

增压锅炉燃烧监测试验研究

周国义, 孙亦鹏, 娄 春, 周怀春

(华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 增压锅炉是船用蒸汽动力装置中的关键设备, 其可靠性和经济性要求很高, 对炉内燃烧进行实时监测很有必要。试验中, 首先运用图像采集系统获得炉内不同负荷下的火焰图像, 再通过图像处理技术得到火焰的辐射温度和表征炉内燃烧强度的辐射能数值。结果表明: 在锅炉正常运行时火焰温度为 1 700 K 左右, 而在高负荷运行时火焰温度约为 1 900 K, 辐射温度与数值模拟结果吻合较好; 同时, 对锅炉 6 种不同运行负荷下火焰辐射能信号监测分析发现, 辐射能信号与过热蒸汽温度和烟气温度的变化趋势也基本一致, 有利于将辐射能作为反馈信号引入到控制系统中, 从而优化锅炉控制。

关 键 词: 增压锅炉; 燃烧监测; 图像处理; 辐射温度; 辐射能信号

中图分类号: TK224 文献标识码: A

引 言

蒸汽动力装置是大型船舶的主动力装置, 船用主锅炉是蒸汽动力装置中的一个重要设备, 在蒸汽动力装置中具有举足轻重的地位。其中增压锅炉由于其炉膛容积热负荷大、热效率高、体积小、机动性好等特点而在大型船舶上得到了较为广泛应用^[1~5]。

为了更好地保证锅炉正常运行, 了解炉内的火焰燃烧信息, 在增压锅炉上安装先进的燃烧监测系统很有必要。炉内火焰温度分布能够很好地揭示炉内燃烧工况和火焰位置, 并与燃烧效率、气体污染物的生成以及炉膛出口未燃尽碳的损失都有密切联系^[6~7], 而且已有研究结果表明, 建立在温度场可视化基础上的自动控制策略有助于提高锅炉炉膛运行的经济性和低污染性^[8]。因此, 通过对炉内火焰温度分布的实时监测和控制将有助于提高大型锅炉炉膛运行的可靠性和经济性。

在增压锅炉上安装火焰监测采集装置, 利用辐射图像计算机处理技术、辐射传热理论方法, 通过对采集的火焰辐射图像分析来获得火焰的辐射温度信

息, 并分析辐射能信号与锅炉相关参数的变化情况, 从而能加深对增压锅炉燃烧的了解, 为下一步开展对锅炉燃烧控制优化提供理论依据。

1 辐射温度计算方法及辐射能信号

文献[9]中给出了一种基于彩色 CCD 三基色的双色法温度图像检测方法, 通过一套比较完整的火焰图像标定和分析方法, 从彩色火焰图像红绿蓝三基色中得到火焰温度图像和火焰黑度图像。其中通过对 CCD 采集的图像进行处理得到图像中任意像素的三基色值, 根据双色法测温原理就可以得到火焰图像中任意像素的温度:

$$T = -C_2 \left[\frac{1}{\lambda_r} - \frac{1}{\lambda_b} \right] / \ln \left[\frac{I_{\lambda_r} \lambda_r^5}{I_{\lambda_b} \lambda_b^5} \right] = -C_2 \left[\frac{1}{\lambda_r} - \frac{1}{\lambda_b} \right] / \ln \left[\frac{c_b R \lambda_r^5}{B \lambda_b^5} \right] \quad (1)$$

式中: T —绝对温度, K; C_2 —Planck 常数; λ_r 、 λ_b —红色和蓝色的波长, 分别为 610.8 和 450.7 nm; I_{λ_r} 、 I_{λ_b} —红色和蓝色的单色辐射强度, $W/(sr \cdot m^3)$; c_b —标定系数, 可按文献[9]中的方法得到; R 、 B —火焰图像任意像素的红、蓝单色值。

