

# 基于小孔喷注理论的复合式小孔消声器设计

李冬梅

(中国飞机强度研究所, 西安 710065)

**摘要:** **目的** 降低某型飞机 ECS 系统空气散热器性能试验台管路产生的高温高速排气噪声。**方法** 依据小孔喷注控制噪声理论, 设计由 4 层穿孔板吸声结构组成的复合式小孔消声器。**结果** 经试验测定, 噪声声压级降低了 35 dB(A)。**结论** 设计的消声器消除了由临界孔板产生的刺耳的高频阻塞噪声, 降低了噪声总声压级。降噪效果明显, 可为类似管路气流噪声的消声设计提供参考。

**关键词:** 声学; 降噪; 小孔喷注理论; 消声器

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2020.06.002

**中图分类号:** TB53 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2020)06-0007-04

## Design of Compound Small-hole Muffler Based on Small-hole Injection Theory

LI Dong-mei

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

**ABSTRACT:** The paper aims to reduce the high-temperature and high-speed exhaust noise generated by the air radiator performance test bench pipeline in the ECS system for a certain type of aircraft. According to the theory of small-hole injection control noise, a composite small-hole muffler composed of a 4-layer perforated sound absorption structure was designed. Through experimental measurement, the noise sound pressure was reduced by 35 dB(A). This design of muffler eliminates the high-frequency blocking noise generated by the critical orifice plate and reduces the total sound pressure level of the noise. It has significant effect of noise reduction and can provide a reference for reduction of airflow noise in similar pipelines.

**KEY WORDS:** acoustics; noise reduction; small-hole injection theory; muffler

消除噪声污染是环境保护的一项重要课题。强噪声会对人体造成伤害, 当噪声达到 120 dB 以上时, 人耳感觉疼痛。噪声声源性质和噪声传播途径的不同使得噪声控制方法多种多样, 消声器、吸声材料的应用各有优势。在研究中既可采用气动声学理论进行数值模拟, 也可采用实验验证。

某型飞机 ECS 系统空气散热器性能试验过程中, 管路射流排气噪声高达 130 dB(A), 远远超出国家标准要求。由于实验室条件限制, 噪声直接排在室内, 严重影响了实验室工作人员的工作和活动, 成为试验

中的安全隐患之一。为此需要采取合适的降噪方法对该强射流噪声进行处理。文中采用马大猷院士提出的小孔喷注控制噪声理论进行散热器试验台管路排气消声器设计, 达到降噪效果。

## 1 小孔喷注噪声控制理论

### 1.1 喷注噪声

气体以很高的速度流出管口或孔口, 冲击、卷吸周围环境气体, 形成剧烈扰动, 从而辐射出强烈的噪

收稿日期: 2019-12-04; 修订日期: 2019-12-11

Received: 2019-12-04; Revised: 2019-12-11

作者简介: 李冬梅 (1969—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为气候环境适应性。

Biography: LI Dong-mei (1969—), Female, Master, Senior Engineer, Research focus: climate and environmental adaptability.

声。这种噪声称为喷注射流噪声，属于四级子声源。最简单的自由喷射是由一个高压容器通过一个圆形喷嘴排放气流，如图1所示。

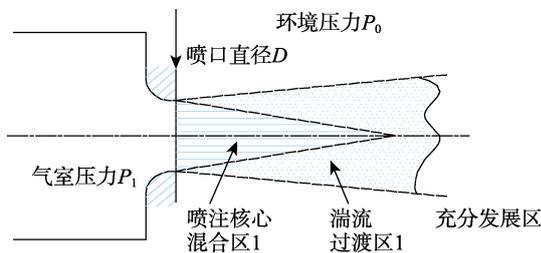


图1 典型喷注结构

Fig.1 Schematic diagram of typical injection structure

直径为  $D$  的圆喷口形成自由喷注的结构，喷口的喷注形式分为混合区、过渡区和充分发展区。混合区的中心部分是喷注的核心，核心长度（或说混合区）的延伸距离大约是喷口直径的 4~4.5 倍。过渡区大致扩展到 10 倍直径的地方。测量表明，沿喷注表面，在喷口附近声压较低，在 3~4 倍喷口直径的距离内迅速增加到最大值，以后又慢慢降低。喷注噪声大部分来自混合区和过渡区的湍流运动，该运动形成湍流噪声，是一种高频噪声，主要产生在喷口附近。

