

文章编号:1001-9014(2006)02-0095-06

直升机红外抑制器红外辐射特性的 数值研究和实验验证

单勇, 张靖周, 李立国

(南京航空航天大学 能源与动力学院 南京 210016)

摘要:对波瓣喷管-弯曲混合管构成的直升机红外抑制器内空气动力学特性和红外辐射特性进行了数值研究,在计算过程中,有机地将三维流场数值计算、壁温计算与红外辐射计算结合起来,与相关实验数据的对比验证表明计算结果与实验结果仅相差15%左右,且红外辐射强度空间分布规律一致;通过对不同缩比模型的数值计算,揭示了模化比对壁面及羽流的红外辐射特性的影响规律,计算结果符合物理过程本质。

关键词:红外抑制器;红外辐射;数值计算;逆向蒙特卡罗法

中图分类号:V231.3, P722.5 **文献标识码:**A

NUMERICAL CALCULATION AND EXPERIMENTAL VERIFICATION FOR THE INFRARED RADIATION CHARACTERISTICS OF HELICOPTER INFRARED RADIATION SUPPRESSOR

SHAN Yong, ZHANG Jing-Zhou, LI Li-Guo

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The internal aerodynamic and infrared radiation characteristics for the helicopter infrared radiation suppressor consisted of lobed nozzle and curved mixing duct were studied by numerical calculations. In the computation, the computations of 3-D flow field and wall temperature and infrared radiation are integrated with. Compared with the experimental data, it is indicated that the relative error between the computational and experimental results is about 15%. The spatial distribution of infrared radiation intensity from computation has the same law as that from experiments. And a series of computations are conducted to obtain the effect of model scale on the wall and plume radiations. The results are verified with the nature the physics process.

Key words: infrared suppressor; infrared radiation; numerical computation; reverse Monte-Carlo method

引言

直升机发动机排气系统的外露壁面和燃气尾焰是红外制导武器的主要探测和攻击目标,减少红外辐射的一个有效方法是使用红外抑制器,利用排气的动量引射环境空气来实施混合降温,目前应用最为广泛的红外抑制器采用波瓣喷管-弯曲混合管结构^[1-3]。大量的研究表明,波瓣喷管具有诱发轴向阵列旋涡的特征,引射-混合性能优越^[4-7]。对于直升机而言,由于不需要通过喷气产生推力,可以利用弯曲的混合管使排气转向并遮挡发动机内部的高温部件;同时,在混合管外还可套上遮挡罩,进一步降低

外露壁面的温度。

目前国内在红外抑制器研究中主要通过模型实验进行气动和红外辐射特性研究,综合运用流体力学、传热学和红外物理学的基本理论开展数值模拟的研究还很缺乏。同时,采用缩比的实验模型所得到的研究结果如何推广应用于真实的状态,也是在红外抑制器研究中面临的一个关键问题。

本文基于 Fluent 商用 CFD 软件,通过计算得到红外抑制器壁面温度、羽流流场数据(包括温度、压力、浓度),基于这些数据,采用逆向蒙特卡罗法计算出红外辐射特征,并将数值计算结果与实验数据进行了对比验证分析。

收稿日期:2005-04-07,修回日期:2005-09-20

基金项目:武器装备预研基金(51410040304HK0201)资助项目

作者简介:单勇(1978-),男,江苏扬州人,博士研究生,研究方向为传热与红外隐身技术。

Received date: 2005-04-07, revised date: 2005-09-20

1 实验研究

1.1 实验模型

实验装置如图 1 所示. 主流由压气机提供, 流量由标准孔板流量计测量. 经过加热器后从喷管流. 喷管前主流的总温和总压由安装在稳定段后部的探针测量. 环境空气依靠主流动量的引射作用驱动, 通过标准入口流量管进入集气室, 在混合管内与主流混合. 在标准入口流量管和集气室的联结部装有通道面积调节机构, 通过改变引射气流通道堵塞比来改变引射流量比 Φ (次流流量与主流流量之比). 两股气流混合后排入环境大气.

