

基于多光谱测温法的转炉炉口火焰温度预测研究

邵艳明 赵书安 陈延如 俞仁龙 赵琦*

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

摘要 对转炉炼钢过程中炉口火焰温度的非接触式在线测量进行了研究。采用无需假设发射率模型的基于最小二乘法的多光谱测温法,利用海洋光学的微型光谱仪USB4000作为分光器件,构建了相应的炉口火焰辐射信息采集系统。采用与炉口火焰温度相近的炉内铁水作为辐射源对系统进行标定,获得其响应系数。选取不同波段的光谱数据,分别将改进的标定方式以及利用卤钨灯进行标定的方式应用于倒炉铁水温度的测量,测温结果表明,波长区间为600~740 nm时,采用改进的方式取得的结果最优。将该方法应用于冶炼过程中炉口火焰温度的在线测量,得到炉口火焰温度在整个吹炼过程中的变化趋势。结果表明,采用所提出的测温方法不仅可以在线反映转炉操作对炉口火焰温度的影响,同时也为炉口操作工人判断炉内铁水的温度提供了有效的依据。

关键词 光谱学;多光谱测温;最小二乘法;校正;氧气顶吹转炉

中图分类号 O433.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1130002

Temperature Measurement of Flame at Converter Mouth Based on Multi-Spectral Thermometry

Shao Yanming Zhao Shu'an Chen Yanru Yu Renlong Zhao Qi

*School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210094, China*

Abstract The non-contact online temperature measurement of the flame at the converter mouth during the basic oxygen steelmaking process is investigated. Multi-spectral radiation thermometry based on the least squares method in which no emissivity model is needed is adopted for the flame temperature measurement. A flame radiation signal collection system at the converter mouth is constructed by taking the Ocean Optics miniature spectrometer USB4000 as the beam split element. The responsivity of the proposed system is obtained by adopting the radiation of the liquid steel in the converter whose temperature is close to that of the flame at the converter mouth for the system calibration. Temperature of the liquid steel during tapping is measured using spectral data of different wavelength bands with responsivity obtained by the improved calibration method and the halogen lamp method, respectively. The results show that the improved calibration method can achieve the best performance in the wavelength band of 600~740 nm. The online flame temperature measurement at the converter mouth is carried out with the proposed method, and the variation in the flame temperature during the steelmaking process is obtained. The results show that the proposed method can not only indicate the impact of the converter operation on the flame temperature at the converter mouth, but also offer a useful auxiliary way for the operators to control the temperature of the liquid steel in the converter.

Key words spectroscopy; multi-spectral thermometry; least squares method; calibration; basic oxygen furnace

OCIS codes 300.2140; 300.6550; 280.2470; 280.6780

收稿日期: 2015-06-01; 收到修改稿日期: 2015-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(61107011, 61077012)、高等学校博士学科点专项科研基金(20123219110021)

作者简介: 邵艳明(1988—),男,博士研究生,主要从事光谱分析、特征提取方面的研究。E-mail: sym2012go@163.com

导师简介: 陈延如(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事光学工程方面的研究。E-mail: yrchen2002@yahoo.com

*通信联系人。E-mail: zhaoqi@njjust.edu.cn

1 引 言

氧气顶吹转炉炼钢主要是指通过加料、氧化反应等吹炼步骤,使得铁水的温度和成分达到一定要求的过程。其中,铁水温度和碳含量是两个主要参数,直接决定钢水是否符合出钢要求。目前大型钢厂一般采用副枪方式对吹炼过程中的铁水进行取样,获得铁水的成分和温度参数^[1-2],该方法无法实现实时测量,且受炉口尺寸限制而无法应用于目前仍大量存在的中小型转炉。为了实现转炉吹炼的在线、非接触式监控以及针对不同型号转炉的适用性,提出了基于炉口火焰辐射光谱的测量方式^[3-4]。目前利用发射光谱进行火焰温度的测量方法主要可以分为利用特征原子发射谱线和连续光谱进行测温两种方式。原子特征谱线法^[5-8]一般用于等离子体火焰的温度测量中,而转炉炉口火焰中存在大量的碳黑颗粒及其他原子,会干扰原子发射出的辐射,使得测量结果产生偏差。利用连续谱线测温时,又可分为双色法(DWRT)^[9-10]和多波长法(MRT)^[11-12]两种方法。双色法的优点是相邻两个波段之间的发射率差异可以忽略,而多波长法则可以利用更多的波长通道来计算火焰的温度,从而更加有效地利用所测得的火焰辐射光谱信息。

