

高炉富氧喷煤条件下理论燃烧温度的即时算法

高贤成 赵晓明

张建良

(济南钢铁集团公司)

(北京科技大学)

摘要 计算高炉富氧喷煤条件下理论燃烧温度有多种公式,但多不便于现场使用。本文提出的理论燃烧温度新型算法直接利用高炉操作仪表参数,计算结果可以较好地指导高炉操作。以某厂高炉实际数据说明了该算法的正确性和实用性。

关键词 富氧喷煤 理论燃烧温度 新型算法

A NEW FORMULA TO CALCULATE PROMPT RACEWAY ADIABATIC FLAME TEMPERATURE OF BLAST FURNACES WITH OXYGEN - ENRICHMENT AND PCI

Gao Xiancheng Zhao Xiaoming

Zhang Jianliang

(Jinan Iron and Steel Corp.)

(University of Science and Technology, Beijing)

Synopsis Although there are a lot of formula to calculate RAFT of blast furnaces, few of them can be considered suitable for operating application. This paper presents a new formula to calculate the prompt RAFT of blast furnaces with oxygen - enrichment and PCI. Since the formula directly uses shift operating parameters, the calculating results can be used as a guidance for operation. The validity and practicality of this formula have been proved by off - line examination for a blast furnace.

Keywords oxygen - enrichment and PCI RAFT new formula

1 前言

近年来,炼焦煤短缺,焦炭价格日益上涨,富氧喷煤技术得到了极大发展。富氧喷煤对高炉冶炼有巨大影响,尤其使炉缸的热状态趋向复杂化,而炉缸热状态对高炉稳定顺行、优质、高产、低耗起着决定性作用。

理论燃烧温度是表征炉缸热状态的指标,理论燃烧温度是根据鼓风温度、鼓风湿度、鼓风富氧率、煤粉喷吹量、焦炭负荷等通过高温区热平衡计算出来的。理论上表明,理论燃烧温度和炉缸热状态紧密相关。高炉生产实践也很好证明了这一点,有不少文献论述了理论燃烧温度与生铁含硅量和铁水温度所具有的良好相关性^[1,2]。

高炉富氧喷煤以后,鼓风参数(风温、湿度、富氧率等)、喷吹煤粉的数量和种类的改变对理论燃

烧温度的影响十分明显(见表1)^[3]。目前已有的理论燃烧温度的计算方法(传统理论燃烧温度算法)比较多,其共同特征是,在理论燃烧温度的计算过程中都要用到如焦比、煤比、富氧率、铁水成分(含碳量)、炉顶煤气成分(或焦炭在风口前的燃烧率)等,由于这些参数本身是高炉冶炼长时间作用的结果,从而使计算结果对高炉理论燃烧温度的宏观把握比较准确。但这些传统算法的明显不足是,上述参数对高炉值班人员不容易直接得到,从而使这些计算方法在高炉生产现场的使用很大程度上受到限制。如果理论燃烧温度能由高炉值班人员日常操作中经常调剂的仪表可读参数来方便地求得,并把高炉适宜的理论燃烧温度作为高炉操作的目标参数,来指导高炉操作,必将对稳定富氧喷煤高炉炉缸热状态、提高富氧喷煤高炉整体运行水平发挥极大的作用。

联系人:赵晓明,硕士研究生,北京市(100083)北京科技大学冶金学院126号信箱

表1 喷煤与鼓风参数改变导致的高炉操作参数变化

参数	改变量	理论燃烧 温度/	焦比变化/ (kg t ⁻¹)	生产率变化/ %
无烟煤	+10 kg/t	-16.2	-9.1	-0.3
烟煤	+10 kg/t	-21.8	-7.6	-0.7
鼓风湿度	+1 g/m ³	-5.8	-0.8	+0.2
鼓风富氧	+1 %	+54	-1.4	+3.6
鼓风温度	+100	+83	-15.5	+5.4

