

混合管结构参数对抑制器气动和红外辐射影响

陈 庚, 单 勇, 谭晓茗, 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: 采用数值模拟的方法, 研究了混合管出口宽高比以及混合管出口掺混距离对红外抑制器整体气动性能和红外辐射特性影响, 在研究参数范围内得到如下结论: 相对于椭圆出口的混合管, 矩形出口混合管的引射系数显著增加, 且垂直方向 3~5 μm 红外辐射强度峰值降低 10.7%; 随着矩形出口宽高比从 2.2 增大到 4.6, 抑制器总引射系数增大, 而总压恢复系数几乎不变; 延长混合管出口掺混距离, 有助于提高抑制器引射能力, 且压力损失几乎没有增加; 无论是增加混合管出口宽高比还是增加出口掺混距离, 红外抑制器水平方向和垂直方向 3~5 μm 波段红外辐射强度都呈现逐渐减小趋势。

关键词: 红外抑制器; 混合管; 宽高比; 掺混距离; 引射系数; 总压恢复系数

中图分类号: V231.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3597-07

Effects of mixing duct geometric parameters on flow dynamics and infrared radiation characteristics for IR suppressor

Chen Geng, Shan Yong, Tan Xiaoming, 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 CFD/IR numerical simulations, the effects of aspect ratio as well as relative space out of mixing duct on helicopter aerodynamics and infrared radiation characteristics were studied systematically. Conclusions can be drawn as follows according to the present simulation conditions: In comparison with IR suppressor with oval outlet, suppressor with rectangular outlet owns a stronger ejecting capacity, and its 3–5 μm infrared radiation intensity is relatively lower, which is exemplified by the fact that the maximum infrared radiation intensity decreased by 10.7% by changing the shape of mixing duct outlet from oval to rectangle. With the aspect ratio of mixing duct exit rising from 2.2 to 4.6, the pumping ratios of the IR suppressors come to increase, but the total pressure recovery coefficients of those suppressors only change slightly. It can be the instrument of enhancing the pumping capacity when the relative space out of mixing duct is extended, which hardly contributes to greater pressure loss on the other hand. Whether the aspect ratio of the mixing duct exit is increased or relative space out of mixing duct is extended, the infrared radiation intensity(3–5 μm) for IR suppressors is going

收稿日期: 2015-04-05; 修订日期: 2015-05-09

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20130790); 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfj201408);

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, 主要从事高效换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, 主要从事航空发动机热端部件冷却技术方面的研究。Email: txmyy@nuaa.edu.cn

to decrease gradually in both horizontal and vertical planes.

Key words: IR suppressor; mixing duct; aspect ratio; relative space; pumping ratio; total pressure recovery coefficient

0 引言

武装直升机发动机红外辐射特征信号主要来源于其高温排气尾焰和裸露高温表面。目前国内、外普遍采用的第二代红外抑制器主要用于对抗 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段红外威胁,波瓣喷管-弯曲混合管结构引射式红外抑制器因其引射性能优越、外露热部件面积小以及混合效率高等特点^[1-4],在法国海豚 SA365C,英国 Lynx-3,美、法联制黑豹 SA365M 等直升机上得到广泛应用,有效地抑制了红外辐射特征信号。

近十几年来,国内以波瓣喷管引射混合器作为研究对象,以降低发动机高温部件和尾焰红外辐射为目标,开展了大量的基础研究工作。大量实验和数值研究结果表明了波瓣喷管结构参数、遮挡罩结构参数对波瓣喷管引射-混合式红外抑制器内部流动特性和红外辐射特性具有很大影响^[5-7]。例如:邵万仁等^[5]研究了波瓣穿透率对波瓣型排气引射混合器气动性能的影响,试验表明,较大的波瓣穿透率有利于两股气流混合,但引射能力下降;王同辉等^[6]通过研究遮挡罩间距对红外辐射特性影响发现,对于降低混合管壁面温度和抑制器整体红外辐射强度,遮挡罩间距存在一个最佳值;唐正府等^[7]对一体化红外抑制器狭长出口弯曲混合管(大宽高比)分析指出,弯曲混合管的混合流动受到流向漩涡和弯管二次流的共同影响,形成了有别于常规椭圆出口截面混合管的一些独特的流动现象和特性。对于目前较为普遍研究的波瓣引射式红外抑制器结构,其混合管有一定弯曲角度且出口呈椭圆状,考虑到矩形出口的排气混合管出口周长要比相同面积的圆或椭圆长,热排气与外界的掺混边界增加,从而可以降低排气温度。矩形出口的排气混合管在某些方向上能够改变排气系统内部向外辐射能量的传递路径,从而改变排气系统的辐射空间分布。虽然国内部分学者开展了矩形出口混合管(低宽高比)内部流动换热方面的研究,但对于红外抑制器气动和红外辐射特性随混合管出口宽高比和掺混距离变化方面的研究很少。因

