

木竹功能材料科学技术丛书

木质吸声材料

彭立民 傅 峰 王军锋 著



科学出版社

木竹功能材料科学技术丛书

木质吸声材料

彭立民 傅 峰 王军锋 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书首先对木质吸声材料的基本情况和理论知识进行了阐述,在此基础上,分析了木质吸声材料的研究进展。主要包括三个部分。第一部分(第一~四章)主要是根据阻抗管测试系统,测试以中密度纤维板为基材的木质穿孔板吸声系数,得出不同工艺的穿孔板吸声规律。为木质穿孔板设计制备提供依据。第二部分(第六章、第七章)是利用聚合物发泡技术和木质人造板复合工艺技术制备木纤维-聚酯纤维复合吸声材料,研究了在一定复合工艺条件下,材料的物理力学性能和吸声性能,并探讨了材料空气流阻率、背后空腔深度、针刺处理工艺及贴面处理对复合材料的吸声性能的影响。第三部分(第五章、第七章、第八章)通过等效流体的密度和体积弹性模量模型,预测了聚氨酯纤维多孔性材料的吸声性能,通过理论模型和实际值之间的线性回归显著性检验,验证等效流体理论模型准确地预测了聚酯纤维吸声材料的吸声系数,为后续木纤维-聚酯纤维复合材料的理论研究奠定一定的基础。

本书可为林业及声学相关专业的高等院校、科研单位和相关声学材料公司等从事木材科学与技术、噪声控制的研究工作人员和相关专业师生提供科学参考。

图书在版编目(CIP)数据

木质吸声材料/彭立民,傅峰,王军锋著.—北京:科学出版社,2018.1

(木竹功能材料科学技术丛书)

ISBN 978-7-03-054544-2

I. ①木… II. ①彭… ②傅… ③王… III. ①吸声材料 IV. ①TB34

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第230915号

责任编辑:张会格 / 责任校对:郑金红

责任印制:张伟 / 封面设计:刘新新

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京九州迅驰传媒文化有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年1月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2018年1月第一次印刷 印张:9 3/8

字数:225 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

噪声污染已成为当代世界性的问题，同水污染和大气污染一起被列为全球三大污染。随着人们生活质量的提高以及环保意识的增强，人们对降低环境噪声方面的需求越来越高，大量吸声材料使用在各种不同的场所，如各种影剧院、音乐厅、报告厅、会议室、KTV包房、酒吧、医院、酒店大堂等。调查表明，71%的员工认为噪声是影响工作效率的首要因素。美国布法罗社会技术革新组织进行了一次研究，发现办公人员花费他们大量时间（超过62%）在静态工作上，集中办公于桌子上或计算机前。同时，人们对吸声材料的性能也提出了更高的要求，吸声材料已从过去单一吸声功能向高吸声性、装饰性、经济性、环保性和多功能转变。

《建筑环境声学》提出：建筑材料不仅要实现一定的使用功能，同时也要具有一定的美观装饰作用。对于吸声建筑材料，基于装饰效果以及安全健康考虑，人们已不再满足于玻璃纤维或矿棉纤维吸声板、穿孔吸声板和金属穿孔板，转而开始研究外形美观、结构轻便、性能优越、绿色安全的新型降噪材料或降噪结构。木质材料自身有着优良的物理性质和受人喜爱的自然视觉效果，在厅堂设计和高档装饰场所常常被优先考虑，而具有良好装饰效果的木质类吸声材料更一直被人们所关注，已成为近年来研究发展的重点。

本书作者对木质声学材料的研究已有十余年，本书以国家948项目、国家科技支撑项目及中国林业科学研究院院长基金项目为课题支撑，对木质穿孔板制备工艺参数、木纤维-聚酯纤维复合吸声材料制备工艺和理论以及多孔性材料的声学模型进行了深入的研究。本书第一章介绍声学基础原理；第二章介绍了木质声学材料的国内外研究现状；第三章介绍了木质声学材料的评价与测试方法；第四章重点对木质穿孔吸声板参数的选择、吸声性能影响因子进行了研究；在第五章中，推导了木纤维-聚酯纤维复合吸声材料的吸声现象理论模型；在第六章和第七章中，分别利用模压法和针刺法制备木纤维-聚酯纤维复合吸声材料，并对相关力学性能和声学性能进行了分析和研究。