红外抑制器由波瓣喷管、中心锥体、弯曲混合管和遮挡罩构成(如图 2 所示). 波瓣喷管的 12 个波瓣沿周向均布, 其结构参数主要有平均直径 d_1 , 波瓣扩张角 α , 波瓣高度 h 和宽度 b ; 弯曲混合管结构参数有直径 d_m , 直管段长度 l , 弯曲角度 β ; 遮挡罩结构参数是遮挡间距 s ; 中心锥体的结构参数有入口锥角 γ , 出口锥角 φ , 锥体直径 d_c . 在气动和红外特性实验中所选择的实验模型参数详见表 1 所列.

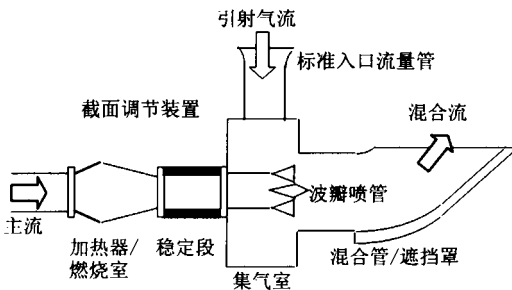


图 1 实验装置
Fig. 1 Experimental rig

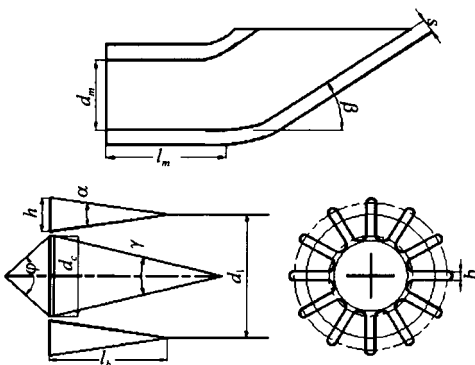


图 2 实验模型示意图
Fig. 2 Schematic of experiment model

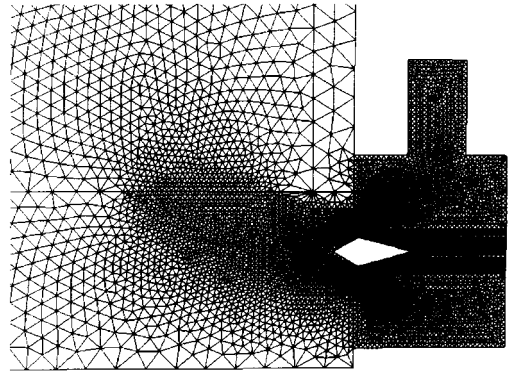


图 3 引射器与外界部分区域网格划分
Fig. 3 Mesh distribution of ejector and part of environment

表 1 实验模型参数

Table 1 Structural parameters of experimental models

实验类别 实验模型	气动 模型 A	红外 模型 B	模型 C
d_1 (mm)	45	150	75
喷管 α ($^\circ$)	25	35	35
h (mm)	13.5	50	25
b (mm)	5	15	7.5
中心 γ ($^\circ$)	30	30	30
φ ($^\circ$)	60	60	60
锥 d_c (mm)	30	100	50
混遮 d_m (mm)	100	300	150
合挡 l (mm)	100	170	85
管罩 β ($^\circ$)	25	35	35
s (mm)	/	0/30	/

1.2 实验内容

在气动实验中, 通过改变引射气流通道的堵塞比, 研究引射流量比对混合管出口气流总温、混合管壁面温度分布的影响. 实验条件: 主流流量为 0.06 kg/s , 总温 240°C , 总压 $102\ 325 \text{ Pa}$, 环境温度 28°C .

