

文章编号:1001-9014(2005)02-0125-05

直升机排气系统红外抑制器的模型实验研究

张靖周, 李立国, 高潮

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要:对直升机排气系统红外抑制器进行了一系列的模型试验研究,旨在分析引射混合和遮挡隔热对降低目标红外辐射特征的作用机制和抑制效果,并对缩比模型的红外辐射相似关系进行探讨.结果表明:(1)引射冷气掺混具有降低排气温度和混合管壁面温度的双重作用,其降温效果在大引射流量比下非常显著;当遮挡间距大于20mm,遮挡隔热可以使遮挡罩壁温接近于环境温度.(2)引射混合对总体红外辐射强度抑制约85%;在此基础上进行隔热遮挡可以再抑制10%.(3)在保持主流速度、温度和压力均相同的条件下,不同缩比模型的辐射亮度基本相当;红外辐射强度基本上与模型的几何模化比平方成正比.

关键词:红外辐射;红外抑制;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

MODEL EXPERIMENTS OF INFRARED SUPPRESSOR FOR HELICOPTER EXHAUST SYSTEM

ZHANG Jing-Zhou, LI Li-Guo, GAO Chao

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

Abstract: A series of model experiments for the infrared signature suppression (IRSS) device used in the helicopter gas turbine exhaust system were carried out to investigate the effects of ambient air pumping-mixing and heat shelter-insulation on decreasing the target infrared signature and quest for the infrared signature similarity between two scaled models with different scale factors. The results show that (1) Ambient air pumping-mixing plays a dual role for reducing the exhaust temperature and mixing duct temperature and this role is more obvious in the case of larger mass flow ratio of secondary flow to primary flow. Sheltering from the hot mixing duct wall makes the sheltering sheath temperature close to ambient temperature in case of the sheltering distance greater than 20mm. (2) Ambient air pumping-mixing contributes about 85% suppression for the total target infrared radiation intensity and heat shelter-insulation contributes about 10% suppression again. (3) While the primary flow velocity, temperature and pressure are at the same condition for different scaled models, the irradiances for different scaled models are almost the same and the infrared radiation intensity is almost proportion to the square of model scale factor.

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

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.

由于发动机运行的工况复杂,直接利用发动机开展红外抑制器的研究无论在成本上、还是时间上都需要付出很大代价.因此采用缩比实验模型所得到的研究结果如何推广应用于真实的状态,是红外抑制器性能分析和结构设计的一个关键问题^[1-3].同时,由于红外辐射具有表面辐射和气体辐射两种来源,引射混合和隔热遮挡的红外抑制作用效果如何,目前仍未有清晰的认识.本文通过一系列的模型实验研究,对波瓣喷管-弯曲混合管引射式红外抑制

收稿日期:2004-03-01,修回日期:2004-09-20

基金项目:武器装备预研基金(51410040304HK0201)资助项目

作者简介:张靖周(1964-),男,江苏东海人,教授,研究方向为传热传质学与红外隐身技术.

Received date: 2004-03-01, revised date: 2004-09-20

器的气动和红外特性进行了测试,基于上述测试数据,分析了引射混合和遮挡隔热的作用机制和红外抑制效果,并对缩比模型的红外辐射相似关系进行了探讨,得出了一些有益的结论.

1 实验系统和模型

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. 经过加热器或燃烧室后从喷管流出,前者用于气动特性测试实验,后者则用于红外特征测试实验. 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 ;中心锥体结构参数有入口锥角 r^2 ,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 所列.

