

文章编号:1000-6893(2007)01-0032-05

直升机排气系统用波瓣喷管 引射-混合式红外抑制器研究

张靖周, 单 勇, 李立国

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

Investigation on Lobed Nozzle Mixer-Ejector Infrared Suppressor for Helicopter Exhaust System

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

(College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

摘 要: 在针对直升机排气系统用波瓣喷管引射-混合式红外抑制器开展的一系列数值计算和模型实验研究基础上,对其内流气动特性和红外辐射特性进行较为系统的综合总结。揭示并分析了这种形式的红外抑制器内部混合流动特征,引射混合和隔热遮挡的红外抑制作用效果,以及红外抑制器缩比模型红外辐射模化关系;同时也指出了需进一步研究的一些问题。

关键词: 红外信号抑制;波瓣喷管;引射-混合器;直升机排气系统

中图分类号: V231.3;P722.5 **文献标识码:** A

Abstract: Based on a series of numerical computations and model experiments on the lobed nozzle mixer-ejector infrared signature suppressor used in helicopter gas turbine exhaust system, the comprehensive summary is made to reveal and analyze the internal aerodynamics of the infrared signature suppressor, the effects of ambient air pumping-mixing and heat shelter-insulation on decreasing the target infrared signature, and the infrared signature similarity between different scaled infrared signature suppressor models. Also some problems needed further investigation are presented.

Key words: infrared signature suppression; lobed nozzle; mixer-ejector; helicopter exhaust system

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^[1-3]。普通喷管的引射-混合器,主要依赖于主流黏性剪切力的作用泵抽次流并与之混合,引射能力弱、混合效率低,需要有很长的混合管才能充分混合,因而常规形式的喷管引射-混合器在航空应用中受到很大的限制。目前的红外抑制器广泛采用波瓣喷管作为引射主喷管结构,大量的研究表明,波瓣喷管具有诱发流向阵列旋涡的特征,引射-混合性能优越^[4-8]。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。

本文在针对波瓣喷管引射-混合式红外抑制器开展的一系列数值计算和模型实验研究基础

上,试图通过较为系统的综合总结,揭示并分析这种形式的红外抑制器内部混合流动特征,引射混合和隔热遮挡的红外抑制作用效果,以及红外抑制器缩比模型红外辐射模化关系;同时也对需进一步研究的一些问题提出看法。

1 研究方法

1.1 实验系统和模型^[9]

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。经过加热器或燃烧

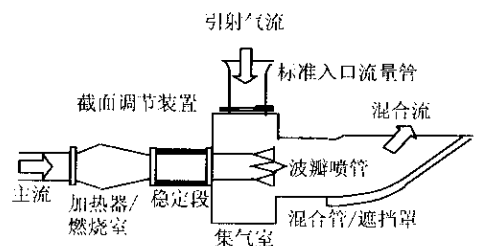


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic of test facility

收稿日期:2005-08-31; 修订日期:2006-03-31

基金项目:武器装备预研基金

通讯作者:张靖周, E-mail: zhangjz@nuaa.edu.cn

室后从喷管流出。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气流量。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(图 2)。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_m ,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如表 1 所示。

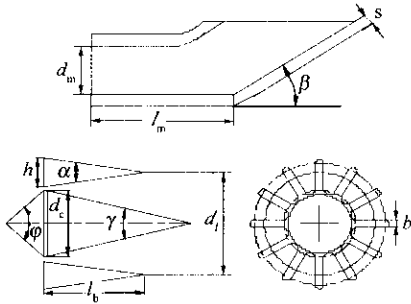


图 2 实验模型示意图

Fig. 2 Simplified mixer-ejector configuration

表 1 实验模型参数

Table 1 Parameters of test models

实验类别	气动		红外	
	模型 A	模型 B	模型 C	
喷管	d_1/mm	45	150	75
	$\alpha/(\text{^\circ})$	25	35	35
	h/mm	13.5	50	25
	b/mm	5	15	7.5
	$\gamma/(\text{^\circ})$	30	30	30
中心锥	$\varphi/(\text{^\circ})$	60	60	60
	d_c/mm	30	100	50
混合管	d_m/mm	100	300	150
	l_m/mm	100	170	85
遮挡罩	$\beta/(\text{^\circ})$	25	35	35
	s/mm	0~35	0/30	/