2 理论燃烧温度的新型算法

以高温区热平衡为基础,根据高炉内的碳元素和氧元素平衡,作者提出新型理论燃烧温度的计算公式:

$$T_f = \{ (4.18 \times 2340 + q_k) \times [(a - 0.21) \times V_0 + (0.21 + 0.29 \times) \times V] + 0.933 \times V \times (\bar{C}_{pb} \times t_b - 4.18 \times 2580 \times) - 933 \times (q_k + q_m) \times M_0 \times C_M \} \div \{ 0.933 \times \bar{C}_{pg} \times [(a - 0.21) \times V_0 + (1.21 + 0.79 \times) \times V] + 11.2 \times 933 \times \bar{C}_{pg} \times w(H_{2M}) \times M_0 \} \quad (1)$$

式中 q_k ——每千克焦炭碳素进入风口区带入的物理热,kJ

q_m ——每千克碳素之煤粉的分解耗热,kJ

\bar{C}_{pb} ——热风温度时鼓风平均热容,kJ/(m³·)

\bar{C}_{pg} ——理论燃烧温度时炉缸煤气平均热容,kJ/(m³·)

t_b ——热风温度,

——鼓风湿度,m³/m³

V ——鼓风量,m³/h

V_0 ——富氧量,m³/h

a ——氧气纯度,%

M_0 ——煤量,t/h

$w(H_{2M})$ ——煤粉中总的含氢量,%

C_M ——煤粉中的含碳量,%

不难推出, $w(H_{2M}) = w(H_{2M}) + w(H_2O_M) \times 2 \div 18$ 。其中 $w(H_{2M})$ 为煤粉氢含量, $w(H_2O_M)$ 为煤粉含水量。下面给出公式(1)中另外几个重要参数的计算方法。

(1) \bar{C}_{pb} 的计算

富氧鼓风后,计算鼓风中的 $w(O)$ 、 $w(N)$ 和水(蒸气)的含量 $w(H_2O_b)$ 的推导过程比较简单,这里只给出结果:

$$w(O) = (1 -) \times 0.21 + (a - 0.21) \times V_0/V \quad (2)$$

$$w(N) = (1 -) \times 0.79 + (a - 0.21) \times V_0/V \quad (3)$$

$$w(H_2O_b) = \quad (4)$$

则富氧鼓风后的平均热容为:

$$\bar{C}_{pb} = \frac{4.18}{22.4} \times \sum_1^3 X_i \times \int_{t_b+273}^{T} (a_i + b_i \times T + c_i \times T^2) dT \quad (5)$$

其中, X_i 分别为 $w(O)$ 、 $w(N)$ 、 $w(H_2O_b)$ 。 a_i 、 b_i 、 c_i 见表2,式中 $T = t_b + 273$ 。

表2 炼铁常用气体热容数据

气体	a	b	c	温度范围/
O ₂	7.16	0.001	-40000	25~2700
N ₂	6.66	0.00102	0	25~2200
H ₂	6.52	0.00078	12000	25~2700
CO	6.79	0.00098	-11000	25~2200
H ₂ O _g	7.17	0.00256	8000	25~2500

(2) \bar{C}_{pg} 的计算

由碳在风口前燃烧的化学方程:



可以求出风口前燃烧1kg碳素所形成的炉缸煤气中。

1) CO 的量:

$$W_{CO} = 2 \times 0.933 \quad (7)$$

2) N₂ 的量:

$$W_{N_2} = \frac{0.933 \times [0.79 \times (1 -) - (a - 0.21) \times V_0]}{(0.21 + 0.29 \times) \times V + (a - 0.21) \times V_0} \quad (8)$$

3) H₂ 的量:

H₂ 的量应该包括两个部分:一部分来之鼓风中的湿分,其量为 $V_b \times$;另一部分来自煤粉,其量为 $11.2 \times C_b^m \times W(H)/C_M$ 。换成可读参数后其表达式为:

$$W_{H_2} = \frac{0.933 \times \times V}{(0.21 + 0.29 \times) \times V + (a - 0.21) \times V_0} + \frac{11.2 \times 933 \times w(H) \times M_0}{(0.21 + 0.29 \times) \times V + (a - 0.21) \times V_0} \quad (9)$$

