

# 船用燃机新型排气红外抑制系统的数值计算与实验研究

杜朝辉 钟芳源  
(上海交通大学)

**〔摘要〕** 本文以多喷口引射加多层气膜冷却的第三代船用燃气轮机排气系统红外抑制装置为例, 发展并完成了模拟该装置气流流场及温度场的数值计算方法。在分析模型实测数据的基础上, 提出了修正模化比影响的方法。为分析排气系统红外抑制装置提供了理论依据。

**关键词** 红外抑制 数值计算 模化比 排气系统 燃气轮机  
**分类号** U664.13 X124

## 0 引言

作为现代舰船主要作战防御手段之一的燃气轮机排气系统红外抑制装置, 经过 20 多年的研制, 已发展到多喷口引射加多层气膜冷却的第三代, 如图 1 所示, 红外抑制装置的主要功能是通过引入冷却空气, 对高温废气以及排气混合管进行冷却, 从而达到降低排气温度和抑制红外辐射强度的目的, 就整个系统的流场形成而言, 是处于内部强迫对流换热, 外部多层气膜冷却以及辐射换热的条件下, 属复杂的紊流流动, 另外排气系统红外抑制装置比较庞大, 工程上都采用有选择性的模型实验, 与实际情况不可避免地存在误差。这就要求发展一种有效的理论计算方法, 用于模拟该装置的复杂流动和修正模型实验的影响。

本文正是针对上述原因, 以典型的多喷口引射加多层气膜冷却的新型抑制装置为例, 采用数值模拟的方法研究了该装置的温度场和红外辐射场的分布规律, 结合大小两种模型实验测量得到的数据, 分析了模化比的影响规律, 并对实船做了相应的参数估计。

## 1 数值计算方法

本文涉及的内部流动是一个在复杂边界条件下

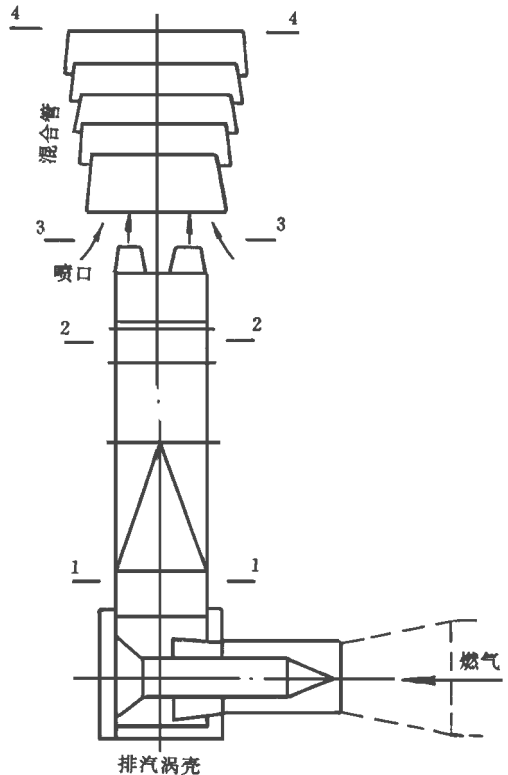


图 1 实验装置及测量点

内部、外部流动及换热耦合在一起的问题。主流热燃气引射冷空气以及多层气膜进行掺混,因而沿半径方向温度分布有明显不均匀性,带有多层气膜的混合管内部的流动及热交换现象是一种无规律的复杂流动。因此结合船用燃气轮机排气系统红外抑制装置的实际工况,可以认为所研究的排气混合管中的气流是不可压缩的三维定常紊流流动。

对于三维不可压、时均  $N - S$  方程,  $K - \epsilon$  双方程紊流模型方程,连续方程,能量方程,可写成如下统一形式:

$$\text{div} (dUH - \Gamma^\Phi \text{grad}H) = S^\Phi \quad (1)$$

式中:  $H$ 为任一输运量;  $d$ 为密度;  $U$ 为速度;  $S$ 为源项

针对所研究装置的复杂几何结构,计算采用任意非正交曲线坐标系,经变换方程(1)可写成

$$\frac{1}{J} \left( \frac{\partial (JF^a)}{\partial a} + \frac{\partial (JF^z)}{\partial z} + \frac{\partial (JF^y)}{\partial y} \right) = S^\Phi \quad (2)$$

