

文章编号:1000-8055(2012)04-0770-07

基于切向流效应的宽频带穿孔板声衬的研究

黄伟稀¹, 侯 宏¹, 李 斌², 方献良², 诸永定²

(1. 西北工业大学 航海学院, 西安 710072;

2. 宁波方太厨具有限公司 电气部, 浙江 慈溪 315336)

摘 要: 对于大孔径穿孔板,减小声质量是实现宽带吸声的关键,而切向流效应可以提高穿孔板声阻、减小声质量,从而实现大孔径穿孔板宽频带吸声。基于上述结论,提出了切向流条件下穿孔板声衬参数的设计原则,并设计了穿孔板消声器实验,实验结果表明:对于大孔径穿孔板,低声质量的通流声衬吸声频带明显宽于无流条件的声衬。这种声衬在航空发动机消声短舱、汽车发动机进排气管道、各种通风管道等存在较大气流环境的消声具有实际意义。

关 键 词: 穿孔板声衬; 切向流效应; 低声质量; 吸声带宽; 消声器

中图分类号: V231.3; O429

文献标志码: A

Broadband sound-absorption of perforated lining in the presence of grazing flow

HUANG Wei-xi¹, HOU Hong¹, LI Bin², FANG Xian-liang², ZHU Yong-ding²

(1. College of Marine,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Electrical Department,

Ningbo Fotile Kitchenware Company Limited, Cixi Zhejiang 315366, China)

Abstract: For large aperture perforation plate, reducing acoustic mass is a way to realize broadband sound absorption. Meanwhile, the acoustic resistance can be enlarged due to the grazing flow effect as well as the reduction of the acoustic mass. Based on above results, the designing principle was proposed for the parameters of the perforation plate. Besides this, the perforated plate muffler experiment was also conducted. The experimental results show that broadband sound absorption can be achieved for large aperture perforation plate with low acoustic mass in the presence of grazing flow when compared with that of perforated lining without grazing flow. Such perforation plate can be applied to the noise reduction of the aircraft engine nacelle, inlet and exhaust pipe of motor engine, and all kinds of ventilation pipe with large air flow.

Key words: perforated lining; grazing flow effect; low acoustic mass; sound-absorption bandwidth; muffler

穿孔板吸声体是一种阻抗复合型吸声结构。马大猷先生在上世纪 70 年代的时候已经完成了穿孔板吸声结构的理论推导与计算^[1],90 年代时

提出了准确计算理论^[2]。穿孔板结构的吸声性能受到孔径、穿孔率、板厚、空腔深度等参数的影响,各种参数对穿孔板结构吸声系数的影响规律前人

收稿日期:2011-05-27; 修订日期:2012-02-20

基金项目:西北工业大学研究生创业种子基金(Z2011036)

作者简介:黄伟稀(1985—),男,广西贵港人,硕士生,研究领域为噪声与振动控制。

已经做了很多的研究^[3-4],因为涉及多种因素,在穿孔板的设计和吸声频带分析时显得较为繁琐,往往会顾此失彼.本文以整体的声质量为出发点,研究了声质量对穿孔板结构吸声带宽的影响.理论和仿真分析表明:声质量是影响穿孔板结构的吸声带宽的关键性因素,减小声质量有助于拓宽吸声频带.

减小穿孔板孔径可以减小声质量、提高声阻,把孔径减小到0.1毫米级(即微穿孔板)可以设计出具有良好吸声效果的宽频带吸声结构.但是很多情况下穿孔板表面有较大的气流通过且气流中含有灰尘、烟雾等,会堵住穿孔板的小孔,这种环境下必须使用大孔径的穿孔板.而对于大孔径的穿孔板,一方面可以通过设计较小的穿孔率增大声阻以实现较高的吸声系数,但减小穿孔率的同时会增大声质量,从而使吸声频带变得很窄;另一方面,如果保持较大的穿孔率以实现较低的声质量,那么声阻会很小,声阻减小将导致最大吸声系数减小,吸声频带变窄.因此对于大孔径的穿孔板,静态条件下无法在保证较高吸声系数的同时实现较宽的吸声频带.

