

# W 型火焰锅炉炉膛温度场的可视化试验研究

姚 斌, 姜志伟, 周怀春, 曾汉才

(华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 使用火焰辐射图像探测系统探测炉膛空间发射到镜头各像素的辐射能量, 然后从能量传递和平衡的角度, 由所得图像重建空间的温度场。在 300 MW 机组 W 型火焰炉进行了炉膛二维断面温度场可视化重建试验。试验在炉膛壁面布置 4 个 CCD 火焰探测器, 采用计算机图像采集处理技术获取炉膛火焰辐射图像, 通过对火焰辐射图像的处理以及相关算法, 重建炉膛断面温度分布, 可动态反映火焰断面温度水平、火焰中心的偏移和火焰刷墙等燃烧异常工况。断面温度场可视化结果刷新一次的时间不超过 5 s, 满足在线监测的要求。

**关 键 词:** 炉膛; 辐射成像; 断面; 温度场; 重建

中图分类号: TM623.94 TK224.1 文献标识码: A

## 1 前 言

W 型火焰锅炉是燃烧方式有别于四角切圆锅炉的一种炉型, 两者炉内温度场分布不同。本试验在 W 型火焰炉膛不同高度的断面布置 4 个火焰图像探测器, 通过火焰图像所携带的辐射能水平和炉膛燃烧温度分布之间的数学模型, 将火焰彩色图像转化为温度图像, 得到不同炉膛的断面温度分布、炉膛断面火焰中心的位置等燃烧信息, 并对这些信息进行分析比较, 结果表明, 重建的断面温度分布是准确的, 温度分布呈现 W 型火焰锅炉燃烧过程的特点。

## 2 断面温度场可视化原理

用矩阵  $A$  的元素  $a(i, j)$  表示第  $i$  个网格单元发出的辐射被第  $j$  个 CCD 象素单元接收到的份额, 主要通过 READ 数和光学参数计算而来。在给出矩阵  $A$  和假定一个系统温度分布后, 根据二维和三维模拟研究的结果, 即使加入很大的辐射能  $E$  的测量误差, 仍然能较好地重建二维和三维的温度分

布<sup>[1~3]</sup>。

对矩阵  $A$  做归一化处理得到矩阵  $A'$ , 根据文献 [3], 辐射成像新模型建立了火焰二维温度图像  $T_{\text{CCD}}$  (其分量为火焰温度图像的四次方) 和炉膛内断面温度分布  $T$  (其分量为炉内火焰温度的四次方) 之间的定量关系, 有:

$$T_{\text{CCD}} = A'T \quad (1)$$

使用正则化方法求解式 (1), 此方法的基本原理是寻找一个使下式极小化的  $T$ :

$$R(T, \alpha) = \|T_{\text{CCD}} - A'T\|^2 + \alpha \|DT\|^2 \quad (2)$$

如文献 [4] 所述, 对于一个在空间内连续分布的重建参数来说, 正则化矩阵是很有效的。除了这些外, 正则化参数  $\alpha$  同样在重建过程中扮演了很重要的角色。经过严格的推导后, 使得式 (2) 极小时的  $T$  为:

$$T_{\text{recons}} = (A'^T A' + \alpha D^T D)^{-1} A'^T T_{\text{CCD}} \quad (3)$$

文献 [5] 具体描述了正则化方法, 并给出了算例。

## 3 炉膛断面温度场测量的试验

### 3.1 试验系统硬件配置

根据试验系统和现场环境的需要, 选用的是高性能、抗干扰能力强的便携式工控机。具体硬件配置见表 1。

表 1 试验系统硬件配置

	型号规格	数量	用途
CCD 火焰探测器	SFTV-A2	1	获取炉膛火焰图像
彩色视频采集卡	SDK2000	1	采集并处理火焰图像
便携机		1	图像处理和结果显示
视频电缆	同轴电缆	若干	传输视频信号

收稿日期: 2005-03-28; 修订日期: 2005-07-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50176056)

