一种小局域条件下微穿孔板吸声体吸声特性研究

李 斌，李 辉，孙国华，杜华太，马卫东，孙志勇，肖 勇，张颖异
(山东非金属材料研究所，山东济南 250031)

摘要：在 1 mm 厚碳纤维增强树脂板材上制备规则圆形的微穿孔，以此为基础，制得一种夹芯微穿孔吸声体，利用阻抗管测试方法研究了小局域条件对该吸声体吸声特性的影响。试验结果表明，小背腔的加入对该吸声体的微穿孔吸声效果有强烈影响，使其微穿孔的吸声频率向高频移动、吸声系数降低；且在该情况下，未发现组合微穿孔的协同吸声效应；基于声电类比法的微穿孔吸声方程可能不适合直接用于该声学结构吸声特性的预测、设计。利用亥姆霍兹吸声公式等声学理论，形成了一种适用于该小局域条件下夹芯微穿孔吸声体的计算方法，可解决该吸声体结构参数的设计问题，为优化其吸声特性提供依据。

关键词：局域；微穿孔；吸声；背腔；亥姆霍兹
中图分类号：TB53 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-3630(2018)-03-0205-06
DOI 编码：10.16300/j.cnki.1000-3630.2018.03.002

Research on the sound absorption performance of micro-perforated panel absorber under small local conditions

LI Bin, LI Hui, SUN Guo-hua, DU Hua-tai, MA Wei-dong, SUN Zhi-yong, XIAO Yong, ZHANG Ying-yi
(*Shandong Non-metallic Materials Institute*, *Ji'nan* 250031, *Shandong*, *China*)

Abstract: The micro-perforation is successfully made on the 1mm thick carbon fiber reinforced resin sheet. Based on this, a sandwich micro-perforated absorber is prepared. The influence of local condition on the sound absorption of this absorber is studied by the impedance tube test method. The results show that the addition of small back cavities has a strong inhibitory effect on the sound absorption of micro-perforation, and the sound absorption frequency of micro-perforation is shifted to high frequency region and the sound absorption coefficient is reduced. In this case, there is no synergetic sound absorption of micro-perforation. The electro-acoustical equivalent circuit model might not be applied to predicting and designing the sound absorption characteristics of this absorber. Based on the acoustic theory such as Helmholtz sound absorption method, a method of calculating the sound absorption characteristics of micro-perforation under small local conditions is established, which could solve the structural design problem of sandwich micro-perforated absorber with small back cavities, and prepare for the next step to optimize the structure of such absorbers.
Key words: local; micro-perforation; sound absorption; back cavity; Helmholtz

0 引 言

微穿孔板是一种低声质量、高声阻的声学元件，其声阻可与空气的特性阻抗相匹配，不需另加多孔性材料，其吸声系数、频带均远优于普通穿孔板，且具有使用方便、清洁、无污染的优点[1-2]。把微穿孔板通过龙骨固定在对象表面，板后留有一定空腔，就形成了高效共振吸声体，目前已应用于飞机吸声内衬、公路吸声屏障、会议厅吸声处理等多种领域[3-7]。但该结构刚度低，对使用空间有一定要求，限制了其在对材料刚度有一定要求的狭小空间中的降噪应用。

山东非金属材料研究所将微穿孔制备在夹芯结构面板上，夹芯泡沫上制有一系列小空腔，形成具有一定刚度的夹芯微穿孔吸声体，相当于将一系列亥姆霍兹共振器串联，将其固定于车辆、船舶等舱室内壁，可满足狭小空间降噪、隔热的需求，优化舱室人机环境。但目前对于这种小局域条件下夹芯微穿孔吸声体吸声特性的研究偏少。

Liu J 等[8-9]通过在微穿孔板后设置蜂窝结构，使其背腔局域化，并设计了一种吸声材料降噪效果测试试验箱，研究了该结构的吸声特性，认为蜂窝的加入阻断了声波在微穿孔板后空腔的传播、使微孔内空气质点振动加快，进而使材料高声阻发挥作用，从而改善了其吸声性能。