本文在现有的基于炉口火焰辐射光谱的测量方式下,采用基于最小二乘法的炉口火焰温度多光谱测量方法,该方法可以利用更多波段的光谱数据,而且无需假设发射率模型,在数值计算上也避免了过度拟合问题。为了得到更加精确的炉口火焰辐射信息,采用了改进的方式对设计的光电系统进行光学响应率校正,可以实现炉口火焰的非接触式实时测量,从而为转炉操作工人通过炉口火焰对铁水温度进行在线监控提供了有效的判断依据。

2 多光谱测温原理

采用多光谱辐射测温法计算温度时,使用的数值方法主要可分为精确法和最小二乘法。精确法在数学上是以 n 个未知数搭配 n 个方程式,在方程式与未知数个数相同的条件下求得未知数数值解的一种方法,而在多光谱辐射测温中,对于 n 个通道共有 n 个方程,由于待测目标的真实温度 T 和对应不同波段的 n 个光谱发射率 $\varepsilon(\lambda, T)$ 均为未知数,故共有 $n+1$ 个未知参量,因此为了解决该问题,通常需要引入发射率假设模型,认为发射率是与波长有关的表达式^[13-14],常见的假设有以下两种:

$$\varepsilon(\lambda, T) = 1 - \exp(-KL\lambda^\beta), \quad (1)$$

$$\varepsilon(\lambda, T) = \exp\left(\sum_{j=0}^m a_j \lambda_i^j\right), \quad m \leq n-2, i=1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

式中 K 和 β 为与波长无关的常数, L 为火焰的光学厚度, λ 为波长, a 为对应于不同波段的发射率模型系数。

因此,对于精确法而言,必须引入 $n+1$ 个不同波长下的辐射强度值才能产生 $n+1$ 个方程式来同时求解表面温度与发射率模型系数。然而,精确法在使用 3 个波长以上的辐射值时,可能会导致其数值过度回归而造成非常大的误差^[15]。为了克服数值过度回归的问题,最小二乘法是一个很好的选择,其目的在于找出最适当的回归曲线,利用数据点与该曲线最小差距的平方,可以避免因数据点的振荡过大而引入的误差。应用最小二乘法时,需要建立一个数学式来近似实验数据,其方程式为^[16]

$$\min_x \frac{1}{2} \|F(\mathbf{x}, \mathbf{x}_{\text{data}}) - \mathbf{y}_{\text{data}}\|_2^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [F(\mathbf{x}, \mathbf{x}_{\text{data}i}) - \mathbf{y}_{\text{data}i}]^2, \quad (3)$$

式中 $\mathbf{x} = [\varepsilon, T]$, 为包含发射率和温度的向量, \mathbf{x}_{data} 对应于 n 个通道的波长值, \mathbf{y}_{data} 则是相应通道的实际光谱辐射强度。关于 \mathbf{x} 的函数 F 即为关于发射率和温度的函数,为普朗克辐射公式:

$$F(\mathbf{x}, \lambda) = x_1 \cdot \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda x_2}\right) - 1 \right]}, \quad (4)$$

式中第一辐射常数 $C_1 = 2\pi hc^2$, 第二辐射常数 $C_2 = hc/k$, h, k 和 c 分别为普朗克常数、波尔兹曼常数和光速。

通过预设上下限,可以将拟合结果限制在实际可能的范围内。之后可以再对这些输出结果做具体分析,以判断是否使得目标函数取得全局最优值。考虑到转炉炼钢的实际情况,可以令发射率 $\varepsilon \in [0, 1]$, 温度 $T \in [1000, 3000]$ 。

3 实验装置

根据辐射光谱的不同特点,火焰可分为发光火焰和透明火焰两类。发光火焰内部含有烟粒,在可见光谱区内有连续光谱辐射;透明火焰的辐射光谱大多在红外区段,呈带状或线状辐射^[17]。考虑到人眼对辐射波长的感知范围,采用海洋光学的USB4000 VIS-NIR微型光谱仪作为辐射信息采集系统中的分光器件,该光谱仪采用非对称交叉 Czerny-Turner 光路,可以采集可见光及近红外部分的光线,响应波长范围为 350~1000 nm,光学分辨率为 1.5 nm FWHM(半峰全宽),现场实验时,整个系统架设于操作工人所在监控室内,距离炉口约为 20 m,整个系统基本上不受炼钢现场恶劣环境的影响,相对于副枪等装置,其维护成本很低。系统组成如图 1 所示,其中望远镜头负责将炉口火焰的辐射信息汇集到光纤中并传至光谱仪,光谱仪再将辐射信息进行光电转换得到相应的光谱强度信号,并传送至计算机进行后续分析和处理。

