

二元弯曲混合管出口结构参数对红外抑制器气动和辐射特性的影响

陈 庚, 谭晓茗, 单 勇, 张靖周

(南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘 要: 采用 CFD 和 IR 综合计算分析的方法, 研究了不同结构参数的二元弯曲混合管对红外抑制器性能的影响。计算结果表明: 与矩形出口的二元弯曲混合管相比, 波瓣型面的混合管出口增加了排气出口周长, 依靠粘性和剪切力的作用实现剪切混合, 二次引射能力增强, 抑制器整体引射性能最大提高了 19.2%。同时, 混合管壁面温度也显著降低, 抑制器垂直方向上 3~5 μm 波段的红外辐射强度峰值最高降低了 13.3%; 在波瓣瓣高一定时, 随着波瓣数增加, 红外抑制器整体引射系数先增大后减小, 而总压恢复系数先减小后增大; 在波瓣瓣宽一定时, 随着瓣高增加, 红外抑制器引射系数逐渐增大, 而总压恢复系数逐渐减小, 辐射强度峰值最大降低了 11.6%。

关键词: 红外抑制器; 两级引射; 二元弯曲混合管; 波瓣混合器; 引射系数; 总压恢复系数; 红外辐射强度

中图分类号: V231.3 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)06-1704-08

Impacts of two-dimensional curved mixing duct exit geometric parameters on flow dynamics and infrared radiation characteristics for IR suppressor

Chen Geng, Tan Xiaoming, Shan Yong, Zhang Jingzhou

(Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power Systems, College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on general CFD/IR numerical simulations, the effects of two-dimensional curved mixing duct geometric parameters on helicopter aerodynamics and infrared radiation characteristics were investigated. Conclusions can be drawn as follows according to the computational results: Compared with two-dimensional curved mixing duct with rectangular outlet, the distorted configurations of mixing duct lobed rectangular outlet extend the perimeter of exhaust exit, thus the strength of the secondary flow shed by lobes is enhanced due to the effective shear-mixing caused by viscous and shear force, which contributes to a maximum increase about 19.2% in pumping capacity of the overall IR suppressor.

收稿日期: 2014-10-29; 修订日期: 2014-12-03

基金项目: 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfjj201408); 中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介: 陈庚(1992-), 男, 硕士生, 主要从事传热与红外抑制技术方面的研究。Email: chengeng@nuaa.edu.cn

导师简介: 谭晓茗(1976-), 女, 副教授, 主要从事主动流动控制及航空发动机热端部件冷却技术研究。

Simultaneously, wall temperature of mixing duct is reduced significantly and the maximum infrared radiation intensity is decreased about 13.3% to its highest when changing the shape of mixing duct outlet from rectangle to rectangular lobe. When the lobe heights of mixing ducts remain unchanged, with the increase of lobe numbers, the pumping ratio of IR suppressor firstly increases then decreases, while the total pressure recovery coefficient firstly decreases then increases. In addition, when the lobe numbers of remain unchanged, with the increase of lobe heights, the pumping ratio rises gradually, but the total pressure recovery coefficient keeps declining, and in this situation, the infrared radiation intensity peak achieve a maximum decrease about 11.6%.

Key words: IR suppressor; two-stage ejection; two-dimensional curved mixing duct; lobed mixer; pumping ratio; total pressure recovery coefficient; infrared radiation intensity

0 引言

直升机发动机排气系统外露壁面和燃气尾焰是红外制导武器的主要跟踪目标。减少排气系统的红外辐射,国内外大部分武装直升机排气系统使用了波瓣喷管引射混合式红外抑制系统,该系统将周围环境空气引射到排气系统内部与发动机高温排气充分混合,从而降低排气峰值温度,达到降低红外辐射的目的^[1-7]。自20世纪80年代,Paterson R W^[8]首次揭示波瓣混合器强化混合两股流体的机理以来,国内外学者围绕波瓣喷管引射混合式红外抑制系统开展了大量的研究工作。谢翌、岳巍等^[9-10]对波瓣混合器涡系结构的形成机理和发展过程进行了详细的研究和探讨,较好地描述了波瓣混合器复杂流场中的流向涡、正交涡等变化规律;张靖周、王先炜等^[11-14]对波瓣喷管引射-混合式红外抑制器开展了一系列数值计算和模型实验研究,对其内部流动特性和红外辐射特性进行了较为系统的总结,获得了引射混合器的结构参数对引射性能的影响规律。为了进一步提高红外抑制系统引射外界环境冷气、强化热气和冷却的混合,Presz和Werle^[15]提出了两级引射的概念,并开展了相关研究。

