

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.02.005

燃料发热量的高炉理论燃烧温度计算模型

张英伟,程树森

(北京科技大学 冶金与生态工程学院,北京 100083)

摘要:对高炉风口前理论燃烧温度进行了修正,建立了基于燃料(焦炭和煤粉)发热量的计算模型,即把燃料的不完全燃烧所放出的热量转化为燃料完全燃烧所放出的热量与燃料不完全燃烧的热损失之差。最后分析了煤种、煤比、富氧率等因素对理论燃烧温度的影响。

关键词:高炉;理论燃烧温度;发热量

中图分类号:TF573.1

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2015)02-0033-06

A model for calculation of theoretical combustion temperature in blast furnace based on fuel calorific value

ZHANG Yingwei, CHENG Shusen

(School of Metallurgical and Ecological Engineering,

University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P.R.China)

Abstract: In this paper, some modifications on theoretical combustion temperature are made, and a model for calculation of theoretical combustion temperature based on the fuel (coke and coal) calorific value is developed. In the model, the incomplete combustion heat that is released by the fuel can be calculated by difference between the complete combustion heat and the heat loss because of incomplete combustion. Finally, the influence of some factors, such as coal species, coal ratio, oxygen enrichment ratio, on the theoretical combustion temperature are analyzed.

Key words: blast furnace; theoretical combustion temperature; calorific value

高炉炉缸的热状态对高炉的顺行和铁水质量有重要影响,目前热状态的判断主要有铁水硅含量分析、炉热指数和风口前理论燃烧温度等指标,但硅含量分析化验时间较长,具有滞后性^[1];炉热指数计算较为复杂,需要求解非线性方程组^[2],实际上直接计算风口前理论燃烧温度更为方便,历来受到操作者的重视。前人的理论燃烧温度计算模型一般忽略灰分的升温 and 熔化耗热同时,那树人^[3]教授也指出,热空气的比热容随温度的变化不能忽略,而前人模型中大多未考虑这一因素。鉴于此,笔者系统地分析了灰分升温耗热、鼓风比热容变化等因素,并将燃料发热量的概念引入计算模型中,建立了基于燃料发热量的高炉理论燃烧温度计算模型。

1 计算理论燃烧温度的综合模型

1.1 高炉风口前理论燃烧温度的概念

在燃烧学中,理论燃烧温度的定义为,假设化学反应物完全燃烧,反应前后系统的动能和势能忽略不计,且不对外做有用功,如果系统绝热且燃烧产生的热量全部用于加热燃烧产物,此时燃烧产物所能达到的最高

收稿日期:2014-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.61271303)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(61271303).

作者简介:张英伟(1987-),男,主要从事冶金与生态方向的研究,(Tel)18811349070;(E-mail):zhangyingwei@yeah.net。

温度即为理论燃烧温度^[4]。在高炉风口燃烧带,燃料发生不完全燃烧,计算其理论燃烧温度时,需考虑不完全燃烧的热损失。前人的高炉风口前理论燃烧温度(以下简称“理论燃烧温度”)的热支出项主要有燃料和鼓风中物理水分解热、煤粉热解耗热以及煤气的升温耗热,热收入项为碳元素不完全燃烧放热、高温焦炭的显热、鼓风的显热,燃烧产物为煤气(主要是 H_2 、 N_2 和 CO),前人的计算公式如式(1)

$$t_f = \frac{Q_c + Q_b + Q_{ck} - Q_{dec} - Q_w}{\bar{C}_m^{CO}(V_{CO} + V_{N_2}) + \bar{C}_m^{H_2}V_{H_2}}, \quad (1)$$

其中: t_f 为理论燃烧温度; Q_c 为燃料中碳元素生成 CO 所放出的热量; Q_b 为鼓风显热; Q_{ck} 为高温焦炭显热; Q_{dec} 为煤粉热解耗热; Q_w 为鼓风和煤粉中物理水分解耗热; \bar{C}_m^{CO} 为 CO 的平均热容(CO 与 N_2 的比热很接近); $\bar{C}_m^{H_2}$ 为 H_2 的平均热容; V_{N_2} 为煤气中 N_2 的体积; V_{CO} 为煤气中 CO 的体积; V_{H_2} 为煤气中 H_2 的体积。在计算中,一般取 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 为基准温度。