因此,富氧喷吹煤粉的情况下,风口前燃烧1kg碳素所形成的炉缸煤气量为:

$$W_{CO} + W_{N_2} + W_{H_2} \quad (10)$$

各组分体积分数为:

$$X_{(O)} = W_{(O)}/V_g; X_{(N_2)} = W_{(N_2)}/V_g; X_{(H_2)} = W_{(H_2)}/V_g$$

则炉缸煤气平均热容为:

$$\bar{C}_{pg} = \sum_1^3 X_i \times \frac{\int_{T_f+273}^{T} (a_i + b_i \times T + c_i \times T^2) dT}{T_f - 25} \quad (11)$$

式中 T_f ——假定适宜的理论燃烧温度

(3) q_m 的计算

煤粉分解热按文献[4]中给出的较新的确定方法:煤粉分解后的最终产物 C、CO、H₂、N₂ 完全燃烧生产 CO₂、H₂O 和 N₂ 放出的热量为 Q_{total} ;煤粉的低位发热量(即煤粉完全燃烧生成 CO₂、H₂O 和 N₂ 所放出的热量)为 Q_{net} ;则应用盖斯定理,即可求出煤粉的分解热为 q_m :

$$q_m = [1 - w(H_2O_M)] Q_{dec} - 124.5 \times 10^3 \times w(H_2O_M) \div 18$$

$$= [1 - w(H_2O_M)] (Q_{net} - Q_{total}) - 124.5 \times 10^3 \times w(H_2O_M) \div 18 \quad (12)$$

3 讨论

从公式(1)不难看出,对确定的高炉,在一定时期内喷吹的煤粉是不变的,可将 C_M 及求得的 q_m 、 $w(H_{2M})$ 视为常数。而公式中的 \bar{C}_{pb} 、 \bar{C}_{pg} 从形式上看好象是未知的,这是为了使 T_f 的表达式简化,从公式(2)~(5)及(7)~(11)可以看出,它们也是由仪表可读参数经计算求得的。只是在通过公式(11)计算 \bar{C}_{pg} 时需要事先假设 T_f 的值,然后再配合公式(1)经过循环计算(当 $|T_{f,i} - T_{f,i+1}| < \epsilon$ 时结束, ϵ 为给定的精度)和 T_f 同时求得。这就是说,当喷吹煤粉一定时[q_m 、 $w(H_2O)$]为常数,一定时间内(a 、 \bar{C}_{pg} 为常数),公式(1)中的其它参数全部为高炉日常操作中经常调剂的仪表可读参数,并且这些参数基本上涵盖了日常操作中的所有调剂参数(小时风量、小时氧量、小时煤量、煤粉种类、风温、鼓风湿度以及氧纯度等)。这便是本算法的突出特点,它一方面决定了即时算法在高炉现场使用的方便性;另一方面为炉缸热状态控制在目标理论燃烧温度的多途径实现成为可能。事实上为将理论燃烧温度作为日常操作调剂中一个重要目标参数,使高炉始终保持良好炉缸热状态打下良好基础。

4 即时算法的应用及其意义

即时算法因为具有上述显著特点,所以对高炉操作具有实际指导意义。就象控制生铁含硅量一样,控制适宜理论燃烧温度必将成为指导高炉操作的一个重要目标参数。为了说明即时算法的意义,下面列出以下几方面的应用例子。

(1) 用即时算法求理论燃烧温度

通过公式(1)可以很方便地计算出某操作参数变化后的理论燃烧温度。例1,某厂 350 m³ 高炉鼓风湿度 1%、氧纯度 0.99、风量 54 000 m³/h、煤量 5 t/h、风温 1 100 ℃,利用公式(1)可很快求出对应于不同氧量的理论燃烧温度,示于表 3。其中,取 $q_k = 2 299$ kJ/kg, $q_m = 1 254$ kJ/kg, $C_M = 75.2\%$, $w(H_{2M}) = 0.033 7$,以下各例同。