式中:  $J$ 为雅可比系数。

采用有限体积法离散方程,根据奥氏公式,将积分化为面积分,即

$$\iint_A (JF^a dZdY + JF^z d^a dY + JF^y d^a dZ) = \iiint_V S^\Phi d^a dZdY \quad (3)$$

式中:  $A$ 为控制体的周边;  $V$ 为控制体的体积。

经过推导可得到控制方程的如下离散化形式:

$$A_p H_p = A_u H_u + A_b H_b + A_e H_e + A_w H_w + A_n H_n + A_s H_s + S_{\text{new}}^\Phi \quad (4)$$

式中:  $P$ 为控制体的中点;  $U - D$ 为控制体的6个相邻节点,各系数的表达式见文献[1]

方程(4)采用线—线欠松弛的方法求解,并引入源项线性化处理及壁面函数法。为了提高求解速度和适应于排气系统红外抑制装置的具体情况,本文对压力修正方程进行了改造,用非交错网格消除压力场和速度场的波动。计算区域如图2所示。计算中边界条件的选取尽可能符合实际流动情况。

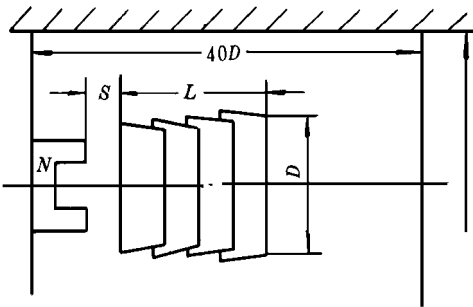


图2 计算区域简图

进口边界:主流,给定全部参数;二次流,考虑到受下游区域影响较小,取轴向速度导数为零,温度取环境温度。

对称轴边界:参数的一阶导数为零,对称轴上的速度为零。

出口边界:全部参数的一阶或二阶导数为零。

径向边界:温度为环境温度,其它参数皆为零。

在计算区域图2中,  $S$ 为喷口与混合管的距离,  $L$ 、 $D$ 为混合管的长度及直径,  $N$ 为喷口数目。

## 2 试验测试

试验装置包括空气管系、燃气管系和测试系统,风源由一台功率为100 kW,流量为1500 m<sup>3</sup>/h,压头为14.7 kPa的离心风机提供。试验中做了两套几何相似的排气系统模型,与实物的模化比是:大模型1:4.5,小模型1:7.2

排气系统由排气涡壳、直段管、引射喷嘴及多层气膜冷却混合管组成(见图1)。试验中在1-4截面上测量了气动参数,在1截面(排气涡壳的出口,即排气系统的进口)测量63个总温总压,在2截面(距1截面4.5倍的管径处)有17个测点测量总温及总压,另在管四周还有4个静压点;在3截面(喷口出口)主流中有4个总压测点;4截面(混合管出口)有10个测点(对大模型4.5)和7个测点(对小模型7.2),测总温总压,测点沿径向平均分布,另外在混合管里沿流向布置18个温度测点,研究混和管的温度分布,测点均匀分布。红外辐射场的测量方法详见文献[5]

测量中温度测量均采用热电偶为一次传感元件,压力测量选用不同量程的压力传感器作为传感元件,配以MSS-48C扫描顺序采样。整个测试系统以HP3054A型数据采集系统为核心,用微型计算机进行编程控制、采样、计算并打印结果。

## 3 结果及讨论

### 3.1 温度场分布

本文全部参数都做了无量纲处理。

图3和图4是混和管壁面及出口废气的温度分布,用4截面比温度  $T_4 = (T_4 - T_a) / (T_2 - T_a)$  ( $T_2$ 是喷口气流温度,  $T_a$ 是大气温度)及混合管壁面比温度  $T_w$