当今处在一个科技飞速发展的年代，新型的木质吸声材料也将与时俱进不断有新的产品和研究出现。感谢浙江省林产品质量检测站教授级高工陆军以及中国林业科学研究院木材工业研究所王东、宋博骐、刘美宏、朱广勇等研究生对本书的完成提供的帮助。由于作者掌握的资料和水平有限，书中遗漏的不当之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

著 者

2017年8月9日

目 录

第一章 概述	1
第一节 声学基本知识	1
一、噪声的危害	1
二、声波的基本性质	1
三、可听声	2
四、声波的速度	2
五、声音的传播与衰减	3
第二节 吸声机理与吸声材料	4
一、吸声机理	4
二、吸声材料	6
主要参考文献	7
第二章 国内外研究现状	9
第一节 国内研究状况	9
一、木质吸声材料的国内研究状况	9
二、穿孔板吸声结构的国内研究现状	11
三、纤维吸声材料的国内研究状况	12
第二节 国外研究状况	14
一、木质吸声材料的国外研究状况	14
二、穿孔板吸声结构的国外研究现状	16
三、合成纤维吸声材料的国外研究状况	17
主要参考文献	18
第三章 木质声学材料的评价与测试方法	23
第一节 驻波管法	23
第二节 传递函数法	23
第三节 混响室法	23
第四节 阻抗管法与混响室法原理概述	24
一、阻抗管传递函数法原理	24
二、混响室法原理	25
第四章 木质穿孔吸声板的研究	27
第一节 木质穿孔吸声板参数的选择	27
一、材料与方法	27
二、实验设备条件及方法	28

第二节 影响木质穿孔吸声板吸声性能的因子分析	29
一、板厚对吸声性能的影响	29
二、孔径对吸声性能的影响	30
三、穿孔率对吸声性能的影响	31
四、板后空腔对吸声性能的影响	32
第三节 吸声系数条件优化	34
一、影响因子的显著性分析	35
二、相关分析	36
第四节 混响室法测试木质穿孔吸声板吸声性能	40
一、实验材料与方法	40
二、实验结果与分析	41
第五节 阻抗管传递函数法与混响室法吸声性能对比	50
一、未钻孔木质人造板吸声系数比较	50
二、孔径 3mm 穿孔板吸声性能对比	50
三、孔径 6mm 穿孔板吸声性能对比	53
四、孔径 9mm 穿孔板吸声性能对比	56
主要参考文献	61
第五章 木纤维-聚酯纤维复合吸声材料的吸声现象理论模型	62
第一节 引言	62
第二节 声波在理想流体中传播的基本理论	62
一、声波在理想流体中传播的 3 个基本物理定律	62
二、声波在理想流体中传播的波动方程	64
三、声波在无界流体中传播的声阻抗	65
四、在无界流体中, 传播方向相反的两列波的叠加	65
五、声波在有界流体中的传播	66
六、平面声波在细管中的传播	66
第三节 木纤维-聚酯纤维复合吸声材料的吸声现象理论模型	69
一、等效介质的密度和体积弹性模量	69
二、等效介质的理论吸声系数	70
三、声波在木纤维-聚酯纤维复合吸声材料中传播时的基本参数	70
四、小结	71
主要参考文献	72
第六章 模压法制备木纤维-聚酯纤维复合吸声材料的研究	74
第一节 木纤维-聚酯纤维复合吸声材料的制备	74
一、简述	74
二、材料与方法	75
三、杨木纤维基本特性的测量	76