作者简介: 姚 斌 (1970-), 男, 湖北广水人, 华中科技大学博士研究生。

### 3.2 试验方案

试验在一台 300 MW 机组 W 型火焰炉进行。试验系统的网格单元划分如图 1 所示。4 个 CCD 火焰探测器在炉壁四角的看火孔直视布置,得到的四幅火焰画面经视频分离器合成一副图像;取四幅火焰图像中间一层象素对应的炉膛断面为研究对象。断面空间被分成  $10 \times 10 = 100$  个网格单元,下炉膛为长方形断面型,炉宽 24 m,炉深 13 m,每个网格单元的大小为  $2.4 \text{ m} \times 1.3 \text{ m}$ 。上炉膛为长方形断面型,炉宽 24 m,炉深 7.7 m,每个 CCD 靶面的中间一层象素划分为 100 个单元,象素单元的编号为从 CCD1 起顺时针排列,象素单元共分为 400 个。炉膛四角有看火孔,炉壁中间有吹灰孔。CCD 布置在靠近炉角的看火孔处。由于本次试验中没有对探测器进行通风冷却,其在炉内停留的时间不宜过长,以免烧坏镜片。

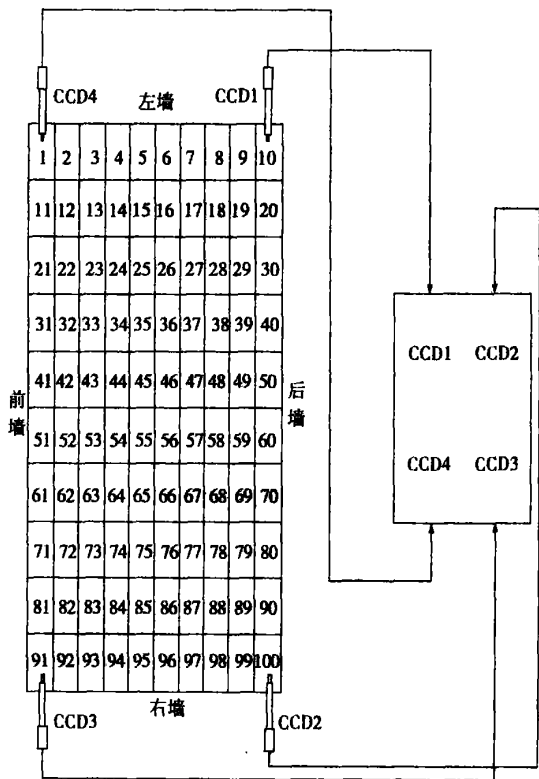


图 1 系统结构

### 3.3 设备检查

试验中的一个重要设备是 CCD 火焰探测器,对 CCD 需要做黑体炉标定,标定的思想是使修正后的三基色  $r'$ 、 $g'$ 、 $b'$  之间的相对大小与黑体炉发出的黑体辐射中三基色代表性波长下的单色辐射能之间的相对大小一致。试验中所用到的 4 个 CCD 的标

定系数见表 2。

表 2 4 个 CCD 的标定系数

探头 1		探头 2		探头 3		探头 4	
Cg	Cb	Cg	Cb	Cg	Cb	Cg	Cb
0.308	0.057 21	0.309 7	0.062 48	0.324 1	0.062 33	0.292	0.057 64

同时,要根据锅炉的尺寸制作好相应的视频线缆以及 CCD 电源线缆。

其次,由于使用的 4 个 CCD 的光谱响应特性不同,它们对于同一物体的真实反映也不尽相同,因此要对 4 个 CCD 做相对系数校正,校正参照物采用实验现场的锅炉燃烧火焰。

### 3.4 完成 CCD 相对系数校正

以第一个 CCD 为基准,先后把 1 号和 2 号、1 号和 3 号、1 号和 4 号 CCD 同时放在同一个看火孔内拍摄火焰图像,对得到的两幅火焰图像的 RGB 做系数校正,得到校正系数,校正图像如图 2 所示。

