

波瓣混合器对双 S 形二元排气系统红外特性的影响

王 丁,吉洪湖,卢浩浩

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘 要: 为了研究波瓣混合器对排气系统红外特性的影响,设计了波瓣数分别为 12、15、18 的波瓣混合器双 S 形二元排气系统,通过数值计算研究了波瓣数对排气系统红外抑制效果的影响,并与相应的环形混合器双 S 形二元排气系统对比。研究表明,随着波瓣数的增加,排气系统的推力略微升高,最大差值在 0.1% 以内;波瓣数越少,排气系统内、外涵气流的热混合度越高,尾喷流的最高温度和红外辐射强度越低,波瓣数由 18 减少到 12 时,喷流辐射强度最大降低了 18.1%;相比环形混合器双 S 形二元排气系统,在侧向和下方探测面上纯喷流辐射的 90° 方位角,三种波瓣数的波瓣混合器双 S 形二元排气系统辐射强度分别降低了 20.9% 和 26.9% 以上。因此,为了得到更好的红外抑制效果,建议使用较少波瓣数的波瓣混合器。

关键词: 波瓣混合器; 双 S 形二元喷管; 红外辐射; 波瓣数

中图分类号: V218 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0204004

Influence of lobed mixer on infrared character of serpentine 2-D exhaust system

Wang Ding, Ji Honghu, Lu Haohao

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

Abstract: In order to study the influence of lobed mixer on infrared (IR) character of serpentine 2-D exhaust system (S2ES), three different lobed mixer S2ESs with lobe numbers of 12, 15 and 18 were designed. The influence of lobe number on IR suppression of S2ES was studied numerically, and the results were compared with a relevant annular mixer S2ES. The results show that, as the lobe number increases, thrust rises slightly with the maximum difference less than 0.1%; the reduction of lobe number changing from 18 to 12 enhances the mixture of core flow and bypass flow and reduces the plume temperature, making the plume radiation intensity attenuated by 18.1% at most; compared with annular mixer S2ES, the radiation intensity of lobed mixer S2ES reduces at least 20.9% and 26.9% in the direction vertical to the axis of nozzle exit on the side and lower detection planes respectively. In summary, it is appropriate to use mixer with fewer lobes in order to achieve better IR suppression.

Key words: lobed mixer; serpentine 2-D nozzle; infrared radiation; lobe number

收稿日期:2016-06-06; 修订日期:2016-07-10

作者简介:王丁(1986-),男,博士生,主要从事飞行器红外隐身技术方面的研究。Email:wangding525@126.com

导师简介:吉洪湖(1957-),男,教授,博士,主要从事航空发动机传热、燃烧及红外隐身技术方面的研究。Email:jhhpe@nuaa.edu.cn

0 引言

涡扇发动机排气系统作为 3~5 μm 中波波段内红外辐射的主要探测与追踪目标,其强烈的红外信号对作战飞行器的战场生存能力有着严重威胁,因此研究发动机排气系统在中波范围内的红外隐身技术有着重要的意义。发动机排气系统的红外辐射主要包括两部分:高温壁面辐射和高温燃气辐射。S 形喷管是一种有效型面遮挡技术,它通过喷管型面的弯折,达到对发动机内部高温部件(如涡轮、中心锥等)的有效遮挡,降低可探测到的固体壁面的红外辐射强度;而波瓣混合器可以强化涡扇发动机内、外涵气流的掺混,降低尾喷流温度,进而明显降低排气系统尾喷流的红外信号。

刘常春^[1]、章叶川^[2]、高翔^[3]等研究了双 S 形二元排气系统型面遮挡效应引起的固体壁面的红外抑制效果,而没有考虑应用波瓣混合器来增强喷流辐射的红外抑制效果。波瓣混合器用于直升机的红外信号的抑制研究已取得了丰硕的成果:张靖周^[4-5]、单勇^[6]分别通过数值计算和实验验证的方法对直升机的波瓣混合器的红外抑制效果进行了研究;陈庚等^[7-8]通过数值计算研究了结构参数对波瓣混合器对红外抑制效果。此外,杜力伟等^[9]数值研究了波瓣数对 S 型喷管内部流向涡的发展规律以及沿轴向内部各截面热混合效率的变化规律,但并没有进一步研究其对红外辐射特性的影响。

文中结合双 S 形喷管对固体壁面辐射的抑制技术和波瓣混合器对喷流辐射的抑制技术,设计了不同波瓣数的涡扇发动机波瓣混合器双 S 形二元排气系统模型,研究了波瓣数对排气系统红外辐射强度的影响,并针对红外抑制效果,对工程应用中波瓣数的选择给出了建议。