喷注湍流噪声功率的经验公式为：

$$\omega = k_p \frac{(p_1 - p_0)^4 D^2}{(p_1 - 0.5 p_0)^2 p_0^2} \quad (1)$$

式中： $k_p$ 为常数； $p_1$ 为气室驻点压力，Pa； $p_0$ 为环境压力，Pa。

喷注90°方向上，距离喷口1 m处的声压级为：

$$L_p = 80 + 20 \lg \frac{(p_1 - p_0)^2}{(p_1 - 0.5 p_0) p_0} + 20 \lg D \quad (2)$$

喷注湍流噪声的频谱具有宽频带噪声的特征，但对人起干扰作用的只是其中可听声频率范围内的一部分。如喷口直径在几厘米或几十厘米，噪声频谱都在可听声范围，全部噪声都对入起干扰作用。若把喷口直径减小到几毫米或更小，噪声频谱将移向很高的频率，超过了人耳可听范围，频谱的大部分对人耳不再起干扰作用。小孔喷注噪声控制理论就是将小孔喷注的主要能量转移到超声波频段内的物理概念。

## 1.2 小孔扩散消声器

小孔扩散消声器是中国科学院声学所马大猷院士提出的一项特殊的设计技术。它与传统多纤维性吸声材料制成的消声器有很大不同，是依据小孔喷注噪声控制理论，将一个大的喷流在不小于原排气量的前提下，改为一系列小喷流来替代，将可听声能量转移到频率更高、对人体影响较小的超声频段，超声在短时间内可快速衰减。即采用多个小孔将高频声移到人耳不敏感的超声范围，从而达到降噪的目的。

根据小孔喷注噪声与其压力和直径的关系和人

的听觉生理和心理特性，提出了在气流或者蒸汽出口的颈部处设计合适的小孔结构，可以大大减少气流噪声对人的干扰作用在可听声频段内的声辐射，降噪量一般可以达到20~60 dB(A)。小孔消声器多采用不锈钢制造，不但具有较好的降噪效果，同时具有构造简单、体积小、质量轻的特点，且不怕水，耐高温防火，清洁，无污染，可耐高温，耐腐蚀，能承受高速连续气流冲击。广泛应用于蒸汽和高压空气喷射等情况下的噪声控制问题，具有良好的工程应用价值。

## 2 降噪方案

### 2.1 噪声源分析

散热器热边气流来自飞机发动机压气机引气，流量为10 000 kg/h（满负荷），热边出口管径为100 mm，气流温度为220 °C，流速达到236 m/s。散热器冷边气流来自飞机发动机外涵道引气，流量为15 000 kg/h（满负荷），出口管径为150 mm，气流温度为350 °C，气流速度达到354 m/s，从而产生了刺耳的高频强射流噪声。经实测，试验过程满负荷供气时，距离排气口10 m处，噪声值高达130 dB(A)。

通过对散热器性能试验管路气流噪声的分析，并综合考虑了实验室人员的工作环境等指标后，决定在散热器冷、热边排气口各加装一台消声器进行降噪处理。

消声器的设计指标为降噪量 $\geq 35$  dB(A)，即：距离散热器冷边和热边排气口10 m处的噪声值在满负荷供气时降到95 dB(A)以下；在热边流量8000 kg/h和冷边流量12 000 kg/h时降到82 dB(A)以下。