### 3.5 拍摄的火焰图像

按照预定方案布置火焰探头,我们在锅炉标高 17.6 m、26.3 m、29.4 m 处,负荷为 300 MW 的炉膛燃烧火焰进行了断面温度场可视化实验研究。在某时刻以 1 s 为间隔,连续拍摄 30 幅火焰图像。在 30 s 时间内,火焰图像和重建的温度场变化不大,图 3 为炉膛不同断面火焰图像。

为保证拍摄到的火焰图像不至于饱和且图像尽量明亮,不同高度处的 CCD 快门速度设置不一样,17.6 m 处为  $1/2000 \text{ s}$ ,26.3 m 和 29.4 m 处为  $1/3000 \text{ s}$

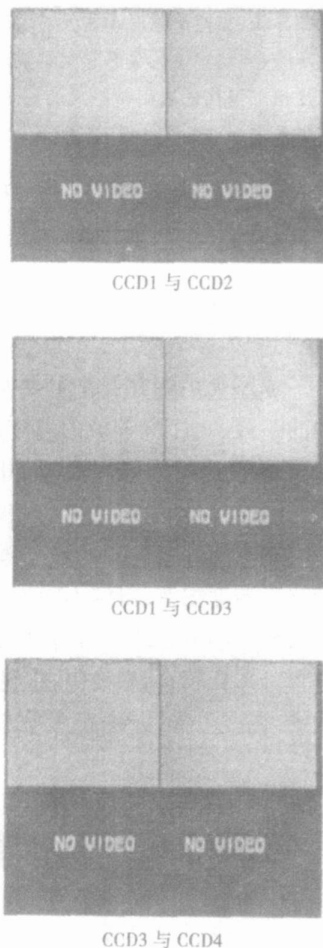


图 2 校正图像

s, R/B 增益比设为 120。图 3 为机组负荷 300 MW 时, 从 3 个不同位置和角度拍摄到的炉内火焰辐射图像, 在图像的右边区域可以明显看到水冷壁, 图像中的水冷壁区域非常暗, 在重建计算中给定一个温度(1 273 K)和辐射率(0.1)。

### 3.6 温度场的重建结果及分析

图 4 为重建的炉膛不同断面温度场分布, 由图

可知, 断面温度场单峰分布特征, 形状呈枕头形, 下炉膛 17.6 m 高度炉膛中心温度为 1 700 °C 左右, 上炉膛 26.3 m 和 29.4 m 高度炉膛中心温度为 1 900 °C 左右, 明显高于相同容量四角切圆锅炉的炉膛中心温度, 这是由于炉膛大量敷设卫燃带, 水冷壁吸热量减少造成的。