文中利用引射混合式红外抑制器的混合管和直升机排气系统遮挡罩构成二级引射,并将弯曲的二元混合管出口设计为直排波瓣,运用气动热力计算和红外辐射数值模拟综合的方法,分析二元弯曲混合管出口的波瓣结构参数变化对红外抑制器整体气动性能和红外辐射特性的影响。

1 物理模型和计算方法

1.1 计算模型

图1为文中的红外抑制器结构,该红外抑制器由中心锥(Central plug)、圆排波瓣喷管(Lobed nozzle)、二元弯曲混合管(Mixing duct)和遮挡罩(Covering shelter)构成。中心锥与波瓣喷管之间为主流入口(即发动机涡轮出口),圆排波瓣喷管与二元弯曲混合管构成一级引射结构,二元弯曲混合管和遮挡罩构成二级引射结构。发动机涡轮排出的高温燃气从主流入口进入圆排波瓣喷管,抽吸外界环境气流,与之在二元弯曲混合管内混合;掺混后的燃气在排出二元弯曲混合管时再次抽吸外界环境气流,与之混合。高温燃气经历了以上两次引射和掺混过程后流出红外抑制器。

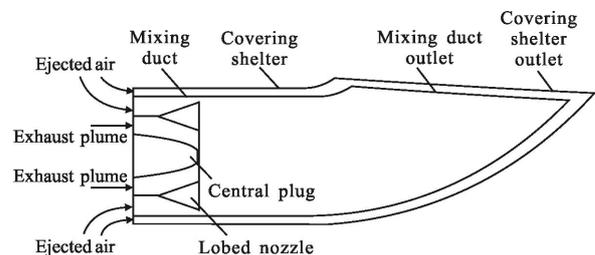


图1 直升机红外抑制器结构

Fig.1 Structure schematic of helicopter IR suppressor

如图2所示,圆排波瓣喷管的12个波瓣沿周向均匀分布,定义喷管直径 d_1 为400 mm,波瓣扩张角 α 为 40° ,波瓣内直径 R_{in} 为138 mm,波瓣外直径 R_{out} 为276 mm,瓣宽 b 为37 mm,喷管直管段长度 l_1 为

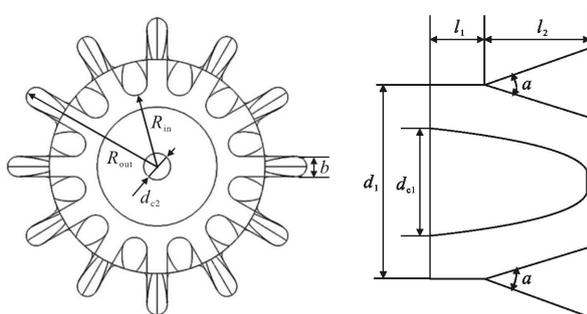
112 mm, 波瓣轴向长度 l_2 为 214 mm; 中心锥体内外直径 d_{c1} 和 d_{c2} 分别为 220 mm 和 50 mm, 锥体长度与波瓣喷管长度相等。如图 3(a)所示, 二元弯曲混合管和遮挡罩结构参数分别为: 混合管直管段长度 L_m 为 886 mm, 遮挡罩直管段长度 L_s 为 886 mm, 混合管直径 D 为 600 mm, 混合管和遮挡罩弯曲角度 β 为 25° , 遮挡间距 s 为 44 mm, 出口平面相对间距 r 为 40 mm 以及出口平面与水平面夹角 γ 为 3.5° 。按照以上结构设计, 混合管长径比 L_m/D 固定为 1.48, 截面比 λ (混合管入口面积与波瓣喷管出口面积之比) 固定为 2.34。

(遮挡罩出口面积为 $895\ 180\ \text{mm}^2$, 混合管出口面积为 $347\ 286\ \text{mm}^2$); 改变二元弯曲混合管出口波瓣的宽度 b_m 和瓣高 h_m , 得到了一系列不同波瓣数 N_{lobe} 和瓣高 h_m 的混合管 M1~M10, 其中 M1~M6 号混合管瓣高保持 105 mm 不变, 波瓣数从 8 增至 18, 瓣宽从 156 mm 减至 72.8 mm; M7、M8、M4、M9 和 M10 号混合管保持瓣宽 84 mm 不变, 瓣高从 75 mm 增至 135 mm, 如表 1 所示。