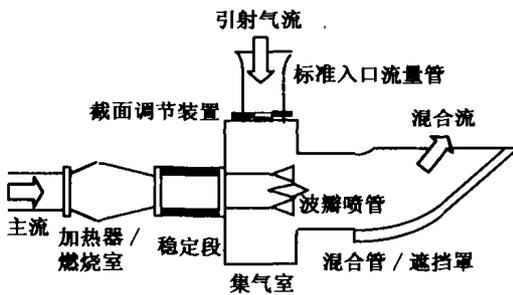


图 1 实验装置示意图
Fig. 1 Schematic of experiment equipment

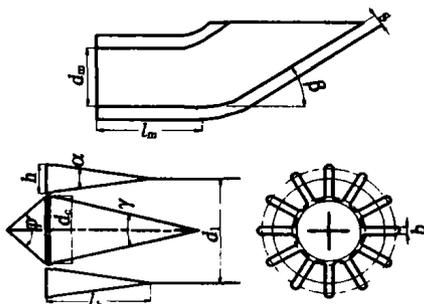


图 2 实验模型示意图
Fig. 2 Schematic experiment model

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		红外	
	小模型	大模型	小模型	
d_1 (mm)	45	150	75	
α ($^\circ$)	25	35	35	
h (mm)	13.5	50	25	
b (mm)	5	15	7.5	
γ ($^\circ$)	30	30	30	
φ ($^\circ$)	60	60	60	
d_c (mm)	30	100	50	
d_m (mm)	100	300	150	
l (mm)	100	170	85	
β ($^\circ$)	25	35	35	
s (mm)	0~35	0/30	/	

2 引射流量与遮挡间距的影响

在电加热风洞上,通过改变引射气流通道的堵塞比和遮挡罩的遮挡间距,研究引射流量比和遮挡间距对混合管出口气流总温、混合管和遮挡罩底部壁面温度分布的影响. 实验条件:主流流量为 0.06kg/s,总温 240 $^\circ$ C,总压 102 325Pa,环境温度 28 $^\circ$ C.

图 3 为引射流量比 ($\Phi = m_p/m_s$) 与引射气流通道面积堵塞比之间的变化曲线.

可以看出,引射流量比随着引射气流通道面积堵塞比的增加而下降的关系并不是线性的,在较大的堵塞比下衰减得更剧烈.

图 4 反映了在不同引射流量比和遮挡间距下,混合管出口气流最高温度、混合管和遮挡罩壁面最高温度的变化趋势. 随着引射流量比的增加,混合气流最高温度和混合管壁面最高温度大幅下降,且两者之间的差值也呈逐渐扩大. 表明引射冷气的作用机制是双重的,即引射气流对热气流的掺混作用和

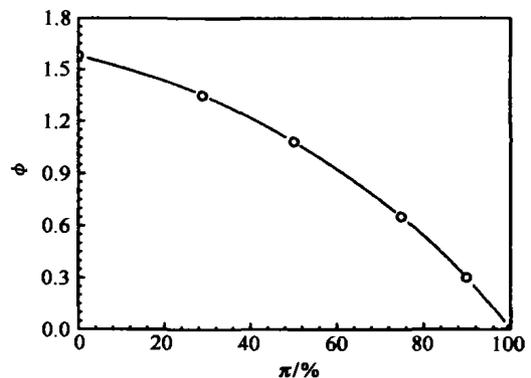


图 3 引射流量比与堵塞比的关系
Fig. 3 Mass flow ratio vs block area ratio

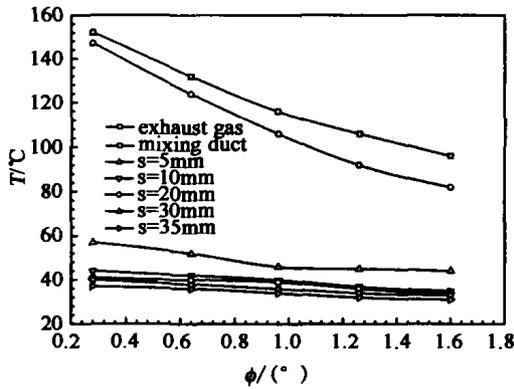


图4 引射流量比和遮挡间距对排气和壁面温度的影响
Fig.4 Effects of m_1/m_p and s on exhaust gas and wall temperatures

对混合管壁面的隔热防护作用.随着遮挡间距的增加,遮挡罩壁面的最高温度在 $s = 0 \sim 10\text{mm}$ 的范围内急剧下降;在 $s = 30\text{mm}$ 之后,再增加遮挡间距对降低遮挡罩壁面温度的贡献就不明显了,而且此时引射流量比对遮挡罩壁面温度的影响也不太显著.

