5.54	2.48	2.34	5.65

表7 四种铁矿粉搭配LD值

矿粉名称	搭配比例								
	2∶3∶2∶3			1∶1∶1∶1			3∶2∶3∶2		
	理论值	实测值	误差/%	理论值	实测值	误差/%	理论值	实测值	误差/%
1+2+3+4	5.41	5.12	5.36	5.21	5.54	6.33	4.99	5.23	4.81
2+3+4+5	3.72	3.48	6.45	4.14	4.04	2.42	4.562	4.76	4.34
3+4+5+6	3.11	3.32	6.75	2.93	3.12	6.48	2.75	2.93	6.55
4+5+6+7	5.05	4.71	6.73	4.85	4.52	6.80	4.64	4.91	5.82
5+6+7+8	3.83	4.03	5.22	4.17	4.29	2.88	4.51	4.82	6.87
6+7+8+9	3.84	3.81	0.78	3.61	3.78	4.71	3.38	3.57	5.62
7+8+9+10	4.09	3.88	5.13	4.2	4.19	0.24	4.31	4.45	3.25

$$H=\sum_{i=1}^{n} H_i \cdot l_i;\ \sum_{i=1}^{n} l_i=1 \qquad (3)$$

式中: H 为混合矿的高温性能特征数,即TH和LD; H_i 为单矿的高温性能特征数,即 TH_i 和 LD_i; l_i 为单矿的配比。

考虑铁矿粉的同化性与流动性过高或者过低均难以获得产、质量指标优良的烧结矿。因此,在烧结生产进行配矿时,应重视同化性和流动性不同的铁矿粉搭配使用以对其相关性能互补或者改善。深入探索后,发现可利用公式(3)进行多种方式的配矿研究,本文列举以下三种:

1) 根据高温性能特征数对铁矿粉的同化性和流动性划分等级[6],如可划分成“很好”、“好”、“一般”、“差”、“很差”五个等级。考虑到不同铁矿粉的高温特性的差别,采取“好配坏”的互补搭配方式,如“很好”搭配“很差”,以此对矿产资源进行整合,充分利用优、劣矿产资源,以达到节省资源的同时获得相对性能较好的配矿方案。

2) 区别传统配矿仅将配矿成本作为目标,而其余指标只做约束处理的情况。考虑公式(3)的可行性,可以增加将同化性和流动性亦作为目标函数,即三个目标函数,进行最优化建模处理。由此配矿可以获得配矿成本最低、同化性能和流动性能最好的配矿方案。同时,利用数学方法对这种非线性多目标函数[7,8]进行求解,可以有效的提高其准确性。

3) 利用公式(3)可以很方便的得到混矿的高温性能参数。因此,在传统的单目标配矿模型[9]中,可以很方便的用“高温性能特征数”来取代最低同化温度和流动性指数对于铁矿粉的高温性能进行评价,以此来提高配矿的准确性。

当然,随着研究的不断深入,配矿方式也会越来越科学与方便。但显然,本文验证的高温特征数的配合性存在的线性关系,可以很大程度地减少配矿研究过程的实验工作量,节省相当一部分成本。

(下转第47页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

通过“6 段 9 点”端部延时技术，在堆积中精确定位端部，采取控制堆积的走行起点，优化混匀矿端部堆积过程，减少端部料的产生，从而减少成分偏析，提高整个料堆的混匀矿堆积质量。

3　效果对比

一期匀矿堆积系统采用上述两种技术后，混匀矿质量得到了较大的提高，2013 年一期混匀矿的质量指标 SiO_2 标准偏差平均值为 0.128，达到国内领先水平（如图 7 所示）。此外，匀矿端部料的取出量由原先的 7 000 多 t 减为 1 700 t 左右，为生产能力的提高也提供有力的保证。

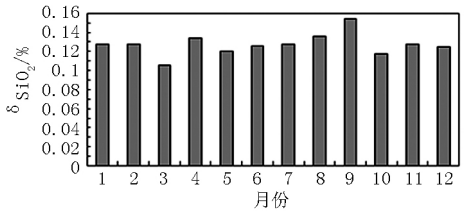


图 7　原料分厂一期混匀矿 2013 年 δ_{SiO_2} 月统计图

4　结　论

提高混匀矿堆积质量是降低烧结矿原料成本的重要途径，采取往返变速平铺布料和端部延时堆积技术可提高混匀矿的堆积质量，从而得到粒度、成分比较均匀稳定的混匀矿，具有一定降本增效的作用。本文重点对这两种技术进行了阐述，以供同行参考。

参考文献

[1] 王建平，刘跃湘，张全新，等. 韶钢原料场改进混匀矿配料的实践[J]. 烧结球团，2009，34(5)：56－58.

[2] 张青，陈明. 宝钢原料场混匀堆积技术创新与实践[J]. 炼铁，2005，(24)：117－121.

[3] 同济大学数学系. 高等数学(下册)[M]. 北京：高等教育出版社，2007.

(上接第 18 页)

5　结　论

1) 本文采用铁矿粉高温性能特征数来衡量铁矿粉的同化性和流动性，该指标综合了烧结过程的各个因素，操作过程简单，可以科学准确地对铁矿粉的同化性和流动性进行评价。

2) 通过对铁矿粉进行两两组合、三三组合、四四组合的实验发现，混合矿的高温性能特征数与单种铁矿粉之间具有线性相关性。可以根据单种铁矿粉的高温性能特征数预测出混合矿的高温性能特征数，这对于烧结优化理论的丰富具有重要的意义。

3) 基于高温性能特征数具有的线性配合关系，可以很方便的获得混合矿的高温性能参数。以此进行配矿研究，可以节省配矿实验成本，具有很强的实际生产意义。

参考文献

[1] 吴胜利，刘宇，杜建新，等. 铁矿粉与 CaO 同化能力的试验研究[J]. 北京科技大学学报，2002，24(3)：258－261.

[2] 吴胜利，杜建新，马洪斌，等. 铁矿粉烧结液相流动特性[J]. 北京科技大学学报，2005，27(3)：291.

[3] 吴铿，王梦，赵勇，等. 测定铁矿粉同化特性新方法的探索[J]. 东北大学学报：自然科学版，2013，34(7)：961－965.

[4] 吴铿，申威，杜瑞岭，等. 铁矿粉烧结液相流动性能的特征数方程的建立[J]. 重庆大学学报，2015，38(05)：26－31.

[5] 裴元东. 铁矿粉的烧结配合性及其应用技术研究[D]. 北京：北京科技大学，2008.

[6] 阎丽娟，吴胜利，尤艺，等. 各种铁矿粉的同化性及其互补配矿方法[J]. 北京科技大学学报，2010，32(3)：298－305.

[7] 刘淋. 多目标线性规划的若干解法及 Lingo 实现[J]. 襄阳职业技术学院学报，2011，10(6)：20.

[8] 刘麟. 基于粒子群算法的多目标函数优化问题研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2005.

[9] 黄晓贤. 铁矿烧结优化配矿数学模型的研究[D]. 长沙：中南大学，2013.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net