文章编号:1674-7070(2009)04-0289-04

AOD 炉炉温在线检测的研究与实现

林晓梅[1]　李慧然[1]

摘要

针对 AOD 红外副枪测温法中多种不确定背景辐射导致的发射率波动问题,提出了基于双色测温原理和黑体等温空腔理论的底枪测温法,稳定了铁水的发射率. 应用基于最小二乘法的曲线回归实现红外测温设备的现场校准,完成温度补偿. 通过在样炉上的精炼实验证明底枪测温系统具有较高的精度和可重复性,可以满足实际生产的要求.

关键词

底枪测温;双色测温;等温空腔;现场校准;AOD

中图分类号 TP216

文献标志码 A

0　引言

Introduction

AOD(Argon Oxygen Decarburization)是氩氧脱碳的简称. AOD 炉由于具有原料适应性强、操作简便、投资费用低等优点[1],广泛应用于冶金行业的各种材料精炼中. 在 AOD 炉普遍应用的同时存在一个亟待解决的关键问题,就是 AOD 炉的测温问题. 温度是冶金工业中一个重要的参数,在 AOD 炉精炼铁合金的过程中,为了更好地控制各种反应的进行,预报铁水成分以及准确地命中终点温度和终点成分,需要对铁水温度做连续的在线检测. AOD 炉具有封闭结构,生产中其内部要发生多种化学反应,炉内熔体一般会温升几百度,反应的最高温度可达近 1 800 ℃,以上因素都给测温,特别是温度的在线检测带来很大困难. 针对 AOD 炉测温中存在的上述问题,本文从实现角度出发,提出了基于侧吹底枪的红外在线测温方法.

1　红外底枪测温法

Bottom-lance infrared temperature measurement

1.1　测温中常见干扰的消除方法

温度连续在线检测主要有接触式测温和非接触式测温两种方法. 在高温连续检测中普遍应用的是非接触式测温,红外测温是非接触式测温领域中应用最广的一种测温方式,其应用基础为普朗克公式[2]

$$E_{b\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}. \tag{1}$$

式(1)中:π, h, c, k 均为常数. $E_{b\lambda}$ 是波长 λ 和温度 T 的函数. 对于近似的灰体,引入发射率 ε_λ,得到实用的辐射能表达式 $E_\lambda = \varepsilon_\lambda E_{b\lambda}$. 通过光学滤光系统使 λ 固定,便可以通过测量 E_λ 的值求出相应的温度值 T,这就是红外传感器工作的基础. 但在实际应用中,红外传感器的接收信号会引入很多干扰量. 对于 AOD 炉系统,当选择在 AOD 炉的顶枪或副枪安排红外探头时,会存在以下几类显著的干扰:高温吹氧在顶枪端口部的剧烈燃烧引入的独立的光噪声;原料带入的大量粉尘以及反应中生成的大量气体对光路的削弱;反应中生成的堆积在铁水顶部没有及时扒除的炉渣产生的背景辐射[3]. 各种干扰因素如图 1 所示.

收稿日期 2009-08-17

资助项目 国家科技支撑计划项目(2007BAQ-00097)

作者简介

林晓梅,女,博士,教授,主要从事信号检测研究. linxiaomei@mail.ccut.edu.cn

李慧然(通讯作者),女,硕士生,研究方向为信号检测. autumnfall@126.com

1　长春工业大学　电气与电子工程学院,长春,130012

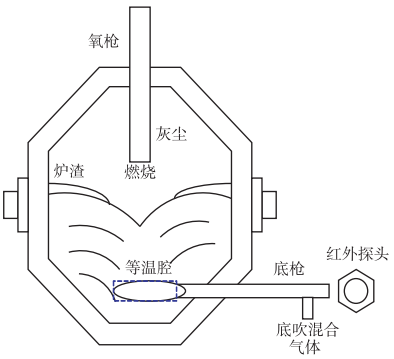


图 1　红外测温中的干扰因素

Fig. 1　Interfering factors in the infrared temperature measurement

光噪声产生的位置固定,在光路上添加挡板或适当改变副枪位置就可以消除. 对于粉尘和气体,常使用双色测温仪表,双色测温的原理基于普朗克公式的一个变换式,表示为

$$K = \frac{E_{\lambda_1}}{E_{\lambda_2}} = \frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}}\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{-5} \mathrm{e}^{\frac{C_2}{T}\left(\frac{1}{\lambda_2}-\frac{1}{\lambda_1}\right)}. \tag{2}$$