随着对高炉内物理化学过程研究的深入,许多学者对理论燃烧温度进行了修正和改进,主要在以下几点:1)考虑燃烧后灰分的升温,即把燃料中灰分作为燃烧产物^[5-6];2)考虑温度对气体热容的影响^[7-8];3)考虑灰分在风口前的熔化耗热^[9];4)考虑灰分中 SiO_2 气化反应(即 $SiO_2 + C = SiO(g) + CO$)的热效应^[10-11];5)考虑煤粉的显热^[1]。

1.2 计算理论燃烧温度的综合模型

1.2.1 鼓风平均热容的计算

气体比热一般是绝对温度的函数,其通式为 $C_p = a + bT + cT^{-2}$,其中 a 、 b 、 c 为常数。在前人模型中,为简化计算,常根据经验选取气体的平均比热,文献[8]中采用积分-平均的方法,得到了气体平均比热,但这种处理需要迭代计算理论燃烧温度。为此,对气体平均比热进行了分析和简化。

设单位质量的气体(如 $1\text{ mol } H_2$)从 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 升到 $t\text{ }^\circ\text{C}$ 所吸收的热量(即“比焓”)为 C_m ,则气体比焓的准确表达式为

$$C_m = \int_0^{t+273} 73C_p dt. \quad (2)$$

根据文献[3],当理论燃烧温度在 $2\ 000\sim 2\ 300\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内时,风口区高炉煤气中各气体成分比焓的近似表达式为

$$C'_m = 0.5bt_f^2 + (a + 273b)t_f + 3.22 \times 10^{-3}c, \quad (3)$$

式中: a 、 b 、 c 为气体比热通式中的系数, t_f 为理论燃烧温度($^\circ\text{C}$),

同理,当鼓风温度在 $1\ 000\sim 1\ 400\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内时,鼓风中各气体成分的比焓近似表达式为

$$C'_{mb} = 0.5bt_b^2 + (a + 273b)t_b + 2.93 \times 10^{-3}c, \quad (4)$$

式中: t_b 为鼓风温度($^\circ\text{C}$),其他符号同式(3),式(3)和式(4)主要的区别在于常数项。

经计算,当鼓风温度在 $1\ 000\sim 1\ 400\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内时,由式(4)得到的比焓的相对误差在 10^{-3} 以内。类似地,当理论燃烧温度在 $2\ 000\sim 2\ 300\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内时,由式(3)得到的煤气比焓的相对误差也在 10^{-3} 以内。这表明这种简化方法具有较高的精度。

1.2.2 燃料不完全燃烧的反应热计算

本模型从燃料发热量的角度进行了改进,原因是:发热量是表征燃料燃烧热的重要参数,一般地,煤的发热量与其灰分含量、水分含量、氧含量呈负相关,与碳含量、氢含量呈正相关。另外,煤的风化程度也会对发热量产生显著影响。因此,发热量更能反映燃料中内部因素(尤其是灰分)和外界因素(如堆放时间)的影响^[12]。在高炉风口,由于煤粉和焦炭进行的是不完全燃烧,理论上讲,采用煤粉和焦炭的不完全燃烧发热量,来计算燃料的不完全燃烧的反应热更为准确,但由于缺少这方面数据,本模型采用如下简化处理方法:将燃料(焦炭和煤粉)的不完全燃烧反应热 Q_{fuel} 转化为燃料的完全燃烧反应热 Q_{com} 与燃料不完全燃烧的热损失 Q_{inc} 的差值^[13],即 $Q_{\text{fuel}} = Q_{\text{com}} - Q_{\text{inc}}$,其中 Q_{inc} 为燃料完全燃烧产物 CO_2 分解和 $H_2O(g)$ 分解的热效应之和。