四、偶氮二甲酰胺分解温度的确定	78
五、材料复合工艺确定	79
六、结论	84
第二节 木纤维-聚酯纤维复合吸声材料性能的研究	85
一、材料与方法	85
二、木纤维-聚酯纤维复合吸声材料的力学性能	86
三、木纤维-聚酯纤维复合吸声材料的声学性能	90
四、结论	94
第三节 木纤维-聚酯纤维复合吸声材料吸声性能的试验分析	94
一、材料与方法	94
二、复合材料的吸声性能	96
三、结论	104
主要参考文献	105
第七章 针刺法制备木纤维-聚酯纤维复合吸声材料的研究	106
第一节 木纤维-聚酯纤维复合吸声材料的制备及吸声性能测试	106
一、材料与方法	106
二、不同密度的木纤维-聚酯纤维复合吸声材料的吸声性能分析	110
三、不同木纤维混合比例木纤维-聚酯纤维复合吸声材料的吸声性能分析	116
四、小结	117
第二节 木纤维-聚酯纤维复合吸声材料理论吸声性能分析	118
一、材料与方法	118
二、试验方法及性能测试	118
三、木纤维-聚酯纤维复合吸声材料的理论吸声系数	120
四、理论吸声性能与实测吸声性能相关性分析	123
五、理论模型理论吸声系数误差分析	125
六、小结	126
第三节 木纤维-聚酯纤维复合吸声材料吸声性能影响因素分析	126
一、材料与方法	127
二、各因素对木纤维-聚酯纤维复合吸声材料吸声性能的影响	127
三、小结	137
主要参考文献	138
第八章 结论	140

第一章 概 述

第一节 声学基本知识

一、噪声的危害

18 世纪中叶进入工业革命以来,以机器取代人力的生产机械化和自动化带动工业、农业、交通运输业迅速发展,给人类的生产和生活带来诸多便利的同时,也造成不可估量的污染。其中,噪声污染越来越严重,逐渐引起人们的重视,已经被列为环境治理的主要对象之一。为了合理防范和控制噪声,首先应明白噪声产生的根源,常见的噪声主要有社会噪声、工业噪声、建筑噪声和交通噪声。据相关统计数据显示,近几年由于机动车辆拥有量的指数式增长,特别是在城镇,由于隔声设施的不够完善,交通噪声占据城市噪声污染来源的 30%,已成为城镇噪声的重要组成部分;随着物质经济条件的丰裕,人们的社会生活多种多样,造成不可估量的噪声污染,社会噪声占据城市噪声污染来源的 40%;除此之外,城市噪声污染来源还包括建筑施工和工业生产噪声,大约占 30%(刘美玲,2011)。噪声污染已越来越严重。据报道,近 30 年来在一些工业发达国家,城市噪声级增加 30dB,平均每年升高 1dB。按声能计算,每 3 年城市环境噪声的声能增加 1 倍,增加 30dB 相当于声能增加 1000 倍,可见噪声污染的增加速度之快。

据有关数据显示,城市环境噪声污染的 30%影响是多方面的。例如,损伤听力,影响睡眠,诱发疾病,干扰语言交谈,噪声还影响设备的正常运转、损害建筑结构等。噪声容易使人疲劳,难以集中精力,从而使工作效率降低,对于脑力劳动者尤其明显;长时间在强噪声环境下工作,会使内耳组织受到损伤,造成耳聋。当噪声超过 135dB 时,电子仪器的连接部位可能会出现错动,引线产生抖动,微调元件偏移,使仪器失效;在特强的噪声下,机械结构和固体材料会产生疲劳现象而出现裂痕或断裂,冲击波影响下,建筑会出现门窗变形、墙面开裂等。

二、声波的基本性质

声音是由物体振动产生的,而振动在弹性介质中的传播形式就是声波。通常将振动发声的物体,称为声源。声源不一定是固体,液体和气体的振动也会产生声音,如海上的浪涛声和火车的汽笛声。如果将一声源体置于真空罩内,则声波不能传播。因此,声波的产生除了要有振动的物体外,还必须要有传播的介质物体,它可以是空气、水等流体,也可以是钢铁、玻璃等固体。介质将产生声波的物体的振动,转变为附近介质粒子的振动,从而实现能量在介质中的传输。声波传播时,粒子振动方向与能量传递方向平行。在空气和液体中传播的一般是纵波,而在固体中的传播方式既有纵波也有横波。

