铁矿粉高温性能特征数之间的关联性研究

张文哲[1]，聂 礼[2]，赵 勇[3]，朱 利[3]，吴 锵[1]
(1. 北京科技大学 冶金与生态工程学院，北京 100083；2. 首钢水城钢铁(集团)有限责任公司，贵州 六盘水 553028；
3. 首钢技术研究院，北京 100041)

摘 要：为了快捷地评价铁矿粉高温性能，为烧结配矿提供依据和参考，采用铁矿粉高温性能特征数，对 15 种不同铁矿粉的高温性能特征数进行了测定。铁矿粉高温性能特征数主要包括同化反应特征数(*TH*)、流动性能特征数(*LD*)和粘结强度特征数(*BS*)，它们是根据冶金物理化学和传输原理，将铁矿粉高温反应过程中的反应温度、时间等参数，与实际相结合，同时考虑了温度、生成速率和烧结生产实际温度的影响，建立理论与应用之间的联系，动态地表征反应过程中的行为信息。根据自身粘结相强度与烧结矿转鼓强度有很好的对应关系，在此基础上，分别分析了 *TH* 和 *LD* 与 *BS* 之间的关系。结果表明：当 *TH* 和 *LD* 均适中时，其 *BS* 最好，由此可以推论其成矿的转鼓强度质量也较好。

关键词：烧结；铁矿粉；高温反应；同化反应；流动性能；粘结强度；特征数
中图分类号：TF046.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000－8764(2020)01－0007－06
doi：10.13403/j.sjqt.2020.01.002

Research on the relevance between high temperature performance characteristic numbers of iron ore fines

Zhang Wenzhe[1], Nie Li[2], Zhao Yong[3], Zhu Li[3], Wu Keng[1]
(1. *School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing* 100083;
2. *Shougang Shuigang Iron and Steel (Group) Co., Ltd., Liupanshui* 553028, *Guizhou*; 3. *Shougang Institute of Technology, Beijing* 100041)

Abstract To evaluate the high temperature performance of iron ore powder quickly and provide a basis and reference for sintering proportioning, the high temperature performance characteristic numbers are used to test the high temperature performance of fifteen different iron ore powder. High temperature performance characteristic numbers of iron ore powder mainly include characteristic number of assimilation reaction(*TH*), characteristic number of fluidity performance(*LD*) and characteristic number of bonding strength(*BS*). They are based on metallurgical physical chemistry and transmission principles, by combining practice with the parameters of reaction temperature and time etc. during high temperature reaction process of iron ore powder and by considering the effect of temperature, rate of production and actual temperature of sintering production, the connection between theory and application is established, and the behavior Information in reaction process is represented dynamically. Based on the good corresponding relationship between self-bonding phase strength and tumbler strength of sinter, the relationships between *TH*, *LD* and *BS* are analyzed respectively. The results show that when *TH* and *LD* are all moderate, its *BS* is the best, therefore it can be inferred that the tumbler strength of sinter is also better.

Key words sintering; iron ore fines; high temperature reaction; assimilation reaction; fluidity; bonding strength; characteristic number

收稿日期：2019－06－20
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51474022)
作者简介：张文哲(1993—)，男，硕士研究生，从事烧结、炼铁方面的研究。
通讯作者：吴 锵(1951—)，教授，从事烧结、炼铁方面的研究。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

铁矿粉的高温性能也即烧结基础特性，国内对铁矿粉高温性能的研究目前主要集中在同化性能、液相流动性能、粘结相强度特性和连晶性能等，研究铁矿粉的高温性能，对改善烧结矿质量、控制生产稳定和降低成本有重要意义[1-2]。对铁矿粉高温性能的评价，目前比较普遍的是采用铁矿粉同化和流动的相关指标，通过与烧结矿的性能对比来进行评价[3]。为了更好地指导烧结配矿，对铁矿粉高温性能(同化性能、流动性能和粘结强度)的研究也在不断地完善和改进。

