

# 模化比对船用排气红外抑制装置 红外辐射特性的影响及修正\*

杜朝辉 钟芳源 赵岩

(上海交通大学动力与能源工程学院, 上海, 200030)

**摘要** 在两种典型船用燃气轮机排气系统红外抑制装置数值计算和试验测量的基础上, 根据相似理论, 分析讨论了模化比对气流和壁面温度场分布以及红外辐射强度的影响, 根据实物排气红外抑制系统的相应参数和模化比影响的量级, 提出了可供选择的修正因子。

**关键词** 模化比, 红外辐射, 红外抑制。

## EFFECT OF SCALE FACTOR ON INFRARED RADIATION CHARACTERISTICS OF MARINE EXHAUST SYSTEM WITH INFRARED SIGNATURE SUPPRESSION DEVICE AND ITS CORRECTION \*

DU Zhao-Hui ZHONG Fang-Yuan ZHAO Yan

(School of Power and Energy Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract** Based on the results of calculation and measurement of the two kinds of marine gas turbine exhaust systems with the infrared signature suppression devices, according to the similarity theory, the effects of scale factor on the temperature profile (of air-flow and tube wall), and infrared radiant intensity (of exhaust plumes and exhaust uptake inner wall) of the exhaust system were analyzed and discussed. Based on the corresponding parameters of real ship exhaust systems as well as the magnitude of scale factor impacts, the recommended values for selecting the scale factor were estimated and presented.

**Key words** scale factor, infrared radiation, infrared signature suppression.

### 引言

作为现代战争重要的作战防御手段之一, 船用燃气轮机排气系统红外抑制装置得到了广泛的应用。船用燃气轮机排气系统红外抑制装置是一个非常复杂庞大的系统, 包括气流流场、温度场、红外辐射场及气流噪声场, 它们之间的相互作用, 工程上通常采用选择性的模型进行研究<sup>[1~3]</sup>。由于模型与实物的不相似性, 几何尺寸和物理量引起的模型和实物之间的不完全相似性, 必然会引起模型实验与实物实际工作状态之间的误差, 故必须采用有效的手段来修正模化比的影响。模化比对各种物理量的影响以及它们的影响量级是有很大的变化的, 要使这种复

杂系统的实物与模型的各种物理量保持理论和实验上的相似是不可能的, 除非模化比非常近似 1, 但是保持模型的实物之间的相同无论经济上还是时间上都是浪费。基于这种原因, 必须通过模型实验的方法, 保持全部的几何物理量与实物系统相似。要解决的问题是如何克服、消除模化比的影响, 并根据实验数据, 有效可靠地估算实物数据。

本文以两种典型红外抑制装置的船用燃气轮机排气系统作为研究对象, 在实验测量和数值计算的基础上, 根据相似理论, 分别讨论了模化比对气流和壁面温度以及红外辐射场的影响, 并计算了影响的数量级。基于模型实验的数据, 对实物排气系统作了估计, 给出了可供选择的修正值。

\* 国家留学回国人员基金(编号 9824822)资助项目  
稿件收到日期 2001-02-14, 修改稿收到日期 2001-09-04

\* The project supported by the Foundation of Returned Overseas Scholars of China(No. 9824822)  
Received 2001-02-14, revised 2001-09-04

## 1 模型试验和数值计算

试验方案1是直管引射,方案2是直管引射加多层气膜冷却,大模型的模化比为1:4.5,小模型为1:7.2.排气系统中气流参数的测量在4个截面上进行,截面1(系统的进口)共布置了63个测量点;截面2(距截面1大约5倍的管径)上有17个测点用于总温和总压的测量;截面3(引射管的出口)在主流的中心设有4个总压测点;截面4(混合管的出口)有10个测点,用于测量压力和温度.在混合管的内壁,布有8个测点用于测量管壁温度.红外辐射的测点位于排气系统中心5~10 m远的地方,测量角度为0°、15°、30°、45°.采用AGA红外热图像系统测量红外辐射强度,它可以接收来自排气管壁和排气烟尘的3~5 μm波段和8~14 μm波段的红外辐射信号.

