

利用辐射光谱法开展发动机燃烧火焰 参数在线测量

杨 斌^{1,2}, 桂欣扬^{1,2}, 周 骛^{1,2}, 姜勇俊^{1,2},
秦 飞³, 蔡小舒^{1,2}, 何国强³

1. 上海理工大学 能源与动力工程学院 颗粒与两相流测量研究所, 上海 200093;
2. 上海理工大学 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093;
3. 西北工业大学 航天学院 燃烧、热结构与内流场重点实验室, 西安 710072)

摘 要: 针对发动机高温燃烧火焰参数非接触式在线原位测量难题,提出了基于火焰辐射光谱(radiation spectroscopy, RS)的火焰参数在线测量方法,采用光纤光谱仪搭建了发动机燃烧火焰参数在线测量系统,并利用黑体炉对光谱仪电荷耦合元件(charge-coupled device, CCD)波长响应特性进行了标定.之后,应用该系统获得了火箭基组合循环(rocket based combined cycle, RBCC)发动机地面试验高温燃烧火焰 200~1100 nm波段辐射光谱,结合普朗克定律与最小二乘法,实现了火焰温度与辐射率参数的在线测量,为发动机燃烧诊断与优化提供了直接数据支撑.

关 键 词: 在线测量方法; 发动机燃烧诊断; 辐射光谱法; 燃烧火焰参数; 温度测量方法

中图分类号: V23; O433.5+2; TH81

文献标志码: A

On-line parameters measurement of combustion flame in engine using radiation spectroscopy

YANG Bin^{1,2}, GUI Xin-yang^{1,2}, ZHOU Wu^{1,2}, JIANG Yong-jun^{1,2},
QIN Fei³, CAI Xiao-shu^{1,2}, HE Guo-qiang³

- (1. Institute of Particle and Two-phase Flow Measurement,
School of Energy and Power Engineering,
University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering,
University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
3. Science and Technology on Combustion,
Internal Flow and Thermal-Structure Laboratory,
School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: For the non-intrusive, on-line and in-situ measurement of high-temperature combustion flame in engine, the method based on radiation spectroscopy (RS) was presented. The system using optical fiber spectrometer was designed for on-line parameters measurements of flame in engine. The wavelength response of charge-coupled device (CCD) was calibrated by the blackbody furnace. Then, the radiation spectroscopy range of 200—1100 nm wavelength of high temperature flame in rocket based combined cycle (RBCC) engine

收稿日期: 2014-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(51327803); 上海市科委科研计划项目(13DZ2260900);

上海高校青年教师培养资助计划项目(ZZslg15002)资助

作者简介: 杨斌(1985—),男,江西上犹人,讲师,博士,主要从事燃烧与多相流测量方法研究.

ground testing was obtained by using this system, and the temperature and radiance of flame were determined with Planck radiation law and the least square method. It can provide important reference for combustion diagnostics and optimization of engine.

Key words: on-line measurement; combustion diagnostics of engine; radiation spectroscopy; combustion flam parameters; thermometry

火焰作为发动机燃烧的现象表征,其参数的测量有助于揭示发动机燃烧机理和燃烧过程规律,同时对高效、稳定与低污染物排放燃烧的组织优化具有重要意义^[1-3]. 然而,发动机内高温燃烧过程是一个极其复杂的多相、多场耦合的物理化学过程,火焰参数在线原位测量十分困难^[4]. 温度测量主要分为接触和非接触式两种. 诸如热电偶、热电阻等接触式测量手段虽然结构简单,测量可靠,但由于存在易干扰燃烧流场,存在测温上限,动态响应差等缺点^[5],难以用于高温火焰测量. 非接触式测量方法中,辐射光谱(radiation spectroscopy, RS)法是利用火焰自身辐射因温度、成分等而异的特点,基于普朗克黑体辐射建立的辐射强度与波长的关系,通过测量辐射强度实现燃烧的在线诊断^[6-9]. 由于高温火焰的辐射率是波长的函数,为消除辐射率随波长变化的影响及提高测温精度,辐射光谱法又由此逐步发展了双波长和多波长辐射测温法. 与诸如平面激光诱导荧光(planar laser induced fluorescence, PLIF)、相干反斯托克斯拉曼光谱(Coherent anti-Stokes Raman spectroscopy, CARS)、可调谐半导体激光吸收光谱(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)等主动式激光光谱技术相比^[10-12],辐射光谱法具有无需外加光源,并且与图像法结合,能够获得燃烧参数空间分布信息等优点^[13],近年来在航空宇航推进^[14]、锅炉^[15]和火灾爆炸^[16]等领域都有了应用.