1 模型设计

文中设计的波瓣混合器双 S 形二元排气系统如图 1 所示,其由末级涡轮叶片(内涵进口)、外涵进口、波瓣混合器、中心锥、支板、双 S 形二元喷管等部件组成。在保持其他部件不变,将波瓣混合器换成相应的环形混合器(图 2(a)所示)构成的环形混合器双 S 形二元排气系统,作为文中对比的基准。

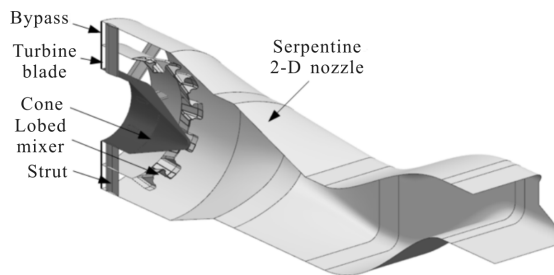


图 1 波瓣混合器双 S 形二元排气系统模型

Fig.1 Geometric model of lobed mixer serpentine 2-D exhaust system

文中所设计波瓣混合器波瓣数量分别为 12 个、15 个和 18 个,如图 2 所示。为了增强掺混效果,所设计的波瓣混合器对波瓣后缘进行了切角与凹扇修形处理,如图 3 所示。图 2 中所有混合器对应的进口截面、出口截面的面积均相等;波瓣混合器的张角 θ 均为 31° 、高度 h 均为 $0.1D_m$ (D_m 为波瓣混合器进口直径)、后缘切角 δ 均为 15° 、波瓣凹扇为半圆形,直径 D 均为 $0.45h$ 。

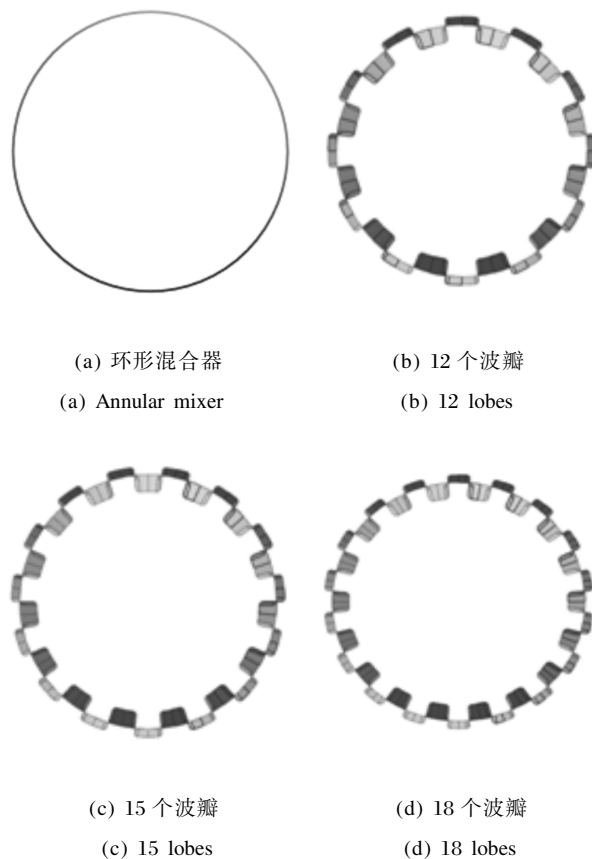


图 2 不同混合器模型后向视图

Fig.2 Rear view of different mixer models

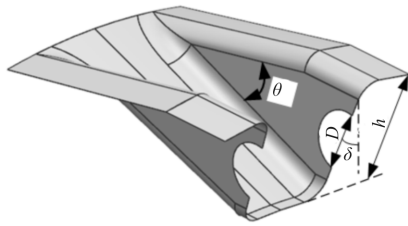


图 3 混合器波瓣设计参数

Fig.3 Parameters of mixer lobe design

2 数值计算方法

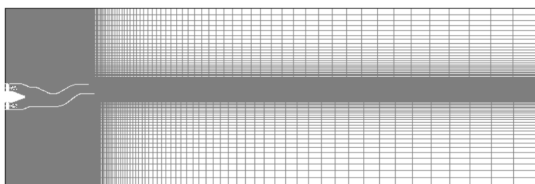
排气系统红外特性的计算分为两部分：流场计算和红外辐射特性计算。流场计算结果为红外辐射特性计算提供所需要的排气系统壁面温度，喷流温度场、压力场以及组分浓度场等数据。