式(2)中:E_{λ_1} 和 E_{λ_2},ε_{λ_1} 和 ε_{λ_2} 分别表示目标物体在波长为 λ_1、λ_2 处的单色辐射功率和发射率. 1 500 ℃以上的铁水温度位于近红外区域,通常满足 $\mathrm{e}^{C_2/\lambda T}$ 远远大于 1,C_2 即为式(1)中的 hc/k. 双色测温的基础就是当传感器由于光路干扰,接收到的辐射能被严重削弱时,两个波长下的干扰近似相等,可以抵消. 但这种测温法只能降低光路被削弱的影响,却无法消除背景辐射的影响. 设铁水在 λ_1 和 λ_2 处的单色辐射功率分别为 E_{λ_1} 和 E_{λ_2},炉渣在 λ_1 和 λ_2 处的单色辐射功率分别为 ξ_{λ_1} 和 ξ_{λ_2},则比值 K' 为

$$K' = \frac{E'_{\lambda_1}}{E'_{\lambda_2}} = \frac{E_{\lambda_1} + \xi_{\lambda_1}}{E_{\lambda_2} + \xi_{\lambda_2}}. \tag{3}$$

由于炉渣是一种随机性很强的背景辐射,所以 K 与 K' 一般不相等,且由于 ξ_{λ_1} 和 ξ_{λ_2} 随机变化,它们之间的关系也不确定. 因此,炉渣的背景辐射成为顶部测温中不可控制的干扰因素.

1.2　底枪测温法的可行性

AOD 炉底枪从炉的侧壁深入底部,一般为内外管的双层结构,内管吹入氩氧(或者以氮代氩)混合气体,外管吹入冷却剂,精炼时通氩气冷却,非吹炼的空隙时间改吹压缩空气或氮气. 在精炼铁合金时底枪内部要保持持续地吹入气体,起搅拌作用的同时,防止高温铁水倒流堵塞底枪,吹入的气体需要维持在一定的速度,速度大小由生产工艺决定. 图 2 给出了一个典型的的 20 t AOD 炉的精炼工艺曲线[4].

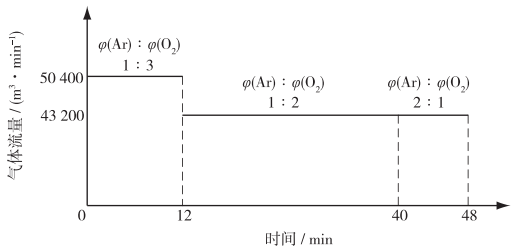


图 2　底吹气体工艺曲线

Fig. 2　Technology curve of bottom blowing gas

射流气体在进入铁水后形成一个气体腔,相比于 AOD 炉内的铁水体积,这个气体柱所占据的那部分铁水可以视为一个等温腔体,如图 1 所示. 等温腔体的发射率常用积分发射率来表示,当一个腔体完全等温时,对于一个固定安放的探测器,腔体的积分发射率不随腔体的温度和波长而变化,基本保持为一个常数. 就是说,等温腔体是一个理想的灰体. 铁水空腔在体积变化不大的范围内,可以维持较好的等温性,这为红外测温提供了一个理想的观测点,在几乎没有背景辐射的情况下,保持被测目标的发射率恒定.

底枪测温引入了另一个问题,就是底吹气体的降温作用. 氩氧混合气体一般在室温吹入,当气液两相以较大的温差相接触时,必然存在一个换热过程. 试图对气液两相区进行建模计算换热量是比较困难的,因为大量实验结果表明,气液两相区并不具有规则的界面,实际上存在着大量的气泡[5].

换热与搅拌作用都主要由气泡导致,这种干扰以换热为基础,需要对此做温度补偿,为了解决建模的困难,要对测温系统实施现场校准[6].

2　现场校准

Field calibration

现场校准就是将待标定的测温设备置于生产中,用现场测得的温度值拟合出温度曲线. 由于 AOD 炉底吹气体的主要作用在于大量气泡产生的搅拌作用,底吹气体的主要做功表现也集中于气泡的浮力和膨胀所做的功,消耗在铁水腔体上的功只是其中很小的一部分,所以在做红外测温设备现场校准的时候做如下假设:

1) 底吹气体的能量主要实现铁水的搅拌,只有很小一部分消耗于底枪空腔处;

2) 相比于铁水的整个升温过程,底吹气体所做的功不足以改变温度变化的整体趋势,只能影响局部形态.