根据式(1)计算得到的温度, 采用红色分量或蓝色分量可计算火焰图像中任一点的辐射率 ϵ :

$$\epsilon = \frac{\pi I_r \lambda_r^5}{C_1} \exp \left(\frac{C_2}{\lambda_r T} \right) \quad (2)$$

辐射能信号是反映火焰投射对水冷壁的辐射程度高低的重要参数, 可以定义为^[8]:

$$E_R = a_1 \sigma_0 T_h^4 \quad (3)$$

式中: E_R —辐射能信号, W/m^2 ; a_1 —炉膛黑度; σ_0 —黑体辐射常数; T_h —火焰有效绝对温度, 但在实际运用中, 辐射能信号是通过彩色火焰辐射图像处理得到的。在图像采集和处理条件固定(指镜头光圈、照相机快门、增益和白平衡等影响图像信息的条件

收稿日期: 2008-10-29; 修订日期: 2008-11-04

作者简介: 周国义(1959—)男, 湖北随州人, 华中科技大学博士研究生, 现工作在海军工程大学, 高级工程师。

不发生变化)的情况下,可直接从图像的灰度值中获得相对辐射能信号,其中图像灰度 W 如下获得:

$$W = 0.11R + 0.59G + 0.23B \quad (4)$$

式中: R 、 G 、 B —图像中平均的红绿蓝 3 个单色值。

2 试验设备

根据增压锅炉的结构及火焰探测器的外径尺寸,试验中将两支火焰图像探测器从锅炉前后墙的观火孔伸入炉膛拍摄炉内燃烧火焰图像,两支火焰探测器采用对角布置,其中前墙探测器布置在靠近水冷壁侧,后墙探测器布置在靠近对流蒸发管束侧,并通过图像采集卡将火焰图像保存在计算机中。整个试验装置布置如图 1 所示。

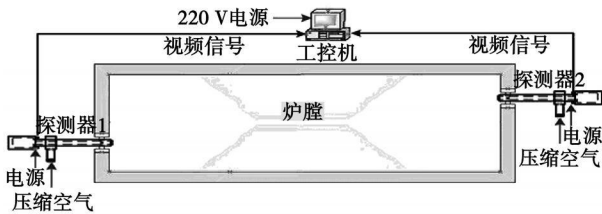


图 1 试验装置布置

图 1 试验装置 CCD 摄像机采用的是三星公司的 SCC-B2303P,为了保证采集图像的质量,避免出现图像饱和或亮度不够情况,试验中对 CCD 的一些

相关参数进行了设置,如光圈为最大,快门设定为 $1/4000$,白平衡设定为 $(-106, 60)$,自动增益设为关。图像采集卡采用的是天敏公司 VC8000 型产品,采集频率最高可达 30 帧/s,图像最大分辨率为 640×480 ,试验中采集频率设定为 1 帧/s,图像分辨率为 240×180 。压缩空气由船上的压缩空气系统提供,压力为 0.7 MPa 左右。给探测器通压缩空气的作用是,一方面对探测器起到冷却保护作用;另一方面可以吹散在探测器镜头附近的油烟,保证采集图像的质量。

3 试验结果

在锅炉 3 种负荷下进行了图像采集试验。3 种负荷分别对应打开 2、3 和 4 个喷油器时的锅炉工况。表 1 给出了 3 种不同负荷下的相关参数。图 2 和图 3 中给出了在 3 种负荷下的前墙和后墙探测器采集的典型火焰图像。

表 1 低、中、高 3 种负荷下的锅炉参数

	负荷 1	负荷 2	负荷 3
喷油器数目	2	3	4
过热蒸汽出口温度/°C	312	368	400
出口烟温/°C	202	287	346
经济器出口水温/°C	159	175	189
空气夹层压力/MPa	0.01	0.035	0.061

