

航空航天装备

民用飞机实验室APU开车高温尾气排放 影响因素分析

马建军

(飞机强度研究所, 西安 710065)

摘要: **目的** 对民用飞机APU在气候实验室内开展极端气候环境下的起动和工作试验, 建立一种APU高温尾气安全排放方法。**方法** 用CFD仿真手段对采用排气管道将APU高温尾气排出气候实验室的可行性及影响因素(包括管道直径、距离、背压等)进行系统性分析研究。**结果** 气管道入口距离APU管道出口过近时, 将有利于APU排气, 引射比 ε 与排气管道出口压力 P_{ex} 及排气管道直径 D 线性相关, 排放温度 t_{ex} 与管道直径 D 成反比。在排气管道入口设置平滑收敛段, 利于消除涡流, 减轻负压程度, 并在一定范围内提高引射比。**结论** 采用管道被动排气是可行的, 合适的排气管道设计为 $D/d=2.0$, $L/d=1.5$, 并在管道入口设置平滑收敛段。

关键词: APU; 高温尾气; 气候实验室

中图分类号: V216

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)11-0069-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.11.010

Analysis of Influencing Factors of Discharging Civil Aircraft APU High Temperature Exhaust Gas from Climatic Laboratory

MA Jian-jun

(Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: This research aims to carry out start-up and working tests under extreme climatic environments for civil aircraft APU in the climate laboratory, and establish a method for the safe discharge of APU high-temperature exhaust gas. CFD simulation method was used to systematically analyze and study the feasibility and influencing factors of using exhaust pipes to discharge APU high-temperature exhaust gas from the climate laboratory, including pipe diameter, distance, and back pressure. When the inlet of the exhaust pipe is too close to the outlet of the APU, it will facilitate the APU exhaust. The ejection ratio ε is linearly related to the outlet pressure P_{ex} of the exhaust pipe and the diameter D of the exhaust pipe. The exhaust temperature t_{ex} is inversely proportional to the pipe diameter D . Furthermore, setting a smooth convergence section at the entrance of the exhaust pipe is beneficial to eliminate eddy currents, reduce the degree of negative pressure, and increase the ejection ratio within a certain range. In conclusion, it is feasible to adopt pipeline passive exhaust: A suitable exhaust pipeline design is $D/d=2.0$,

收稿日期: 2021-11-11; 修订日期: 2021-12-15

Received: 2021-11-11; Revised: 2021-12-15

基金项目: 国防基础科研(JCKY2020205B029)

Fund: National Defense Basic Scientific Research(JCKY2020205B029)

作者简介: 马建军(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为飞机气候环境试验技术。

Biography: MA Jian-jun (1989-), Male, Master, Senior engineer, Research focus: aircraft climate environment test technology.

引文格式: 马建军. 民用飞机实验室APU开车高温尾气排放影响因素分析[J]. 装备环境工程, 2022, 19(11): 069-076.

MA Jian-jun. Analysis of Influencing Factors of Discharging Civil Aircraft APU High Temperature Exhaust Gas from Climatic Laboratory[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(11): 069-076.

$L/d=1.5$, and a smooth convergence section is set at the inlet of the pipeline.

KEY WORDS: APU, high temperature exhaust gas, climatic environmental test chamber

飞机实验室气候试验是以一架可飞行的全状态飞机为试验对象,在气候实验室中对其施加温度、湿度、太阳辐射、降雪、淋雨、吹风等气候环境,考核其在极端气候环境下的功能和性能^[1-2],确保飞机具有良好的环境适应性^[3]。飞机实验室气候试验与外场试验一样是高度动态的,将真实地复现飞机在极端环境下浸泡一夜后^[4],飞机启动 APU 或发动机,操作各飞机系统,检查飞机各系统功能是否正常,性能是否出现衰减^[5-7]。飞机的 APU 启动和工作一方面是试验对象,一方面又为其他子系统提供气源或电源等动力^[8]。APU 启动时会喷出高温尾气,必须将 APU 的高温尾气安全地排出实验室,避免影响试验环境,保障试验安全。本文通过 CFD 仿真技术^[9],对 APU 高温尾气的排放方法和排放影响因素进行了分析,为 APU 尾气排放系统的设计提供参考。

1 气候实验室内 APU 开车高温尾气排放方法

美国麦金利实验室进行过 B787、A350、CS100、MRJ190 等多架民机的气候试验,其 APU 高温尾气是通过一根排气管道排出实验室外的,如图 1 所示。通常情况下,高温尾气都是“被动排放”的^[10],即依靠 APU 高温尾气较高的气流速度进入排气管道,从而排出实验室,同时会引射一部分周围空气一同排出,类似一个引射器。相关引射器方面的研究表明,排气管道的特征参数,包括管道直径、距离、形状、背压等^[11-15],对主气流和被引射气流之间的相互影响存在一定的影响。这些研究基本集中在超声速甚至高超超声速引射方面,侧重于对引射器性能(如引射系数、总压恢复系数等)的研究,而 APU 尾气速度则相对较低,关于 APU 尾气排放的分析尚不多见。