本文在之前的研究基础上,提出基于 200~1100 nm 波段辐射光谱的火焰参数在线测量方法,采用光纤光谱仪搭建发动机燃烧火焰参数在线测量系统,并将其应用于火箭基组合循环(rocket based combined cycle, RBCC)发动机地面试验,实现发动机高温燃烧火焰参数的在线测量.

1 辐射光谱法测量原理

基于辐射光谱的火焰参数在线测量系统如图 1 所示. 利用光纤光谱仪对火焰光谱进行测量. 火

焰的辐射经过安装于探头内的透镜折射后汇聚到一根石英光纤上,该光纤将接收到的辐射信号传递给微型电荷耦合元件(charge-coupled device, CCD),转化为电信号后,再经模/数转换后由计算机记录并处理.

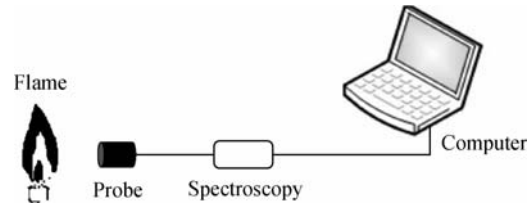


图 1 辐射光谱法测量示意图
Fig. 1 Schematic of radiation spectroscopy

根据普朗克定律,火焰辐射波长 λ 与辐射强度 E_λ 的关系为

$$E_\lambda = \epsilon(\lambda, T) \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} \tag{1}$$

式中 $\epsilon(\lambda, T)$ 为辐射率函数, C_1, C_2 为辐射常量, T 为火焰温度.

为简化计算,可将燃烧火焰辐射视为灰体辐射,即将辐射率函数 $\epsilon(\lambda_i, T)$ 视为一个常数,不考虑其随波长的变化. 同时,将试验得到的光谱数据经标定后,利用最小二乘法结合普朗克定律,设定拟合目标函数为

$$f(\epsilon') = \sum_{i=1}^n (\ln E_{\lambda_i} - y_i)^2 = \sum_{i=1}^n (\ln k + \epsilon' - 5 \ln \lambda_i - \frac{C_2}{\lambda_i} T' - y_i)^2 \tag{2}$$

其中 $\epsilon' = \ln \epsilon$, $T' = 1/T$, ϵ 为辐射率, E_{λ_i} 是理论辐射强度, y_i 是实际测量辐射强度, T 为温度. 当 $f(\epsilon')$ 取最小值时,对应的 ϵ, T 值即为所求.

2 CCD 波长响应特性标定

由于光纤光谱仪中 CCD 元件对不同波长的入射光响应特性不同,为使检测系统输出的光谱曲线能正确反映辐射源辐射强度与波长之间的相对关系,需对系统的响应强度进行标定.

CCD 波长响应特性标定利用黑体炉完成. 通过测量黑体炉辐射的响应强度并与该温度下黑体理论辐射计算值进行比较即可得到 CCD 波长响应修正系数 k_λ .

1200℃ 黑体辐射计算强度 $V(I_\lambda)$ 及黑体炉实验获得的 CCD 响应强度计数值 $V(I_\lambda)'$ (光谱仪强度计数值) 随波长 λ 的变化曲线如图 2 所示, 其中实线代表黑体炉标定试验中 CCD 的响应曲线, 虚线代表黑体辐射理论计算所得曲线.