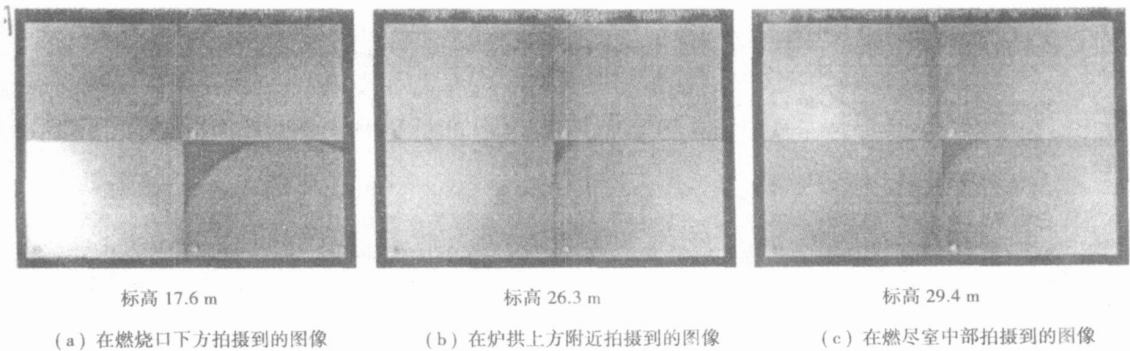


图 3 不同高度断面火焰图像

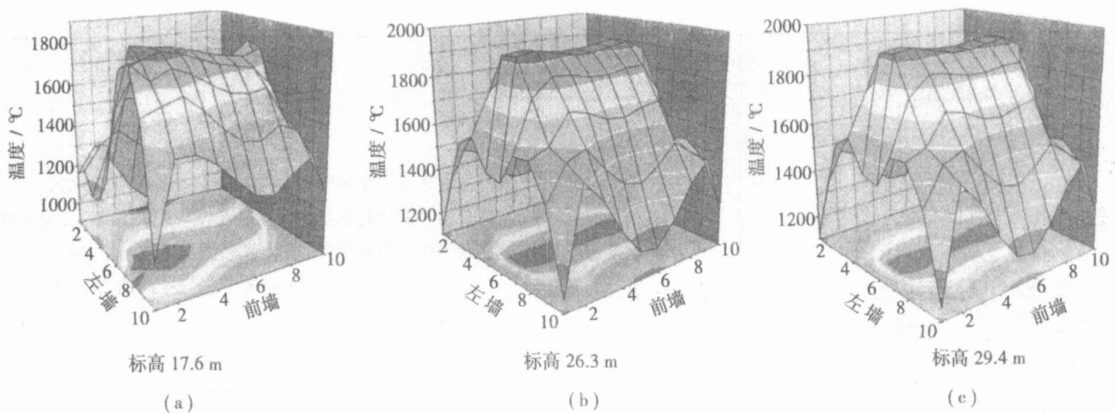


图 4 不同高度断面重建的断面温度分布

表 3 重建的断面温度与激光高温计测量温度的比较

断面位置/m	负荷/MW	激光高温计测量温度/°C	重建断面平均温度/°C
17.6	300	1 230.8	1 366.5
26.3	300	1 386.0	1 551.8
29.4	300	1 297.8	1 475.9

为了对重建的断面温度进行检验, 用激光高温计在不同高度从看火孔对炉内温度进行了测量, 结果如图 5 所示。表 3 对比两种不同方式的测量结果, 可以看出重建的断面温度分布与激光高温计测

量的结果随断面高度变化趋势基本上是一致的, 变化规律是上下低中间高, 这从侧面说明重建的断面温度分布是准确的。由于激光高温计测量的是炉膛四角附近的温度, 比重建断面平均温度要低。

## 4 结 论

本项研究是在一台 300 MW W 型火焰炉进行的炉膛断面温度场可视化试验研究, 试验研究结果表明, 炉膛的断面温度场呈现典型的单峰分布特征, 形

状呈枕头形;其偏斜情况与电厂运行经验基本一致;沿炉膛高度温度场的变化规律是上下低中间高,这与激光高温计在不同高度从看火孔对炉内温度进行了测量结果是一致的,体现了 W 型火焰炉燃烧过程的特点。断面温度场可视化结果刷新一次的时间不超过 5 s,满足实时监测的要求。

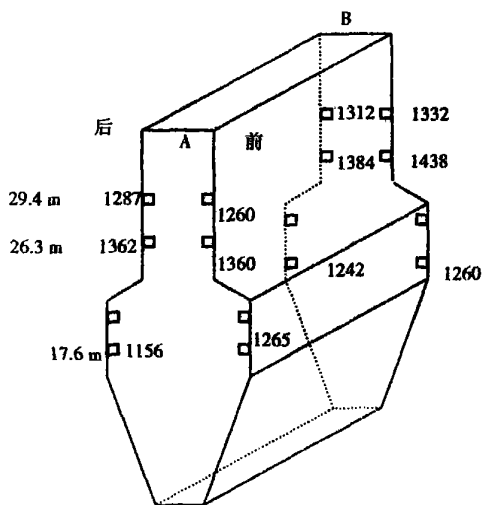


图 5 不同高度看火孔温度测量结果

参考文献:

[ 1 ] ZHOU HUAI CHUN, HAN SHU DONG. Simultaneous reconstruction of temperature distribution, absorptivity of wall surface and absorption coefficient of medium in a 2-D furnace system[ J ]. **International Journal Heat and Mass Transfer**, 2003, 46( 14): 2645—2653.