图 1 庞巴迪 CS100 飞机 APU 尾气排放

Fig.1 Bombardier CS100 APU Exhaust Gas Emission

理想情况下,排气管道的存在不应改变 APU 的正常工作状态,APU 排气参数不应发生改变。从实

验室温度和压力稳定的角度来说,将 APU 高尾温气连同被引射空气排出实验室,必须同时向实验室内补充等量且与室内温度相同的新风,排放量越大,所需新风量越大,配套的新风系统能力也越大,因此 APU 尾气排放系统的设计流量也不宜过大。

2 模型建立

飞机和 APU 尾气排放管道在实验室中的安装如图 2 所示,排气管道对接 APU 尾气出口,排气管道的出口在实验室的右后方。针对研究的目标,取实际模型的一部分进行研究并进行简化(如图 3 所示),简化模型包括飞机后机身、APU 排气口、APU 管道、APU 附近大气、排气管道等。以 APU 排气管道的出口圆心作为坐标原点,APU 排气口和 APU 管道的直径 d 为 0.3 m,APU 轴心距离地面高度 4 m,排气管道 X 方向长 30 m,管道的弯头半径为管道直径的 2 倍。

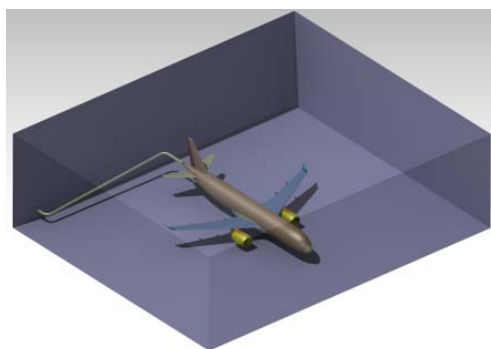


图 2 飞机和 APU 排气管道在实验室中安装示意图
Fig.2 Schematic diagram of the installation of aircraft and APU exhaust pipes in the laboratory

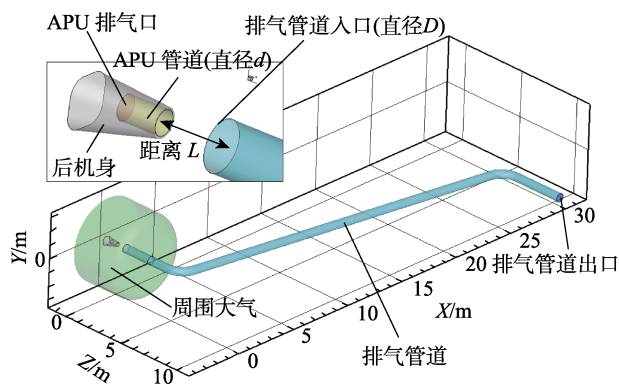
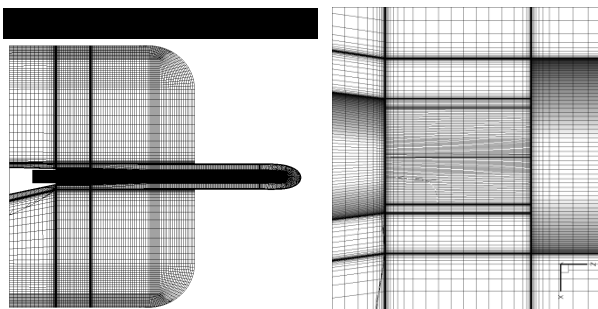


图 3 简化模型

Fig.3 Simplified model

对简化模式进行网格划分,如图 4 所示。网格为六面体网格,在 APU 管道和排气管道壁面设置边界层,边界层第一层网格高度为 0.001 mm,以使壁面

y^+ 为 1 左右, 并且在 APU 管道出口和排气管道入口附近进行网格加密设置, 网格数量为 480 万。

a $X=0$ 截面网格分布

b 局部网格加密

图 4 网格划分

Fig.4 Mesh division: a) $X=0$ section grid distribution; b) local grid densification

选用 $k-\omega$ SST 湍流模型^[16-20], 边界条件设置如下。

1) APU 排气口: 质量流量入口, 流量为 3.5 kg/s , 温度 t_0 为 381°C , 湍流强度为 5%, 湍流耗散系数为 10%。

2) 周围大气: 压力入口, 总压为 0 Pa , 温度 t_a 为 20°C , 湍流强度为 2%, 湍流耗散系数为 2%。

3) 排气管道出口: 压力出口 P_{ex} 为 0 Pa , 温度为 20°C , 湍流强度为 2%, 湍流耗散系数为 2%。

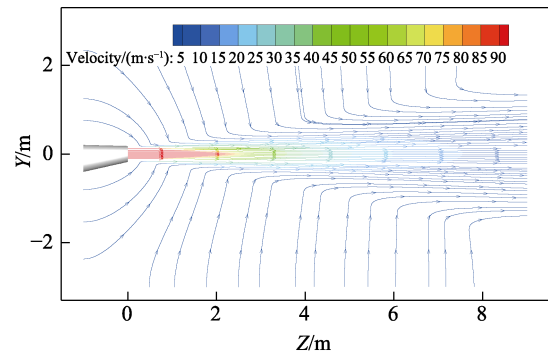
4) 机身、APU 管道壁面、排气管道壁面: 本文不分析机身等表面对实验室内温度场的影响, 因此均设置为绝热壁面。

