

## 微穿孔板吸声结构水下应用研究\*

王泽锋<sup>†</sup> 胡永明 倪明 罗洪

(国防科技大学光电科学与工程学院 长沙 410073)

**摘要** 马大猷教授提出的微穿孔板吸声结构在空气噪声降低和隔离方面得到了广泛的应用,但未见水下应用的相关研究和报道。本文将空气中微穿孔板理论应用到水中,得到了水下微穿孔板吸声结构的吸声公式。通过理论分析,得出了微穿孔板结构直接应用于水中无法获得宽频吸收的结论。提出了通过匹配液将微穿孔板间接应用到水下的设想。设计了单层板和双层板吸声结构,并对它们的吸声特性进行了理论分析与仿真。结果表明,本文设计的微穿孔板吸声结构在水中能够获得优于空气中的宽频带吸声效果。实验测量了自制的微穿孔板吸声结构,吸声系数的测量值与理论曲线基本吻合,从而验证了理论分析的正确性。

**关键词** 吸声结构,水下用微穿孔板,噪声控制,声阻抗

## Investigations of micro-perforated sound absorption structures for underwater usage

WANG Ze-Feng HU Yong-Ming NI Ming LUO Hong

(College of Photoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

**Abstract** Micro-perforated sound absorption structures proposed by Professor Maa Dah-You have got abroad application on noise reductions and isolations in air. To our knowledge, however, there are no investigations and reports about their applications underwater. In this paper, the sound absorption formula of the same micro-perforated sound absorption structures underwater is derived from the corresponding theories in air. The conclusion that such structures cannot possess wide absorption is obtained. Then two modified micro-perforated panel sound absorption structures are proposed. Simulation results show that these structures have better sound absorption properties than those in air. The micro-perforated sound absorption structures designed and made by ourselves are tested in a standing-wave tube filled with water, and the experimental values of the sound absorption coefficient are in agreement with the theoretical values, which verify the theoretical analysis.

**Key words** Sound absorption structure, Micro-perforated panel for underwater usage, Noise control, Acoustic impedance

2006-10-18 收稿; 2007-02-26 定稿

\* 国防科技大学优秀博士研究生创新基金(0623)资助项目

作者简介:王泽锋(1980-),男,湖南临武人,博士研究生,主要从事光纤传感技术的研究。胡永明(1960-),男,教授,博士生导师。倪明(1972-),男,副教授,博士,硕士生导师。罗洪(1978-),男,博士研究生。

<sup>†</sup> 通信联系人 E-mail: hotrosemaths@163.com

## 1 引言

微穿孔板吸声理论是马大猷教授在1975年提出的<sup>[1]</sup>, 其后在1997年又给出了其准确理论<sup>[2]</sup>, 这一理论在国内外已受到普遍关注。由于具有不受材料限制、清洁、无污染、透明采光等诸多优点, 微穿孔板吸声结构在噪声降低和隔离方面得到了广泛的应用<sup>[3-7]</sup>。但是据我们所知, 目前的研究主要集中在空气中, 还没有见到关于微穿孔板水下应用的研究和报道。而水下同样有着非常广阔的应用前景, 因此进行微穿孔板吸声结构水下应用的研究非常有必要。

本文在空气中微穿孔板吸声理论的基础上, 对其水下应用的理论进行了初步探讨。通过设计了一种简单的结构, 将微穿孔板间接应用于水中, 获得了优于空气中的吸声效果。

## 2 介质中微穿孔板的声阻抗率

微穿孔板可以看作具有声阻和声质量的声学元件, 马大猷教授对此进行了详细深入的分析<sup>[1-2]</sup>, 得到了介质中通用的微穿孔板相对声阻抗的表达式:

$$z = r + j\omega m \quad (1)$$

式中,  $r$  和  $m$  分别是穿孔板的相对声阻和声质量:

$$r = \frac{32\mu t}{\rho c d^2} k_r, k_r = \left[ \sqrt{1 + \frac{x^2}{32}} + \frac{\sqrt{2x}}{8} \frac{d}{t} \right] \quad (2)$$

$$m = \frac{t}{\rho c} k_m, k_m = \left[ 1 + \frac{1}{\sqrt{9 + x^2/2}} + 0.85 \frac{d}{t} \right] \quad (3)$$

其中,  $\mu$  为介质的运动粘滞系数,  $t$  为穿孔板的厚度,  $d$  为孔的直径,  $c$  为介质中的声速,  $p$  为板的穿孔率,  $x = 0.5d \sqrt{\omega/\mu}$ ,  $\omega$  为声波的

