

文章编号: 1000-3851(2002)01-0107-06

多孔材料的流体动力特性

何 枫, 张锡文, 王学芳

(清华大学 工程力学系, 北京 100084)

摘要: 多孔材料广泛应用于消声降噪、过滤等工业领域, 笔者针对较高消声效果的 PVF 多孔消声材料喷注的外部流场特性进行了较为详细的实验研究, 对不同厚度的材料的外部流动速度、湍流量、声场和压力分布进行了细致的测量, 得出多孔材料的出流是由不同方向的普通微射流和微射流的汇聚扩散组成的结论, 证明流体经多孔材料出流后的噪声是由外部扩散流场的湍流所决定的。多孔材料的作用在于:(1) 总压的降低和出流面积的缩小;(2) 由于多孔材料的不同方向微射流的相互耦合作用、引起外部流动特性的改变。气动消声材的选择上要注重其对出流流场的改善, 这是达到良好消声效果的根本所在。

关键词: 多孔消声材料; 微射流; 流场; 降噪

中图分类号: O422.8; O359⁺.2 文献标识码: A

FLOW CHARACTERISTICS FROM POROUS SOUND ABSORBING MATERIALS

HE Feng, ZHANG Xi-wen, WANG Xue-fang

(Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The characteristics of porous sound absorbing material have great effects on the behavior of a pneumatic silencer. Measurements of the centerline mean velocity, total pressure, and distribution of turbulent intensity were made to investigate the flowfield generated by compressible air passing through the porous material (polyvinyl formal) with different thickness. The details of the flowfield are different from those of the free jet of a convergent nozzle. The airflow from the porous material includes common micro-jet flow, combining and spreading flow. The effects of the porous sound absorbing material on the noise attenuation include two aspects one is the total pressure is decreased, and the other is the outer flowfield such as its axial velocity profile and distribution of turbulent intensity is changed due to a great deal of micro-jet flow interaction.

Key words: porous sound absorbing materials; micro-jets; flow field; noise attenuation

多孔材料用于消声、吸声方面的应用研究方兴未艾, 但大部分工作集中在容器或管道中铺设的消声材对声波的吸收特性^[1], 流动介质不直接穿透消声材等方面的研究。如 Cumming A.^[2]等研究了沿管道内布置吸声材后声波的衰减, 并进行了多孔同性和异性吸声材在阻性管中空气-间隙对吸声影响的理论和实验研究^[3]。Allard^[4]等发现聚亚安酯多孔材随空气间隙的变化有几乎固定的高阻抗, 但对声的入射吸收系数却大不相同。Tooms^[5]等对有流动时声音在多孔材料中的传播进行了较为细致的研究, 指出声传播在极限情况下有精确解, 但与实验结

果吻合不好。Ramakrishnan^[6]还利用微元流方程研究了陶瓷多孔材中的声速问题。这些研究工作对气动消声器的设计的指导意义并不大, 气动消声器涉及的是多孔材料的出流噪声方面的研究, 一般认为目前多孔材料的作用是降低总压并缩小流体出流面积, 这是基于平均流动的概念。张锡文^[7]对当前气动系统的各类消声材进行了实验对比归纳, 提出了适合各类消声材的消声公式, 并认为聚乙烯醇缩甲醛 (polyvinyl formal, 简称 PVF) 材料是性能优良的消声材之一。笔者对空气穿透消声材料的出流流场进行了细致的测量, 为 PVF 材料应用于气动消声器以