APU 高温尾气成分比较复杂, 但主要成分仍然是空气, 本文重点研究的是管道特征对流动参数的影响, 故 APU 尾气按空气计算, 空气密度采用理想气体模型, 空气黏性采用萨特兰公式进行计算。压力-速度耦合计算采用 SIMPLE 算法, 压力、动量、湍流、能量方程采用二阶迎风差分格式, 当排气管道出口质量流量变化在 $1 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$ 以内时, 认为计算收敛。

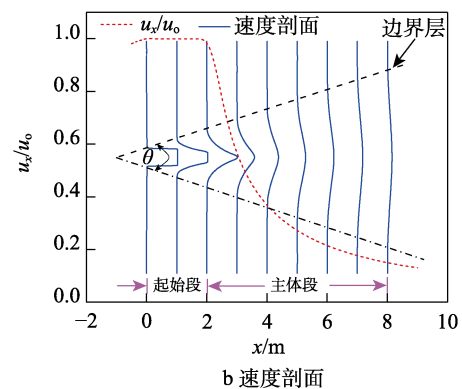
3 结果分析

3.1 自由射流状态

APU 尾气自由射流状态下 (无排气管道) 的流动分布特性如图 5a 所示, APU 排气口的出口速度达 91 m/s , 当地马赫数为 0.18, 属于亚音速气流, 总压为 $2\,377 \text{ Pa}$ 。APU 尾气高速射流离开 APU 管道后, 由于射流边界速度的不连续性而产生剪切效应, 射流与周围大气产生能量交换, 不断消耗射流的能量, 直到射流的最中心区域。射流轴心处的速度及 APU 管道出口不同距离处的速度剖面如图 5b 所示, 射流轴心速度在离开 APU 管道出口一段距离内未见衰减, 该段称为射流的起始段, 此后轴心速度开始迅速衰减, 称为射流的主体段, 射流与大气分界处称为边界层, 射流的扩散角为 34° 。



a 流动迹线及速度场



b 速度剖面

图 5 APU 尾气自由射流

Fig.5 APU exhaust gas free jet: a) flow trace and velocity field; b) velocity profile

APU 尾气自由射流状态下的压力分布如图 6 所示。可见, 在没有任何其他约束条件下, 射流内部静压与周围大气基本一致, 在 20 Pa 以内。

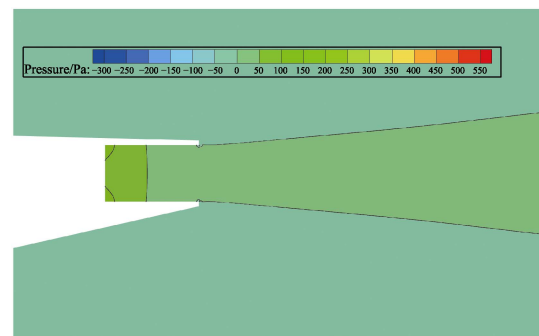
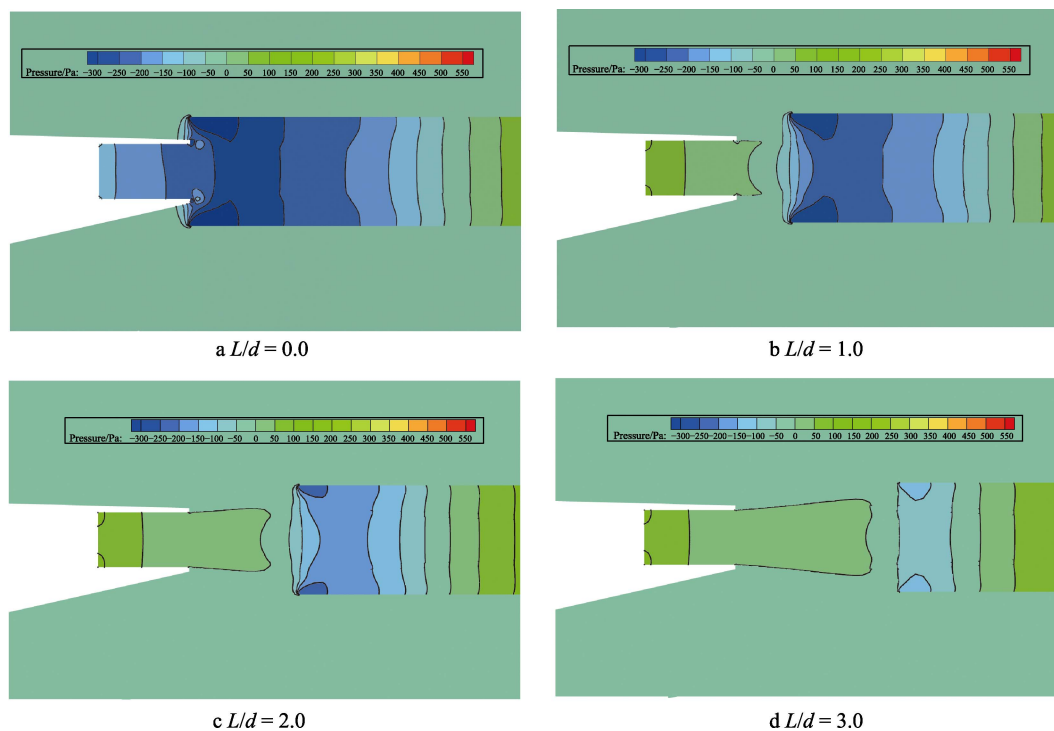