然而,已有的研究表明:切向流对穿孔板声阻抗及吸声性能有很大的影响.总体上讲,切向流可以增加穿孔板的声阻同时减小声质量,从而改善其吸声特性.切向流效应对穿孔板声阻抗的影响预测目前已经有几种比较成熟的理论模型.1996年Howe等^[5]使用质点位移连续条件匹配小孔剪切层两侧的声场建立了一种切向流影响穿孔板声阻抗的模型;2002年景晓东等^[6]则利用法向质点速度连续条件来建立模型,通过在小孔前缘施加Kutta条件来反映切向流效应中所包含的声涡转化机制.1986年Narayana K与Munjal M L^[7]用经验和实验总结的方法提出了指定参数范围的经验公式,并对气流条件下的消声器进行了实验和分析;2003年Lee S H和Ih J G也提出了切向流条件下小孔声阻抗的经验模型^[8].

在切向流的条件下,对于大孔径的穿孔板,可以设计较高的穿孔率实现较低的声质量,通过切向流效应提高其声阻,最终实现较高的吸声系数和较宽的吸声频带.因此切向流的应用为大孔径穿孔板实现宽频带吸声提供了一种有效的途径.根据各种文献来看,目前切向流效应对穿孔板声阻抗影响的研究均未讨论声质量对带宽的影响,在确定流速的情况下对穿孔板声衬的参数设计方面的工作也比较缺乏.在实际应用中,声衬表面往

往不可避免地存在较高流速的切向气流,因此基于切向流效应的低声质量宽频带穿孔板声衬的研究是一个重要的课题.

1 穿孔板吸声结构吸声带宽的分析

穿孔板吸声结构正入射的吸声系数^[1]为

$$\alpha = \frac{4r}{(1+r)^2 + [\omega m - \cot(\omega D/c)]^2} \quad (1)$$

其中 r 为相对声阻, m 为相对声质量, ω 为角频率, D 为空腔深度, c 为声速.

共振频率:当质量抗和声容抗相等时发生共振,此时吸声系数最大.

$$\omega_0 m = \cot(\omega_0 D/c) \quad (2)$$

频带宽度:对于穿孔板的吸声带宽,一般依据半吸声频带宽度(即吸声系数为最大吸声系数一半时的频率比)来衡量.但是半吸声频带很大并不代表吸声性能就好,如果最大吸声系数很小,那么即使频率比很大,其吸声性能也是不好的.本文使用马大猷先生在文献^[9]提出的0.5吸声系数带宽为有效吸声频带,即把吸声系数大于0.5的频带作为有效吸声频带,用上下限频率比 ω_2/ω_1 作为衡量带宽的参量.

1.1 微穿孔板

文献^[9-10]对微穿孔板吸声带宽极限进行了讨论:当孔径减小至0.1 mm左右时, ωm 远远小于 $(1+r)$,吸声频率比 ω_2/ω_1 仅仅与声阻 r 有关,与声质量和空腔深度无关,关系式^[9]如下:

$$\omega_2/\omega_1 = f_2/f_1 = \pi/\operatorname{arccot}[8r - (1+r)^2] \quad (3)$$

根据上式的计算,当 $r=2$ 或 $r=3$ 时带宽最大值,吸声频带可达3个倍频程,声阻率超过3以后,最大吸声系数减小,吸声频带也随着变窄.

1.2 较大孔径穿孔板($d \geq 1$ mm)

孔径较大的穿孔板不满足 ωm 远小于 $(1+r)$ 的条件,式(3)并不适用.式(1)中 α 取0.5,可导出

$$\cot(\omega_1 D/c) - \omega_1 m = [8r - (1+r)^2]^{1/2} \quad (4)$$

$$\cot(\omega_2 D/c) - \omega_2 m = -[8r - (1+r)^2]^{1/2} \quad (5)$$

从上式可以看出,0.5吸声系数频带上下限频率与声阻、声质量、腔深有关.图1是大孔径穿孔板带宽与声阻 r 、声质量 m 和腔深 D 的关系图,直线 ωm 代表质量抗,曲线 $\cot(\omega D/c)$ 代表声容抗,两者的交点对应的频率为共振频率,两者差值为 R

时,对应的频率是 0.5 吸声系数带宽的上下限频率, $R=[8r-(1+r)^2]^{1/2}$.