研究涉及的是复杂边界条件下内部、外部流动及换热耦合问题,主流热燃气引射冷空气进行掺混,气膜冷却混合管内部的流场,沿半径方向温度分布呈明显的不均匀性,混合排气管中的气流是复杂的三维紊流流动.如果考虑上述全部影响因素,在现有的研究条件和水平下是不可能进行的,需做如下简化假设:(1)排气混合管轴对称;(2)排气速度一般较低,可认为气流是不可压的.数值计算使用求解原参数的SIMPLER方法,采用非正交曲线坐标系和非交错网格分析本问题所涉及的内部和外部流动及对流换热的复合问题<sup>[4]</sup>.

红外辐射场的热源由两部分组成,一部分是固体壁面的辐射,这部分辐射的能量谱分布是一条光滑的曲线;另一部分是热燃气流辐射,能量谱分布是一系列分立的谱线或谱带.金属壁面的辐射强度计算比较简单.气体的辐射主要集中在3~5 μm波段,由H<sub>2</sub>O和CO<sub>2</sub>产生.水蒸汽在3~5 μm波段之间属于弱吸收和发射<sup>[5]</sup>,计算只考虑二氧化碳在3~5 μm波段,特别是在4.5 μm波段附近的吸收和发射,并假设吸收系数不随温度和成份变化.

## 2 模化比对温度场和红外辐射场的影响

### 2.1 模化比对出口气流和壁面温度的影响

图1(工况1.0)是截面2的气流温度T随模化比变化的测量值.比温度定义 $T_2 = (T - T_a) / (T_1 - T_a)$ (T<sub>1</sub>是截面1的平均温度,T<sub>a</sub>是大气温度).图2表示方案1在截面4气流的比温度 $T_4 = (T_4 - T_a) / (T_1 - T_a)$ 变化的测量值,以及混合管的比温度 $T_w =$

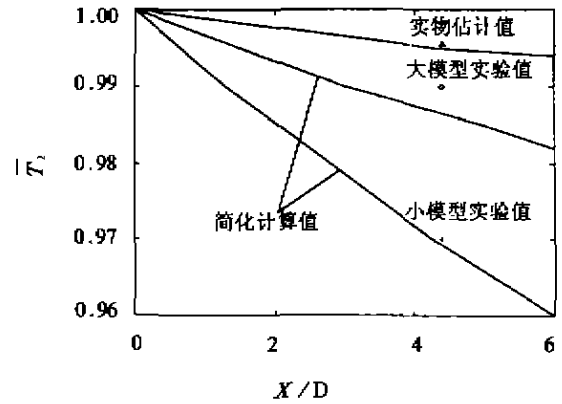


图1 截面2处气流的比温度分布  
Fig.1 Distributions of air-flow specific temperature at cross section 2

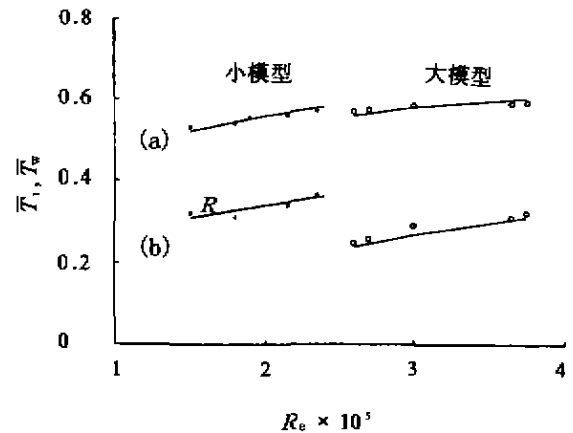


图2 方案1混合管壁及出口气流的比温度分布  
(a) 排气出口 (b) 混合管壁  
Fig.2 Distributions of air-flow specific temperature at exhaust plume and mixing tube wall specific temperature for model 1  
(a) exhaust plume (b) mixing tube wall

$(T_w - T_a) / (T_1 - T_a)$ ( $T_w$ 为混合管壁面温度, $T_4$ 是出口截面温度).图3是方案2在上述相同截面的比温度分布.随模化比及工况的变化,在相同的进口压力、温度和流量时,数值计算值也表示在图中(实验和数值计算结果均作了无量纲处理).

