

# 关于微穿孔板吸声体频带宽度极限的讨论

焦风雷 刘克 丁辉

(中科院声学研究所 北京 100080) (北京劳动保护科学研究所 北京 100054)

2000年3月20日收到

2001年5月21日定稿

**摘要** 依据马大猷教授的微穿孔板吸声体准确理论,利用计算机辅助设计对于该结构频带宽度极限情况从理论上进行了讨论,把极限频宽和最大吸声系数的制约关系量化,并得到此情况下应用于低频或高频环境孔径的选用范围,以及此情况下板厚和穿孔率与传统观念不同的特点。以上分析结果以及所提供的结构参数为宽频带微穿孔板的具体设计提供有价值的参考。

**关键词** 微穿孔板吸声体, 极限频带宽度

## Discussions on the utmost frequency band of a microperforated-panel absorber

Jiao Fenglei Liu Ke

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Ding Hui

(Beijing municipal institute of labour protection, Beijing 100054)

**Abstract** Based on Prof. Maa Dah-You's general theory of the microperforated panel (MPP) absorber, the discussions on the utmost frequency band of MPP are made in this paper, including the relation between the utmost frequency band and the maximal absorpti on coefficient. Selectable diameters of perforations of MPP applicable to intermediate or lower frequency are offered. We propose that the choosing of panel thickness and percentage of perforated area of MPP can be quite different from that in the traditional design.

**Key words** Microperforated-panel absorber, Utmost frequency band

### 1 引言

近几年来,无纤维材料的发展越来越受到人们的广泛重视。微穿孔板吸声体有着不受材料限制、清洁、无污染并且可以透明采光的特点,无疑是一种很好的吸声结构。这种结构可

以广泛应用于条件要求苛刻有高速气流和高声强的管道系统中,应用于需要高度清洁的血液病房,或者应用于需要一种透明的吸声材料、半公开性的办公室等场合。但对于这种结构,人们总是对它的吸声频带宽度感到不足,常用的微穿孔板吸声带宽只有1-2个倍频程。正是

这一弱点限制了它的使用。值得欣喜的是,近两年马大猷教授又提出了微穿孔板吸声体的准确理论<sup>[1]</sup>。这一理论揭示出如果孔径进一步减小,频带宽度可以进一步,增加达到3-4个倍频程,在迫切需要无纤维吸声材料的今天,使人们看到微穿孔板的优势。不过,该理论也表明,孔径减小到一定程度就达到频带宽度的极限值。近几年来,加工制造能力提高很快,不仅激光可以形成微孔,而且粉末冶金,烧结丝网,电刻腐蚀等也能形成微米级的孔,可能达到微穿孔板频带宽度的极限情况。对于微穿孔板的频带宽度极限情况进行讨论,促进该结构在声学工程中应用,正是本文的目的。

## 2 微穿孔板吸声体的准确理论<sup>[1]</sup>

一块均匀穿孔直径小于1mm的板与其背后的空腔一同构成了微穿孔板吸声体。微穿孔板的结构参数定义为, $d$ 是穿孔直径, $t$ 是板厚, $b$ 是孔间距,单位都是mm, $D$ 是板后空腔厚度,单位是m。 $p$ 是穿孔面积占全板总面积的百分数(%), $f$ 是声音频率(Hz), $\rho$ 为空气密度, $c$ 为声速。

理论的重点在于,假设板上各孔各自的特性互不影响,并且孔间板的部分对声波的反射可以忽略不计,这样,可将板视为大量微孔的并联,从而把单个微孔的声阻抗转变为微穿孔区域的一个简单的平均的声阻抗。整个微穿孔板吸声体的相对声阻抗(声阻抗与空气特性阻抗的比值)为:

$$Z = r + j\omega m - j\text{ctg}(\omega D/c) \quad (1)$$

其中微穿孔板的相对声阻 $r$ (声阻与空气特性阻抗的比值)和相对声质量 $m$ (声质量与空气特性阻抗的比值)分别为:

$$r = \frac{32\mu t}{pc d^2} \left( \sqrt{1 + \frac{k^2}{32}} + \frac{\sqrt{2}}{32} k \frac{d}{t} \right) \quad (2)$$

