

微穿孔板和微缝板吸声体研究进展

刘 克

(中科院声学研究所, 北京 100080)

2001 年 11 月 29 日收到

摘要 介绍了我国在新型吸声体微穿孔板和微缝板的特点、首创、理论分析、加工制作、多方面的应用情况, 以及其在国外的影响。也讨论了这些吸声体的部分发展方向。

关键词 吸声体, 新型, 微穿孔板, 微缝板

Advances in the study of microperforated-panel and microslit acoustic absorbers

LIU Ke

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

Abstract The novel type of acoustic absorbers of the microperforated-panel and the microslit developed in this country is addressed. Their characteristic features, invention, analyses and applications as well as their influence abroad are presented. Some directions of further development are discussed.

Key words Acoustic absorbers, Novel type, Microperforated-panel absorbers, Microslit absorbers

1 引言

在和平发展的现代社会中, 自身的生活质量和生存环境的优劣显得尤为重要。消除噪声污染、解决噪声公害和改善环境的声质量, 是全社会共同的呼声。吸声材料的使用是人们取得理想声环境所不可缺少的一种措施。声源发出的声波遇到墙面、天花板、地面以及其它物体表面时, 都会发生反射现象。声波在物体表面多次反射的结果, 如果设计不当, 会使室内的音质变坏、产生声聚焦、噪声升高等。从改善室内音质和噪声控制的角度, 在墙面或天花板

饰以吸声材料或是悬挂适当的空间吸声体, 室内的反射声就会被部分吸掉, 音质就会得到改善。20 世纪 90 年代开始, 卫生环保人士发现传统的纤维型吸声材料对人体健康有害, 因此无需添加纤维型吸声材料的微穿孔板 (MPA) 和微缝板吸声体 (MSA) 的发展引起人们的广泛关注。

我国在无纤维吸声材料微穿孔板和微缝板研究方面, 始终走在世界前列。1997 年 7 月, 我国著名的声学家、中国科学院院士马大猷获得了德国夫朗和费学会 (FhG) 奖章和无纤维吸声材料 (ALFA) 奖。就是表彰他在首创微

穿孔板吸声结构的基础理论和设计方面的卓越工作。同时在德国还召开了第一次无纤维吸声材料座谈会，马大猷教授应邀在会上作“微穿孔板的发展”报告。德国声学学会(DAGA)会长 J.Meyer 教授和 FhG 的会长 H-J.Warnecke 教授均到会，与会者 140 余人^[1]。

马大猷教授的获奖是与近年来无纤维吸声材料发展有关的。1993 年德国在波恩建成了新的议会大厅。建筑师们充分发挥了现代艺术构思。周围都是玻璃的圆形建筑。却忽视了它的音质问题，建成后由于墙面反射声聚集以及声场不均匀，致使在大厅中央发言席一开口如入闹市。德国政府决定对新议会大厅进行改建，要求既要解决大厅内的音质问题，还要保持议会大厅水晶宫般的外貌。传统的改善室内音质所用的纤维吸声材料在这里是无能为力了。德国建筑物理研究所在我国访问学者的倡导下应用马大猷教授微穿孔板基础理论和设计方法，采用透明有机玻璃微穿孔板吸声结构，成功地解决了问题。

回顾微穿孔板吸声结构的研究，不只是始于见诸于文献的 1975 年。60 年代中期，我国火箭事业迅速发展，功率不断加大，噪声问题日益突出。特别是，当时国际上发射方式已从地面转入竖井。这使火箭噪声问题更加突出。高声强、高声压、高温度的吸收材料迫切需要。马大猷教授为当时国防科委开展火箭噪声研究，亲自率领年轻科研人员赴现场测量，并始终坚持研究工作。由于他深厚的声学功底，活跃的科学思维加上国家迫切需要，一个全新吸声结构的概念在他的头脑中形成了。微穿孔板吸声体的理论研究正是在“知识无用论”盛行，知识分子被贬的年代里完成的。1975 年有关论文在《中国科学》上发表^[2]，发明得以传世，进而在德国产生轰动，乃至影响吸声材料未来的发展。近年马大猷教授又将这一理论进一步发展，获得了精确解^[3]，并对微穿孔板吸声体在低声强下的性能进行了研究。近年来，无纤维性吸声结构有较大的发展并有取代传统纤维性