图 6 APU 尾气自由射流压力场分布

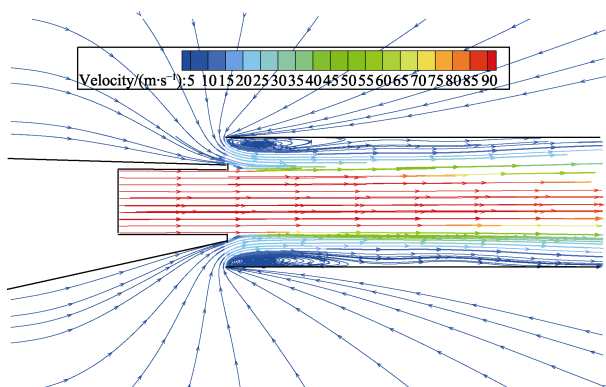
Fig.6 Pressure field distribution of APU exhaust gas free jet

3.2 管道直径与管道入口距离

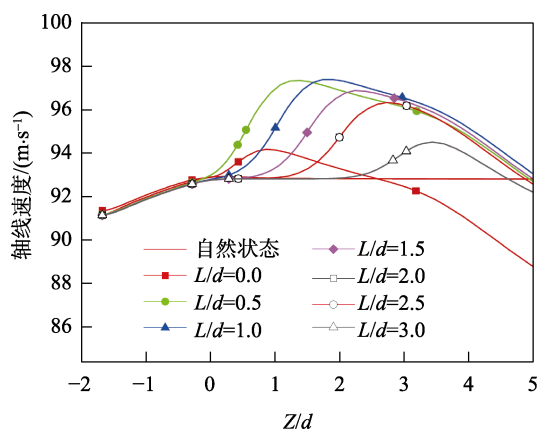
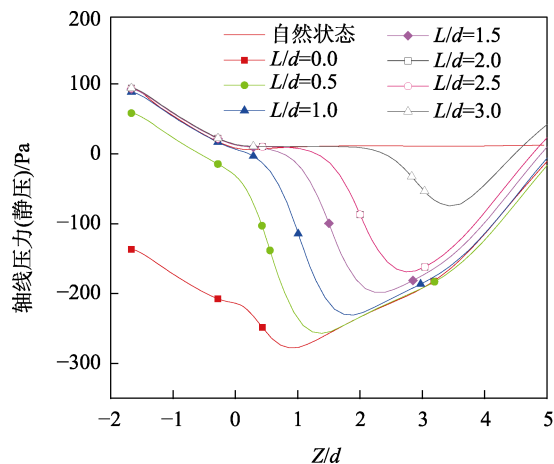
排气管道出口压力 $P_{\text{ex}}=0 \text{ Pa}$, 直径 D 为 2 倍的 APU 排气管道直径 d 时, 不同的排气管道入口距离 L 下 APU 管道出口附近的压力分布如图 7 所示。可以看出, 当 L/d 为 0 时, APU 管道出口附近出现了较大的负压, 导致 APU 的排气总压 P_0 仅为 $2\,158 \text{ Pa}$, 小于自然射流时的 $2\,377 \text{ Pa}$, 对 APU 正常工作参数产生了影响。随着 L 的增大, 负压区域逐渐远离 APU 管道出口。当 $L/d=2.0$ 时, APU 管道出口处的压力与自然射流状态下的基本一致。

图7 管道直径 $D/d=2$ 时不同管道入口距离 L/d 时的压力（静压）分布Fig.7 When the pipe diameter $D/d=2$ static pressure distribution at different pipe inlet distances L/d

产生这种情况的原因可以由图8所示的流动分布说明。APU 尾气高速气流的引射作用，周围大气经过加速进入排气管道，并在排气管道入口附近形成了涡流，大气加速会导致其静压降低。同时，涡流的存在进一步减小了有效流通面积，加剧了负压。负压区的存在改变了 APU 排气射流的扩散条件，导致 APU 排气流量不变的情况下，所需排气压力的降低，影响了 APU 正常工作参数。

图8 管道直径 $D/d=2$ 、 $L/d=0$ 时的流动迹线
Fig.8 Flow trace when pipe diameter $D/d=2$ and $L/d=0$

射流轴心处的速度和压力如图9和图10所示。当排气管道入口距离 L 过近时，引射空气在排气管道入口形成的涡流减小了 APU 射流的流通面积，迫使 APU 射流轴心速度增大，排气管道入口的负压区导致 APU 射流轴心压力的降低。当管道入口距离 L/d 超过 1.5 时，APU 管道出口处 ($Z/d=0$) 的轴心速度和压力基本恢复到自然射流状态。

图9 管道直径 $D/d=2$ 时不同 L 下的射流轴心速度
Fig.9 Pipe diameter $D/d=2$ jet axis velocity at different L 图10 管道直径 $D/d=2$ 时不同 L 下的射流轴心压力
Fig.10 Pipe diameter $D/d=2$ jet axial pressure at different L