### 2.2 消声器设计

由以上小孔喷注噪声理论得出，采用小孔扩散消声器可降低高温高速气流噪声，且清洁无污染。高速气流的多孔扩散过程就是气流经过多孔材料形成许多小喷注，然后再汇合成一个面积较大而速度较低的大喷注，达到噪声降低的效果。消声量计算为：

$$\Delta L = 10 \left[ \frac{2}{\pi} \left( \tan^{-1} X_A - \frac{X_A}{1 + X_A^2} \right) \right] \quad (3)$$

式中： $X_A = 0.165D$ 。在消声器设计时，需要把握好孔径、孔距、孔数三个参数匹配关系，尤其应注意以下四方面因素。

1) 从实用角度出发，孔直径不能选得太小。因为孔直径太小，不仅难加工，而且还容易堵塞，影响排气量，增加气流阻力；也不能太大，如果孔径过大，消声效果会很差。

2) 如果小孔间距较小，气流通过小孔后，还会相互混合成大的喷注而产生低频噪声，从而使消声效果变差。为此，设计小孔喷注消声器时，孔间中心距  $b$  应满足： $b \geq d + 6\sqrt{d}$ 。

3) 为了使排气通畅, 考虑到小孔的阻尼作用, 消声器的开孔流通面积需设计成排气口流通面积的多倍。

4) 小孔喷注板应具有足够的强度和刚度, 保证在间歇性排气气流的冲击力作用下不产生结构噪声。

综合考虑上述要求, 设计的小孔复合式消声器由 4 层多孔板结构组成, 消声段有效长度为 1150 mm, 所有材质均为 1.5 mm 厚不锈钢板, 层与层之间由支撑件连接, 如图 2 所示。从里往外 (1—4 层) 的设计参数分别见表 1。



图 2 复合式小孔消声器  
Fig.2 Compound small-hole muffler

表 1 复合式小孔消声器参数  
Tab.1 Parameters of compound small-hole muffler

	管路直径/ mm	消声段长度/ mm	穿孔孔径/ mm	穿孔率/ %
1	150	1025	1	12.2
2	300	1066	1.5	9.12
3	400	1107	2.5	5.5
4	550	1150	5	5.17

### 3 降噪效果

分别将消声器连接到散热器性能试验台冷边管路和热边管路出口。试验过程中, 逐渐加大供气流量, 直至最大负荷。当供气流量达到满负荷运转时, 距离排气口 10 m 测得的声压级为 95 dB(A)。试验室工作人员反映, 现场感受降噪效果明显。

安装消声器前后, 散热器试验台管路热边供气流量 8000 kg/h、冷边供气流量 12 000 kg/h 时, 在试验现场, 距离排气口 10 m 处测得的声压级见表 2。加消声器前后散热器出口的噪声频谱如图 3 所示。

表 2 加装消声器前后试验场噪声测量值比较  
Tab.2 Comparison of noise in test site before and after installing muffler

Freq/Hz	AF	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Leq1/dB(A)	116.9	56.7	71.8	85.7	96.3	105.9	110.7	111.2	113.7	105.3
Leq2/dB(A)	80.5	51.2	64.4	68.8	70.7	71.9	74.6	72.6	71.2	63.4

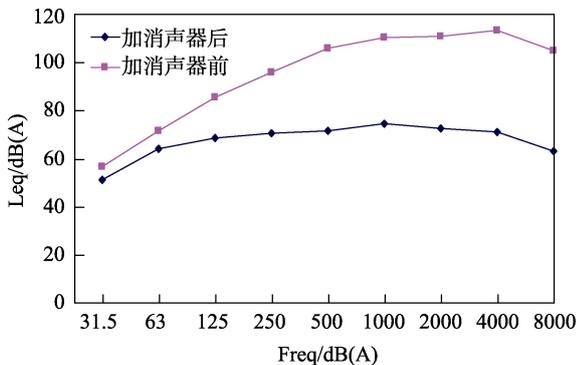


图 3 加消声器前后散热器出口的噪声频谱  
Fig.3 Noise spectrum at the radiator outlet before and after installing muffler