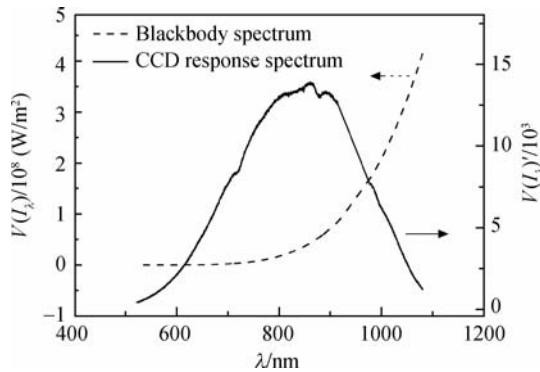


图 2 1200℃ 下黑体辐射计算及试验所得光谱
Fig. 2 Blackbody spectrum and CCD response spectrum at temperature of 1200℃

将图 2 中 CCD 响应强度和黑体辐射强度进行比较, 可以得到 CCD 波长响应修正系数 k_λ , 如公式(3)所示

$$k_\lambda = \frac{V(I_\lambda)'}{V(I_\lambda)} \quad (3)$$

CCD 波长响应修正系数 k_λ 随波长的变化曲线如图 3 所示.

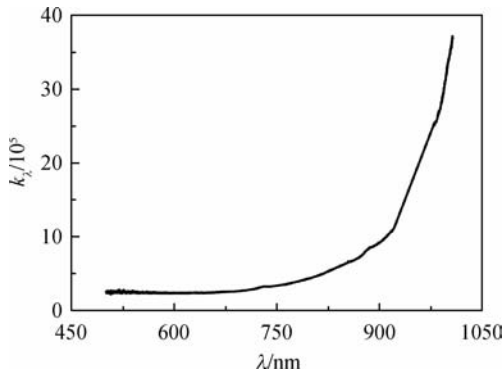


图 3 CCD 波长响应修正系数

3 试验系统与条件

发动机燃烧火焰参数测量试验系统如图 4 所

示, 其中图 4(a) 为系统示意图, 图 4(b) 为光纤探头与发动机连接处照片. 为保证火焰信号的连续性, 试验选取靠近发动机出口处的压强测点作为探头安装处. 发动机燃烧火焰辐射光信号由探头汇集到光纤并传输至光纤光谱仪 (Ocean Optics, HR4000), 光谱仪将光信号转换为电信号, 并通过模/数转换, 由计算机记录试验所得各波长对应 CCD 响应强度数据并进行处理.

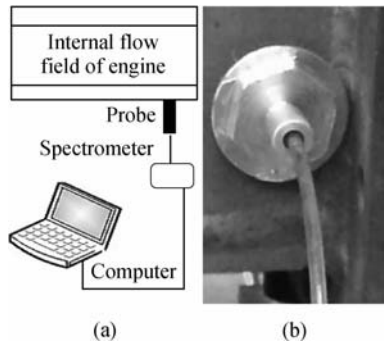


图 4 试验系统
Fig. 4 Experiment system

直连式 RBCC 发动机地面试验^[17] 时序如图 5 所示. 以空气阀打开作为时间零点; 第 3.5 s, 加热火箭工作; 第 5 s, 主火箭开始工作, 同时二次燃料开始喷注; 第 7.5 s, 主火箭停止工作; 第 9.5 s, 加热火箭停止工作, 同时二次燃料阀门关闭. 第 19.5 s, 空气阀门关闭, 试验结束.

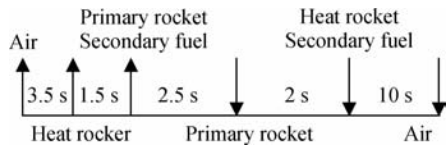


图 5 发动机试验时序
Fig. 5 Experimental timing sequence

4 试验结果及分析

试验获得每 50 ms 积分时间段的辐射光谱, 数据处理首先消除试验前记录的背景光信号, 然后按照 CCD 波长响应修正系数转换, 再结合普朗克定律与最小二乘法, 即式(3), 获得燃烧温度与辐射率随时间的变化. 对试验结果进行分析如下:

4.1 典型时刻火焰辐射光谱分析

以煤油为燃料的发动机火焰燃烧产物主要由气相的 H_2O , CO_2 和固相的炭黑颗粒等组成, 火焰辐射光谱是多组分非均匀气、液、固多相吸收、

发射、散射和变折射率的综合效应。由于 H_2O 、 CO_2 等气相分子对光强的发射和吸收具有选择性,因此,其辐射光谱只在红外波段一些特征谱带上具有较强信号,而炭黑固体颗粒的辐射率 ϵ 随波长变化不大,可看作灰体,其辐射光谱具有连续特征。本文提出的基于 200~1100 nm 波段辐射光谱的火焰参数测量方法正是针对含有炭黑固体颗粒的连续辐射光谱,对于在 200~1100 nm 波段辐射较弱的纯气相火焰辐射光谱无法进行参数测量。