不同排气管道直径 D 和排气管道入口距离 L 时的 APU 排气总压 P_0 如图 11 所示。可以看出, 距离 L 的对 P_0 的影响最大, 当 $L/d=0$ 时, P_0 都偏小。随着 L 的增大, P_0 逐渐增大。当 L/d 超过 2.0 时, P_0 基本不再变化, 恢复至自然射流时状态。同时直径 D 对 P_0 也有影响, D 越大, P_0 恢复至自然状态所需的 L 也越大。当 $D/d=2.0$, 且 $L/d=1.5$ 时, P_0 就已基本恢复至自然状态, 对 APU 正常工作参数无影响。

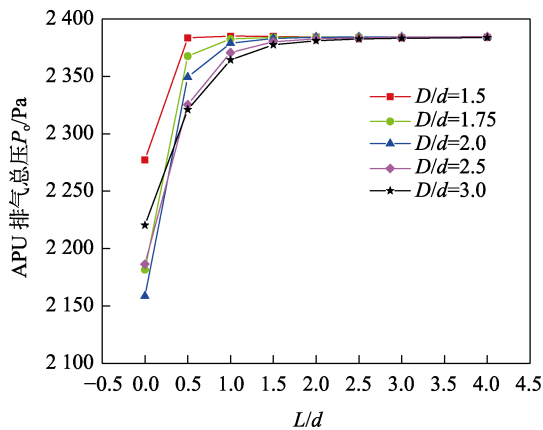
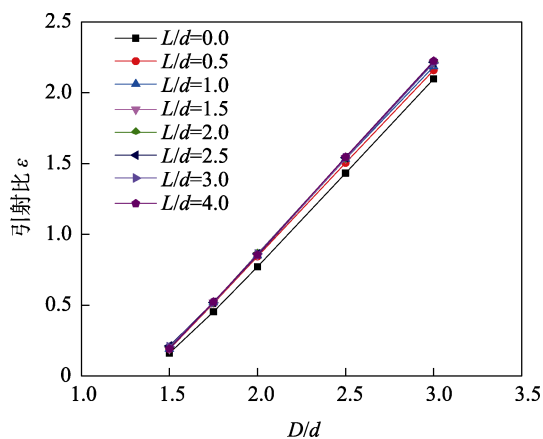


图 11 APU 排气总压

Fig.11 APU exhaust gas total pressure

APU 对空气的引射作用大小可用引射比 ε 来表征, 其定义为引射的空气质量流量与 APU 尾气质量流量之比。不同的排气管道直径 D 和排气管道入口距离 L 时的引射比如图 12 所示。可以看出, 引射比基本上与管道直径成正比, 而与排气管道距离 L 的关系不大。

图 12 不同 D 和 L 时的引射比Fig.12 Ejection ratio at different D and L

不同排气管道直径 D 与排气管道入口距离 L 时, 最终的排放温度如图 13 所示。假设 APU 的高温尾气及被引射的空气完全进入排气管道, 不考虑其他因素, 则最终的排放温度 t_{ex} 与 APU 尾气温度 t_0 及大气温度 t_a 之间的关系可用式 (1) 计算, 计算结果如图 14 所示。

$$t_{ex} / t_0 = \frac{1 + \varepsilon(t_a / t_0)}{1 + \varepsilon} \quad (1)$$

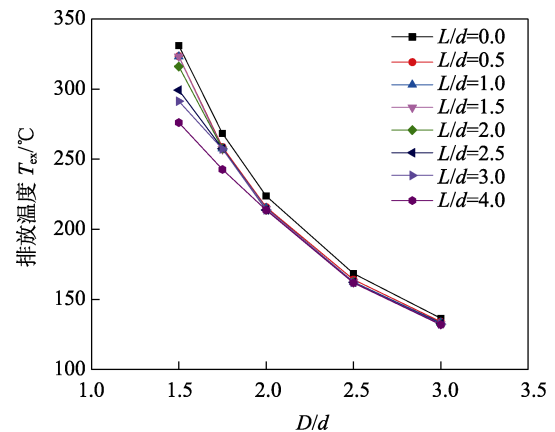
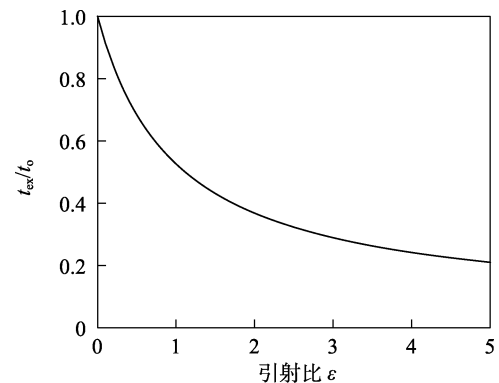
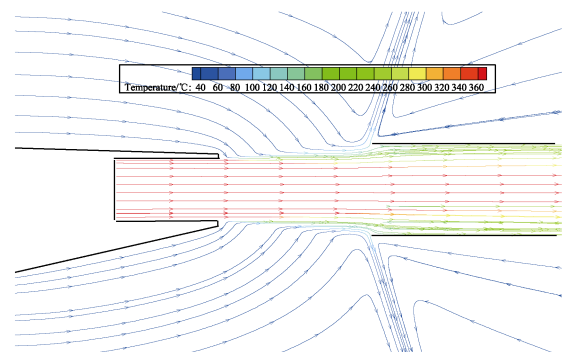
图 13 不同 D 和 L 时的排放温度 t_{ex} Fig.13 Discharge temperature t_{ex} at different D and L 

