

# 微穿孔板消声器的特性和它在环境噪声控制中的应用

冯 瑀 正

(中国科学院声学研究所)

## 一、消声器的概况

消声器是治理环境噪声污染的主要手段之一。降低机组噪声,在声学处理方法中,消声器与隔声罩是两个最主要的手段。国内已有长沙噪声控制设备厂及长沙和天津消声器厂等专门生产定型与非标准消声器。

现在国内外所采用的消声器有以下几种类型

### 1. 阻性消声器

在消声器内部沿管壁面上贴加一层衬里吸声材料,一般采用多孔材料(玻璃棉或矿渣棉等),在表面上加一层穿孔护面板。利用声波在管中传播时,多孔材料吸收声能。消声量的大小,主要与铺设材料的吸声系数、通道截面的周长和面积的比以及通道有效长度有关。

### 2. 抗性消声器

利用管道中声阻抗的突然变化,引起声波反射而降低噪声。实际上是在抗性消声器内部声压与振速的相互变化而吸收了声能。形式上多种多样。

### 3. 阻抗复合式

多是上两种的简单串联,也有的在膨胀室式的抗性消声器的侧壁上加一层多孔吸声材料,因而具有阻抗复合的性质。

### 4. 干涉消声器

利用分支管与主通道间声程差为  $1/2$  波长,利用声波的干涉而消除噪声。这种方法

限于纯音或窄带白噪声。

### 5. 小孔喷注、纱网、多孔陶瓷消声器

近年来发展的新型消声器,主要用以消除高压排气放空的噪声,适用于阻塞情况。

以上所列的各类消声器,各有不同的应用范围与局限性,主要问题是:

1. 对比较高速的气流,都有较大的阻力损失,而且消声量有较多的下降。

2. 作为消除中、高频噪声的最主要的消声器—阻性消声器,由于内部充填多孔吸声材料,因而有怕水怕火不耐高温和容易出尘(纤维)等缺点。

3. 抗性消声器中的膨胀室,虽无(2)的缺点但体积较大、高频性能差。

因此,国内外噪声控制工作者一直在探求一种宽频带、体积小、高效率的消声器,并且能应用于各种环境。微穿孔板消声器的研制成功基本上满足了这些要求。

## 二、微穿孔板消声器的原理

穿孔板吸声结构已广泛应用,并有系统的理论。为得到高的吸声系数与宽的频带要求,消声器具有低的声质量与高的声阻,这对于一般的穿孔板难于满足。声学家马大猷教授总结以往穿孔板吸声结构的理论和实践的经验,提出了新的概念,并且从理论上证明了作为穿孔板吸声结构主要的指标吸声系数和频带宽度主要由穿孔结构的声质量与声阻决定,而这两个因素可以由穿孔率和孔径这两

个因素所确定。这样就为从穿孔板解决低声质量和高声阻指出了方向。这一新概念的提出导致微穿孔板吸声结构的出现。马大猷教授经过一系列的计算与理论研究提出了新的微穿孔板吸声结构的理论，并且给出了实用的设计图表，便于工程设计人员使用，理论值与实测值很接近，与一般吸声结构的理论相比较要严格完整得多。

这里简单介绍一下理论的结果作为设计微穿孔板消声器的理论基础。设微穿孔板吸声结构的主要参量：板厚  $t$  (毫米)，孔径  $d$  (毫米)，穿孔率  $p$ ，孔中心距  $b$  (毫米)，微穿孔板与后壁的距离  $D$  (毫米)。声波波长为  $\lambda$ 。设  $b \gg d$ ,  $\lambda \gg d$ 。微穿孔板的孔径在 0.1—1.0 毫米之间。在计算中加入了小孔的端点校准。

