

钢铁冶金与材料

钒钛磁铁矿高炉冶炼理论燃烧温度控制研究

郑 魁^{1,2}, 王 炜², 干 显³, 谢洪恩¹, 付卫国¹, 董晓森¹

(1. 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 攀钢集团研究院有限公司, 四川 攀枝花 617000; 2. 钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉科技大学, 湖北 武汉 430081; 3. 攀钢集团西昌钢钒有限公司, 四川 凉山 615000)

摘 要: 风口前理论燃烧温度是评价高炉炉缸热状态的重要参数之一。在传统理论燃烧温度计算模型基础上, 综合考虑了灰分、未燃煤粉、 SiO_2 气化率等因素对理论燃烧温度的影响, 修正了理论燃烧温度计算模型。研究结果表明, 传统计算模型忽略的因素对理论燃烧温度的影响程度为 53 ~ 55 °C; 富氧率、喷煤量、鼓风湿度、风温、煤粉燃料率、煤粉预热温度、灰分、 SiO_2 气化率对理论燃烧温度的影响程度依次递减; 攀枝花钢钒公司高炉适宜的理论燃烧温度在 2 160 ~ 2 320 °C, 鼓风湿度恒定的情况下, 理论燃烧温度适宜的控制范围在 2 220 ~ 2 280 °C。将理论燃烧温度实时在线计算应用于高炉生产操作调控后, 有效促进了高炉稳定顺行, 降低了高炉燃料消耗。

关键词: 高炉; 理论燃烧温度; 计算模型; 修正

中图分类号: TF051

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)05-0130-09

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.05.017

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Research on theoretical combustion temperature control of V-Ti magnetite blast furnace smelting

Zheng Kui^{1,2}, Wang Wei², Gan Xian³, Xie Hong'en¹, Fu Weiguo¹, Dong Xiaosen¹

(1. State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Pangang Group Research Institute Co., Ltd, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2. Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China; 3. Pangang Group Xichang Steel & Vanadium Co., Ltd., Liangshan 615000, Sichuan, China)

Abstract: The theoretical combustion temperature in front of the tuyere is one of the important parameters for evaluating the thermal state of the blast furnace hearth. On the basis of the traditional theoretical combustion temperature calculation model, the influence of ash content, unburned coal powder, and SiO_2 gasification rate on the theoretical combustion temperature was comprehensively considered, and the theoretical combustion temperature calculation model was revised. The research results indicate that, the influence of factors ignored by traditional calculation models on the theoretical combustion temperature ranges from 53 to 55 °C. The influence of oxygen enrichment rate, coal injection rate, blowing humidity, air temperature, coal fuel rate, coal preheating temperature, ash content, and SiO_2 gasification rate on the theoretical combustion temperature decreases in sequence. The suitable theoretical combustion temperature control range for the blast furnace at Panzhihua Steel & Vanadium Co., Ltd. is 2 160~2 320 °C. And under the condition of constant blowing humidity, the suitable control range for the theoretical combustion temperature is 2 220~2 280 °C. After applying real-time online calculation of theoretical

combustion temperature to the regulation of blast furnace production operations, it effectively promotes

Key words: blast furnace, theoretical combustion temperature, calculation model, revise

0 引言

炉缸区域是高炉的“心脏”, 为高炉冶炼提供源源不断的热量和还原气体, 炉缸热状态良好程度对高炉稳定顺行和铁水质量影响至关重要。攀钢高炉冶炼高钛型钒钛磁铁矿, 存在入炉品位低、渣铁比高、渣中 TiO_2 含量高、炉渣熔化性温度高、炉渣 TiO_2 易被还原生成高熔点物质、炉缸易出现堆积和粘结等特性, 对高炉炉缸的热状态控制要求高于普通高炉冶炼。当前以铁水 $[\text{Si}]$ 、 $[\text{Ti}]$ 含量、铁水的物理温度表征炉缸热状态变化, 虽然准确度高, 但存在滞后性, 不能及时反映出高炉炉缸实时热状态, 而理论燃烧温度则是一个更具实时性的炉缸热状态表征指标^[1], 通过对理论燃烧温度的稳定控制, 可以起到优化下部综合调剂、稳定炉缸工作状态的作用。

现有的理论燃烧温度计算方法, 要么计算考虑的影响因素不够全面, 影响理论燃烧温度的计算精度; 要么涉及的参数项过多, 无法使其真正实现在线应用和准确指导高炉生产实践; 再有就是各钢铁企业结合自身情况回归得到的半经验公式和经验公式, 并不具备普遍适用性^[2-11]。因此, 有必要进一步综合考虑理论燃烧温度的影响因素, 提出更精确的计算

模型, 结合攀钢钒钛磁铁矿高炉冶炼特点和原燃料条件, 提出适宜的理论燃烧温度控制技术, 实现理论燃烧温度在线计算并指导高炉下部调剂。

1 理论燃烧温度计算模型建立

高炉理论燃烧温度是指在绝热条件下, 风口区域燃料进行不完全燃烧, 燃料和鼓风带入物理热及燃烧反应放出的热量全部传给燃烧产物所能达到的温度^[12]。理论燃烧温度的计算过程实质上是一个风口前区域局部的热平衡计算过程。传统的理论燃烧温度计算模型如式 1, 考虑的热收入项仅包括焦炭显热 $Q_{\text{焦}}$ 、煤粉显热 $Q_{\text{煤}}$ 、焦炭及喷吹煤粉不完全燃烧化学热 $Q_{\text{R焦}}$ 和 $Q_{\text{R煤}}$ 、鼓风显热 $Q_{\text{风}}$; 热支出项仅考虑煤粉分解热 $Q_{\text{分}}$ 、水分分解热 $Q_{\text{水}}$ 、部分学者考虑了灰分携带热 $Q_{\text{灰}}$ 对热支出的影响。而根据理论燃烧温度计算的假想绝热环境(如图 1 所示)可知, 该绝热环境在热收入项上还应包括喷煤载气显热 $Q_{\text{载气}}$, 热支出项还应包括灰分中 SiO_2 气化反应热 Q_{SiO} 、未燃煤粉带走热 Q_{S} ; 分子项进行热熔计算时, 产物不仅包括煤气中的(N_2 、 CO 、 H_2), 还应包括未燃煤粉和灰分。因此, 修正后的理论燃烧温度的计算模型应该如式 2 所示。