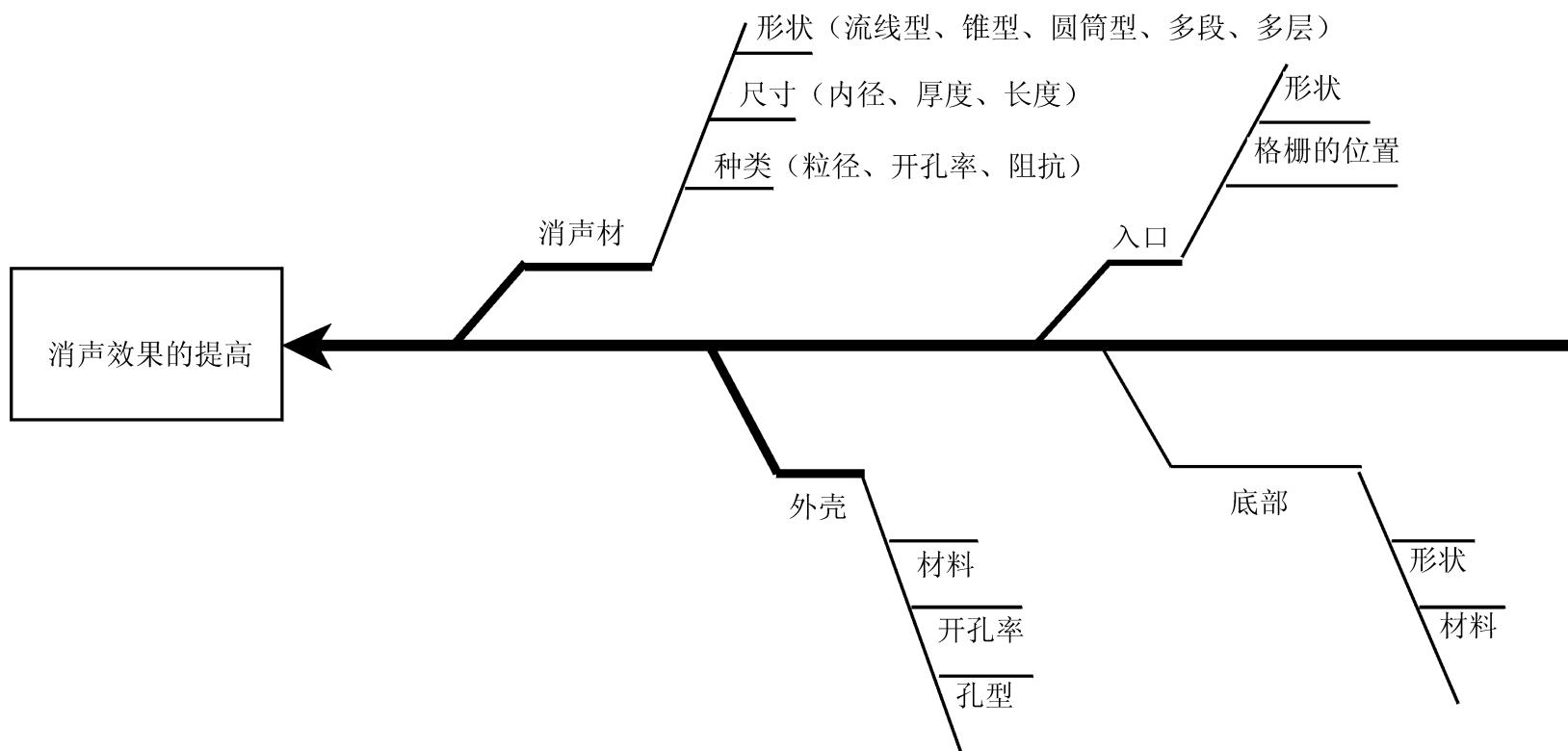


图 1 影响消声器性能的因素

Fig. 1 The influencing factors to silencer

及进一步改进消声器的性能打下了基础。

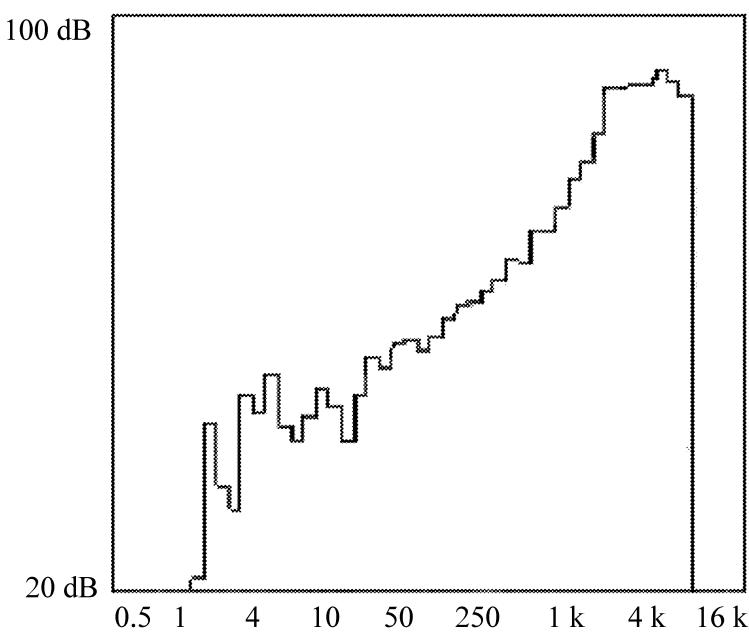
1 PVF 消声材料

影响气动消声器性能的因素有消声材、消声器外壳、消声器入口和底部的设计等^[7], 如图 1 所示, 对各因素的影响进行细致的研究后, 可得出影响程度大小和先后排列顺序, 在这些因素中对消声器性能影响最大的是消声材料。

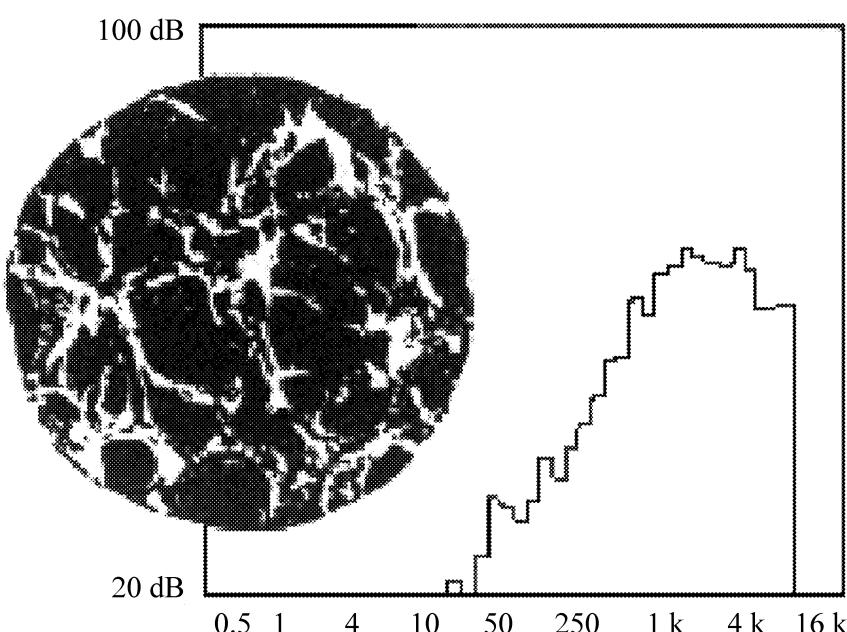
多孔消声材又是由其种类(粒径、开孔率、阻抗、密度)、尺寸(内径、外径、长度)及形状等多种因素决定的。从材料细观参数出发, 气动消声材的选择可