此,文中运用数值模拟的方法,计算、分析了抑制器混合管出口宽高比和掺混距离对红外抑制器内部流动特性和红外辐射特性的影响规律。

1 物理模型

红外抑制器物理模型如图 1 所示。主要由波瓣喷管(Lobed nozzle)、中心锥体(Central plug)、二元弯曲混合管(Mixing duct)和二元弯曲遮挡罩(Covering shelter)构成,其中波瓣喷管和中心锥体之间为主流进口,混合管和波瓣喷管之间为一级引射次流入口,遮挡罩和混合管之间为二级引射次流入口。发动机的高温燃气通过主流进口进入波瓣喷管,由于排气动量的引射作用,外界大气从次流入口被抽吸流入红外抑制器内,高温燃气与一级引射次流先在弯曲混合管内混合后,又在混合管出口处与二级引射次流进一步混合,最终流出红外抑制器,进入外界大气环境。

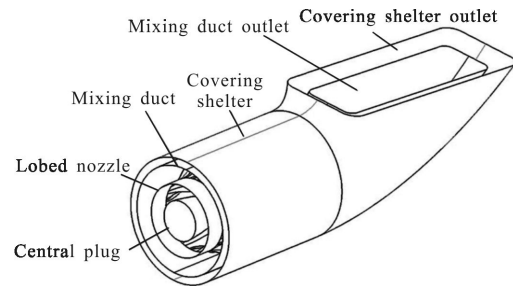


图 1 红外抑制器整体示意图

Fig.1 Diagrammatic sketch of IR suppressor

如图 2 所示,波瓣喷管的 12 个波瓣沿周向均匀分布,其结构参数主要有: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。图 3 为混合管和遮挡罩具体结构示意图,混合管和遮挡罩出口都为矩形,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,遮挡罩出口平面与水平面夹角 γ 为 3.5° 。

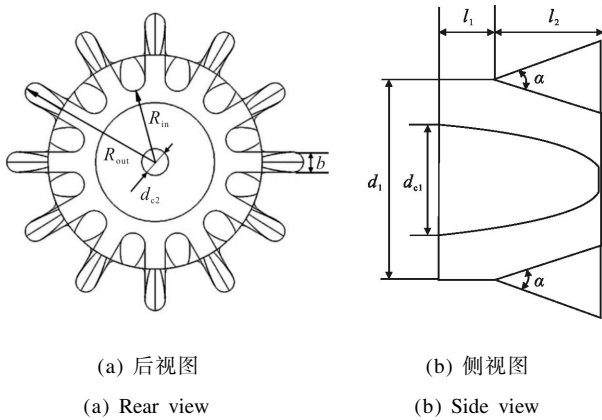
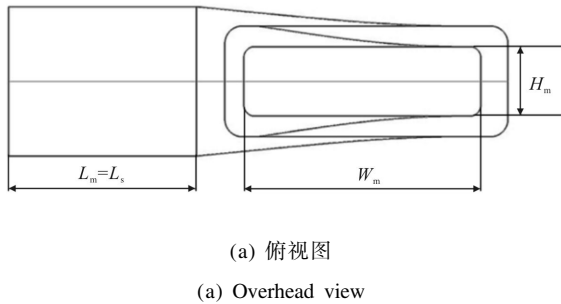
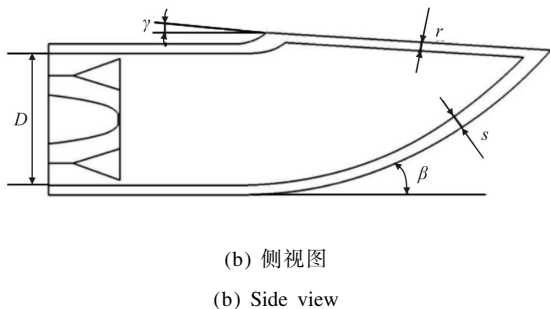