在燃烧实验台架上对红外抑制器大、小模型 (B 和 C) 进行红外辐射特性的测试, 采用航空煤油燃烧生成高温燃气. 用红外光谱辐射计和响应波段为 $3.63 \sim 4.84 \mu\text{m}$ 的积分辐射强度计进行红外辐射亮度和辐射强度的测试. 大模型实验条件: 主流流量为 1.0 kg/s , 总温为 600°C , 总压为 $112\ 060 \text{ Pa}$, 环境温度 32°C . 大小模型的主流流量控制在 $4:1$, 采用相同比例的油气比, 从而保证主流速度相等而表征流动相似的雷诺数不同, 主流的总温、总压和成份基本相同.

2 数值研究

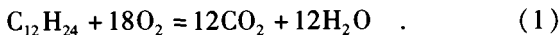
2.1 流场计算模型

本文研究的物理模型是根据实验模型确定的.

由于实验模型是中心对称结构,计算模型只采用了实验模型的一半.考虑到波瓣喷管的复杂型面以及三维模型的复杂结构,计算中采用非结构化网格,在波瓣喷管内部及其外侧采用局部加密网格,整个计算区域的网格数达到 814 271.图 3 为对称截面的引射系统和部分外界环境区域的网格划分,在波瓣喷管内部及其外侧的网格间距为 2mm,外界环境区域的网格间距为 8~50mm 不等.由于混合管出口处的压力并不是外界大气压力,羽流的红外辐射计算也要求提供混合管出口后的一个较大区域内的流场信息,所以在出口外界选取一个足够大的区域(模型尺寸的 4 倍),其边界压力取为外界大气压力.

2.2 边界条件

主流入口和次流入口按照流量进口处理,流量和温度根据实验测量赋值^[8].压力出口边界设置在混合管出口下游区域的边界上,静压设为环境大气压力,其它变量按沿流向偏导数为零处理.混合管出口作为计算区域内部面处理.为得到混合管壁面温度场,该壁面设定为流、固耦合面.由于要考虑气体辐射问题,主流入口气体假设为完全燃烧的燃气,成分为氮气、二氧化碳和水蒸气,化学反应方程为



因此在主流进口处氮气、二氧化碳和水蒸气体积百分比分别为 0.693、0.061 4、0.245 6;次流入口气体为环境大气,其考虑成分为氮气和氧气,其体积百分比分别为:0.79、0.21.

2.3 流场计算方法

对于流场计算,本文采用标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型,主流和二次流入口处的紊流动能和紊流动能耗散率按照经验关系选取^[9]: $k_{in} = 0.03u_{in}^2$, $\varepsilon_{in} = k_{in}^{1.5}/(0.005D)$,这里, D 为对应于主流和二次流入口的管道当量直径,近壁区采用标准壁面函数法进行处理.一些经验参数的选取为: $C_{\mu} = 0.09$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $pr_t = 0.85$.流动与传热的控制方程采用二阶迎风差分格式离散,压力与速度耦合采用 SIMPLE 算法.速度和 k, ε 的收敛精度都达到 10^{-4} ,温度收敛精度达到 10^{-5} .

2.4 红外辐射计算方法

对于红外辐射特性计算,本文采用逆向蒙特卡罗法(RMC)^[10,11]和窄谱带模型法^[12].

RMC 的主要思路是从接收点(测点)向外发射和跟踪光束(如图 4 所示),当光束穿过羽流或投射到表面而被吸收时,则认为沿该光束的路径上有一束能量能够反向到达接收点,经多次发射-跟踪-

反向接收后,统计所得到的光束信息,获得所需要的结果.

在能量反向到达接收点的过程中,需要求解尾喷流的能量辐射传输方程.吸收、发射、散射性介质内辐射传递方程可以写为

$$\frac{dL_\sigma}{dt} = kL_\sigma - k_\alpha L_{b,\sigma} - \frac{k_s}{4\pi} \int_{\Omega=4\pi} L_\sigma(\theta', \varphi') \phi(\theta, \varphi, \theta', \varphi') d\Omega, \quad (2)$$

$$k = k_\alpha + k_s \quad dt = -\rho ds$$

式(2)中, k 为总衰减率, k_α 为吸收率, k_s 为散射率, ρ 为耗散分子密度, L_σ 为研究点处在辐射传输方向 s 的光谱辐射亮度, $L_{b,\sigma}$ 为由普朗克函数决定的黑体光谱辐射亮度, Ω 为立体角, t 为光学深度, ϕ 为散射相函数.