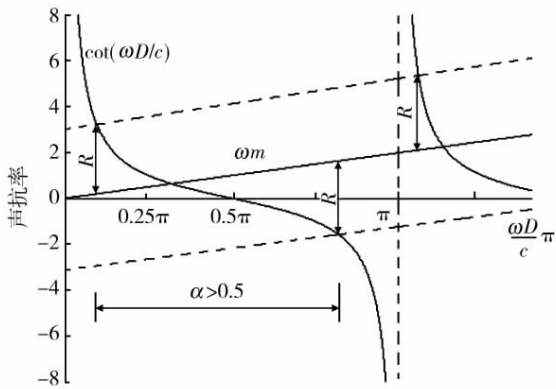


图 1 大孔径穿孔板的 0.5 吸声系数带宽
Fig. 1 0.5 absorption coefficient bandwidth of the large aperture perforation plate

声阻率 r : R 是两曲线在上下限频率处的差值, R 增大时,下限频率往低频移动,上限频率往高频移动,因此吸声频带加宽. $r=1$ 时, $R=2$; $r=2$ 时, $R=\sqrt{7}$; $r=3$ 时, $R=\sqrt{8}$; 而 $r=4$ 时, R 又回到 $\sqrt{7}$. 因此在声质量和腔深一定的情况下,声阻为 2 或者 3 时达到最大带宽.

相对声质量 m : 在声阻、空腔深度一定的前提下, m 越小,直线 ωm 的斜率越小,吸声频带越宽. 表 1 是在不同声阻率条件下 0.5 吸声系数频率比与声质量的关系,可以看到,吸声带宽和上下限频

表 1 吸声带宽与声质量的关系

Table 1 Relationship of the sound-absorption bandwidth and acoustic mass

r	$m/10^{-4}$	D/mm	$\alpha=0.5$ ω_2/ω_1	$\alpha=0.5$ f_1/Hz	$\alpha=0.5$ f_2/Hz
1	1.1	130	5.8	180	1050
1	2.2	130	5.6	170	947
1	4.4	130	4.5	159	719
1	8.8	130	3.3	140	460
3	1.1	130	8.1	139	1231
3	2.2	130	7.9	135	1060
3	4.4	130	6.7	128	850
3	8.8	130	4.2	130	550
5	1.1	130	5.1	200	1020
5	2.2	130	4.7	190	910
5	4.4	130	4.2	166	692
5	8.8	130	3.0	150	450

率比随着声质量的减小而单调性地增大,而声阻率的变化没有改变声质量对吸声带宽的影响趋势. 图 2 是不同声质量对应的吸声系数曲线,从图中可以直观地看到,随着声质量的减小,吸声频带显著加宽了. 因此减小声质量是实现宽频吸声最有效的措施.

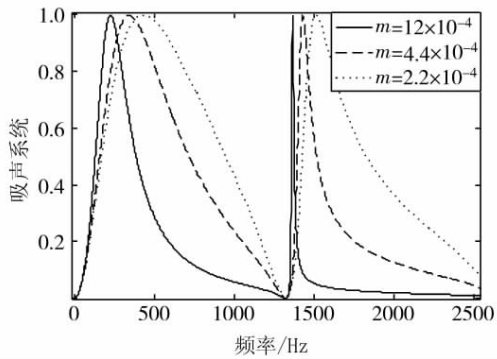


图 2 声质量对带宽的影响($r=1.1, D=130\text{ mm}$)
Fig. 2 Effect of the acoustic mass on the bandwidth

另一方面,空腔深度也会影响大孔径穿孔板的吸声带宽, D 越大频带越宽. 腔深 D 太大会占用空间,通过增大 D 来拓宽吸声频带是不合理的. 因此,对于较大孔径的穿孔板,声质量是实现宽频带吸声最关键的决定性因素. m 是穿孔板结构的声质量,在物理意义上来讲,它代表穿孔板小孔中空气柱的质量,声质量与空腔的声容共同构成穿孔板结构的声抗.