图 14 排放温度与引射比之间的理论关系

Fig.14 Relationship between discharge temperature and ejection ratio

对比图 13 和图 14 可以看出, 在 $D/d=1.5$ 、 $L/d \geq 2.0$ 及 $D/d=2.0$ 、 $L/d \geq 4.0$ 时, 排放温度背离了式 (1) 的计算, 即在引射比基本不变的情况下, 排放温度出现了下降。产生这种现象的原因是当排气管道直径较小时, 随着排气管道入口距离 L 的增大, 引射的空气已经无法完全进入排气管道, 部分被加热的引射空气又重新回到大气, 这就造成了部分能量的损失, 导致最终的排气温度降低, 如图 15 所示。由于部分高温气体重新回到实验室, 这也标志着排气失效。

图 15 $D/d=1.5$ 、 $L/d=2.5$ 时的流动迹线及温度Fig.15 Flow trace and temperature when $D/d=1.5$, $L/d=2.5$

3.3 排气管道出口压力

由于最终的排放温度较高,可能会在排气管道的出口后采取降温措施,如喷水降温等,这将使得排气管道的出口压力产生变化。 $D/d=2.0$ 、 $L/d=1.5$ 时,排气管道出口压力 P_{ex} 的影响如图 16 所示。可以看出, P_{ex} 对引射比 ε 有着较大的影响,基本上 P_{ex} 每增大 100 Pa, 引射比 ε 降低 0.116, 同时也导致排放温度随着升高。随着 P_{ex} 的增大, APU 排气总压 P_o 也随着增大, 但 P_{ex} 小于 600 Pa 时, P_o 变化较小, $P_{ex}=600$ Pa 时仅增大了 5 Pa, P_{ex} 大于 600 Pa, P_o 迅速增大, 而排放温度增大趋势反而放缓。

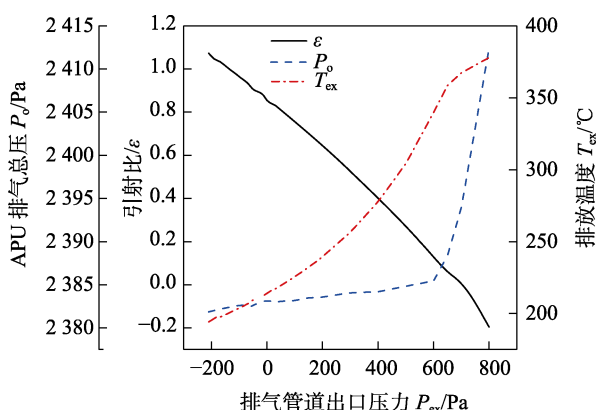


图 16 $D/d=2.0$ 、 $L/d=1.5$ 时排气管道出口压力 P_{ex} 的影响
Fig.16 When $D/d=2.0$ and $L/d=1.5$, the influence of the outlet pressure P_{ex} of the exhaust pipe

P_{ex} 分别为 500、600、700 Pa 时, 流动迹线及温度分布如图 17 所示。可以看出, 当 $P_{ex}=500$ Pa 时, APU 高温尾气及被引射空气尚能完全进入排气管道; $P_{ex}=600$ Pa 时, 被引射空气几乎已经无法进入排气管道, 涡流区已经从管道入口溢出; $P_{ex}=700$ Pa 时, APU 高温尾气也无法完全进入排气管道, 产生了回流, 进而导致 APU 排气总压的迅速增大。

3.4 管道入口形状

由 3.2 节的分析可知, 管道入口区域涡流的存在加剧了负压, 可以通过在管道的入口加一个平滑收敛段来减小负压, 如图 18 所示。从图 18 中可以看出, 在 $L/d=0$ 时, 收敛段的存在明显改善了管道入口附近的流动状态, 消除了涡流, 负压也大大减小, APU 排气总压恢复到 2 302 Pa。因此, 增加收敛段, 将降低管道距离 L 的影响程度, 对排气管道的安装也相应降低。

收敛管道与原始管道的对比如图 19 所示。可以看出, 收敛管对于 APU 排气总压的影响显著变小, 且随着 L 的增大, APU 总压最终为 2 377 Pa, 与自然射流时的一致。与此同时, $L/d \leq 2.0$ 时, 引射比也大于原始管道, 但 $L/d > 2.0$ 时, 引射比却小于原始管道。

引射比减小的原因可从管道入口的质量流量分布 (如图 20 所示) 看出, 收敛段的存在阻碍了引射空气的流动, 导致其质量流量分布产生了比较明显的突变, 引起总的质量流量小于原始管道。