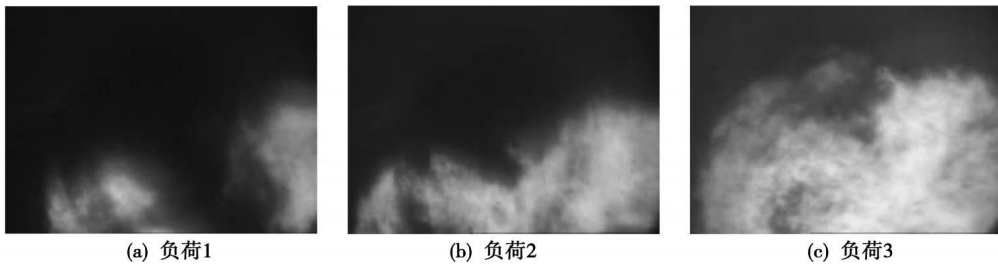


图 2 3 种不同负荷下前墙探测器采集的图像

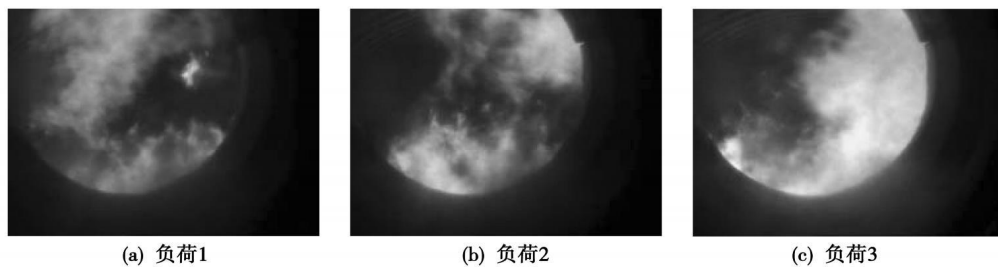


图 3 3 种不同负荷下后墙探测器采集的图像

从图 2 和图 3 可知,随着锅炉负荷的升高,打开的喷油器数量增多,图像中的火焰区域随之增大,图像的亮度也逐渐增大,前后墙探测器采集的图像有明显差别。其原因是前墙位置水冷壁侧的空气夹层较薄,探测器能完全伸入炉内,压缩空气的作用也很明显,所以图像质量就很好。而后墙位置对流管束侧的夹层厚度超过了探测器的长度使之不能完全伸

入炉内,视角角很小,而且压缩空气不能起到对炉内油烟的吹散作用,造成图像被油烟遮挡,不能完全反映炉内的燃烧情况。因此,对温度和辐射能的计算主要采用前墙探测器采集的图像。

按照式(1)的辐射温度计算方法,选择红色和蓝色按图 2 中的图像进行计算,结果如图 4 所示。

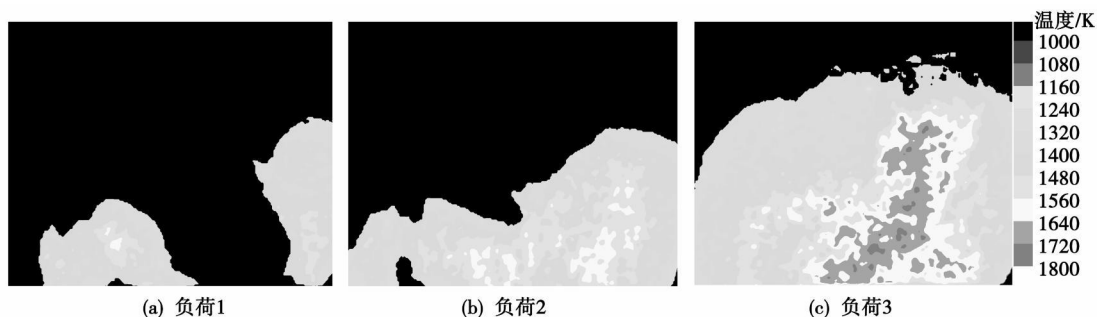


图 4 3 种不同负荷下前墙探测器采集的图像辐射温度分布情况

从图 4 中可知,随着打开喷油器数目增多,图像中的火焰区域逐渐增大,温度也有明显上升,在负荷 1 时火焰区域的最高温度为 1 650 K 左右,在负荷 2 时为 1 750 K 左右,负荷 3 时则达到了 1 900 K 左右。结果与文献[5, 9] 中的经验数据以及文献[10] 中数值模拟的结果基本一致。