2 切向流效应对穿孔板声阻抗及吸声性能的影响

关于切向流对穿孔板声阻抗影响的各种理论模型之间有一定的差别,而且计算方法都比较复杂. 因此,我们更偏向于寻找一种能反映切向流对声阻抗影响规律趋势的简单公式. Rao N K 与 Munjal M L^[7] 在 1986 年经过大量的实验研究总结出了一个对于特定参数范围的经验公式(6)和公式(7),其适用范围为: $0.05 \leq Ma \leq 0.2, 0.03 \leq \sigma \leq 0.1, 1\text{ mm} \leq t \leq 3\text{ mm}, 1.75\text{ mm} \leq d_h \leq 7\text{ mm}$.

$$R = 7.337 \times 10^{-3} (1 + 72.23Ma) / \sigma \quad (6)$$

$$X =$$

$$[2.2 \times 10^{-5} f(1 + 51t)(1.0 + 204.0d_h)] / \sigma \quad (7)$$

Lee S H 和 Ih J G 在 2003 年提出的经验公式^[8]

$$R_n = a_0(1 + a_1 |f - f_0|)(1 + a_2 Ma) \times (1 + a_3 d)(1 + a_4 t)/\sigma \quad (8)$$

其中 $f_0 = 412(1 + 104Ma)/(1 + 274d)$, $a_0 = 3.94 \times 10^{-4}$, $a_1 = 7.84 \times 10^{-3}$, $a_2 = 14.9$, $a_3 = 296$, $a_4 = -127$.

$$X = b_0(1 + b_1 d)(1 + b_2 t)(1 + b_3 M)(1 + b_4 f)/\sigma \quad (9)$$

其中 $b_0 = -6 \times 10^{-3}$, $b_1 = 194$, $b_2 = 432$, $b_3 = -1.72$, $b_4 = -6.62 \times 10^{-3}$.

从这两种经验公式可以看出,穿孔板声阻率与切向流流速基本上呈线性递增的关系,流速增大时,声阻率增大而声质量抗则会减小;而且切向流并不改变其他参数对声阻抗的影响规律,在没有切向流的情况下,其他参数(如孔径、穿孔率、板厚度等)与声阻抗的关系未发生本质的改变,因此,切向流可以作为一个独立参数进行分析。

陈敬^[11]在其硕士论文中给出了大量的关于切向流与偏流相互作用对穿孔板声阻抗影响的实验数据,本文主要关注并采用其切向流的部分。图3、图4分别是其中一种穿孔板(孔径3.2 mm,板厚0.5 mm,穿孔率1.7%)的声阻率和声抗率随切向流流速变化的关系。此处的声抗仅包括穿孔板本身的质量抗,而未考虑后空腔的容抗。从图的曲线规律可以看出,随着流速的增加,声抗减小,意味着声质量减小。穿孔板的声阻和声质量在不同频率上的值是不一样的,但是为了计算方便,本文把两种频率上的声阻、声质量值进行平均,空腔深度取130 mm,用公式(1)计算吸声系数,画出三种不同流速下的吸声系数曲线,如图5。从图的对比可看到,随着流速的增加,穿孔板的吸声频带明