收稿日期：2017-05-08；**修回日期：**2017-09-17
作者简介：李斌(1987－)，男，山东潍坊人，硕士，研究方向为吸声构件研发及应用。
通讯作者：李斌，E-mail: 13853119162@163.com

Kimihiro S 等[10]在微穿孔板后加蜂窝体，赋予微穿孔板吸声体一定刚度，发现材料低频吸声性能得到改进，在亥姆霍兹-基尔霍夫完整公式基础上对该局域吸声材料性能进行计算并验证。

钱玉洁等[11]分析认为，将多孔径微穿孔板吸声体的背腔按不同孔径分离、局域化，每种孔径的微孔可以与它们各自的空腔相互作用，独立地发挥吸声特性。

本文利用阻抗管测试方法研究小局域条件对夹芯微穿孔吸声体(Sandwich Micro-Perforated Absorber, SMPA)正入射吸声特性的影响，并根据微穿孔吸声等声学理论建立了该吸声结构吸声特性的计算方法，为下一步结构优化设计提供了依据。

1 实验部分

1.1 实验材料

碳纤维增强树脂板材(以下简称碳板)，1 mm 厚；聚甲基丙烯酰亚胺(polymethacrylimide, PMI)泡沫，闭孔，硬质，20 mm 厚；双组份聚氨酯结构胶。

1.2 试样制备

(1) 微穿孔碳板制备

在 1 mm 厚碳板上制备微孔，用投影仪观察各微孔的大小及形态，确保微孔形态光滑、规整。

(2) 不同背腔结构 PMI 泡沫背腔制备

加工外径为 35 mm、不同背腔尺寸的 PMI 泡沫。

(3) SMPA 试样制备

用微穿孔碳板、不穿孔碳板依次做面板、底板，用结构胶将面底板粘接到不同背腔结构 PMI 泡沫上，制备出具有不同声学结构的 SMPA 试样，结构示意图如图 1 所示。

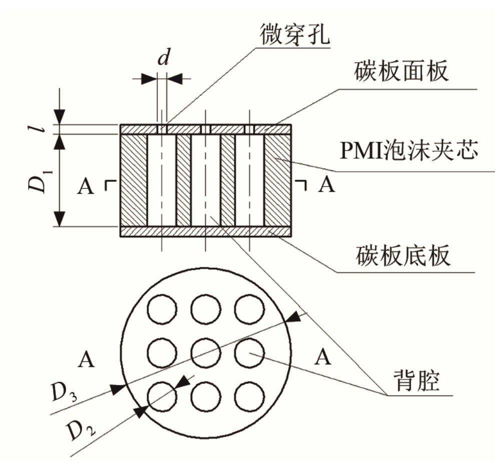


图 1 SMPA 试样结构示意
Fig.1 The structure diagram of SMPA sample

1.3 微穿孔吸声体吸声特性测试

用阻抗管测试不同声学结构的 SMPA 试样的吸声特性。

2 结果与讨论

2.1 碳纤维增强树脂板材微孔制备方法研究

自制微穿孔形态如图 2 所示。从图 2 可见，微孔接近圆形，形态规整，微孔内基本无断裂碳纤维。

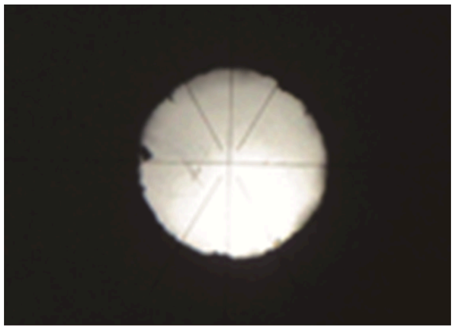


图 2 微穿孔状态投影图
Fig.2 The projection drawing of micro-perforated state

2.2 微穿孔板材吸声特性仿真程序编制

基于声电类比法微穿孔吸声方程，以 Excel 软件为基础，设计了一个能够预测微穿孔材料声波正入射下吸声特性的程序，输入微孔孔径、穿孔率、微孔孔深和腔深等参数，即可计算材料吸声特性曲线，计算所用公式如式(1)～(3)所示[12-13]：

$$\alpha=\frac{4\gamma}{(1+\gamma^2)+(\omega\cdot m-\mathrm{ctan}\,\dfrac{\omega D}{c_0})} \tag{1}$$

$$\gamma=\frac{32\mu l}{\Phi\rho_0 c_0 d^2}\left(\sqrt{1+\frac{\chi^2}{32}}+\frac{\sqrt{2}\chi d}{8l}\right) \tag{2}$$