3 红外特性测试

在燃烧实验台架上对红外抑制器大模型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,燃气中的主要辐射成份为 H_2O 和 CO_2 .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.为了评价红外抑制的抑制层次和效果,设计了一个排气截面积和波瓣喷管(不含中心锥体)相等、几何形状与弯曲混合管相似的简单排气管.同时对红外抑制器分别采取不加遮挡罩、加遮挡罩、对遮挡罩再遮挡等方式进行测试.实验条件:主流流量为 1.0kg/s ,总温为 600°C ,总压为 $112\ 060\text{Pa}$,环境温度 32°C ,遮挡罩间距 30mm .

测得的主要参数为:引射流量比为 1.8 ,混合管出口气流最高温度 222°C ,平均排气温度约 150°C ,混合管壁面最高温度 180°C ,遮挡罩壁面最高温度 40°C .无抑制排气管的出口气流最高温度 554°C ,平均排气温度约 400°C ,混合管壁面最高温度 343°C .

图5为波瓣喷管红外抑制器和简单排气管的排气尾焰的光谱辐射照度,可见:两者的光谱分布具有很强的相似性,峰值辐射波长为 $4.38\mu\text{m}$,这主要是二氧化碳的波段辐射;但是峰值辐射照度的数值却差一个数量级.

图6为 $3 \sim 5\mu\text{m}$ 波段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.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;

(2) 对于未加遮挡的红外抑制器,尽管暴露的面积和排气尾焰的体积比无抑制简单排气管要高几倍,但由于温度大大降低,其红外辐射强度可以降低约 85% ;这可以看作是引射冷气混合对总体红外辐射抑制的贡献;

(3) 对于加遮挡的红外抑制器,由于外露壁面温度大幅降低,相对无抑制简单排气管红外辐射强度可以降低 97% ,比未加遮挡的红外抑制器又有约 10% 的衰减;这可以看作是隔热遮挡对总体红外辐射抑制的贡献;

(4) 如果再对遮挡罩进行再遮挡,使壁面辐射的影响消除,则红外抑制器的尾焰辐射强度公变无抑制简单排气管总体辐射强度的 $1 \sim 2\%$ 左右,与无抑制简单排气管的尾焰辐射相比,红外辐射强度下降了 97% .

由此可以分析出红外抑制器引射混合和隔热遮挡的作用层次:引射混合对总体红外辐射强度抑制

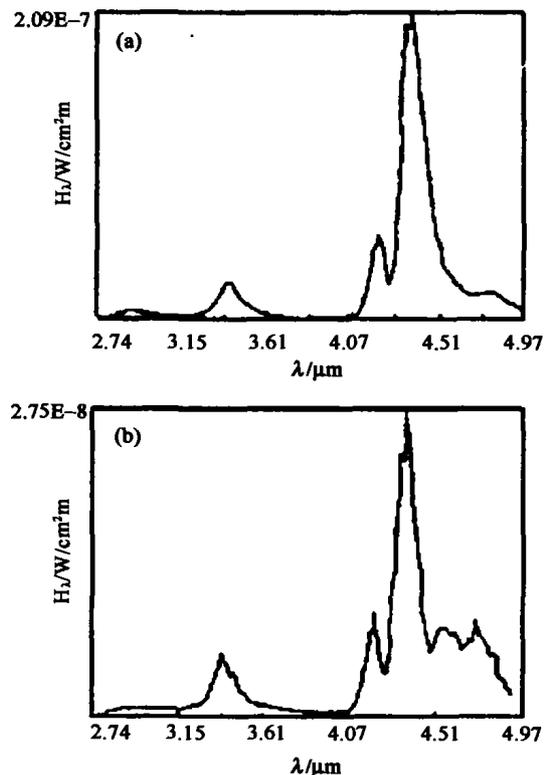


图5 排气尾焰的光谱辐射照度
(a) 简单排气管 (b) 红外抑制器
Fig.5 Exhaust plume irradiance
(a) simple exhaust duct (b) IR suppressor