从空气阀门打开,3.5 s 加热火箭工作至 5.0 s 主火箭开始工作阶段,即 0~5.0 s 时间段,无明显火焰辐射光谱。这是因为在空气阀打开阶段,空气温度低,在 200~1100 nm 波段辐射较弱;而当加热火箭工作后,虽然燃气温度提升,但是由于加热火箭以酒精作为燃料,酒精燃烧后主要产物为 H_2O 、 CO_2 等三原子气体,其辐射为非连续的特征带状光谱,且主要集中在红外波段,在 200~1100 nm 的测试波段内辐射很弱。

当 5.0 s 主火箭工作,同时喷入二次燃料后,由于二次燃料采用煤油作为燃料,碳元素含量高,燃气中出现炭黑等固体颗粒物,高温固体颗粒物在 200~1100 nm 波段具有较强连续辐射,因此,从 5.0 s 左右开始,光谱仪能够探测到明显的辐射光谱,此时采集的光谱数据即为有效数据,可用于温度和辐射率计算。如图 6 所示,为 5.05 s 时刻火焰辐射光谱,可见此时光谱较为光滑,光强最大出现在 770 nm 附近,而在 950 nm 附近由于光纤特性出现吸收。忽略非光滑光谱特征,根据普朗克辐射定律,结合最小二乘法拟合,可得火焰温度为 1547.6 K,辐射率为 0.7625。

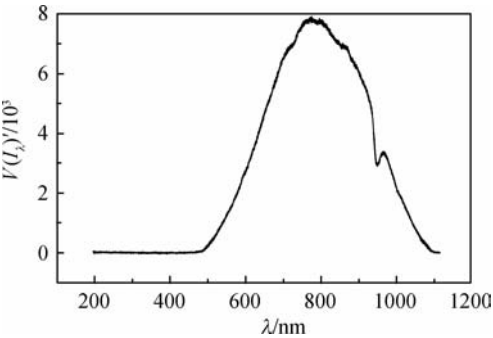


图 6 试验 5.05 s 时刻火焰辐射光谱
Fig. 6 Radiation spectroscopy of flame in 5.05 s

试验第 9.05 s 时刻,主火箭停止工作,此时发动机只喷入二次燃料,其辐射光谱如图 7 所示。可

见,辐射光谱仍然具有图 6 所示的光谱特征,光强最大值出现在 730 nm 附近,同时,在 591,770 nm 和 674 nm 附近出现了明显的原子光谱辐射谱线^[18],根据美国国家标准与技术研究院原子光谱数据库(NIST atomic spectra database)^[19]查询,可知分别是 Na,K,Li 碱金属痕量元素的原子谱线。可知,随着燃烧火焰温度的升高,这些煤油中含有的碱金属痕量元素原子会自发发射原子光谱,进而在辐射光谱中产生孤立的发射谱线。忽略非光滑光谱特征,通过普朗克辐射定律,结合最小二乘法拟合,可得到此时的温度为 1958.2 K,辐射率为 0.02。根据维恩定律可知,温度提升,对应于最大辐射力的波长将减小,即曲线峰值左移,这与图 6、图 7 所示的光谱特征吻合。同时由于燃烧更加趋于稳定和充分,产物中炭黑固体颗粒减少,辐射率降低,因此,图 7 所示的光谱强度整体比图 6 所示的强度弱。

