

双级波瓣引射混合器的引射性能

潘丞雄¹, 张靖周^{1,2}, 单 勇¹

(1. 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, 南京 210016;
2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘 要: 采用实验和数值方法对双级波瓣引射混合器的引射性能进行研究, 重点研究混合管在两种不同进口方式下的引射混合器气动特征差异, 并初步分析混合管面积比和长径比对双级波瓣引射混合器引射性能的影响。结果表明: 混合管进口方式对引射能力有非常重要的影响, 在研究的结构参数条件下, 对于受限式进口, 单级波瓣引射混合器的引射能力要强于双级波瓣引射混合器约 10%; 而对于敞开式进口, 其引射能力要优于受限式进口最大约 35%, 此时双级波瓣引射混合器的引射能力要略好于单级波瓣引射混合器。在较大的混合管面积比或较小的长径比下, 敞开式进口下双级波瓣引射混合器较受限式进口表现尤为优越。

关 键 词: 引射混合器; 双级波瓣喷管; 引射性能; 实验测试; 进口方式

中图分类号: V231

文献标志码: A

Pumping performance for double-stage lobe mixer/ejector

PAN Cheng-xiong¹, ZHANG Jing-zhou^{1,2}, SHAN Yong¹

(1. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,
College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Co-Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: The pumping performances of double-stage lobe mixer/ejector were experimentally and numerically investigated. The aerodynamic characteristics difference of mixer/ejector between two inlet modes of mixing duct was illustrated and the effects of mixing duct area ratio and length-diameter ratio on the pumping performance of double-stage lobe mixer/ejector were preliminarily analyzed. The results show that the inlet mode of mixing duct has strong influence on pumping capacity. Under the present configuration parameters, the pumping capacity of single-stage lobe mixer/ejector is 10% superior to that of double-stage lobe mixer/ejector in the case of confined inlet. While in the case of open inlet, the pumping capacity is 35% superior to that of confined inlet at most. The pumping capacity of double-stage lobe mixer/ejector is stronger than that of single-stage lobe mixer/ejector. Especially for the mixing duct with bigger area ratio or less length-diameter ratio, the pumping performances of double-stage lobe mixer/ejector in the case of open inlet is superior to that of confined inlet.

Key words: mixer/ejector; double-stage lobed nozzle; pumping performance; experimental test; inlet mode

直升机发动机排气系统的外露壁面和燃气尾焰是红外辐射的重要来源, 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]。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^[4-11],相对于普通的喷管,可以抽吸更多的环境空气进入混合管对高温主流进行冲淡和冷却,并在较短的轴向距离内实现高效的混合.近年来针对波瓣喷管引射式红外抑制器,还开展旋翼下洗气流影响、排气系统与机身一体化、混合管遮挡、短突扩波瓣抑制流动分离等技术的发展研究^[12-17].

随着涡轴发动机功质比的提高,发动机热力循环的最高温度有较大幅度的提升,极大地加剧了排气系统的红外辐射能量,使排气系统的红外抑制方案设计面临更加苛刻的挑战. Presz 和 Werle^[18]提出了多级波瓣引射混合器的概念,鲁盼等^[19]对一种二元双级波瓣引射混合器的面积比、波瓣张角影响进行了数值研究,在混合管进口前端开放式的外部引射环境情况下,研究结果表明在大引射面积比情况下,使用双级波瓣喷管可以提高引射及推力.注意到在上述研究中,未考虑混合管进口前端安置在受限空间中的溢流效应,因此针对多级波瓣引射混合器的研究还亟待深入.

本文运用实验和数值方法对双级波瓣引射混合器的引射性能进行研究,重点在于揭示混合管进口处于敞开空间和受限空间中的双级波瓣引射混合器气动特征差异,并初步分析双级波瓣引射混合器的混合管面积比和长径比对引射性能的影响.