表 1 混合管波瓣出口几何参数

Tab.1 Geometry parameters of curved mixing duct outlet

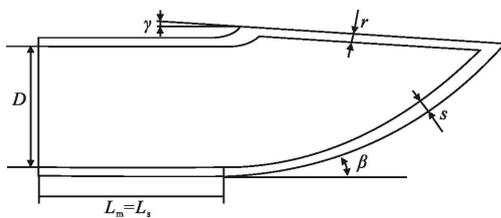
		outlet									
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
N_{lobe}		8	10	12	14	16	18	14	14	14	14
b_m /mm		156	121.3	99.3	84	72.8	64.2	84	84	84	84
h_m /mm		105	105	105	105	105	105	75	90	120	135



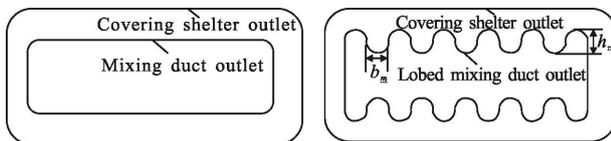
(a) 后视图 (b) 侧视图
(a) Rear view (b) Side view

图 2 圆排波瓣喷管和中心锥结构

Fig.2 Structure schematic of lobed nozzle and central plug



(a) 中心对称截面
(a) Central symmetrical section



(b) 混合管矩形出口 (c) 混合管矩形波瓣出口
(b) Curved mixing duct outlet (c) Lobed mixing duct outlet

图 3 混合管和遮挡罩结构

Fig.3 Scheme diagram of mixing duct and covering shelter

二元弯曲混合管出口分别设计成矩形和波瓣形, 如图 3(b)和图 3(c)所示。波瓣呈同向布置(即波瓣的波峰对波峰)。遮挡罩和混合管出口面积不变

1.2 网格划分和边界条件

考虑到圆排波瓣喷管、二元弯曲混合管和遮挡罩等复杂型面和结构, 采用非结构化网格, 并在波瓣壁面附近局部加密, 经网格独立性试验, 总体网格数约为 350 万。红外抑制器主流入口采用质量流量入口, 质量流量为 4.7 kg/s, 温度 773 K; 引射次流入口给定压力入口, 其总压即为环境大气压力 101 325 Pa, 温度为环境温度 300 K; 为保证红外抑制器排气流动不受计算域边界影响, 选取一个足够大的外场, 定其边界(长约为混合管直径的 5 倍, 宽约为混合管长度的 10 倍, 高约为混合管直径的 10 倍)作为计算模型出口边界, 总压为环境大气压力。

1.3 数值计算方法

流场和温度场的计算采用 Fluent 软件, 选取剪切应力输运(SST) $k-\omega$ 湍流模型^[16-17], 近壁区采用标准壁面函数法处理, 采用二阶迎风差分格式离散, 压力和速度耦合采用 SIMPLEC 算法, 收敛精度为 10^{-5} 。考虑到实际过程中的辐射换热, 选用离散坐标辐射模型(DO)计算高温燃气与固壁面以及固壁面与固壁面之间辐射换热。在计算流场时加入组分输运模型, 假设主流燃气入口气体为完全燃烧的燃气, 计算得到主流入口处高温燃气的氮气、二氧化碳和水蒸气

质量分数分别为 0.706、0.209 和 0.085；引射次流为环境大气，氮气和氧气质量分数分别为 0.756 和 0.244。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^[18-20]。红外辐射特性计算时方位角分布定义如图 4 所示,水平面为 0°~90°范围,铅垂面为 -90°~90°范围。