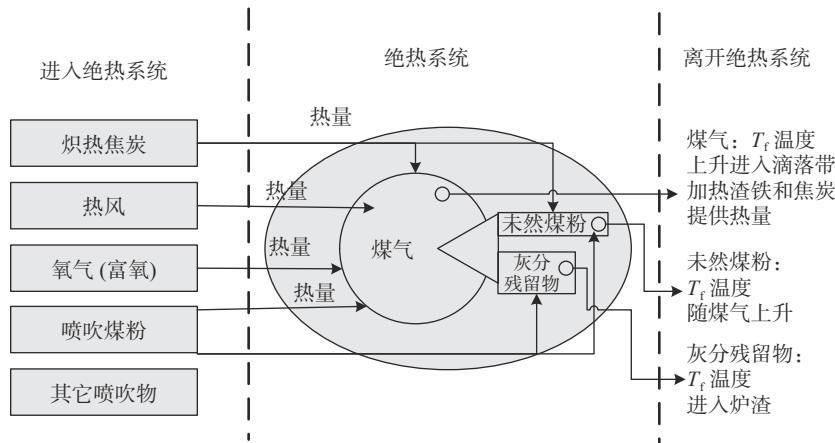


图 1 理论燃烧温度计算模型

Fig. 1 Theoretical combustion temperature calculation model

$$T_f = \frac{Q_{\text{焦}} + Q_{\text{煤}} + Q_{\text{R焦}} + Q_{\text{R煤}} + Q_{\text{风}} - Q_{\text{水}} - Q_{\text{分}}}{c_{\text{N}_2+\text{CO}}(V_{\text{CO}} + V_{\text{N}_2}) + c_{\text{H}_2} V_{\text{H}_2}} \quad (1)$$

$$T_f = \frac{Q_{\text{焦}} + Q_{\text{煤}} + Q_{\text{R焦}} + Q_{\text{R煤}} + Q_{\text{风}} + Q_{\text{载气}} - Q_{\text{水}} - Q_{\text{分}} - Q_{\text{灰}} - Q_{\text{SiO}} - Q_{\text{S}}}{c_{\text{N}_2+\text{CO}}(V_{\text{CO}} + V_{\text{N}_2}) + c_{\text{H}_2} V_{\text{H}_2} + c_{\text{灰}} W_{\text{灰}} + c_{\text{S}} W_{\text{S}}} \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: T_f 为理论燃烧温度, $^{\circ}\text{C}$; Q_i 为各物质带入或带走的热量, kJ ; c_i 为各物质的平均比热熔 $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$; V_i 为气体体积量, m^3 ; w_i 为质量, kg 。

应用修正后的理论燃烧温度计算模型进行计算时,区别于传统算法并应注意的事项有:

1)煤粉的比热容是一个与煤粉灰分、含水量相关的变量值;

2)煤粉分解热不再是一个定值,应该用盖斯定律^[5],结合煤粉低位发热量测试、煤粉 C、H、O、N、S 元素含量分析进行计算;

3)水分分解热既要包含鼓风带入水分,也要包括喷吹煤带入水分产生的分解热;

4)未燃煤粉仅含固定碳和灰分,能在极短的停留时间内升温至理论燃烧温度;

5)由焦炭和喷吹煤粉完全燃烧剩下的灰分,由于软熔温度仅 $1\ 350\ ^{\circ}\text{C}$ 左右,灰分对理论燃烧温度的影响应分为固相升温、熔解吸热、以及液相升温几个过程;

6)灰分中 SiO_2 的还原量占进入风口区域的总量的 6% 左右^[7], SiO_2 气化反应热为 $-692.6\ \text{kJ}/\text{mol}$;

7)鼓入热风、产生的煤气等气体密度和比热容是一个与温度相关的函数,比热容可用(式 3)和表 1 中数据^[13]进行循环迭代计算,直到假定温度与理论燃烧温度相等(绝对差值 <0.01)。

表 1 炼铁常用气体热容系数数据

Table 1 Heat capacity coefficient data of commonly used gases in ironmaking

气体	a	b	c	温度范围/ $^{\circ}\text{C}$
O_2	7.16	0.001 00	-40 000	25 ~ 2 700
N_2	6.66	0.001 02	0	25 ~ 2 700
H_2	6.52	0.000 78	12 000	25 ~ 2 700
CO	6.79	0.000 98	-11 000	25 ~ 2 700
H_2O	7.17	0.002 56	8 000	25 ~ 2 700

表 2 焦炭和喷吹煤粉成分

Table 2 Compositions of coke and pulverized coal injection

	固定C	挥发分	灰分	水分	灰中成分				%
					CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	
焦炭	86.14	1.27	12.75	0	4.49	53.61	1.95	23.82	
煤粉	76.81	12.21	12.52	0.50	7.14	47.61	2.98	22.35	

$$C_p = \frac{4.18}{22.4} \sum X_i \frac{\int_{298}^{t+273} (a_i + b_i T + c_i T^{-2}) dT}{t - 25} = \frac{4.18}{22.4} \sum X_i \left[a_i + \frac{b_i}{2} (t + 273 + 298) + \frac{c_i}{298(t + 273)} \right] \quad (3)$$