角频率。

由(2)、(3)式可以得到:

$$\frac{r}{m} = \frac{32\mu}{d^2} \cdot \frac{k_r}{k_m} \quad (4)$$

$r/m$  接近穿孔板结构的吸声角频带宽度<sup>[1]</sup>, 由(4)式可知  $d$  越小,  $\mu$  越大, 吸声频带就越宽。由于水的运动粘滞系数约为空气的1/16, 因此同样结构的穿孔板水中的吸声带宽只有空气中的1/16。要想获得与空气中相同的吸声带宽, 必须将孔径减小到原来的1/4, 大大增加了加工制作的难度。

为了解决微穿孔板直接应用于水下吸声频带窄的问题, 我们设计了图1和图2所示的吸声结构。将微穿孔板置于一种运动粘滞系数较大的匹配液中, 通过紧贴在穿孔板外表面的一层很薄的水下透声材料与水隔开。为了保证声波能够更好地进入微穿孔板吸声结构中, 达到理想的吸声效果, 应该尽量选择声阻抗与水匹配的液体和隔离材料。实验中, 选择的匹配液为蓖麻油, 隔离材料为聚氨脂。蓖麻油的特性阻抗  $\rho c = 1.4 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , 与水匹配, 且运动粘滞系数较大, 室温下  $\mu = 0.9875 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ 。而根据实际应用的需要, 可以生产出与水完全匹配的聚氨脂材料。因此, 由(4)式可知孔径为1mm的穿孔板在蓖麻油中就可获得比空气中宽得多的吸声频带。根据实际应用的需要, 孔径还可以大于1mm, 大大简化了微穿孔板的设计与制作。

## 3 微穿孔板吸声结构的吸声系数

微穿孔板吸声结构是共振吸声体, 由其等效电路可以求得吸声特性。图1是单层结构,  $R$  和  $M$  分别为穿孔板的声阻和声质量,  $Z_D$  为板后空腔的声阻抗率, 其值按一般计算为:

$$Z_D = -j\rho c c t g(\omega D/c) \quad (5)$$

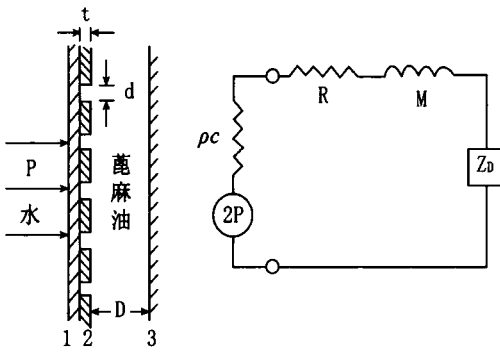


图 1 单层微穿孔板吸声结构及其等效电路图  
1—阻抗匹配材料(如聚氨酯)  
2—微穿孔板 3—刚性反射壁

式中,  $\rho$  为水的密度,  $c$  为水中声速。  
正入射时吸声系数为:

$$\alpha = \frac{4r}{(1+r)^2 + \chi^2} \quad (6)$$

式中,  $r, \chi$  分别是穿孔板吸声结构的等效相对声阻和声抗。由图 1 的等效电路图可知, 对于单层微穿孔板吸声结构有:

$$r = R/\rho c, X = \omega M/\rho c - \text{ctg}(\omega D/c) \quad (7)$$

将(7)式代入(6)式可得单层板结构的吸声系数:

$$\alpha = \frac{4r}{(r+1)^2 + (\omega m - \text{ctg}(\omega D/c))^2} \quad (8)$$

其中,  $D$  为板到反射壁的距离,  $m = M/\rho c$  是穿孔板的相对声质量。

由(8)式可以求得频率变化时最大的吸声系数:

$$\alpha_0 = 4r(1+r)^2 \quad (9)$$

此时对应的频率, 即共振频率  $\omega_0$  满足:

$$\omega_0 - \text{ctg}(\omega_0 D/c) = 0 \quad (10)$$

由(9)、(10)式可知, 最大吸声系数只与板的相对声阻有关; 当穿孔板的结构参数给定以后, 共振吸声频率由  $D$  唯一确定。

由(8)式可得  $\alpha = 0.5$  对应的频率  $\omega_{1,2}$  应满足:

$$\omega_{1,2} m - \text{ctg}(\omega_{1,2} D/c) = \pm \sqrt{6r - r^2 - 1} \quad (11)$$

由三角函数的特性可知, 变量  $A$  小于 1 时余切可近似表达成  $\text{cot}A = 1/A - A/3$ , 代入(10)、(11)式求得共振频率:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{(m + D/3c)(D/c)}} \quad (12)$$

