

# 使用合金蜂窝体制造的宽频带消声器

刘培臣

(北京工业大学科技总公司, 100022)

**【摘要】** 在理论上用瑞利吸声模型证明了合金蜂窝体的吸声作用, 并根据多孔扩散消声、微孔吸声和扩张室消声等原理制造出合金蜂窝体宽频带消声器。

**【关键词】** 合金蜂窝体, 瑞利吸声模型, 消声器

**【中图分类号】** TB5; X5

在工业生产中, 广泛地使用空压机、鼓风机、高压离心风机、化学反应容器、蒸汽锅炉等设备, 它们在进、排气过程中产生强烈的噪声, 其噪声声级通常在 90 ~ 120 dB 的范围内, 严重污染环境。

目前市售消声器型号各异, 种类很多, 由于消声特性不同、结构不同, 不可通用互换, 不能维修, 不耐酸、碱、盐, 只是一次性使用, 且消声频带窄, 插入损失低, 体积大, 安装不方便。

我校在研制稀土-铁合金蜂窝催化剂时, 通过实验发现合金蜂窝体有吸声作用, 但对吸声机理并不清楚。本研究课题就是在上述实验基础上, 在理论上使用瑞利吸声模型证明了合金蜂窝体的吸声作用, 并根据多孔扩散消声、微孔吸声和扩张室消声等原理制造出了以金属做吸声材料的宽频带消声器。在实地使用中取得了较满意的消声效果。

## 1 噪声频谱特性

### 1.1 5L-40/8型空压机的噪声频谱特性

5L-40/8型空压机排放口为  $\phi 50$  无缝钢管, 放空时排气气流速度很高, 产生强大的噪声, 该噪声是因高速气流与周围低速气流发生涡流混合产生的。根据 Lighthill 气体动力学方程可知, 湍流喷射时噪声声功率  $P$  [1]:

$$P = \frac{\rho^2 \cdot v^8 \cdot D^2}{\rho_0 c_0^5} \cdot k_0 \quad (1)$$

式中  $\rho$  为喷注介质密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $v$  为喷注速度 ( $\text{m}/\text{s}$ );  $D$  为喷口直径 ( $\text{m}$ );  $\rho_0$  为环境介质密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $c_0$  为环境介质内声速 ( $\text{m}/\text{s}$ );  $k_0 = (0.3 \sim 1.8) \times 10^4$ 。由公式 (1) 可以看出: 在消声器设计中, 如果能使喷注速度  $v$  降低, 那么噪声声功率  $P$  将有较大的下降, 我们有效地利用了这一原理。

在北京炼焦化学厂对 5L-20/8 型空压机排放口、全放空时进行了实地测量, 测点设在

轴线 45° 角方向 1 m 处, 噪声频谱如表 1 所示.

由表 1 测量结果看出: 在 2 kHz 频带范围内有一峰值. 根据喷注湍流噪声的频谱及小孔扩散消声器的理论<sup>[2,3]</sup>, 湍流喷射噪声峰值频率  $f_p$ :

$$f_p = Sh \cdot \frac{v}{D} \quad (2)$$

式中  $Sh=0.2$  为斯特劳哈尔数;  $v$  为喷注速度 (mm/s);  $D$  为喷口直径 (mm). 若喷注速度  $v=340 \times 10^3$  mm/s, 喷口直径  $D=50$  mm, 那么  $f_p=1360$  Hz. 此计算值与测量值相一致.

由公式 (2) 可以看出: 在消声器设计中, 如果能使喷口直径  $D$  变小, 那么将会出现升频现象, 即湍流喷射噪声峰值频率将会提高. 仍取  $v=340 \times 10^3$  mm/s, 那么

$$D=3 \text{ mm 时 } f_p=23 \text{ kHz}$$

$$D=2 \text{ mm 时 } f_p=34 \text{ kHz}$$

$$D=1 \text{ mm 时 } f_p=68 \text{ kHz}$$

以上频率已超出可听声频率范围, 人耳是听不到的, 在设计中有效地利用上述理论来降低喷注噪声.

## 1.2 CTF-M No8 风机的噪声频谱特性

在北京绝缘材料厂风机房对 CTF-M No8 型高压离心风机进风口进行实地测量, 测点设在风机隔声罩外, 进风口轴线方向 1 m 处, 噪声频谱如表 2 所示.

由以上两组现场实测数据看出, 其噪声声压级高、频谱宽的特点.