2.1 流场计算方法

流场计算采用 Fluent 软件，选用隐式耦合求解器，连续性方程、动量方程和能量方程的离散采用 2 阶迎风差分格式。湍流模型选用 SST (shear stress transport) $k-\omega$ 模型，燃气组分计算选用组分传输模型对，辐射换热计算选用 DO(discrete ordinates)模型。

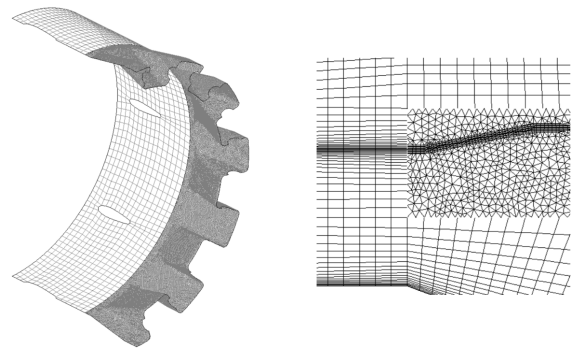
发动机排气系统计算状态为地面试车工况，来流马赫数为 0。内涵进口：压力进口，总温为 943 K，落压比为 2.3，流体介质为燃气；外涵进口：压力进口，总温为 385 K，落压比为 2.25，流体介质为空气；外流场边界为压力出口边界，其中压力和温度与大气环境相同；中心锥和支板为绝热边界条件，混合器和喷管与周围流体进行耦合换热。辐射换热计算中，所有壁面的发射率设为 0.9。

选用 1/2 的排气系统模型进行流场计算，半圆柱形的外流场外径为 $10D_0$ (D_0 为喷管进口直径)，轴线长度为 $30D_0$ 。以波瓣数 12 的排气系统模型为例，对称面上及喷管附近局部网格如图 4 所示，将波瓣段单独从流场抠出环形区域，采用非结构化网格(图 4(b))，流场其余部分均采用结构化的六面体网



(a) 对称面上的流场网格

(a) Grid in symmetric plane of the flow field



(b) 波瓣混合器壁面网格

(b) Lobed mixer mesh

(c) 壁面网格加密

(c) Wall mesh densification

图 4 数值计算网格图示

Fig.4 Grid for CFD

格，结构化与非结构化网格均对壁面附近网格进行了加密处理(图 4(c))，结构化网格和非结构化网格接触面设置为 Interface 边界进行数据传递。经过了网格独立性验证，混合网格的总数约为 370 万。

2.2 红外辐射强度计算方法

采用课题组自主开发的飞行器红外特征计算分析软件(NUAA-IRSE)对红外辐射进行计算，红外辐射强度计算采用反向蒙特卡洛法 (Backward Monte Carlo, BMC)^[10]。需要说明的是：文中红外计算的结果为目标自身的红外辐射强度，不考虑大气吸收对红外辐射的衰减作用。

波瓣混合器双 S 形二元排气系在整个后半球范围内设置三个探测面，如图 5 所示，分别为上方探测

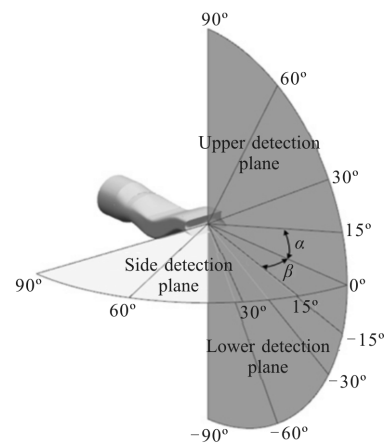


图 5 双 S 形二元喷管探测面分布

Fig.5 Sketch map of detection planes of serpentine 2-D nozzle

面($\alpha=0^\circ\sim 90^\circ$)、下方探测面($\alpha=0^\circ\sim -90^\circ$)和侧向探测面($\beta=0^\circ\sim 90^\circ$),每个探测面上的探测角度间隔为 5° 。

2.3 红外辐射计算方法验证

文中对发动机排气系统的流场和红外特性的计算使用的软件及计算方法与参考文献[11]是相同的,参考文献 [11] 给出了涡扇发动机排气系统 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段内红外辐射强度的测量值和计算值的对比分布如图 6 所示,测量值和和计算值最大相对误差在 10%左右,验证了文中的计算方法能比较准确地反映涡扇发动机排气系统的红外辐射特性。