1 物理模型

双级波瓣引射混合器的物理模型如图1所示.在图1(a)中,主流通过第1级波瓣喷管进入第2级波瓣喷管中,抽吸来自集气室的次流,在第2级波瓣喷管中混合后再喷射进入混合管,注意到被主流引射的次流通过集气室分别进入第2级波瓣喷管和混合管,即混合管的进口前端安置在受限的引射环境中,为便于叙述,本文将其定义为

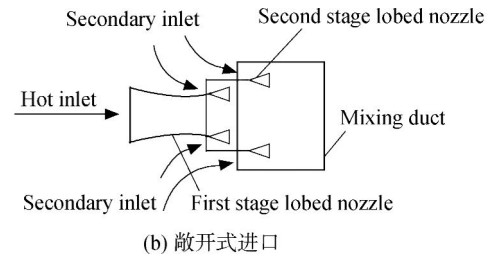
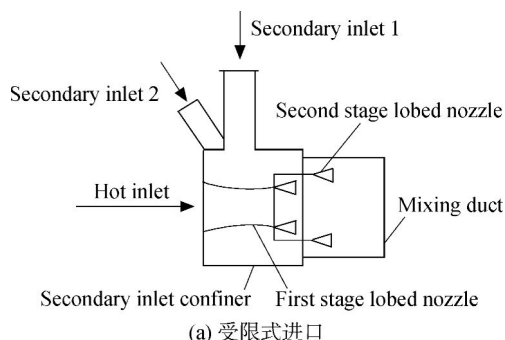


图1 双级波瓣引射混合器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of double-stage lobe mixer/ejector

混合管进口处于受限空间(简称受限式进口).在图1(b)中,无论是第2级波瓣喷管还是混合管,外部环境的气流抽吸均从外部环境中直接进入,本文将其定义为混合管进口处于敞开空间(简称敞开式进口).设计该两种次流引射结构的目的是为了对比敞开式进口和受限式进口条件下,引射混合器的气动特征差异.将该图中的第2级波瓣喷管移去,则上述双级波瓣引射混合器转化为单级波瓣引射混合器.

2 实验模型和方法

图2为受限式进口双级波瓣引射混合器实验装置示意图.主流由高压鼓风机提供,其额定体积流量为 $3130\text{ m}^3/\text{h}$,额定压力为 5460 Pa ,进入单管燃烧室加热后经过整流段从喷管中喷出.实验过程中,主流进口质量流量为 0.235 kg/s ,主流总温为 800 K .次流由主流泵吸进入混合管,在受限式进口中,集气室上设计有两个引射气流入口,通过吸风喇叭管测量引射气流的质量流量.

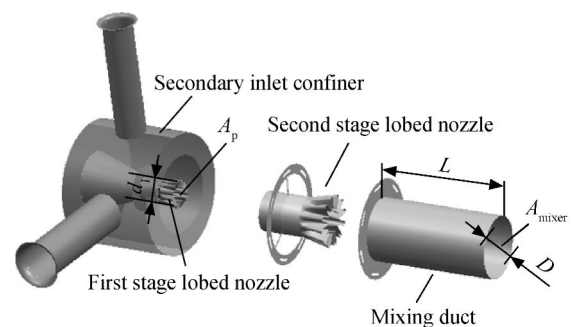


图2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experiment setup

波瓣喷管的结构如图3所示,第1级波瓣喷管进口直径 $d_1 = 60\text{ mm}$,直管段 $l_{11} = 50\text{ mm}$,出口共12个波瓣沿周向均匀布置,瓣宽 $b_1 = 9\text{ mm}$,瓣长 $l_{12} = 60\text{ mm}$,波瓣内环半径 $R_{in} = 45\text{ mm}$,外环半径 $R_{out} = 76\text{ mm}$,第1级波瓣喷管出口面积

$A_p = 3185 \text{ mm}^2$; 第 2 级波瓣喷管瓣宽 $b_2 = 12 \text{ mm}$, 波瓣内环半径 $R_{2in} = 30 \text{ mm}$, 外环半径 $R_{2out} = 66 \text{ mm}$, $d_2 = 100 \text{ mm}$, $l_{21} = 110 \text{ mm}$, $l_{22} = 70 \text{ mm}$.