用无量纲式 $\frac{p}{p_0} = f \left(\frac{W}{t}, \frac{QdW}{Ae}, \frac{\dot{W}}{Ae} \right)$ ^[7] 来选择, 式中各参数为输入声压 p , 输出声压 p_0 , 气体体积流量 Q , 气体密度 d , 粘性系数 μ , 以及材料物理参数: 空孔径 W 孔隙率 e , 厚度 t , 入流面积 A 。

按以上原则, PVF 材料是性能优异、具有较高消声效果的消声材, 作为一种多孔软质的消声材, 广泛用于气动消声器上。因此研究 PVF 消声材的流体动力特性具有重要意义。气动噪声研究常采用标准孔板出流来模拟气动系统噪声源, 其频谱特征以高频为主, 而 PVF 材料可有效抑制高频噪声, 其内部构造及频谱分析见图 2。



(a) 孔板出流噪声频谱



(b) 加装 PVF 消声材出流噪声频谱

图 2 PVF 内部构造放大视图和出流噪声频谱

Fig. 2 The flow noise frequency and magnifying picture of interior structure of PVF

2 PVF 多孔消声材喷注流场特征

实验装置如图 3 所示, 在出口直径为 8 mm 的收缩圆管出口处加装不同厚度的平面多孔材料, 实验上游总压为 0.25 MPa(表压)。入射气流垂直穿透平面多孔材料, 采用丹麦 DANTEC 热线风速仪和总压管, 总压管开口直径 0.4 mm, 对多孔材料出流流场进行实验测试, 得到外部流场特性。多孔消声材料选用 PVF, 厚度分别为 0.5 mm、1 mm、2 mm、3 mm、4 mm、10 mm。

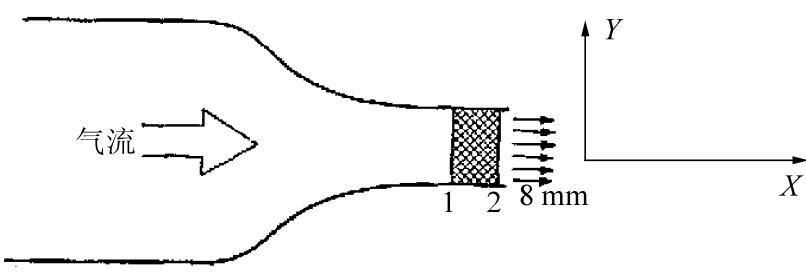


图 3 测量实验装置示意图

Fig. 3 Test apparatus

2.1 中心平均速度和总压沿轴向变化

PVF 多孔材料的喷注同一般自由射流不同, 在近场 $X < 4 D$ 内没有恒定速度的喷注核心区速度, 如图 4 为厚度为 10 mm 的 PVF 材料的中心平均速度, 中心速度多次反复测量均在出口附近出现凹陷, $X = 4 D$ 处中心速度达到极值, 而后速度逐渐衰减下降, 其下降规律与自由射流相似。

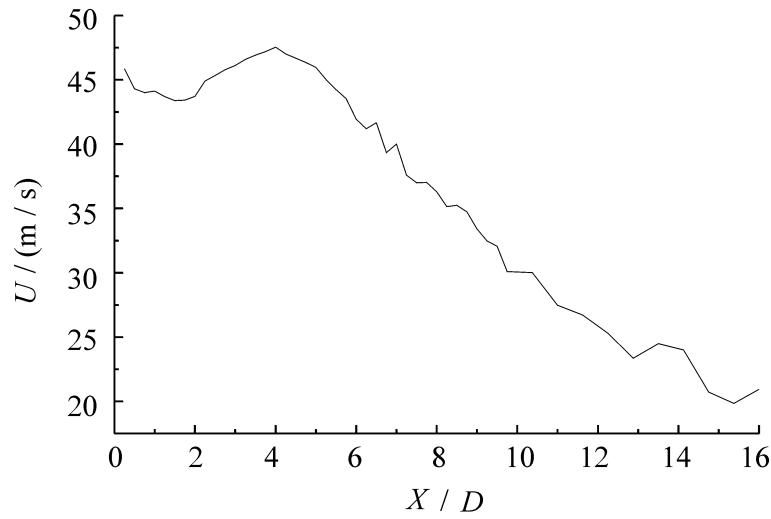


图 4 中心速度沿轴向变化

Fig. 4 Axial mean velocity

在出口附近出现中心速度凹陷是由于出流为多微射流, 近场大量微射流间有复杂的相互耦合作用, 使近场出口中心平均速度下降, 随后微射流进一步混合汇聚, 又一次膨胀, 随后在远场大喷注逐渐扩散衰减。