当声波为纵波，其纵向振动导致介质的压缩和变稀。波长和频率是声波的重要参数。波长是声波在介质中传播一个完整周期的距离。频率是介质粒子振动的频繁程度，表示每秒时间内完成的周期数。声波在介质中传播时，介质粒子以相同的频率振动。只有当声波传入另一种介质时，频率才会发生变化。

三、可听声

物体振动是产生声音的根源，但并不是物体产生振动后一定会使人感知到声音。因为人耳能感觉到的声音频率范围只是在 20~20 000Hz，这个频率范围的声音被称为可听声，频率低于 20Hz 的声波被称为次声波，频率高于 20 000Hz 的声波被称为超声波。对于人耳来说，次声和超声都是感知不到的。

描述声音高低的物理量是频率；描述声音强弱的物理量有声压、声强、声功率以及各自相应的级；描述声音大小的主观评价量是响度和响度级。噪声由随机分布的多种频率声波混合形成。因此，噪声一般可以解析为具各自声压级的频带谱图。可听声的主要频率的波长如表 1-1 所示。

表 1-1 可听声主要频率的波长
Table 1-1 The wave length of audible sound main frequency

频率/Hz	20	50	100	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000	20 000
波长/m	17	6.8	3.4	1.36	0.68	0.34	0.17	0.085	0.043	0.017

四、声波的速度

声速是声波传播距离与时间的比率。它取决于介质的性能——惯性和弹性。密度就是介质的惯性性能。介质中粒子的惯性越大，对附近粒子扰动的响应就越小，从而使声波的传播变慢。在其他参数相同的情况下，声波在低密度介质中的传播比在高密度中快。而弹性性能与介质材料在应力或应变作用下抵抗变形或保持形变的趋势有关。弹性模量就反映了这样的状态，如钢铁的弹性模量高于橡胶。在分子级别上，高弹性模量材料的粒子间作用力非常强。当施加应力时，粒子间的强相互作用可以阻止材料变形并有助于材料形状的保持。因此，材料的相态对声速有极大的影响。总之，固体具有最强的粒子间作用力，然后依次是液体和气体。所以，在固体中，声波的传播比在液体中快，尽管声波的速度可以由声波的频率和波长进行计算，但在物理上并不取决于这些参数。声波在一些材料中的传播速度如表 1-2 所示。

表 1-2 声波在一些材料中的传播速度
Table 1-2 Acoustic propagation velocity in some materials

材料名称	传播速度/(m/s)	材料名称	传播速度/(m/s)
混凝土	3100	松木	3600
砖	3700	软木	500
玻璃	3658	水	1410

续表

材料名称	传播速度/(m/s)	材料名称	传播速度/(m/s)
铁	4800	大理石	3800
铝	5820	花岗岩	6000

五、声音的传播与衰减

当声源振动时，其邻近的空气分子受到交替的压缩和扩张，形成疏密相间的状态，空气分子时疏时密，依次向外传播（图 1-1）。

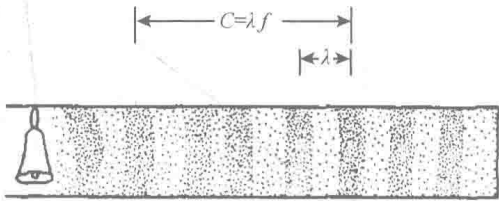


图 1-1 声音传播示意图

Fig.1-1 Sound propagation diagram

C 为声速 (m/s); λ 为波长 (m); f 为频率 (Hz)

声源的振动是按一定的时间间隔重复进行的，振动是具有周期性的，在声源周围媒质中产生周期的疏密变化。在同一时刻，从某一个最稠密（或最稀疏）的地点到相邻的另一个最稠密（或最稀疏）的地点之间的距离称为声波的波长。振动重复的最短时间间隔称为周期。周期的倒数，即单位时间内的振动次数，称为频率，媒质中的振动逐渐由声源向外传播。这种传播是需要时间的，即传播的速度是有限的，这种振动状态在媒质中的传播速度被称为声速。

在空气中声速：

$$c=331.45+0.61t \tag{1-1}$$

显然，在这些物理量之间存在相互关系：

$$\lambda=c/f \tag{1-2}$$

$$f=1/T \tag{1-3}$$

式中， λ 为波长 (m); f 为频率 (Hz); T 为周期 (s); t 为空气的摄氏温度。可见，声速 c 随温度变化会有一些变化，但是一般情况下，这个变化不大，实际计算时常取 c 为 340m/s。