为了研究辐射能信号与锅炉相关参数之间的关系,在锅炉的 6 种不同工况下进行了辐射能信号的检测分析。表 2 给出了 6 种工况的相关参数,图 5

给出了 6 种记录工况下的典型火焰。

表 2 6 种记录工况的相关参数

	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6
喷油器数目	4	3	3	3	3	2
过热汽温/℃	400	373	368	356	323	312
出口烟温/℃	346	297	287	271	232	202
经济器出口水温/℃	189	184	175	172	176	159
空气夹层压力/MPa	0.061	0.032	0.035	0.029	0.017	0.01

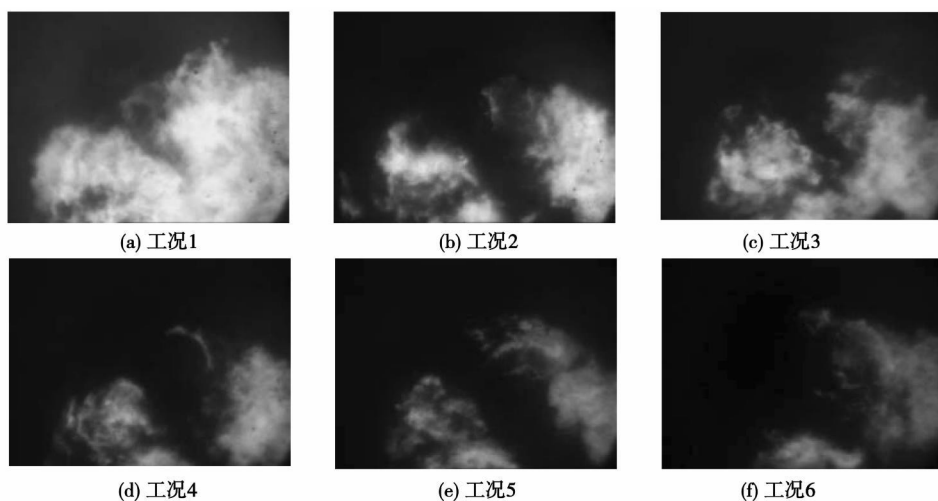


图 5 6 种记录工况下的典型火焰图像

在图像处理中选取图像中红色值大于 40 的区域为火焰有效区域,根据式(2)和式(3)计算得到平

均辐射温度和平均辐射率,并按式(4)计算这一区域内的平均图像灰度作为辐射能水平,结果如表 3 所

示。

从表 3 中知, 随着锅炉工况的降低, 火焰有效区域的平均温度逐渐降低, 平均辐射率的变化则与之相反, 是逐渐增大的, 而辐射能信号则逐渐减小, 它与温度变化一致。可见辐射能信号的变化可以间接反映出火焰温度的变化。而且综合表 2 和表 3 中的数据发现, 辐射能信号与过热器出口蒸汽温度和出口烟气温度的变化趋势基本一致。这样在工程中就可以通过采用基于辐射能信号反馈的燃烧控制来优化过热器出口蒸汽温度和锅炉烟囱出口烟气温度, 以增强锅炉燃烧的经济性和稳定性, 提高锅炉负荷调控能力。降低出口烟气温度, 同时对增强船体的热隐身性能也有良好的效果。

表 3 6 种工况下火焰有效区域的平均温度、平均辐射率和辐射能信号水平

	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6
平均温度/K	1 813.95	1 769.96	1 709.74	1 686.17	1 648.14	1 618.05
平均辐射率	0.533	0.558	0.632	0.653	0.713	0.768
辐射能信号	156.19	138.54	113.69	103.46	89.32	79.02