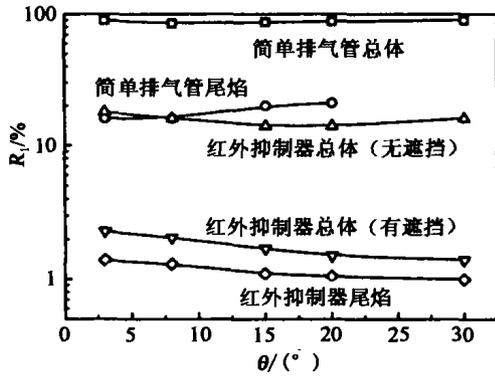


图6 相对辐射强度随方位角的分布
Fig. 6 Distribution of relative radiance intensity vs azimuthal angle

约 85% ;在此基础上进行隔热遮挡可以再抑制 10% 左右.

图 7 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到 0.15 ~ 0.29 × 10⁻¹ W/cm² · Sr, 但是同样的目标在 8 ~ 14 μm 波段内的红外辐射亮度仍为 4.5 ~ 4.9 × 10⁻³ W/cm² · Sr 这样大的数值, 几乎经 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至仅比环境温度高 8℃, 但红外辐射仍然较强, 还需与降低目标辐射率的措施相结合.

4 大小模型对比

为了分析缩比模型红外特性测试结果的可推广性, 寻求不同尺度模式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. 在对比实验中, 大小模型的主流流量控制在

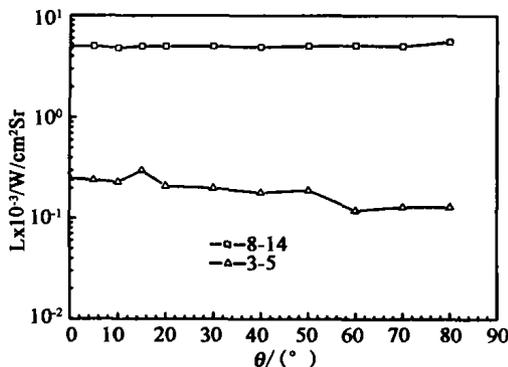


图7 辐射亮度随方位角的分布
Fig. 7 Distribution of irradiance vs azimuthal angle

4: 1, 采用相同比例的油气比, 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、总压和成份基本相同. 抑制器未采用遮挡罩.

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, 图 8 为椭圆形出口截面上沿长轴方向的温度分布情况; 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, 最大温度相差 4℃.

2 个不同尺寸实验模型在 3 ~ 5 μm 波段的红外辐射亮度比较见图 9. 可以发现, 2 个实验模型的红外辐射亮度无论在数值上, 还是在分布上基本一致. 表明在保持两个模型的主流速度、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. 同时, 由于此时未采用遮挡罩, 大模型的红外辐射亮度比采用遮挡罩时

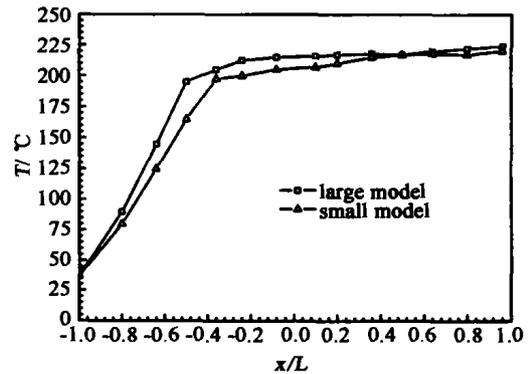


图8 椭圆形出口长轴上气流温度
Fig. 8 Mixing flow temperature distribution in the long axis of ellipse exhaust exit