声波传播时，媒质中各点的振动频率都是相同的，但是，在同一时刻各点的相位不一定相同。同一质点在不同时刻也会有不同的相位。所谓相位是指在时刻 t 某一质点的振动状态，包括质点振动的位移大小和运动方向，或者压强的变化。在图 1-2 中，质点 A 、 B 以相同频率振动，但是 B 比 A 在运动时间上有一定的滞后， C 、 D 等质点在时间上依次相继滞后，当 A 质点处于最大压缩状态，即压强增大到最大时， B 、 C 、 D 质点处的压强程度依次减弱，以至 D 点处于最大膨胀状态。这就是说质点间在振动相位上依次落后，存在相位差。正是由于各个质点的振动在时间上有超前和滞后，才在媒质中形

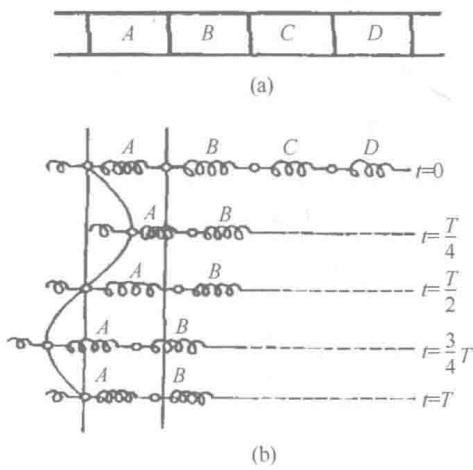


图 1-2 声波传播的物理过程

Fig.1-2 Physical process of sound travel

伴随反射出现，速度和方向会发生相应变化。声波反射能量取决于两种介质的性质差异，差异小时，反射能量少透射能量多，声波在传播中被不断地衰减。声波衰减的原因主要是：①当声波从声源向四面八方辐射时，波前的面积随传播距离的增加而不断扩大，声波被扩散，通过单位面积上的声能相应减少；②由于传播介质的黏滞性、热传导和分子弛豫过程等原因，声波被吸收。这两者均使声波在传播过程中声能不断地被转化为其他形式的能量，从而导致声强不断衰减。

成波的传播。可以看出，距离为波长 λ 的两质点间的振动状态是完全相同的，只不过后者在时间上延迟了一个周期。

声波作为机械波的一种，具有波在传播中的一切特性。声波通常会到达介质的边界，并进入另一种介质。声波在两种介质间的行为，称为边界行为。当声波到达另一种介质时，会有 4 种可能的边界行为。声波在前进过程中，遇到尺寸比其波长大得多的障碍物时，就会发生反射；当遇到尺寸较小的障碍物或孔隙时，就会发生衍射，由于衍射现象与障碍物尺寸和声波波长的比值有关，低频噪声更容易发生衍射；声波透过界面进入新介质，为透射；折射

第二节 吸声机理与吸声材料

减弱噪声通常有 3 种途径：在声源处减弱，在传播过程中减弱，在人耳处减弱。而实际运用中，主要是通过噪声的传播过程中设置吸声材料来达到吸声降噪的目的。常见的吸声机理有 3 类：薄板共振吸声结构的吸声机理、亥姆霍兹吸声机理和多孔吸声机理。

一、吸声机理

声波在媒介中传播的过程中，由于摩擦和黏滞阻力的作用，声能转换为机械能、热能等其他形式的能量而耗散的过程被称为吸声。当声波传到吸声材料（结构）表面时，由于材料（结构）的阻碍作用，部分被表层反射或散射回去；一部分透过表面进入材料（结构）内部被“吸收”，进入材料的声能又有一部分会直接经过材料（结构）透射出去，如图 1-3 所示。