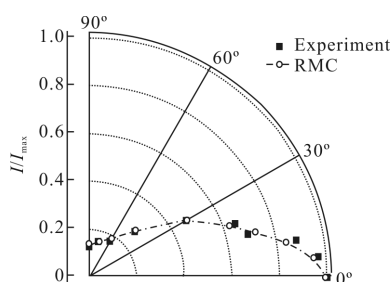


图 6 辐射强度的空间分布
Fig.6 Spatial radiant intensity

3 计算结果与分析

3.1 推力和热混合度计算结果

利用无量纲推力 $F_{\text{lobe}}/F_{\text{annular}}$ 定量分析涡扇发动机的推力性能,利用热混合度 Φ 定量分析内、外涵气流的掺混效果, F_{lobe} 、 F_{annular} 分别为波瓣混合器和环形混合器的实际推力。热混合度的表达式如下:

$$\Phi = 1 - \frac{\int_{A_c} |h_t - h_{t,m}| d\dot{m}}{\int_{A_c} |h_t - h_{t,m}| d\dot{m}_c + \int_{A_f} |h_t - h_{t,m}| d\dot{m}_f} \quad (1)$$

其中,

$$h_{t,m} = \frac{\dot{m}_c h_c + \dot{m}_f h_f}{\dot{m}_c + \dot{m}_f} \quad (2)$$

式中: $h_{t,m}$ 为内、外涵流体完全混合时的总焓; Φ 反映了冷、热流气体的掺混程度,直接关系到排气系统高温喷流的温度分布,因此,对排气系统喷流的红外辐射有着直接的影响。理论上讲,排气系统流量与涵道比相等的情况下,喷管出口截面处的热混合度越高,同等温线的高温喷流的区域就越小,喷流的红外辐射也就越小。

图 7 所示为排气系统无量纲推力 $F_{\text{lobe}}/F_{\text{annular}}$ 和热混合度 Φ 随波瓣数的增加的变化趋势。由图可知,相比环形混合器的排气系统,三种波瓣混合器的排气系统的推力最大降低了 1.35%;随着波瓣数增加,推力略微增大,最大差值在 0.1%以内;而随着波瓣数增加,热混合度减小,当波瓣数由 12 增加到 18,热混合度由 0.444 减小到 0.378。因此,波瓣数增加对涡扇发动机排气系统的内、外涵气流的掺混效果是不利的,即对喷流辐射的红外抑制也是不利的。

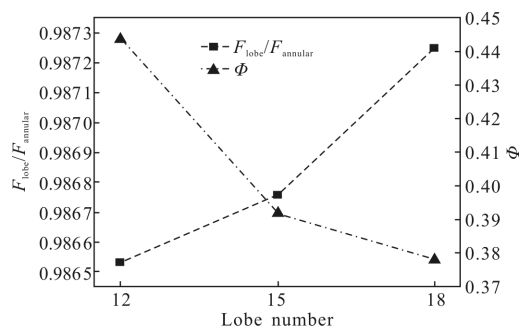


图 7 不同波瓣数排气系统的推力系数及热混合度对比
Fig.7 $F_{\text{lobe}}/F_{\text{annular}}$ and Φ of exhaust systems with different lobe numbers

3.2 红外辐射特性计算结果

3.2.1 光谱辐射特性

不同混合器的双 S 形二元排气系统在下方探测面 $\alpha=-90^\circ$ 方位 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段内的光谱辐射强度分布如图 8 所示,图中 C_λ 是用于无量纲化的常数。由图可知,固体壁面辐射波段 $3\sim 4.15\ \mu\text{m}$ 和 $4.63\sim 5\ \mu\text{m}$ 的光谱

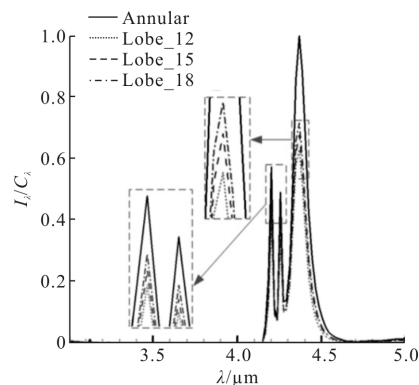


图 8 下方探测面 90° 方位角光谱辐射强度分布
Fig.8 Spectral radiation intensity distributions on lower detection plane