设微穿孔板吸声结构的相对声阻抗 (以空气的特性阻抗  $\rho c$  为单位  $\rho$  为空气的密度， $c$  为空气中的声速)。

$$z = r + j\omega m - jctg \frac{\omega D}{c}$$

其中  $m$  为相对声质量， $r$  为相对声阻， $\omega = 2\pi f$  ( $f$  为板振动频率)。理论给出

$$r = \frac{ak_r}{d^2 p}, \quad m = (0.294) \times 10^{-3} \frac{tk_m}{p}$$

其中声阻系数  $k_r = \sqrt{1 + \frac{x^2}{32}} + \frac{\sqrt{2} x}{8} \frac{d}{t}$ ，

声质量系数  $k_m = 1 + \frac{1}{\sqrt{9 + \frac{x^2}{2}}} + 0.85 \frac{d}{t}$ ，

这里  $x = hd\sqrt{f}$ ， $a$  和  $h$  是常数，对于绝热的板  $a = 0.147$ ， $h = 0.32$ ，而对于传导热能好的板  $a = 0.235$ ， $h = 0.21$ 。声吸收的角频带宽度近似地由  $\frac{r}{m}$  值确定，此值越大吸收的频带越宽。

$$\frac{r}{m} = \frac{l}{d^2} \frac{k_r}{k_m}$$

$l$  是一个常数，对绝热板  $l = 500$ ，金属板  $l = 1140$ ，上式也可表示为

$$\frac{r}{m} = 50f \frac{k_r/k_m}{x^2}$$

而  $k_r/k_m$  的近似表达式为

$$k_r/k_m = 0.5 + 0.1x + 0.005x^2$$

根据要求的  $r, m, f$ ，利用上述各公式，可求出微穿孔板结构的  $x, d, t, p$  各参量。

下面再讨论微穿孔板的吸声系数  $\alpha$  与吸收的带宽。从理论上得到

$$\alpha = \frac{4r}{(1+r)^2 + (2\pi gy - ctg 2\pi y)^2}$$

其中  $y = \frac{fD}{c}$ ， $g = \frac{mc}{D}$ 。共振时有

$$2\pi f_0 m - ctg \frac{2\pi f_0 D}{c} = 0$$

最大吸声系数 (共振频率  $f_0$  时)  $\alpha_0 = \frac{4r}{(1+r)^2}$ ，

吸收为  $\frac{\alpha_0}{2}$  的频带宽度  $\Delta f = f_2 - f_1$  由下式确定

$$2\pi f_1 m - ctg \frac{2\pi f_1 D}{c} = -(1+r)$$

$$2\pi f_2 m - ctg \frac{2\pi f_2 D}{c} = (1+r)$$

由实际给出的要求的最大吸收  $\alpha_0$  和频带  $f_2, f_1$  可计算出  $r, m, D$  值。再由此定出微穿孔板的结构参量。这些计算比较复杂，可利用理论给出的一系列曲线来求得。详见参考文献[1]。

当声波斜入射时 (入射角  $\theta$ ) 声阻减小为  $r \cos \theta$ ，吸收的频带  $f_2, f_1$  各增加  $\frac{1}{\cos \theta}$  倍 (向高频移)，但  $f_2/f_1$  的数值不变。在无规入射情况，吸收的峰谷平均，吸收的最大值减小。

为了加宽吸收的频带要求孔径尽可能小，但过小的孔径加工不方便而且易堵塞。为了解决这个问题，采用较大的孔径 (0.5—1.0 毫米)，并将二种微穿孔板并联或串联使用。并联可以加宽吸收的频带，但平均的吸声系数减小，用的不多。串联是采用两层微穿孔板，穿孔率与空腔可以相同，也可以不同。使

用串联结构吸声系数高而且吸收的频带宽。从理论上知道, 双层结构声阻在低频和后腔共振时增加, 并且共振频率比单层要低  $\frac{D_1}{D_1 + D_2}$  倍 ( $D_1$ 、 $D_2$  代表前腔与后腔的深度), 因而可使吸收的频率向低频扩展 3—5 倍, 达到宽频带和高吸收。