修正后的理论燃烧温度计算在考虑上述问题后,计算流程如图 2 所示,由计算机编程进行计算。

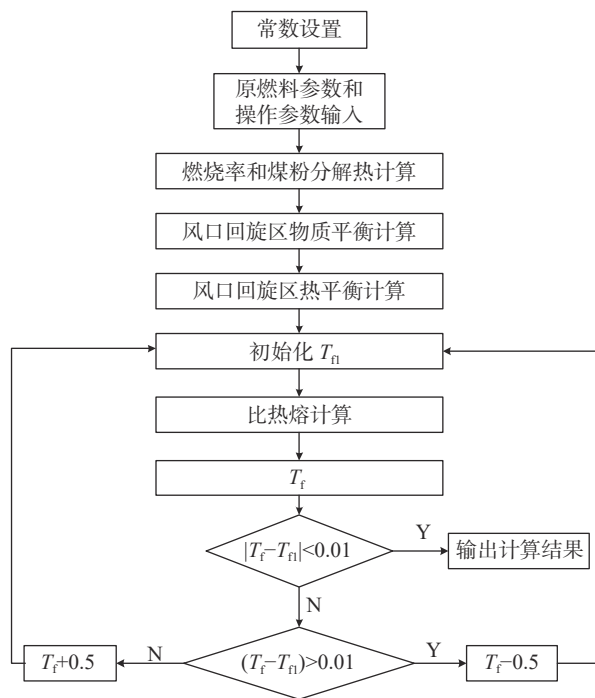


图 2 理论燃烧温度计算流程

Fig. 2 Theoretical combustion temperature calculation flowchart

2 理论燃烧温度计算及控制研究

2.1 理论燃烧温度影响规律计算

为便于与攀钢钒高炉冶炼实际情况相符,以攀钢钒 1[#]高炉为参考对象,对 1[#]高炉使用的焦炭和喷吹煤粉分别进行了 6 组取样分析,得到焦炭和喷吹煤粉的平均质量如表 2 所示,喷吹煤粉的热值如表 3 所示;对取样期间 1[#]高炉的生产指标进行统计平均,高炉相关操作参数如表 4 所示。

表 3 喷吹煤粉元素含量和发热值

Table 3 Element content and calorific value of coal injection

	C _{ad} /%	H _{ad} /%	N _{ad} /%	O _{ad} /%	低位发热值/(J·g ⁻¹)
煤粉	77.62	3.41	0.8	3.01	32 041.37

表 4 相关高炉操作参数

Table 4 Relevant blast furnace operating parameters

风量/ (m ³ ·min ⁻¹)	风温/ ℃	富氧量/ (m ³ ·h ⁻¹)	鼓风湿度/ (g·m ⁻³)	喷煤量/ (t·h ⁻¹)	焦比/ (kg·t ⁻¹)	煤比/ (kg·t ⁻¹)	煤粉温度/ ℃	煤粉燃烧率/ %	日产量/ t
3 000	1 210	3 500	9	15.8	440	110	60	80	3 350

表 5 各变量对理论燃烧温度的影响

Table 5 The influence of various variables on the theoretical combustion temperature

变量	变化幅度	T _r 变化/℃
风温	10	+6.94
煤粉预热温度	10	+0.45
喷煤比	10	-15.02
鼓风湿度	1	-4.95
煤粉燃烧率	10	+5.47
喷煤速率	1	-10.76
富氧率	1	+45.6
SiO ₂ 气化率	1	-1
喷吹煤灰分	1	-1.42
焦炭灰分	1	-2.4

注: 变量变化幅度: 风温和煤粉预热温度以 10℃ 计, 喷煤比以 10 kg/t 计, 鼓风湿度以 1 g/m³ 计, 煤粉燃烧率以 10% 计, 喷煤速率以 1 t/h 计, 其余以变化 1% 计。

在各影响因素中存在的规律特点为, 增加风口回旋区热收入或促进风口回旋区燃烧反应的影响因素项, 如风温、富氧、煤粉预热温度, 对理论燃烧温度产生正相关影响; 反之, 增加风口回旋区热支出的影响因素项, 如鼓风湿度、喷煤、SiO₂ 气化率、灰分, 对理论燃烧温度产生负相关影响; 煤粉燃烧率呈现的影响规律除外, 原因在于尽管随着煤粉燃烧率提高, (式 2) 分子项热支出量增加, 但未燃煤粉量的减少对 (式 2) 分母项燃烧产物的平均热容影响幅度高于分子项热支出影响幅度, 故呈现了随着煤粉燃烧率增加, 理论燃烧温度增加的规律。

结合表 5 中各因素在实际生产中的调控空间, 各因素易于调节、且易对理论燃烧温度进行大幅影响的顺序依次为: 富氧率、喷煤、鼓风湿度、风温、煤粉燃烧率、煤粉预热温度、灰分、SiO₂ 气化率。其中, 焦炭和煤粉的灰分, 作为不利因素, 虽然对理论燃烧温度的影响幅度小, 但灰分提高会增加高炉冶炼渣量和燃料消耗。

2.2 修正模型与传统模型计算对比

以攀钢钒 1[#]高炉数据作为计算条件, 应用式(1)

将表 2~4 中的原燃料参数和高炉操作参数带入理论燃烧温度计算模型中进行单因素变量计算, 得到的各主要参数对理论燃烧温度的影响规律和影响幅度如表 5 所示。

(2) 分别对理论燃烧温度计算, 结果如图 3 所示。传统计算模型中未考虑的因素: 未燃煤粉、灰分、SiO₂ 气化率等, 对理论燃烧温度计算值的影响达到 53~55℃, 且修正后的计算模型的单因素变化对理论燃烧温度的影响斜率低于传统模型计算结果。各钢铁企业高炉使用的理论燃烧温度范围上下限通常在 200℃ 以内, 约 50℃ 的结果偏差对理论燃烧温度的控制影响是较大的, 因而进一步综合考虑各因素对理论燃烧温度的影响后, 使得计算结果更加精确, 更符合于攀钢高钒型钒钛磁铁矿高炉冶炼生产实际。