### 4 结论

文中针对某型飞机 ECS 系统空气散热器性能试验台管路排气噪声污染问题, 设计的 4 层穿孔板结构小孔复合式消声器, 可以有效地降低高速气流噪声, 且结构简单, 体积小, 质量轻, 耐高低温、湿热、腐蚀等极端恶劣环境。应用结果证明, 能够保证高速气流下长期有效作用, 适合试验室等对环境要求较高的工作环境, 具有优良性能和工程适用性。

#### 参考文献:

- [1] 汤冠琼, 林宇震, 秦皓, 等. 带阻塞喷射的大流量排气管降噪处理[J]. 噪声与振动控制, 2014, 34(5): 102-105.  
TANG Guan-qiong, LIN Yu-zhen, QIN Hao, et al. Noise Control for Large Flux Exhaust Pipe with Choked Jet[J]. Noise and Vibration Control, 2014, 34(5): 102-105.
- [2] 田静. 微穿孔板和微孔喷注—马大猷教授对声学的特殊贡献[J]. 噪声与振动控制, 2015, 40(2): 129-133.  
TIAN Jing. Microperforation and Microjet Noise—The Special Contributions of Prof. Da-You MA in Acoustics[J]. Noise and Vibration Control, 2015, 40(2): 129-133.
- [3] 马大猷. 噪声控制学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.  
MA Da-you. Noise Control[M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [4] 周新祥. 噪声控制及应用实例[M]. 北京: 海洋出版社, 1999.  
ZHOU Xin-xiang. Noise Control and Application Examples[M]. Beijing: Ocean Press, 1999.
- [5] 温华兵, 王国治. 特种发动机排气放空消声器设计及性能分析[J]. 江苏科技大学学报, 2006(4): 64-67.

- WEN Hua-bing, WANG Guo-zhi. Design and Characteristics Analysis of Jet Exhaust Muffler for Special Engine[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology, 2006(4): 64-67.
- [6] GB/T3222—1994, 环境噪声测量方法[S].  
GB/T3222—1994, Environmental Noise Measurement Method[S].
- [7] 牛国强, 牛国胜, 罗巧丽. 排气放空噪声在火电厂锅炉排气中治理及应用[J]. 噪声与振动控制, 2004(1): 47-48.  
NIU Guo-Qing, NIU Guo-Sheng, LUO Qiao-Li. Government and Application of the Discharge Noise in the Furnace Discharging of Thermal Power Plant[J]. Noise and Vibration Control, 2004(1): 47-48.
- [8] 赵坚行, 王锁芳, 刘勇. 热动力装置的排气污染与噪声[M]. 北京: 科学出版社, 2009.  
ZHAO Jian-xing, WANG Suo-fang, LIU Yong. Exhaust Pollution and Noise from Thermal Power Plant[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [9] 王昌, 张杰, 郭文亮. 小孔喷注复合式消声器综合性能仿真与优化[J]. 中国农机化学报, 2015, 37(5): 164-167.  
WANG Chang, ZHANG Jie, GUO Wen-liang. Simulation and Optimization on Acoustic Performance for Small Holes Injection Compound Muffler[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(5): 164-167.
- [10] 杨文强. 孔群喷注噪声特性实验研究[C]// 浙苏黑鲁津四省一市声学学术会议论文集. 济南: 中国声学学会, 2009.  
YANG Wen-qiang, LIU Gong-min. Experimental investigation of micropores noise[C]// Proceedings of the Acoustics Academic Conference. Jinan: Acoustical Society of China, 2009, 28(6): 135-138.
- [11] 陈枫. 小孔喷注节流减压复合消声器的设计及应用[J]. 中国环保产业, 2004(6): 32-36.  
CHEN Feng. Design and Application of Complex Muffler with Small-hole Jetting, Reduction of Expenditure and Pressure[J]. Environmental Protection Industry of China, 2004(6): 32-36.