铁矿粉最低同化温度的测量是通过多次改变目标温度，进行重复试验来确定铁矿粉开始同化的最低温度，一般需要进行5、6次试验才能测出结果，试验过程较为繁琐，且指标单一，没有考虑铁矿粉同化过程中的各种信息。针对这一不足，吴浩方等[4]采用可视卧式高温炉，通过摄像头观察同化过程，定义同化反应的起始点为试样下降10%高度，反应终点为试样下降80%，用起始点之间的反应温度和时间来描述铁矿粉的同化性能；裴元东[5]在高温炉上方添加高温摄像头，用同化过程中的4个特征温度点来评价铁矿粉的同化性能，它们分别是试样收缩、液相开始形成、反应剧烈和液相固结时的温度，由于判断温度点的依据主要靠摄像头观察到的俯视图，对判断精度的要求严格，容易带来较大的误差。

铁矿粉的流动性指数指的是铁矿粉试样高温反应后生成的液相流动面积与初始面积的比值，流动性指数大则说明粘结相的流动性强。测定方法是通过将铁矿粉小饼试样放入高温卧式炉中，恒温1 300 ℃进行试验，并记录试样收缩到80%所用的时间，定义为熔化时间，结合流动性指数和熔化时间来表征铁矿粉液相流动性[6]。这种研究方法仅考虑了液相反应温度是一个固定值，忽略了铁矿粉流动随着温度变化的过程信息，且没有考虑开始流动的温度及流动过程的快慢，可能会使评价结果不够全面。

粘结相自身强度是通过将铁矿粉经过1 250 ℃高温烧结后，测定其抗压强度得出。在试验过程中，由于烧结反应的不可控性，生成的粘结相并不规则，所以在抗压试验中会有一定的误差，其主要取决于压力的角度，试验重现性不理想[7-8]。沈峰满等[9]分别针对纵向和横向受力，研究粘结相的抗压和抗折两个方向的强度，试验结果表明抗折强度与烧结杯转鼓试验的结果吻合。所以在研究粘结相自身强度时，将重点放在了抗折强度，即粘结相所受剪切力的强度方向上。朱德庆和李光森等[10-11]的研究结果表明，基于剪切强度的烧结矿粘结强度是制约其转鼓强度的主要因素。

由上可见，评价铁矿粉高温性能的指标众多，每个指标仅反映性能中的一个参数，很难准确反映铁矿粉的高温反应特性，且忽略了其反应过程中的信息和各个指标间的相互作用，不利于对铁矿粉质量进行直观和全面的评价，给烧结生产配料带来很大不便。

为更加简便和全面地评价铁矿粉的烧结性能，相关学者根据冶金物理化学和传输原理，建立了铁矿粉高温性能特征数，即分别为同化反应特征数(*TH*)、流动性能特征数(*LD*)和粘结强度特征数(*BS*)3个指标，该特征数同时兼顾了实际烧结的温度和反应过程中反应物的生成曲线，建立了反应过程中不同信息之间的内在联系[12-15]。由于粘结相强度与烧结矿转鼓强度有着最直接的制约关系，本文测定了15种不同铁矿粉高温烧结性能特征数，分别确定了同化反应特征数(*TH*)和流动性能特征数(*LD*)与粘结相强度特征数(*BS*)的关系，进而得出由铁矿粉*TH*和*LD*可以对烧结成矿转鼓强度做出预测，可为其应用在烧结配料上提供试验理论依据。

1 试验原料与方法

1.1 试验设备与试样制备

为了能够全面观察在高温过程中铁矿粉烧结性能的变化，采用可视卧式高温试验炉，配用摄像头从侧面对试样进行拍照，每3 s拍照一次，用计算机记录全部试验过程的图像[12]。试验装置示意见图1。