表 1 5L-20/8 空压机排放口实测噪声频谱

$f/\text{Hz}$	31.5	63	125	250	500
$BL_p/\text{dB}$	62	64	68	80	91
$f/\text{kHz}$	1	2	4	8	16
$BL_p/\text{dB}$	102	121	110	103	90

\*  $L_A=112$  dB (A)

表 2 CTF-M No8 高压离心风机进风口噪声频谱

$f/\text{Hz}$	31.5	63	125	250	500
$BL_p/\text{dB}$	83	86	88	96	105
$f/\text{kHz}$	1	2	4	8	16
$BL_p/\text{dB}$	100	97	92	80	78

\*  $L_A=107$  dB (A)

## 2 合金蜂窝体宽频带消声器的研制

### 2.1 合金蜂窝体结构与吸声机理

合金蜂窝体结构: 合金蜂窝体是一种耐高温、耐腐蚀性的合金材料 (1Cr18Ni9Ti), 该材料被轧制成 0.08 mm 厚的薄带, 并在其上轧有小于 1 mm 的微孔. 上述材料在使用时, 其中一种压制成波浪形状薄带, 另一种是平条形状薄带, 并将波浪形带与平条形带叠置在一起卷绕成圆柱体, 圆柱体断面上有数千个  $\phi 1.5 \sim 2$  的小孔, 圆柱体中间则为  $\phi 1.5 \sim 2$  的数千个平行通道, 在平行通道壁面上穿有无数多个小于 1 mm 的微孔.

合金蜂窝体的吸声机理和吸声系数: 在研究多孔性吸声材料时, Rayl 曾给出了一种理想化的模型, 称为 Rayl 吸声结构模型, 它包含许多等间隔的相同的平行通道, 它由完全刚性的骨架材料隔开 (图 1). 假定位于  $X=0$  的该系统表面和通道轴垂直, 在正  $X$  方向, 假定模型是无界的, 且每个通道直径都很小, 以致气体的分布几乎完全决定于空气的粘滞性而和任何内力无关. 选用的合金蜂窝体结构与上述瑞利吸声结构模型是一致的.

根据流体力学和声传播理论，可以得到在圆通管道中的质点运动方程和连续性方程为：

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} + \Omega u$$

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t}$$

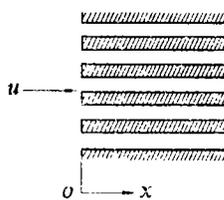


图1 瑞利吸声模型

将简谐波关系式：

$$p(x, t) = p_m e^{j(\omega t - kx)}$$

$$u(x, t) = u_m e^{j(\omega t - kx)}$$

代入上述质点运动方程和连续性方程中，并求齐次方程的解得到：

$$k p(x, t) - (\omega \rho_0 - j \Omega) u(x, t) = 0$$

$$\omega p(x, t) - \rho_0 c^2 k u(x, t) = 0$$

求出 
$$k = \frac{\omega}{c} \left( 1 - \frac{j \Omega}{\rho_0 \omega} \right)^{\frac{1}{2}}$$

根据声阻抗率定义有：

$$z_s = \frac{p(x, t)}{u(x, t)} = \rho_0 c \left( 1 - \frac{j \Omega}{\rho_0 \omega} \right)^{1/2}$$

当考虑多个圆通道和材料性质、结构等因素对声学特性影响时，声阻抗率  $z_s$  应为：

$$z_s = \rho_0 c \cdot \frac{\sqrt{Q}}{\sigma} \cdot \left( 1 - j \frac{\Omega}{\rho_0 \omega} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

式中： $\rho_0$ 为空气密度  $\text{kg/m}^3$ ，（通常取  $1.21 \text{kg/m}^3$ ）； $c$ 为声速  $(\text{m/s})$ ；（ $20^\circ\text{C}$  取  $344 \text{m/s}$ ）； $Q$

为材料结构因数（实验得出）； $\sigma$ 为含孔率（%）； $\Omega = \frac{8\eta}{\gamma^2}$  为单位长度圆通管道中的流阻；

$\eta$ 为空气粘滞系数（ $\eta = 1.8 \times 10^{-3}$ ）， $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$ ； $\gamma$ 为圆通管道半径（本试件  $\gamma = 0.8 \sim 1$ ）， $\text{mm}$ ；

$\omega$ 为简谐波圆频率  $(1/\text{s})$ ； $z_s$ 为声阻抗率  $(\text{Rayl})$ 。通过实验，得到了  $\sigma$  与  $Q$  的关系，如表3所示。对合金蜂窝体取： $\sigma = 0.6$ ， $Q = 4.5$ 。