1.2.3 理论燃烧温度模型

根据前人的研究结果,结合高炉实际,本研究主要在以下几方面进行了修正和完善,1)对鼓风比焓进行了分析和简化;2)考虑了煤粉的显热;3)考虑了灰分中 SiO_2 的气化耗热;4)将灰分作为燃烧产物,考虑了灰分的熔化吸热;5)引入发热量参数,从而使燃料的不完全燃烧热转化为燃料完全燃烧所放出的热量与其不完全燃烧的热损失之差,其理论燃烧温度表达式为

$$t_f = \frac{Q_c + Q_b + Q_{ck} + Q_{ca} - Q_{inc} - Q_w - Q_{SiO} - Q_{fu}}{\overline{C}_m^{CO}(V_{CO} + V_{N_2}) + \overline{C}_m^{H_2}V_{H_2} + \overline{C}_m^{SiO}V_{SiO} + \overline{C}_a^1n_a^1 + \overline{C}_a^2n_a^2}, \quad (5)$$

经整理得

$$Q_c + Q_b + Q_{ck} + Q_{ca} - Q_{inc} - Q_w - Q_{SiO} - Q_{fu} = Q_g + Q_a + Q'_{SiO}. \quad (6)$$

以下对式(5)、(6)中各项分别进行说明。需要说明的是,本模型是以1 t生铁为基准。

1) t_f 为理论燃烧温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

2) 燃料(焦炭和煤粉)完全燃烧所放出的热量 Q_c , 单位为 kJ。其计算公式为

$$Q_c = m_{\text{coke}}Q_1 + \eta m_{\text{coal}}Q_2, \quad (7)$$

式中: Q_1 、 Q_2 分别为焦炭和煤粉的低位空气干燥基发热量(单位均为 kJ/kg); m_{coke} 、 m_{coal} 分别为煤比和焦比; η 为煤粉的燃尽率; Q_2 的计算公式^[12]为

$$Q_2 = 6\,984 + 275C_{\text{ad}} + 805.7H_{\text{ad}} - 142.9O_{\text{ad}} + 60.7S_{\text{ad}} - 74.4A_{\text{ad}} - 129.2M_{\text{ad}}, \quad (8)$$

式中: C_{ad} 、 H_{ad} 、 O_{ad} 、 S_{ad} 、 A_{ad} 、 M_{ad} 分别为 C 元素、H 元素、O 元素、S 元素、灰分和水分的含量(%)。

3) 鼓风显热 Q_b , 单位为 kJ。将单位质量的鼓风比焓 C_m 换算为单位体积的比焓, 记为 C_v , 则鼓风显热可表示为

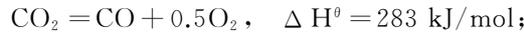
$$Q_b = C_v^{N_2}V_b^{N_2} + C_v^{O_2}V_b^{O_2}, \quad (9)$$

式中: $V_b^{N_2}$ 、 $V_b^{O_2}$ 分别为鼓风中 N_2 和 O_2 的体积, 由式(4)知, 鼓风显热为鼓风温度的二次函数。

4) 高温焦炭的显热 Q_{ck} , 单位为 kJ。设焦炭进入燃烧带的温度为 $1\,500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。焦炭中每 kg 碳元素的比焓为 $4.18 \times 550\text{ kJ/kg}$ 。

5) 煤粉的显热 Q_{ca} , 单位为 kJ。

6) 燃料(焦炭和煤粉)不完全燃烧造成的热损失(相对于完全燃烧) Q_{inc} , 单位为 kJ。这部分热损失主要是燃烧产物 CO_2 和 $H_2O(g)$ 的分解耗热, 其反应为



所以, $Q_{inc} = n_C \Delta H_1 + 0.5n_H \Delta H_2$ 。其中: n_C 、 n_H 分别为燃料中 C 和 H 元素的物质的量, ΔH_1 、 ΔH_2 分别为 CO_2 和 H_2O 的分解热。

7) 鼓风中物理水分解热 Q_w , 单位为 kJ。每 m^3 水蒸气分解耗热为 $q = 10\,874\text{ kJ/m}^3$, 则分解热为 $q\varphi V_b$, 其中: φ 为鼓风中水分的体积分数, V_b 为鼓风体积(m^3)。

8) SiO_2 气化生成 SiO 的反应耗热 Q_{SiO} , 根据相关数据, 在温度高于 $1\,500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, SiO_2 的还原是逐级进行的, 且 C 还原 SiO_2 生成 SiO 较为困难, 该反应主要发生在风口前的高温区^[14]。根据文献^[10], 每 mol SiO_2 的气化耗热为 687.3 kJ/mol 。