表 3 不同氧量下的理论燃烧温度

氧量/(m ³ h ⁻¹)	500	1 000	1 500	2 000	2 500
$T_f/$	2 144.0	2 176.5	2 208.8	2 240.4	2 271.6

(2) 当某操作参数变化时,为维持适宜理论燃烧温度,给出适宜的喷煤量

从公式(1)可以导出,由高炉日常操作参数表达的求喷煤量的算式:

$$M_0 = \{ (4.18 \times 2 340 + q_k) \times [(0.21 + 0.29 \times \bar{C}_{pg}) \times V + (a - 0.21) \times V_0] - 0.933 \times \bar{C}_{pg} \times [(a - 0.21) \times V_0 + (1.21 + 0.79 \times \bar{C}_{pg}) \times V] + T_f + 0.933 \times V \times (\bar{C}_{pb} \times t_b - 4.18 \times 2 580 \times \bar{C}_{pg}) \} \div \{ 11.2 \times 933 \times T_f \times \bar{C}_{pg} \times w(H_{2M}) + 933 \times (q_k + q_m) \times C_M \} \quad (13)$$

为维持适宜理论燃烧温度,当某操作参数变化时利用此公式即可求出适宜的喷煤量(因 \bar{C}_{pg} 与 M_0 有关,故要经循环逼近求得)。如对例 1 中的高炉,鼓风湿度 1%、风温 1 100 ℃、无氧,由于炉温低欲控制风量,为坚持喷煤并维持理论燃烧温度为 2 200 ℃时,可利用公式(13)很快求出不同风量下适宜的喷煤量,见表 4。

表 4 不同风量时的适宜喷煤量

风量/(m ³ h ⁻¹)	55 000	50 000	45 000	40 000	35 000
煤量/(t h ⁻¹)	5.4	4.9	4.5	4.0	3.5

(3) 当某操作参数变化时,为维持适宜理论燃烧温度,给出适宜的富氧量

同样由公式(1)可推出富氧量的表达式:

$$V_0 = \{ (4.18 \times 2 340 + q_k) \times [(0.21 + 0.29 \times \bar{C}_{pg}) \times V + 0.933 \times V \times (\bar{C}_{pb} \times t_b - 4.18 \times 2 580 \times \bar{C}_{pg})] - 0.993 (q_k + q_m) \times M_0 \times C_M - 0.933 \times T_f \times \bar{C}_{pg} \times (1.21 + 0.79 \times \bar{C}_{pg}) \times V - 11.2 \times 933 \times T_f \times \bar{C}_{pg} \times w(H_{2M}) \times M_0 \} \div \{ 0.933 \times \bar{C}_{pg} \times (a - 0.21) \times T_f - (4.18 \times 2 340 + q_k) \times (a - 0.21) \} \quad (14)$$

为维持适宜理论燃烧温度,当某操作参数变化时利用此公式即可求出适宜的富氧量(因 \bar{C}_{pb} 、 \bar{C}_{pg} 与 V_0 有关,故要经循环逼近最后求得)。如在例 1 的条件下,维持理论燃烧温度为 2 200 时,可利用公式(14)很快求出不同煤量时适宜的富氧量,见表 5。

表 5 不同煤量时的适宜富氧量

煤量/(t h ⁻¹)	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
氧量/(m ³ h ⁻¹)	590.6	846.6	1 102.7	1 358.7	1 614.7