由图 5 轴向总压曲线可以看出, 在气流出口附近 $X = 2 D$ 总压下降, 气流从材料射出, 突然膨胀,

能量耗散, 随后气流总压又有所上升, 在 $X = 4 D$ 附近出现极值, 随后总压衰减。中心总压变化规律同用热线测量的中心速度(图 3)一致。

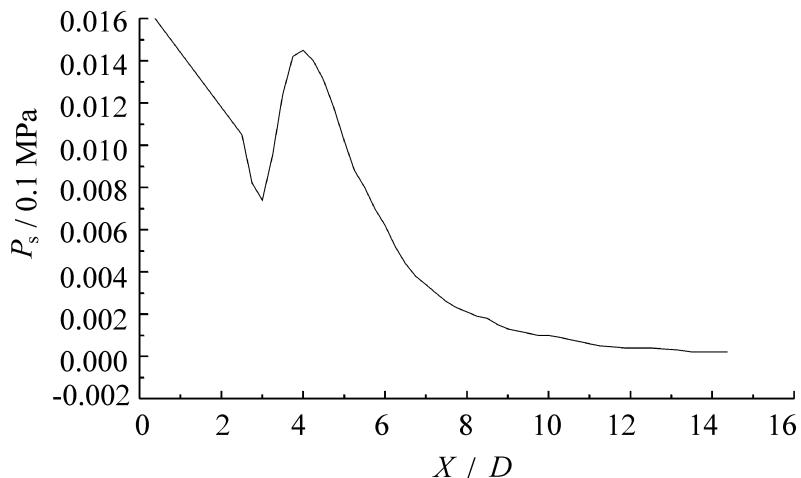


图 5 中心总压沿轴向分布图

Fig. 5 Axial total pressure

2.2 横截面上速度和总压分布

在多孔材料喷流出口轴向多个截面上测量其速度分布, 图 6 为各截面 U 速度分布图, 图 7 为各截面总压分布图。射流在充分发展前的近场速度剖面呈现两侧高、中心低的现象, 同普通射流具有明显区别。在射流的下游, 凹陷的速度剖面逐渐回升为凸型, 呈中心速度最大分布, 这种现象同图 4 的近场中心速度的测量结果相对应, 下游充分发展后的射流同典型的自由射流相似。

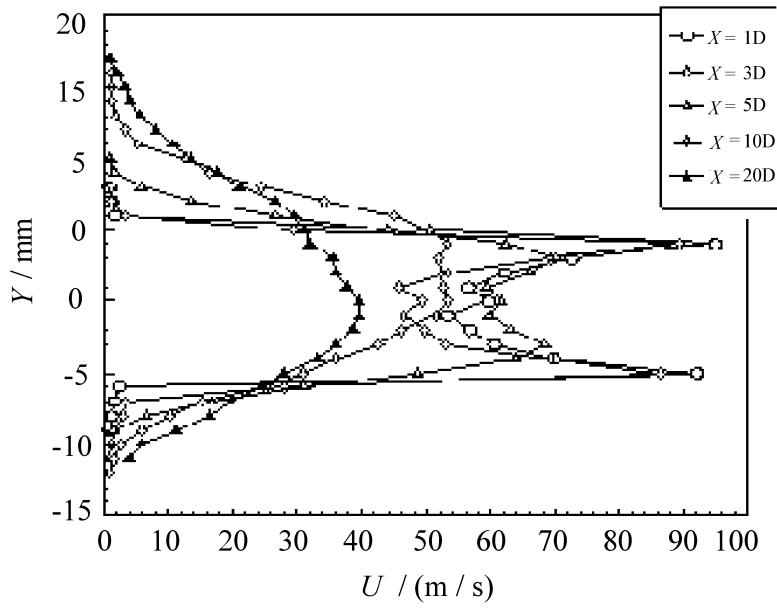


图 6 各截面 U 大小对比

Fig. 6 Mean velocity profiles

从图 7 出流横截面的总压分布可以看出, 近场总压分布与速度分布相似(图 6), 即两侧有陡峭的峰值、中心总压低, 表明出流的中心能量损失大, 两侧能量损失小。随着出流的进一步发展, 横截面上的总压分布逐渐平缓, 直至中心的总压高, 两侧总压低。多孔材料的出流是由不同方向的普通微射流和微射流的汇聚扩散组成的, 射流近场中心部分, 由于诸多的不同方向喷射的微射流的相互耦合作用, 能量损耗较大, 速度较低。而在射流外边界, 微射流卷吸周围静止的气体, 能量损耗相对较小, 速度较大。