对不同钢厂转炉炉口采集到的火焰光谱数据进行比对分析后,发现炉口火焰光谱主要由连续的背景辐射光谱和两处线状谱线所构成,且分布位置相同,如图 2 所示,可见实验采用设备及数据处理方式适用于不同钢厂的转炉。

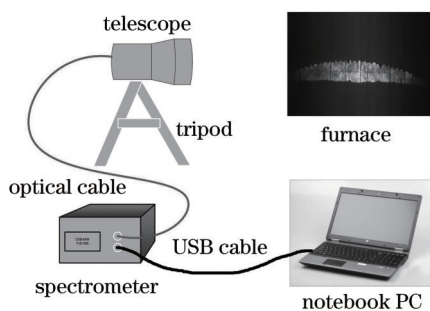


图 1 系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the designed system

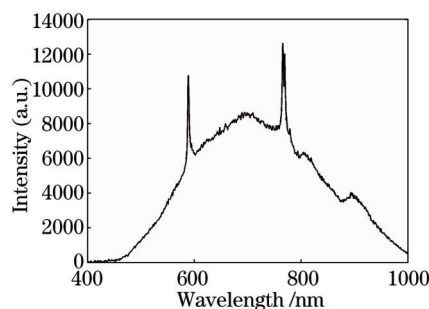


图 2 测得的光谱强度

Fig.2 Measured spectral intensity

4 系统校准

由于光纤的耗损、光谱仪的光栅效率以及 CCD 光谱响应率^[18-20]等因素的影响,光谱仪系统的输出与其接收到的火焰辐射信号之间存在一定的差异,需要通过系统标定进行如下转换:

$$D_{\lambda}(T) = S_{\lambda}(T)R_{\lambda}, \quad (5)$$

式中 $D_{\lambda}(T)$ 为系统在波长 λ 处测得的响应强度, $S_{\lambda}(T)$ 为对应的实际光谱辐射强度, R_{λ} 为整个系统的转换效率,且与被测对象的具体温度无关。通常采用色温为 3100K 的标准卤钨灯 LS-1 对系统进行转换效率的标定,其辐射覆盖 360~2500 nm 的可见光和近红外波段,标定结果如图 3 所示。图 3 (b) 所示卤钨灯的校正曲线是由图 3 (a) 中的普朗克强度曲线和实际测得的强度曲线经(5)式计算得到的。

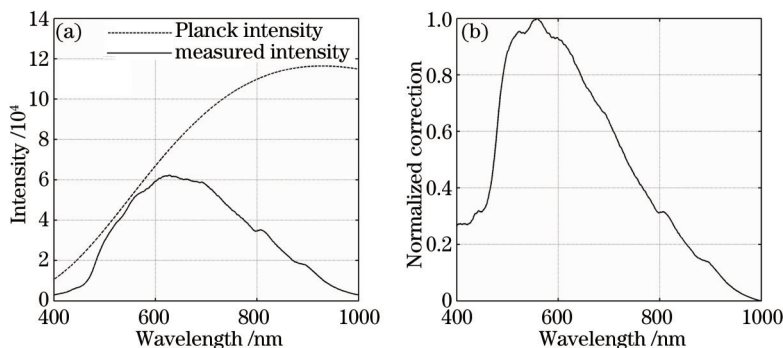


图 3 温度为 3100 K 的卤钨灯的标定结果。(a) 卤钨灯的普朗克强度和测得的响应强度;(b) 响应率曲线

Fig.3 Calibration result of the halogen lamp at 3100 K. (a) Planck intensity and measured intensity; (b) responsivity curve

由于炉口火焰的温度远低于 3100 K,因此转炉炼钢现场的空气造成的散射效果比标定时要明显;此外,现场测试时光谱仪系统距离转炉炉口约为 20 m,也会加剧火焰辐射在传播路径中的散射和吸收现象,因此,

