

光谱测温法应用于转炉炼钢火焰测温

许凌飞 李武森 陈延如 徐实学 李 伽 王勇青

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要 炉口火焰是在转炉炼钢过程中最重要的对炉内钢水温度和成分含量判定的一个重要依据。将炉口火焰光谱分为两部分频谱:背景光谱和原子发射光谱特征。假设背景光谱光强度补偿了特征原子的受激而产生的自吸或者自蚀光强度损失,基于火焰发射光谱(FES)原理和转炉炼钢过程中的火焰光谱,推导出特征原子光谱和强度与火焰温度之间的关系。结果表明,火焰发射光谱测温法所测得的温度与实际温度的误差能够在理想的范围内。

关键词 光谱学;火焰温度;火焰发射光谱;转炉炼钢

中图分类号 TN958

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP48.053001

Thermometry Measurements in Basic Oxygen Furnace by Applying Flame Emission Spectrum

Xu Lingfei Li Wusen Chen Yanru Xu Shixue Li Jia Wang Yongqing

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Techniques, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract Flame of basic oxygen furnace is the most important evident in the steel making process. The flame spectrum is divided into the background spectrum and the characteristic atomic emission spectrum. Compared with the figure of the characteristic atomic emission spectrum measured by spectrometer with the Gaussian function, the conclusion shows that the background spectrum can compensate the loss of the light intensity due to the stimulated absorption of characteristic atomic. Based on the flame emission spectrometer (FES) and spectrum in the basic oxygen furnace (BOF's) flame, a new relationship between the intensity of characteristic atomic spectrum and the temperature of the flame is deduced. The results indicate that the temperature measured by FES is inosculated to the temperature obtained by converter sub-lance comparatively.

Key words spectroscopy; flame temperature; flame emission spectrometry; basic oxygen furnace

OCIS codes 300.0300; 300.6210

1 引言

火焰发射光谱法(FES)是一种分析燃烧场的重要方式。在复杂的燃烧场中,可以通过测量特征原子的发射光谱或吸收光谱来推断出火焰中的成分含量。在许多工业测量中,FES已经被广泛使用。有文献指出, H_2/H_2O , $NH_3/H_2/N_2O$, $H_2/N_2O/NO_2$ 反应之间关系可以用发射光谱法来精确分析^[1]。在燃烧煤粉的情况下,火焰发射光谱法可用于燃烧场的温度控制。煤粉火焰光谱能够描述煤粉的燃烧状态^[2]。火焰场是一种电离场^[3],利用光谱仪对火焰场的分析结果与电离探测器对火焰场的分析结果是一致的^[4],可以通过测量特征原子的发射光谱,来测量火焰的温度。现今,主要的光谱温度测量技术是双线温度测量方法。文献^[5]表明,在火焰的光谱分布中存在钠,钾的特征谱线。从钾的两根特征光谱的强度,可以利用双线测温法,考虑了原子发射和辐射场之间相互作用,给出了煤粉燃烧场的火焰温度^[6],但测量结果要比利用热电偶测量的温度值高 60~160 K。在转炉炼钢中,转炉炉口火焰提供了铁水在转炉中的状态信息。工人可以通过

收稿日期: 2010-08-16; 收到修改稿日期: 2010-11-03

基金项目: 国家 863 计划(2007AA04Z181)资助课题。

作者简介: 许凌飞(1984—),男,博士研究生,主要从事光谱分析,图像处理等方面的研究。E-mail: jsj900@hotmail.com

导师简介: 陈延如(1954—),男,教授,博士生导师,主要从事目标光学散射特性、光电信息动态探测与处理、激光制导与空间编码等方面的研究。E-mail: yrchen2002@yahoo

火焰来推断钢水的温度和碳含量。在转炉炼钢终点判断中,钢水的温度是一个重要参数以此来决定钢水是否达到标准^[7]。本文尝试使用火焰发射光谱法,来测量转炉炼钢中钢水温度。

2 转炉炼钢炉口火焰光谱及测量原理

使用海洋光学的 USB400 系列光纤光谱仪,得到关于炉口火焰光谱分布。光谱仪技术规范如下:物理特性尺寸为 89.1 mm×63.3 mm×34.4 mm,重量为 190 g,探测器为东芝 TCD1304AP,线阵 CCD 探测范围为 200~1100 nm,像素为 3648 pixel,像素尺寸为 8 μm×200 μm,像素阱深为 100,000,电子信噪比为 300:1(全信号),A/D16 位暗噪声为 12 RMS counts,校正线性度大于 99.8%,灵敏度为 400 nm:130 photon/count; 600 nm:60 photon/count。