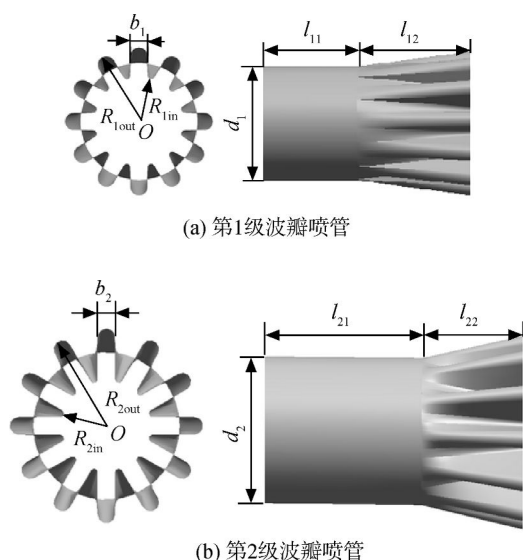


图 3 波瓣喷管示意图

Fig. 3 Schematic diagram of lobed nozzle

通过改变混合管的直径和长度, 研究引射混合器的混合管面积比和长径比对引射性能的影响. 混合管长度分别取为 170, 320 和 420 mm, 混合管长径比 L/d_1 依次为 2.83, 5.33 和 7.00; 混合管直径分别取为 142, 158 和 200 mm, 对应的混合管面积比 A_{mixer}/A_p 依次为 5.0, 6.2 和 10.0.

3 计算模型和方法

按照实验件结构和实验参数进行数值模拟. 流场计算使用 Fluent 软件.

计算域由双级波瓣引射混合器模型、主流进口边界、次流进口边界和外场空间边界组成. 图 4 为敞开式进口的计算域示意图. 混合管排气出口处的压力并不是外界大气压力, 且出口截面流动并未充分发展, 所以在混合管外选取一个足够大的区域(长约为混合管直径的 15 倍, 直径约为混合管直径的 8 倍)作为混合管出口外场边界.

1) 主流进口边界条件: 质量流量、总温均与实验时保持一致, 质量流量为 0.235 kg/s , 总温为 800 K . 考虑到燃烧室出口气流的强湍流特性, 主流湍流度设为 5%.

2) 次流进口边界条件: 设定为压力入口, 由于引射气体来自大气, 其总压即为环境大气压力, 为 101325 Pa , 总温即环境温度, 为 288 K .

3) 固体壁面边界条件: 采用无滑移固体壁面

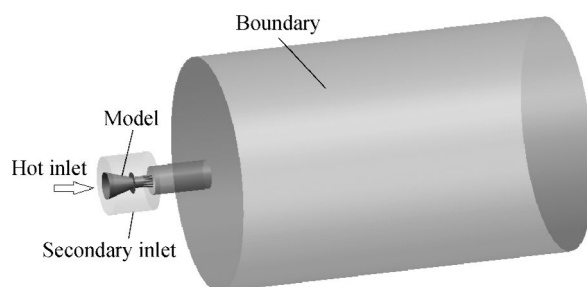


图 4 计算域示意图

Fig. 4 Schematic diagram of computational region

边界条件, 内部壁面设定为流-固耦合面.

4) 外场边界条件: 设定为压力出口, 背压即为环境大气压力, 为 101325 Pa , 环境温度为 288 K .

计算采用非结构化网格, 在波瓣喷管和混合管壁面附近流动参数变化剧烈的位置采用局部网格加密, 使得近壁区 y^+ 与所采用的 SST (shear stress transport) $k-\omega$ 紊流模型对应的壁面处理相适应, 根据网格独立性实验的结果, 最终网格总数定在 350 万左右.