图 2 波瓣喷管和中心锥结构示意图
Fig.2 Structure schematic of lobed nozzle and central plug



(a) 俯视图
(a) Overhead view



(b) 侧视图
(b) Side view

图 3 混合管和遮挡罩结构示意图

Fig.3 Scheme of mixing duct and covering shelter

通过改变弯曲混合管矩形出口宽度 W_m 和高度 H_m 比值(简称宽高比 W_m/H_m , 记为 A)以及掺混距离 r (如图 3 所示), 得到了一组具有不同混合管出口宽高比和掺混距离的红外抑制器 II~II1, 比较它们的气动性能和红外辐射特性差异。此外, 设计了与 I7 相同出口面积和弯曲角度的椭圆形出口红外抑制器作为基准模型, 通过比较说明混合管出口形状改变对红外抑制器气动和红外辐射特性的影响。该组红外抑制器混合管几何参数如表 1 所示, 其中 β 为混

合管和遮挡罩弯曲角度,其他参数与上文所给几何参数相等。在设计过程中,保持矩形出口面积和对称中心位置不变;遮挡罩与混合管之间遮挡间距 s 恒为 44 mm。

表 1 红外抑制器混合管几何参数

Tab.1 Geometric parameters of mixing duct in IR suppressors

	r/mm	A	$\beta/(\text{^\circ})$
II	80	2.2	27.7
II2	80	2.6	26.8
II3	80	3.0	25.9
II4	80	3.4	25
II5	80	3.8	24.7
II6	80	4.2	24.2
II7	80	4.6	23.9
II8	0	4.6	23.9
II9	40	4.6	23.9
II10	120	4.6	23.9
II11	160	4.6	23.9

2 数值计算方法

2.1 网格划分与边界条件

采用 ICEM-CFD 软件划分网格。考虑到波瓣喷管、弯曲混合管和遮挡罩等复杂型面的复杂结构,采用非结构化网格划分方法对计算域进行网格划分,并对波瓣喷管、弯曲混合管等复杂壁面和排气喷流区域采用局部网格加密。为了确定计算模型的网格无关性以及最合适的网格计算数,对整个红外抑制器模型进行了网格独立性测试,通过计算比对,最终确定红外抑制器模型网格数约为 610 万。

在耦合计算红外抑制器内部流动过程中,需要先设定特定的进出口、耦合边界条件。参考某型涡轴发动机技术数据,红外抑制器进口边界条件为:主流入口采用质量流量入口,质量流量为 4.7 kg/s ,温度 770 K ,并假定进口参数均匀分布;引射次流入口给定压力入口,由于引射气体来自大气,其总压即为环境大气压力 $101\ 325 \text{ Pa}$,温度为环境温度 300 K 。外部流场边界条件:包围红外抑制器的外场是一个长方体出口边界,边界压力取环境大气压力 $101\ 325 \text{ Pa}$,温度 300 K ,其他变量按沿流向偏导数为零处理。真

实红外抑制器外场条件与当地环境、直升机飞行姿态等因素有关,文中研究的外场为静止流场,通过研究抑制器模型在静止空气环境中气动和红外辐射特性变化,为后期真实情况数值模拟结构参数的选取提供参考依据。

2.2 内外流场与红外辐射特性计算

红外抑制器流场和温度场计算采用 FLUENT 软件,耦合求解排气系统内部气流流动和传热过程。采用剪切应力输运(SST) $k-\omega$ 湍流模型^[8]进行数值模拟,近壁区采用增强壁面函数。在计算流场时,加入了组分输运模拟来确定排气组分分布,假设主流高温燃气为完全燃烧的燃气,通过求解化学反应方程求得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。为了考虑壁面的对流和辐射换热,流动控制方程中引入了辐射传输方程,辐射传输方程采用离散坐标辐射模型(DO 模型),遮挡罩、内外壁面和内部固体发射率设置为 0.8。流动传热与组分输运方程中对流项和扩散项均采用二阶迎风差分格式离散,压力与速度耦合常用 SIMPLEC 算法,收敛精度为 10^{-5} 。