在远场充分发展区微射流汇聚后扩散,与普通射流相同,并满足射流相似性定律。

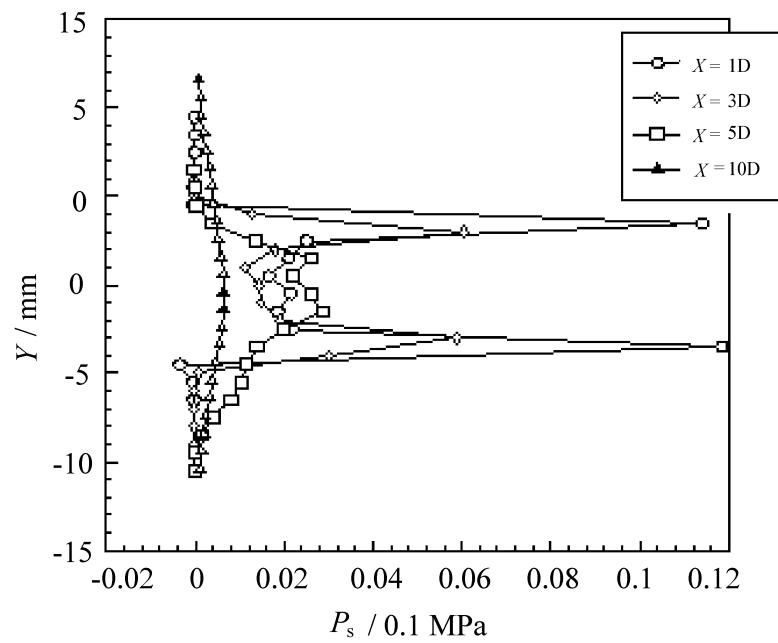


图 7 出流横截面总压分布

Fig. 7 Total pressure profiles

2.3 出流流场湍流度分布

定义:二阶统计矩为 $STD = \frac{Eu^2 f}{Ef} - U^2$, 单位为 m/s

$$\text{湍流强度 (Turbulent Intensity)} = \frac{STD \times 100\%}{U}$$

式中 f 为采样时间, u 为瞬时轴向速度, U 采样时间内轴向平均速度。

2.3.1 射流中心湍流度

图 8 显示了 10 mm 材料轴向湍流度的变化,其结果与收缩喷嘴的自由射流有相似之处。在 0 ~ 4 D 的核心区, 湍流强度较小且变化不大, 处于自保持状态; 4 D ~ 10 D 为过渡区, 湍流度逐渐加大; 大于 10 D 为充分发展区, 湍流度变化不大。

2.3.2 各截面湍流度分布

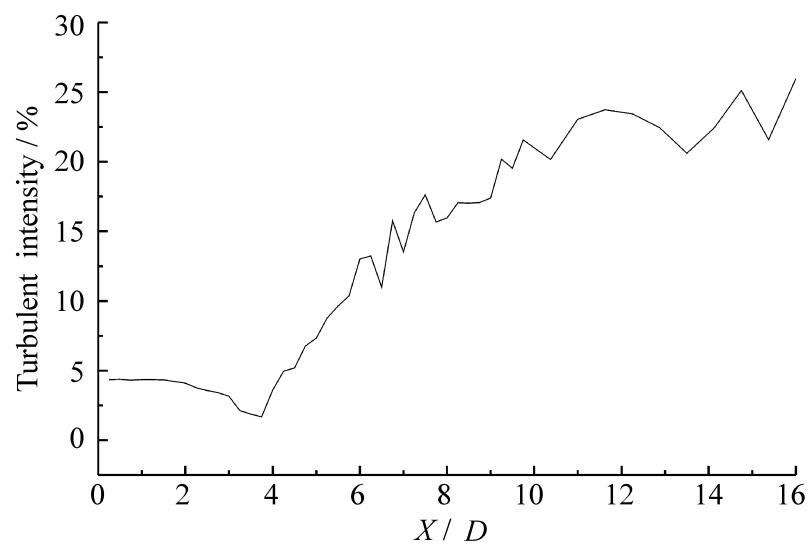


图 8 轴向湍流度分布

Fig. 8 Axial turbulent intensity

图 9 是截面上湍流强度分布, 图 10 为流场湍流强度的等值线图。在整个测量出流区域内, 射流中心雷诺应力和湍流强度低, 剪切层内雷诺应力和湍流强度最大, 在剪切层湍流卷吸掺混剧烈。