微穿孔板消声器中最简单的是管式消声器, 在低频声波波长大于共振器尺寸时, 可以应用共振消声器的消声公式, 消声量(传输损失)

$$\Delta L = 10 \log_{10} \left[ 1 + \frac{\gamma + 0.25}{\gamma^2 + \beta^2 \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)^2} \right]$$

式中  $\gamma = rS$ ,  $\beta = \frac{Sc}{2\pi f_0 V}$ ,  $S$  为通道的截面积,  $V$  是板后空腔的体积,  $c$  是空气中的声速, 共振频率  $f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{p}{tD}} \left( t' = t + 0.8d + \frac{1}{3}pD \right)$ 。在中频可应用阻性消声器的消声量计算公式

$$\Delta L = \varphi(\alpha) \frac{P_1}{S} L_1$$

$P_1$  代表管道内横断面的周长,  $L_1$  是管道的长度,  $\varphi(\alpha)$  是与吸声系数  $\alpha$  有关的量。

应该指出, 微穿孔板消声器的理论还不很清楚, 高频的消声性能比估计的要好。温度升高, 性能变化不大。

### 三、微穿孔板消声器的特性

消声量与气流速度有关, 而不同类型的消声器其随气流速度变化的特性亦不同。

从微穿孔板消声器与同尺寸的玻璃棉消声器在 20—120 米/秒气流速度下消声特性的对比实验<sup>[6]</sup>, 找出了实验规律。实验用的通道内径 200 毫米, 双层微穿孔板  $p_1 = p_2 = 2.7\%$ , 板厚  $t = 0.5$  毫米, 直径  $d = 0.5$  毫米, 前腔  $D_1 = 100$  毫米、 $D_2 = 40$  毫米, 玻璃棉厚度为 140 毫米、密度为 30 公斤/米<sup>3</sup>, 护面

板厚度 1 毫米、孔径 8 毫米、穿孔率 20%, 消声器长度均为 2 米, 传声器距出风口垂直气流方向为 5 厘米。得到消声量  $\Delta L$  与气流速度  $V$  的关系的经验公式为(中高频范围):

微穿孔板消声器(简称微式)

$$\Delta L = 75 - 34 \log_{10} V \quad 120 \geq V \geq 20 (\text{米/秒})$$

玻璃棉消声器(简称棉式)

$$\Delta L = 102 - 54 \log_{10} V \quad 120 \geq V \geq 20 (\text{米/秒})$$

在 20 米/秒流速时两种消声器消声量近似为 30 分贝。流速加倍, 微式消声量减少 10 分贝, 而棉式减少 16 分贝。高气流速度(60 米/秒)以上棉式产生附加噪声已不能用作消声器, 但微式几乎不产生附加噪声, 因此更宜用于较高速气流消声, 在 70 米/秒仍有 10 分贝的平均消声量。两种消声器的消声量列于表 1。

表 1 不同流速下两种消声器消声量对比

气流速度 (m/s)	A 声级降低 (dB)		6.3—4K Hz 平均(dB)	
	微式	棉式	微式	棉式
15	27	27	20—30	20—30
60	20	12	10—20	0—10
85	14	7	5—10	-7—6
100	12	2	4—10	-9—2
120	5	-8	0—7	-9—1

消声器另一个重要特性是阻损。通风空调系统一般风机的风压都较小, 因此要求消声器的阻损要小。普通玻璃棉加护面板的阻性消声器(片式片距 100—200 毫米)在风速为 5 米/秒时, 消声器每米长的阻损约在 2—3 毫米水柱。声流式的阻性消声器的阻损达 6—8 毫米水柱。同样的微穿孔板消声器片式只有 0.01 毫米水柱而声流式也只有 0.3 毫米水柱, 阻损基本上可以忽略。对高速通风, 风速达到 15 米/秒时, 微穿孔板消声器片式阻损也只有 1 毫米水柱, 微穿孔板声流式消声器也只有 5 毫米水柱, 因此适用于高速通风系统, 风速的提高就可以将大型风道改为