而  $\alpha = 0.5$  对应的两个吸收频率为<sup>[8]</sup>:

$$\omega_{1,2} = \sqrt{\frac{6r - r^2 - 1}{4(m + D/3c)^2} + \frac{1}{D/c(m + D/3c)}} \mp \frac{\sqrt{6r - r^2 - 1}}{2(m + D/3c)} \quad (13)$$

从而可以求得半吸收宽度

$$B = \frac{|\omega_1 - \omega_2|}{\omega_0} = \sqrt{\frac{(6r - r^2 - 1)D}{(m + D/3c)c}} \quad (14)$$

由(14)式可知, 当板后空腔深度  $D$  确定以后, 半吸收宽度主要由穿孔板的相对声阻抗决定。  $r$  越大,  $m$  越小,  $B$  就越大。但是, 为了保证最大吸声系数能够达到 0.5,  $r$  的取值必须在 0.17 ~ 5.83 之间。因此, 在保证高吸收系数的情况下, 只能通过降低穿孔板的相对声质量来提高吸声带宽。而  $m$  大致只与穿孔率  $p$  有关<sup>[1]</sup>, 为了获得足够的吸声带宽, 往往需要很多的小孔。为了避免在大面积上穿大量微小的孔, 同时改善吸声效果, 我们设计了图 2 所示的双层板串联结构。

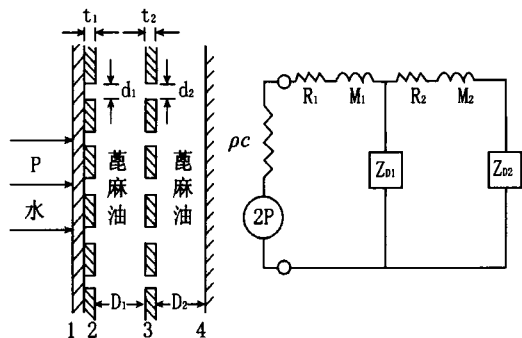


图 2 双层微穿孔板吸声结构及其等效电路图  
1—阻抗匹配材料(如聚氨酯)  
2,3—微穿孔板 4—刚性反射壁

由双层板吸声结构的等效电路可以求

得其相对声阻抗:

$$z = r + jX = r_1 + j(\omega m_1 - \text{ctg}(\omega D_1/c)) + \frac{\text{ctg}^2(\omega D_1/c)}{r_2 + j(\omega m_2 - \text{ctg}(\omega D_1/c) - \text{ctg}(\omega D_2/c))} \quad (15)$$

式中,  $r_1, r_2, m_1, m_2$  分别为两穿孔板的相对声阻和相对声质量,  $D_1, D_2$  分别为两穿孔板后的空腔深度。由(15)式可以求得双层板吸声结构的等效相对声阻和等效相对声抗分别为:

$$r = r_1 + \frac{r_1 \text{ctg}^2(\omega D_1/c)}{r_2^2 + j(\omega m_2 - \text{ctg}(\omega D_1/c) - \text{ctg}(\omega D_2/c))^2} \quad (16)$$

$$\chi = \omega m_1 - \text{ctg}(\omega D_1/c) - \frac{\text{ctg}^2(\omega D_1/c)(\omega m_2 - \text{ctg}(\omega D_1/c) - \text{ctg}(\omega D_2/c))}{r_2^2 + (\omega m_2 - \text{ctg}(\omega D_1/c) - \text{ctg}(\omega D_2/c))^2} \quad (17)$$

将(16)和(17)式代入(6)式即可得到双层板结构的吸声系数。

### 4 仿真与实验

根据以上理论分析,对本文设计的单层和双层微穿孔板吸声结构的吸声特性进行了仿真分析,结果如图3~图8所示。其中,图3~图6分别为空腔深度、穿孔率、孔径和穿孔板厚度对单层板结构吸声系数的影响;图7和图8是双层板吸声结构的吸声特性曲线。

从图3可以看到,当其它参数不变时,共振吸收频率 $\omega_0$ 随 $D$ 的增加往低频移动,且吸声系数0.5对应的绝对频带宽度变窄,但相对宽度基本不变。

从图4可以看到,穿孔率过大或过小,都会降低最大吸声系数,影响吸声效果,最好控制在5%左右。

从图5可以看到,孔径主要影响吸声带宽,孔径越小,吸声频带越宽。但是,孔径过小会减

小最大吸声系数,影响整体吸声效果。

从图6可以看到,穿孔板厚度主要影响低频部分的吸声特性,对高频部分基本没什么影响。随着穿孔板厚度变大, $\omega_0$ 往高频移动,且低频的吸声系数变小,吸声效果变差。