吸声材料的趋势。现将无纤维吸声材料微穿孔板及微穿孔缝的研究新进展做一概述。

2 微穿孔板和微缝板的吸声特点

吸声材料可分为两类，一类是多孔纤维性吸声材料，另一类为共振吸声材料。

纤维性吸声材料的吸声机理是透入材料内部的声波在小孔和狭缝中传播时，与构成微孔和狭缝的固体材料产生摩擦作用，由于粘滞性和导热性的效应，把声能逐渐耗散。纤维性吸声材料的主要特点是成本低、吸声频带宽、吸声系数高、生产简单，一直是传统的吸声材料。

而另一类共振吸声材料或称共振吸声结构有薄板吸声、共振吸声、穿孔板吸声、微穿孔板吸声、微缝板吸声等多种形式。共振吸声结构普遍基于亥姆霍兹共振器的原理。共振吸声材料与多孔材料不同的特点在于：利用共振器的特点，更有效地消耗声能，不怕水和潮气、防火、清洁、无污染、耐高温、耐腐蚀、能承受高速气流冲击。共振吸声结构的致命弱点是吸声频带较窄。但近年来，环境和安全卫生界人士提出矿物性纤维对人体有害，因此，新型、洁净的无纤维吸声材料已是国际发展的新趋势。

较大规模地使用亥姆霍兹共振器是采用穿孔板的形式。这种穿孔板在使用中最大的问题就是需另加声阻。穿孔板结构的声阻要与大气的特性阻抗相匹配才能获得较高的吸声系数，其声质量要尽量降低才能加宽频带。普通穿孔板因为孔较大，本身达不到这种要求，只能另加多孔材料以补充声阻。因多孔性材料本身就是宽频带吸声材料，穿孔板基本只是用作护面板。微穿孔板和微缝板则无需另加纤维型吸声材料。另外，多孔材料和纤维型材料的孔隙一般无规律可循，而在薄板上穿以大量有规律的微孔和微缝，就可以形成有严格规律的吸声体。

微穿孔板和微缝板都可以看作大量单个声学元件（孔或窄缝）的并联。如孔间距离比孔

径大得多时，可假设各孔的特性互不影响，同时如孔间距离比波长小得多时，孔间板面对声波的反射可以忽略不计，这样微穿孔板和微缝板的声阻抗率简单地就等于单声学元件的声阻抗率除以孔数。

微穿孔板和微缝板具有低声质量、高声阻，其吸声频带宽度可优于常规的穿孔板共振吸声结构。在共振结构材料中，唯有该结构具有宽频带的趋势，可弥补共振吸声结构吸声频带窄的不足，并具有不受材料限制、清洁、无污染、又可透明采光的特点，是吸声材料的发展趋势。

3 微穿孔板和微缝板的区别

微穿孔板和微缝板吸声体的理论和设计源于我国。该理论为寻找新型无纤维吸声材料代替传统材料提供新的途径。

如上所述微穿孔板吸声体是马大猷教授在60年代后期为准备在恶劣条件下应用的吸声体而提出的。75年提出了该结构的理论和设计其结构及等效电路如图1所示^[2]。97年马大猷教授又将这一理论作了新发展，得到了微穿孔板吸声体精确理论^[3]。根据微穿孔板吸声体精确理论，吸声频带主要由孔径决定。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，从而揭示了该结构吸收频带方面的潜力，从而使单层微穿孔板做成具有足够宽的通用吸声体奠定了理论基础，为微穿孔板吸声体的研究和发展展示了广阔的前景。

微穿孔板的吸声特性普遍高于微缝板，其单层吸声频带宽度如果设计合理在第一吸声频带可达3-4倍频程。微穿孔板吸声体的穿孔板常数 k 和相对声阻 r 是重要的参数。合理的设计为 $k=1.0-1.6$ ， r 小至接近1。

微缝板则是采用将微穿孔板上的孔改为窄缝的形式，窄缝的宽度小于1mm，穿孔率与微穿孔板相接近。微缝板的理论是马大猷教授于

2000年提出的^[4]。微缝板吸声体与微穿孔板吸声体极为相似，相应的公式只是差在数字系数，主要是声阻较小，而声抗较大（主要是末端修正大）。如果使用同样的参数，微缝吸声体的吸声特性不如微穿孔板吸声体。但在微缝板的理论中，又提出了补救措施，即较小的声阻系数可用较小的缝宽予以补偿，较大的声抗修正可以用较深的缝深（较厚的板）来抵消其影响。同时采取这两种措施（较小的缝宽和较厚的板）可获得与微穿孔板同样的吸声特性。