通过 FLUENT 软件得到红外抑制器壁面温度、尾焰流场等数据后,采用反向蒙特卡罗法(RMC)^[9]来计算红外抑制器内部高温壁面和尾焰的辐射强度,详细的程序开发和实验验证见参考文献[10]。以波瓣喷管入口中心为探测原点,探测点分布如图 4 所示。由于模型的对称性,在水平方向对模型的探测范围为 $0^\circ\sim 90^\circ$,其中 0° 方向为喷管出口排气方向;垂直方向上,对模型的探测范围为 $-90^\circ\sim 90^\circ$ 。

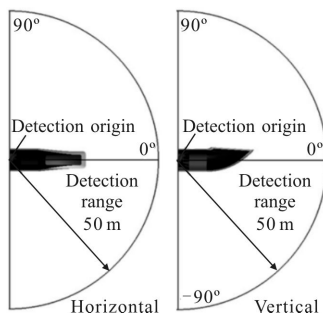


图 4 探测点位置分布

Fig.4 Distribution of the detecting points

3 计算结果与分析

3.1 红外抑制器气动特性

引射系数是衡量引射系统抽吸能力的重要指标,也是波瓣引射混合器的重要性能指标之一,定义为:

$$\phi = \sum m_{pi} / m_s \quad (1)$$

式中: m_s 为主流质量流量; m_{pi} 为各级引射次流质量流量。

图 5 为红外抑制器整体引射系数 Φ 随混合管出口宽高比 W_m/H_m 的变化情况。由图可知,红外抑制器引射系数随着宽高比的增加而增加,当宽高比从 2.2 增加到 4.6,引射器引射系数增加了 12%。一方面,在保证排气出口位置一致、排气面积相同的条件下,随着混合管出口宽高比的增加,弯曲混合管的外侧弯曲曲率减小,从而弯曲角度 β 相应地减小,弯曲部位近壁面静压降低,致使引射外界环境冷气的压差增大,引射系数随之升高;另一方面,由于混合管出口面积一定,宽高比的增加必然使得矩形出口周长增大,即初始主、次流剪切混合周长增加,主流粘性剪切力作用范围变大,引射能力变强。

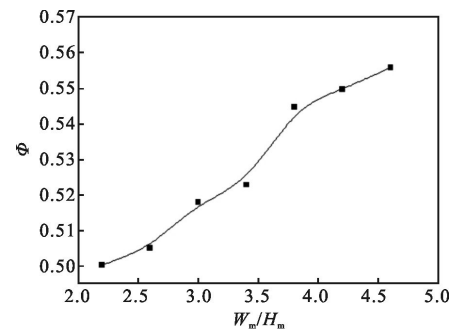


图 5 不同混合管出口宽高比下的红外抑制器引射系数

Fig.5 Pumping ratios for IR suppressors with different mixing duct exit aspect ratios

同理,由于混合管矩形出口周长大于相同面积椭圆出口周长,使得主、次流掺混边界增加。当混合管出口由椭圆出口变为矩形出口,红外抑制器引射系数由 0.447 提升至 0.556,引射能力得到显著增强。

图 6 为混合管出口掺混距离 r 对抑制器整体引射性能的影响。从图中可以看出,当混合管出口掺混距离从 0 增加到 160 mm,引射系数从 0.506 增大到 0.606,增加幅度达 19.8%。这是因为掺混距离越大,

排气出口的负压区域越大,且排气流和引射气流的接触面越大,从而引射系数得到提高,且高温排气和二级引射冷气混合的越充分。

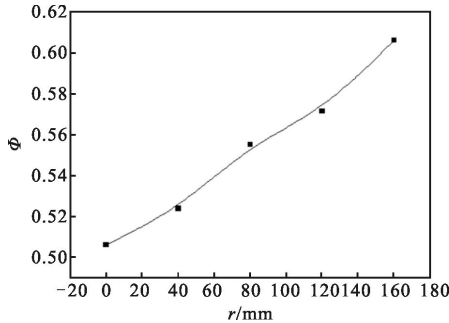


图 6 混合管出口掺混距离对红外抑制器引射系数的影响

Fig.6 Effects of relative space of mixing duct exit on pumping ratios for IR suppressors