试样制备中的铁矿粉粒度 < 149 μm，CaO

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

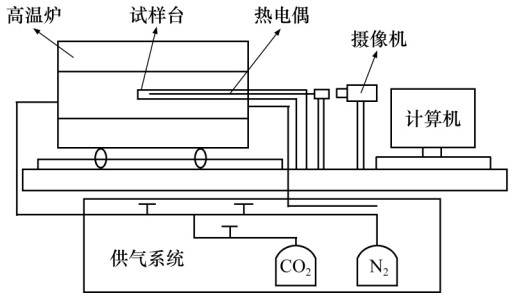
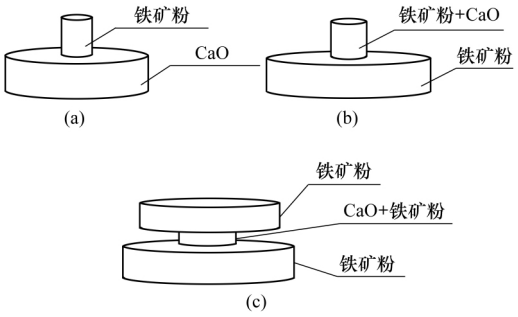


图 1　试验装置示意

为分析纯，充分烘干后待用。使用压片机在一定的压力(10 MPa)和时间(3 min)下，按试验的要求(图 2)分别制备 *TH*、*LD* 和 *BS* 的试样。其中 *LD* 和 *BS* 的试样，二元碱度为 4.0，通过铁矿粉中的化学成分来分别计算 CaO 的配加量，试验全程通空气。



(a) *TH* 试样；(b) *LD* 试样；(c) *BS* 试样

图 2　测定 3 种特征数实验的试样制备图

1.2　升温制度的选择

从宏观上看，实际烧结生产的升温速度很快，最高为 1 700 ~ 2 000 ℃/min，最低为 450 ~ 650 ℃/min，到预热带后升温速率下降很多，最高为 500 ℃/min，最低为 100 ℃/min(系无水干料)[16]。国内外学者们在研究铁矿粉的烧结性能时，也大多采用三阶段的快速升温来模拟实际烧结温度曲线，但与实际情况还相差很多，而且为了防止热滞后现象，在不同阶段都要有一定的保温时间。为了提高试样的升温速度，需要使用铂金高温炉，铂金高温炉成本高，且不能配碳，也不能对反应过程进行观察。

通过预备试验发现，在试样没有发生同化反应或熔化前，升温速度的快慢对铁矿粉高温性能特征数的影响不大。如对于一种同化反应温度在 1 240 ℃的铁矿粉，将试样分别采用快、慢两种升温速度升温至 1 200 ℃，恒温一段时间后取出，试样外观都没有发生变化，也没有液相的产生，并分别通过 X 射线衍射(X-ray diffraction，XRD)验证了没有铁酸钙的生成[10]。分别对快、慢两种不同升温速率在达到1 150 ℃后，采用相同的升温速率，得到的 *TH* 基本相同。表明在不发生同化反应时，试验的升温速率的影响可以忽略。对铁矿粉的 *LD* 的研究结果也是一样的。

事实上，铁矿粉进行同化反应后，熔化流动发生在烧结燃烧带的最高温度区域内，温度达到最高点，在该区域升温速率较之前会大幅度下降，并由正变负。因此，在 1 150 ℃以上，铁矿粉高温性能特征数的测定试验，可以采用较低的升温速度进行。由于采用了图 1 所示的卧式高温炉，不仅减少了实验成本，消除热滞后对实验的影响，而且可以对铁矿粉的高温性能进行过程摄像观察，以便全面地了解铁矿粉高温反应过程的重要信息。

因此，本文测定铁矿粉高温性能特征数试验升温条件：室温 ~ 1 150 ℃，15 ℃/min；1 150 ℃以上，5 ℃/min。

1.3　铁矿粉高温性能特征数的计算方法

TH 的计算方法如公式(1)所示[10]。

$$TH = \frac{2^n\left(\frac{V}{t_a}\right)\left(\frac{T_a}{1\,000}\right)}{H} \tag{1}$$

式中：*TH* 量纲为 1；*n* 为烧结实际生产温度与同化反应温度之比；*V* 为同化反应的体积分数，%；t_a 为同化反应的时间，s；T_a 为同化反应的温度，℃；*H* 为本试验的升温速度，℃/min。