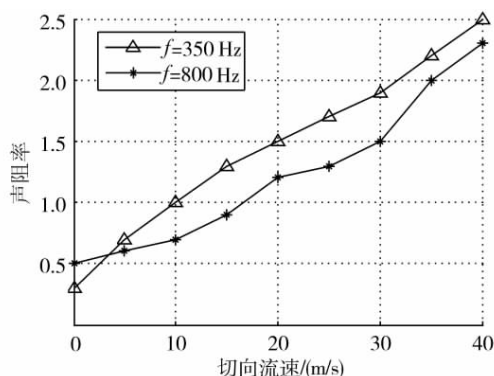


图3 声阻率与切向流速的关系

Fig. 3 Relationship of acoustic resistance and the velocity of grazing flow

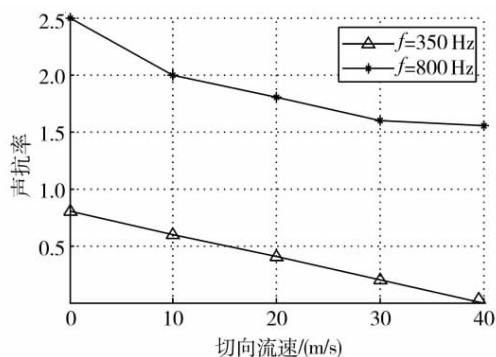


图4 声抗率(ωm)与切向流速的关系

Fig. 4 Relationship of acoustic reactance and the velocity of grazing flow

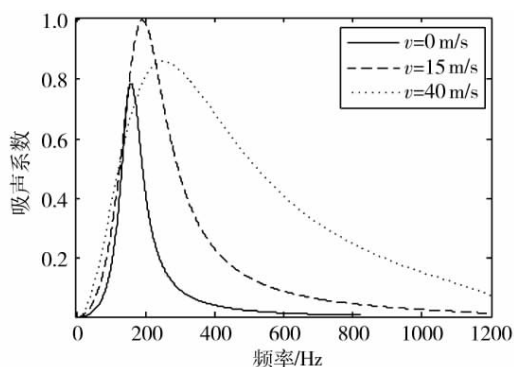


图5 穿孔板吸声系数曲线与切向流速的关系

Fig. 5 Relationship of sound-absorption coefficient curve and the velocity of the grazing flow

显加宽。切向流可以提高穿孔板的声阻,减小声质量,这两方面都是拓宽吸声频带的重要原因。当然声阻也不能太大,超过3以后带宽就会变窄,这是上文得出的结论。

3 声衬设计及实验

通流声衬总的设计原则是:在保持合理声阻的前提下设计较小的声质量。切向流本身可以减小穿孔板的声质量,拓宽吸声频带,然而对于大孔径的穿孔板来说,其声质量仍然较大,可以通过穿孔板几何参数进一步减小声质量。静态条件下声质量与穿孔率、孔径、板厚度都有关系^[2]

$$m = \frac{0.294 \times 10^{-3} t}{p} k_m \quad (10)$$

$$k_m = 1 + \left(9 + \frac{k^2}{2}\right)^{-1/2} + 0.85 \frac{d}{t} \quad (11)$$

穿孔板常数 $k = 0.21d \sqrt{f_0}$, d 为孔径(mm), t 为板厚(mm), p 为穿孔率(%)。

由以上公式及计算机仿真分析可知,减小板厚可以减小声质量,同时也会减小声阻,可以根据

声阻和实际刚度的需要合理选择板厚,但是不能太厚,如果太厚则会增大声质量,同时较大的厚度会导致切向流效应在一定流速范围内失效^[6](文献^[6]称为下沉区),若无特别要求,板厚一般选择 0.5~1 mm. 减小孔径 d 可以减小声质量增大声阻,但是如引言所述,很多应用环境下需要用较大孔径的穿孔板,因此应结合实际应用的需要在可选择的范围内选取最小孔径. 穿孔率是唯一不受应用环境限制且对声质量有显著影响的参数,在考虑切向流效应保证合理声阻的前提下可以尽可能地增大穿孔率来减小声质量. 如果流速较高且设计合理,声质量可以接近微穿孔板的数量级,吸声效果可以接近于微穿孔板的效果. 腔深决定了吸声频率范围,腔深确定后,各吸声频段的位置就已确定,所以应根据实际噪声频率特性设计合理的腔深.

基于切向流效应对穿孔板吸声性能的影响,根据某型号抽油烟机的噪声辐射频率特性,设计了一种考虑切向流影响的低声质量宽频带穿孔板消声器用于油烟机排风管道的消声,实验结果表明:切向流条件下低声质量穿孔板消声器的消声性能优于一般穿孔板消声器,吸声频带较宽.

3.1 消声器参数设计

消声器结构如图 6 所示,消声器内径为 160 mm,内衬为穿孔板,等效空腔深度为 130 mm,消声器有效长度为 $l=250$ mm. 由于油烟机排风管道中的流速已经固定,所以根据低声质量的原则合理设计穿孔板参数使声阻率保持在 1 以上,穿孔板参数为

- 1) $d=1.2$ mm, $t=0.5$ mm, $p=1.1\%$;
- 2) $d=1.2$ mm, $t=0.5$ mm, $p=2.2\%$.