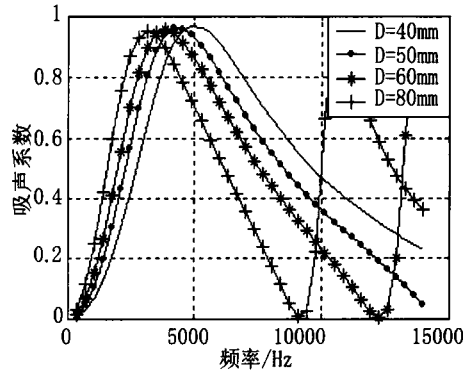


图3 空腔深度对单层结构吸声系数的影响  $t = d = 1\text{mm}, p = 5\%$

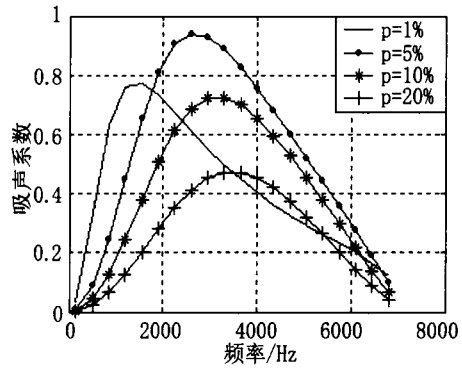


图4 穿孔率对单层结构吸声系数的影响  $D = 100\text{mm}, t = d = 1\text{mm}$

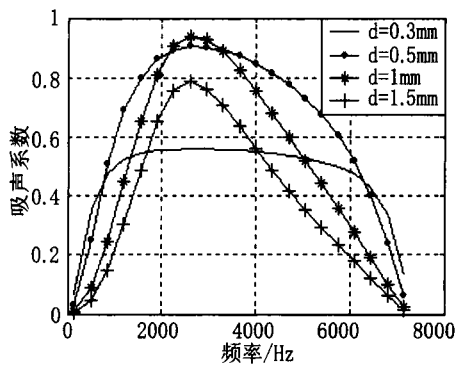


图5 孔径对单层结构吸声系数的影响  $D = 100\text{mm}, t = 1\text{mm}, p = 5\%$

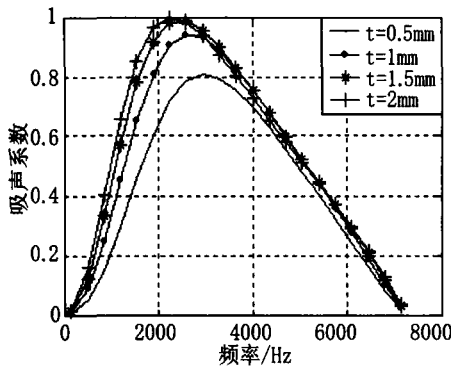


图 6 穿孔板厚度对单层结构吸声系数的影响

$$D = 100\text{mm}, d = 1\text{mm}, p = 5\%$$

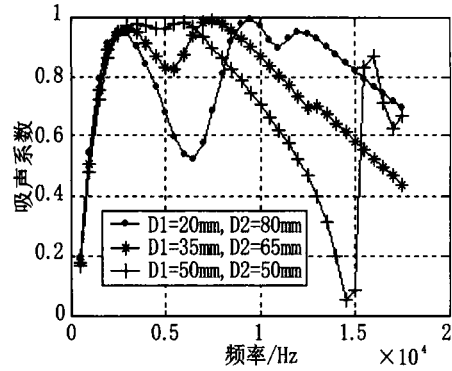


图 8 不同参数的双层板串联结构的吸声特性随 D1、D2 的变化

$$t_1 = d_1 = 0.5\text{mm}, t_2 = d_2 = 1\text{mm}, p_1 = p_2 = 5\%$$

图 7 对应的两块穿孔板参数相同,图 8 对应的不同。 $D_1$  为内板与外板之间的距离,  $D_2$  为内板与反射壁之间的距离。外板到反射壁的距离都为 100mm, 改变  $D_1$  和  $D_2$ , 分别得到三条曲线。可以看出, 当  $D_1$  和  $D_2$  相同时, 吸声频带内的平均吸声系数较高, 但吸声带宽要窄些。根据实际应用的需要, 合理调节  $D_1$  和  $D_2$ , 可以得到满意的吸声效果。