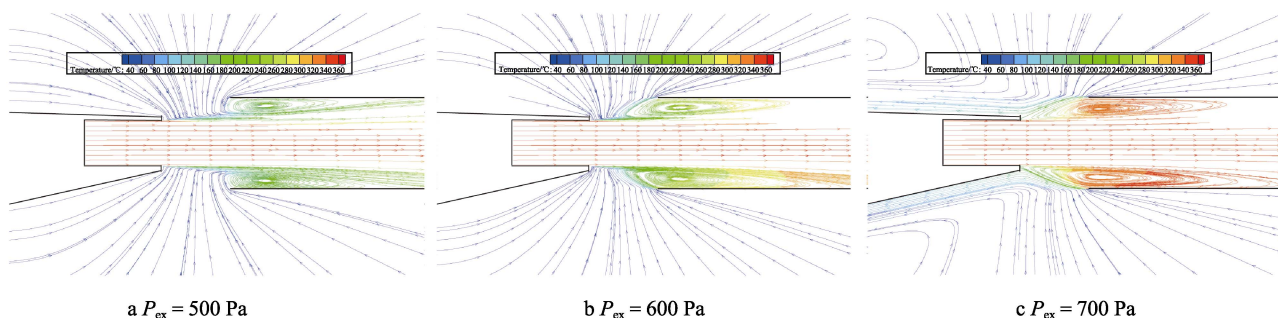


图 17 $D/d=2.0$ 、 $L/d=1.5$ 时不同排气管道出口 P_{ex} 的流动迹线及温度
Fig.17 When $D/d=2.0$ and $L/d=1.5$, the flow trace and temperature of P_{ex} at the outlet of different exhaust pipes

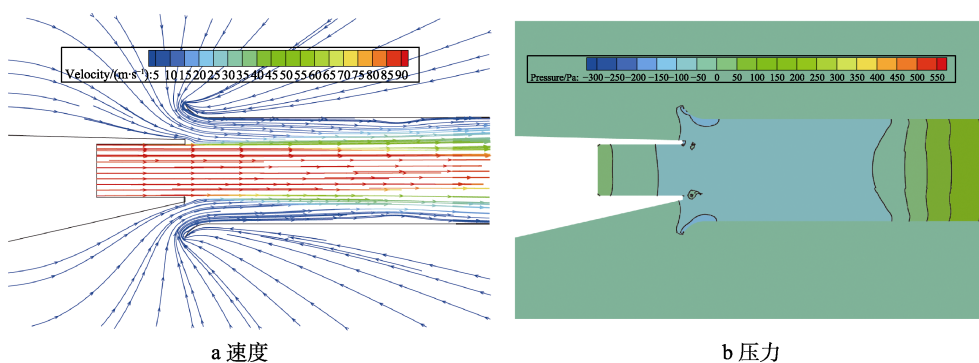


图 18 收敛管道 $D/d=2.0$ 、 $L/d=0$ 时速度和压力的分布
Fig.18 Convergent pipeline $D/d=2.0$ (a) velocity and (b) pressure distribution when $L/d=0$

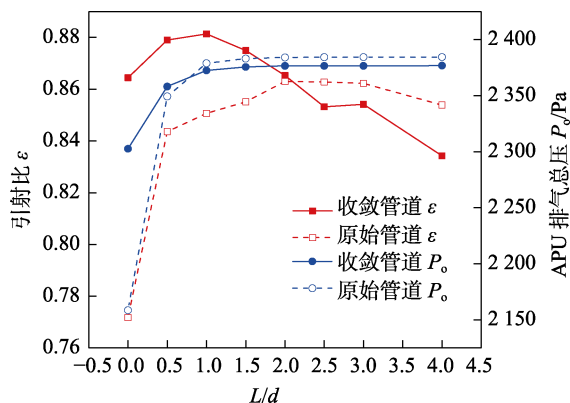
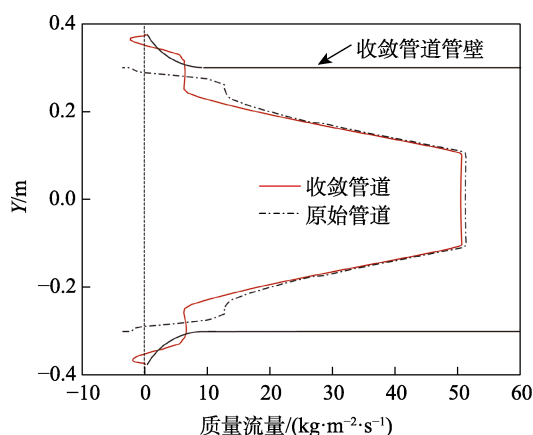


图 19 收敛管道与原始管道对比

Fig.19 Convergent pipeline compared with the original pipeline

图 20 $D/d=2.0$ 、 $L/d=2.5$ 时 2 种管道入口质量流量分布
Fig.20 When $D/d=2.0$ and $L/d=2.5$, the inlet mass flow distribution of two kinds of pipelines

4 结论

通过以上的计算分析, 可以得出以下结论:

1) 通过排气管道对 APU 高温尾气进行“被动排气”是可行的。

2) 排气管道入口与 APU 管道的出口距离 L/d 小于 1.5 时, 由于负压区靠近 APU 管道出口, 引起 APU 总压减小, 利于 APU 排气。

3) 引射比与排气管道的直径基本上成正比, 排气管道直径 D/d 小于 2.0 时, 应减小排气管道入口与 APU 管道的出口距离 L , 防止高温气体溢出管道, 造成排气失效。