在实际的炉口火焰辐射强度测量中,通过卤钨灯进行标定仍然存在一定的问题^[21]。

一般辐射光谱符合灰体分布的光源均可用于光谱仪系统的标定,而温度为 1900 K 左右的熔融铁水处于热平衡状态,可以认为其辐射特性符合灰体分布,因此,综合考虑温度和距离因素,实验选用倒炉取样时炉内铁水的辐射作为标定的辐射光源。

图 4 (a) 为利用热电偶所测温度为 1933.15 K 的铁水对应的光谱仪响应曲线,图 4 (b) 中两条曲线分别为利用铁水和卤素灯进行标定的归一化曲线。从图 4 (b) 可知,两者的校正曲线在 450 nm 以下存在很大区别,卤钨灯曲线比较光滑,而铁水曲线抖动严重。这主要是由于铁水温度对应的普朗克强度相对于卤钨灯要低很多,因此信噪比随着波长的减小而减小所造成的。位于 590 nm 和 760 nm 附近的两个凹陷是由铁水光谱中对应位置的吸收峰造成的,与图 2 中炉口火焰的两个发射峰位置相同,分别为 Na 和 K 的谱线^[22]。

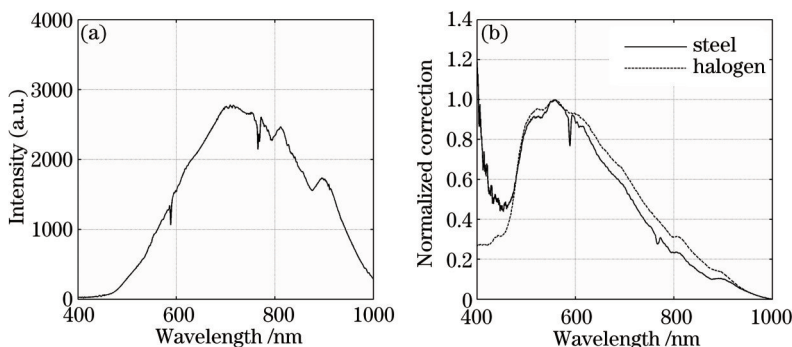


图 4 (a)1933.15 K 铁水的测得强度; (b)铁水与卤钨灯的校正曲线对比

Fig.4 (a) Measured intensity of liquid steel at 1933.15 K; (b) comparison of correction curves of liquid steel and halogen lamp

根据得到的系统响应率,可以对图 2 所示实时获取的炉口火焰辐射光谱进行还原,得到如图 5 所示的实际入射光谱强度分布。由图 5 可知,还原光谱在第二个特征峰之后的波段波动较大,这是由于在对应波段处的系统响应率低于其他波段,当用实际测得的响应强度去除该处的响应率后,对应的噪声被放大所致。因此在实际温度计算中应该尽量避免选用该波段的数据。

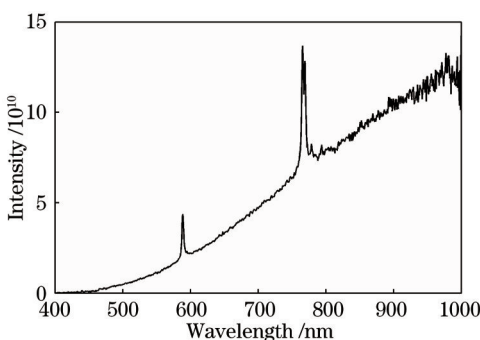


图 5 实际光谱强度

Fig.5 Actual spectral intensity

5 实验结果与分析

为了求解(3)式,需要给出发射率和温度的初始值。对于与真实值偏差较大的初始值,其输出结果可能会使求解陷入局部最优,为此需设置一个初始值矩阵,通过遍历矩阵中的每对组合,并取最优结果得到最终值。选用 11×11 矩阵 M 作为初始值:

$$M = \begin{bmatrix} (\varepsilon = 0, T = 3000) & (\varepsilon = 0.1, T = 3000) & \cdots & (\varepsilon = 0.9, T = 3000) & (\varepsilon = 1, T = 3000) \\ (\varepsilon = 0, T = 2800) & \ddots & & \ddots & (\varepsilon = 1, T = 2800) \\ \vdots & & & & \vdots \\ (\varepsilon = 0, T = 1200) & \ddots & & \ddots & (\varepsilon = 1, T = 1200) \\ (\varepsilon = 0, T = 1000) & (\varepsilon = 0.1, T = 1000) & \cdots & (\varepsilon = 0.9, T = 1000) & (\varepsilon = 1, T = 1000) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