(4) 鼓风湿度变化时,适宜理论燃烧温度的控制由公式(1)可以看出,鼓风湿度对理论燃烧温度的影响十分明显。这就是为什么随季节变化高炉鼓风质量和接受风温、煤粉的能力不同的的重要原因之一。例 1 中富氧量 1 000 m³/h,其它条件不变,理论燃烧温度为 2 200 ,用公式(13)求出不同湿度下的喷煤量示于表 6。由于很多地区不同季节湿度变化非常大,从表 6 可以看出,为稳定炉缸热状态即便是同一高炉,不同季节控制不同操作参数的重要性。

表 6 不同湿度时的适宜喷煤量

湿度/(m ³ m ⁻³)	0.001	0.005	0.01	0.02	0.03
煤量/(t h ⁻¹)	5.4	4.9	4.3	3.1	1.8

很值得注意的是,在上述应用(2)、(3)、(4)中,由于理论燃烧温度为给定的常数,所以在这些情况下的计算,无须对 T_f 象例(1)那样循环求解;当温度一定时 \bar{C}_{pb} 、 \bar{C}_{pg} 随机 V_0 、等的变化很小,如视为常数,将使得当某操作参数变化时,为维持

适宜理论燃烧温度,求欲改变参数调节量的计算变得极为简便。

5 结 论

(1) 理论燃烧温度是一个很好的表征高炉炉缸热状态的函数。高炉操作中,应该象控制适宜生铁含硅量一样,控制适宜理论燃烧温度。

(2) 理论燃烧温度即时算法不仅是理论燃烧温度计算中的一个创新,而且,它使将理论燃烧温度作为高炉日常调剂的目标参数,从而稳定炉缸热状态成为可能。即时算法的计算充分表明了实现这一愿望的诸多供灵活选择的实现途径。

(3) 新型算法基本上包含了高炉日常操作中所有的可调参数,无需任何间接变量(如焦比、煤比、煤气成分等)。每个高炉在一定的冶炼条件下都存在一个适宜的理论燃烧温度,当某个(或某些)操作参数发生变化后,为维持目标理论燃烧温度,利用此算法可以方便地求出欲改变操作参数的调节目标量,现场使用极为方便。

(4) 以某厂具体数据离线运行,证明了该模型的正确性和良好的可操作性。

参 考 文 献

- 1 成兰伯. 高炉炼铁工艺及计算. 北京:冶金工业出版社,1991
- 2 陈 英. 用风口燃烧温度判断高炉热状态的可行性研究. 鞍钢技术,2000,(11):6~8
- 3 张建良,秦民生. 高炉高富氧大量喷吹煤粉的理论分析. 钢铁,1992,(10):12~13
- 4 张建良,杨天钧. 高炉喷煤过程煤粉分解热确定的新方法. 北京科技大学学报,2001,(8):308~310

(收稿日期:2003-03-13)

攀钢钢轨在线热处理方法及装置获发明专利权

由攀钢研制开发的“利用轧制余热生产高强度钢轨的热处理方法及装置”,现已获得国家发明专利权。对铁路钢轨进行热处理是提高其强韧性、耐磨性和抗疲劳性的重要技术。钢轨热处理技术分为离线热处理和在线热处理。利用轧制余热生产高强度钢轨的热处理技术,亦称钢轨在线热处理工艺,是国外从上个世纪 80 年代中期开始开发的提高钢轨使用性能和寿命及降低钢轨生产成本的新技术,目前拥有此技术的国家尚属少数。其工作原理是将热轧后保持在奥氏体区域的高温状态的钢轨连续送入设置有冷却装置的热处理机组中,使钢轨得到均匀的加速冷却,在钢轨头部由表及里的较深范围内获得硬度均匀降低的微细珠光体组织。它与钢轨离线热处理工艺的主要区别是,钢轨无需重新加热,因而可以大大提高生产率和降低生产成本。

攀钢钢轨离线热处理方法和装置在上个世纪 80 年代曾获专利权,现在攀钢钢轨在线热处理方法和装置又获得国家专利权,为大批量生产优质高强重轨和高速轨奠定了坚实、可靠的技术基础。

(摘自中国冶金信息网)