模化比对出口流场和壁面温度场分布的影响分析如下:在相同的进口截面和相同的平均温度 $T_1$ 以及平均速度 $U_1$ 条件下,对方案1,由于气动及传热的不完全相似,引起直喷管出口以及混合管出口截面4的温度分布不相似.结果是随着模化比的增加,出口温度 $T_2$ 和 $T_4$ 增加,而两者的排气管壁面温度下降到同一程度,同时它导致引射系数也下降到同

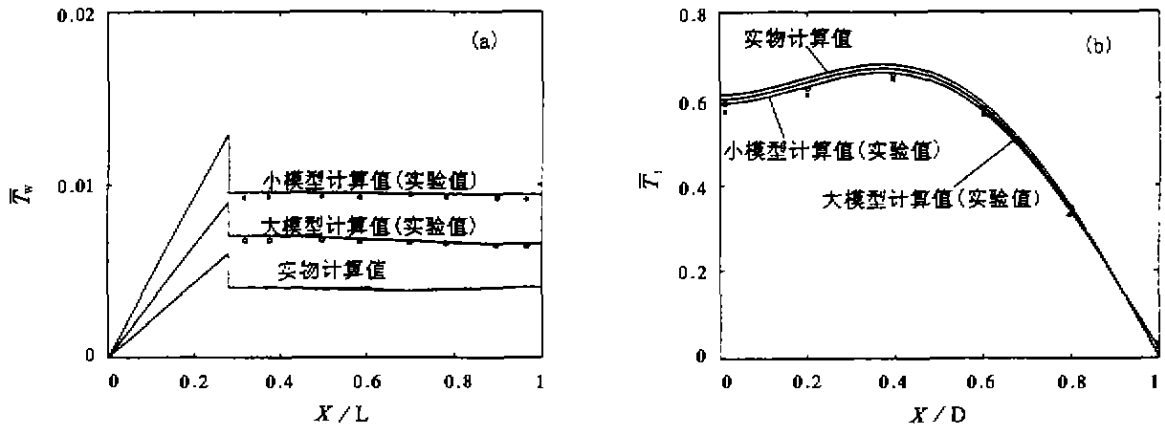


图3 方案2混合管壁及出口气流的比温度分布  
(a)混合管壁 (b)排气出口

Fig. 3 Distributions of air-flow specific temperature at exhaust plumes and mixing tube wall specific temperature for model 2  
(a) mixing tube wall (b) exhaust plume

样的程度. 模化比越大, 即越接近实物, 上述趋势也越大. 对于气流温度场, 也不可能保持模型实验值与实物相似, 结果是模化比越小, 它们之间的差别越大.

对方案2, 由于多层气膜冷却的作用, 混合管出口附近的壁面温度已下降到接近大气温度的较低水平. 这种非常低的壁温, 使得红外辐射强度减小 95~99%<sup>[1]</sup>. 在相同模型尺寸的条件下, 模化比的影响要小于方案1, 出口气流温度是小模型低于大模型, 而排气混合管壁温是小模型高于大模型, 究其原因大模型的金属壁厚已明显小于气膜开槽厚度, 气膜冷却的效果更强, 并随着雷诺数的增加气膜冷却的效果相应增强. 由此可推断, 实物的冷却效果更明显, 即红外抑制的效果更显著.