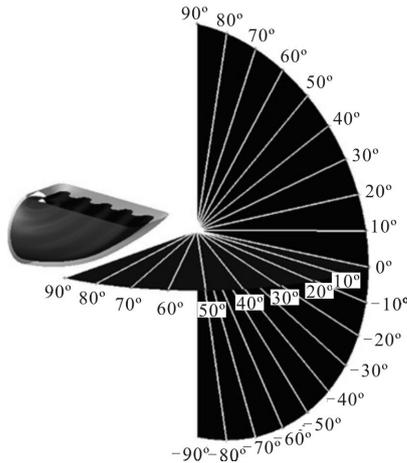


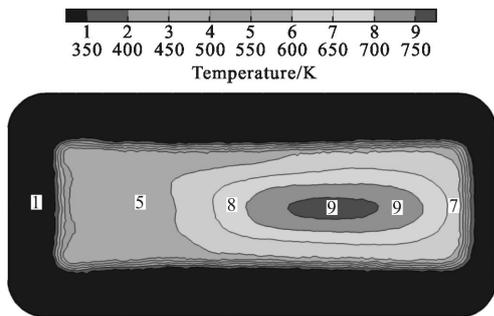
图 4 探测位置分布平面

Fig.4 Distribution of detecting point

2 计算结果与分析

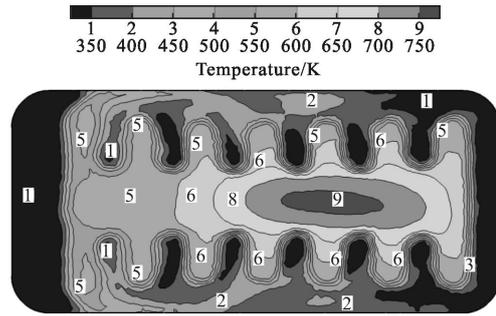
2.1 红外抑制器出口温度和速度分布

图 5 为混合管出口分别为矩形和波瓣形时遮挡罩出口平面温度分布。从图中可以看出,由于弯曲混合管内流动受到流向漩涡和弯管二次流的共同影响,排气峰值温度出现在长轴方向中部偏外的位置;相对于进气主流温度 773 K,抑制器出口截面的气体温度有效降低,这主要是第一级圆排波瓣引射器引射外界环境冷气,并与高温进气主流混合导致的;在弯曲混合管出口波瓣型面的挤压下,排气高温核心



(a) 矩形出口

(a) Rectangular outlet



(b) 矩形波瓣出口

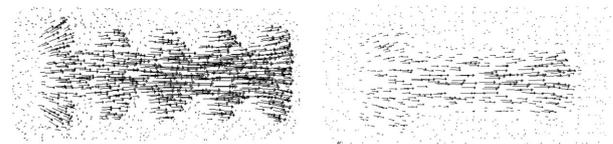
(b) Rectangular lobe outlet

图 5 遮挡罩出口平面温度分布

Fig.5 Temperature distribution at covering shelter outlet

区受到影响,温度分布等值线变形,并且由于混合管边缘排气与周围空气接触更充分,其温度也较矩形出口得到降低。

图 6 为混合管出口下游两个截面的速度矢量分布,分别位于遮挡罩出口及其下游 0.5D(D 为混合管等效直径)。高速气体流出混合管后,在长轴方向具有很大的向混合管外侧的速度分量(图中显示向右的速度矢量),而在短轴方向由中间向两边的速度分量很小,因而不能形成与一级圆排波瓣下游类似的大尺度流向涡,所以二元弯曲混合管出口的波瓣强化高温气体与环境气体混合的能力不如一级圆排波瓣。此时的二元弯曲混合管主要依靠气流的粘性作用拖拽与之接触的引射气流,并利用波瓣折转的型面拓展排气流与引射气流间的混合,达到增加抑制器整体引射能力、降低排气温度的目的。



(a) 遮挡罩出口截面

(b) 出口下游 0.5D 截面

(a) Covering shelter outlet

(b) 0.5D cross-section

图 6 混合管下游截面速度矢量图

Fig.6 Velocity vectors at downstream cross-section of mixing duct

2.2 红外抑制器气动特性

引射系数是衡量引射式红外抑制器抽吸外界环境气体能力的重要指标,也是波瓣引射混合器的重要性能指标之一,文中定义为:

$$\phi = \sum m_p / m_s \quad (1)$$

式中: m_s 表示主流质量流量; m_{pi} 表示各级引射次流质量流量。

图 7 为红外抑制器引射系数随着混合管出口波瓣数的变化情况。图中波瓣数为 0 表示原始的矩形出口弯曲混合管红外抑制器。弯曲混合管出口设计为波瓣状后, 引射系统明显提高了一些, 结合图 6 反映的信息, 可以确定是流体在粘性力的作用下借助波瓣增加的剪切边界长度增加了红外抑制器整体引射系数。在波瓣瓣高保持不变时, 波瓣数从 8 增加到 18, 引射系数先增大后减小, 在波瓣数为 14 时达到最大值 0.551, 这比矩形出口弯曲混合管红外抑制器的引射系数提高了 14.2%。造成这一趋势的原因是: (1) 随着波瓣数增加, 混合管出口主、次流剪切混合周长增大, 引射能力增强; (2) 密集的波瓣波瓣数目的增加导致引射气流通道的流动阻力增大, 引射能力减弱。