应用声学

$$m = \frac{t}{pc} \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{32 + \frac{k^2}{2}}} + 0.85 \frac{d}{t} \right) \quad (3)$$

微穿孔板的一个重要参数是穿孔板常数 $k$ ,定义为

$$k = d \sqrt{\frac{f_0}{10}} \quad (4)$$

共振频率 $f_0$ 满足

$$\omega_0 m - \text{ctg}\left(\frac{\omega_0 D}{c}\right) = 0 \quad (5)$$

正入射时该结构的吸声系数为

$$\alpha = \frac{4r}{(1+r)^2 + (\omega m - \text{ctg}(\frac{\omega D}{c}))^2} \quad (6)$$

共振频率时,吸声系数达到最大, $\alpha_{\max} = 4r/(1+r)^2$ 。吸声系数为最大值一半时的频率为半共振频率,有两个频率记为 $f_1$ 和 $f_2$ 。频带宽度(两个半共振频率之间的频域)通常表示为 $\Delta f/f_0 = (f_2 - f_1)$ 或 $f_2/f_1$ 。

设计时,穿孔板常数 $k$ 的选取对该结构的吸声频带宽度起重要影响。

马大猷教授曾于1975年提出这种吸声结构的理论<sup>[2]</sup>,由于当时机加工条件的限制,只能加工毫米级的孔,所以理论的推导做了近似,目前称之为“近似理论”。现今的准确理论,主要通过共振频率点和半共振频率点做图解,见文献<sup>[1]</sup>,分析得到频带宽度,即

$$\Delta f/f_0 = \left(\frac{4}{\pi}\right) \text{tg}^{-1}(1+r) \quad (7)$$

$$\frac{f_2}{f_1} = \left(\frac{\pi}{\text{ctg}^{-1}(1+r)} - 1\right) \quad (8)$$

具体图解方法这里不再赘述。

## 3 对准确理论的实验研究

实验在 $\phi 100\text{mm}$ 的驻波管中进行。激光穿孔加工不锈钢板样品,孔径为0.2mm。由于孔径较小容易被堵塞,超声清洗可以保证孔径的

· 37 ·

准确性。超声清洗前后的实验结果如图 1。图 1 中也绘出了根据准确理论计算出的吸声系数曲线。由图 1 看出,清洗后样品的实验曲线与理论曲线符合较好(与理论不符合的两个波峰是由于板振动对微穿孔板结构吸声特性的影响,见另文讨论 [3])。图 2 含用 0.35mm 直径的针,手工冲孔加工的塑料板样品的实验结果。该样品由于大量小孔加工的不均匀性,孔径不容易测量。从图 2 实测的吸声特性曲线与不同  $d$  时的理论计算曲线对比,预估加工后孔径  $d$  接近 0.33mm。

由实验证明,微穿孔板吸声体准确理论在一定范围内有较高的精确性。

#### 4 微穿孔板吸声体极限频宽情况的讨论

根据文献 [1],在共振频率确定的条件下,孔径对频带宽度起决定作用。孔径越小,频带宽度越宽。当孔径减小至 0.2mm 以下,频带宽度可大于 3 个倍频程。但是应注意到,频带宽度随孔径的减小并不会无限制地增加,增加到一定程度就达到极限值,频带宽度就不再增加,即达到极限频带宽度。

由公式 (7) 和 (8) 分析,单层微穿孔板吸声体所能达到的极限频带宽度,取决于共振频率时的相对声阻,也就是取决于设计时所

要求的最大吸声系数。这里将极限频带宽度列于表 1。由表 1 可以看出,当设计要求的吸声系数不大于 0.92 时,单层微穿孔板的吸声带宽才可能达 3 个倍频程(即  $f_2/f_1 = 8$ ),当最大吸声系数不大于 0.6 时,才可能达 4 个倍频程(即  $f_2/f_1 = 16$ )。