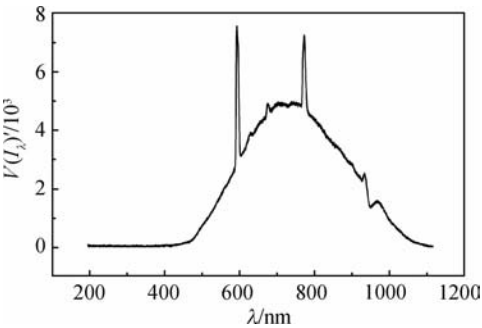


图 7 试验 9.05 s 时刻火焰辐射光谱
Fig. 7 Radiation spectroscopy of flame in 9.05 s

4.2 温度及辐射率随时间变化规律

试验设定光谱仪积分时间为 50 ms,即每秒获得 20 个光谱数据文件。对煤油二次燃料喷注时间段获得的有效辐射光谱数据进行逐一分析,得到温度 T 与辐射率 ϵ 随时间的变化曲线,如图 8 所示。其中,实线为辐射率变化曲线,虚线为温度变化曲线。通过与试验时序对比,可知当二次燃料喷入(即 5.0 s 时刻)后,燃烧火焰温度与辐射率同时急剧提升,辐射率瞬间达 0.7625 后逐渐降低。这是因为二次燃料喷入后,在点火初始阶段,燃烧不稳定且效率低,大量的炭黑固体颗粒物形成,与主火箭高温燃气混合,造成辐射率接近 1,随着燃烧过程的稳定,炭黑颗粒减少,相应的辐射率降低。

发动机二次燃料喷注阶段存在两种工况:主火箭工作阶段(即 5.0~7.5 s 时间段),可见燃烧火焰温度和辐射率都波动较大,这是因为二次燃

料燃烧初始阶段,点火不稳定,且与主火箭高速羽流掺混,相应的火焰参数变化较大;主火箭停止工作阶段(即 7.5~9.5 s 时间段),火焰温度与辐射率较为平稳,且温度较高,辐射率较低。这是因为随着燃烧产生的热量不断的积累,燃烧火焰趋于稳定,火焰参数也就相应稳定,同时由于温度高,燃烧效率较高,产生的炭黑固体颗粒物相应减少,辐射率也就相应较低,为 0.02 左右。由此可知,在二次燃料稳定点火后,关闭主火箭后可以实现较为高效和稳定燃烧。从另一方面可以看出,相对于温度参数,火焰辐射率在一定程度更能体现燃烧情况,为保证燃料充分燃烧,应尽可能使发动机出口火焰在 200~1100 nm 波段的辐射率接近 0。此试验中,温度燃烧发动机出口附近火焰 200~1100 nm 波段的平均辐射率为 0.02,说明火焰产物中仍然存在炭黑颗粒,发动机的燃烧组织优化还有一定的潜力。

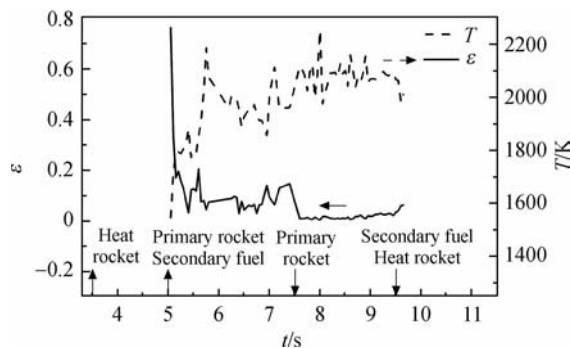


图8 温度和辐射率随试验时间变化曲线

Fig.8 Curves of temperature and emissivity changing with time

5 结 论

本文获得结论如下:

1) 对于以煤油为燃料的发动机燃烧火焰,由于燃烧产生炭黑等固体颗粒物,其辐射在 200~1100 nm 波段较强,因此,通过辐射光谱法可以有效在线测量发动机火焰温度与辐射率参数。

2) 通过温度参数特别是辐射率参数,可以有效的诊断出燃烧优劣:点火过程中,火焰温度与辐射率波动较大,且辐射率相对较高;燃烧稳定后,火焰温度与辐射率相对稳定,当燃烧效率较高时,炭黑颗粒较少,火焰在 200~1100 nm 测量波段的辐射率接近于 0。

参考文献:

[1] Soid S N, Zainal Z N. Spray and combustion characteriza-

tion for internal combustion engines using optical measuring technique: a review[J]. Energy, 2011, 36(2): 724-741.

[2] Richecoeur F, Ducruix S, Scouffaire P, et al. Experimental investigation of high-frequency combustion instabilities in liquid rocket engine[J]. Acta Astronautica, 2008, 62(1): 18-27.

[3] Candel S, Durox D, Schuller T, et al. Advances in combustion and propulsion applications[J]. European Journal of Mechanics B: Fluids, 2013, 40: 87-106.

[4] McKenzie R L. Progress in laser spectroscopic techniques for aerodynamic measurements: an overview[J]. AIAA Journal, 1993, 31(3): 465-477.