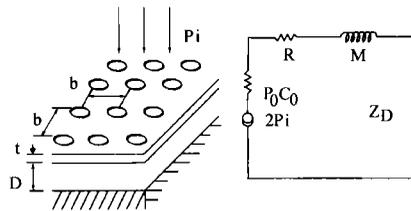


图1 微穿孔板吸声体结构及等效电路

4 微穿孔板和微缝板的应用

在微穿孔板吸声体提出的二十多年来，微穿孔板在噪声治理和音质控制工程中得到了广泛的应用。作为微穿孔板结构及理论的发源地，国内声学专业的学者对微穿孔板结构作了许多试验研究，有许多实际应用的实例。

在普通条件下，经过适当的组合，微穿孔板吸声结构能够在相当宽的频率范围内得到高的吸声量，用作消声器的话，阻损可以控制在很小的范围内。在特殊条件下，它能够耐高温和气流冲击，不怕油污和水蒸气。即使是有水流动也具有很好的吸声性能，受到短期的火焰喷射也不至于损坏。在这一点上，几乎没有其他吸声材料能与之相比，这对于蒸汽排放空系统、燃汽轮机以及发动机实验站的排放系统的消声都具有很重要的意义。

在高速气流下，微穿孔板消声器具有比阻性消声器、扩张室消声器、阻抗复合消声器等更好的消声性能和空气动力性能，而具有良好的空气动力性能又往往是绝大多数机器设备所

必需的。在很高的气流下，微穿孔板消声器还有一定的消声性能，再生噪声较其它类型的消声器低得多。对大型空气动力设备的消声器来说，可以较大幅度地减小尺寸，降低造价。对于要求洁净的场所，微穿孔板吸声结构使用后可以不必担心粉屑在房间内飘荡，同时施工和维修等都方便得多，而且由于省去了板后多孔性材料，可大大节省投资，降低造价。因而，有着较高消声量和良好的空气动力性能的微穿孔板吸声结构将有着非常广阔的应用前景。

1988年有学者研制了微穿孔（透明）消声通风百叶窗。现场测试具有15dB的隔声量，并申请国家专利。还可设计双层通风隔声窗。在窗上一侧附上透明微穿孔板材料，该窗隔声效果较好，还起到一定的通风作用。以上二例应用透明微穿孔板吸声结构在窗户上的做法，都是充分利用了微穿孔板清洁、无污染的优势，并充分考虑了透明采光的要求。

1997年国内开发的微穿孔板消声器已获得中国国家环保局环境保护产品认证证书。

血液病房、烧伤病房及手术室是一个要保证既洁净又安静的空间场所。其空调系统产生的噪声则往往影响这些地方的正常使用。在医院通风系统中，微穿孔板吸声效果也得到了验证。在一些需要清洁环境的重要生产车间也采用了微穿孔板吸声处理。有些作业场所越来越多地需要设置场所内的小场所，有的称之为控制室，有的称之为观察室、休息室等。这些小室外界噪声常透射入室，室内的混响声也较大，用透明微穿孔板结构，隔声提高，室内声级下降。

高架道路声屏障也采用了微穿孔板吸声结构，大大开拓了微穿孔板应用的新领域。微穿孔板吸声结构透明隔声屏障由厚度2mm的聚碳酸酯板做隔声层。微穿孔板吸声结构透明隔声屏障有以下优点：透光性能好，适用于要求透视的隔声屏障；美观，与周围环境景观协调；抗紫外线，不易老化；重量轻，是普通玻璃重量的二分之一；耐冲击，耐腐蚀性能是普通玻

璃的200倍；干净，无二次污染。适用于要求洁净的场所；

目前，国内有学者正在进行一种安全、清洁、低噪声场所设计，即在一个需要清洁安全的低噪声场所，对所有噪声控制措施全部采用微穿孔板吸声结构。包括：微穿孔板吸声吊顶、移动式微穿孔板吸声隔声屏，采用微穿孔板吸声内衬隔声箱（以上二种可做成透明的），微穿孔板消声器等。

近年来，国外也发展了微穿孔板的多种应用，其中德国在这方面较为突出。

如前所述，1995年，微穿孔板技术使得德国议会大厦声聚焦问题得到成功解决，在国际上引起了较大的反响。可以说是此项工作，才引起国外学者对于微穿孔板结构的广泛重视。也发展了微穿孔板结构的多种应用，主要有薄膜吸声体、薄膜扩散体、隔声窗、吸声吊顶等形式。微缝板用0.3mm宽的缝代替圆孔应用于语言播音室中也得到较好的吸声特性。在研制玻璃窗上微穿孔板的同时，发现微穿孔板不仅具有良好的吸声性能，窗的隔声性能也提高了。例如，厚8mm的玻璃窗，隔声量38dB，在窗前75mm处加一层微穿孔板后，隔声量增加了3dB。