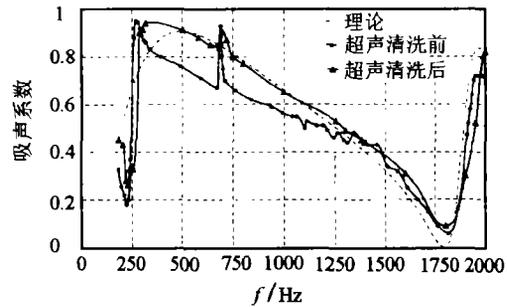


图 1 超声洗前后激光加工样品的吸声曲线

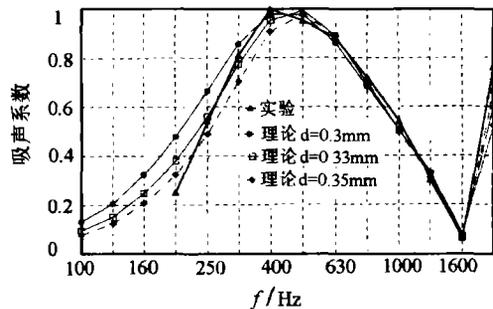


图 2 冲孔样品的吸声曲线

表 1 微穿孔板吸声体的极限吸声频带宽度

$\alpha_{max}$	1	0.92	0.9	0.87	0.8	0.7	0.6	0.5
$r$	1	1.79	1.92	2.12	2.6	3.4	4.4	5.8
$\Delta f/f_0$	1.41	1.56	1.581	1.605	1.657	1.717	1.77	1.815
$f_2/f_1$	5.78	8.12	8.54	9.12	10.65	13.13	16.28	20.6

为了便于分析讨论,我们曾基于微穿孔板准确理论,编制计算机辅助设计程序,可以通过改变结构参数准确迅速计算结构的吸声特性,并且可以根据吸声特性的要求来设计结构参数 [4]。

设对于低频 50-800Hz,取  $f_0$  为 425Hz,对于中频 200-3200Hz,取  $f_0$  为 1700Hz。这

样利用计算机辅助设计设计结构参数,得到的部分结果见表 2。由表 2 可知,孔径减小至 0.07-0.1mm(主要由共振频率决定)时,已达到频带宽度的极限值。另外,当孔径减至 0.07mm 以下时,才可能在高频段(200-3200Hz)达到 3 个或 4 个倍频程的吸声效果,而对于低频段(50-800Hz)孔径减至 0.15mm 以下就