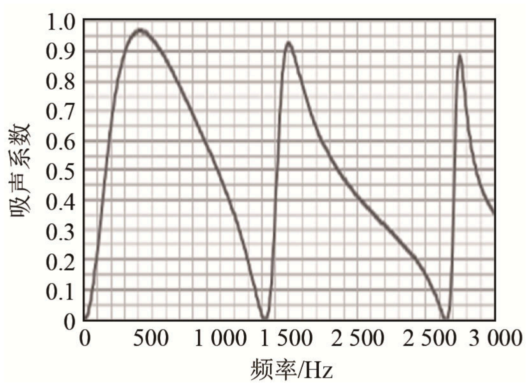
$$\rho=\frac{\omega l}{\Phi c_0}\left(1+\frac{1}{\sqrt{9+\dfrac{\chi^2}{2}}}+\frac{8d}{3\pi l}\right) \tag{3}$$

式中：α 为微穿孔板正入射吸声系数；γ 为微穿孔板的相对声阻率；ρ 为微穿孔板的相对声抗率；m 为微穿孔板的相对声质量；c_0 为空气中声速；ω 为角频率；D 为微孔背腔腔深。μ 为运动粘滞系数；l 为微孔孔深；Φ 为穿孔率；ρ_0 为空气密度；d 为微孔孔径；χ 为微孔半径与微孔孔口粘滞附面层厚度之比。

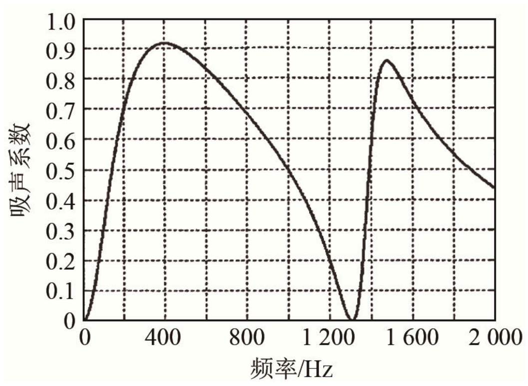
利用上述程序，计算参数为微孔孔径 d=0.2 mm、穿孔率 Φ=0.502%、微孔孔深 l=0.2 mm、背腔腔深 D_1=130 mm 的吸声体的吸声特性曲线，并将上述计算结果与文献[14]中的数据进行对比，如图 3

所示。

其中，图 3(a)为 Excel 软件计算的结果，图 3(b)为文献[14]中的资料数据。从图 3 中可以看出两者结果基本一致，证明了该程序的合理性。



(a) 软件计算结果



(b) 文献[14]中数据

图 3　微穿孔板吸声特性计算结果与文献对比

Fig.3　The comparison of the calculated results of micro-perforated panel's sound absorption characteristics with literature data

2.3　SMPA 吸声特性仿真与实测结果对比分析

SMPA 试样的制备面板上有 9 个微孔，微孔孔径 d=0.7 mm、微孔孔深 l=1 mm、背腔腔深 D_1=20 mm、背腔腔径 D_2=6 mm、试样外径 D_3=35 mm，每个微孔下对应一个小背腔，见图 1。利用微穿孔板材吸声特性仿真程序计算该结构的吸声特性，其穿孔率按照 $(d/D_3)^2$ 计算。得到该结构的理论共振吸声频率 f_0=570 Hz，对应吸声系数 α_0=0.96。

经阻抗管测试，得到该试样实际吸声性能：f_0 为 800 Hz、α_0 为 0.51。若在基于声电类比法微穿孔吸声方程中，穿孔率按照 $(d/D_2)^2$ 计算，则 f_0 为 1 060 Hz、α_0 为 0.85。可以看出，两种计算结果与测试结果差异均较大，f_0 明显移动，且 α_0 显著降低，说明小背腔对微穿孔板的吸声效果有较大影响；另一方面说明，该结构若利用声电类比法的微穿孔吸声方程计算，需界定清楚其穿孔率的计算方法。