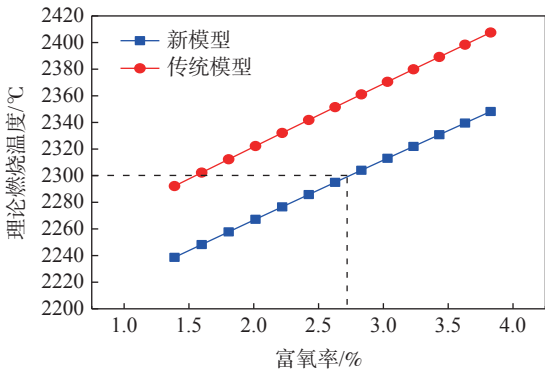


图 3 理论燃烧温度计算模型修正前后计算结果对比
Fig. 3 Calculation results of theoretical combustion temperature calculation model before and after correction

2.3 适宜的理论燃烧温度及控制

2.3.1 适宜的理论燃烧温度

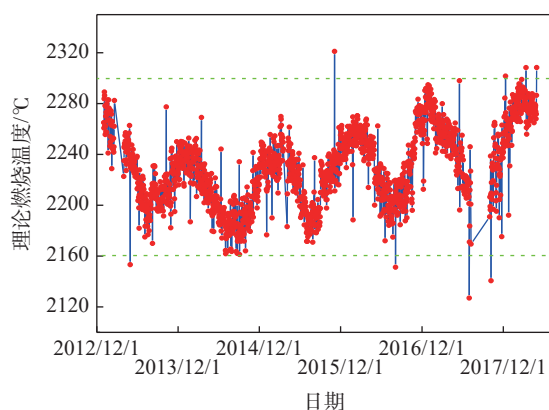
如表 6 所示, 不同钢铁企业的高炉结合自身冶炼条件和原燃料条件, 都会确定一个适宜的理论燃烧温度控制范围^[11], 理论燃烧温度控制是否得当, 直接影响高炉的稳定顺行。反之, 在构建的理论燃烧温度计算模型基础上, 代入高炉稳定顺行阶段的理论燃烧温度计算相关数据, 即可得到该高炉适宜的理论燃烧温度控制范围。

表6 各国钢铁企业理论燃烧温度控制范围

Table 6 Theoretical combustion temperature control range of steel enterprises in various countries

国家	公司	$T_f / ^\circ\text{C}$	国家	公司	$T_f / ^\circ\text{C}$
荷兰	hoogyens	2 150 ~ 2 350	德国	shwelgen	2 250 ~ 2 300
法国	索拉克	2 100 ~ 2 160	中国	宝钢	2 000 ~ 2 300
日本	福山	2 200 ~ 2 400	中国	首钢A高炉	2 165 ~ 2 365
日本	君津3 [#]	2 300 ~ 2 350	中国	首钢B高炉	2 165 ~ 2 280
日本	鹿岛3 [#]	2 400 ~ 2 450	中国	国丰1 [#]	2 100 ~ 2 300

应用本文构建的理论燃烧温度计算模型,代入2013年1月至2018年10月攀钢钒1[#]高炉炉况指标较好时的原燃料数据和操作参数计算得到的理论燃烧温度计算结果。由图4可知,1[#]高炉的适宜理论燃烧温度为2 160 ~ 2 300 $^\circ\text{C}$ 。用同样的方法,对攀钢钒其它4座高炉理论燃烧温度计算,得到的各高炉适宜理论燃烧温度控制范围分别为:2[#]高炉2 160 ~ 2 320 $^\circ\text{C}$,3[#]高炉2 160 ~ 2 310 $^\circ\text{C}$,4[#]高炉2 160 ~ 2 300 $^\circ\text{C}$,新3[#]高炉2 160 ~ 2 320 $^\circ\text{C}$ 。

图4 攀钢钒1[#]高炉理论燃烧温度变化Fig. 4 Theoretical combustion temperature change of 1[#] blast furnace of Pansteel

如图4所示,攀钢钒高炉理论燃烧温度随时间呈现出了以年度为周期的类似正弦函数波动规律。造成该现象的最主要影响因素为鼓风湿度随攀枝花气候变化呈现如图5所示的周期性变化。雨季和旱季大气湿度相差12 g/m^3 ,对理论燃烧温度的影响值接近60 $^\circ\text{C}$ 。经计算,鼓风湿度恒定在年平均值11.4 g/m^3 时,攀钢钒高炉的适宜理论燃烧温度控制范围可从2 160 ~ 2 320 $^\circ\text{C}$ 进一步精确至2 220 ~ 2 280 $^\circ\text{C}$ 范围内。

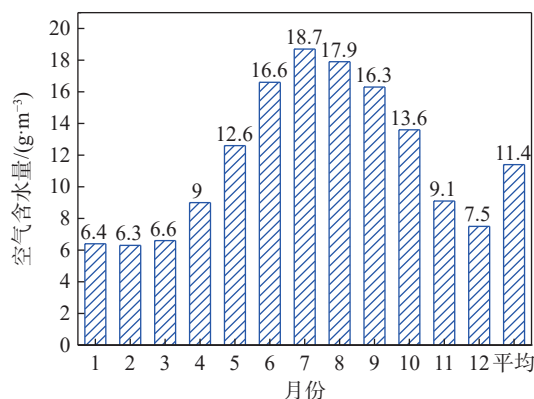


图5 攀枝花各月空气含水量统计

Fig. 5 Statistics of air moisture content in Panzhihua

同样,从图4中也可以看出,各年理论燃烧温度周期变化规律相同,但各年的理论燃烧温度上限和下限值控制仍有差别。原因在于攀钢钒高炉采用的富氧和喷煤操作调剂搭配呈现出了如图6(a)~(b)的反向变化。2013至2018年后,攀钢钒各高炉富氧率呈现先降低、后增高的趋势,在2015年达到最低值;煤比则呈现相反的变化趋势。因此,在2013年及2018年之后,攀钢钒高炉理论燃烧温度的控制上限和下限相比于2015年有所增高。