根据能量守恒得到：

$$E_i = E_r + E_a + E_t \tag{1-4}$$

吸声性能的强弱通常用吸声系数 α 表示。 α 的计算如下：

$$\alpha = (E_a + E_r) / E_i = (E_i - E_t) / E_i \tag{1-5}$$

式中, E_a 为被材料或结构吸收的声能; E_t 为透射声能; E_i 为入射声能; E_r 为被测材料或结构反射的声能。

(一) 薄板共振吸声结构的吸声机理

薄板与墙体或顶棚之间存在空腔时也能吸声, 如木板、金属板做成的天花板或墙板等, 这种结构的吸声机理是薄板振动吸声。薄板在声波作用下发生振动, 并发生弯曲变形, 薄板振动时, 由于板内部和龙骨间出现摩擦损耗, 使声能转化为板振动的机械能, 最后转变为热能而起到吸声作用。由于低频声波比高频声波容易激起薄板的振动, 所以这种结构具有低频的吸声特性。当入射声波的频率与薄板振动结构的固有频率一致时, 将发生共振。建筑中常用的薄板吸声结构的共振频率为 80~300Hz。

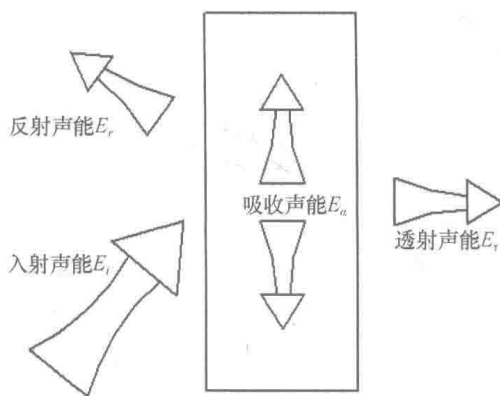


图 1-3 吸声过程示意图

Fig.1-3 Schematic diagram of sound absorbing

(二) 亥姆霍兹吸声机理

当墙面或天花板配置带空气的穿孔板时, 即使材料本身吸声性能很差, 这种结构也具有吸声性能, 如穿孔的石膏板、木板、金属板, 甚至是狭缝吸声砖等, 这类吸声结构被称为亥姆霍兹共振器。在亥姆霍兹共振器中, 吸声结构可以看作许多单孔共振腔并联而成, 单孔由大的腔体和窄的颈口组成, 材料外部空间与内部腔体通过窄的瓶颈连接。在声波的作用下, 孔颈中的空气柱就像活塞一样做往复运动, 开口处振动的空气由于摩擦而受到阻滞, 使部分声能转化为热能。当入射声波的频率与共振器的固有频率一致时, 即会产生共振现象, 此时孔颈中的阻尼作用最大, 声能得到最大吸收。

这种吸声机理的特点为, 对频率的选择性很强, 只对共振频率具有较大的吸声系数, 偏离共振频率时则吸声效果变差, 吸收声的频带也比较窄, 一般只有几十赫兹到 200Hz, 通常为使其吸声频带加宽, 常在穿孔板后蒙上一层纺织物或是填充多孔吸声材料。

很多科研人员对亥姆霍兹共振器进行了研究。Dickey 和 Selamet (1996) 研究了一维小腔体亥姆霍兹共振器的声学特性; Selamet 和 Ji (1999) 研究了变截面腔体的声衰减特性及非对称亥姆霍兹共振器的吸声性能; Nagaya 等 (2001) 研究了二阶亥姆霍兹共振器组成的消声器; Selamet 和 Lee (2003) 研究了带有伸长瓶颈的亥姆霍兹共振器的声学特性, 到目前为止, 人们利用亥姆霍兹共振器可以将吸声频率降至 200Hz 以下。利用亥姆霍兹共振器最常用的实例是微穿孔板吸声结构, 能够较好地改善建筑声学功能, 可广泛应用于吸声降噪工程, 效果理想。