基本达到 3 个或 4 个倍频程的吸声效果。当然, 选取的最大吸声系数如果小于 0.92 时, 比如最大吸声系数取 0.8, 孔径不必小到 0.07

(对高频 200-3200Hz) 或 0.15 mm (对低频段 50-800Hz) 就能达到 3 个倍频程的频带宽度。

表 2 由性能要求设计微穿孔板吸声体结构参数

$f_0 = 1700\text{Hz}$ $\alpha_{max} = 0.6$						$f_0 = 1700\text{Hz}$ $\alpha_{max} = 0.92$					
$d(\text{mm})$	$t(\text{mm})$	$k$	$p(\%)$	$D(\text{mm})$	$f_2/f_1$	$d(\text{mm})$	$t(\text{mm})$	$k$	$p(\%)$	$D(\text{mm})$	$f_2/f_1$
0.1	0.1	1.3	0.4	15.4	9.1	0.1	0.1	1.3	0.8	29.2	7.3
0.1	0.2	1.3	0.7	18.1	11.6	0.1	0.2	1.3	1.7	32.1	7.6
0.1	0.5	1.3	1.7	20.1	13.3	0.1	0.5	1.3	4.3	34.0	7.8
0.07	0.1	0.9	0.7	27.4	15.6	0.07	0.1	0.9	1.7	39.4	8.0
0.07	0.2	0.9	1.4	29.8	15.9	0.07	0.2	0.9	3.4	40.8	8.0
0.07	0.5	0.9	3.5	31.4	16	0.07	0.5	0.9	8.5	41.7	8.0
0.03	0.1	0.4	3.7	45.7	16.2	0.03	0.1	0.4	9.2	48.3	8.1
0.03	0.2	0.4	7.4	46.1	16.2	0.03	0.2	0.4	18.3	48.4	8.1
0.03	0.5	0.4	18.5	46.3	16.3	0.03	0.5	0.4	45.8	48.5	8.1
$f_0 = 425\text{Hz}$ $\alpha_{max} = 0.6$						$f_0 = 425\text{Hz}$ $\alpha_{max} = 0.92$					
$d(\text{mm})$	$t(\text{mm})$	$k$	$p(\%)$	$D(\text{mm})$	$f_2/f_1$	$d(\text{mm})$	$t(\text{mm})$	$k$	$p(\%)$	$D(\text{mm})$	$f_2/f_1$
0.15	0.1	0.98	0.2	84.2	13.8	0.15	0.1	0.98	0.4	139.2	7.8
0.15	0.2	0.98	0.3	100.0	15.3	0.15	0.2	0.98	0.8	151.3	7.9
0.15	0.5	0.98	0.7	112.5	15.8	0.15	0.5	0.98	1.9	159.4	8.0
0.1	0.1	0.65	0.3	141.0	16	0.1	0.1	0.65	0.9	174.7	8.0
0.1	0.2	0.65	0.7	150.7	16.1	0.1	0.2	0.65	1.7	179.3	8.1
0.1	0.5	0.65	1.7	156.9	16.2	0.1	0.5	0.65	4.2	180.8	8.1
0.07	0.1	0.46	0.7	172.4	16.1	0.07	0.1	0.46	1.7	188.7	8.1
0.07	0.2	0.46	1.45	176.4	16.2	0.07	0.2	0.46	3.4	190.4	8.1
0.07	0.5	0.46	3.4	178.9	16.2	0.07	0.5	0.46	8.4	191.4	8.1

选取  $d = 0.07\text{mm}$ 、 $t = 0.5\text{mm}$ 、 $p = 3.5\%$ , 而  $D$  分别等于 50mm 和 100mm 时, 将其理论曲线分别绘于图 3 的 (a) 和 (b)。从图 3 可以看出, 在频带宽度极限情况下, 单层微穿孔板吸声体在 50Hz-8kHz 之间, 除了有限个吸声波谷 (反共振频率处) 以外, 其吸声效果能满足对吸声材料的一般要求。

在频带宽度极限情况下, 不同孔径时能满足吸声性能要求的微穿孔板穿孔率  $p$  随板厚  $t$  的变化规律绘于图 4。

通过对上面图表可见, 在讨论单层微穿孔板频带宽度极限情况时, 要注意突破两种传统的观念。

(1) 在以往的设计中, 通常将  $d/t = 1$  作为一设计原则。这一原则是考虑到加工的问题, 即常规的孔径 0.8mm 左右的微穿孔板, 多采用

钻孔、冲孔等机械加工, 这样就不能在太厚的板上加工。目前, 由于加工方法的提高, 有望达到微穿孔板频带宽度的极限情况, 又可能在较厚的板上形成微孔。这样, 对板厚的选择就应突破以往设计原则的限制。如果基于以往的设计原则, 当孔径在 0.1mm 左右时, 板就需很薄, 那就会给微穿孔板的应用带来很大的局限性。

(2) 在满足性能要求的前提下, 板厚的选择决定了穿孔率的选择。现设计中微穿孔板的穿孔率常取 1-3% 在研究中, 本文发现, 当孔径在 0.8mm 左右的范围内, 选用不同的板厚对穿孔率的选择影响不大, 穿孔率普遍小于 5% 而当孔径进一步减小, 不同的板厚对穿孔率的选择影响变大。孔越小, 影响越大。当孔径小于 0.1mm 时, 对于较厚的板穿孔率可超过 10%

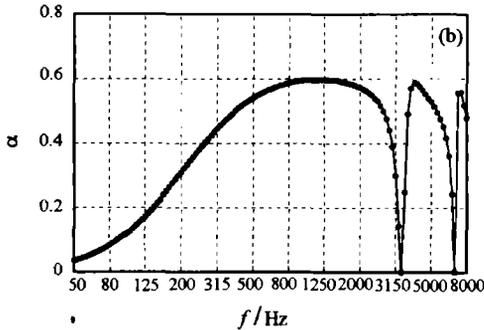
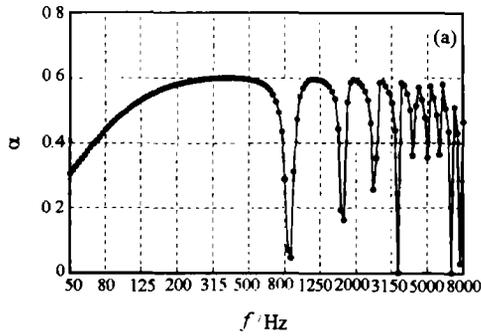