1.2 数学模型和计算方法^[8,10]

本文研究的物理模型是根据实验模型确定的,由于实验模型是平面对称结构,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。

由于引射气流依靠主流的动量驱动,其入口难以给定速度边界条件。考虑到外部环境的大气压力是一定的,引射气流入口处的总压和总温便可设定为环境大气压力和温度。在初始计算时,按照进口速度为 5 m/s 假定一个均匀的进口静压,通过迭代计算对静压值进行修正,同时对进口速度进行修正。当计算收敛后最终获得引射质量流量^[8]。

湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 二方程湍流模型,近壁区采用非平衡的壁面函数法进行处理。采用 Fluent 分离隐式求解器进行稳态计算,各物理量的离散采用二阶迎风格式。收敛的标准是判断各物理量的相对残差小于 10^{-5} 。

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

2 红外抑制器内流气动特性

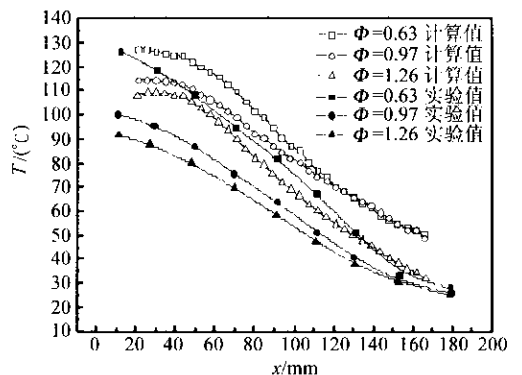
在电加热风洞上,通过对波瓣喷管和具有相同面积的圆喷管在相同的弯曲混合管结构参数下(对应表 1 模型 A)进行对比实验,实验条件为:主流流量为 0.06 kg/s,总温 240 $^\circ\text{C}$,总压 102 325 Pa,环境温度 28 $^\circ\text{C}$ 。2 种喷管引射流量比 Φ 的对比如表 2 所示。可以看出,在相同的主流状态下,波瓣喷管引射的冷空气量是圆喷管的 2 倍。

表 2 引射流量比实验结果

Table 2 Pumping ratio test(Experiment)

主流状态	波瓣喷管	圆喷管
冷态	1.39	0.68
热态	1.83	0.82

图 3 为通过调节引射气流通道的堵塞比得到的不同引射流量比下,波瓣喷管-弯曲混合管



(a) 椭圆长轴

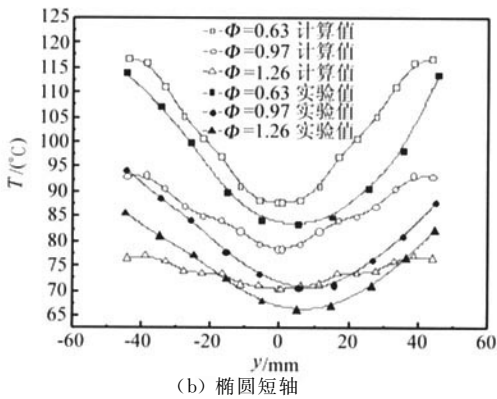


图3 模型A混合管出口温度分布

Fig. 3 Temperature distributions at mixing duct exit(model A)

椭圆形出口截面上的温度分布测试结果,以及相应的数值计算结果。图中椭圆长轴方向的原点取为弯曲段外侧前缘处。

一个值得注意的现象是在短轴上存在明显的马鞍形温度分布特征,即靠近中央的温度低于两侧的温度;而在长轴方向则呈现尾部气流温度明显高于前缘的分布。随着引射流量比的增加,马鞍形趋于平缓,长轴方向的温度梯度也趋衰减。