由量纲分析可知，如果在该参数上乘以 *Nu* 数，可以得到同化反应消耗的热量与设备供给传导到试样表面的热量二者的比值。同时由于考虑了时间的因素，该特征数表示单位时间同化反应消耗的热量与单位时间供热的比值。其计算的结果表明在同一升温条件下，同化反应进行到一定程度所吸收的热量。

由公式(2)可以计算 *LD*[11]。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$LD = \frac{\left(\frac{\eta}{t_b}\right)\left(\frac{T_b}{10}\right)}{H} e^{\frac{24\,500(T_0-T_b)}{T_0 \cdot T_b}} \quad (2)$$

式中: LD 量纲为1; η 为反应的面积增长率,%; t_b 为反应的时间,s; T_b 为反应的温度,℃; e的指数项是为了修正温度对液相粘度的影响关系,其中 T_0 为实际烧结生产温度,本文取1 290 ℃。

由量纲分析,该特征数表示液相流动面积增长单位时间所消耗的热量与供热的比值。LD 同时考虑了流动温度、液相流动面积变化速度,还包含了铁矿粉流动温度与烧结生产温度差异对液相流动面积变化速度的影响。

烧结矿从微观上来说可以分为液相粘结相和未熔含铁固相两个部分,其反应机理主要是靠生成的液相对固相进行粘结。而烧结矿的强度主要取决于这两个部分各自的自身抗压强度和两相间的粘结强度。通过试验发现,铁矿物天然生成,较为致密,其强度要比其他两种高;粘结相自身的抗压强度也要高于粘结相粘接强度[9]。所以认为烧结矿强度的主要限制性条件是未熔含铁固相和粘结相之间的粘结强度,通过测定其剪切力来研究这一指标。测定方法:将制好的试样放在高温炉中加温至1 280 ℃,保温10 min后取出,使用卡槽装置[10]测试试样的粘结面剪切力,将试样被压溃时所承受的最小压力,定义为试样的粘结强度。选取PB粉的粘结强度作为基准,BS 的计算公式如下[12]:

$$BS = \frac{\text{某一矿粉的粘结相粘结强度}}{\text{PB粉的粘结相粘结强度}} \quad (3)$$

式中: BS 量纲为1。

采用 BS 使粘结相的强度特性评价有了一个重要的衡量标准。PB粉是国内普遍使用、而且用量很大的矿粉之一,作为一种国际矿粉市场的基准指数矿,其同化性能与流动性能较为居中,选取PB粉作为基准矿粉具有重要的实际意义和参考价值。

2 铁矿粉高温性能特征数的测定

表1为15种生产中常见矿粉的主要化学成分。由表1可见: 15种矿粉中 SiO_2 质量分数较高的为A矿、E矿和F矿,都在5%以上; CaO质量分数的区别不大,最高的为C矿,最低的为B矿; Al_2O_3 质量分数较高的有C矿和I矿,较低的为B矿和J矿; MgO质量分数波动不大,只有C矿和E矿超过了0.5%,其它矿都在0.4%左右浮动。

测定的15种铁矿粉高温性能特征数(TH、LD 和 BS),结果见表2。

表1 铁矿粉的主要化学成分(质量分数) %

成分	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
TFe	61.03	67.32	60.07	61.32	63.02	62.17	64.17	60.36	63.29	65.66	60.26	64.16	61.06	65.34	61.28
SiO_2	5.80	2.59	4.26	3.49	5.36	5.21	2.15	3.12	4.21	4.31	4.91	3.88	4.11	2.99	2.22
CaO	0.53	0.37	1.47	0.51	1.18	0.72	0.82	0.39	0.69	0.57	1.08	0.79	0.71	0.63	0.51
Al_2O_3	1.45	0.86	1.77	1.32	1.43	1.25	1.47	1.12	1.62	0.82	1.46	1.16	1.20	1.09	1.27
MgO	0.31	0.42	0.54	0.41	0.53	0.41	0.43	0.42	0.44	0.47	0.47	0.46	0.41	0.33	0.40