2.4　不同背腔腔深 SMPA 吸声特性仿真与实测结果对比

为明确小背腔对微穿孔的影响，利用阻抗管测试方法研究背腔腔深变化对微穿孔吸声体吸声特性的影响，设计以下试验：测试一系列面板上有 9 个微孔、微孔孔径 d 为 0.7 mm、微孔孔深 l 为 1 mm、背腔腔径 D_2 为 35 mm 的微穿孔吸声体，其腔深 D_1 分别为 10～80 mm，步长为 10 mm，编号分别为 2-1～2-8。利用微穿孔板材吸声特性仿真程序计算，并与阻抗管测试结果对比，试验结果见表 1，其中穿孔率按照 $(d/D_2)^2$ 计算。表 1 中峰值半高宽为吸声峰值的一半及以上对应的频率范围。

表 1　不同腔深对吸声性能的影响

Table 1　The effect of different cavity depths on the sound absorption performance

腔深/mm	计算值			实测值		
	f_0/Hz	α_0	峰值半高宽/Hz	f_0/Hz	α_0	峰值半高宽/Hz
10	814	0.94	666～995	857	0.89	709～1 060
20	570	0.96	440～739	661	0.94	530～823
30	462	0.97	341～625	564	0.95	442～739
40	398	0.98	284～557	505	0.96	380～663
50	354	0.98	245～510	502	0.92	200～650
60	321	0.99	217～475	455	0.95	182～602
70	296	0.99	195～449	447	0.95	160～580
80	276	0.99	178～426	425	0.95	140～550

从表 1 中可以看出，基于声电类比法微穿孔吸声方程的仿真程序计算值与实测值差距较大：f_0 的实测值要高于计算值，而 α_0 则低于计算值，但计算值所显示的变化趋势与实际值仍保持一致。

2.5　不同背腔腔径 SMPA 吸声特性仿真与实测结果对比

为了研究背腔腔径变化对 SMPA 试样吸声特性的影响，设计了以下试验：制备了一系列面板上有 1 个微孔、微孔孔径 d 为 0.5 mm、微孔孔深 l 为 1 mm、背腔腔深 D_1 为 20 mm 的 SMPA 试样，其腔径 D_2 分别为 5～25 mm，步长为 5 mm，编号分别为 3-1～3-5，其 PMI 夹芯泡沫如图 4 所示，试验结果如图 5 所示。

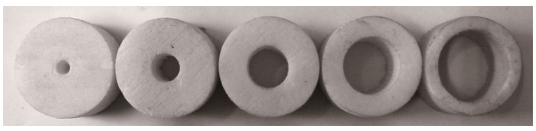


图 4　不同背腔腔径尺寸的 PMI 泡沫

Fig.4　Various PMI foams with different back cavities

从图 5 中可以看出，随着背腔腔径变小，SMPA 的吸声频率向高频移动，吸声系数降低。这与目前

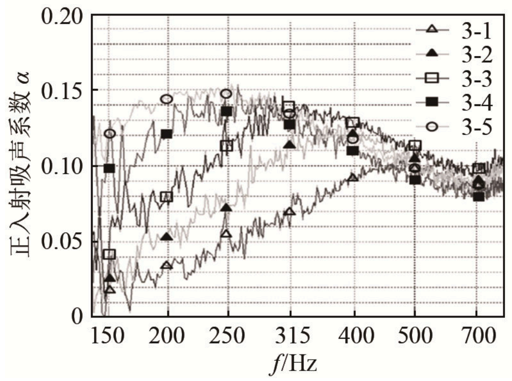


图 5 不同背腔腔径的 SMPA 试样吸声特性曲线

Fig.5 The sound absorption characteristics of the SMPAs with different back cavity diameters

大空腔的微穿孔板吸声体声学非局域特点不同，SMPA 试样吸声特性受其背腔影响较大，且背腔腔径或腔深越小，即每个微穿孔对应的背腔体积越小，吸声性能越被抑制。

这与文献[8-10]的研究结果有差别，Liu J 等[8-9]认为蜂窝的加入可以使微孔内空气质点振动加快，从而改善材料吸声性能；而 Kimihiro S 等[10]认为蜂窝板材的流阻引起的低频吸声峰不受局域参数的影响，故使材料的吸声频带更宽、并移向低频。