辐射强度几乎为 0，这是由于该方位角固体壁面的可视面积几乎为 0；燃气辐射波段为 4.16~4.63 μm，其辐射的特点为选择性辐射，该波段内的波峰和波谷的形成归因于燃气中 CO₂ 的强发射和吸收作用。对比不同排气系统在波长 λ=4.37 μm 处的峰值可以看出，随着波瓣数的增加，光谱辐射强度依次增大，相比环形混合器的双 S 形二元排气系统，波瓣混合器的双 S 形二元排气系统的光谱辐射强度降低了 28.9%~37.6%。

3.2.2 积分辐射强度

不同混合器的双 S 形二元排气系统在侧向探测面上 3~5 μm 波段内的积分辐射强度分布如图 9 所示。所有排气系统的积分辐射强度分布规律是一致的，最小值均出现在 0°方位。在整个侧向探测面上，由于文中设计的双 S 形二元喷管型面完全遮挡了排气系统内部的高温部件，高温喷流辐射占据了排气系统总辐射的主导地位，因此排气系统的红外辐射强度空间分布基本取决于喷流辐射的分布规律。波瓣数越多，红外辐射强度越大；在 β=90°方位，相比波瓣数为 12 的排气系统，波瓣数为 15 和 18 的排气系统的辐射强度分别增大了 10.5%和 12.4%；在 β=90°方位，相比环形混合器的排气系统，所有波瓣混合器的排气系统辐射强度均降低 20.9%以上。

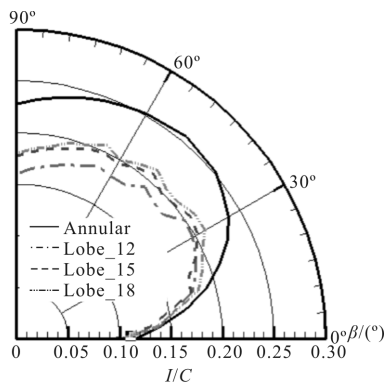


图 9 侧向探测面上排气系统积分辐射强度分布

Fig.9 Integral radiation intensity distributions on side detection plane

图 10 所示为不同混合器双 S 形二元排气系统在上方和下方探测面上 3~5 μm 波段内的积分辐射强度分布。下方探测面积分辐射强度的分布规律与侧向探测面类似，并且随着波瓣数的增加，红外辐射强度增大；在 α=-90°方位，波瓣数由 12 依次增加到 15、18 时，排气系统的辐射强度依次增大了 10%和

18.1%；在 α= -90°方位，相比环形混合器的排气系统，所有波瓣混合器的排气系统辐射强度均降低 26.9%以上。

由于喷管出口段的修形处理，使得在整个上方探测面上固体壁面辐射对排气系统总辐射影响较大。在 α=5°和 α=10°方位辐射强度较大是因为此方位区间排气系统内部的高温部件如中心锥、涡轮叶片和混合器等可视投影面积较大，如图 11 所示；α= 5°~10°，波瓣数为 15 的排气系统辐射强度最小，是由于波瓣数为奇数 15 的混合器最上方的波瓣单元为内扩张角波瓣(图 2 所示)，减小了高温燃气对出口喷管上侧壁面的强化对流换热程度，上侧壁面温度较低，如图 11(c)所示；但总的来讲，波瓣数对固体辐射强度的影响不大，最大差值不大于 3%。在 α=90°方位，固体壁面辐射依旧对排气系统总辐射有贡献，相比环形混合器的排气系统，所有波瓣混合器的排气系统辐射强度均降低 14.7%以上。

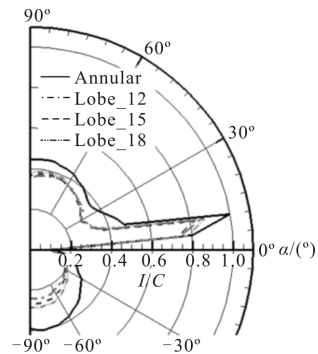


图 10 上方和下方探测面上排气系统积分辐射强度分布

Fig.10 Integral radiation intensity distributions on upper and lower detection planes