4 结果与分析

4.1 混合管进口方式的影响

引射系数是衡量引射能力的重要指标, 定义为引射次流质量流量与主流质量流量之比. 表 1 给出了在受限式进口条件下, 混合管长径比 $L/d_1 = 5.33$ 、面积比 $A_{mixer}/A_p = 6.2$ 时, 单级波瓣与双级波瓣引射混合器的引射系数实验测试结果. 由于敞开式进口的引射次流质量流量无法测量, 故该表中无法给出. 表 2 给出了同样结构参数条件下的数值计算结果.

表 1 受限式进口引射系数实验结果

Table 1 Experimental result of pumping coefficient for confined inlet

波瓣结构	单级	双级
引射系数	0.817	0.766

表 2 引射系数计算结果

Table 2 Computational result of pumping coefficient

波瓣结构	单级		双级	
	受限式进口	敞开式进口	受限式进口	敞开式进口
引射系数	0.833	0.706	0.949	0.953

在其他混合管长径比和面积比情况下, 实验

和计算结果同样表明:对于受限式进口,单级波瓣引射混合器的引射能力要强于双级波瓣引射混合器;而对于敞开式进口,其引射能力要优于受限式进口,同时双级波瓣引射混合器的引射能力要略大于单级波瓣引射混合器,这与已有的研究结论^[18-19]是一致的.说明混合管进口方式对引射能力有非常重要的影响.

图5和图6分别为在混合管长径比 $L/d_1 = 5.33$ 、混合管面积比 $A_{\text{mixer}}/A_p = 6.2$ 时,受限式进口和敞开式进口的混合管壁面静压分布.可以看出,在受限式进口下,单级波瓣引射混合器的混合管壁面静压明显低于双级波瓣引射混合器,说明单级波瓣引射混合器引射次流的能力要强于双级波瓣引射混合器;而对于敞开式进口,单级波瓣与双级波瓣引射混合器的混合管壁面静压基本一致,在进口处双级波瓣引射混合器的混合管壁面静压略低,间接地验证了表2的结论.

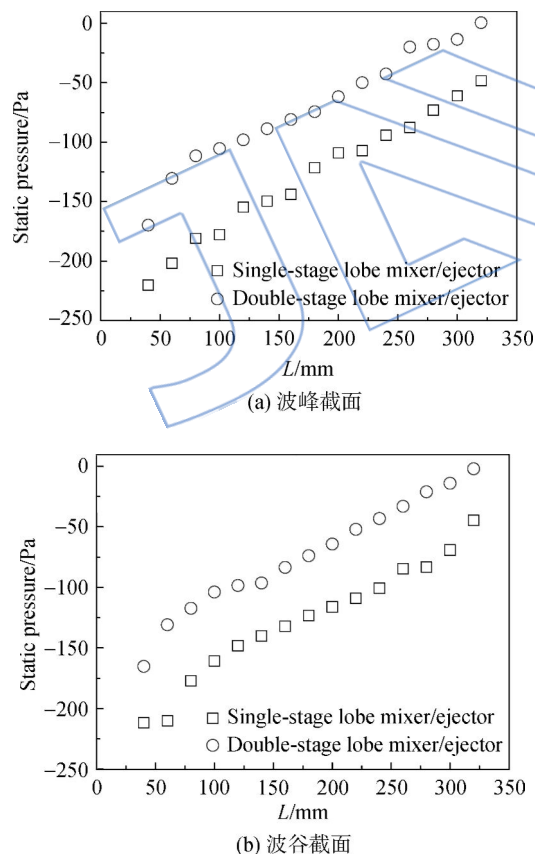


图5 混合管壁面静压分布(受限式进口)

Fig. 5 Static pressure on mixing duct wall (confined inlet)