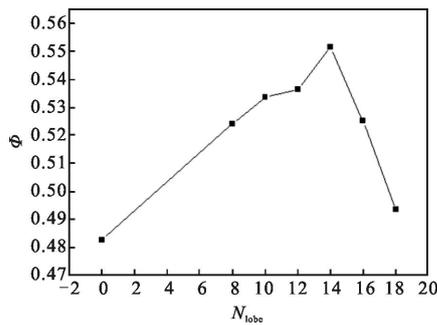


图 7 混合管出口波瓣数对引射系数影响

Fig.7 Pumping ratios for IR suppressors of different mixing duct lobe numbers

图 8 为在同样波瓣瓣宽的条件下波瓣瓣高对引射系数的影响。由图可知, 红外抑制器引射系数随着混合管瓣高增加而增大, 当瓣高增加到 135 mm 时, 引

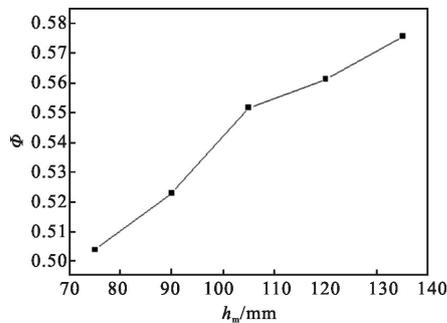


图 8 不同混合管波瓣瓣高下的红外抑制器引射系数

Fig.8 Pumping ratios for IR suppressors of different mixing duct lobe heights

射系数高达 0.576, 比矩形出口弯曲混合管红外抑制器的引射系数提高了 19.2%。一方面, 瓣高增加, 波瓣出口主、次流剪切混合周长增大, 导致引射能力加强; 另一方面, 瓣高增加, 波瓣波谷处的排气速度增加, 低压区域的静压值降低, 引射通道进出口的压差增大, 因而引射系数得到提高。

总压恢复系数可以间接地衡量流动掺混过程中压力损失。文中将其定义为:

$$\sigma = \left(\frac{1}{A_{out}} \int P_{out}^* dA_{out} \right) / \left(\frac{1}{A_{in}} \int P_{in}^* dA_{in} \right) \quad (2)$$

式中: A_{in} 表示主流入口面积; P_{in}^* 表示圆排波瓣喷管入口总压; A_{out} 表示遮挡罩出口面积; P_{out}^* 表示遮挡罩出口总压。

图 9 和图 10 表示红外抑制器总压恢复系数随着混合管出口波瓣数和波瓣瓣高的变化情况。由于主、次流在混合过程中, 流体微团之间相互摩擦, 造成流动损失, 表现为出口总压降低。引射系数越大, 与主流掺混的次流质量流量越大, 剪切层扩散混合产生的能量损失越多, 压力损失越大。因此, 当混合

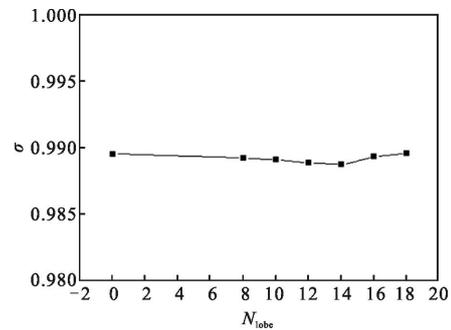


图 9 混合管波瓣数对红外抑制器总压恢复系数影响

Fig.9 Effects of mixing duct lobe numbers on total pressure recovery coefficient for IR suppressors