4 结 论

增压锅炉作为船用蒸汽动力装置中的重要部件, 其运行的可靠性和经济性是对现代船用锅炉提出的最基本的技术要求, 而对锅炉燃烧进行监测是实现这一要求行之有效的办法, 不但能摆脱以往只凭眼看的监测手段, 导致准确性不高的特点, 通过图像采集系统获取炉内火焰图像, 更加直观地反映炉内的燃烧信息, 而且通过对图像进行分析获取炉内的温度分布, 进而得到辐射能信号, 将其引入到炉内燃烧控制系统中, 达到优化锅炉运行、降低锅炉排烟温度、增强锅炉热隐蔽性的目的。

在增压锅炉上安装火焰探测器, 获取炉内火焰燃烧图像能直观的反映炉内燃烧情况, 并通过辐射温度计算方法得到火焰辐射温度。计算结果表明, 在锅炉正常运行时火焰温度为 1 700 K 左右, 而在高负荷运行时火焰温度约为 1 900 K, 与经验数据及文献中数值模拟的结果一致。通过对 6 种不同锅炉运行负荷下火焰辐射能信号监测分析发现, 辐射能信号与过热器出口蒸汽温度和烟气温度的变化趋势基本一致, 将辐射能作为反馈信号引入到控制系统中, 对优化锅炉运行很有帮助。

参考文献:

- [1] 刘长和. 船用增压锅炉技术的新进展[J]. 热能动力工程, 1999, 14(4): 241—245.
- [2] 周国义. 舰用锅炉原理[M]. 武汉: 海军工程大学出版社, 2002.
- [3] 吉桂明, 李汇文. 应用于海军舰船的增压主锅炉[J]. 锅炉制造, 1999(1): 23—30.
- [4] 王 敏, 朱东琦, 姜任秋, 等. 舰用蒸汽锅炉增压燃烧对锅炉性能影响的研究[J]. 应用科技, 2004(9): 45—47.
- [5] 李 章, 张 宁, 刘祥源, 等. 舰用增压锅炉装置[M]. 北京: 海潮出版社, 2000.
- [6] ZHOU H C, LOU C, CHENG Q et al. Experimental investigations on visualization of three-dimensional temperature distributions in a large-scale pulverized-coal-fired boiler furnace[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(1): 1699—1706.
- [7] LOU C, ZHOU H C, YU P F, et al. Measurements of the flame emissivity and radiative properties of particulate medium in pulverized-coal-fired boiler furnaces by image processing of visible radiation[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(1): 2771—2778.
- [8] 王浙芬. 基于炉内温度场可视化的燃烧优化控制方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [9] 姜志伟, 周怀春. 基于图像处理的火焰温度及辐射率图像检测方法[J]. 华中科技大学学报, 2004, 32(9): 49—51.
- [10] 龚三省. 舰用锅炉理论和管理[M]. 武汉: 海军工程学院出版社, 1987.
- [11] 彭泽均. 船用增压锅炉燃烧的数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.

(编辑 陈 滨)

· 书 讯 ·

《O₂/CO₂ 煤粉燃烧污染物特性实验和理论研究》

本文研究了 O₂/CO₂ 气氛下煤粉燃烧特性、SO₂ 钙基脱除的直接硫化特性及 NO_x 燃煤排放特性, 并对燃烧过程进行了数值模拟, 主要工作概括为以下几个方面: 借用热重分析手段比较了空气和 O₂/CO₂ 气氛下煤粉的燃烧特性, 并就固硫特性作初步讨论; 煤集的燃烧和模拟; 分别以热重仪及沉降炉研究了中等温度(800~900℃)和较高温(900~1 250℃)下空气和 O₂/CO₂ 两种气氛钙基脱硫特性; 建立了高温条件下 CaSO₄ 分解的吉布斯自由能与温度的函数关系, 并求取了 SO₂ 分解压力与分解温度之间的关系, 在此基础上得到了 CaSO₄ 高温热力学分解特性等等。