图7和图8为数值模拟得到的引射混合器对称面流线的分布情况.可以看出,对于受限式进口,单级波瓣引射混合器的次流可以较为顺利地

流入混合管与主流进行掺混,而安装有第2级波瓣喷管后,第2级波瓣喷管的壁面对于流入引射系统的次流产生了一定的阻挡作用,导致流入混合管的次流气体被迫分成两股,极大地影响了次流气体与主流气体的掺混,这便是导致安装有次流集气室情况下,双级波瓣引射混合器的引射效果要弱于单级波瓣引射混合器的原因.而对于敞开式进口,第2级波瓣喷管和混合管入口皆直接连通大气环境,次流可以顺畅地流入引射混合器,

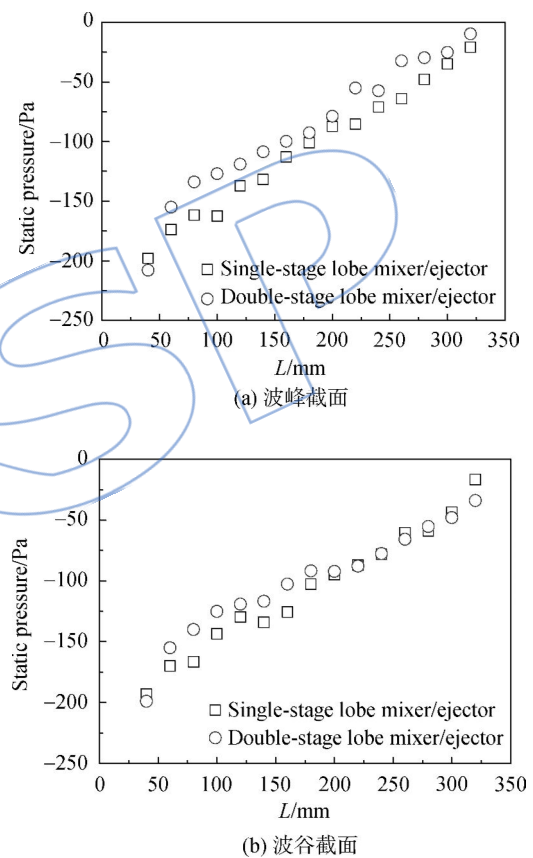
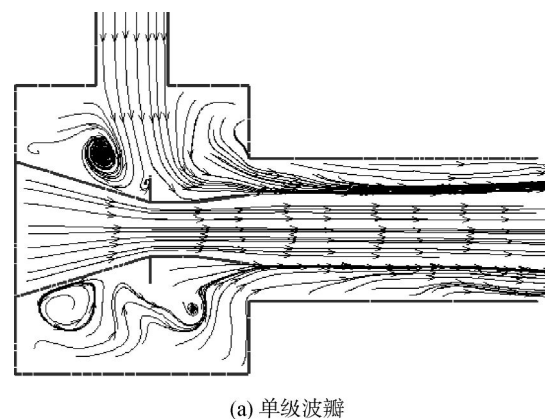
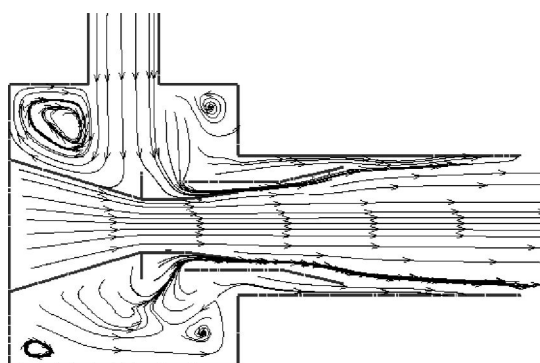


图6 混合管壁面静压分布(敞开式进口)

Fig. 6 Static pressure on mixing duct wall (open inlet)