对上述问题进行求解时,另外一个需要考虑的因素是需要衡量波段长度、计算时间和结果精确度。对于小的波段而言,拟合结果和实际数据之间可能更加接近,但是更容易受到噪声的影响,耗时较多,相比之下,长波段拟合结果考虑的是整体的趋势,部分数据点可能与拟合结果相差较大,但其耗时相对较短,且可以更好地利用所测得的光谱数据。

5.1 波段分析

为了寻找合适的波段,对倒炉时采集的其他4炉铁水辐射光谱进行了温度计算,并分别对波段 1(460~520 nm),波段 2(520~580 nm),波段 3(460~580 nm),波段 4(620~660 nm),波段 5(660~720 nm),波段 6(620~720 nm)以及波段 7(600~740 nm)进行分析,结果如表 1 所示。

表 1 不同波段的温度计算结果

Table 1 Temperature calculated with different wavelength bands

Actual temperature /K	Predicted temperature /K						
	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7
1912.15	1764.5	1890.5	1837.0	1901.4	1914.3	1911.0	1909.0
1911.15	1933.7	1786.7	1787.2	2077.5	1843.7	1928.1	1915.9
1916.15	1944.3	1856.4	1882.7	1978.9	1899.7	1926.2	1918.2
1900.15	1852.5	1822.7	1822.0	2016.4	1822.1	1882.1	1870.1

为了检验改进方式对该系统的测温准确度效果,采用卤钨灯标定得到的响应系数进行同样的计算,结果如表 2 所示。

表 2 卤钨灯校正的测温结果

Table 2 Temperature of halogen lamp correction

Actual temperature /K	Predicted temperature /K						
	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7
1912.15	1900.4	1912.3	1910.8	2031.9	2029.8	2015.0	2037.3
1911.15	2034.7	1945.4	1943.6	2238.2	1952.4	2037.8	2055.2
1916.15	2054.9	1894.0	1893.8	2121.5	2013.9	2033.1	2051.1
1900.15	1960.9	1987.9	1984.3	2165.4	1975.2	1985.8	2001.6

两种方式下的预测结果与实际温度之间的差值如图 6 和图 7 所示,其中序号为 1 至 7 的不同线条依次对应 7 个不同的波段。

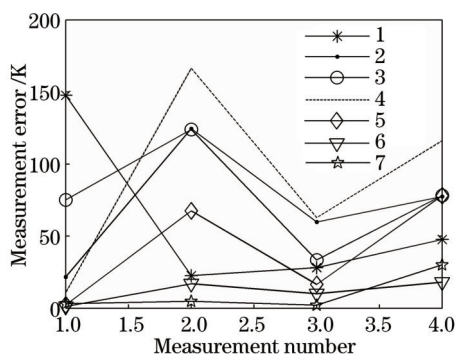


图 6 改进的校正测温偏差

Fig.6 Error of the improved correction method

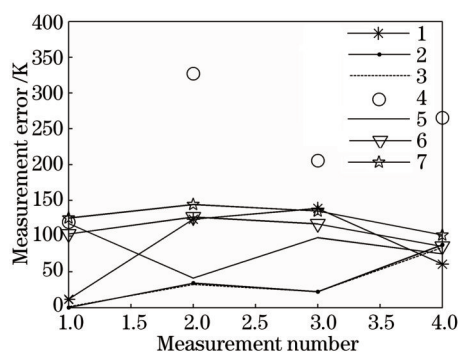


图 7 卤钨灯校正测温偏差

Fig.7 Error of the halogen lamp correction method

实验结果表明,利用卤钨灯标定的计算结果在低波长部分比较精确,而对于改进的方式,在选择波段 7 (600~740 nm)时可得到最优计算结果。实际计算中,采用不同波段对(6)式的初值矩阵进行寻优所需的时间如表 3 所示。

表3 不同波段的计算时间

Table 3 Computational time of different wavelength bands

Wavelength band /nm	Consumed time /s
460~520	1.3481
520~580	1.3885
460~580	1.3151
620~660	2.7973
660~720	2.3407
620~720	1.9806
600~740	1.7503