总压恢复系数可以间接地衡量流动掺混过程中的压力损失。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} 为主流入口面积; P_{in}^* 为圆排波瓣喷管入口总压; A_{out} 为遮挡罩出口面积; P_{out}^* 为遮挡罩出口总压。

图 7 和图 8 分别为混合管出口宽高比和掺混距离对红外抑制器总压恢复系数的影响。在弯曲混合管中,由于弯曲引起的二次流动,从波瓣喷管流出的高温燃气流动受到弯曲混合管弯曲壁面限制挤压,高温主流在二次流作用下形成沿弯曲混合管切线方向的壁面射流。在掺混距离不变的情况下宽高比增加,弯曲混合管弯曲角度 β 减小,混合管弯曲段流体流动阻力减小,主流动量损失和压力损失也随之降低;但在混合管出口主、次流混合过程中,流体微团

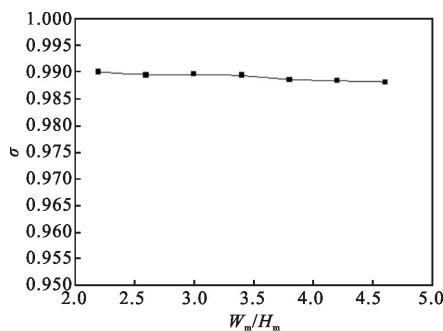


图 7 混合管出口宽高比对红外抑制器总压恢复系数影响

Fig.7 Effects of mixing duct exit aspect ratios on total pressure recovery coefficients for IR suppressors

之间相互摩擦造成流动损失,所以宽高比增大,使得剪切混合周长增加,剪切层扩散混合产生的能量损失越多,压力损失越大。由于这两种因素的共同作用,随着宽高比增加,红外抑制器总压恢复系数略微减小,如图 7 所示。从图中还可以看出,总压恢复系数总体呈现逐渐降低趋势,这说明对于所设计的模型,剪切层扩散混合造成的压力损失比弯曲角度 β 增加造成压力损失效果更加明显。

由图 8 可知,红外抑制器总压恢复系数随混合管出口掺混距离增加而逐渐减小。这是因为掺混距离增大,引射系数越大,与主流掺混的次流质量流量越大,扩散混合过程中产生的能量损失越多,压力损失越大。

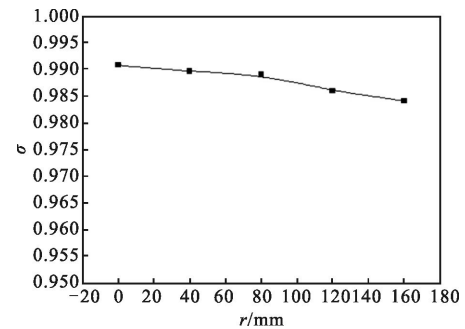


图 8 混合管出口掺混距离对红外抑制器总压恢复系数影响

Fig.8 Effects of mixing duct exit relative space on total pressure recovery coefficients for IR suppressors

3.2 红外辐射特征

红外抑制器 3~5 μm 波段红外辐射强度受到排气系统外露高温壁面和排气尾焰的共同影响。图 9 为水平方向红外抑制器整体和排气尾焰 3~5 μm 波段红外辐射强度随混合管出口宽高比变化情况。通过比较可以明显看出,水平方向排气尾焰辐射强度随探测角度变化规律与整体大体相似,这是由于红外抑制器外部遮挡罩壁面温度近似等于环境温度,所以水平面 3~5 μm 波段红外辐射主要来源于尾焰气体。0°~90°方向,水平方向整体辐射强度变化不是很明显,其数值在 2 W/sr 内波动。尽管宽高比增加导致探测视野内抑制器外壁面可视面积增大,使得固壁面辐射略微增加,但是宽高比增加又使得引射系数提高,混合管壁面温度和排气尾焰温度都有所降低,综合起来,水平方向整体辐射强度随着宽高比的增加而逐渐减小。当宽高比为 4.6 时,其水平面 3~5 μm