对于吸收性介质,若不考虑粒子散射,并且将沿光束传递方向的行程分为 n 层(如图 3 所示),第 i 层厚度为 l_i ,用每层中心点作为该层的代表,设其物性为常数,平均吸收系数为 α_i .将某一行程中对测点有贡献的所有层到达测点的贡献叠加,就获得了在反向光束方向上,尾喷流以及壁面到达测点的方向光谱辐射亮度:

$$L_\sigma^n = L_\sigma^0 \tau_1 \tau_2 \cdots \tau_n + L_{b,\sigma}^1 (1 - \tau_1) \tau_2 \tau_3 \cdots \tau_n + L_{b,\sigma}^2 (1 - \tau_2) \tau_3 \tau_4 \cdots \tau_n + \cdots + L_{b,\sigma}^{n-1} (1 - \tau_{n-1}). \quad (3)$$

式(3)中, L_σ^n 是沿光线传递反方向到达测点的光谱辐射亮度, $L_{b,\sigma}^i$ 是用波数表示的普朗克函数, $\tau_i = \exp(-l_i \alpha_i)$,为第 i 层的透射率.当光线遇到发动机热部件,如喷管内壁面、混合管内壁面和蒙皮等,则 L_σ^0 为该固面向光束传播反方向发射的光谱辐射亮度;如果光束直接逸出羽流,则 $L_\sigma^0 = 0$;如果固体壁面有反射,则利用蒙特卡罗法的概率模型确定其反射方向,按照上面过程继续跟踪,直到它被吸收或逸出流场为止.

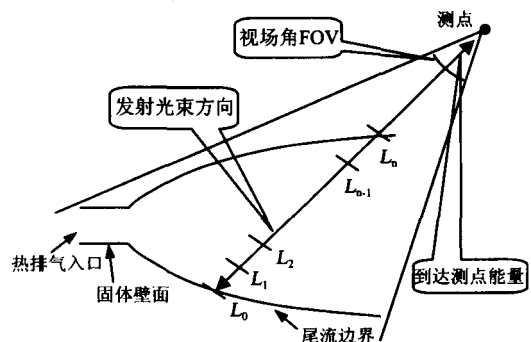


图 4 计算过程示意

Fig. 4 Schematic of calculation procedures

在跟踪了 N 束光线后 (本文 $N = 1\,000\,000$), 可以获得在视场角 (FOV) 内的到达测点的辐射照度 H (W/cm^2). 如果将探测目标作为点源处理, 其辐射强度 I (W/Sr) 可表示为 $I = H \cdot R^2$, R 为探测距离.

$$H = \frac{\int_{FOV} \left(\sum_{i=1}^{NB} \sum_{j=1}^{N_{abs}} L_{\sigma,i,j}^n \cdot \cos\theta_j \cdot \Delta\sigma_i \right) d\Omega}{\int_{FOV} d\Omega} \cdot FOV$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{j=1}^{N_{abs}} L_{\sigma,i,j}^n \cdot \cos\theta_j \cdot \Delta\sigma_i}{N} \cdot FOV, \quad (4)$$

式(4)中, NB 为总波带数; N_{abs} 为对测点有贡献的光线总数; θ_j 是入射光线的天顶角; $\Delta\sigma_i$ 是第 i 个波带的宽度. FOV 是测点对目标表面所张的立体角. 羽流单元控制体内的平均吸收系数 α_i 是根据窄谱带模型, 由红外辐射手册中的数据库线性插值得到^[13].