此外,由于实际光谱辐射强度在低波长部分的能量较弱,而波段7对应的强度较大,综合考虑信噪比及计算时间等因素,最终选取改进方式以及600~740 nm处的光谱进行炉口火焰温度的测量。

5.2 计算结果分析

选用波段7进行炉口火焰温度的计算,可得如图8所示的温度预测曲线。依据现场炼钢工人的经验,炼钢过程中,铁水的温度大致从1500 K逐步上升到1900 K左右,不同的钢种略有不同,而炉口火焰的温度一般会比铁水的温度高几百度。由图8可知,温度预测结果大致符合实际火焰的温度变化区间,其中曲线在过程中有若干上下起伏,这主要是由于操作工人在冶炼过程中进行氧枪的升降操作造成的火焰温度变化,其他一些比较大的起伏则是由于冶炼过程中的加料,如石灰石、轻烧、矿石等造成的炉内铁水以及相应火焰温度的变化。

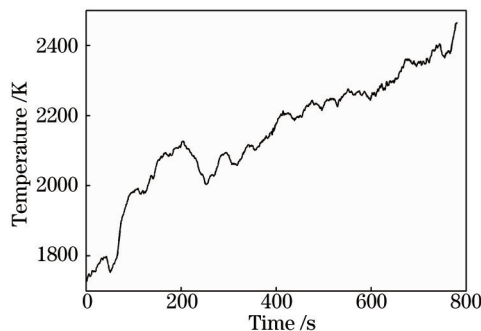


图8 实际测得的炉口火焰温度变化曲线

Fig.8 Measured temperature variation curve of the flame at the converter mouth

6 结 论

研究了基于最小二乘法的转炉炉口火焰多光谱法测温技术,该方法无需假设发射率模型,并且可以充分利用测得的光谱信息,对数据的利用更为有效。为了获得更加准确的系统响应系数,提出了通过炉内铁水的辐射光谱来标定系统响应率的改进方式,并对现场吹炼过程的炉口火焰温度进行了测试。实验结果表明,该方法可以有效地响应转炉吹炼过程中的操作,并对炉口火焰温度的变化趋势有较好的预测能力,能够为转炉操作工人预测炉内铁水的温度提供有效的依据。关于炉内铁水温度的准确预测,还需结合转炉生产中的加料等其他参数,在后续的工作中进一步确定。

参 考 文 献

- 1 Xie Shuming, Tao Jun, Chai Tianyou. BOF steelmaking endpoint control based on neural network[J]. Control Theory & Applications, 2003, 20(6): 903-907.
谢书明,陶钧,柴天佑. 基于神经网络的转炉炼钢终点控制[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(6): 903-907.
- 2 A Bigeev, V Baitman. Adapting a mathematical model of the end of the blow of a converter heat to existing conditions in the oxygen-converter shop at the Magnitogorsk metallurgical combine[J]. Metallurgist, 2006, 50(9): 469-472.
- 3 Wen Hongyuan, Zhao Qi, Chen Yanru, *et al.*. Basic oxygen furnace endpoint forecasting model based on radiation and modified neural network[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(11): 2131-2135.
温宏愿,赵琦,陈延如,等. 基于炉口辐射和改进神经网络的转炉终点预测模型[J]. 光学学报, 2008, 28(11): 2131-2135.
- 4 L F Xu, W S Li, M Zhang, *et al.*. A model of basic oxygen furnace (BOF) end-point prediction based on spectrum information of the furnace