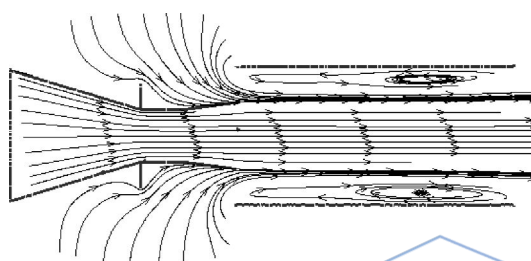
(a) 单级波瓣



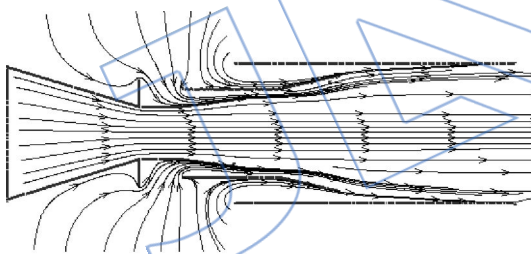
(b) 双级波瓣

图 7 引射混合器对称面流线分布(受限式进口)

Fig. 7 Streamline distribution in symmetry plane of mixer/ejector (confined inlet)



(a) 单级波瓣



(b) 双级波瓣

图 8 引射混合器对称面流线分布(敞开式进口)

Fig. 8 Streamline distribution in symmetry plane of mixer/ejector (open inlet)

由于在单级波瓣引射混合器中,相对较大的混合管截面导致主流无力加速引射气流^[5,8],此时双级波瓣引射混合器则可以有效地规避这一问题,从而提高引射系数。

4.2 混合管面积比和长径比的影响

表 3 给出了双级波瓣引射混合器的不同混合管面积比(混合管长径比 $L/d_1 = 5.33$)所对应的引射系数测试和计算结果。

在受限式进口条件下,当混合管面积比为 5.0 或 6.2 时,其引射系数未发生明显的变化,当混合管面积比增大到 10.0 的情况下,系统的引射能力出现了明显的下降,这说明对于引射混合器而言,过大的混合管面积比并不利于引射性能的

表 3 不同混合管面积比的引射系数

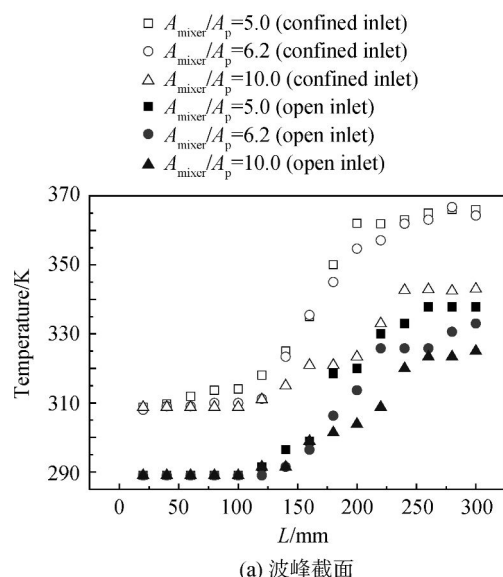
Table 3 Pumping coefficients for different mixing duct area ratios

A_{mixer}/A_p	实验值 (受限式进口)	计算值 (受限式进口)	计算值 (敞开式进口)
5.0	0.766	0.702	0.921
6.2	0.766	0.706	0.953
10.0	0.668	0.519	0.902

提高。其原因在于:过大的混合管面积比导致主流无力加速引射气流,称为主流动量过膨胀。对于敞开式进口,在较大的混合管面积比下,双级波瓣引射混合器的引射能力下降幅度明显低于受限式进口的情形。

图 9 为实验测得的双级波瓣引射混合器在不同混合管面积比下的混合管壁面温度分布。从图中可以看出,无论对于受限式进口还是敞开式进口,在混合管面积比为 5.0 或 6.2 时,在混合距离约为 0.7 倍管长位置,已形成周向较为均匀的混合;混合管面积比越大,混合管壁面离主流越远,故混合管壁面温度越低。注意到,敞开式进口下的壁面温度均低于对应的受限式进口壁面温度,表明抽吸进的冷气质量流量相对较大,导致壁面温度的下降。

表 4 给出了双级波瓣引射混合器的不同混合管长径比(混合管面积比 $A_{\text{mixer}}/A_p = 6$)所对应的引射系数测试和计算结果。从表中可以看出,在本文研究的混合管面积比下,随着混合管长径比的提高,其引射系数逐渐增加,引射系数与混合管长径比呈现单调的变化规律。