小管道,这是通风空调的发展方向。

#### 四、微穿孔板消声器的设计

从微穿孔板吸声结构的理论和消声器的消声原理,以及它的特性,根据现有已报导的微穿孔板消声器的分析和一些实验结果,可以总结出微穿孔板消声器的设计原则与方法,以供参考。微穿孔板的厚度在0.5—1.0毫米,材料不限,视要求而定。孔径在0.5—1.0毫米范围,穿孔率在1—3%比较好。一般多采用双层微穿孔板,以达到宽频带与高声吸收。吸声频率为低频125—250赫,多层的总空腔为15—20厘米,中频500—1000赫时为8—10厘米,高频2000—4000赫时为3—5厘米,前后空腔的比不大于1:3。前面接近气流的一层穿孔率有时略高于后层。为了防止在微穿孔板空腔内发生沿管长方向的声波传播,对高消声量的消声器每半米可加横向档板。要求阻力小时可采取直通形式;可允许有些阻力时可采取声流或多室式。如果管中气流速度过高(50—100米/秒),可先加变速接头减速。对于过低的流速(5米/秒以下)可在消声器内提高一些速度以减小消声器尺寸(这只有在微穿孔板消声器才有可能)。

已经研制成功并在实际上使用的微穿孔板消声器有如下几种类型。

##### 1. 通风空调消声器

这种情况的气流速度较低,一般只有5米/秒。这里要求阻损小。小风量可使用管式,大风量可用片式或声流式,当要求高风速时可达30米/秒。主要利用低阻损的特点。

##### 2. 柴油机消声器

主要利用微穿孔板消声器耐高温和不怕油污等特点,消声器可作成可装卸形式定期清洗油污与积碳,孔径1毫米比较合适。为了提高低频消声可作成复合式,已用的有三种形式(1)与多孔材料组合(60马力),(2)与共

振式组合消除某些低频共振(300马力),(3)与膨胀室式组合(3000马力)。

##### 3. 高温、高速水蒸气的消声器

用管式微穿孔板消声器加有排出端的导向斜板以加强声扩散,在出口端有排水孔以排除积水。

##### 4. 消烟除尘导风器的消声器

以微穿孔板与多孔吸声材料复合的形式,有火焰与水蒸气的部分用微穿孔板制成。

##### 5. 燃气轮机与喷气发动机试车台消声器

利用耐高温与阻力小的优点,多采用片式并加膨胀腔的复合形式。也可以作为喷雾消声后级的消声器。长沙噪声控制设备厂已生产有1000瓦燃气轮机消声器。

##### 6. 高压排气放空消声器

前级为多级减压,后级为片式微穿孔板消声器的组合形式

##### 7. 矿井局扇消声器

管式微穿孔板消声器有的进气作成喇叭口形式以减少阻力,利用它的防水防潮优点。

这里只列出大致类型,详细可参看有关文献与资料。

微穿孔板的加工问题,少量使用可用钻头打孔或用小冲头冲孔,可几层同时加工。大量使用时可用模具制成多排的冲头或滚挤压模。上海红旗机筛厂与长沙噪声控制设备厂有产品出售。加工时微穿孔板后面引起的突起,实践证明不影响使用效果。

#### 五、几个实例

1. 抚顺石油二厂催化、裂化车间加催化剂的加料排气消声器,排出为高温高压水蒸气,声源距地面30米,在地上附近噪声达98分贝(A)。用管内径156毫米,使用2米长的微穿孔板消声器加有导向斜板与排水孔,实测消声效果20分贝(A),最大噪声频带2千赫下降30分贝。消声器工作时见有大量积水从排水孔流出。

2. 2000瓦燃气轮机排气消声器,用片式

微穿孔板消声器,片距 28 厘米,消声器长 3 米。 $A$  声级减少 13 分贝,最大消声频带 4 千赫为 20 分贝。

3. 风洞风机消声器,风机风量  $10^4$  米<sup>3</sup>/小时,管径 120 毫米用 2 米长微穿孔板消声器在风速为 20 米/秒及 50 米/秒分别减少  $A$  声