为了阐述上述特征,选择在混合管直段中3个流向截面上的速度矢量图进行分析。图中 x 为流向混合距离。

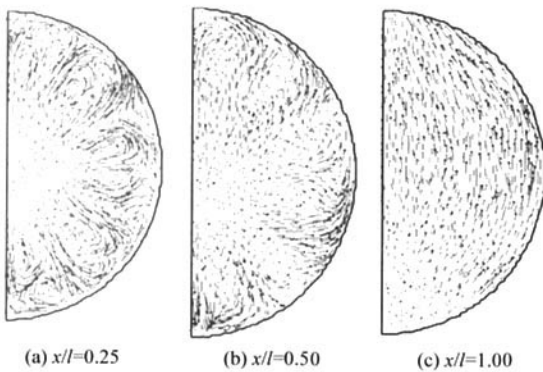


图4 混合管直段流向截面上速度矢量(计算值)

Fig. 4 Velocity vectors at streamwise section (Num.)

波瓣喷管具有诱发流向阵列旋涡的特征,正是由于这种流向涡的作用,加强了主流与引射气流之间的混合,也增强了主流泵吸引射气流的能力。在直管段后部,由于流向涡强度的衰减和弯曲混合管诱发的二次流影响,此时流向涡的作用已基本消失。

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5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。弯管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,这就造成了在椭圆形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。

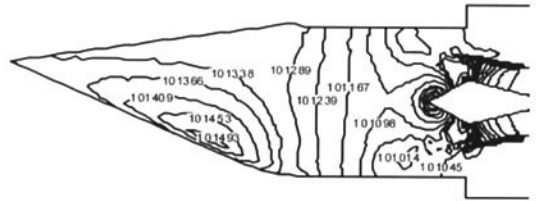


图5 混合管对称面压力等值线(计算值)

Fig. 5 Pressure contours in symmetry section (Num.)

对弯曲段从入口到出口依次截取3个椭圆截面(分别命名为W1,W2,W3)分析其内部的流场(图6)。从流线可以清晰地看出:由于弯曲引起的二次流动,位于中心的高温气流被弯管二次流带着向外侧运动,在外侧壁面的限制挤压下,转而向短轴两侧运动,从而形成短轴方向中央温度低于两侧温度的马鞍形温度分布特征。

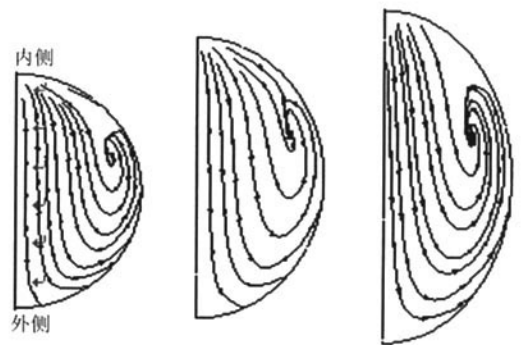


图6 混合管弯曲段截面流线(计算值)

Fig. 6 Streamlines at the curved duct section (Num.)

由上述分析,弯曲混合管出口截面出现的温度分布型,排气峰值温度未能得到较大幅度的降低,因此如何进一步降低排气峰值温度仍需要开展必要的研究。

3 红外抑制器红外辐射特性

为了分析缩比模型红外特性测试结果的可推广性,寻求不同尺度模型的红外辐射相似关系,设计了2种几何相似、几何相似比例为2的红外抑制器模型(对应表1模型B和模型C)。在对比实验中,大小模型的主流流量控制在4:1,模型B主流流量为1.0 kg/s,从而保证主流的速度相等而表征流动相似的雷诺数不同,主流的总温和总压基本相同,总温600°C,总压112 060 Pa,环境温度32°C。抑制器未采用遮挡罩。