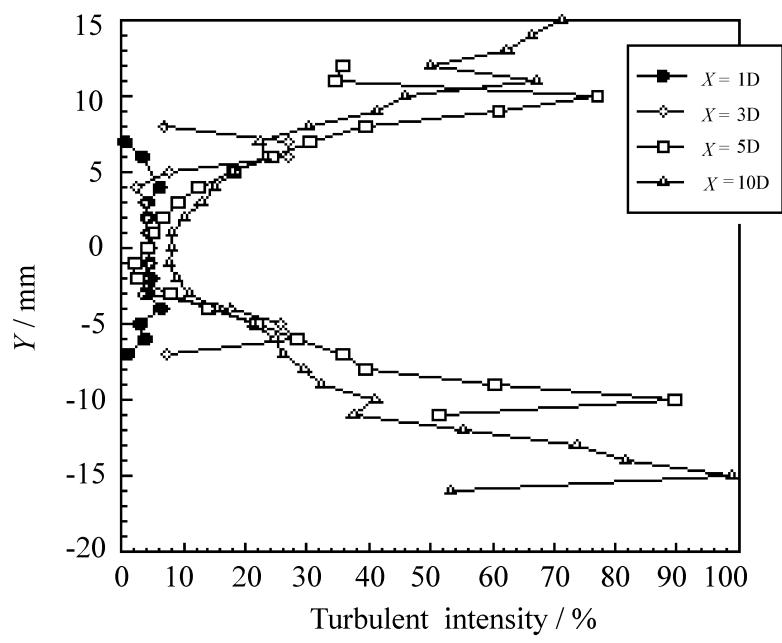


图 9 各截面湍流度分布

Fig. 9 Turbulent intensity profiles

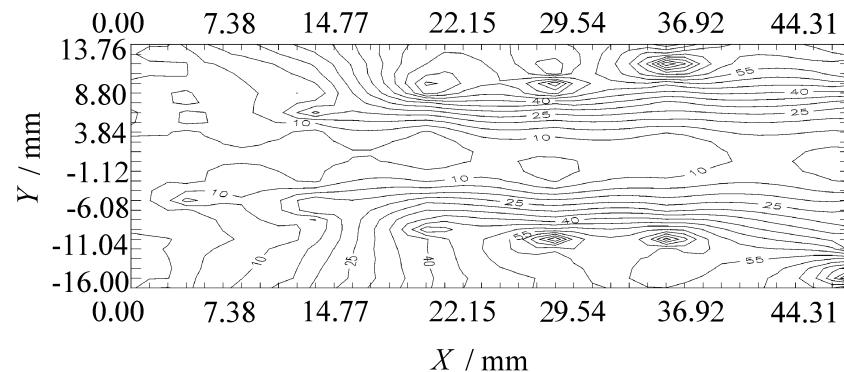


图 10 湍流度等值线图

Fig. 10 Turbulent intensity contours

3 出流噪声场分布

出流声场在半消声室中,采用 FFT 快速频谱分析仪和精密声级计测量。

图 11 为气流通过厚度为 10 mm 多孔材料后在

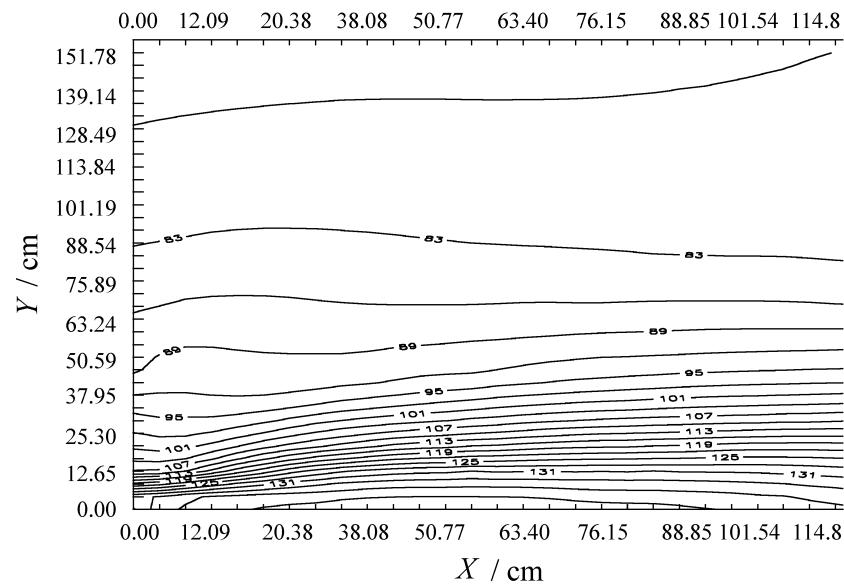


图 11 多孔材料出流声压分布

Fig. 11 Sound pressure contours of flow from PVF

出口附近中心轴对称平面上近声场的声压分布。参照湍流度分布图 10, 在湍流度大的地方, 其声压也较大;而且湍流度变化大的地方, 其声压也有较大的

梯度变化。这证明了在加上多孔材料之后外流场出流噪声仍由外部流场湍流强度所决定的, 和无多孔材料的声压场分布(图 12)对比, 其声压梯度明显降低, 湍流场强度减弱。多孔材料的作用在于:(1) 降低总压和缩小出流面积^[7]; (2) 引起外部流动特性的改变, 如轴心速度分布, 截面速度分布、湍流度分布等都不同于未加材料之前的自由射流的特性。