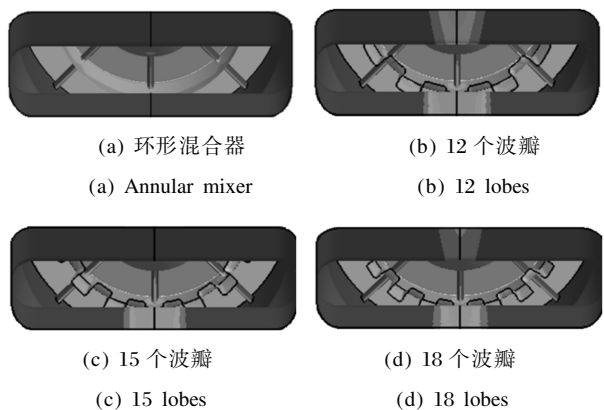


图 11 α=10°壁面可视壁面温度对比

Fig.11 Temperature of invisible wall at the angle of α=10°

4 结 论

文中设计了不同波瓣数的波瓣混合器,研究了波瓣混合器对双 S 形二元排气系统红外辐射强度的影响,并与环形混合器的双 S 形二元排气系统作对比,得到以下结论:

(1) 相比环形混合器双 S 形二元排气系统,波瓣混合器双 S 形二元排气系统推力损失在不大于 1.35% 的前提下,红外抑制效果最大增强了 26.9%。

(2) 波瓣数对固体壁面的红外辐射强度影响很小,对喷流的红外辐射强度的影响明显;波瓣数由 18 减少到 12,排气系统的推力仅降低了不到 0.1%,而热混合度却增加了 14.9%,喷流抑制效果最大增强了 18.1%。

(3) 出于对发动机排气系统红外抑制的角度考虑,建议使用较少的波瓣数的波瓣混合器。此时,推力性能几乎没有影响的前提下,可以有效降低高温喷流的红外辐射强度。

参考文献:

- [1] Liu Changchun, Ji Honghu, Huang Wei, et al. Numerical simulation on infrared radiation characteristics of serpentine 2-D nozzle [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28(7): 1482-1488. (in Chinese)
刘常春, 吉洪湖, 黄伟, 等. 一种双 S 形二元喷管的红外辐射特性数值研究[J]. 航空动力学报, 2013, 28(7): 1482-1488.
- [2] Zhang Yechuan, Wang Zhanxue, Shi Jingwei, et al. Analysis on flow and infrared radiation characteristics of double S-nozzle [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28(11): 2468-2474. (in Chinese)
章叶川, 王占学, 史经纬, 等. 双 S 形喷管流动及红外特性分析[J]. 航空动力学报, 2013, 28(11): 2468-2474.
- [3] Gao Xiang, Yang Qingzhen, Shi Yongqiang, et al. Numerical simulation of radiation intensity of double S-shaped exhaust system with different outlet shapes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1726-1732. (in Chinese)
高翔, 杨青真, 施永强, 等. 出口形式对双 S 弯排气系统红外特性影响研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1726-1732.
- [4] Zhang Jingzhou, Shan Yong, Li Ligu. Computation and validation of parameter effects on lobed mixer-ejector performances [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2005, 18(3): 193-198.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Chen Geng, Tan Xiaoming, Shan Yong, et al. Impacts of two-dimensional curved mixing duct exit geometric parameters on flow dynamic and infrared radiation characteristics for IR suppressor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1704-1711. (in Chinese)
陈庚, 谭晓茗, 单勇, 等. 二元弯曲混合管出口结构参数对红外抑制器气动和红外辐射特性的影响 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1704-1711.
- [8] Chen Geng, Shan Yong, Tan Xiaoming, et al. Effects of mixing duct geometric parameters on flow dynamics and infrared radiation characteristics for IR suppressor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 3597-3603. (in Chinese)
陈庚, 单勇, 谭晓茗, 等. 混合管结构参数对红外抑制器气动和红外辐射影响[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(12): 3597-3603.
- [9] Du Liwei, Liu Youhong, Shao Wanren, et al. Effect of lobe number on aerothermodynamic performance of lobed S-shaped two-dimensional nozzle [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(4): 916-926. (in Chinese)
杜力伟, 刘友宏, 邵万仁, 等. 波瓣数对波瓣 S 型混合二元喷管气动热力性能影响[J]. 航空动力学报, 2015, 30(4): 916-926.
- [10] Huang Wei, Ji Honghu. Efficiency of aero-engine infrared radiation computation by using BMC method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2334-2338. (in Chinese)
黄伟, 吉洪湖. BMC 法计算航空发动机红外辐射的效率研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2334-2338.
- [11] Huang Wei, Ji Honghu, Si Ren, et al. Infrared characteristics calculating of turbofan engine exhaust system[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2010, 31(6): 745-750. (in Chinese)
黄伟, 吉洪湖, 斯仁, 等. 涡扇发动机排气系统红外特征 [J]. 推进技术, 2010, 31(6): 745-750.