但喷煤比和富氧率本应是相辅相成的,提高富氧率有利于提高喷吹煤粉在风口前的充分燃烧率,降低未燃煤粉对钒钛磁铁矿高炉冶炼的不利影响,从而有利于提高喷煤比和优化高炉燃料结构。对图6中各高炉富氧率和喷煤比的搭配按平均值进行校正,认为平均2.0%的富氧率搭配140 kg/t 的喷煤比是较为适宜的。根据表5各因素对理论燃烧温度的影响,考虑富氧和喷煤调剂优化后,攀钢钒高炉适宜的理论燃烧温度控制范围在没有稳定鼓风湿度的情况下,应被控制在2 170 ~ 2 300 $^\circ\text{C}$,稳定鼓风湿度后,适宜的理论燃烧温度控制范围应该在2 220 ~ 2 270 $^\circ\text{C}$ 。

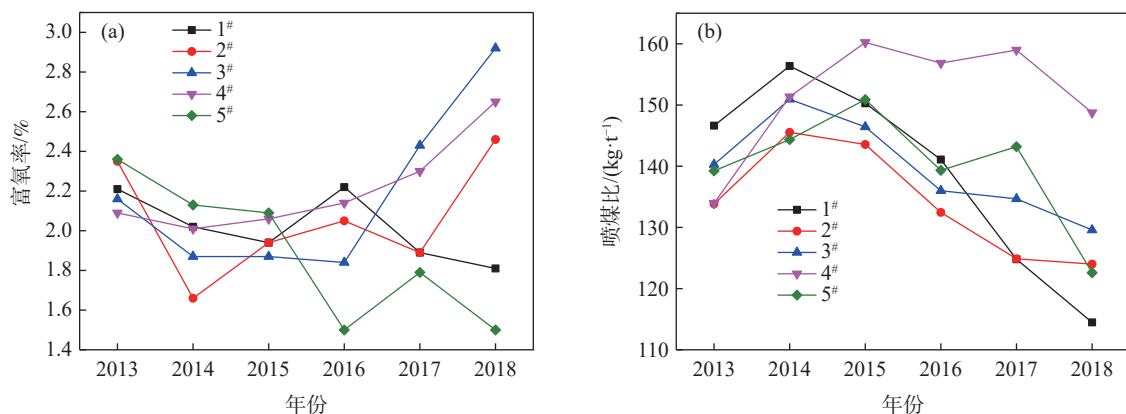


图6 攀钢钒各高炉富氧率(a)和喷煤比(b)变化

Fig. 6 Changes in oxygen enrichment rate (a) and coal injection ratio (b) of blast furnaces of Pansteel

2.3.2 适宜理论燃烧温度控制技术

实现理论燃烧温度的稳定控制,最常用的措施就是实现风温、富氧、鼓风湿度、喷煤量等措施的联动优化搭配。虽然灰分、灰中 SiO_2 气化率、煤粉有效燃烧率等会对理论燃烧温度产生影响,但自身变化幅度很小,高炉也要追求原燃料质量的稳定,因此它们不被作为调控理论燃烧温度的参数选择。

2.3.2.1 风温调剂

风温是高炉最廉价的热量来源,在热风炉能够提供,且高炉能够接受的条件下,通常尽可能使用高风温,较少对风温进行调剂。仅在炉况波动不顺的时候,停止喷煤和停止富氧后,为了防止炉缸单位时间内生成的渣铁承受的炉缸热过高,缓解风量和风压的紧张关系,会将风温下调至 $700 \sim 1\,000\text{ }^\circ\text{C}$,相应理论燃烧温度被降低至 $1\,960 \sim 2\,120\text{ }^\circ\text{C}$ 。降风温措施仍然不足以降低炉内温度时,会适当进行加湿鼓风。

理论燃烧温度受风温和鼓风湿度变化的影响如图7所示。在攀枝花,考虑早季和雨季鼓风湿度可超过 12 g/m^3 差值变化,造成近 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 的理论燃烧温度差异。在旱季恢复炉况时,为了让理论燃烧温度适宜于炉况,应在图7的对应规律基础上,适当采用更低的风温或适当加湿鼓风;相反,在雨季恢复炉况时,应充分考虑鼓风湿度分解所需热量,适当采用更高一点的风温,若加湿,应扣减大气湿度的影响值。

2.3.2.2 富氧、喷煤、鼓风湿度调剂

高富氧、大喷煤,当前已成为国内外高炉炼铁的常规强化冶炼手段,国内多数企业富氧率达到 $4\% \sim 6\%$ 范围,沙钢 $5\,800\text{ m}^3$ 高炉、韩国光阳 $4\text{ }^\circ\text{H}$ 高炉、荷兰艾默伊登等少数高炉富氧率达到 10% 以

上^[14-17]。上述企业富氧对理论燃烧温度的影响,将分别达到 228 、 $456\text{ }^\circ\text{C}$,远大于攀钢钒高炉理论燃烧温度适宜的 $160\text{ }^\circ\text{C}$ 上下限差值控制。因此,富氧率提高至一定程度,必然要与能够降低理论燃烧温度的喷煤和加湿鼓风进行配合使用。结合攀钢钒高炉生产实际和攀枝花气候条件,以表7中富氧、喷煤和鼓风湿度的高低搭配能够代表攀钢钒高炉的下部调剂控制范围。