公式(3)就是推导和实验得出的合金蜂窝体的声阻抗率。根据材料吸声系数  $\alpha^{[4]}$  的定义，即可得出合金蜂窝体吸声系数  $\alpha$  的表达式：

$$\alpha = 1 - \left| \frac{z_s - \rho_0 c}{z_s + \rho_0 c} \right|^2 \tag{4}$$

表3 含孔率  $\sigma$  与材料结构因数  $Q$  间的关系

$\sigma/\%$	0.4	0.6	0.8	1
$Q$	15	4.5	2	1

## 2.2 合金蜂窝体吸声系数的测量与计算

使用驻波管法测量合金蜂窝体吸声系数，得到测量结果的吸声系数  $\alpha_1$ ，见表4。

使用驻波管，通过对驻波比的测量，并找出靠近负载处第一个声压极小值位置，根据阻抗图<sup>[5]</sup>得到声阻抗率  $z_s$ ，然后利用公式(4)来计算合金蜂窝体的吸声系数  $\alpha_2$ ，见表4。

本次测量试件为圆柱体（结构参看2.1节），直径  $D = 100 \text{mm}$ ，带宽  $L = 50 \text{mm}$ ，重量  $G$

=248.1 g, 室内温度  $t=24\text{ }^\circ\text{C}$  .

由结果看出吸声系数  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  是相近的.  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  的不同点是,  $\alpha_1$  是直接测结果;  $\alpha_2$  是在测量基础上又进行了计算和查图, 此过程是会有误差的.

表4 合金蜂窝体吸声系数  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$

$f/\text{Hz}$	125	250	500	1000	2000	4000
$\alpha_1$	0.07	0.10	0.14	0.24	0.44	0.61
$\alpha_2$	0.09	0.14	0.18	0.32	0.43	0.60

### 2.3 结论

通过上述讨论可以看出合金蜂窝体结构不仅有吸声作用, 而且还能同时满足公式(1)(增容降速)和公式(2)(小孔扩散)的要求. 所以用它制作消声器是可行的.

为了增加消声频带宽度, 本设计还使用了扩张室消声器原理<sup>[6]</sup>和微孔板吸声结构理论和设计<sup>[7]</sup>.

## 3 消声器的设计要求和结构

### 3.1 设计要求

具有良好的消声性能,  $A$  声级插入损失  $\Delta L=25 \sim 30\text{ dB}$ ; 宽的消声频带范围  $\Delta f=63 \sim 16\text{ kHz}$ .

具有良好的空气动力性能, 要求消声器的阻力损失  $\Delta p=200 \sim 800\text{ Pa}$ .

结构简单, 采用积木式组装方式, 制作安装方便, 体积比同类产品要小, 经济耐用, 耐酸、碱、盐及腐蚀性气体.

具有通用性、互换性, 便于维修、维修清理后继续使用.

### 3.2 结构特点

根据上述要求, 我们采用了双圆筒结构, 合金蜂窝体分段组装、多级扩张和微穿孔板吸声结构(见图2).

## 4 消声器的声学性能测试

北京炼焦化学厂 5L-40/8 型空压机排放口安装该产品后的测试结果如图3, 表5所示, 测点距消声器排放口 1m, 轴线  $45^\circ$  角方向, 全放空.

北京绝缘材料厂 CTF-M No8 高压离心风机进风口安装该产品后的测试结果如图4所示, 测点距消声器进风口轴向 1m.

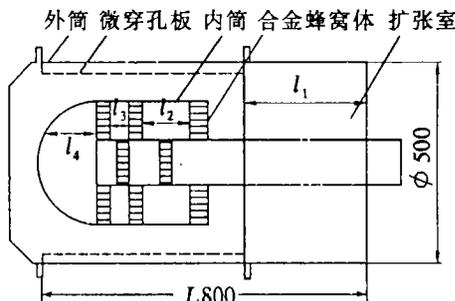


图2 合金蜂窝体消声结构

## 5 结论

采用合金蜂窝体宽频带消声器后, 对空压机排气放空和高压离心风机进气噪声均有明显的降噪效果, 避免了压力突变时产生的噪声和哨叫声, 达到设计要求.