- flame with support vector machine (SVM)[J]. *Optik*, 2011, 122(7): 594–598.
- 5 Xu Lingfei, Li Wusen, Chen Yanru, *et al.*. Thermometry measurements in basic oxygen furnace by applying flame emission spectrum[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(5): 053001.
许凌飞, 李武森, 陈延如, 等. 光谱测温法应用于转炉炼钢火焰测温[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(5): 053001.
- 6 Cheng Zhihai, Cai Xiaoshu. Measurement of pulverized coal flame's temperature by spectrum analysis of characteristic atomic emissions [J]. *Journal of 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.
- 7 Chen Xiaobin, Cai Xiaoshu, Fan Xueliang, *et al.*. Experimental study on flame temperature measurement by double line of atomic emission spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(12): 3177–3180.
陈晓斌, 蔡小舒, 范学良, 等. 原子发射双谱线法测火焰温度的实验研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(12): 3177–3180.
- 8 Sun Chengqi, Gao Yang, Yang Deming, *et al.*. Spectroscopic method for measuring electron temperature and electron density of thermal spray plasma[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(4): 043001.
孙成琪, 高 阳, 杨德明, 等. 光谱法测量低压热喷涂等离子体的电子温度和电子密度[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(4): 043001.
- 9 Y P Sun, C Lou, H C Zhou. A simple judgment method of gray property of flames based on spectral analysis and the two-color method for measurements of temperatures and emissivity[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(1): 735–741.
- 10 W J Yan, H C Zhou, Z W Jiang, *et al.*. Experiments on measurement of temperature and emissivity of municipal solid waste (MSW) combustion by spectral analysis and image processing in visible spectrum [J]. *Energy & Fuels*, 2013, 27(11): 6754–6762.
- 11 Wang Yongqing, Chen Yanru, Zhao Qi, *et al.*. Multi-spectral measurement of basic oxygen furnace flame temperature[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(11): 2920–2924.
王勇青, 陈延如, 赵 琦, 等. 氧气顶炉口火焰温度多光谱分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(11): 2920–2924.
- 12 Sun Kun, Sun Xiaogang, Dai Jingmin. Development of multi-spectral thermometer for explosion flame true temperature measurement [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(3): 849–852.
孙 崑, 孙晓刚, 戴景民. 测量爆炸火焰真温的多光谱温度计的研制[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(3): 849–852.
- 13 Zhou Jie. Experimental study of flame temperature measurement based on combustion flame radiation multi-wavelength analysis[J]. *Power Engineering*, 1999, 19(6): 460–465.
周 洁. 基于辐射强度多光谱分析的燃烧火焰温度测量方法的实验研究[J]. *动力工程*, 1999, 19(6): 460–465.
- 14 Zhai Yang, Zhu Rihong, Shen Hua, *et al.*. Multi-spectral radiation based transient pyrometer for high speed dynamic system measurement [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(4): 698–704.
翟 洋, 朱日宏, 沈 华, 等. 多光谱瞬态测温计用于动力发射系统火焰测试[J]. *应用光学*, 2011, 32(4): 698–704.
- 15 B K Doloresco. Review of Multispectral Radiation Thermometry and Development of Constrained Minimization Method[D]. West Lafayette: Purdue University, 1986: 12–20.
- 16 M V Hansen. Flame Temperature Measurement in an Internal Combustion Engine[D]. Copenhagen: Technical University of Denmark, 2010: 24–28.
- 17 A G Gaydon, H G Wolfhard. *Flames, Their Structure, Radiation and Temperature*[M]. Han Zhaocang Trans. Beijing: Chinese Industry Press, 1965: 288–302.
给登, 沃弗哈尔德. 火焰的结构、辐射与温度[M]. 韩昭沧译. 北京: 中国工业出版社, 1965: 288–302.
- 18 Liu Yaqun, Tang Shunxing, Guo Yajing, *et al.*. Analysis of influence of CCD's nonlinear photoelectric characterization on evaluating the high power laser beam quality[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(4): 0402001.
刘亚群, 唐顺兴, 郭亚晶, 等. CCD 光电响应非线性特性对高功率激光光束质量评价的影响[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0402001.
- 19 Li Zhiwei, Xiong Wei, Shi Hailiang, *et al.*. Correction of detector response error for hyperspectral spatial heterodyne interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0530001.
李志伟, 熊 伟, 施海亮, 等. 超光谱空间外差干涉仪探测器响应误差校正[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0530001.
- 20 Zhang Zihui, Wang Shurong, Huang Yu. New absolute spectral irradiance source with wide band and monochromatic light outputting[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(5): 0514002.
张子辉, 王淑荣, 黄 煜. 新型宽波段单色输出绝对光谱辐照源[J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0514002.
- 21 S Keyvan, R Rossow, C Romero. Blackbody-based calibration for temperature calculations in the visible and near-IR spectral ranges using a spectrometer[J]. *Fuel*, 2006, 85: 796–802.
- 22 S Keyvan, R Rossow, C Romero, *et al.*. Comparison between visible and near-IR flame spectra from natural gas-fired furnace for blackbody temperature measurements[J]. *Fuel*, 2004, 83: 1175–1181.

栏目编辑: 吴秀娟