(三) 多孔吸声机理

多孔材料的吸声机理是材料内部有大量微小的连通的孔隙, 孔隙间彼此贯通形成空气通道, 且通过表面与外界相通, 可模拟为由固体框架间形成许多细管或毛细管组成的

管道构造。当声波入射到材料表面时，一部分在材料表面被反射，另一部分则透入到材料内部向前传播，小孔中心的空气质点可以自由地响应声波的压缩和稀疏，但是紧靠孔壁或纤维材料表面的空气质点振动速度较慢，摩擦和空气的黏滞阻力，使空气质点的能量不断转化为热能，从而使声波衰减。声波在刚性壁面反射后，经过材料回到其表面时，一部分声波透射到空气中，一部分又反射回材料内部，声波通过这种反复传播，能量不断转换耗散，如此反复，直到平衡，由此使材料“吸收”了部分声能。

多孔性吸声材料的吸声性能主要受材料的厚度、密度、流阻、孔隙率、结构因子、材料后面空气层厚度、表面装饰处理和使用时的外部条件等影响。纤维吸声材料的吸声性能主要受材料的空气流阻率、孔隙率、弯曲率、黏性特征长度和热力学特征长度影响。多孔材料吸声的必要条件是：材料有大量空隙，空隙之间互相连通，孔隙深入材料内部。

二、吸声材料

吸声材料是具有较强的吸收声能、减低噪声性能的材料。由于其自身的多孔性、薄膜作用或共振作用而对入射声能具有吸收作用。常见的吸声材料有聚酯纤维吸声板、木质穿孔吸声板、水泥木丝板等。

（一）聚酯纤维吸声板

现在市场上比较常用的非木质吸声板主要是聚酯纤维吸声板，聚酯纤维吸声板是由聚酯纤维热压而成，而聚酯纤维本身是用聚对苯二甲酸乙二醇酯制成的，是当前非常普遍的一种合成纤维。聚酯纤维吸声板是一种多孔材料，材料内部有大量微小的连通的孔隙，声波沿着这些孔隙可以深入材料内部，与材料发生摩擦作用将声能转化为热能。多孔吸声材料，该种类型的吸声板吸声系数较高，吸声系数（NRC）能达到 0.9 以上，但是价格相对较贵。

（二）木质穿孔吸声板

穿孔板安装时，背后留有一定的空气层，板上的每个孔与其背后的空腔等效于亥姆霍兹共振器。如图 1-4 所示，穿孔板共振吸声结构可近视看作许多亥姆霍兹共振器的并联。

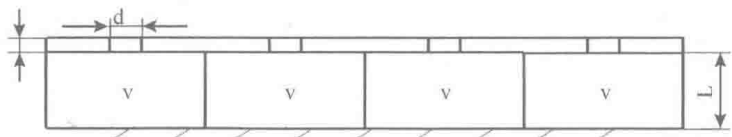


图 1-4 穿孔板结构
Fig.1-4 Structure of perforated panel
d 为孔径；v 为空腔；L 为空腔深度

当声波进入穿孔板上的小孔后，由于板后留有一定的空气层，波动引起的声压强变化刺激孔内的空气柱往复运动，使得空腔内的空气被反复压缩或膨胀，当入射声波频

率与穿孔板结构固有频率相等时,孔内空气柱与空腔内空气组成的系统便发生共振。此时,系统振动最激烈,声能以最快的速度转化为热能,声能损失最多,故吸声系数达到最大值。

木质穿孔吸声板是根据声学原理加工而成,由饰面、芯材和吸声薄毡组成。木质穿孔吸声板按照表面分为孔木吸声板和槽木吸声板。孔木吸声板表面的孔有圆孔、狭条孔和微孔。孔木吸声板是一种在人造板的正面、背面都开圆孔结构的吸声材料;槽木吸声板是一种在人造板的正面开槽、背面穿孔的狭缝共振吸声材料,微孔吸声板孔径小于0.8mm,现代工艺水平打出来的孔径甚至能达到0.02mm,通过调节打孔的疏密程度,可以大大提高木质穿孔吸声板的穿孔率,从而提高吸声性能。常见的木质穿孔吸声板基材可分为中密度纤维板、胶合板、定向刨花板(欧松板)、普通刨花板以及集成指接板等。其中尤以中密度纤维板为基材的木质穿孔吸声板应用最为广泛,累计市场使用量超过了800万 m^2 。