9) 液态灰分(含焦炭中的灰分和煤粉中灰分, 下同)的升温 and 熔化吸热 Q_{fu} , 单位为 kJ。燃料灰分的主要成分为 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 和 MgO , 忽略其他微量成分, 则每 mol 液态灰分的升温 and 熔化吸热为

$$q_{fu}^i = \overline{C}_a^i t_f + \Delta H_{fu}^i \quad (i=1\text{ 表煤粉灰分}, i=2\text{ 表焦炭灰分}), \quad (10)$$

式中: \overline{C}_a^i 为灰分的平均比热, kJ/mol; ΔH_{fu}^i 为灰分的平均熔化焓, 其计算公式为 $\Delta H_{fu}^i = \sum x_j \Delta_j H_{fu}$ (j 分别为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO), 其中: x_j 为灰分中组分 j 的摩尔分数, $\Delta_j H_{fu}$ 为组分 j 的熔化焓, 则液态灰分升温 and 熔化吸热为

$$Q_{fu} = a \sum \frac{m_i}{M_i} q_{fu}^i \quad (i=1\text{ 表示煤粉灰分}, i=2\text{ 表示焦炭灰分}). \quad (11)$$

10) 煤气升温吸热量 Q_g , 单位为 kJ。其计算公式为

$$Q_g = [\overline{C}_m^{CO}(V_{CO} + V_{N_2}) + \overline{C}_m^{H_2}V_{H_2}]t_f, \quad (12)$$

式中: \overline{C}_m^{CO} 和 $\overline{C}_m^{H_2}$ 分别为 CO 和 H_2 的平均比热(注: CO 和 N_2 的比热很接近), V_{CO} 、 V_{N_2} 、 V_{H_2} 分别为 CO 、 N_2 、 H_2 的体积。将 C_m 换算为单位体积的比焓, 记为 C_v , 则 Q_g 可整理为式(11), 显然是理论燃烧温度的二次函数,

$$Q_g = C^{CO}(V_{CO} + V_{N_2}) + C_{H_2}V_{N_2}. \quad (13)$$

11) 固态灰分升温吸热量 Q_a , 单位为 kJ。其计算公式为 $Q_a = t_f(1-a) \sum \overline{C}_a^i n_a^i$ ($i=1$ 表煤粉灰分, $i=2$ 表焦炭灰分), 单位为 kJ, 其中, n_a^i 为灰分的物质的量。

12) 气体 SiO 的升温耗热 $Q'_{\text{SiO}} = \bar{C}_m^{\text{SiO}} V_{\text{SiO}} t_f$ 其中, \bar{C}_m^{SiO} 为 SiO 的平均比热, V_{SiO} 为 SiO 的体积。因气态 SiO 的比热也符合气体比热通式, 其升温耗热与式(9)类似, 不再赘述。

综上, 将相关数据代入式(6), 可得到一个关于理论燃烧温度的一元二次方程, 利用求根公式即可得到理论燃烧温度。

2 结果与讨论

2.1 两种模型计算结果的比较

本模型计算中, 主要的物性参数和生产参数^[9,15]如表 1、表 2。其他条件为: 鼓风温度为 1 100 ℃、富氧率为 1.9%、鼓风湿度为 1%、铁水含碳量为 4.5%、焦比为 430 kg/t HM、煤比为 97 kg/t HM、灰分熔化率为 50%。两种方法的计算结果如表 3。

由表 3 可知, 对于京西煤和杜尔坪煤, 本模型得到的理论燃烧温度均高于前人模型。其原因在于: 1) 本模型考虑了灰分的升温吸热和熔化吸热等因素; 2) 本模型中引入了发热量, 这一概念更能体现煤粉中各种元素(如 C、H、O、N、S)的热效应及其贡献。值得注意的是, 在相同条件下, 本模型得到的京西煤理论燃烧温度低于杜尔坪煤, 而京西煤的发热量大于杜尔坪煤, 这可能是由于采用相同的煤粉置换比(二者置换比均为 0.8)所造成的。

表 1 焦炭成分(质量分数/%)
Table 1 Coke composition(mass fraction/%)

固定碳	灰分(13.66)							挥发分(0.99)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	FeS	P ₂ O ₅	CO ₂	CO	CH ₄	H ₂	N ₂	H	N	S
83.83	6.36	5.42	4.48	0.12	0.85	0.03	0.01	0.10	0.65	0.10	0.10	0.04	0.70	0.27	0.55