[ 2 ] ZHOU HUAI CHUN, SHENG FENG, HAN SHU DONG, *et al.* Reconstruction of temperature distribution in a 2-D absorbing-emitting system from radiant energy images[ J ]. **JSME International Journal( Serier B)**, 2000, 43(1): 104—109.

[ 3 ] 姜 春, 韩署东, 刘 浩, 等. 一种煤粉燃烧火焰辐射成像新模型[ J ]. **工程热物理学报**, 2002, 23( 增刊): 93—96.

[ 4 ] REGINSKA T. A regularization parameter in discrete ill-posed problems [ J ]. **SIAM Journal on Scientific Computing**, 1996, 17( 3): 740—749.

[ 5 ] ZHOU HUAI CHUN, HAN SHU DONG, SHENG FENG, *et al.* Visualization of three-dimensional temperature distributions in a large-scale furnace via regularized reconstruction from radiative energy images numerical studies[ J ]. **Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer**, 2002, 72: 361—383.

(渠源 编辑)

(上接第 34 页)

5 结 论

本文采用三维有限元方法计算了 1 021 t/h 锅炉汽包在内压作用下的理论应力集中系数,得到的结果比德国 TRD301 标准推荐的理论应力集中系数大 22.7%。采用优化理论,建立了 1 021 t/h 锅炉优化启动曲线的数学模型;通过计算,得到了 1 021 t/h 锅炉冷态启动和热态启动的优化曲线;结合汽包寿命在线监测系统,可实现对 300 MW 机组的优化启动。理论和实践证明,按本文计算得到的优化曲线启动,不仅能保证汽包寿命的安全性,而且能缩短启动时间,增强火电机组适应快速启动的能力。本文所建立的理论模型和方法对电站锅炉优化运行具有一定的指导意义。

参考文献:

寿命估算[ J ]. **中国电机工程学报** 1998, 18(1): 67—72.

[ 2 ] 郑 克, 刘志刚, 李益民, 等. 辛店电厂 DG670/140—2 型锅炉汽包低周疲劳寿命研究[ J ]. **热力发电**, 2000(3): 49—54.

[ 3 ] 王运明. 电厂锅炉锅筒寿命计算[ J ]. **热能动力工程**, 1997, 12( 6): 442—444.

[ 4 ] 赵铁成, 沈月芬, 梁艳明, 等. 电厂锅筒内压应力三维有限元分析[ J ]. **中国电机工程学报**, 1999 19(1): 31—33.

[ 5 ] 李 斌, 陈昕宽, 沈月芬. 基于有限元方法的锅炉汽包应力在线监测程序的研究[ J ]. **西安交通大学学报**, 2003, 37( 5): 447—450.

[ 6 ] 袁镇福, 周 洁, 宁安坤, 等. 电厂锅炉启动曲线最优化及实时启动指导[ J ]. **动力工程**, 1997, 17(4): 40—45.

[ 7 ] 管德清, 莫江春, 张学纶, 等. 电站锅炉优化启动的数学模型 [ J ]. **动力工程**, 2003, 23(2): 2279—2283.

[ 8 ] 袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论与方法[ M ]. 北京: 科学出版社, 1997.

[ 9 ] 管德清, 莫江春, 李 立, 等. 300 MW 机组锅炉汽包寿命在线监测系统的研究[ J ]. **热能动力工程**, 2005, 20( 1): 57—60.