(a) 波峰截面

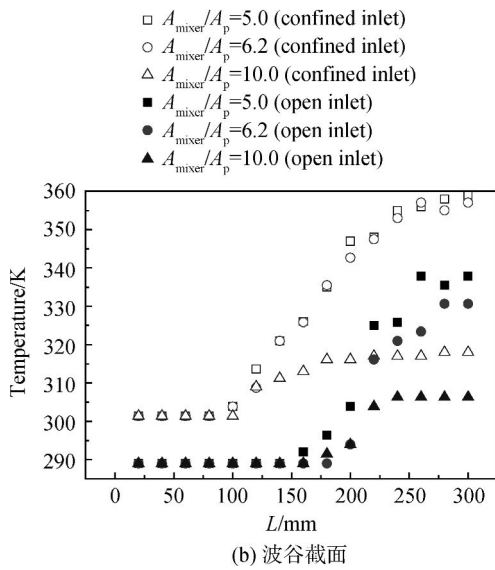


图9 不同混合管面积比的混合管壁面温度分布

Fig. 9 Temperature on mixing duct wall for different mixing duct area ratios

表4 不同混合管长径比的引射系数

Table 4 Pumping coefficients for different mixing duct length-diameter ratios

L/d_1	实验值 (受限式进口)	计算值 (受限式进口)	计算值 (敞开式进口)
2.83	0.515	0.443	0.630
5.33	0.766	0.702	0.953
7.00	0.915	0.830	1.106

图10为实验测得的双级波瓣引射混合器,在不同混合管长径比下的混合管壁面温度分布.无论对于管受限式进口还是敞开式进口,不同的混合管长径比的壁面温度分布规律基本一致,当混合管长径比为2.83时,由于主流尚未触壁,故混合管壁面温度仅略高于环境温度;随着混合管长

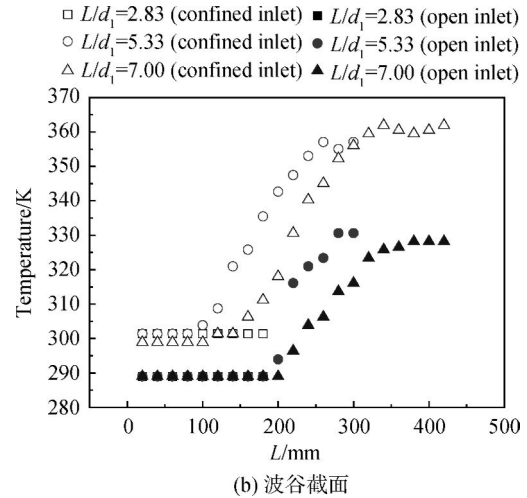


图10 不同混合管长径比的混合管壁面温度分布

Fig. 10 Temperature on mixing duct wall for different mixing duct length-diameter ratios

径比增大,主流与次流混合的气流能够在流出混合管出口前触壁,导致混合管壁面温度明显提高,此时,主流对次流的抽吸作用能够得到充分发挥,引射能力也显著提升.同样地,敞开式进口下的壁面温度均低于对应的受限式进口,表明敞开式进口的混合管引射能力要强于后者.

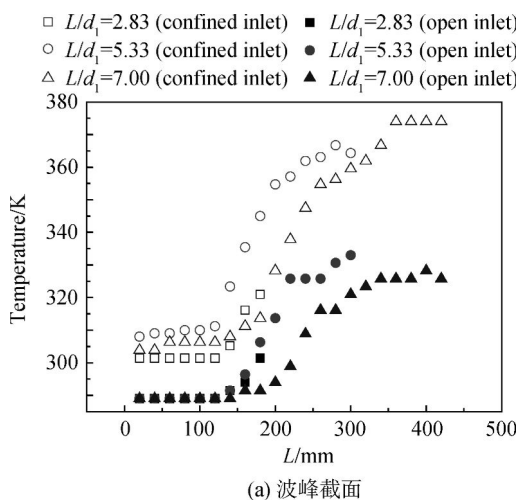
5 结论

1) 混合管进口方式对引射能力有非常重要的影响,对于受限式进口,单级波瓣引射混合器的引射能力要强于双级波瓣引射混合器;而对于敞开式进口,其引射能力要优于受限式进口,此时双级波瓣引射混合器的引射能力要略大于单级波瓣引射混合器.