表 2 煤粉的成分(质量分数/%)
Table 2 Coal composition(mass fraction/%)

煤种	工业分析				元素分析				
	水分	灰分	挥发分	固定碳	C	H	O	N	S
京西煤	2.8	14.24	4.48	78.48	79.40	1.53	0.98	0.85	0.18
杜尔坪煤	1.05	18.95	13.99	66.01	71.58	3.43	2.64	1.16	1.19

2.2 煤比对理论燃烧温度的影响

其他参数不变, 考虑煤比的变化, 煤比变化的前提是综合焦比不变, 置换比为 0.8, 则煤比对理论燃烧温度的影响如图 1 和图 2 所示。对比图 1 和图 2 可知, 高炉理论燃烧温度与煤比的变化趋势与煤种密切相关。对于京西煤, 理论燃烧温度随煤比的增加而降低, 但降低幅度较小, 即煤比增加 10 kg, 理论燃烧温度降低 0.8 ℃。对于杜尔坪煤, 理论燃烧温度变化趋势刚好相反, 即煤比增加 10 kg, 理论燃烧温度增加 2.25 ℃。总体上, 本模型可以体现煤种对理论燃烧温度的影响, 但煤比对理论燃烧温度的

影响较为温和, 而且本模型的结果均高于前人模型的结果。由图 1 和图 2 也可以发现, 煤比增加 10 kg, 前人模型得到的理论燃烧温度均降低 6.6 ℃, 未体现煤种的影响。

2.3 富氧率对理论燃烧温度的影响

其他变量不变, 煤种采用京西煤, 分析富氧率对理论燃烧温度的影响, 结果如图 3, 由图可知, 相同条件下, 富氧率每提高 1%, 本模型得到的理论燃烧温度提高 32.9 ℃, 这一结果与陈化宝等^[8]人的研究结果相吻合。富氧率提高 1%, 前人模型的结果将提高 38.3 ℃, 出现这一差异的原因在于; 富氧鼓风后, 产生的煤气量减少, 与前人模型相比, 本模型中燃烧产物增加了灰分, 在同样的热收入下, 煤气升温幅度将减小。

表 3 两种模型计算结果的比较
Table 3 the results comparison for both models

煤种	低位发热量/ (10 ⁷ J/kg)	理论燃烧温度/℃	
		本模型	前人模型
京西煤	2.85	2 239	2 211
杜尔坪煤	2.75	2 251	2 194

注: 煤粉的低位发热量计算采用的是式(7)

2.4 灰分熔化率对理论燃烧温度的影响

其他条件不变,考虑灰分熔化率对理论燃烧温度的影响,结果如图 4,前人模型并未考虑灰分的影响,理论燃烧温度不随灰分熔化率变化。在本模型中,理论燃烧温度随灰分熔化率的增大而降低,灰分熔化率每提高 10%,理论燃烧温度约降低 4.5 °C,这一结果与文献[8]的结果一致,在灰分熔化率为 0 和 100%的情况下,两者的理论燃烧温度相差 45 °C,这也表明,灰分熔化率对理论燃烧温度的影响不可忽略。

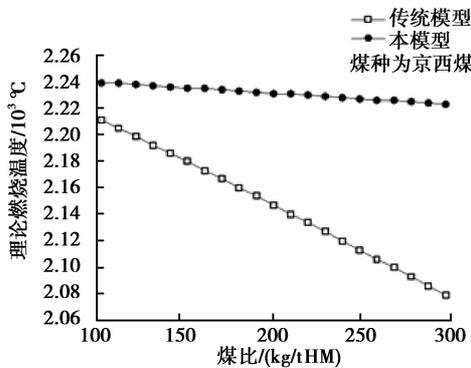


图 1 煤比对理论燃烧温度的影响(京西煤)

Fig.1 effect of coal ratio on theoretical combustion temperature(Jingxi coal)