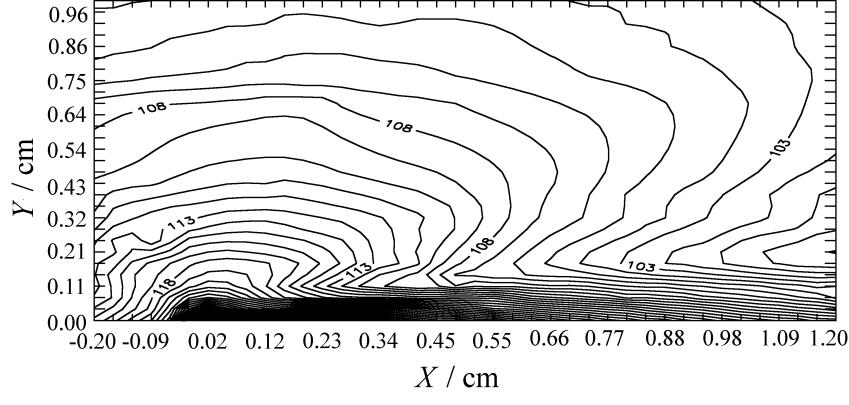


图 12 无 PVF 材料出流声压分布

Fig. 12 Sound pressure contours of free jet

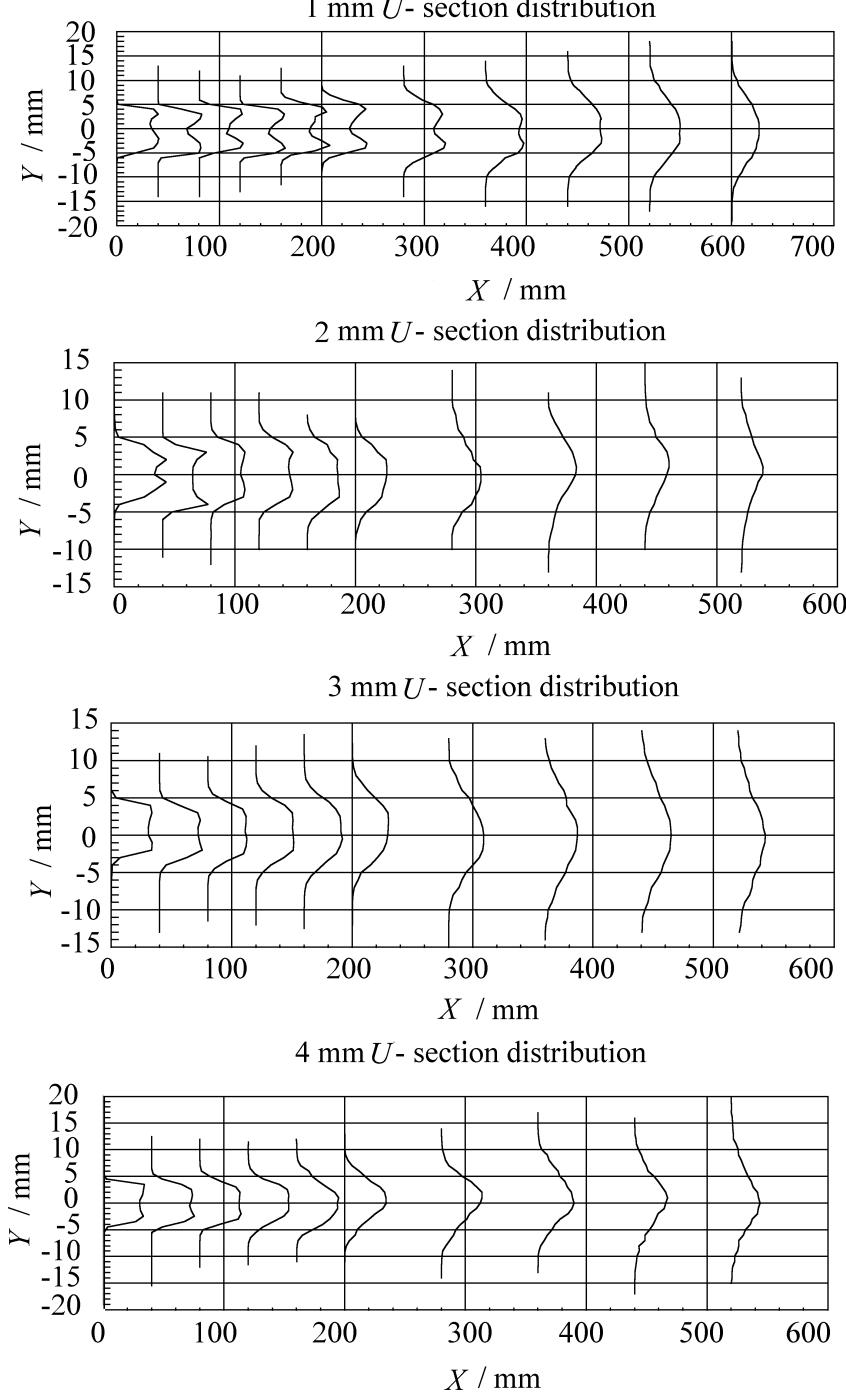


图 13 厚度为 1 mm、2 mm、3 mm、4 mm 材料的横截面速度分布

Fig. 13 Mean velocity profiles of different thickness PVF

4 不同厚度 PVF 材料特性对比

对厚度分别为 1 mm、2 mm、3 mm、4 mm PVF 材料, 在相同出口速度的条件下, 测量了其中心对称平面上的速度分布。由图 13 可见, 不同厚度材料的截面上的速度, 在射流初始区分布均呈中心低的马鞍型, 但随着材料厚度的增加, 射流初始区的速度分布趋于均匀化, 在射流的下游中心速度逐渐恢复为凸状, 为典型的充分发展的自由射流速度分布。

不同厚度材料湍流度分布(图 14)也同 10 mm 材料, 在出流的剪切层区域内, 其湍流度最大, 梯度也最大。在满足出口流量或入口压力的条件下, 消声材应适当选取使外流场湍流梯度减小所对应的材料厚度。