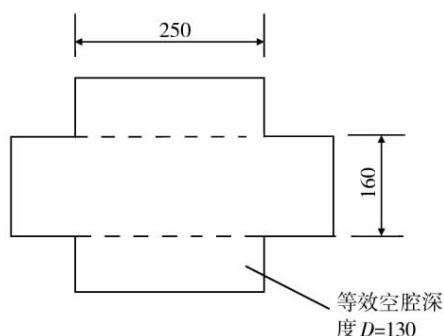


图 6 消声器结构示意图(单位:mm)

Fig. 6 Diagram of the muffler structure (unit:mm)

3.2 驻波管法测量穿孔板结构的吸声系数

用驻波管测量了与两种消声器内衬同样参数

的穿孔板. 测得 1 号板的声阻率 $r=1$, 2 号板 $r=0.4$, 吸声系数曲线如图 7 所示, 1 号板吸声效果好于 2 号板. 静态条件下, 根据穿孔板的理论, 穿孔率增大以后导致声阻减小从而使最大吸声系数减小, 从图 7 的对比可看出, 穿孔率为 $p=1.1\%$ 时穿孔板的最大吸声系数为 1; 但是当穿孔板增大到 $p=2.2\%$ 以后, 最大吸声系数变小, 吸声频带变窄.

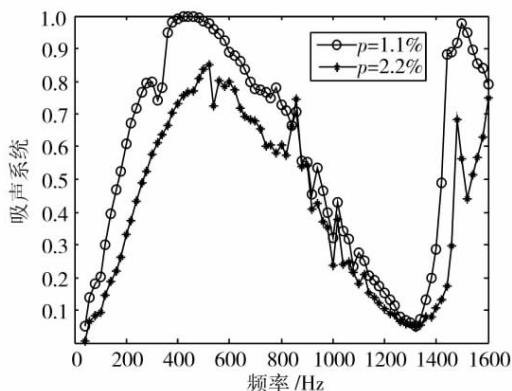


图 7 两种穿孔板的吸声系数曲线

Fig. 7 Absorption coefficient curves of two perforated plates

3.3 静态条件下消声器的插入损失测量

实验装置如图 8 所示, 实验在半消声室内进行. 数据采集系统主要包括: 声望 MPA201 + MA211 型 ICP(internal electronics piezoelectric) 传声器, SYV-75-3 型信号传输同轴电缆和 BNC-J12 型工业接口组成的屏蔽传输电缆, 美国国家仪器公司的 PXI 工业控制计算机和 PXI4472B 数据采集卡; 声源系统包括扬声器、声望 VS302USB 声学分析仪、功率放大器和计算机. 把 1 m 长的厚塑料排风管与消声器(0.5 m)连接, 扬声器在排风管左端发出一个白噪声, 用数据采集系统测量消

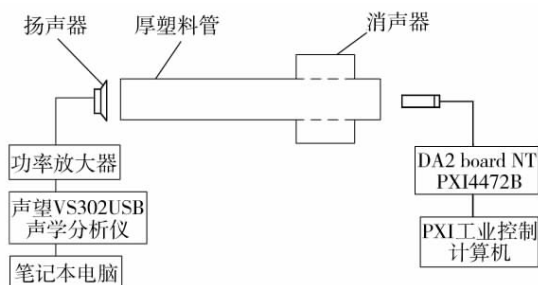


图 8 无流条件下消声器插入损失测量

Fig. 8 Measurement of the insertion loss of the muffler without grazing flow

声器右管口中心外 10 cm 处的噪声信号;然后撤掉消声器和 1 m 长的排风管,换上 1.5 m 长的排风管,采集同样测点的噪声信号。用声信号分析程序计算两种情况下采集的噪声信号的 A 声级,分析其噪声频谱,画出 A 声级频谱图。加消声器与不加消声器时各频段上 A 声级的差值就是消声器各频段的插入损失。插入损失曲线如图 9 所示,可以看到,静态条件下,1 号板的消声器吸声效果好于 2 号板的消声器,与驻波管的测量结果一致。