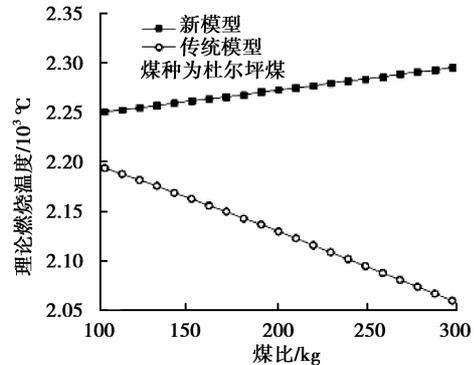


图 2 煤比对理论燃烧温度的影响(杜尔坪煤)

Fig.2 effect of coal ratio on theoretical combustion temperature(Duerping coal)

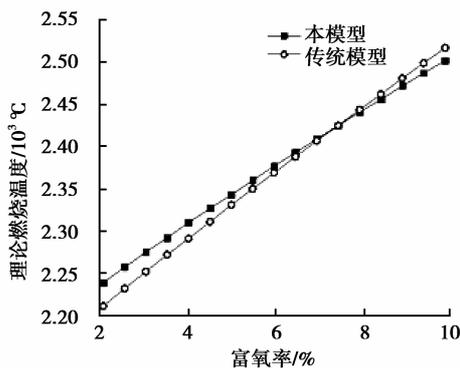


图 3 鼓风富氧率对理论燃烧温度的影响

Fig.3 effect of oxygen enrichment ratio on theoretical combustion temperature

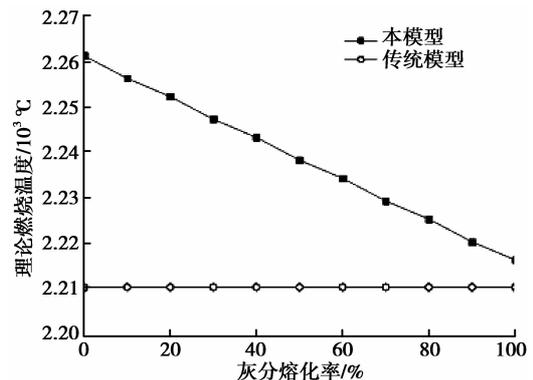


图 4 灰分熔化率对理论燃烧温度的影响

Fig.4 effect of ash's fusion ratio on theoretical combustion temperature

2.5 鼓风温度对理论燃烧温度的影响

其他条件不变,考虑鼓风温度对理论燃烧温度的影响,结果如图 5。由图可知,理论燃烧温度随鼓风温度的升高而升高,这主要是由于高风温为燃烧带入了更多的显热,从而使理论燃烧温度得到提高,进一步计算得知,风温每提高 100 °C,对于本模型,其理论燃烧温度提高约 69 °C,对于前人模型,其理论燃烧温度提高约 76 °C。这一差别主要是由于物质比热随温度变化和灰分升温熔化耗热引起的。

3 结 论

1)根据理论燃烧温度的概念,对理论燃烧温度进行了修正,其主要的修正项有:①考虑了燃料灰分的熔化吸热和固态灰分的升温耗热;②对煤气和鼓风的平均比热进行了分析和简化;③考虑了 SiO₂ 在风口前的气化耗热;④考虑煤粉的

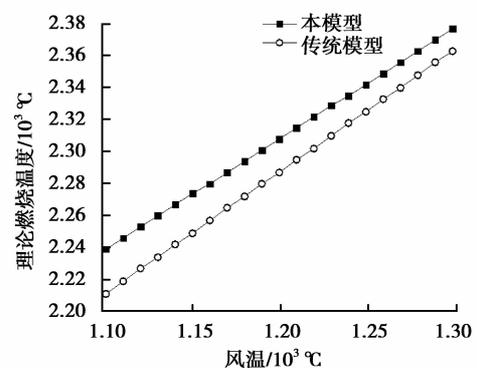


图 5 鼓风温度对理论燃烧温度的影响

Fig.5 effect of blast temperature on theoretical combustion temperature

显热;⑤从燃料发热量的角度分析了燃料的燃烧热效应。进而建立了综合模型,并给出了详细的说明。

2) 针对鼓风气体和煤气的平均比热计算较为繁琐的问题,本模型对其进行了分析和简化,分析表明,二者比焓均为鼓风温度的二次函数,且这种简化的相对误差在 10^{-3} 以内。