根据以上理论分析, 我们设计加工了两块结构参数相同的圆形穿孔钢板, 厚度为 1mm, 直径为 12cm, 板上共穿了 142 个小圆孔, 孔径为 1mm, 穿孔率约为 1%。利用这两块穿孔板, 我们分别设计了板后空腔深度为 100mm 的单层板吸声结构和板后空腔深度各为 50mm 的双层板吸声结构, 并在充水驻波罐(由一根内径 125mm, 壁厚 4mm, 长 500mm 的钢管和位于钢管一端的水下扬声器构成, 根据声波导理论, 其理论截止频率约为 7000Hz) 中对它们的吸声特性进行了测试, 结果如图 9 和图 10 所示。从图中可以看到, 实际测量值与理论曲线基本吻合。

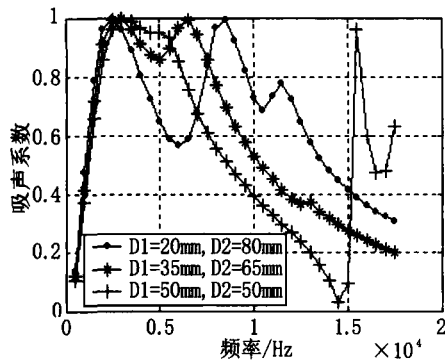


图 7 相同参数的双层板串联结构的吸声特性随 D1、D2 的变化

$$t_1 = t_2 = d_1 = d_2 = 1\text{mm}, p_1 = p_2 = 5\%$$

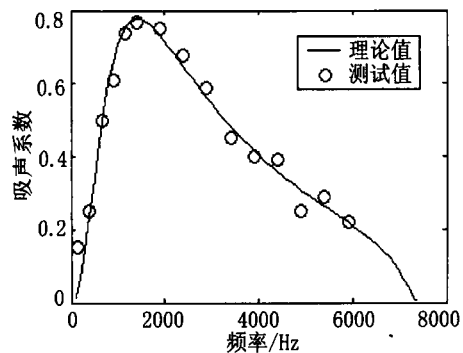


图 9 单层穿孔板吸声结构的吸声特性

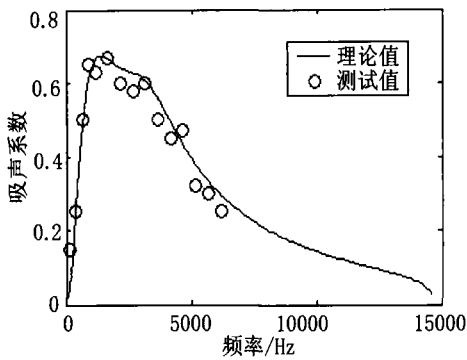


图10 双层穿孔板吸声结构的吸声特性

## 5 结论

本文在马大猷教授空气中微穿孔板吸声理论的基础上,详细分析了微穿孔板的水下吸声特性。得出了将微穿孔板吸声结构直接应用于水中无法获得宽频吸收的结论。提出了一种简单的微穿孔板吸声结构水下应用的设计方法,并对单层板和双层板吸声结构的吸声特性进行了理论分析与仿真。结果表明,微穿孔板吸声结构通过匹配液间接应用于水中,可以获得优于空气中的吸声效果。

特别是双层板吸声结构,吸声带宽高到了几十千赫,能够满足一般应用的需要。本文对于微穿孔板吸声结构的水下应用提供了一定的理论依据。

## 参 考 文 献

- [1] 马大猷. 微穿孔板吸声结构的理论与设计. 中国科学, 1975,18(1):38-50.
- [2] 马大猷. 微穿孔板吸声体的准确理论和设计. 声学学报, 1997,22(5):385-393.
- [3] Maa Dah-You. Potential of micro-perforated panel absorber. J. Acoust. Soc. Am., 1998,104(6):2861-2866.
- [4] 查雪琴,康健,张婷,等. 微穿孔板的应用技术. 声学学报, 1994,19(4):258-265.
- [5] 陆凤华,李竹园. 微穿孔吸声体的应用. 声学学报, 2001, 26(2):185-187.
- [6] 刘克. 微穿孔板和微缝板吸声体研究进展. 应用声学, 2002,21(1):3-6.
- [7] 查雪琴, H. Fuchs. 单片独立的(stand-alone)微穿孔吸声体. 声学学报, 2005,30(6):493-497.
- [8] 马大猷. 微穿孔吸声体吸收带宽极限. 声学学报, 2003, 28(6):561-56.