有了上述假设,就可以利用统计的方法,通过样本数据对红外设备实施现场校准.

将标准热电偶采集到的 N 个温度值 T_i($i=1,2,3,\cdots,N$)和双色测温读出电路测得的 N 个 K_i 值($i=1,2,3,\cdots,N$)一起组成样本对空间(K_1,T_1),(K_2,T_2),(K_3,T_3),…,(K_N,T_N),将式(2)重写,并做变换,得

$$K=\frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}}\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5 e^{\frac{C_2}{T}\left(\frac{1}{\lambda_2}-\frac{1}{\lambda_1}\right)}. \tag{4}$$

式(4)中:λ 和 C_2 为定值;$\varepsilon_{\lambda_1}/\varepsilon_{\lambda_2}$是发射率的比值,对于底枪测温法,可以认为其值为定值. 令

$a=(\varepsilon_{\lambda_1}\cdot\lambda_2^5)/(\varepsilon_{\lambda_2}\cdot\lambda_1^5)$, $b=C_2(1/\lambda_2-1/\lambda_1)$,

则 a,b 均为常量,可以得到铁水温度变化曲线具有指数函数的形式.

由于底吹气体对铁水具有降温作用,并且依据前面的假设,这种降温作用只是局部的,不足以改变铁水整体的温度变化趋势,可以将这种影响计入参数 a 和 b 中,通过对 a,b 的修正,获得 T 与 K 的对应关系曲线. 将 a,b 带入式(4)中,得

$$K=a\cdot e^{\frac{b}{T}}. \tag{5}$$

将式(5)作为经验回归曲线,在样本对空间(K_i,T_i)上做基于最小二乘法的曲线拟合,完成红外系统的现场校准.

3 实验验证

Experimental verification

在实验室中,以 20 t AOD 炉实验样机冶炼铁合金,实施现场校准验证上述结论. 实验中选择热电偶铂铑 30-铂铑 6,型号 KB-602,外加热保护管,反应时间不大于 8 s. 在 48 min 的工艺区间上用热电偶和红外测温设备采集 24 对样本值,其比色测温电路的读出值和对应温度值如表 1 所示.

在式(5)中,令 $y=\ln K$,$x=1/T$,得到 y 关于 x 的线性关系式

$$y=bx+\ln a.$$

应用最小二乘原理,对此关系式做一元线性回归[7],得 $a=0.57$,$b=1\,726.9$,即经现场校准的曲线为

$$K=0.57\cdot e^{\frac{1\,726.9}{T}}.$$

线性相关的显著性检验 F 参数为 312.74,$F_{0.01}$ 为 7.88;相关系数 r 为 0.965,$r_{0.01}$ 为 0.514. 由于 $F>F_{0.01}$,$r>r_{0.01}$,所以线性相关显著. 曲线相关系数 R_{xy} 为 0.931,数值接近 1,曲线拟合效果较好. 拟合曲线如图 3 所示.

表 1 样本对空间

Table 1 Space of sample pairs

序号	K	t/℃	序号	K	t/℃
1	1.464 0	1 558	13	1.406 5	1 644
2	1.456 3	1 568	14	1.404 6	1 647
3	1.454 9	1 571	15	1.400 3	1 652
4	1.446 0	1 582	16	1.411 5	1 657
5	1.435 2	1 599	17	1.394 9	1 661
6	1.428 7	1 611	18	1.393 1	1 666
7	1.438 0	1 616	19	1.390 7	1 671
8	1.425 9	1 621	20	1.387 7	1 676
9	1.417 1	1 627	21	1.357 9	1 679
10	1.415 2	1 631	22	1.383 6	1 680
11	1.410 2	1 636	23	1.384 2	1 680
12	1.409 6	1 640	24	1.384 8	1 679

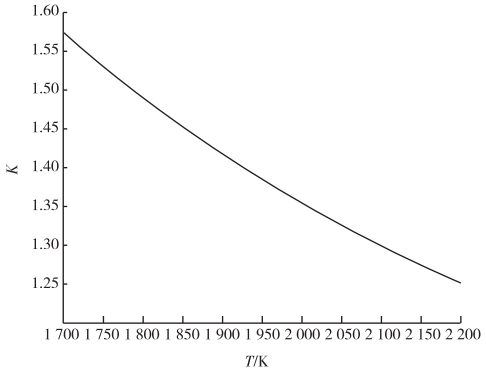


图 3 现场校准拟合曲线

Fig. 3 Field calibration fitting curve

将内置校准曲线的样机应用于精炼过程,温度示值与拟合曲线对应关系如图 4 所示.