[5] 戴景民, 金钊. 火焰温度测量技术研究[J]. 计量学报, 2003, 24(4): 297-302.

DAI Jingmin, JIN Zhao. Study on the measurement techniques of flame temperature[J]. Acta Metrologica Sinica, 2003, 24(4): 297-302. (in Chinese)

[6] Zhang Z M, Tsai B K, Machin G. Radiometric temperature measurements, I. Fundamentals[M] // A C Parr. Experimental Methods in the Physical Sciences Volume 42. Oxford: Academic Press, 2009.

[7] 戴景民. 辐射测温的发展现状与展望[J]. 自动化技术与应用, 2004, 23(3): 1-7.

DAI Jingmin. Survey of radiation thermometry[J]. Techniques of Automation and Applications, 2004, 23(3): 1-7. (in Chinese)

[8] 辛成运, 程晓昉, 张忠政. 基于光谱响应定标的辐射测温方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(10): 2735-2738.

XIN Chengyun, CHNEG Xiaofang, ZHANG Zhongzheng. Radiation thermometry based on calibration of spectral responsivity[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(10): 2735-2738. (in Chinese)

[9] 姜志伟, 周怀春, 姜春, 等. 基于图像处理的火焰温度及辐射率图像检测法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2004, 32(9): 49-51.

JIANG Zhiwei, ZHOU Huaichun, LOU Chun, et al. Method of detecting flame temperature and emissivity image based on color image processing[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2004, 32(9): 49-51. (in Chinese)

[10] 郭培卿, 臧述升, 葛冰, 等. 合成气扩散燃烧的 OH-PLIF 测量[J]. 航空动力学报, 2011, 26(4): 842-847.

GUO Peiqing, ZANG Shusheng, GE Bing, et al. OH-PLIF measurement of syngas diffusion flame[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(4): 842-847. (in Chinese)

[11] Deguchi Y, Kamimoto T, Wang Z Z, et al. Applications of laser diagnostics to thermal power plants and engines[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73(2): 1453-1464.

[12] 陈敏, 宋文艳, 肖隐利, 等. 斜切径向旋流燃烧室主燃区光学测量与特性分析[J]. 航空动力学报, 2013, 28(8): 1727-1735.

CHEN Min, SONG Wenyan, XIAO Yinli, et al. Optical measurement and characteristic analysis of aeroengine

combustor primary zone with counter-rotating swirler[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(8): 1727-1735. (in Chinese)

[13] 张向宇,吕伟,周怀春,等. 基于辐射图像处理的单火嘴三维温度场测量[J]. 燃烧科学与技术, 2014, 20(2): 115-120.

ZHANG Xiangyu, LÜ Wei, ZHOU Huaichun, et al. 3-D temperature distribution measurement on a single-nozzle furnace by radiation image processing[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2014, 20(2): 115-120. (in Chinese)

[14] 徐朝启,何国强,刘佩进,等. 固体推进剂燃烧温度的双波长测试方法[J]. 固体火箭技术, 2010, 33(5): 594-598.

XU Chaoqi, HE Guoqiang, LIU Peijin, et al. A two-wave-length optical method for the high combustion temperature measurement of solid propellant[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2010, 33(5): 594-598. (in Chinese)

[15] 蔡小舒,罗武德. 光谱法测量煤粉火焰温度和黑度的研究[J]. 工程热物理学报, 2000, 21(6): 779-782.

CAI Xiaoshu, LUO Wude. In-situ measurement of temperature and emissivity of pulverized coal flame with spectrum analysis[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2000, 21(6): 779-782. (in Chinese)

[16] NIE Baisheng, HE Xueqiu, ZHANG Chen, et al. Temperature measurement of gas explosion flame based on the radiation thermometry[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2014, 78: 132-144.

[17] 李宇飞. RBCC 引射/亚燃模态热力调节机理研究[D]. 西安:西北工业大学, 2007.

LI Yufei. Thermal adjustment mechanism research on ejector and ramjet mode of RBCC[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007. (in Chinese)

[18] 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.

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. (in Chinese)

[19] National Institute of Standards and Technology. NIST atomic spectra database[EB/OL]. [2014-12-04]. <http://www.nist.gov/pml/data/asd.cfm>.

(编辑:秦理曼)