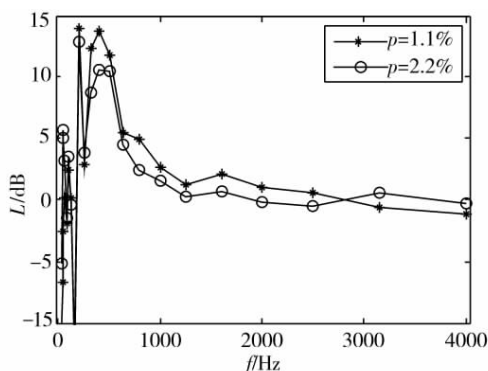


图 9 静态条件下消声器插入损失对比

Fig. 9 Comparison of the insertion loss of the mufflers without grazing flow

3.4 切向流条件下消声器的插入损失测量

有流条件下的测量实验装置如图 10 所示,测量方法与静态条件下消声器插入损失实验类似,只是声源变成了油烟机的噪声,而且排风管中有气流通过(流速为 14 m/s)。油烟机出风口与排风管紧密连接,在油烟机开机 20 min 后用声信号采集系统采集出风口处(测点位于出风口右上侧各 30 cm 处)的噪声信号;然后撤掉消声器和 1 m 长的排风管,换上 1.5 m 长的排风管,采集同样测点的噪声信号。

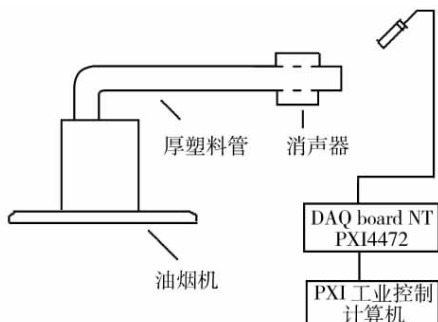


图 10 气流条件下消声器插入损失测量

Fig. 10 Measurement of the insertion loss of the mufflers with grazing flow

对噪声信号进行计算与分析,1 号板($p=1.1\%$)的消声器总消声量为 3 dB,而 2 号板($p=2.2\%$)的消声器总消声量为 4 dB,2 号板好于 1 号板。两种消声器总消声量偏小的原因是穿孔板消声器主要用于低频的吸声,空腔中未加吸声材料,对高频声的吸收很少;同时消声器管径较大而长度较小也是消声量偏小的原因之一。插入损失曲线如图 11 所示,可以看到,在切向流条件下,大穿孔率的消声器吸声频带明显宽于小穿孔率的消声器,与静态条件下的测量结果截然相反。插入损失曲线中 600~800 Hz 频段内的消声量明显降低,使曲线出现一个凹槽,这种现象在多次不同条件不同测量方法测量的结果中都会出现。这可能是由于板的振动引起的^[12],由于板厚较小,穿孔板在声音的激励下发生共振,在共振频率附近辐射噪声,使该频段的声量增大。

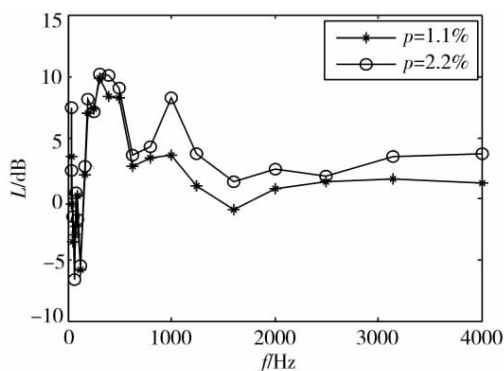


图 11 切向流条件下消声器插入损失对比

Fig. 11 Comparison of the insertion loss of the mufflers with grazing flow

由静态和切向流两种条件的实验对比可知,增大穿孔板的穿孔率后,无切向流条件下穿孔板结构的吸声性能变差;而切向气流条件下大穿孔率消声器的吸声效果优于小穿孔率的消声器。因此实验证明了两点:切向流能提高穿孔板的声阻;较低的声质量有利于拓宽穿孔板结构的吸声频带。