表2 铁矿粉的高温性能特征数

项目	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
TH	38.26	8.13	7.94	7.74	6.25	8.76	29.45	39.65	16.94	18.57	16.37	21.95	13.24	23.53	7.48
LD	45.63	3.16	14.73	8.90	37.40	31.98	2.13	6.42	17.44	19.81	25.55	15.43	11.72	7.50	6.56
BS	0.88	0.48	0.89	0.89	1.15	1.29	1.39	1.19	1.56	1.56	1.57	1.63	1.42	1.21	0.71

从表2可见: 1) A矿、G矿和H矿 TH 较高,都在25以上,同化性好; I矿、J矿和K矿 TH 适中; C矿、D矿和E矿 TH 较小,在10以下,同化性较差。2) LD 最差的是B矿和G矿,非常小,表明铁矿粉在高温下几乎未流动; A矿和F矿 LD 在30以上,其流动性好; 其它

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

铁矿粉矿流动性适中。③铁矿粉 *BS* 最好的是 L 矿，达到 1.63；最差的是 B 矿，只有 0.48，最高与最低相差 3 倍多。

3　试验结果分析

3.1　原料成分对铁矿粉高温性能特征数的影响

由表 1、2 可以看出：

(1) 对于 *TH*：当烧结料中 Al_2O_3 质量分数增加时，可以生成含 Al_2O_3 的硅酸盐，促进铁酸钙的生成，并且 Al_2O_3 能增加铁酸钙存在的温度范围，因此适当的 Al_2O_3 能使 *TH* 增加；但是 Al_2O_3 也不宜过高，因为高温状态下的硅铝酸盐会使液相难以流动，反而使同化反应速率减缓，*TH* 降低，如矿粉 B 中 Al_2O_3 质量分数太低，矿粉 C 中的 Al_2O_3 质量分数过高，它们的 *TH* 都较低；当 MgO 增加时，MgO 能和 SiO_2 及 Al_2O_3 形成高熔点的镁橄榄石，造成不利于同化反应的动力学环境，提高了同化温度，使得 *TH* 降低；而 SiO_2 质量分数的变化对 *TH* 的影响较小，这是因为铁矿粉中铁氧化物数量远高于 SiO_2，对于铁氧化物与 CaO 的反应影响较小。

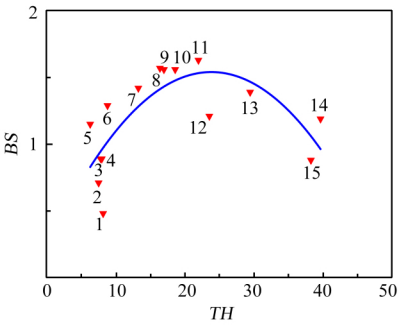
(2) 对于 *LD*：当铁矿粉中所含的 SiO_2 较高时，*LD* 较高，如矿粉 A、E 和 F。这是因为在二元碱度一定时，SiO_2 高意味着配入的 CaO 高，有利于形成更多的液相；Al_2O_3 和 MgO 对铁矿粉高温性能的影响比较小，更多的是体现在形成的复合物影响铁酸钙的生成，比如 Al_2O_3 与 CaO 形成的 $5CaO\cdot Al_2O_3$，MgO 在高温下形成的 $2MgO\cdot SiO_2$ 和 $MgO\cdot Fe_2O_3$，熔点都在 1 400 ℃以上，会使炉渣难熔，而阻碍液相的生成，使 *LD* 降低。

(3) 对于 *BS*：从结果来看，单一元素对其影响没有明显的规律性，这是因为 *BS* 的变化不仅受到液相生成的量的影响，还和液相的生成温度、主要成分和黏度等因素有关，是多种元素交互的影响。下文通过试验结果，分析 *TH* 和 *LD* 对 *BS* 的综合影响，探究铁矿粉高温性能特征数之间的内在联系。