火焰的频谱是由 3 个部分组成。两碱金属的发射线和背景辐射谱。在一些研究中表明碱金属的发射谱线同样存在于煤与瓦斯的火焰发射光谱^[8]。火焰发射光谱法的温度测量只是用碱金属的特征发射谱线强度来测量火焰场的温度^[9]。因此,第一步是提取背景辐射光谱特征发射。在此,假设背景辐射是灰体辐射。因此,背景光谱可以看作是一个连续谱。在图 1 中的特征谱线强度为特征发射强度和背景辐射强度的总和。在原子发射光谱特征波段,强度可写为

$$I(\lambda) = I_e(\lambda) + I_G(\lambda), \quad (1)$$

式中 $I(\lambda)$ 是 CCD 光纤光谱仪测得的光强度值, $I_e(\lambda)$ 是实际特征原子发射光谱的强度值, $I_G(\lambda)$ 是背景的光谱强度值。因为将背景辐射光谱视为一个连续光谱,所以,利用支持向量机(SVM)做一个函数拟合,计算出在特征波段 527~616 nm 和 706~725 nm 的背景光谱辐射光强度值。选择了其他波段上的背景光谱强度值作为拟合数据,这样,在特征原子发射谱线处,背景辐射的光谱强度值可以写成

$$I_G(\lambda) = \sum_{i=1}^M (\alpha_i - \alpha_i^*) K(\lambda_i, \lambda) + b, \quad (2)$$

式中 $K(\lambda_i, \lambda)$ 是 SVM 函数拟合中的内积核函数。通过(2)式可以计算出在特征原子发射波段上的背景辐射光谱强度,然后再代入(1)式中,可以得到特征原子发射光谱的实际光强度值。这样,可以把整个火焰光谱分成 3 个部分,如图 2 所示。

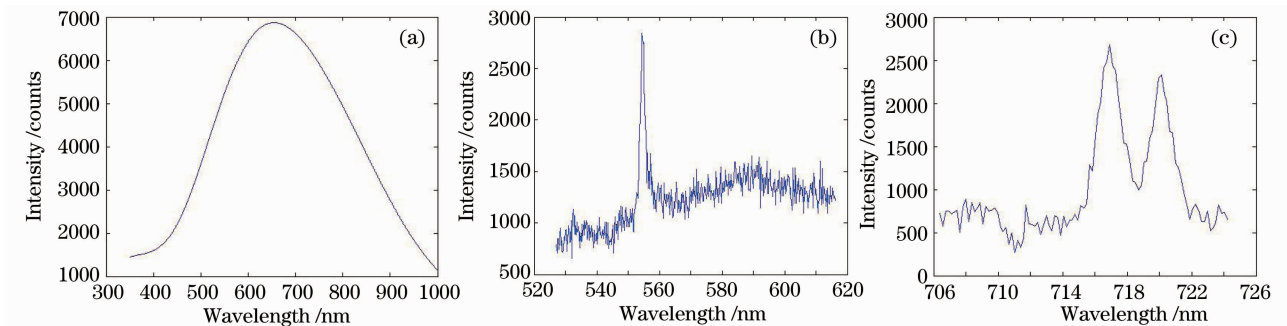


图 2 火焰光谱的 3 个部分。(a) 背景辐射光谱分布;(b) 527~616 nm 处,特征原子发射光谱分布;(c) 706~725 nm 特征原子发射光谱

Fig. 2 Three parts of the spectrum, (a) background radiation spectrum distribution; (b) characteristic emission spectrum at wavelength from 527 to 616 nm; (c) characteristic emission spectrum at wavelength from 706 to 725 nm

在火焰发射光谱法的温度测量中,只考虑它的特征发射强度,如图 2(b), (c) 所示。在与高浓度的碳物质燃烧,在 527 nm 存在其火焰光谱发射峰 616 nm 可能是钠线,也可能是亚铁离子发出的发射谱线^[10]。该发射峰,是碱金属的特征发射光谱。从整个转炉炼钢过程中,该谱线变化比较大:初期,基本淹没在背景辐射

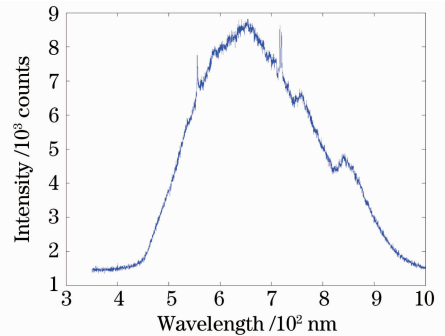


图 1 炉口火焰光谱分布

Fig. 1 Spectrum of basic oxygen furnace (BOF)

所以,利用支持向量机(SVM)做一个函数拟合,计算出在特征波段 527~616 nm 和 706~725 nm 的背景光谱辐射光强度值。选择了其他波段上的背景光谱强度值作为拟合数据,这样,在特征原子发射谱线处,背景辐射的光谱强度值可以写成