出现上述差别的原因可能是文献[8-10]所使用的蜂窝材料均为薄壁件(约为 1 mm)，而本文讨论的 PMI 泡沫背腔腔壁相对较厚(至少 5 mm)。与薄壁蜂窝相比，采用 PMI 泡沫背腔会使微穿孔板后空间大幅缩减。同时，PMI 泡沫背腔与面板、底板用结构胶胶粘为一体，形成强约束条件，自身振动困难，相当于刚性面，难以对微穿孔吸声特性产生增益。上述结构变化引起吸声体的声阻显著增加，微孔内空气质点振动受到抑制，导致 SMPA 试样的共振吸声峰移向高频、吸声系数下降。

2.6 小背腔对组合微穿孔吸声特性影响分析

在微穿孔吸声理论中，两种微孔在同一块板上属于并联结构，分别发挥作用，可以有效拓宽吸声频带[13]。组合微穿孔主要有两种设计思路：(1) 少量小孔提高低频性能，多个大孔提高高频性能；(2) 少量大孔提高低频性能，多个小孔提高高频性能。

根据上述理论设计如下试验：制备一系列微孔孔深 l 为 1 mm、背腔腔深 D_1 为 20 mm、背腔腔径 D_2 为 24 mm、试样外径 D_3 为 35 mm 的 SMPA 试样，其面板上微孔组合方案及吸声特性仿真计算结果如表 2 所示，试样编号为 4-1～4-5。

图 6 为试样 4-1～4-5 的阻抗管实测吸声特性，均未在图中发现双吸收峰现象，这表明在该小局域条件下可能不存在组合孔的协同吸声效应；且穿孔

表 2 组合微穿孔方案设计及理论计算结果

Table 2 Scheme design and theoretical sound absorption results of combined micro-perforation

试样编号	第一种微孔(低频孔)				第二种微孔(高频孔)			
	孔径/mm	孔数	f_0/Hz	α_0	孔径/mm	孔数	f_0/Hz	α_0
4-1	0.4	5	227	0.22	0.7	4	307	0.61
4-2	0.8	1	218	0.47	0.4	12	353	0.44
4-3	0.8	1	218	0.47	0.4	20	456	0.61
4-4	0.8	1	218	0.47	0.5	8	336	0.51
4-5	0.8	1	218	0.47	0.5	12	412	0.64

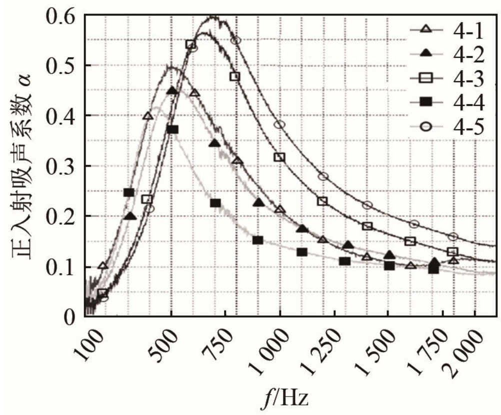


图 6 试样 4-1～4-5 的吸声特性曲线

Fig.6 The sound absorption characteristic curves of SMPA sample 4-1~4-5

率越大，吸声体共振峰越往高频移动。

2.7 SMPA 试样吸声频率的精确计算

由上述试验可知，基于声电类比法微穿孔吸声方程不适合直接用于预测 SMPA 试样吸声特性，需按照其结构特点重新设计一种计算方法。经分析，该类吸声体属于亥姆霍兹共振器的一种，亥姆霍兹共振器吸声公式如式(4)示[15]：

$$f_0=\frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{S}{l_e V_0}} \tag{4}$$

式中：c 为空气中声速；l_e 为有效孔深；S 为微穿孔截面积；V_0 为每个小孔分得的空腔容积。

由文献[15]可知，这种短管达到背腔但不深入的情况，l_e 取值为(l+0.73d)，其中 l 为孔深，d 为孔径。若采用式(4)直接计算 SMPA 试样的吸声频率，其理论值与实际值仍然差距很大，需对其进行修正。本论文将有效孔深 l_e 改为修正值 L，对于不同结构的吸声体采用不同的修正值。