3.2　*BS* 分别与 *TH* 和 *LD* 的关系

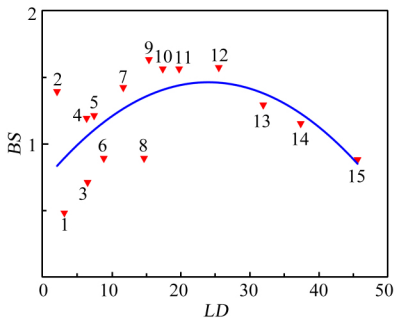
由前人的研究结果可知，铁矿粉的高温反应性可以用来评价烧结矿的转鼓强度，粘结相的抗折强度与烧结矿的转鼓强度密切相关[12]。因此，有必要研究 *BS* 分别与 *TH* 和 *LD* 的关系，分析其影响的内在原因，为指导生产的使用奠定一定的理论基础。

图 3 和图 4 分别为所测烧结矿 *BS* 与 *TH* 和 *LD* 的关系示意图，对应的二次关系式分别见公式(4)和公式(5)。



1—B 矿；2—O 矿；3—D 矿；4—C 矿；5—E 矿；6—F 矿；7—M 矿；8—K 矿；9—I 矿；10—J 矿；11—L 矿；12—N 矿；13—G 矿；14—A 矿；15—H 矿。

图 3　*TH* 与 *BS* 之间的关系



1—B 矿；2—G 矿；3—O 矿；4—H 矿；5—N 矿；6—D 矿；7—M 矿；8—C 矿；9—L 矿；10—I 矿；11—J 矿；12—K 矿；13—F 矿；14—E 矿；15—A 矿。

图 4　*LD* 与 *BS* 之间的关系

BS 与 *TH* 的关系式为

$$BS = -0.002\ 31 \times TH^2 + 0.109\ 93 \times TH + 0.231\ 8 \quad (4)$$

BS 与 *LD* 的关系式为

$$BS = -0.001\ 31 \times LD^2 + 0.062\ 84 \times LD + 0.704\ 79 \quad (5)$$

由图 3 和图 4 可知：虽然数据点与拟合曲线有的偏离较大，但结果都显示，当 *TH* 和 *LD* 适中时，*BS* 都处于较高的水平，可以间接地推断出铁矿粉在适中的 *TH* 和 *LD* 时烧结矿的转鼓

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

强度最好，如J矿、K矿和L矿；当*TH*和*LD*过高或过低时，*BS*较小，如A矿和B矿。

3.3 铁矿粉高温性能特征数对烧结矿转鼓强度的影响

由公式(1)可知：影响铁矿粉*TH*的是同化反应温度和同化反应速度。如果铁矿粉同化反应温度不高、反应速率较快，有较好的热力学和动力学条件，可以较早地生成铁酸钙(SFCA)，有利于粘结相的生成，*BS*高，有利于提高烧结矿转鼓强度；而当铁矿粉同化反应温度高、反应速率慢，同化反应的热力学和动力学条件差，生成铁酸钙较晚，不利于粘结相的生成，*BS*低，使烧结矿转鼓强度下降。由公式(2)可知，影响铁矿粉*LD*的是流动温度、流动面积增长率。如流动温度较低，但流动面积增长率却较慢或流动温度较高，但流动面积增长率却较快，这类的铁矿粉也会有较适合的*LD*，也可以得到较高的*BS*。

为了进一步探究3个铁矿粉高温性能特征数之间的内在联系，对表2中的试验结果进行了多元线性回归分析，得出公式(6)：

$$BS = 0.006 \times TH + 0.025 \times LD + 1.041 \quad (6)$$

由公式(6)可看出：*LD*对*BS*的影响系数是*TH*的4倍左右。在图2(b)中，测定*LD*是将粘结相试样放在铁矿粉垫片上，这比通常测定流动性能采用粘结相试样放在耐热钢垫片上[6]要更加与烧结生产的实际情况吻合。测定*TH*的垫片是分析纯CaO，见图2(a)，*TH*的试验是模拟烧结液相生成中的主要部分，但不是全部过程；而*LD*的实验是模拟烧结过程中液相生产的全部过程。这可能是导致*LD*与*BS*的关联性比*TH*要强的原因。