2.2 模化比对红外辐射强度的影响

图4是方案1大小模型红外辐射强度的实测值、通过面积外插小模型的红外辐射值得到大模型的红外辐射强度值也在标在图上, 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理论分析可知<sup>[6]</sup>, 如果不考虑气体的吸收, 且温度差值  $\Delta T/T$  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  $\bar{S} = S_1/S_2$  的平方, 以及温度比  $\bar{T} = T_1/T_2$  的 4 次方成正比, 即  $I_1/I_2 = \bar{S}^2 \bar{T}^4$ , 式中下标 1, 2 分别表示大小模型.

另外, 数值计算结果也表明, 在红外辐射实测距

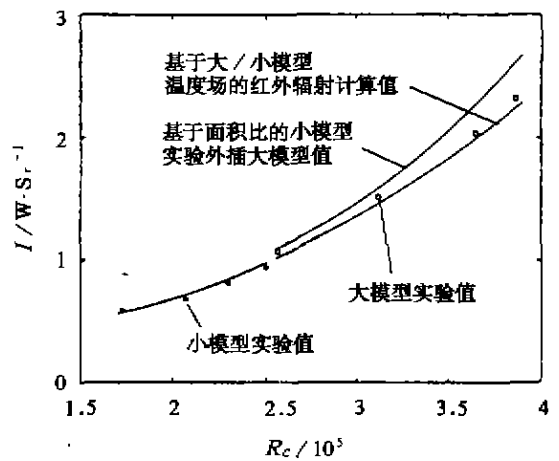


图4 方案1红外辐射强度随工况的变化  
Fig. 4 Variations of infrared radiant intensity of exhaust system with operation conditions for model 1

离小于 30 m 的条件下, 如果计及气体的吸收, 上述公式也可认为是合适的.

本文讨论的红外抑制装置的红外辐射强度, 尽管管壁面温度  $T_w$  大大小于排气废气的气流温度  $T_f$ , 但辐射强度中的主导值还是混合管的壁温(约占系统红外辐射量的 85%), 因此实际上模化比的影响引起小模型的壁温低于大模型的壁温, 这将产生另外的结果, 即小模型红外辐射的外插值将高于大模型红外辐射强度值. 对于方案2, 由于混合管的壁温是大模型低于小模型, 而出口气流则是大模型

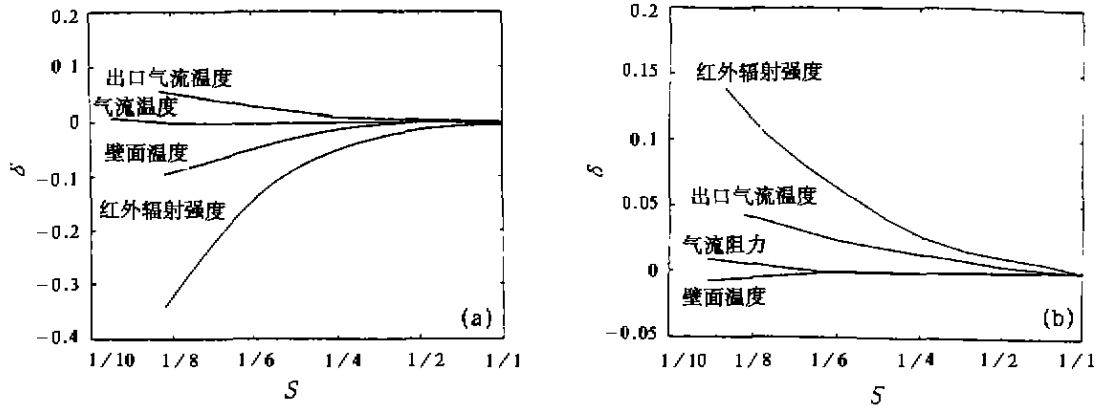


图5 模化比的影响

(a) 方案1 (b) 方案2

Fig. 5 Influences of scale factors

(a) model 1 (b) model 2

高于小模型,两者相互作用的综合结果,将使模化比的影响减小,由于金属壁的红外辐射量大大强于气体,所以最终的影响规律是一致的,即实物的红外辐射强度将小于模型实验的结果,但误差将明显小于方案1。