$= T_w - T_a / T_2 - T_a$ 表示。从中可以看到,理论计算的结果与实验测量数据符合很好,这说明本文的数值计算方法是正确可靠的。对于多层气膜混合管,由于多层气膜冷却的效果非常好,使得壁面温度达到接近大气温度的较低水平。正是这种非常低的壁温,使得该装置的红外辐射强度(处于  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  波段中的红外信号)将减小  $95\% \sim 99\%$  [3]。并且是大模型的壁温小于小模型。究其原因是大模型的金属壁厚已明显小于气膜开槽的宽度,气膜冷却的效果很强,并随雷诺数的增大气膜冷却的效果相应增加,同文献 [3] 的分析一致,由此可以推断实物的壁温将进一步降低,也就是说实船的壁面温度将小于模型实验。另外,图中还绘上了根据面积外差得到的实船温度分布估计值。

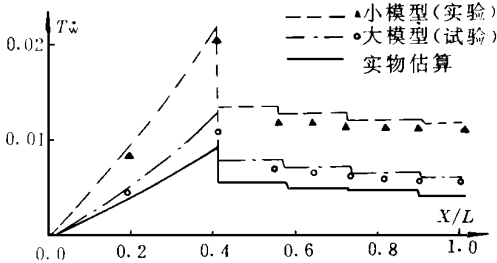


图 3 混合管壁面温度分布

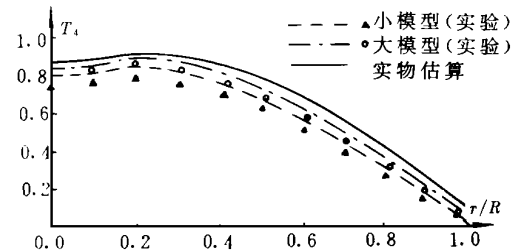


图 4 出口气流温度分布

### 3.2 红外辐射场分布

图 5 是大小模型排气系统红外辐射强度的实测值(在观测角为  $45^\circ$ , 处于  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  波段中的红外辐射)。这里的单位是  $\text{W/SR}$ ,  $\text{W}$  是瓦特,  $\text{SR}$  是单位角。另外,通过外插小模型的红外辐射强度值得到的大模型的红外辐射强度也同样在图上用点划线表示,经比较表明,大模型的测量值低于用小模型外插得到的值。

从排气系统红外辐射场的相似分析可知 [5], 如

果不考虑气体的吸收,以及温差值  $\Delta F / F$  很小(小于  $20\%$ ) 具有完全相似温度场分布的两种排气系统红外辐射强度,与模化比  $S = S_s / S_1$  的平方,以及温度比  $T = T_s / T_1$  的 4 次方成正比,即

$$I_s / I_1 = S^2 T^4 \quad (5)$$

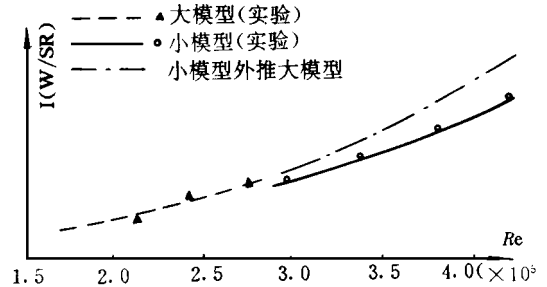


图 5 红外辐射强度分布

这里下标  $1, s$  分别表示大小模型。

另外,数值计算结果也表明,如果计入气体的吸收,且红外辐射的实测距离不太远的话(不大于  $30\text{m}$ ),公式 (5) 也可认为是合适的。

对带有气膜冷却混合管的抑制装置,其混合管的壁温是大模型小于小模型,而出口气流则是大模型大于小模型,由于金属壁温的红外辐射大大强于气体,约占全部红外辐射强度的  $85\%$ 。所以两者相互综合作用的结果,还是小模型的红外辐射值大于大模型,所以实船的红外辐射强度将小于大模型。