从上述测试结果可知，SMPA 试样吸声特性主要受穿孔率、背腔体积的影响，而本项研究以微孔孔径 0.5 mm、背腔腔深 20 mm 的 SMPA 试样为应用对象，故接下来针对不同微孔孔数、不同背腔腔径对吸声体吸声特性的影响规律开展研究。

2.7.1 不同孔数 SMPA 试样吸声频率的计算修正与验证

对于背腔腔径 D_2 为 25 mm、背腔腔深 D_1 为 20 mm、面板分别打 1、4、9、21 个孔径 d 为 0.5 mm 微孔的 SMPA 试样，其阻抗管测试结果如表 3 所示，根据式(4)反推有效腔深修正值 L。

假设修正值 L 为微穿孔孔数 n 的方程，见式(5)：

$$L(n)=an^3+bn^2+cn+e \tag{5}$$

代入表 3 中的数值，可得 a=2.65×10^{-4}，b=−1.30×10^{-2}，c=1.94×10^{-1}，e=7.68×10^{-1}。

按式(5)求得其它孔数的修正值 L，见表 4。

表 3　Φ25 mm 腔径、20 mm 腔深和不同孔数的 SMPA 试样吸声特性

Table 3　The sound absorption characteristics of the SMPA with Φ25 mm cavity diameter, 20 mm cavity depth and different hole numbers

孔数	实测 f_0/Hz	修正值 L
1	253	0.95
4	420	1.35
9	580	1.64
21	725	1.56

表 4　Φ25 mm 腔径、20 mm 腔深和不同孔数的 SMPA 试样修正值 L

Table 4　The correction value L of SMPA with Φ25 mm cavity diameter and 20 mm cavity depth and different hole numbers

孔数 n	修正值 L	孔数 n	修正值 L	孔数 n	修正值 L
1	0.95	8	1.62	15	1.65
2	1.11	9	1.65	16	1.63
3	1.24	10	1.67	17	1.61
4	1.35	11	1.68	18	1.59
5	1.45	12	1.68	19	1.58
6	1.52	13	1.68	20	1.57
7	1.58	14	1.66	21	1.54

对表 4 中结果进行验算，在背腔腔径 D_2 为 25 mm、背腔腔深 D_1 为 20 mm 的 SMPA 试样面板上分别打 2、3、4、5 个孔径 d 为 0.5 mm 的微孔，用阻抗管测试其吸声特性，并与计算值相比较。结果如表 5 所示。

从表 5 中可知，f_0 声电类比法公式计算值与实际值相差 30%～45%；亥姆霍兹公式修正前后，两值相差分别在 18%、8%以内，相差不大。

表 5　Φ25 mm 腔径、20 mm 腔深和不同孔数的 SMPA 试样的 f_0 修正验证

Table 5　The verification of the f_0 correction of the SMPA with Φ25 mm cavity diameter, 20 mm cavity depth and different hole numbers

孔数	f_0 计算值/Hz			f_0 实际值/Hz
	声电类比法公式	修正前亥姆霍兹公式	修正后亥姆霍兹公式	
2	195	293	333	360
3	239	359	385	384
4	275	414	425	434
5	309	463	460	450

2.7.2 不同腔径 SMPA 试样吸声频率的计算修正与验证

对于背腔腔深 D_1 为 20 mm、面板打 1 个孔径 d 为 0.5 mm 微孔、不同背腔腔径的 SMPA 试样，其修正前亥姆霍兹公式 f_0 计算值及阻抗管测试结果见表 6。从表中可以看到腔径越小，利用修正前亥姆霍兹公式的 f_0 计算值与实测值偏差越大。

进行公式(5)相同的推演可得，对于单孔(Φ0.5 mm)单腔的试样，其修正值 L 与腔径 D 的函数为：

$$L(D)=1.99\times10^{-4}D^4-1.47\times10^{-2}D^3+4.01\times10^{-1}D^2-4.81\times10^{-1}D+23.55 \tag{6}$$