为了与实验保持一致, 红外辐射计算中要考虑大气中的水蒸气和二氧化碳的衰减作用. 本文采用刘林华等^[14,15] 提出的大气透过率数据库插值得到符合实际情况的二氧化碳和水蒸气的透过率. 该数据库仅适用于海平面的水平路程的透过率计算, 对于实际情况需要对传输路程进行必要的修正^[16], 经过修正后的等效路程 x_0 即可用于数据库插值, 得到二氧化碳的大气透过率.

$$x_0 = x \left(\frac{p}{p_0} \right)^k, \quad (5)$$

式(5)中, x 为实际传输路程, x_0 为等效路程, p 为当地大气压力, p_0 为海平面上的大气压, k 指数值对 H_2O 取为 0.5, 对 CO_2 取为 1.5.

决定传输路程中水蒸气透过率大小的指标是可降水量^[16], 通过该值在数据库中的插值, 可得到水蒸气透过率.

$$W = \frac{\rho_{wv}}{\rho_w} x_0, \quad (6)$$

式(6)中, W 为衰减路程内的可降水量, ρ_w 为水的密度, ρ_{wv} 为水蒸气的密度, x_0 为等效路程.

3 结果与分析

3.1 混合管出口截面和壁面温度分布

图 5 是根据气动实验模型, 在不同引射流量下, 分别通过计算和实验得到的弯曲混合管椭圆形出口截面长、短轴方向的温度分布 (长轴坐标 $X = 0mm$ 对应的是弯曲混合管椭圆形出口内侧, $X = 180mm$ 对应的是外侧; 短轴坐标 $Y = 0mm$ 对应的是短轴中

心, $Y = 44.6$ 、 -44.6 对应的是短轴两端). 可以看到: 在长轴方向, 弯曲混合管内侧温度接近于引射气流温度, 外侧温度要比内侧高出好多; 在短轴方向, 中间温度低于两侧, 温度分布具有马鞍形特征. 这些特征是混合管弯曲造成的. 对于不同的引射流量, 计算值与实验值最大相差 $20^\circ C$, 且温度分布趋势一致, 总体上看, 二者的相对误差在 15% 以内.

3.2 混合管内流场

图 6 是弯曲混合管对称截面的速度矢量. 高速主流喷入混合管, 其动量拖拽次流进入, 在混合管直管段沿壁面形成回流. 由于混合管的弯曲, 高速的主流对壁面形成冲击, 造成近壁面的静压升高 (如图 7 所示), 迫使主流发生偏转, 并形成沿弯曲混合管切线方向的壁面射流. 椭圆形出口截面内侧的静压比外侧低, 且低于外界环境大气压力, 所以有外界的冷气被卷吸与混合管内侧的气流进行掺混, 这就造成了在出口平面内侧温度接近于环境温度, 从而在混合管椭圆形出口截面长轴上存在很大的温度梯度.

3.3 混合管壁面及羽流红外辐射特征

图 8 是模型 B 和 C 在 $3 \sim 5\mu m$ 波段的红外辐射强度实验与计算值的对比 (方位角 $\theta = 0^\circ$ 表示正对

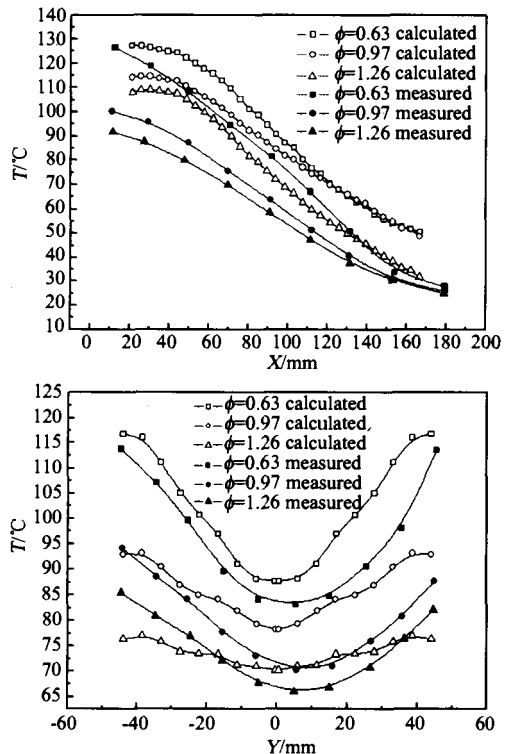


图 5 模型 A 混合管出口温度分布 (a) 长轴方向 (b) 短轴方向
Fig. 5 Temperature distribution at mixing duct exit (a) direction of long axis (b) direction of short axis