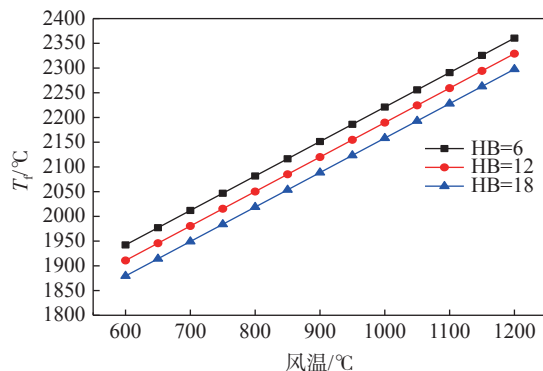


图7 风温对理论燃烧温度的影响

Fig. 7 The influence of hot-blast temperature on theoretical combustion temperature

风温稳定在 $1\,200\text{ }^\circ\text{C}$ 时,在表7的搭配方案下,富氧率变化对理论燃烧温度的影响见图8。理论燃烧温度要维持在 $2\,160 \sim 2\,320\text{ }^\circ\text{C}$ 适宜范围内,在旱季,高炉喷煤比低于 110 kg/t ,富氧率不宜超过 2.7% ;喷煤比达到 135 kg/t 时,开始存在富氧率下限要求;喷煤比超过 160 kg/t ,富氧率在 4.35% 以下,可以不用考虑其它调剂措施,富氧率进一步提高而喷煤比降低时则要考虑加湿鼓风。在雨季,高炉喷煤比低于 110 kg/t ,富氧率不宜超过 4.6% ,但也不宜低于 1.1% ;喷煤比超过 160 kg/t ,富氧率在 6.0% 以下,可

以不用考虑其它调剂措施,但富氧率不宜低于2.7%,否则可能出现理论燃烧温度过低,炉缸热量补充不足。若理论燃烧温度控制范围进一步缩小,喷煤比和富氧率的搭配范围、需要使用加湿鼓风的范围,也将在图8基础上进一步收窄。

表7 富氧、喷煤、鼓风湿度搭配方案

Table 7 Matching scheme for oxygen enrichment rate, coal injection, and air blast humidity

富氧	喷煤/(kg·t ⁻¹)	鼓风湿度(HB)/(g·m ⁻³)
高	高(160)	高(18)
高	高(160)	低(6)
高	低(110)	低(6)
低	高(160)	高(18)
低	低(110)	高(18)
低	低(110)	低(6)

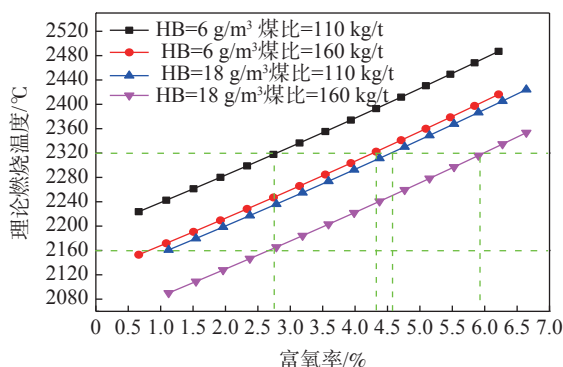


图8 富氧对理论燃烧温度的影响

Fig. 8 The influence of oxygen enrichment rate on theoretical combustion temperature

喷煤比对理论燃烧温度的影响见图9。富氧(fO_2)在2.5%范围内,不论鼓风湿度为6 g/m³还是18 g/m³,即不论是在旱季还是雨季,攀钢钒高炉喷煤比在100~160 kg/t范围内变动,理论燃烧温度基本仍处于2160~2320℃范围内。在富氧率超过3.5%以后,在旱季,喷煤比≤130 kg 容易导致理论燃烧温度超过上限值,要加湿鼓风,在雨季则不存在类似问题。富氧率越高,越能够促进煤粉在高炉风口前的有效燃烧率,从而进一步促进高炉理论燃烧温度的提高。

鼓风湿度调剂的手段主要有脱湿鼓风和加湿鼓风。图10为攀钢钒高炉在不同鼓风湿度和不同喷煤比条件下,将理论燃烧温度控制在2160~2320℃适宜范围内对应的富氧率上限和下限值。在对应喷煤比下,富氧率超过上限时,需要考虑采取加湿鼓风,富氧率低于下限值时,则需要考虑采取脱湿鼓风。

对于攀钢钒高炉,平均喷煤比在120~140 kg/t,短期有达到160 kg/t的能力,结合攀枝花气候条件变化,在富氧率<4.5%范围内,通过富氧和喷煤的相互调剂便可满足理论燃烧温度合理控制的需求,无需加湿鼓风。更为重要的是通过脱湿鼓风,消除季节变换引起的大气湿度变化对理论燃烧温度和炉缸热状态的波动影响。

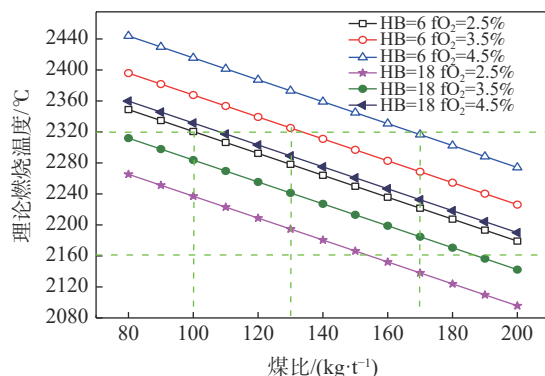


图9 煤比对理论燃烧温度的影响

Fig. 9 The influence of coal injection ratio on theoretical combustion temperature