对公式(6)进行验算，背腔腔深 20 mm、面板打 1 个孔径为 0.5 mm 微孔、腔径分别为 22、16 mm 的 SMPA 试样的 f_0 计算值和实测值见表 7。由表 7 可见，f_0 计算值和实测值差距较小。

表 6　不同腔径和腔深的 SMPA 试样频率 f_0 的计算和测试数据

Table 6　The computed and tested f_0 values of the SMPA with different cavity diameters and cavity depths

序号	腔径/mm	腔深/mm	修正前亥姆霍兹公式 f_0 计算值/Hz	实测 f_0/Hz
1	4.60	19.94	1128	469
2	9.54	20.00	543	388
3	14.60	20.00	355	306
4	19.54	19.96	265	259
5	24.60	19.80	212	253

表 7　不同腔径、20 mm 腔深的 SMPA 试样的 f_0 修正验证

Table 7　The verification of the f_0 correction of the SMPA with different cavity diameters and 20 mm cavity depth

序号	背腔腔径/mm	f_0/Hz	
		计算值	实测值
1	21.8	257	259
2	15.6	294	283

2.7.3 SMPA 试样吸声频率预测与验证

利用式(4)～(6)对背腔腔深 D_1 为 20 mm、腔径 D_2 为 22 mm、试样外径 D_3 为 35 mm、微孔孔径 d 为 0.5 mm、不同数量微孔的 SMPA 试样的 f_0 进行预测，并与修正前亥姆霍兹公式、声电类比法公式计算结果进行比较，试验结果如图 7 所示。

从图 7 中数据可以看出，f_0 实测值与修正后亥姆霍兹公式计算值差距最小，两值偏差在 8%以内，说明上述 SMPA 试样吸声特性计算方法简单、可行。

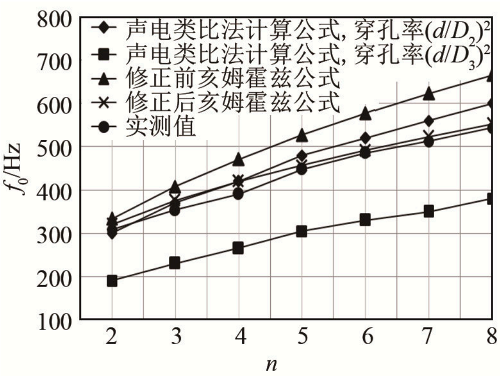


图 7 背腔腔深 20 mm、腔径 Φ22 mm、不同穿孔数夹芯微穿孔吸声体的 f_0 值

Fig. 7 The f_0 values of the SMPA with Φ22mm cavity diameter, 20 mm cavity depth and different hole numbers

3 结 论

(1) 通过将微穿孔制备在 SMPA 试样面板上，赋予材料吸声特性，并具有一定刚度，能满足一些特殊降噪场合需求。研究发现小背腔的存在明显抑制了微穿孔的吸声，使其吸声频率移向高频、吸声系数降低，可能是 PMI 泡沫背腔腔壁相对较厚、强约束下振动困难，抑制了微孔孔内空气质点的振动导致；未发现该声学结构组合微孔的协同吸声效应；基于声电类比法微穿孔吸声方程可能并不适用于该结构吸声特性的预测和设计。

(2) SMPA 试样的结构相当于将一系列亥姆霍兹共振器串联，故利用亥姆霍兹吸声公式等声学理论，建立了一种适用于该小局域条件下微穿孔吸声特性的计算方法。通过阻抗管测得的 SMPA 试样吸声特性，推导出了公式中有效腔深修正值 L 分别与微穿孔孔数 n、背腔腔径 D_2 的函数关系，试验验证可行。该计算方法可解决上述带有小背腔的 SMPA 试样的结构参数的设计问题，为优化该 SMPA 试样的特性提供依据。

参 考 文 献

[1] 刘海. 隔吸声复合式蜂窝夹层板结构的设计与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士论文, 2013.
LIU Hai. Design and experimental analysis of acoustic insulation and absorption composite honeycomb sandwich structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.