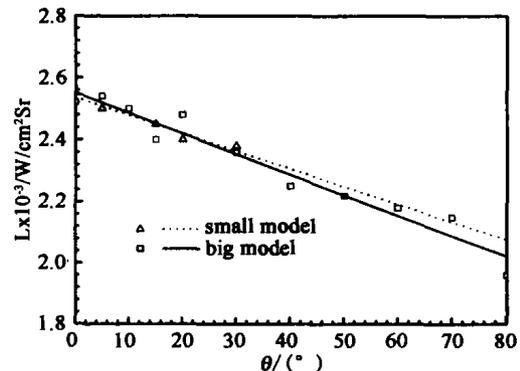


图9 辐射亮度随方位角的分布
Fig. 9 Distribution of irradiance vs azimuthal angle

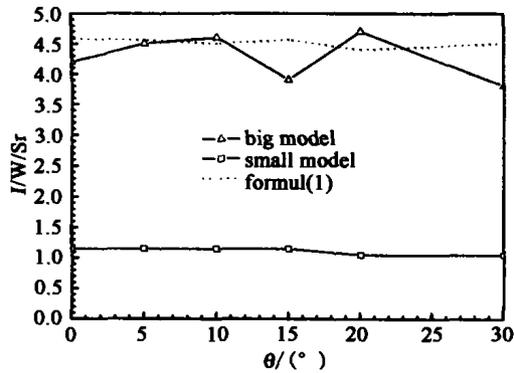


图 10 辐射强度随方位角的分布

Fig. 10 Distribution of radiation intensity vs azimuthal angle

(图 7) 高出一个数量级。

图 10 为大小模型红外辐射强度的比较, 图中虚线为将小模型试验数据按照式(1)

$$I_2/I_1 = s^2. \quad (1)$$

外推得到的结果. 式中 s 为几何模化比。

实验数据表明, 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式(1), 即在保持 2 个模型的主流速度、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。

4 结语

本文在小型低速热喷流实验装置上对直升机排气系统红外抑制器进行了一系列的模型试验研究, 结果表明:

(1) 引射冷气掺混具有降低排气温度和混合管壁面温度的双重作用, 其降温效果在大引射流量比下非常显著. 因此, 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) 当遮挡间距大于 20mm, 遮挡隔热可以使遮挡罩壁温接近于环境温度. 当遮挡间距大于 30mm 时, 再增大遮挡间距对降低遮挡罩壁面温度的贡献就非常微弱了, 而且此时引射流量比对遮挡罩壁面温度的影响也不太显著。

(3) 排气尾焰的光谱辐射分布具有很强的相似性, 峰值辐射波长为 $4.38\mu\text{m}$. 采取红外抑制器的排气尾焰峰值辐射照度比未抑制排气降低一个数量级。

(4) 引射混合对目标总体红外辐射强度抑制约 85%; 在此基础上进行隔热遮挡可以再抑制 10% 左右。

(5) 在保持主流速度、温度和压力均相同的条件下, 不同缩比模型的辐射亮度基本相当; 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 [C]. 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, 94-3215, 1994.
- [3] ZHANG Jing-Zhou, LI Li-Guo, 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 86—1614, 1986.
- [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(13): 2577—2585.
- [7] Zhang Jing-Zhou, Xie Zhi-Rong. Three-dimensional computational study for flow fields within fore lobe mixer [R]. ISABE-2003-1104, 2003.
- [8] Birk A M, Vandam D. Infrared signature suppression for marine gas turbine: comparison of sea trail and model test result for the DRES IRSS system [J]. *ASMA Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1994, 116(1):75—81.
- [9] 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.