之中,随着炼钢过程的继续,炉内反应的加剧,该谱线逐渐突出。因此,可以使用这根的特征发射光谱来计算火焰温度。由于在转炉炼钢的情况下火焰温度分布是不均匀的,因此特征原子发射光谱自吸自蚀的情况要被考虑到。在波长为 589 nm 的特征谱线上,即图 2(b),对光谱强度数据进行了分析,找不到任何明显的自吸现象。因此可以假设:在这个波段上的背景辐射光强正好弥补了特征原子发射谱线自吸时吸收的能量。特征原子发射谱线可视为两个能级之间的跃迁,所以在局部热平衡条件下,特征原子的发射谱线能量强度可以写为

$$I_E(\lambda) = A_{21}h\nu n_2 + B_{21}u_{\Delta}h\nu n_2 - B_{12}u_{\Delta}h\nu n_1, \quad (3)$$

式中右边的第一项是原子自发辐射的光强度,第二项是原子受激辐射的光强度,第三项是原子受激吸收的光强度。 A_{21}, B_{21}, B_{12} 是爱因斯坦系数, u_{Δ} 是背景辐射提供的能量强度。 n_1, n_2 分别是处于两个能级上的原子数目。由于在炼钢情况下,受激辐射的能量非常小,所以,仅仅考虑自发辐射和受激吸收的能量即可,这样原子特征谱线上的发射强度可以写为

$$I_E(\lambda) = A_{21}h\nu n_2 - B_{12}u_{\Delta}h\nu n_1. \quad (4)$$

受激吸收所减少的光强值就是产生自吸现象的原因。由于背景辐射的能量正好能够补偿自吸所吸收的能量,那么,就有

$$I_G(\lambda) = B_{12}u_{\Delta}h\nu n_1. \quad (5)$$

根据爱因斯坦系数之间的关系,以及在局部热平衡下,处于两个能级的原子数目仍然服从玻耳兹曼分布,可以得到

$$I_G(\nu) + I_E(\nu) = \frac{8\pi h^2 \nu^4}{c^3} \cdot B_{12} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right) n_1, \quad (6)$$

式中 k 是玻耳兹曼常数, T 是火焰场的温度。

背景辐射的能量密度,在转炉炼钢的情况下可以做近似为

$$u_{\Delta} = I_G \frac{L}{c}, \quad (7)$$

式中 L 是光在火焰中的行程,即炉口的宽度。又可以得到

$$B_{12}n_1 = c/(h\nu L). \quad (8)$$

将(8)式代入(6)式中,整理可以得到光谱强度值和温度之间的关系式

$$T = \frac{N}{-\ln[I(\nu)] + M}, \quad (9)$$

式中 $N = \frac{h\nu}{k}, M = \ln\left(\frac{Lc^2}{8\pi h\nu^3}\right)$ 。考虑到 CCD 光纤光谱仪的光谱特性,即光谱仪在不同波长下的响应不同,实际的光谱光强度需要在测量得到的光强度上乘以一个响应率系数,因此(9)式可以改写成

$$T = \frac{N}{-\ln(I) + M + \xi^*}, \quad (10)$$

式中 ξ^* 是光谱响应系数的自然对数。

3 实验分析

(10)式需要满足两个条件:1)燃烧系统应该局部热平衡系统;2)背景辐射的能量应大于自吸损失的能量。在炼钢过程中,转炉可以假设成一个热平衡系统(探测距离足够远)。CCD 的光纤光谱仪放置于离转炉 20 m 处,因此,得到的光谱是一个小区域的火焰光谱。因此,可以将这种光谱强度分布作为一个局部热平衡的频谱分布。据冶金技术,温度在转换器的多样化分为三步。第一步是在加热的过程,是由于在转炉内的反应是放热反应,在这一步,对钢水温度急剧上升。第二步是稳步上升的过程。在这一步,在转炉内的反应主要是碳和氧之间,此时,烟雾的干扰反比较严重,表现为光谱分布出现大的抖动,钢水温度上升缓慢,近乎一个平稳的平台期。最后一步是温度下降的过程,这是由于碳元素在钢水中的含量太低,碳氧反应不再剧烈,该钢水温度出现了下降。而钢水的温度和火焰的温度之间处于一种平衡状态,可以认为火焰的温度就是钢水的温度。在 FES 的温度测量,选择在 589 nm 的特征谱线(图 3)。光谱仪的分辨率为 0.2 nm,而在得到的