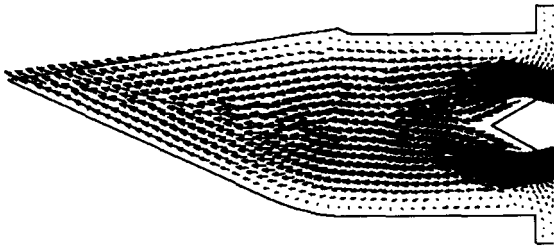


图 6 对称面速度矢量
Fig. 6 Velocity vector in symmetry section

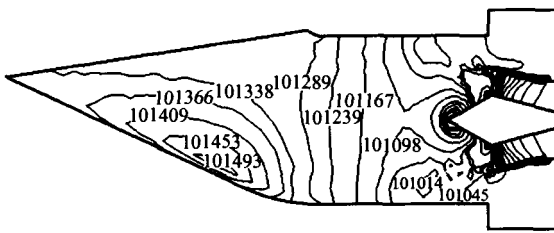


图 7 对称面压力等值线
Fig. 7 Pressure contour in symmetry section

排气系统后方的位置). 可以看出: 实验值与计算值的趋势基本一致, 误差在 15% 以内. 图中虚线为将模型 C 试验数据按照式 $I_2/I_1 = s^2$ 外推得到的结果. 式中 s 为几何模化比, I_2, I_1 分别为模型 B 和 C 的红外辐射强度. 实验与计算数据都表明, 大模型的红外辐射强度与小模型红外辐射强度之间的关系基本上遵守这一规律, 即在保持 2 个模型主流速度、温度和压力均相同的条件下, 红外辐射强度基本上与模型的几何模化比平方成正比^[8,17]. 图 9 为模型 B 和 C 的红外辐射强度沿方位角繁荣分布, 可见两者的变化趋势一致, 且在数值上也基本满足辐射强度之比等于几何模化比的平方这一规律.

图 10 是模型 C 在不同主流温度下的红外辐射强度分布计算结果. 为了研究主流温度对红外辐射强度的影响, 用数值模拟的方法, 改变主流温度得到了如图 7 所示结果. 图中虚线为将模型 C 试验数据按照式 $I_4/I_3 = T^4$ 外推得到的结果. 式中 T 为温度比, I_4, I_3 分别为模型 C 在 973K 和 873K 主流温度下的红外辐射强度. 计算数据表明, 在保持模型的主流流量、压力均相同的条件下, 红外辐射强度基本上与模型主流温度的四次方成正比.

图 11 是模型 C 羽流光谱辐射照度的计算和实验结果分布. 可以看出: 计算结果表现出了气体辐射特性和大气吸收特性, 羽流中的二氧化碳在 $4.1 \sim 4.4 \mu\text{m}$ 波段发出了强烈辐射和在 $4.2 \sim 4.3 \mu\text{m}$ 处的大气强烈吸收, 光谱分布与实验结果基本一致. 以上

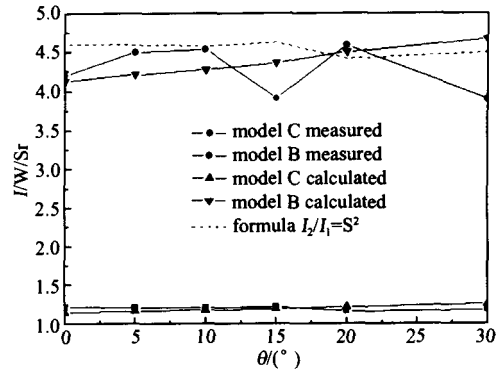


图 8 辐射强度的实验与计算比较
Fig. 8 Comparison of calculated and measured infrared radiation intensity