2) 在较大的混合管面积比或较小的混合管长径比下,两者均表现为主流无力加速次流的结构特征,此时,敞开式进口下双级波瓣引射混合器较受限式进口表现尤为优越.

参考文献:

- [1] Francois T. Internal aerodynamics of infrared suppressors for helicopter engines[J]. Journal of the American Helicopter Society, 1988, 33(4): 4-14.
- [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] Ponton T, Warnes G. Helicopter IRS engine integration for the 'first' technology demonstrator programme[R]. ASME Paper GT2007-27408, 2007.
- [4] Presz W M, Morin B L, Gousy R G. Forced mixer lobes in ejector designs[J]. Journal of Propulsion and Power, 1988,



- 4(4):350-355.
- [5] Skebe S, McCormick D, Presz W. Parameter effects on mixer-ejector pumping performance[R]. AIAA 88-7018, 1988.
- [6] 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 Jingzhou, LI Ligu, GAO Chao, 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)
- [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(12): 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,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.
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): 33-36. (in Chinese)
- [10] SHAN Yong, ZHANG Jingzhou. Numerical investigation of flow mixture enhancement and infrared radiation shield by lobed forced mixer[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(17/18): 3687-3695.
- [11] 刘友宏,郭楠,李江宁,等.后缘切角对波瓣混合器性能影响[J].航空动力学报,2009,24(9):1917-1922.
LIU Youhong, GUO Nan, LI Jiangning, et al. Effect of cut angles at trailing edge on the performance of a lobed mixer [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(9): 1917-1922. (in Chinese)
- [12] 王先炜,黄勇,路玉霞.旋翼下洗气流对红外抑制器性能的影响研究[J].航空动力学报,2003,18(6):772-776.
WANG Xianwei, HUANG Yong, LU Yuxia. Influences of the downwash flow from a helicopter rotor on the performances of an infrared suppressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(6): 772-776. (in Chinese)
- [13] 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研究[J].航空动力学报,2005,20(6):978-982.
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)
- [14] 唐正府,张靖周,王先炜,等.排气系统与尾机身一体化红外抑制器实验分析[J].航空动力学报,2007,22(2):233-237.
TANG Zhengfu, ZHANG Jingzhou, WANG Xianwei, et al. Experimental research on infrared suppressor integrating the exhaust system with the tail part of a helicopter [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(2): 233-237. (in Chinese)
- [15] Bettini C, Cravero C, Cogliandro S. Multidisciplinary analysis of a complete infrared suppression system[R]. ASME Paper GT2007-27721, 2007.
- [16] 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.
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)
- [17] 潘丞雄,张靖周,单勇,等.引射/强迫波瓣混合器开设通气狭缝的流动分离控制[J].航空动力学报,2013,28(2):331-337.
PAN Chengxiong, ZHANG Jingzhou, SHAN Yong, et al. Flow separation control of lobed ejector/forced mixer by ventilation[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(2): 331-337. (in Chinese)
- [18] Presz W M, Werle M. Multi-stage mixer/ejector system [R]. AIAA-2002-4064, 2002.
- [19] 鲁盼,黄勇,王方,等.面积比、波瓣张角对多级波瓣喷管性能的影响研究[J].航空发动机,2010,36(6):12-17.
LU Pan, HUANG Yong, WANG Fang, et al. Area ration and lobe angle influence on the performance of multistage lobed nozzles[J]. Aeroengine, 2010, 36(6): 12-17. (in Chinese)