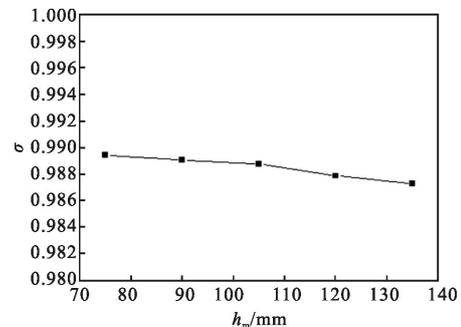


图 10 混合管波瓣瓣高对红外抑制器总压恢复系数影响

Fig.10 Effects of mixing duct lobe heights on total pressure recovery coefficient for IR suppressors

管瓣高一定时,波瓣数增加,红外抑制器总压恢复系数先减小后增大,与引射系数变化趋势相反,如图9所示。同理,如图10所示,当混合管瓣宽一定时,瓣高增加,引射系数增大,则总压恢复系数逐渐减小。

2.3 红外辐射强度分布特征

在水平探测平面上,只有遮挡罩壁面和排气尾焰是可视的辐射源。红外抑制器的遮挡罩壁面温度接近环境温度,3~5 μm 波段红外辐射主要来源于尾焰气体,从计算数据分析可得:尾焰辐射占整体辐射的83%左右。图11为红外抑制器在水平方向3~5 μm 波段的红外辐射强度空间分布(波瓣数的影响)。从图中可以看出,随着探测角度从0°增加到90°,由于气体辐射强度变化不是很明显,抑制器整体辐射强度基本保持不变;波瓣数的变化对抑制器水平面红外辐射强度几乎没有影响,其数值在±1.5 W/sr 内波动;与混合管出口矩形的红外抑制器相比较,波瓣对抑制器水平面的辐射强度的影响可以忽略。

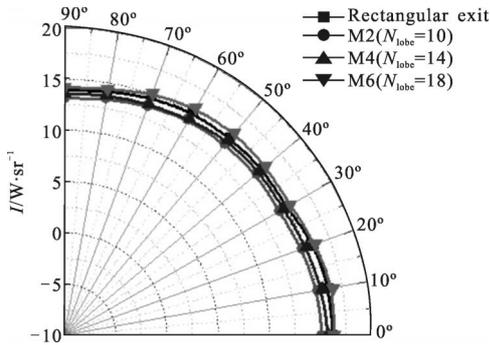


图11 水平面上,整体红外辐射强度分布(不同波瓣数)
Fig.11 Horizontal infrared radiation intensity(3~5 μm) for IR suppressors of different mixing duct lobe numbers

图12表示垂直平面上红外抑制器整体3~5 μm 波段红外辐射强度随着波瓣数的变化情况。由于结构不对称,0°~90°和0°~-90°探测方向辐射强度呈现不对称。在-90°~0°方向,红外抑制器内部高温壁面和向上的排气尾焰被弯曲遮挡罩遮挡,探测视场内只是外露的遮挡罩壁面以及少部分排气尾焰,红外辐射强度明显较低,仅约为0°~90°方向辐射强度峰值的5%。10°~30°范围内,由于可以看到内部高温壁面,且与主流排气方向一致,红外辐射强度显著提高;随着探测角度增加,视场内的弯曲混合管高温壁面暴露面积变大,在60°方向红外辐射强度达到最大,约为160 W/sr。从图中可以看出,随着波瓣数增

加,抑制器红外辐射强度先减小后增大,与引射系数变化规律一致。这是因为混合管引射的环境冷气在混合管与遮挡罩间流动,以对流换热的方式带走大量的热量,引射系数越大,混合管壁面温度越低,向外辐射出的能量也越少。与混合管矩形出口的红外抑制器相比,混合管出口改为波瓣形状后,垂直方向的红外辐射强度都有所降低。例如:当波瓣数为14时,抑制器辐射强度峰值由163.6 W/sr 降低到141.7 W/sr,降低幅度达13.3%。

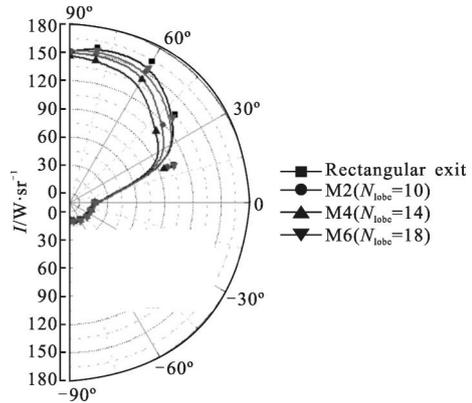


图12 垂直方向,整体红外辐射强度(不同波瓣数)
Fig.12 Vertical infrared radiation intensity(3~5 μm) for IR suppressors of different mixing duct lobe numbers