级 25 及 22 分贝,最大消声频带在 500—2000 赫分别减少 30 及 20 分贝。

表 2 中给出了几种微穿孔板消声器常用的规格,其中  $t$  代表板厚,  $d$  孔径,  $p_1$  和  $p_2$  为前、后层微穿孔板的穿孔率,  $D_1$  和  $D_2$  为前、后腔厚度。

表 2 微穿孔板消声器中经常采用的几种结构

规格 (mm)					吸声系数 ( $\alpha_0$ )*				
$t$	$d$	$P_1, P_2$	$D_1$	$D_2$	(125)	(250)	(500)	(1000)	(2000)**
0.5	1.0	2.4%	107	37	0.21	0.65	0.71	0.93	0.98
0.5	0.5	2.7%	100	40	0.55	0.81	0.86	0.82	0.75
0.8	0.8	2%, 1%	80	120	0.48	0.97	0.93	0.64	0.15
0.8	0.8	2.5%, 1%	50	50	0.18	0.69	0.97	0.99	0.24

\* 驻波管, \*\* 频率 ( $H_z$ )

下面列举可以采用的各种微穿孔板消声器与微穿孔板复合式消声器的图例。图 1—8 是各种结构示意图。这些消声器满足多用途与宽频带的要求,可根据实际情况选用。

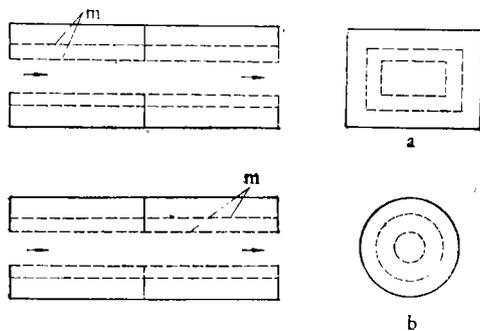


图 1 微穿孔板消声器。  
a 狭矩式, b 管式

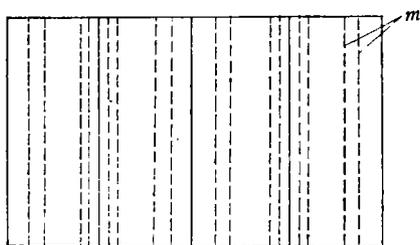


图 2 微穿孔板消声器,片式

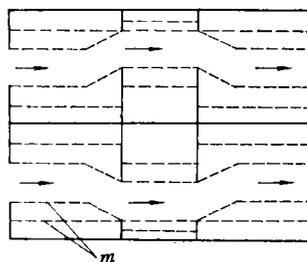


图 3 微穿孔板消声器,折板式

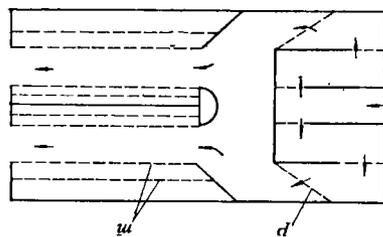


图 4 减压与微穿孔板复合消声器

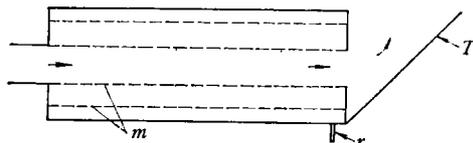


图 5 具有导流与排水的微穿孔板消声器

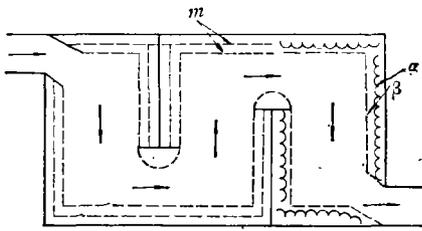


图6 微穿孔板与阻性的复合消声器

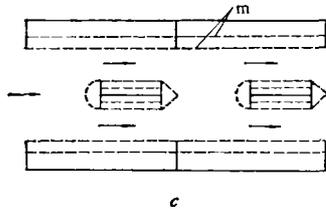
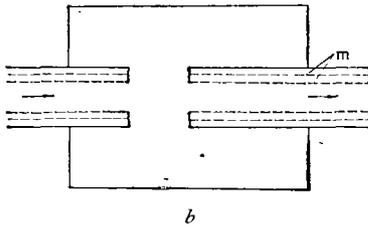
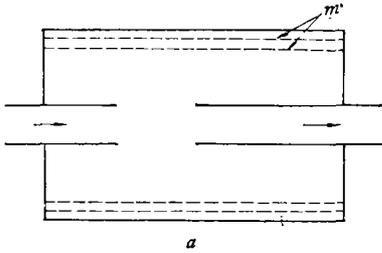


图7 微穿孔板与膨胀式的复合消声器

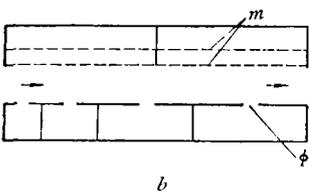
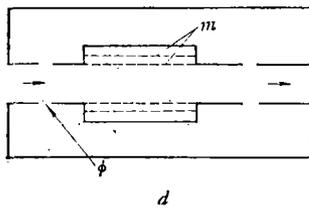