4) 排气管道的出口压力与引射比基本上成反比, 且出口压力增大到一定值时, 将导致高温气体无法排出, APU 排气总压迅速增大。

5) 可通过在排气管道入口设置平滑收敛段的方式消除管道入口处的涡流, 减轻负压程度, 且一定程度上提高引射比, 将降低对排气管道距离的安装要求。

6) 为保持 APU 正常工作以及保持较低的排放量, 比较适合排气管道设计为 $D/d=2.0$ 、 $L/d=1.5$, 并在管道入口设置平滑过渡段。

参考文献:

- [1] 王涛, 米毅. 大型客机气候实验室试验研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2017(4): 117-120.
WANG Tao, MI Yi. Research on Airliner Climatic Laboratory Test[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2017(4): 117-120.
- [2] CCAR 25—2011, 中国民用航空规章第 25 部运输类飞机适航标准[S].
CCAR 25—2011, China Civil Aviation Regulations Part 25 Airworthiness Standards for Transport Aircraft[S].
- [3] AC 500-006, Aircraft Operation After Ground Cold Soak[S].
- [4] 李家祥. 波音 737 飞机冬季运行故障概述[J]. 科技创新导报, 2020, 17(17): 18-19.
LI Jia-xiang. Overview of Boeing 737 Aircraft Running Failure in Winter[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2020, 17(17): 18-19.
- [5] 刘伟, 黄开明, 王旭, 等. 低温对涡轴发动机起动性能影响的试验与分析[J]. 航空动力学报, 2019, 34(6): 1282-1289.
LIU Wei, HUANG Kai-ming, WANG Xu, et al. Test and Analysis on Influences of Low Temperature on Starting Performance of Turboshaft Engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(6): 1282-1289.
- [6] 郭海红, 潘旭, 张志舒. 非标准大气条件下航空发动机地面起动性能[J]. 航空动力学报, 2013, 28(6): 1286-1290.
GUO Hai-hong, PAN Xu, ZHANG Zhi-shu. Aero-Engine Ground Starting Performance at Non-Standard Atmosphere[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(6): 1286-1290.
- [7] 王晗, 刘昊, 张强. 民用飞机辅助动力装置进气系统降扬雪适航验证要求研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2020(4): 12-15.
WANG Han, LIU Hao, ZHANG Qiang. Airworthiness Certification Requirements of Falling and Blowing Snow for APU Inlet System of Civil Airplanes[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2020(4): 12-15.
- [8] BOULDIN B, VUNNAM K, HERNANZ-MANRIQUE J A, et al. CFD Analysis and Full Scale Testing of a Complex Auxiliary Power Unit Intake System[J]. ASME J. 2011, 133: 465-476.
- [9] VICTORIO J R, BILLIE F. F-35 Climatic Chamber Testing & System Verification[C]//2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. [s. l.]: AIAA, 2018.
- [10] KLEB W, WOOD W, GNOFFO P. Computational Aeroheating Predictions for X-34[C]//36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Virginia: AIAA, 1998.
- [11] HAN Yu, WANG Xiao-dong, SUN Hao, et al. CFD Simulation on the Boundary Layer Separation in the Steam Ejector and Its Influence on the Pumping Performance[J]. Energy, 2019, 167: 469-483.
- [12] SRIVEERAKUL T, APHORNROTANA S,

- CHUNNANOND K. Performance Prediction of Steam Ejector Using Computational Fluid Dynamics: Part 2. Flow Structure of a Steam Ejector Influenced by Operating Pressures and Geometries[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2007, 46(8): 823-833.
- [13] YAN Jia, CAI Wen-jian, LI Yan-zhong. Geometry Parameters Effect for Air-Cooled Ejector Cooling Systems with R134a Refrigerant[J]. Renewable Energy, 2012, 46: 155-163.
- [14] ZHU Yin-hai, JIANG Pei-xue. Bypass Ejector with an Annular Cavity in the Nozzle Wall to Increase the Entrainment: Experimental and Numerical Validation[J]. Energy, 2014, 68: 174-181.
- [15] 姚峰, 董素君, 王浚. 高温燃气风洞加热特性仿真分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(6): 685-689.
- YAO Feng, DONG Su-jun, WANG Jun. Numerical Analysis of High-Temperature-Gas Wind Tunnel Thermal Characteristics[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(6): 685-689.
- [16] 董素君, 齐玢, 李志杰, 等. 低速高温燃气流热模拟试验方法和设备[J]. 航空动力学报, 2012, 27(5): 961-968.
- DONG Su-jun, QI Bin, LI Zhi-jie, et al. Approach and Facility for Aerodynamic Thermal Test by Lower Speed and High-Temperature Gas Flow[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(5): 961-968.
- [17] 赵飞, 张延玲, 朱荣, 等. 超音速射流流场中湍流模型[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(3): 366-372.
- ZHAO Fei, ZHANG Yan-ling, ZHU Rong, et al. Turbulence Model in Supersonic Jet Flow Field[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(3): 366-372.
- [18] 廖达雄. 气体引射器原理及设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018: 119-123.
- LIAO Da-xiong. Principle and Design of Gas Ejector[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2018: 119-123.
- [19] BESAGNI G, INZOLI F. Computational Fluid-Dynamics Modeling of Supersonic Ejectors: Screening of Turbulence Modeling Approaches[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 117: 122-144.

责任编辑: 刘世忠