光谱中,在 589 nm 处的特征光谱峰值的宽度有 5 个波长,所以,特征波长带宽为 1 nm。

在实际转炉炼钢中,在一炉中利用副枪在不同的时间内测量 10 次火焰温度,和计算出的火焰温度值比较,结果如图 4 所示。由图 4 可以发现两者比较接近。这说明背景辐射的能量能够补偿特征原子由于自吸而产生的能量损失,并且,火焰温度可以通过火焰发射光谱法进行测量。但是,存在的问题是,现场对光谱仪的干扰是无法避免的,特别是初期烟雾比较浓重时。

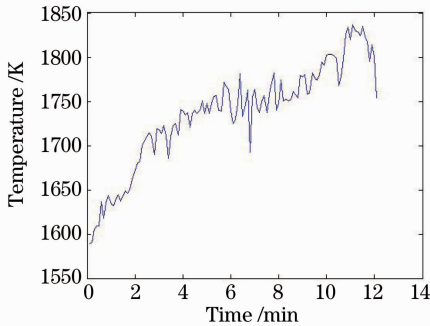


图 3 589 nm 处原子特征谱线计算温度曲线

Fig. 3 Temperature curve calculated by using the characteristic emission at 589 nm

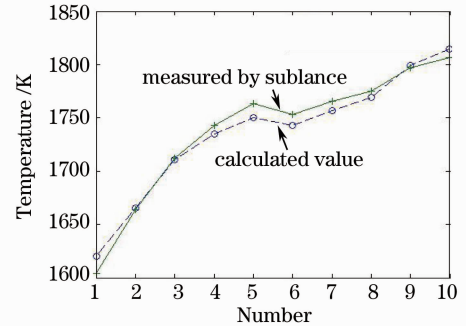


图 4 火焰温度场测量值和计算值比较

Fig. 4 Comparison between the calculated value and measured value

4 结 论

在转炉的情况下,可以用火焰发射光谱法来测量炉内钢水温度。实验结果表明,由 FES 计算给出的温度变化与冶金理论中钢水的温度变化一致。在 FES 测温法中,由于温度分布不均,应该考虑背景辐射能量对特征原子跃迁的作用。在这种情况下,背景辐射能量补偿了特征谱中心波长的自吸能量。在测量过程中,烟雾对光谱仪的干扰导致的温度曲线不够平滑,这种曲线的抖动是不可避免的,不过由于实际炼钢中,无需全程对钢水的稳定进行实时的控制,所以可以采用取样的方式来避免这种干扰。

参 考 文 献

- Rosario C. Sausa, Demetris T. Venizelos. Flame structure studies of burner-stabilized, N₂O-and NO₂-containing flames by mass spectrometry, laser-induced fluorescence, and modeling[C]. *SPIE*, 2001, **4448**: 1~7
- Waldemar Wojcik, Tomasz Golec, Andrzej Kotyra *et al.*. Application of flame monitoring system for flame spectrum analysis in industrial conditions[C]. *SPIE*, 2004, **5576**: 377~380
- C. TH. J. Aekemade, R. Herrmann. Principles of Flame Spectroscopy[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984
- S. Zimmermann, S. Wischhusen, J. Muller. Micromachined flame ionization detector and flame spectrometer[C]. *SPIE*, 1999, **3876**: 238~245
- Cheng Zhihai, Cai Xiaoshu, Yue Jun *et al.*. The experiment study of flame temperature measurement by the characteristic emission spectrum[J]. *J. Engineering Thermophysics*, 2007, **28**(s2): 221~224
程智海,蔡小舒,岳俊等. 火焰特征辐射谱线测温方法实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2007, **28**(s2): 221~224
- Cheng Zhihai, Cai Xiaoshu. Measurement of pulverized coal flame's temperature by spectrum analysis of characteristic atomic emissions[J]. *Power Engineering*, 2007, **27**(6): 918~922
程智海,蔡小舒. 应用原子特征发射谱线法测量煤粉火焰温度[J]. *动力工程*, 2007, **27**(6): 918~922
- Wang Yazhen, Li Chengzuo. BOF steelmaking[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003. 332~338
王雅贞,李承祚. 转炉炼钢问答 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003. 332~338
- Hamadi M. Ben, P. Vervisch, A. Coppalle. Radiation properties of soot from premixed flat flame[J]. *Combustion and Flame*, 1987, **68**(1): 57~67
- C. Beatrice, C. Bertoli, N. C. Cirillo. Two-color pyrometry measurements of soot loading in a diesel engine burning model fuels of varying quality[J]. *Combust. Sci. and Technol.*, 1995, **110**(11): 321~339
- Cai Xiaoshu, Ji Kun, Zhao Zhijun. The measurement of radiation spectrum of flame of different fuel. [J]. *Engineering Thermophysics*, 2004, **25**(1): 171~173
蔡小舒,季琨,赵志军. 不同种类燃料火焰的辐射光谱测量[J]. *工程热物理学报*, 2004, **25**(1): 171~173