需要指出，*TH*和*LD*中也都考虑了烧结生产的实际温度对铁矿粉高温烧结性能的影响。从理论上讲，只要温度足够高，铁矿粉都能够进行同化反应和形成液相，反之则反。采用铁矿粉高温性能特征数在指导烧结配矿时，对*TH*和*LD*较低的铁矿粉可以采用合理的方法来提高烧结生产的实际温度，也可以获得较为理想的烧结矿转鼓强度。

4 结 论

(1) 铁矿粉高温性能特征数充分利用了试验所获得的不同信息，建立了不同信息之间的内在联系，给出了表征不同信息的总体内涵，可更好地表征铁矿粉的烧结性能。对原铁矿粉高温性能的指标众多，不利于对铁矿粉质量进行直观和全面的评价及在指导烧结生产配料中使用不方便等缺陷进行了改进。

(2) *TH*与*LD*与*BS*的关系相同：在*TH*和*LD*适中时，*BC*较高；*TH*与*LD*过大或过小时，*BS*都会下降。根据前人的研究，粘结相强度与烧结矿的转鼓强度有很好的正相关性的结论，选择适当值的*TH*和*LD*，可获得较高的*BS*，烧结矿的转鼓强度也好。

(3) *TH*与*LD*都分别考虑了温度、生产速率和生产中实际烧结温度的影响。在指导烧结配矿时，获得铁矿粉的*TH*与*LD*后，要进一步分析温度和生成速率的影响，可深入地了解影响粘结相产生的因素，有效地维持烧结生产的稳定，从而降低烧结成本。如铁矿粉*TH*和*LD*较低时，可采用合理的方法提高烧结料层的实际温度，也可获得较好的烧结矿转鼓强度。

参考文献

[1] Loo CE, Leung W. Factors influencing the bonding phase structure of iron ore sinters [J]. ISIJ International, 2007, 43(9): 1 393 – 1 402.

[2] Okszaki J, Higuchi K, Hosotani Y, et al. Influence of iron ore characteristics on penetrating behavior of melt into ore layer [J]. ISIJ International, 2003, 43(9): 1 384 – 1 392.

[3] 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.

[4] 吴浩方，贾彦忠，梁德兰. 几种常见进口铁矿石的烧结基础性能[J]. 钢铁，2011，46(7)：10 – 13.

[5] 裴元东. 扬地粉高配比烧结试验研究[C]//中国金属学会. 第5届中国金属学会青年学术年会论文集. 北京：中国金属学会，2010：21 – 27.

[6] 吴胜利，裴元东，陈辉，等. 铁矿粉烧结液相流动性评价[J]. 北京科技大学学报，2008，30(10)：1 095 – 1 100.

[7] 潘文. 低品质铁矿资源在首钢烧结中的应用研究[D]. 北京：北京科技大学，2013.

(下转第39页)

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(2) 当 $w(SiO_2)$ 为 5.5%，$w(MgO)$ 在 1.4%~2.2% 变化时，随着 $w(MgO)$ 的升高，爆裂温度降低 8.95 ℃；当 $w(MgO)$ 为 2.0% 时，爆裂温度达到最低 590 ℃；$w(MgO)$ 继续增加，爆裂温度呈上升趋势。

(3) 当焙烧温度为 1 300 ℃、$w(SiO_2)$ 为 5.5% 时，随着 $w(MgO)$ 的提高，球团矿抗压强度逐渐降低；$w(MgO)$ 每增加 0.1%，抗压强度降低 71.9 N/P。

(4) 随着 $w(MgO)$ 的提高，$RDI_{+3.15\ mm}$ 呈先降低后提高的趋势。$w(MgO)$ 为 1.6% 时，$RDI_{+3.15\ mm}$ 最低，为 90.3%，还原性能变差，$w(MgO)$ 每增加 0.1%，还原性能降低 1.6%。

(5) 当 $w(SiO_2)$ 为 5.5% 时，随着 $w(MgO)$ 的提高，球团的软化开始温度总体呈上升趋势，软化区间温度变化较小，整体上镁质球团的软化开始温度较酸性球团提高 30~40 ℃，总体软化性能得到改善。

(6) 综合认为，球团中 $w(MgO)$ 在 1.8%~2.0% 较为合理。

参考文献

[1] 王新东，李建新，胡启晨. 基于高炉炉料结构优化的源头减排技术及应用[J]. 钢铁，2019，54(12)：104-110；131.