[2] 裴春明, 周兵, 李登科, 等. 多孔材料和微穿孔板复合吸声结构研究[J]. 噪声与振动控制, 2015, **35**(5): 35-38.
PEI Chunming, ZHOU Bing, LI Dengke, et al. Study on the composite sound absorber made up of porous materials and MPP[J]. Noise and Vibration Control, 2015, **35**(5): 35-38.

[3] 孙亚飞, 陈仁文, 徐志伟, 等. 应用微穿孔板吸声结构的飞机座舱内部噪声控制实验研究[J]. 声学学报, 2003, **28**(4): 294-298.
SUN Yafei, CHEN Renwen, XU Zhiwei, et al. Experimental research of noise control in the fighter cockpit using microperforated panel absorber structure[J]. Acta Acustica, 2003, **28**(4): 294-298.

[4] 刘秀娟. 非均匀背衬微穿孔吸声结构的研究及其在吸声屏障中的应用[D]. 上海: 上海交通大学硕士论文, 2006.
LIU Xiujuan. The research to micro-perforated panel acoustic absorbers with heterogeneous cavities and their application in noise barrier[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2006.

[5] 荆东明, 龚宪生. 计算机辅助设计在微穿孔声屏障设计中的应用[J]. 噪声与振动控制, 2006, **26**(3): 92-95.
JING Dongming, GONG Xiansheng. Application of computer aided design in structural design of microperforated-panel sound barrier[J]. Noise and Vibration Control, 2006, **26**(3): 92-95.

[6] 杨军伟, 蔡俊, 邵骢. 微穿孔板--蜂窝夹芯复合结构的隔声性能[J]. 噪声与振动控制, 2013, **33**(4): 122-125.
YANG Junwei, CAI Jun, SHAO Cong. Sound insulation property of the composite structure with micro-perforated panels and honeycomb core[J]. Noise and Vibration Control, 2013, **33**(4): 122-125.

[7] 俞悟周. 高架道路渐变空腔微穿孔声屏障的设计和降噪[J]. 环境污染与防治, 2008, **30**(7): 55-57.
YU Wuzhou. Design and noise reduction of elevated road barrier of micro-perforated panels with linear-change cavity[J]. Environmental Pollution & Control, 2008, **30**(7): 55-57.

[8] LIU J. Advanced studies on series impedance in waveguides with an emphasis on source and transfer impedance[D]. Kentucky: University of Kentucky, 2011, 117-135.

[9] LIU J, Herrin D W. Enhancing micro-perforated panel attenuation by partitioning the adjoining cavity[J]. Applied Acoustics, 2010, **71**(2):120-127.

[10] Kimihiro S, Ippei Y, Motoki Y, et al. Sound absorption characteristics of a honeycomb-backed microperforated panel absorber: Revised theory and experimental validation[J]. Noise Control Engineering Journal, 2010, **58**(2):157-162.

[11] 钱玉洁. 宽频带单层微穿孔板吸声体的研究[D]. 合肥：中国科学技术大学博士论文, 2014.
QIAN Yujie. Research on broadband single-layer micro-perforated panel absorber[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.

[12] 马大猷. 微穿孔板吸声体的准确理论和设计[J]. 声学学报，1997, **22**(5): 385-393.
MA Dayou. General theory and design of microperforated-panel absorbers[J]. Acta Acustica, 1997, **22**(5): 385-393.

[13] 王鹏, 王敏庆, 刘彦森, 等. 并联微穿孔板吸声结构研究[J]. 压电与声光, 2008, **30**(4): 489-491.
WANG Peng，WANG Minqing，LIU Yansen, et al. Study on the Parallel Microperforated Panels[J]. Piezoelectectrics & Acoustooptics, 2008, **30**(4): 489-491.

[14] 崔文静. 组合微穿孔板的吸声性能研究[D]. 太原: 太原理工大学硕士论文, 2008.
CUI Wenjing. Study on performance of the combine microperforated panel sound-absorbing constructions[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008.

[15] 马大猷. 亥姆霍兹共鸣器[J]. 声学技术, 2002, **21**(z1):2-3.
MA Dayou. Helmholtz resonator[J]. Technical Acoustics, 2002, **21**(z1): 2-3.