同理,波瓣瓣高对抑制器水平面上的红外辐射影响也甚微,但是会改变垂直面上的辐射强度,如图13所示。随着混合管瓣高增加,引射能力变强,引射次流增多,混合管壁面温度得到降低,故抑制器红外辐射强度减小。当瓣高从75 mm 增加到135 mm,红外辐射强度峰值从152.7 W/sr 降低到135.0 W/sr,降低幅度达到11.6%。

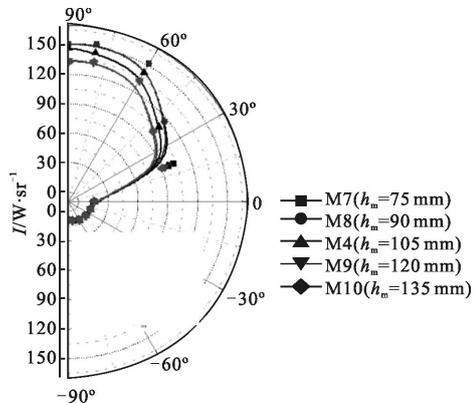


图13 垂直平面上,整体红外辐射强度(不同瓣高)
Fig.13 Effects of mixing duct lobe heights on vertical infrared radiation(3~5 μm) for IR suppressors

3 结 论

文中以两级引射式红外抑制器为研究对象,对比分析了混合管出口矩形和波瓣形的内流场流动特性,分析了二元弯曲混合管结构参数对其气动和红外辐射特性的影响。在文中研究参数范围内,得到了以下结论:

(1) 在二元弯曲混合管出口波瓣型面的挤压下,排气高温核心区受到影响,核心区温度分布等值线变形;对于文中设计的模型,热排气在混合管出口主要是依靠粘性和剪切力的作用引射环境次流,实现二次引射和剪切混合,二次引射对尾焰的降温效果不明显,因此波瓣对抑制器在水平面上的辐射强度几乎没有影响。

(2) 与矩形出口的混合管相比,波瓣出口能够增强引射性能,从而增加了混合管与遮挡罩间流动的环境冷气流量,降低了混合管壁面温度。因此,垂直方向上 3~5 μm 波段的红外辐射强度明显降低,当波瓣数为 14 时,其辐射强度峰值降低幅度达 13.3%。

(3) 波瓣瓣高一定时,随着波瓣数增加,红外抑制器整体引射系数先增大后减小,而总压恢复系数先减小后增大;混合管瓣宽一定时,随着瓣高增加,红外抑制器引射系数逐渐增大,而总压恢复系数逐渐减小。

(4) 垂直面上,瓣高一定时,波瓣数增加,抑制器 3~5 μm 波段红外辐射强度先减小后增大;瓣宽一定时,瓣高增加,抑制器 3~5 μm 波段红外辐射强度逐渐减小,当瓣高从 75 mm 增加到 135 mm,其辐射强度峰值降低 11.6%。

参考文献:

- [1] Armand F, Amelio Y. Infrared suppression for a gas turbine engine: US, 5699965[P]. 1997.
- [2] Ponton A J. The use of concurrent engineering techniques in helicopter IR suppressor design [R]. AIAA-2005-1290, 2005.
- [3] Thompson J, Birk A M, Cunningham M. Design of infrared signature suppressor for the Bell 205 (UH-1H) helicopters, Part I: aerothermal design[C]//Proceedings of Seventh CASI Propulsion Symposium, 1999.
- [4] Mahulikar S P, Prasad H S S, Potnuru S K. Infrared signature suppression of helicopter engine duct based on "conceal and camouflage"[J]. *J Propul Power*, 2008, 24(3): 613-618.
- [5] Mahulikar S P, Rao G A, Sonawane H R. Infrared signature studies of aircraft and helicopters [J]. *PIERS Proceedings*, 2009, 2(26): 18-21.
- [6] Yu Simon C M, Yip T H, Liu C Y. The mixing characteristics of forced mixers with scalloped lobes [J]. *AIAA Journal of Propulsion and Power*, 1997, 13 (2): 305-311.
- [7] Bettini C, Cravero C, Cogliandro S. Multidisciplinary analysis of a complete infrared suppression system [J]. *ASME Proceedings*, 2007, 6: 1365-1370.
- [8] Paterson R W. Turbofan mixer nozzle flow field—a benchmark experimental study [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1984, 106: 692-698.
- [9] Xie Yi, Li Teng, Liu Youhong. Numerical investigation of vortical structures in a jet mixing flow of lobed mixer [J]. *Science Technology and Engineering*, 2011, 11(32): 7972-7978. (in Chinese)
谢翌, 李腾, 刘友宏. 波瓣混合器混合流场中涡结构的数值研究[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(32): 7972-7978.
- [10] Yue Wei, Lei Zhijun, Su Shangmei, et al. Numerical investigation on vortex structure and jet mixing mechanism in lobed mixer [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28 (2): 338-347. (in Chinese)
岳巍, 雷志军, 苏尚美, 等. 波瓣混合器涡系结构及射流掺混机理的数值研究[J]. 航空动力学报, 2013, 28(2): 338-347.
- [11] Zhang Jingzhou, Shan Yong, Li Ligu. Investigation on lobed nozzle mixer-ejector infrared suppressor for helicopter exhaust system[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2007, 28(1): 32-36. (in Chinese)
张靖周, 单勇, 李立国. 直升机排气系统用波瓣喷管引射-混合式红外抑制器研究[J]. 航空学报, 2007, 28(1): 32-36.
- [12] Wang Tonghui, Wang Xianwei, Zhang Jingzhou, et al. Effect of covering shelter on infrared radiation characteristics of helicopter infrared radiation suppressor [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(7): 1493-1499. (in Chinese)
王同辉, 王先炜, 张靖周, 等. 直升机红外抑制器遮挡罩间距对红外辐射特性的影响[J]. 航空动力学报, 2009, 24(7): 1493-1499.
- [13] Shan Yong, Zhang Jingzhou, Li Ligu. Numerical calculation and experimental verification for the infrared radiation characteristics of helicopter infrared radiation suppressor[J]. *J Infrared Millim Waves*, 2006, 25(2): 95-100. (in Chinese)
单勇, 张靖周, 李立国. 直升机红外抑制器红外辐射特性的数值研究和实验验证 [J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25

- (2): 95–100.
- [14] Liu Youhong, Liu Wei. Experimental and numerical study of ejection characteristics of circular lobe ejector with bend mixers [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2005, 20(1): 92–97. (in Chinese)
刘友宏, 刘伟. 圆排波瓣弯曲混合管引射实验与数值模拟 [J]. *航空动力学报*, 2005, 20(1): 92–97.
- [15] Presz W M, Werle M. Multi-stage mixer/ejector system[R]. AIAA-2002-4064, 2002.
- [16] Pan Chengxiong, Zhang Jingzhou, Shan Yong. Research on suppressing flow separation of lobed mixer-ejector by scarfing treatment [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(2): 255–262. (in Chinese)
潘丞雄, 张靖周, 单勇. 斜切对抑制引射式波瓣喷管内部流动分离的效果研究 [J]. *航空学报*, 2013, 34(2): 255–262.
- [17] Ren Lifeng, Zhang Jingzhou, Wang Xianwei, et al. Analysis of stealth properties on IR radiation suppressor embed inside helicopter rear airframe [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2091–2097. (in Chinese)
任利锋, 张靖周, 王先炜, 等. 直升机后机身内埋式红外抑制器隐身性能分析 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(11): 2091–2097.
- [18] Qi Xueqin, Wang Pingyang, Zhang Jingzhou, 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)
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.
- [19] Lv Jianwei, Wang Qiang. Numerical calculation and analysis of infrared radiation characteristics from aircraft skin by using RMC method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 232–237. (in Chinese)
吕建伟, 王强. 飞行器蒙皮红外辐射特性的反向蒙特卡罗计算与分析方法 [J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(2): 232–237.
- [20] Zhao Qiang, Yang Shizhi, Qiao Yanli, et al. Computation of radiative transfer model based on MODIS infrared channel [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 238–241. (in Chinese)
赵强, 杨世值, 乔延利, 等. 基于 MODIS 红外通道的辐射传输计算 [J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(2): 238–241.