4 结 论

基于声质量对穿孔板吸声带宽的影响和切向流效应对声阻抗的影响,切向流条件下,合理选择气流参数和几何参数,大孔径穿孔板声衬可以实现宽频带吸声,通流声衬吸声频带明显宽于不通流声衬。在实际工程中,对于气流流速固定不变的环境,可以合理设计穿孔板的几何参数,在保证合理声阻的前提下尽量减小低声质量,以达到最大

吸声带宽,实现宽带吸声。

与普通多孔性吸声材料相比,大孔径穿孔板声衬具有防烟尘水雾、防火、耐高温、抗腐蚀等优点,可以在各种恶劣的环境下使用,因此穿孔板声衬在各种特殊环境中将会得到广泛应用,如航空发动机消声短舱、汽车发动机进排气管道、鼓风机、各种通风管道等的降噪。

参考文献:

- [1] 马大猷. 微穿孔板吸声结构的理论和设计[J]. 中国科学, 1975(1):38-50.
MA Dayou. The theory and design of the microperforated-plane sound-absorbing structure[J]. Science in China, 1975(1):38-50. (in Chinese)
- [2] 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 the microperforate-plane absorbers[J]. Chinese Journal of Acoustics, 1997, 22(5):385-393. (in Chinese)
- [3] 左言言, 周晋花, 刘海波, 等. 穿孔板吸声结构的吸声性能及其应用[J]. 中国机械工程, 2007, 18(7):778-780.
ZUO Yanyan, ZHOU Jinhua, LIU Haibo, et al. The sound-absorbing performance and application of the perforated plane structure[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(7):778-780. (in Chinese)
- [4] 李唐. 不等腔微穿孔板组合吸声结构的吸声特性初探[D]. 太原:太原理工大学, 2008.
LI Tang. Rudimentary researches on the acoustic characteristics of microperforated panel absorbers with alterable air-cavity[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [5] Howe M S, Scott M I, Sipcic S R. The influence of tangential mean flow on the Rayleigh conductivity of an aperture[J]. Proc. R. Soc. Lond. A, 1996, 452(1953):2303-2317.
- [6] 景晓东, 孙晓峰, 吴景枢, 等. 基于声涡转化对穿孔板切向流效应的研究[J]. 力学学报, 2002, 34(5):657-664.
JING Xiaodong, SUN Xiaofeng, WU Jingshu, et al. An investigation of grazing flow effect on the impedance of a perforated plate based on sound-vortex interaction[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2002, 34(5):657-664. (in Chinese)
- [7] Rao K N, Munjal M L. Experimental evaluation of impedance of perforates with grazing flow[J]. Journal of Sound and Vibration, 1986, 108(2):283-295.
- [8] Lee S H, Ih J G. Empirical model of the acoustic impedance of a circular orifice in grazing mean flow[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2003, 114(1):98-113.
- [9] 马大猷. 微穿孔板的实际极限[J]. 声学学报, 2006, 31(6):481-484.
MA Dayou. The actual limit of the microperforated panel[J]. Chinese Journal of Acoustics, 2006, 31(6):481-484. (in Chinese)
- [10] 马大猷. 微穿孔吸声体吸收带宽极限[J]. 声学学报, 2003, 28(6):561-562.
MA Dayou. The absorption bandwidth limit of the microperforated absorber[J]. Chinese Journal of Acoustics, 2003, 28(6):561-562. (in Chinese)
- [11] 陈敬. 偏流与切向流相互作用对穿孔板声学特性影响[D]. 北京:北京航空航天大学, 2000.
CHEN Jing. The influence of the interaction of bias and grazing flow on the acoustic characteristics of the perforated panel[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002. (in Chinese)
- [12] 焦风雷, 刘克, 丁辉. 微穿孔板吸声体中的板振动[J]. 声学技术, 2000, 20(1):45-47.
JIAO Fenglei, LIU Ke, DING Hui. Panel resonance on absorption characteristics of microperforated-panel absorber[J]. Technical Acoustics, 2000, 20(1):45-47. (in Chinese)