(渠源 编辑)

[ 1 ] 林兴华, 蒋家羚. 130 t/h 锅炉汽包凹槽浅插式接管结构的疲劳

neering under the Changsha University of Science & Technology, Changsha, China, Post Code: 410076) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 27 ~ 30

On the basis of studying the contact-rubbing vibration behavior of a rotating machine rotor an axial locating method for a rotor contact-rubbing point was explored, and a vibration vector analysis-based axial locating method for a contact-rubbing fault put forward. The results of the study indicate that the contact-rubbing of a rotating shaft surface with some portion of a stator will lead to a temporary thermal bending of the rotor, thus giving rise to a change in non-equilibrium state of the rotor. This change can be reflected through a change in vibration vector at the two ends of the rotor. By utilizing the variation relation of the vibration vector at the two ends of the rotor it is possible to ascertain the axial location of the contact-rubbing point at the rotor surface. The analysis of a practical usage case has shown that the method of locating the contact-rubbing fault of a rotating machine as proposed by the authors possesses adequate precision. **Key words:** rotating machine, contact rubbing, fault locating

基于汽包寿命的 1 021 t/h 锅炉启动过程的优化研究 = A Study of the Optimization of a 1021 t/h Boiler Start-up Process on the Basis of the Boiler Drum Service Life [刊, 汉] / GUAN De-qing, MO Jiang-chun, LU Li-ming (Institute of Power & Mechanical Engineering under the Changsha University of Science & Technology, Changsha, China, Post Code: 410076), MAO Yong-zhong (Hunan Provincial Shimen Power Plant, Shimen, Hunan Province, China, Post Code: 415300) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 31 ~ 34, 38

By using a three-dimensional finite element theory calculated was the stress field of a 1021 t/h boiler drum under the action of an internal pressure. The theoretical stress concentration factor thus obtained is greater than the recommended value of German TRD301 standard by 22.7%. In addition, the thermal stress of the boiler drum under a quasi-steady state was calculated using the theory of thermal elasticity. By employing TRD301 standard the fatigue life of the boiler drum was calculated. With the time step experienced by the pressure-rise range at various stages serving as an optimized parameter, thereby achieving the dual target of lowering fatigue life loss and shortening start-up time, a model of boiler start-up process optimization was set up based on the boiler drum service life. Through calculations optimized curves were obtained for the 1021 t/h boiler cold-state and hot-state start-up process. On this basis, the practical operation of a 1021 t/h boiler for a 300 MW unit at a certain power plant has brought about satisfactory results. A start-up on the basis of these optimized curves can not only ensure a small loss of boiler drum service life, but also significantly shorten boiler start-up time. The optimized start-up curves set up by the authors can provide significant guidance for the boiler operation of the 300 MW plant. **Key words:** boiler drum, fatigue life, start-up process, optimization

W 型火焰锅炉炉膛温度场的可视化试验研究 = Experimental Research on the Visualization of Temperature Fields in a Boiler Furnace with a W-shaped Flame [刊, 汉] / YAO Bin, JIANG Zhi-wei, ZHOU Huai-chun, et al (State Key Laboratory on Coal Combustion under the Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 35 ~ 38

A flame radiation-image detection system is used to detect the radiation energy emitted from a furnace space to the various image elements of a lens. Then, from the standpoint of energy transmission and equilibrium a spatial temperature field is reconstructed from the obtained images. A visualization reconstruction test for a furnace two-dimensional sectional temperature field was conducted on the W-shaped flame furnace of a 300 MW unit. During the test 4 CCD (charge-coupled device) based flame detectors were installed on the furnace walls and furnace flame radiation images obtained by employing computer image acquisition and processing techniques. Through a processing of the flame radiation images and by using relevant algorithms a temperature distribution of the furnace section was reconstructed. It is possible to dynamically reflect the temperature level of the flame section and also abnormal combustion conditions, such as the deviation of a flame center, a flame brushing past a water wall, etc. The time needed for updating the visualization results of furnace-section temperature field will not exceed 5 seconds, thus adequately meeting the requirements of real-time monitoring. **Key words:** furnace, radiation image formation, furnace section, temperature field, reconstruction