从上述的讨论可以清楚地认识到,不能通过简单的面积外插从一种模型的测量值直接获得实船排气系统的红外辐射值,而必须通过模化比修正的方法来实现。本研究中使用近似的轴对称废气红外辐射场计算方法与固体壁面红外辐射场的计算方法来计算大小模型的红外辐射强度值 [5], 从图中可知数值计算结果与测量值一致。

## 5 结论

(1) 本文的数值计算方法可以有效地模拟船用燃气轮机排气红外抑制系统的复杂流动。

(2) 多喷口引射加多层气膜冷却的新型红外抑制装置可以高效地抑制红外辐射。

(3) 不能通过简单的外插把模型实验的结果推广到实物,而必须经过模化比影响的修正分析。

## 参 考 文 献

- 1 杜朝辉,钟芳源.求解复杂边界三维紊流流场的非交错网格方法,上海交通大学学报,1994,28(5)
- 2 Zhong Fangyuan The effects of scale factor on the aerothermodynamic and infrared radiation performance of naval gas turbine system with infrared signature suppression device. ASME Paper, 93-GT-232, 1993
- 3 Birk A M, VanDam D. Infrared signature suppression for marine gas turbine comparison of sea trial and model test result for the DRES ball IRSS system. Jour. of Engineering for Gas Turbines and Power, 1994, 116 (1): 75~ 81
- 4 Birk A M and Davis W R. Suppression of the infrared signatures of marine gas turbines. ASME Jour. of Engineering for Gas Turbines and Power, 1989, 111, (1): 123~ 129
- 5 戴宇.模化比对舰船燃气轮机排气系统模型的气动阻力、温度分布及红外辐射性能的影响研究.上海交通大学博士学位论文,1992

作者简介 杜朝辉,男,1964年10月生。现为上海交通大学动力机械工程系副教授。1992年在西北工业大学获工学博士学位,1994年上海交通大学博士后流动站工作期满后留校工作。

长期从事叶轮机械气动热力学研究,在国内外学术期刊上发表过论文20余篇,获得省部级奖2项,并获上海市优秀博士后奖励。(通讯处 200030 上海交大机械工程系 210教研室)

## 经验交流

## 司炉人员的宝贵心得:

## 改善沸腾炉燃烧的措施

沸腾燃烧是介于层状燃烧与县浮燃烧之间的燃烧方式。由于沸腾炉具有强化燃烧,特别是能燃用一般锅炉无法烧的劣质燃料等特点,所以在一些劣质煤产区应用比较广泛。

但是,受燃料来源的限制和粉碎、筛分系统运行状况的影响,往往使进入流化床上的燃料不能保持在设计的粒度范围内,从而使流化床上的燃料不能处于良好的沸腾状态。所占比例很小的细粉和粗块对流化床燃烧影响很大。因为燃烧室进料口为负压区,细粉状燃料进入炉膛后很容易随上升烟气而进入烟道排出,造成了锅炉固体不完全燃烧热损失增加;相反,粗块进入炉膛后又容易压住部分风帽,造成局部料层堆积而结焦。司炉人员为了防止大块燃料堆积而人为地增大风量,提高风速,又造成了排烟热损失增加。

因此,要保证沸腾炉经济运行,在加强粉碎、筛分系统运行管理的基础上,在沸腾炉结构上也要采取措施。对于细粉状燃烧,可在溜煤管中部设置引射器,利用风室内高压空气将其引射至沸腾层中部。因为此位置温度水平较高,氧气浓度大,且能延长细粉状燃料在燃烧室内停留的时间,所以基本上可以燃尽,而对于粗块状燃料,可在燃烧室内进料口的下方200~300mm处布一层由耐热金属材料结成的网,网眼的规格以能挡住不能被正常风速所吹起的煤粒径为边长。这样,只有当大块燃料在网上燃成小块后才能落入流化床上进行沸腾燃烧。采取上述措施后,不同粒度的煤可分别以固定、沸腾、悬浮等方式燃烧,保证了锅炉的经济、安全运行。