数值计算和实验测试得出:2种实验模型得

到的引射流量比基本相同,二者相差仅 6% 以内;混合管椭圆形出口截面上的温度和壁面温度分布也基本相同,在对应的空间位置上二者之间的最大温度相差 4℃。

模型 B 和模型 C 在 3~5 μm 波段的红外辐射亮度比较见图 7。可以发现,二者无论在数值上,还是在分布上基本一致。表明在保持 2 个模型的主流速度、温度和压力均相同的条件下,由于引射流量比、混合流出口的速度和温度分布型面相似且在对应的空间位置上数值基本相等,以及混合管壁面温度分布也相似且在对应的空间位置上数值基本相等,这些因素使得表征单位面积上辐射强度的红外物理量-辐射亮度与模型尺度的相关性几乎可以不考虑。

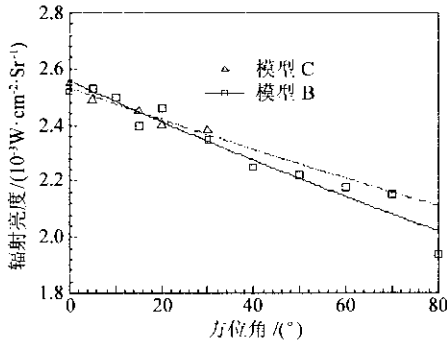


图 7 模型 B 和 C 辐射亮度随方位角的分布(实验值)

Fig. 7 Distribution of irradiance vs azimuthal angle(Model B & C, Exp.)

图 8 是模型 B 和 C 在 3~5 μm 波段的红外辐射强度实验与计算值的对比。图中虚线为将模型 C 试验数据按照式 $I_B/I_C = \gamma^2$ 外推得到的结果,式中 γ 为几何模化比。实验与计算数据都表明,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。

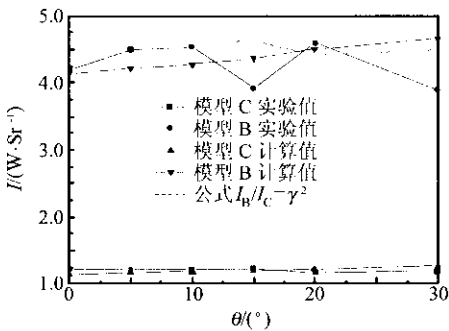


图 8 辐射强度的实验与计算比较

Fig. 8 Comparison of calculated and measured infrared radiation intensities

图 9 为相对辐射强度随方位角的分布,图中,以简单排气管的最大辐射强度作为基准,椭圆形排

气口长轴方向为 0°方位角。简单排气管的排气截面积与模型 B 波瓣喷管(不含中心锥体)相等、几何形状与弯曲混合管相似,遮挡罩间距固定为 30 mm。

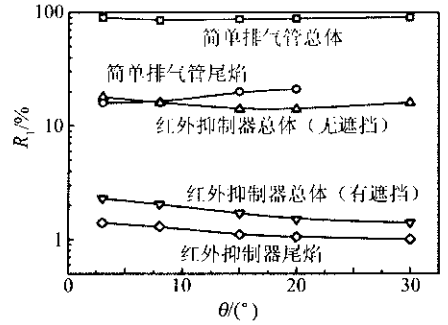


图 9 相对辐射强度随方位角的分布(实验值)

Fig. 9 Distributions of relative radiance intensity vs azimuthal angle (Exp.)

比较发现:(1)对无抑制简单排气管,尾焰辐射只占其总体辐射的 20% 左右,采用抑制器后,尾焰辐射可降低 97% 左右;(2)对于未加遮挡的红外抑制器,其红外辐射强度相对于无抑制排气管可以降低约 85%,加遮挡比未加遮挡的红外抑制器又有约 10% 的衰减。表明引射混合和隔热遮挡对降低红外辐射特征信号都具有重要的作用效果,特别是引射混合机制,既可以降低尾焰温度,又可以降低混合管壁面温度,作用具有双重性。