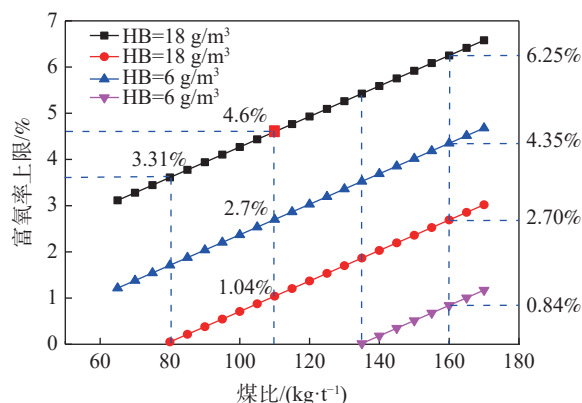


图10 不同鼓风湿度和喷煤比对应的富氧上限

Fig. 10 Upper limits of oxygen enrichment corresponding to different blowing humidity and coal injection ratios

2.3.3 理论燃烧温度经验公式回归

为了更好地将理论燃烧温度计算应用于高炉生产现场,为高炉炼铁人员及时反馈下部调剂效果,理论计算模型涉及的参数项过多,计算过程复杂,高炉计算机控制系统无法同时获得所有参数条件,尽管理论计算结果精确,但难以在高炉上实现在线计算和应用。将理论燃烧温度回归成关于风量、风温、富氧、喷煤、鼓风湿度等少数主要影响参数的经验公式,同时兼顾计算准确度,则可大幅降低理论燃烧温度在线计算应用的难度。

结合理论燃烧温度计算模型和攀钢钒各高炉历史生产数据和原燃料数据, 对理论燃烧温度进行了计算, 以最小二乘法将理论燃烧温度回归成关于风温 T_B (°C)、鼓风湿度 H_B (g/m³)、富氧与鼓风量比值 V_{O_2} (m³/m³)、喷煤量与鼓风量比值 V_{Coal} (kg/m³) 的一次多项式函数 $T_f=f(T_B, H_B, V_{O_2}, V_{Coal})$, 得到适用于各高炉的经验计算公式 4。

$$T_f = 1\,555.470 + 0.697T_B - 5.234H_B + 3\,385.625V_{O_2} - 1\,818.404V_{Coal} \quad R^2 = 0.998 \quad (4)$$

回归公式与模型理论计算结果的回归拟合度 R^2 高于 0.9, 拟合度较高。应用各高炉回归方程和历史数据进行理论燃烧温度计算, 并与模型理论计

算结果进行做差比较, 差值均在 ± 5 °C 范围内, 精度完全能够满足高炉生产使用。

2.4 应用情况

在理论燃烧温度经验计算公式(式 4)的基础上, 经过编程, 于 2018 年 7 月开始逐步应用于攀钢钒 1[#]、2[#]、3[#]、新 3[#]座高炉生产操作系统, 2019 年应用于 4[#]高炉生产操作系统, 为高炉生产操作人员和管理人员提供理论燃烧温度的瞬时计算值、班平均值、天平均值, 以及历史曲线, 形成的控制技术为高炉操作人员实现下部调剂精准控制提供了有效参考。如表 8 所示, 理论燃烧温度上线应用后, 促进了攀钢钒各高炉产量和燃料消耗指标优化。

表 8 2018 年理论燃烧温度上线运行前后攀钢钒高炉主要技术经济指标

Table 8 Main technical and economic indicators of blast furnace before and after the theoretical combustion temperature was put into operation in 2018 at Pansteel

高炉	利用系数/[t·(m ³ ·d ⁻¹)]			燃料比/(kg·t ⁻¹)		
	1~6月	7~12月	比较	1~6月	7~12月	比较
1 [#]	2.713	2.745	0.032	566.1	558.0	-8.1
2 [#]	2.711	2.816	0.105	566.1	556.9	-9.2
3 [#]	2.695	2.680	-0.014	566.2	561.2	-5.0
新3 [#]	2.179	2.315	0.136	580.4	573.6	-6.8

3 结论

1) 结合理论燃烧温度定义和风口回旋区的实际情况, 综合考虑煤粉燃烧率、灰分中 SiO₂ 气化还原等影响因素, 对传统理论燃烧温度计算模型进行修正, 经计算对比, 被传统计算模型忽略的因素对理论燃烧温度的计算结果影响达到 53~55 °C。

2) 应用修正后计算模型计算分析的结果表明, 结合调控空间和难易程度, 富氧率、喷煤比、鼓风湿度、风温、煤粉燃料率、煤粉预热温度、灰分、SiO₂ 气化率对理论燃烧温度的影响程度依次递减。攀钢钒高炉适宜的理论燃烧温度在 2 160~2 320 °C, 鼓风湿度恒定的情况下, 理论燃烧温度适宜的控制范

围在 2 220~2 280 °C。

3) 对于攀钢钒高炉生产, 喷煤比低于 110 kg/t, 在旱季易出现理论燃烧温度超上限值; 富氧率在 4.5% 以内, 可通过喷煤比和富氧的合理搭配将理论燃烧温度控制在适宜范围内, 无需使用加湿鼓风, 但富氧率超过 3.5% 时, 应在现有基础上进一步提高喷煤比。

4) 通过回归经验公式, 在保证计算精度的前提下, 降低了理论燃烧温度在攀钢钒高炉上的应用难度; 经在攀钢钒 1[#]~新 3[#]五座高炉操作系统上在线计算和应用, 促进了攀钢钒高炉产量和燃料消耗指标优化。

参考文献

- [1] Wu Shengli, Yu Xiaobo, Chen Hui, *et al.* Calculation of theoretical flame temperature in a blast furnace[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 12(30): 1432-1438.
(吴胜利, 余晓波, 陈辉, 等. 高炉理论燃烧温度的计算 [J]. 北京科技大学学报, 2008, 12(30): 1432-1438.)
- [2] Na Shuren. Analysis of ironmaking calculation[M]. Beijing, Metallurgical Industry Press, 2010.
(那树人. 炼铁计算辨析 [M]. 北京, 冶金工业出版社, 2010.)