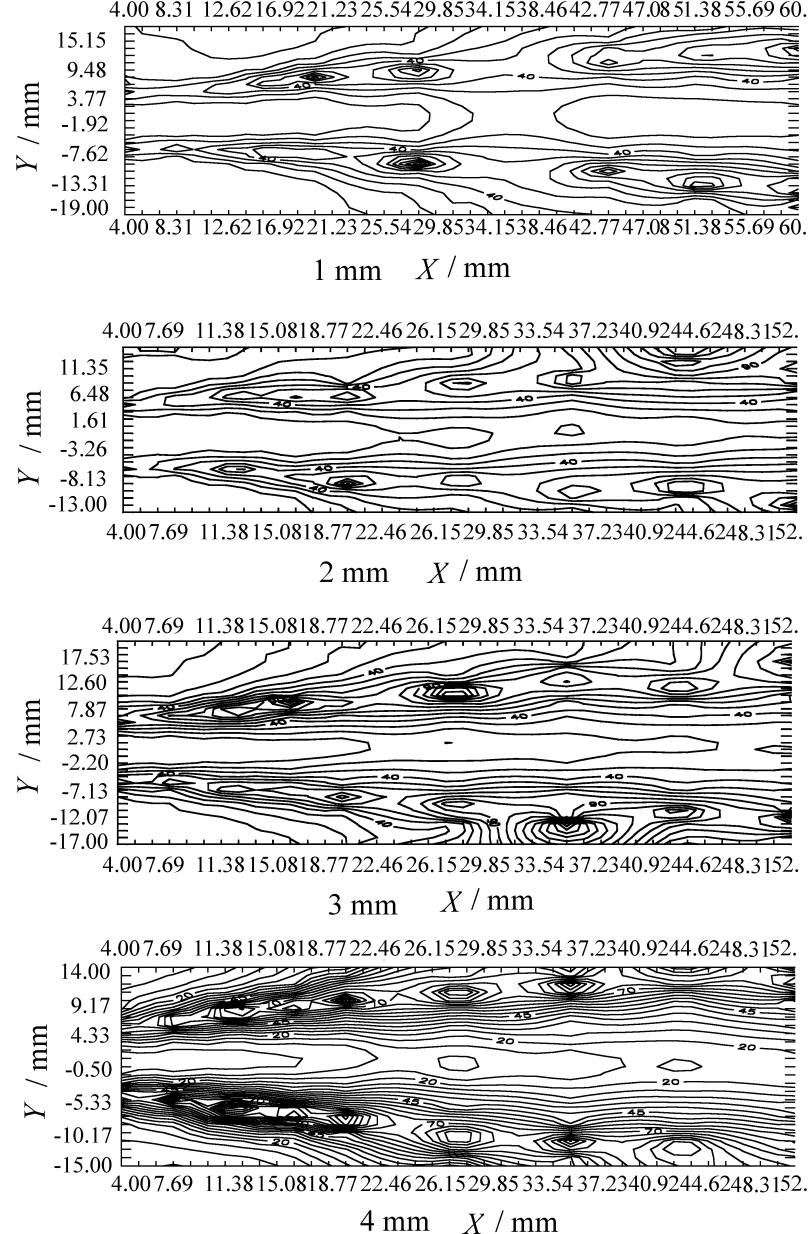


图 14 不同厚度材料的湍流度分布

Fig. 14 Turbulent intensity profiles of different thickness PVF

5 结 论

对不同厚度的 PVF 消声材出流流动速度、湍流度、声场和压力分布进行了细致的测量, 多孔材料的出流是初始为不同方向的微射流, 然后逐渐发展为充分发展的自由射流, 证明了在加上多孔材料之后

出流的噪声仍然是由消声材外部扩散流场的湍流所决定的,其出流湍流梯度和声压梯度分布都明显降低。多孔材料的作用在于:

- (1) 总压的降低和出流面积的缩小;
- (2) 由于多孔材料的不同方向微射流的相互卷吸作用、引起外部流动特性的改变,如轴心速度分布、截面速度分布、湍流度分布等都不同于未加材料之前的自由喷注。气动消声材的选择上要注重其对出流流场的改善,这是达到良好消声效果的根本所在。

参考文献:

[1] Delay M E, Bazley N. Acoustical properties of fibrous absorbent materials [J]. Applied Acoustics, 1970, 3: 105- 116.

- [2] Cummings A, Astley R J. A finite element scheme for attenuation in ducts lined with porous materials [J]. J Sound and Vibration, 1987, 116(2): 239- 263.
- [3] Cummings A. Impedance tube measurements on porous media: the effects of air-gaps around the sample [J]. J Sound and Vibration, 1991, 151(1): 63- 75.
- [4] Allard J F, Delage P. Free field measurements of absorption coefficient on square panels of absorbing materials [J]. J Sound and Vibration, 1985, 101(1): 161- 170.
- [5] Tooms S, Attenbrough K. Propagation from a point source over a porous and elastic foamlayer [J]. Applied acoustics 1993, 39(2): 53- 63.
- [6] Ramakrishnan N. Speed of sound in porous materials [J]. Bulletin of Materials Science, 1994, 17(5): 499- 504.
- [7] 张锡文. 气动系统降噪与消声器特性研究 [D]. 北京: 清华大学, 1999.