整体辐射强度峰值是宽高比为 2.2 时峰值的 84.2%。

由图可知,椭圆出口基准模型与 I7 矩形出口红外抑制器水平方向 3~5 μm 辐射强度数值大小大致相当,两者最大相差约 1 W/Sr,可见出口形状改变对于红外抑制器水平面 3~5 μm 辐射强度影响不明显。

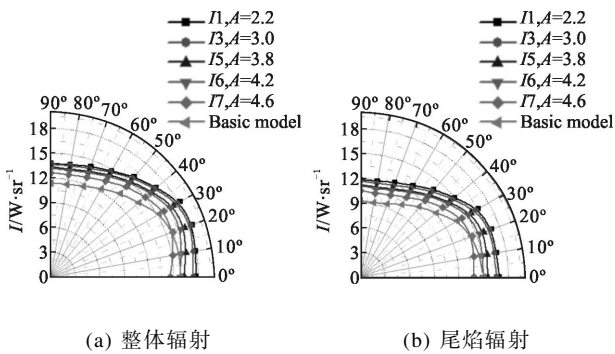


图 9 水平方向抑制器整体/排气尾焰 3~5 μm 红外辐射强度 (不同宽高比)

Fig.9 Overall/exhaust gas infrared radiation (3~5 μm) of different aspect ratios in horizontal plane

图 10 为垂直方向红外抑制器整体和固壁面 3~5 μm 波段红外辐射强度随混合管出口宽高比变化情况。在 $-90^\circ\sim 0^\circ$ 范围里,探测视野内固壁面主要是遮挡罩外壁面,由于遮挡罩壁面温度接近环境温度,所以整体辐射主要来自于尾焰气体辐射; $0^\circ\sim 90^\circ$ 方向,抑制器内部高温壁面暴露在探测视野里,其向外辐射强度数值远远超过气体辐射,故该范围内整体辐射强度主要取决于固壁面辐射强度大小。由图 10(a) 可知, $-90^\circ\sim 0^\circ$ 范围内,模型整体辐射主要来自于尾焰气体辐射,整体辐射强度较低,其值较 90° 方向整体辐射强度衰减了 92%。 $10^\circ\sim 30^\circ$ 范围内,由于可以看到内部高温部件,红外辐射强度显著提高;继而随着探测角度增加,弯曲混合管外侧暴露面积变大,到达 60° 方向时,红外辐射强度达到最大。此外,随着混合管宽高比增加,抑制器红外辐射强度逐渐减小,这与引射系数变化规律一致:引射系数越大,主、次流掺混效果越明显,尾焰高温核心区越小,向外辐射能力也越弱。值得注意的是, $30^\circ\sim 60^\circ$ 范围内,随着宽高比增加,整体辐射强度降低幅度较大,这是因为宽高比增加,混合管出口更加狭长,探测角度内高温壁面面积显著减小,所以壁面辐射降低较明显。

与椭圆出口基准模型相比,I7 矩形出口红外抑

制器垂直方向 3~5 μm 红外辐射强度明显降低,其辐射强度峰值由 151.0 W/sr 降低到 134.8 W/sr,降低幅度达 10.7%。对于波瓣喷管-弯曲混合管结构引射式红外抑制器,其主要威胁来自于垂直方向高温排气尾焰和裸露高温表面的 3~5 μm 波段红外辐射,因此,将混合管出口由椭圆改变为矩形有效提升了抑制器整体红外隐身性能。

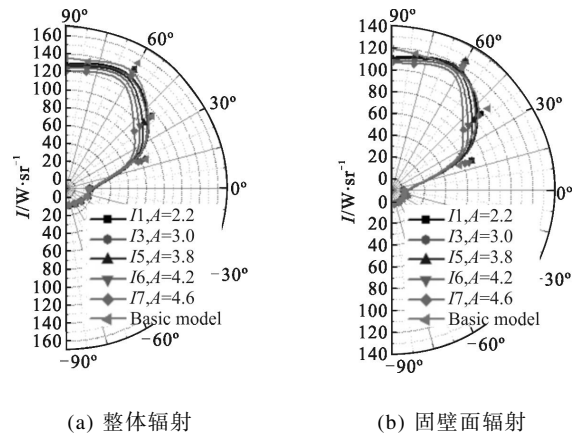


图 10 垂直方向抑制器整体/固壁面 3~5 μm 红外辐射强度 (不同宽高比)