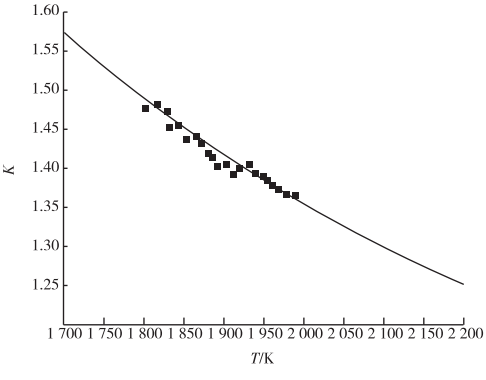


图 4 拟合曲线回归效果

Fig. 4 Regression effect of fitting curve

从图 4 中可以看出,铁水温度值基本落在拟合曲线上,尽管原材料成分有所不同,冶炼环境改变了,曲线的拟合效果仍然很好,这是因为底枪测温法中的等温铁水腔体发射率可以保持稳定.

4 结论

Conclusion

本文通过对几种 AOD 炉炉温连续在线检测方法的可行性进行分析,提出了一种基于底枪的测温方式,消除了随机背景辐射的影响,降低了发射率的波动;再辅助以现场温度校准,提高了测温设备的精度和鲁棒性. 由于工艺曲线只用于样机实验,所以文中的数据值不能作为实际中的参考值,需要根据生产要求,按照上述方法实施现场校准.

参考文献

References

[1] 吴燕萍. AOD 设备及工艺设计特点[J]. 中国冶金,2007,17(4):45-47
WU Yanping. Device and technology design features of AOD[J]. China Metallurgy,2007,17(4):45-47

[2] 高魁明,谢植. 红外辐射测温理论与技术[M]. 沈阳:东北工学院出版社,1989:117-126
GAO Kuiming, XIE Zhi. Theory and technology of infrared radiation temperature measurement[M]. Shenyang: Northeast Engineering Institute Press,1989:117-126

[3] Masato S, Tsuyoshi Y, Ryuji N, et al. Development of new technique for continuous molten steel temperature measurement[J]. Nippon Steel Technical Report,2004,89:23-27

[4] 李瑞丽,方爱民. 小型氩氧混合脱碳(AOD)炉炼钢工艺[J]. 江苏冶金,2007,35(6):46-48
LI Ruili, FANG Aimin. Steel-making process using a small argon-oxygen mixture(AOD) furnace[J]. Jiangsu Metallurgy,2007,35(6):46-48

[5] 朱苗勇,萧泽强. 钢的精炼过程数学物理模拟[M]. 北京:冶金工业出版社,1998:203-222
ZHU Miaoyong, XIAO Zeqiang. Mathematical and physical simulation of steel refining process[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,1998:203-222

[6] 张忠恒. 双波长红外测温仪的研究[D]. 天津:天津理工大学,2007
ZHANG Zhongheng. Research on double-channel infrared thermometer[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology,2007

[7] 林文浩. 概率论与数理统计[M]. 厦门:厦门大学出版社,2002:358-424
LIN Wenhao. Probability theory and mathematical statistics[M]. Amoy: Xiamen University Press,2002,358-424

Research on and implementation of online temperature measurement for an AOD furnace

LIN Xiaomei[1] LI Huiran[1]

1 Institute of Electrical and Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012

Abstract Directed at the fluctuation of the emissivity induced by several kinds of uncertain background radiations in the AOD infrared sub lance method, a kind of bottom lance method has been put forward in this paper based on the colorimetric temperature measurement theory and the blackbody isothermal cavity theory, so that the emissivity of the hot metal could be kept stable. The curvilinear regression based on the least square method is applied in a sample space to perform the field calibration and the temperature compensation of the equipment. The experiment carried out on a prototype shows a high precision and a good reproducibility, thus the bottom lance measurement system can meet the demands of actual manufacture.

Key words bottom lance measurement; colorimetric temperature measurement; isothermal cavity; AOD; field calibration