采用合金蜂窝体做消声器中的吸声材料, 兼有小孔喷注扩散消声特性、扩张室消声特

表5 排气压力  $p$  与 A 声级关系的测试结果

$p/\text{MPa}$	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
$L_{A1}/\text{dB}$	82	88	98	104	108	110	113
$L_{A2}/\text{dB}$	56	60	71	77	78	80	82

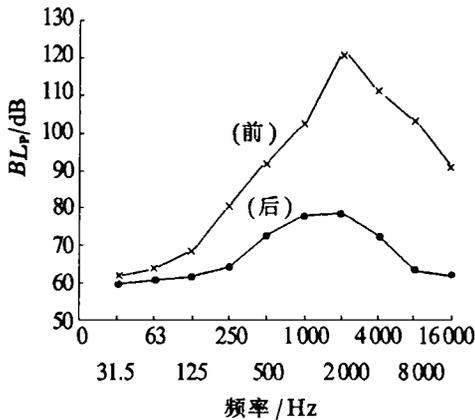


图3 降噪频谱特性

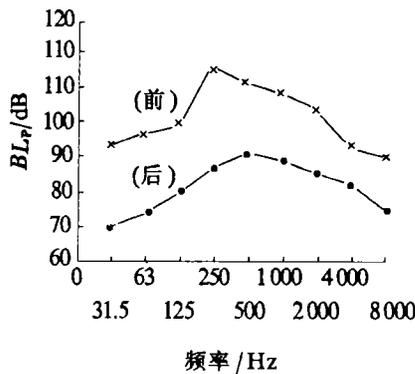


图4 降噪频谱特性

性和微穿孔板吸声结构的消声特性。可根据噪声源的不同频率特性改变  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 、 $l_4$  和合金蜂窝体的数量。

该消声器结构简单，采用积木式装配法。当合金蜂窝体表面积有油污、粉尘后，可将消声器拆开清洗，拆装方便，可重复使用。

该消声器具有通用性，体积比同类产品要小，具有耐腐蚀、耐高压、耐高温等特点，整体安装方便。

合金蜂窝体宽频带消声器于1988年10月8日通过北京市环保局、北京市教育局组织的专家审定小组的鉴定，同意上述结论意见，并认为该消声器属国内首创，建议降低成本，继续扩大推广使用。

该消声器现已推广使用，在一些厂家使用了8年，性能可靠、稳定。

### 参 考 文 献

- 1 Lighehill M T. On sound generated aerodynamically, I general theory. Proc Roy Soc. 1952, A211: 567 ~ 587
- 2 马大猷, 李沛滋. 小孔喷注和小孔消声器. 中国科学, 1977(5): 445 ~ 455
- 3 马大猷, 李沛滋. 排气噪声的有动降低. 环境科学学报, 1981, 1(1): 2 ~ 11
- 4 马大猷, 沈敏. 声学手册. 北京: 科学出版社, 1983. 462 ~ 471
- 5 杜功焕, 朱哲民. 声学基础(下册). 上海: 上海科学技术出版社, 1982. 2 ~ 8
- 6 方丹群. 空气动力性噪声与消声器. 北京: 北京科学技术出版社, 1978. 140 ~ 155
- 7 马大猷. 微穿孔板吸声结构理论和设计. 中国科学, 1975(1): 44 ~ 48

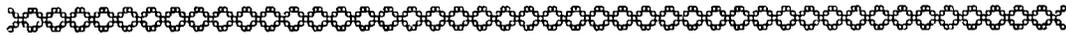
# The Broadband Muffler Made From the Alloy Honeycomb Monolith

Liu Peichen

( General Corporation of Science and Technology, Beijing Polytechnic University, 100022 )

**【Abstract】** The Rayleigh Model is used to prove that the alloy honeycomb monolith has sound absorption performance. Based on the principles that porous material diffuses and silences noise, that micro pore construction absorbs sound, and that expansion chambers silence noise, the broadband muffler is made from the alloy honeycomb monolith.

**【Key words】** alloy honeycomb monolith, rayleigh model, muffler



## 博士生导师简介

**沈光地** 博士，电子工程学系教授，博士生导师，国家集成光电子重点联合实验室研究员，校固态电子学研究所所长。沈教授多年来一直从事光电子和微电子技术方面的研究。1985年以前，沈教授在半导体激光器和电荷耦合器件的研究上处于当时国内领先地位，并获多项重要研究成果，发表论文论著 30 余篇本。1985 至 1992 年他在瑞典林雪平大学做合作研究，负责硅锗—硅异质结器件与光电子微电子应用课题。从研制出世界上第一批硅锗—硅异质结双极晶体管共振隧道器件，到提出新型异质结光电子器件等，取得一系列国际领先水平的成果。在硅锗—硅异质结器件红外探测器和半导体激光器等方面，提出了一些新物理思想，新器件结构高性能器件对器件的发展和更新有重要意义。1986 以来，沈教授在国际一流学术刊物和重要国际学术会议上发表论文 40 多篇，其研究工作处于世界先进水平。

目前沈教授正继续从事半导体光电子和高速电子技术的研究，并指导着 5 名博士、硕士生。沈教授正在研究的国家级重点科研项目有 4 项，包括“863”项目、国家自然科学基金项目、北京市重点学科课题等。