Fig.10 Overall/solid wall infrared radiation (3~5 μm) of different aspect ratios in horizontal plane

混合管出口掺混距离也对红外抑制器水平和垂直方向 3~5 μm 波段红外辐射强度产生了很大影响。计算结果表明,水平方向上,随着混合管出口掺混距离的增加,排气喷流核心区域面积减小,辐射强度逐渐降低;垂直方向上,抑制器 3~5 μm 红外辐射随掺混距离增加而减小,当掺混距离为 160 mm 时,其辐射强度峰值为 128 W/sr,较掺混距离为 0 时辐射强度峰值降低了 17%左右。

4 结论

通过一系列数值模拟探究,分析了混合管出口宽高比和掺混距离对红外抑制器整体气动性能和红外辐射特性影响规律。在所研究的参数范围内得到了以下结论:

- (1) 与椭圆出口红外抑制器相比,矩形出口红外抑制器引射性能增强,且垂直方向 3~5 μm 红外辐射强度明显降低,其辐射强度峰值降低幅度达 10.7%。
- (2) 红外抑制器引射系数随着混合管出口宽高

比和掺混距离的增加而增加。当宽高比从 2.2 增加到 4.6, 引射器引射系数增加了 12%; 掺混距离从 0 增加到 160 mm, 引射系数增加了 19.8%。

(3) 随着混合管出口宽高比增大, 抑制器总压恢复系数总体呈现略微减小趋势, 且剪切层扩散混合造成的压力损失比弯曲角度 β 增加造成压力损失效果更加明显; 随着混合管出口掺混距离增大, 抑制器总压恢复系数也略微降低。

(4) 水平方向, 随着探测角度从 0° 增加到 90° , 红外抑制器 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段红外辐射强度变化较小, 且混合管出口宽高比越大, 掺混距离越长, 辐射强度越低; 垂直方向, 红外抑制器 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段红外辐射强度呈现明显的不对称性, -90° 方向辐射强度较 90° 方向衰减超过 90%, 且随着混合管出口宽高比和掺混距离增大, 红外辐射强度逐渐减小。

参考文献:

- [1] Prez W M, Reynolds G, McCormick D C. Thrust augment using mixer-ejector-diffuser systems [R]. AIAA Paper 94-0020, 1994.
- [2] Ponton A J. The use of concurrent engineering techniques in helicopter IR suppressor design[R]. AIAA-2005-1290, 2005.
- [3] Ooba Y, Kodama H, Nakamura Y. Large eddy simulation analysis of a 18-lobe convoluted mixer nozzle [R]. AIAA Paper 2002-0717, 2002.
- [4] Mahulika S P, Rao G A, Sonawane H R. Infrared signature studies of aircraft and helicopters [J]. *Piers Proceedings*, 2009, 2(26): 18-21.
- [5] Shao Wanren, Wu Shousheng. Experimental research on lobed exhaust ejection mixer [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2000, 15(2): 155-158. (in Chinese)
- [6] 邵万仁, 吴寿生. 波瓣型排气引射混合器的试验研究[J]. *航空动力学报*, 2000, 15(2): 155-158.
- [6] Wang Tonghui, Wang Xianwei, Zhang Jingzhou, et al. Effects 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.
- [7] Tang Zhengfu, Zhang Jingzhou, Shan Yong. Investigation on ejecting and mixing characteristics of lobed nozzle with curved mixing duct and slot exit [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2005, 20(6): 978-982. (in Chinese)
- 唐正府, 张靖周, 单勇. 波瓣喷管-狭长出口弯曲混合管引射混合特性分析[J]. *航空动力学报*, 2005, 20(6): 978-982.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Shan Y, Zhang J Z, Li L G. Numerical investigation of flow mixture enhancement and infrared radiation shield by lobed nozzle[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29: 3687-3695.