2009 年 7 月出版。

The distribution of the gas-liquid two-phase flow (especially the liquid phase) in various flat tubes of a parallel flow evaporator exercises a relatively big influence on its heat transfer performance. If the gas and liquid distribution in various flat tubes is not uniform, the above-mentioned performance will deteriorate remarkably. At different gas and liquid flow rates, the authors have experimentally studied the liquid flow distribution in six forms of branch pipes of a parallel flow evaporator. During the test, it has been determined that the annular flow pattern predominates. It has been found that for a vertical descending and ascending flow, the method of increasing the tube diameter can not improve the liquid flow distribution in various branch pipes, but the location of the gas and liquid inlet in the main pipe has a relatively big influence on the uniformity of the flow distribution. **Key words:** parallel flow evaporator, gas-liquid two-phase flow rate, flow pattern, uniformity, annular flow

增压锅炉燃烧监测试验研究 = **Experimental Study of the Combustion Monitoring of a Supercharged Boiler** [刊, 汉] / ZHOU Guo-yi (Marine and Power College, Naval Engineering University, Wuhan, China, Post Code: 430033), SUN Yi-peng, LOU Chun, et al (National Key Laboratory on Coal Combustion, Central China University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(6). — 766 ~ 769

Supercharged boilers are key equipment items in a marine steam power plant and it is necessary to conduct a real-time monitoring of the in-furnace combustion to secure their good reliability and high cost-effectiveness. During the test, the authors have first employed an image acquisition system to capture the flame images at various loads of the boiler and then used image processing technology to obtain the radiation temperature of the flame and the radiant energy magnitudes characterizing the in-furnace combustion intensity. It has been found that during a normal operation, the boiler flame temperature is approximately 1700 K, while at a high load, the temperature is about 1900 K. The radiation temperature is in relatively good agreement with the numerical simulation results. In the meantime, it has been found by monitoring and analyzing the boiler flame radiant energy signals at six operating loads that the radiant energy signals assume a basically same variation tendency as the superheated steam and flue gas temperature, facilitating the introduction of the radiant energy into the control system as a feedback signal and thereby optimizing the boiler control. **Key words:** supercharged boiler, combustion monitoring, image processing, radiation temperature, radiant energy signal

“W”型火焰锅炉二次风改造对燃烧影响的试验研究 = **Experimental Study of the Influence of the Secondary Air Modification of a “W” Type Flame Boiler on Combustion** [刊, 汉] / LEI Lin, DUAN Xue-nong (Experiment Research Institute, Hunan Provincial Electric Power Corporation, Changsha, China, Post Code: 410007), WANG Hua-jian (National Key Laboratory on Coal Combustion, Central China University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074), WANG Yi-gang (Datang Huayin Zhuzhou Thermal Power Generation Co. Ltd., Zhuzhou, China, Post Code: 412000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(6). — 770 ~ 772

In the light of the problems and deficiencies of a “W” type flame boiler of FW (Foster Wheeler) technology at high loads, the authors have reconstructed a 1 025 t/h boiler of the same type in a power plant by decreasing the incidence angle of F-layer secondary air downward by 25 degrees. The problem and deficiencies include: a high combustible content of fly-ash at high operating loads, difficulty in combustion air replenishment and susceptibility to screen type superheater overheating, etc. Through a data simulation and a cold and hot state contrast test, it has been found that the advantages resulting from the reconstruction are evident at boiler high loads. At the rated load, primary air path is effectively lengthened and the above-mentioned problems, such as the air replenishment difficulty and overheating of the screen type superheater, have been solved or eliminated. The desuperheating water requirement is cut by 20.9% and the solid incomplete combustion loss decreases by over 1.5%. **Key words:** “W” type flame boiler, secondary air, combustion, reconstruction

基于数据融合的机组燃煤可磨性在线检测 = **On-line Detection of Plant Fuel Coal Grindability Based on Data**