[2] 裴元东，赵志星，马泽军，等. 国外铁矿粉烧结理论与技术的进展(二)[J]. 烧结球团，2010，35(4)：1-5.

[3] 杨双平. 翼钢高炉炉渣的冶金性能研究[J]. 钢铁研究，2008，36(4)：9-20.

[4] 许满兴，张玉兰. 新世纪我国球团矿生产技术现状及发展趋势[J]. 烧结球团，2017，42(2)：25-30；37.

[5] 郭豪. 适宜太钢 4 350 m^3 高炉炉渣的成分[J]. 钢铁研究学报，2008，20(9)：58-63.

[6] 任伟，杨熙鹏，孙俊波，等. 富镁膨润土用于铁矿球团的试验研究[C]//2014 年全国炼铁生产技术会暨炼铁学术年会文集(上). 郑州：中国金属学会，2014：436-442.

[7] 周明顺，翟立委，李艳茹. 鞍钢烧结矿适宜 MgO 含量的试验研究[J]. 烧结球团，2005，30(6)：1-4.

[8] 谭德波，节永烈，龙红明. 马钢生产镁质球团的工业试验[J]. 烧结球团，2011，36(2)：28-31.

[9] 周明顺，沈峰满，翟立伟，等. MgO 添加方式对改善球团矿冶金性能的影响[J]. 钢铁，2012，47(4)：14-18.

[10] 周明顺. 鞍钢炼铁原料准备技术应用基础研究[D]. 沈阳：东北大学，2004.

[11] 潘向阳，龙跃，李神子，等. $w(MgO)$ 对熔剂性球团矿冶金性能的影响[J]. 钢铁，2019，54(10)：17-22.

[12] 张树江，蒋中秋，米立光，等. 球团矿添加镁质添加剂的研究[J]. 河北理上大学学报(自然科学版)，2011，33(4)：22-23.

[13] 吴锦文，李贵松，许彦斌. 氧化镁对酸性球团冶金性能的影响[J]. 烧结球团，1983，9(4)；14-22.

[14] 范晓慧，谢路奔，甘敏，等. 高镁球团焙烧特性及其固结强化机理[J]. 中南大学学报(自然科学版). 2013. 44(2)：449-454.

[15] 青格勒，吴锵，刘洪松，等. 焙烧温度对低硅含镁球团矿还原膨胀率的影响及机理[J]. 中国有色金属学报，2015，25(10)：2 901-2 912.

[16] 侯恩俭，王斌，马文，等. 鞍钢球团矿添加镁质复合粘结剂的研究[J]. 鞍钢技术，2017(4)：10-14.

(上接第 12 页)

[8] 王崇茂. 南钢铁矿粉评价体系研究[D]. 北京：北京科技大学，2013.

[9] 金明芳，李光森，姜鑫，等. 影响烧结过程最初液相形成的因素[J]. 节能，2008(4)：7-9.

[10] 朱德庆，薛钰霄，潘 建，等. 铁矿粉高温反应性能综合指数评价烧结性能[J]. 钢铁，2017，52(8)：19-28.

[11] 李光森. 粘结相对烧结矿强度的影响机理及其合理组分的探讨[D]. 沈阳：东北大学，2008：2-99.

[12] 吴锵，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.

[13] 朱利，吴锵，申威，等. 表征铁矿粉烧结液相流动性能的新方法[J]. 钢铁研究学报，2016，28(6)：13-18.

[14] 陈小敏，吴锵，秦喧柯，等. 基于粘结强度特征数的烧结矿强度评价方法[J]. 重庆大学学报，2018，41(7)：23-29.

[15] 黄德军，吴锵，赵路朋，等. 铁矿粉高温性能特征数的配合性研究[J]. 烧结球团，2016，41(5)：13-18；47.

[16] 付菊英，姜涛，朱德庆. 烧结球团学[M]. 长沙：中南工业大学出版社：1995.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net