图3 频带宽度极限情况下微穿孔板吸声体的吸声特性曲线

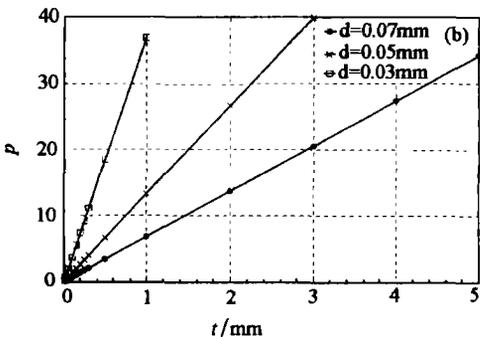
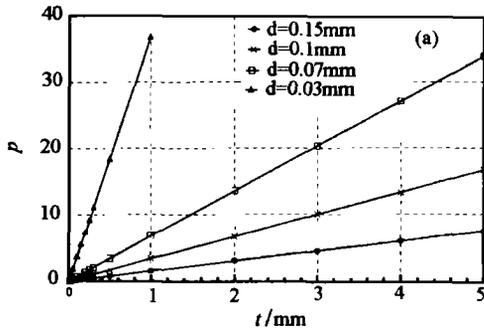


图4 频宽极限情况下微穿孔板穿孔率  $p$  随其板厚  $t$  的变化规律

(见图4)。但这些只是根据准确理论的辅助设计推导出的结果。而微穿孔板吸声体的理论是基于各微孔的特性之间不存在相互影响。当孔间距  $b = 2d$  时,  $p = 19.6\%$ , 所以当穿孔率大约超过  $19.6\%$  以上, 各微孔之间的距离较近, 已经不满足上述近似条件。对穿孔率大于  $19.6\%$  的情况, 需要另加以分析。

## 5 结论

根据微穿孔板吸声体准确理论的指导, 本文利用计算机辅助设计对该结构极限频带宽度情况从理论上进行了讨论, 得到以下结论:

(1) 对单层微穿孔板的最大吸声系数要求不大于  $0.6$  或  $0.92$  时, 分别可以达到单层微穿孔板频带宽度的极限值  $3$  个或  $4$  个倍频程。

(2) 孔径减小至  $0.07\text{--}0.1\text{mm}$  (主要由共振频率决定) 时, 已达到频带宽度的极限值。另外还应指出, 当孔径减至  $0.07\text{mm}$  以下时, 才可能在中频段 ( $200\text{--}3200\text{Hz}$ ) 达到  $3$  个或  $4$  个倍频程的吸声效果, 而对于低频段 ( $50\text{--}800\text{Hz}$ ) 孔径减至  $0.15\text{mm}$  以下就达到  $3$  个或  $4$  个倍频程的吸声效果。

(3) 对于频带宽度极限情况, 不必以  $d/t = 1$  来选择板厚, 可以选用较厚的板。

(4) 对于频带宽度极限情况, 对于选用较厚板的情况其穿孔率可突破  $1\text{--}3\%$  的限制, 可达到  $10\%$ 。

通过较长一段时间的工作, 作者有理由相信, 微穿孔板吸声体将在  $21$  世纪的声学工程中发挥更大的作用。

## 参 考 文 献

- 1 马大猷. 声学学报, 1998, 23(1): 1-7.
- 2 马大猷. 中国科学, 1975, 1: 38-50.
- 3 焦风雷, 丁辉, 刘克. 声学技术, 2001, 20(1): 45-47.
- 4 焦风雷, 乔五之, 刘克等. 轻工业学院学报, 1997, 15(3): 52-62.