吉林冶金机电设备厂现在两台SHF10-13型沸腾炉。由于设备年久失修,资金紧张,锅炉结焦问题一度十分严重,固体不完全燃烧热损失高达28%。1995年采用上述措施后,结焦问题已基本上解决,固体不完全燃烧热损失降至17.2%。这种措施投资很少、维护简单、无运转设备,对于改造老式沸腾锅炉,不失为一种行之有效的办法。

(吉林冶金机电设备厂司炉人员:赵伟 供稿)

Electric Power Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1997, 12(1). -33- 36  
 The use of negative-pressure dust collecting units in thermal power plants of China and existing problems related with its use are described. In addition, the authors dwell on the theoretical basis for employing centrifugal fans to provide a negative-pressure source for the dust collecting units and its effectiveness in practical use. Also described are the design specifications of the centrifugal fan-based dust collecting systems. **Key words** negative-pressure dust collecting system, centrifugal fan, Roots fan, dust collector

电站燃煤锅炉结渣特性的试验研究 = **An Experimental Study of the Slagging Characteristics of a Coal-fired Utility Boiler** [刊,中] / Zhao Liming ( Harbin Power Station Equipment Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1997, 12(1). -37- 40

Through the simulation of the actual boiler operating conditions by utilizing a pulverized coal combustion test stand to burn a coal sample on a trial basis conducted is a slagging test for the boiler of a power station 300 MW unit. A comprehensive slagging index  $R_2$  is proposed with the credibility of evaluation being enhanced, resulting in a more accurate prediction of the boiler actual slagging trend. **Key words** boiler, Slagging, prediction, test

船用燃机新型排气红外抑制系统的数值计算与实验研究 = **Numerical Calculation and Experimental Study of a Naval Gas Turbine Exhaust Infrared Signature Suppression Device** [刊,中] / Du Zhaohui, Zhong Fangyuan ( Shanghai Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1997, 12(1). -41- 44

By taking the exhaust system infrared signature suppression device of a third generation naval gas turbine with multi-jet ejection and multi-layer film cooling as an example developed and completed is a numerical calculation method for simulating the air flow and temperature fields of the said suppression device. On the basis of analysing the measured data of the model the authors have proposed a method for correcting the effect of modelling scale, thus providing a theoretical basis for analysing the infrared signature suppression device of the exhaust system. **Key words** infrared signature suppression, modelling scale, exhaust system, gas turbine

UG-75/5.3-M型锅炉布风板阻力的试验研究 = **An Experimental Study of the Air Distribution Plate Resistance of a Model UG-75/5.3-M<sub>3</sub> Fluidized Bed Boiler** [刊,中] / Li Zhiwang ( Heilongjiang Provincial Electric Power Testing Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1997, 12(1). -45- 47

An analysis is performed of the mathematical model of air distribution plate resistance for a model UG-75/5.3-M<sub>3</sub> circulating fluidized bed boiler with the said plate resistance being tested. A regression was conducted by using the test results, and a calculation formula obtained for determining the variation of the air distribution plate resistance with air flow rate. The air distribution plate resistance factor obtained is designated as  $\alpha$ . Some reference data are provided for the operation of the boiler. **Key words** circulating fluidized bed, air distribution plate, resistance

湿蒸汽透平的汽水分离器的试验研究 = **An Experimental Study of the Steam-Water Separator of a Wet Steam Turbine** [刊,中] / Chen Qinglong et al. ( Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1997, 12(1). -48- 51

Presented in this paper are the experimental study results of an intermediary steam-water separator for a saturated-steam turbine. A type-selection test consists of a cold-state (air-water test) and a hot-state appraisal test, including a verification test first by simulation and then by a full-scale model. The optimum steam-water separator test model has been turned into a product. Its long-term safe and reliable operation has proved that the experimental study is a successful one. **Key words** test body, air-water test rig, steam-water test rig