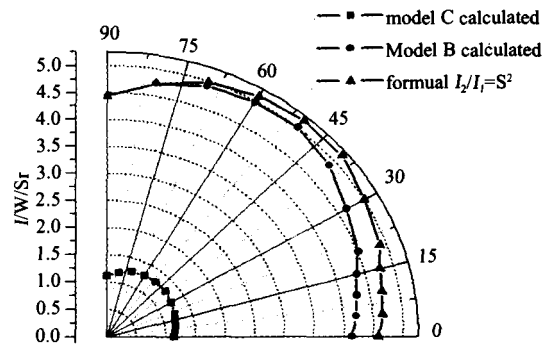


图 9 辐射强度与方位角
Fig. 9 Infrared radiation intensity vs azimuthal angle

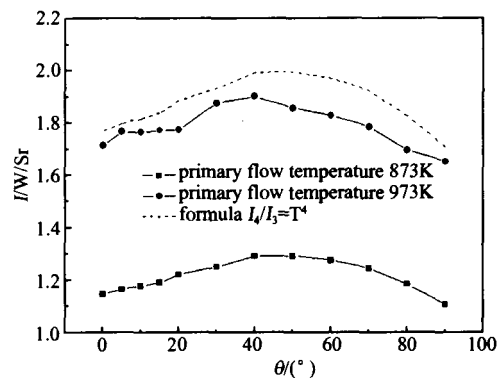


图 10 不同主流温度下模型 C 红外辐射强度分布
Fig. 10 Infrared radiation intensity distribution at difference primary flow temperature

计算结果符合物理本质.

4 结论

本文在基于 FLUENT 商用 CFD 软件对直升机红外抑制器的流场、温度场计算的基础上, 采用逆向蒙特卡罗法对实验模型进行了红外辐射特征的数值研究, 与相关实验数据的对比表明计算结果与实验

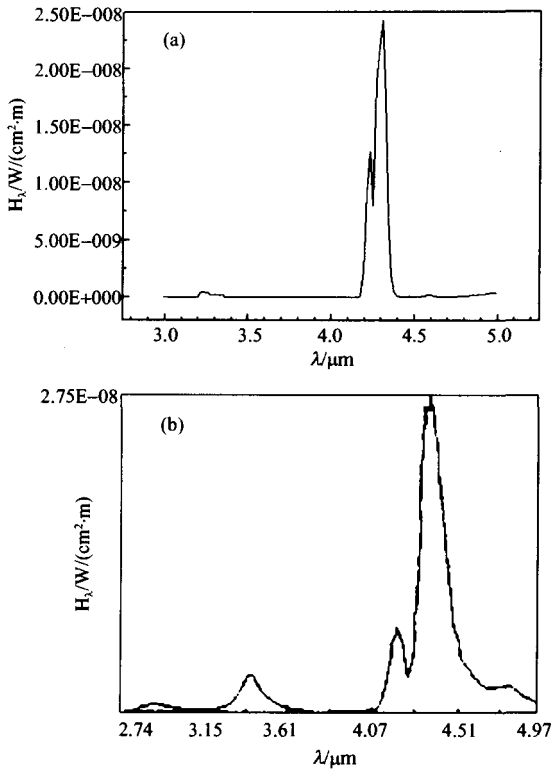


图 11 模型 C 羽流光谱辐射照度 (a) 计算结果 (b) 实验结果

Fig. 11 Infrared radiation irradiance spectrum of small model plume (a) calculated result (b) measured result

结果仅相差 15%，验证了本文计算方法和结果的正确性。

通过研究,得到以下结论:(1)在保持主流流量和压力均相同的条件下,红外辐射强度基本上与模型主流温度的四次方成正比;(2)在保持主流速度、温度和压力均相同的条件下,不同缩比模型的红外辐射强度基本上与模型的几何模化比平方成正比。