由上述讨论可清楚地看到,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物的红外辐射值,而必须通过模化比修正的方法来实现,本文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获得大小模型的红外辐射强度值,从图5中可知数值计算结果与测量值基本一致,说明数值计算的结论是正确的。

### 3 实船排气系统的温度场及红外辐射场的估计

基于模化比影响分析和所采用的修正方法,根据模化比为1:4.5和1:7.2的模型实验数据,估计了实物排气系统混合出口处的平均温度 $T_1$ ,混合管壁面比温度 $\overline{T_w}$ ,以及在平均观测角为 $45^\circ$ 时,处于 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段中的红外辐射强度。

为了清楚地表示模化比作用的量级,图5(工况1.0)给出了大小模型气流及壁面温度的测量值,以及由大小模型测量值通过面积外插得到的实物红外辐射强度值,以设计工况为例,可得到如下的模化比影响量级:图中 $\delta$ 为相对误差, $S$ 为模化系数, $S = D_{\text{model}}/D_{\text{real}}$ 。

(1) 实物排气比温度 $\overline{T_1}$ ,方案1是66.2%,比小模型高3.77%,比大模型高1.7%,方案2是62%,比小模型高3.2%,比大模型高2.0%;

(2) 实物混合管壁面比温度 $\overline{T_w}$ ,方案1是27%,比大模型低3.6%,比小模型低7.0%,方案2是0.46%,比大模型低0.21%,比小模型低0.44%;

(3) 实物红外辐射强度值,方案1的计算结果比通过大模型测量值外插得到的值要低7.6%,比通过小模型测量值外插得到的值要低26.1%,方案2的推算结果比通过大模型测量值外插得到的值要高3.5%,比通过小模型测量值外插得到的值要高9.0%。

### 4 结语

(1) 模化比对排气系统的温度分布有影响,最大的影响是对红外辐射强度,采用较小的模型会产生一个量级的影响,对实物红外辐射强度的估算必须进行相应的修正;

(2) 为了提高模型实验数据直接应用的可靠性,应根据不同试验的目的和设备,优化模化因子,较合适的模化比对壁面温度是 $1/6\sim 1/3$ ,对红外辐射强度是 $1/4\sim 1/2$ ;

(3) 对于不同于图1所示的红外抑制装置,也可用本文的分析和修正方法或在此基础上加以改进,但是,模化比影响的量级以及气流流动的传热计算将随不同情况会有所变化。

### REFERENCES

- [1] DAI Yu. Investigation of the effects of model scale on the aerodynamic resistance, temperature distribution and infrared signature of marine gas turbine exhaust system. Ph. D thesis. Shanghai Jiaotong University(戴

- 字. 模化比对船用燃气轮机排气系统气流阻力和温度场分布及红外辐射影响的研究. 上海交通大学. 博士学位论文)
- [2] 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. *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, 1994, **116**(1): 75—81
- [3] Birk A M, Davis W R. Suppression of the infrared signature of marine gas turbine. *ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, 1989, **111**(1): 123—129
- [4] DU Zhao-Hui, ZHONG Fang-Yuan. Numerical study of 3-D viscous internal flow with non-staggered grid for complex boundary. *Journal of Shanghai Jiaotong University*(杜朝辉, 钟芳源. 求解复杂边界三维紊流流动的非交错网格方法. *上海交通大学学报*), 1994, **31**(5): 36—42
- [5] Soufiani A. Validity of band-model calculations for  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}$  applied to radiant properties and conductive radiant transfer. *J. Q. S. R. T.*, 1978, **33**: 185
- [6] ZHONG Fan-Yuan, DAI Yu. The effects of scale factor on the aerodynamic and infrared radiation suppression device. *ASME Paper*, 93-GT-232, 1993