3) 在相同条件下,本模型得到的理论燃烧温度高于前人模型的(灰分熔化率为 50%)。在本模型中,富氧率每提高 1%,理论燃烧温度提高约 32.9 °C。鼓风温度每提高 100 °C,理论燃烧温度提高约 69 °C。

4) 煤比对理论燃烧温度的影响与煤种密切相关。采用本模型,在相同条件下,京西煤的理论燃烧温度随煤比的增加而降低,即煤比增加 10kg,理论燃烧温度降低 0.8 °C,而杜尔坪煤的理论燃烧温度随煤比的增加而增加,即煤比增加 10kg,理论燃烧温度升高 2.25 °C,总体上,煤比对理论燃烧温度的影响较为温和。

5) 灰分的熔化率每提高 10%,理论燃烧温度降低约 4.5 °C,即灰分熔化率分别为 0 和 100%时,两者的理论燃烧温度相差 45 °C,说明灰分的熔化对理论燃烧温度的影响不可忽略。

参考文献:

- [1] 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,2008,30(12):1432-1438.
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, 30(12): 1432-1438.
- [2] 魏丽,杨世山,张飞,等.以炉热指数预报高炉铁水含硅量和铁水温度的数学模型[J].冶金研究,2005:55-60.
WEI Li, YANG Shishan, ZHANG Fei, et al. A mathematical model on prediction of hot metal silicon content and temperature using blast furnace hearth thermal state parameters[J]. Metallurgical Study, 2005: 55-60.
- [3] 那树人.炼铁计算辨析[M].北京:冶金工业出版社,2010.
- [4] 鄂加强,杨蹈宇,崔洪江,等.工程热力学[M].北京:中国水利水电出版社,2010.
- [5] 徐辉,邹宗树.对理论燃烧温度计算的一点认识[J].炼铁,2008,27(2):54-55.
XU Hui, ZOU Zongshu. The understanding on the calculation of theoretical flame temperature[J]. Ironmaking, 2008, 27(2): 54-55.
- [6] Wu S L, Liu C S, Fu C L, et al. Improvements on calculation model of theoretical combustion temperature in a blast furnace[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2011, 18(12): 1-5.
- [7] 吴胜利,陈辉,余晓波,等.高炉理论燃烧温度计算的研究[J].钢铁,2008,43(9):16-19.
WU Shengli, CHEN Hui, YU Xiaobo, et al. Study on calculation of theoretical combustion temperature of BF[J]. Iron and Steel, 2008, 43(9): 16-19.
- [8] 陈化宝,陈林森,肖红涛,等.超高富氧对理论燃烧温度的影响[J].钢铁研究,2011,39(4):1-4.
CHEN Huabao, CHEN Linsen, XIAO Hongtao, et al. Effect of ultra-high oxygen enrichment on the theoretical combustion temperature[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011, 39(4): 1-4.
- [9] 吴桐,程树森,张鹏.理论燃烧温度公式的修正[C].2008年中小高炉炼铁学术年会,2008,74-79.
- [10] 万鹏,吴铿,韦少华,等.高炉风口前理论燃烧温度公式的思考[J].中国稀土学报,2010,28:39-42.
WAN Peng, WU Keng, WEI Shaohua, et al. Thinking of the theoretical combustion temperature formula before tuyere in BF[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2010, 28: 39-42.
- [11] 张二华,吴铿,万鹏,等.SiO₂还原对风口前理论燃烧温度的影响[J].北京科技大学学报,2010,32(11):1406-1411.
ZHANG Erhua, WU Keng, WAN Peng, et al. Effect of SiO₂ reduction on the theoretical flame temperature before tuyere in a blast furnace[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(11): 1406-1411.
- [12] 陈文敏.煤的发热量和计算公式(修订2版)[M].北京:煤炭工业出版社,1993.
- [13] 田贯三,付林.西气东输中天然气合理应用方式研究[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [14] 王筱留.钢铁冶金学(炼铁部分)(第2版)[M].北京:冶金工业出版社,2000.
- [15] 于瑞生,论国瑞.利用煤的热值和工业分析数据计算煤中各主要元素含量[J].华东电力,1996(3):33-36.
YU Ruisheng, LUN Guorui. Calculation of the main element content using coal calorific value and industrial analysis data[J]. East China Electric Power, 1996(3): 33-36.