图 10 为加装遮挡罩时 3~5 μm 和 8~14 μm 2 个波段内的红外抑制器辐射亮度比较。可以看出,红外抑制器尽管可把暴露热部件和排气尾焰在 3~5 μm 波段内的红外辐射亮度降低到 $0.15 \times 10^{-3} \sim 0.29 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{Sr}$,但是同样的目标在 8~14 μm 波段内的红外辐射亮度仍有 $4.5 \times 10^{-3} \sim 4.9 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{Sr}$ 这样大的数值,几乎比 3~5 μm 波段的数值大 20 至 25 倍。由此可见,对于 8~14 μm 波段内的红外辐射,尽管遮挡罩的最高温度降低至仅比环境温度高 8℃ 左右,但红外辐射仍然较强,还需开展降低表面温度与降低表面辐射率的技术研究。

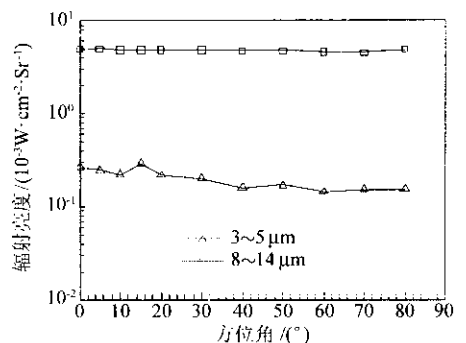


图 10 辐射亮度随方位角的分布(实验值)

Fig. 10 Distributions of irradiance vs azimuthal angle

4 结 论

(1) 波瓣喷管引射-混合式红外抑制器对抑制排气系统红外辐射强度具有很好的效果,在红外抑制器设计中,应尽可能地寻求高引射流量比的结构设计方案。

(2) 在保持主流速度、温度和压力相同的条件下,一定范围内的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。

(3) 进一步改善弯曲混合管椭圆形出口的温度分布均匀性,降低外露表面温度与表面辐射率,仍需要开展相应的研究。

参 考 文 献

- [1] Francois T. Internal aerodynamics of infrared suppressors for helicopter engines[C]//40th Annual National Forum of the American Helicopter Society. 1984.
- [2] Power G D, McClure M D, Vinh D. Advanced IR suppressor design using a combined CFD/test approach [R]. AIAA 94-3215, 1994.
- [3] 张靖周, 李立国, 高潮, 等. 波瓣喷管红外抑制系统的实验研究[J]. 航空动力学报, 1997, 12(2): 212-214.
Zhang J Z, Li L G, Gao C, et al. An experimental study on a lobed nozzle of an infrared suppression system [J]. Journal of Aerospace Power, 1997, 12(2): 212-214. (in Chinese)
- [4] Presz W M, Gousy R G, Morin B L. Forced mixer lobes in ejector designs[R]. AIAA 86-1614, 1986.
- [5] Presz W M, Morin B L, Blinn R F. Short efficient ejector systems[R]. AIAA 87-1837, 1987.
- [6] Skebe S A, McCormick D C, Presz W M. Parameter effects on mixer-ejector pumping performance [R]. AIAA 88-

0188, 1988.

- [7] 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.
- [8] Zhang J Z, Shan Y, Li L G. Computation and validation of parameter effects on lobed mixer-ejector performances[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2005, 18(3): 193-198.
- [9] 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[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(2): 125-129.
Zhang J Z, Li L G, Gao C. Model experiments of infrared suppressor for helicopter exhaust system [J]. J Infrared Milim Waves, 2005, 24(2): 125-129. (in Chinese)
- [10] 亓雪芹, 王平阳, 张靖周, 等. 反向蒙特卡罗法模拟波瓣喷管的红外辐射特性[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(8): 1229-1232.
Qi X Q, Wang P Y, Zhang J Z, et al. Reverse Monte Carlo simulation on infrared radiation of lobed nozzle/mixer plume[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(8): 1229-1232. (in Chinese)

作者简介:



张靖周(1964—) 男,教授,博士。主要研究方向:强化传热、红外隐身等方面的研究。E-mail: zhangjz@nuaa.edu.cn, 电话:025-84893666。

单 勇(1978—) 男,博士研究生。主要研究方向:传热和红外隐身研究。电话:025-84892200。

李立国(1935—) 男,教授。主要研究方向:强化传热、红外隐身等方面的研究。联系电话:025-84892200。

(责任编辑:刘振国)