5 发展方向

作为微穿孔板吸声体的发源地，我国声学工作者正为继续保持在这一领域的国际领先地位而努力。

微穿孔板应用中的首先的问题就是加工问题。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。

再有，在注重开展加工方法研究的同时，也应进一步开展微穿孔板结构系列化、组合化和标准化方面的工作，研究多种形式的微穿孔板组合结构。

(下转第25页)

现的,另一方面可以简化加工过程中的操作。

关于“局”现象能够适用到哪些种类的工
具系统问题,目前似乎还看不到有什么限制。
最初的发现是限于最简单的直杆和直管,后来
用到了超声衍磨中挠性杆—油石座这种形状
较复杂的纵振动工具系统,并进一步扩大用到
弯曲振动的刀杆。实用时有一个不确定因素,
是由于当前对工具系统和驱动系统之间的耦合
要求还不很清楚,因此在企图试用到新的对象
时,有时需要依靠实践来摸索怎样耦合。显然,
亟待理论上寻求引导。

这样,经过 20 年的并非十分强化的探索,
局部共振现象的重要性逐渐显示出来。在各种
类型的超声加工、超声处理的复合振动系统中
“局”原则有可能成为普遍适用的设计依据。

参 考 文 献

- 1 范国良, 应崇福, 林仲茂等. 应用声学, 1982, 1(1): 2-7.
- 2 Fan Guoliang(范国良), Zhang Weixian(张维贤). Proc International Conference on Ultrasonic Technology, Toyohashi: 1987, 323-328.
- 3 罗有成, 杨立华, 张维贤. 激光与红外, 1996, (5): 332-334.
- 4 赵继, 王立江, 孟继安. 声学学报, 1992, 17(1): 22-29.
- 5 赵波, 何定东. 机械工艺师, 1998, (6): 4-6.
- 6 马玉英, 丁大成. 物理学报, 1987, 36(2): 208-215.
- 7 汪承灏. 应用声学, 1982, 1(4): 48, 19.
- 8 周光平, 鲍善惠, 程存弟等. 应用声学, 1994, 13(6): 39-42.
- 9 鲍善惠. 应用声学, 1998, 17(4): 6-10.
- 10 Harris C M. Shock and Vibration Handbook, 3rd edition New York: McGraw-Hill, 1988. 6-19-6-22, 6-3-6-6.



(上接第 6 页)

但目前,微穿孔板所用板材较为单一,基本以钢板为主,且结构组合较少。并且对其加工安装及自身结构要求较严,给广泛应用带来了局限性。因此,在实际应用研究上,微穿孔板吸声材料及结构还有很多工作要做。即,在注重开展加工方法方面工作的同时,也应进一步开展微穿孔板结构系列化、组合化和标准化方面的工作,研究多种形式的微穿孔板组合结构。

例如:微穿孔板的并联结构。在一些需要噪声控制和需要改善厅堂音质以外,特别要研究开发微穿孔板结构定型产品和其在民用、工业产品上的应用。例如:在传统灯箱上微穿孔板护面代替传统护具,若设计得当,则成为具有吸声性能的灯箱。进行多种形式材质的微穿孔板的开发,特别是透明材质微穿孔板的开发,

因为,许多问题不但需要吸声、隔声而且需要可透视采光。

对定型产品的开发研究,也应解决微穿孔板在应用中的另一个重要的问题,即安装问题。对微穿孔板的串联结构已有一些研究,它可以有效地扩展吸声频带。但对于微穿孔板的并联结构,在国内外还没有这方面的工作。并联结构方面的理论及实验研究,对微穿孔板异型结构的开发将有很大的帮助。

从理论和实践来看,微穿孔板和微缝板吸声体未来有着广阔的发展前途,在建筑材料声学化和声学材料装饰化上,将起到很大作用。

参 考 文 献

- 1 马大猷. 声学学报, 1998, 23(1): 1-8.
- 2 马大猷. 中国科学, 1975, 18(3): 38-50.
- 3 马大猷. 声学学报, 1997, 22(5): 385-393.
- 4 马大猷. 声学学报, 2000, 25(6): 481-485.