REFERENCES

- [1] Francois T. Internal aerodynamics of infrared suppressors for helicopter engines [R]. 40th Annual National Forum of the American Helicopter Society, 1984:1—14.
- [2] Power G D, McClure M D, Vinh D. Advanced IR suppressor design using a combined CFD/test approach [R]. AIAA Paper, 1994:94—3215.
- [3] ZHANG Jing-Zhou, LI Li-Gao, GAO Chao, et al. An experimental study on a lobed nozzle of an infrared suppression system [J]. *Journal of Aerospace Power* (张靖周, 李立国, 高潮, 等. 波瓣喷管红外抑制系统的实验研究. *航空动力学报*), 1997, 12(2):212—214.
- [4] Presz W M, Gousy R G, Morin B L. Forced mixer lobes in ejector designs [R]. AIAA Paper, 1986:86—1614.
- [5] Presz W M, Morin B L, Blinn R F. Short efficient ejector systems [R]. AIAA Paper, 1987:87—1837.
- [6] Liu Y H. Experimental and numerical investigation of circularly lobed nozzle with/without central plug [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45:2577—2585.
- [7] SHAN Yong, ZHANG Jing-Zhou. Numerical computation and examination of a lobed mixer-ejector [J]. *Journal of propulsion technology* (单勇, 张靖周. 波瓣喷管引射-混合器的数值研究与验证. *推进技术*), 2004, 25(4):320—324.
- [8] ZHANG Jing-Zhou, LI Li-Guo, GAO Chao. Model experiments of infrared suppressor for helicopter exhaust system [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张靖周, 李立国, 高潮. 直升机排气系统红外抑制器的模型实验研究. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(2):125—129.
- [9] TAO Wen-Quan. *Numerical Heat Transfer* [M]. Xian: Xi'an Jiaotong University Press (陶文铨. *数值传热学*. 西安:西安交通大学出版社), 1992.
- [10] Michael F. Modest backward monte carlo simulations in radiative heat transfer [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2003, 125(57).
- [11] LU Xiao-Dong, Hsu Pei-Feng. Reverse Monte Carlo method for transient radiative transfer in participating media [C]. ASME International Mechanical Engineering Congress Washington, D. C., 2003, 15—21.
- [12] YU Qi-Zheng. *The Theory of Radiation Heat Exchange* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press (余其铮. *辐射换热原理*. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社), 2000.
- [13] Ludwig C B, Malkmus W, Reardon J E, et al. Handbook of infrared radiation from combustion gases [R]. NASA SP-3080, 1973.
- [14] LIU Lin-Hua, DONG Shi-Kui, YU Qi-Zheng, et al. Atmospheric mean transmittance in wavelength interval 0.1 μm from infrared 1 to 14 μm, (I) Transmittance of carbon dioxide [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology* (刘林华, 董士奎, 余其铮, 等. 红外 1 ~ 14 μm 波长间隔 0.1 μm 上大气平均透过率, (I) 二氧化碳的透过率. *哈尔滨工业大学学报*), 1998, 30(5):8—12.
- [15] LIU Lin-Hua, DONG Shi-Kui, YU Qi-Zheng, et al. Atmospheric mean transmittance in wavelength interval 0.1 μm from infrared 1 to 14 μm, (II) Transmittance of water vapor [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology* (刘林华, 董士奎, 余其铮, 等. 红外 1 ~ 14 μm 波长间隔 0.1 μm 上大气平均透过率, (II) 水蒸汽的透过率. *哈尔滨工业大学学报*), 1999, 31(6):75—78.
- [16] XU Nan-Rong, BIAN Nan-Hua. *Infrared Radiation and Homing* [M]. Beijing: National Defence Industry Press (徐南荣, 卞南华. *红外辐射与制导*. 北京:国防工业出版社), 1997.
- [17] DU Zhao-Hui, ZHONG Fang-Yuan, ZHAO Yan. Effect of scale factor on infrared radiation characteristics of marine exhaust system with infrared signature suppression device and its correction [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杜朝辉, 钟芳源, 赵岩. 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. *红外与毫米波学报*), 2001, 20(6):437—441.