- [3] Sun Lianyou, Xu Shugang. The calculation of the theoretical burning temperature in front of the tuyere[J]. Bengang Technology, 2008(4): 8-10.
(孙连友, 徐书刚. 风口前理论燃烧温度的简易计算 [J]. 本钢技术, 2008(4): 8-10.)
- [4] Xu Shugang, Tian Hui. The calculation on line of theoretical burning temperature in front of the tuyere[J]. Bengang Technology, 2000(4): 7-8.
(徐书刚, 田辉. 风口前理论燃烧温度的在线计算 [J]. 本钢技术, 2000(4): 7-8.)
- [5] Zhang Jianliang, Yang Tianjun, Gao Zhengkai, *et al.* A new method to determine the decomposition heat of coal during PCI for BF[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2001, 4(23): 308-310.
(张建良, 杨天钧, 高征铠, 等. 高炉喷煤过程煤粉分解热确定的新方法 [J]. 北京科技大学学报, 2001, 4(23): 308-310.)
- [6] Zhang Jianliang, Qiu Jiayong, Guo Hongwei. Research of theoretical flame temperature in blast furnace tuyere[J]. Iron and Steel, 2012, 7(47): 10-14.
(张建良, 邱家用, 国宏伟. 高炉风口区理论燃烧温度的研究 [J]. 钢铁, 2012, 7(47): 10-14.)
- [7] Zhang Er'hua, Wu Keng, Wan Peng. Effect of SiO_2 reduction on the theoretical flame temperature before the tuyere in a blast furnace[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 11(32): 1406-1411.
(张二华, 吴铿, 万鹏. SiO_2 还原对高炉风口前理论燃烧温度的影响 [J]. 北京科技大学学报, 2010, 11(32): 1406-1411.)
- [8] Liu Chengsong, Li Jingshe, Tang Haiyan. Improvements on calculation model of theoretical combustion temperature in the tuyere raceway of BF[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2015, 3(36): 392-396.
(刘成松, 李京社, 唐海燕. 高炉风口理论燃烧温度计算模型的改良 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 3(36): 392-396.)
- [9] Dai Bing, Zhang Jianliang, Su Dongxue. Development and practice of theoretical combustion temperature calculation model of blast furnace[J]. Metallurgical Industry Automation, 2012, 3(36): 54-57.
(代兵, 张建良, 苏东学. 高炉理论燃烧温度计算模型的开发与实践 [J]. 冶金自动化, 2012, 3(36): 54-57.)
- [10] Wang Guangwei, Zhang Jianliang, Su Buxin. Calculation of theoretical combustion temperature in a blast furnace with consideration of chemical equilibrium[J]. Iron and Steel, 2012, 4(47): 9-13.
(王广伟, 张建良, 苏步新. 考虑化学反应平衡的理论燃烧温度计算 [J]. 钢铁, 2012, 4(47): 9-13.)
- [11] Li Zhaoyi. Analysis of the theoretical flame temperature in the front of BF tuyeres[J]. Baosteel Technology, 2011(4): 5-7.
(李肇毅. 高炉风口理论燃烧温度分析 [J]. 宝钢技术, 2011(4): 5-7.)
- [12] Xu Hui, Zou Zongshu. Some understanding of theoretical combustion temperature calculation[J]. Ironmaking, 2008, 27(4): 54.
(徐辉, 邹宗树. 对理论燃烧温度计算的一点认识 [J]. 炼铁, 2008, 27(4): 54.)
- [13] Chen Huabao, Chen Linsen, Xiao Hongtao. Effect of ultra-high oxygen enrichment on theoretical combustion temperature[J]. Research on Iron & Steel, 2011, 4(39): 1-4.
(陈化宝, 陈林森, 肖红涛. 超高富氧对理论燃烧温度的影响 [J]. 钢铁研究, 2011, 4(39): 1-4.)
- [14] Guo Honglie, Huang Junjie. Practice of oxygen rich coal injection in Shougang Jingtang 5 500 m^3 blast furnace[J]. Ironmaking, 2016, 6(35): 30-32.
(郭宏烈, 黄俊杰. 首钢京唐 5 500 m^3 高炉富氧喷煤实践 [J]. 炼铁, 2016, 6(35): 30-32.)
- [15] Chen Lingkun, Li Xiangwei, Lu Longwen. Efficient smelting practice of No. 8 blast furnace at Wuhan Iron and steel group[J]. Ironmaking, 2016, 5(35): 1-7.
(陈令坤, 李向伟, 陆隆文, 等. 武钢 8 号高炉高效冶炼实践 [J]. 炼铁, 2016, 5(35): 1-7.)
- [16] Ren Yanjun, Dong Yansheng, Wang Weidong, *et al.* Economic analysis of oxygen enrichment rate in blast furnace of Shagang[J]. Ironmaking, 2014, 6(33): 57-59.
(任彦军, 董演生, 王卫东, 等. 沙钢高炉富氧率经济性分析 [J]. 炼铁, 2014, 6(33): 57-59.)
- [17] Bakker T, Tijhuis G J, Bol L C G M. Developments of operating points of the Umuiden blast furnaces[J]. World Iron and Steel, 2014, 4: 1-8.
(Bakker T, Tijhuis G J, Bol L C G M. 艾莫伊登高炉操作要点的发展 [J]. 世界钢铁, 2014, 4: 1-8.)