图8 微穿孔板与共振式的复合消声器

图中： $m$ 代表微穿孔板， $P$ 减压器的排气孔， $T$ 导流板， $r$ 排水管， $\alpha$ 多孔吸声材料， $\beta$ 穿孔率大于20%的护面板， $\phi$ 共振器的孔。

在马大猷教授亲自指导下的微穿孔板消声器的研究工作,从1967年试制成第一个微穿孔板消声器后,到1973年经过系统的研究工作,找出了在高速气流下消声器的消声规律与阻损关系,建立了微穿孔板消声器的系列,并在实际应用上取得了明显效果。

本文得到马大猷教授的指导,并与方丹群、孙家其二同志进行过有益的讨论,在此一并致谢。

### 参 考 资 料

- [1] 马大猷, 中国科学, 1, 38 (1975).
- [2] 马大猷等, 中国科学, 5, 445 (1977).
- [3] 马大猷等, 物理学报, 6, 631 (1978).
- [4] Beranek, L. L., Noise and Vibration Control, McGraw-Hill, p. 362, 1971.
- [5] Webb, J. D., Noise Control in Industry, Wiley & Sons, p. 197, 1978.
- [6] Woods, R. I., Noise Control in Mechanical Services, Wiley & Sons, p. 185, 1976.
- [7] 冯瑀正等, 环境科学, 4, 49 (1978).
- [8] 方丹群等, 物理, 4, 200 (1975).
- [9] 冯瑀正, 环境污染与防治, 1, 32 (1979).
- [10] 方丹群, 空气动力噪声与消声器, 科学出版社, 208页, 1978.

### 《气象》月刊征订启事

《气象》是综合性中级气象科技刊物。其内容包括大气探测,天气预报,气候,雷达气象,卫星气象,农业气象,人工影响天气以及气象仪器装备等各个专业。本刊将努力为实现气象科技现代化服务,其主要任务是报导气象科学实验的新成果,交流气象技术和经验,传播气象科技知识,介绍国外的先进气象科学技术,开展群众性的学术讨论。此外,本刊还以一定篇幅深入浅出地介绍各地的天气、气候特点,对一些罕见的天气、气候现象进行报道和分析解释。

读者对象主要为气象台站的气象科技工作者,气象科研人员和气象院校师生;也可供农业、林业、盐业、渔业、交通、民航、海洋、环境保护、水利水文、地理等科研部门、业务单位和院校师生阅读参考。

本刊每月一期,16开本,每期40页,定价每本0.18元。由《气象》月刊编辑委员会编辑,农业出版社出版,北京市邮局公开发行。