木质穿孔装饰吸声板一方面表面美观富有装饰效果,另一方面又具有良好的吸声特性。通过穿孔率、空腔以及填充吸声材料的变化,获得声学设计所需的吸声频率特性,而且价格也比较经济。目前该板已成为室内装饰中广泛使用的装饰材料。木质穿孔装饰吸声板特别适用于音乐厅、影剧院、电影院、多功能厅、广播录音室、专业吸声室、歌舞厅、法院、审判庭厅以及体育馆等有声学设计要求的工程装修。

(三) 水泥木丝板

水泥木丝板属于环保型绿色建材,是由水泥作为交联剂、木丝作为纤维增强材料,加入部分添加剂所压制而成的板材。水泥木丝板从20世纪40年代开始在欧洲广泛应用,目前已成为国际上应用范围很广的建筑材料。它实用性广、性能优异,不但具有一定的吸声效果,而且有耐腐,耐热,耐蚁蚀,易加工,与水泥、石灰、石膏配合性好,绿色环保等多种优点。现在,荷兰、芬兰、德国、奥地利、俄罗斯等国家已经形成了不少此类板材的专项制造公司以及专业设备制造厂家;而国内上海、南京、北京等地区近几年才开始使用。目前,木丝板的用途如下:公共场所的吸声与装饰,如影剧院、体育馆、会议室、候车室等;用于消音降噪,如高速公路的噪声屏障,工业降噪机房。水泥木丝板的吸声系数(NRC)一般在0.6左右。

主要参考文献

- 方丹群,王文奇.1983.噪声控制技术[M].上海:上海科学技术出版社.
- 胡耐根.2011.噪声对生物的影响[J].科技信息,(25):131-132.
- 霍瑜姝,王聪,李鸾妹.2010.噪声危害与治理[J].企业技术开发,29(7):81-85.
- 刘美玲.2011.环境噪声污染的危害与防控[J].科技资讯,(15):158.
- 施丽莉.2004.低频噪声烦恼度实验室研究[D].杭州:浙江大学硕士学位论文:9.
- 王小雪,刘群,程钟书.2010.浅析吸声降噪材料[J].网络财富,(15):205.
- 张立,盛美萍.2005.低频宽带共振吸声结构与原理[J].陕西师范大学学报(自然科学版),33(2):59-61.
- 张彦,周心艳,李旭祥.1996.发泡聚合物-无机物复合吸声材料的研究[J].噪声振动与控制,(3):33-35.
- Dickey N S, Selamet A. 1996. Helmholtz resonators: One-dimensional limit for small cavity

- length-to-diameter ratios[J]. Journal of Sound and Vibration, 195: 512-517.
- Nagaya K, Hano Y, Suda A. 2001. Silencer consisting of two-stage Helmholtz resonator with auto-tuning control[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 110: 289-295.
- Selamet A, Ji Z L. 1999. Acoustic attenuation performance of circular expansion chambers with extended inlet/outlet[J]. Journal of Sound and Vibration, 233: 197-212.
- Selamet A, Lee I. 2003. Helmholtz resonator with extended neck[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 113: 1975-1985.

第二章 国内外研究现状

第一节 国内研究状况

一、木质吸声材料的国内研究状况

我国的木质吸声材料近年来得到了迅速的发展,据统计,我们每年的木质吸声材料产量达到 1000 万 m^2 以上,木丝板、轻质纤维板和木质穿孔吸声板是目前应用较为普遍的吸声材料。轻质纤维板是密度在 $0.4\text{g}/\text{cm}^3$ 以下的纤维板,因为该产品密度低且具有多孔性,具有良好的吸声和隔热性能,主要用于高级建筑的吸声结构。

对于木质穿孔吸声板的使用可以追溯到 20 世纪 50~60 年代,那时候一般用胶合板及硬质木纤维板穿孔作为装饰吸声板,这些板比较薄,采用刷漆装饰,表面比较单调,而且硬质木纤维板受潮会发生翘曲变形,装饰效果比较差,现在已经很少使用。大约在 20 年前,一些室内装修要求较高的建筑使用了进口木质穿孔吸声板。该板以中密度木纤维板为基板,强度高、刚度大,能经受得起一定的碰撞。采用真木皮或用三聚氰胺(仿木皮)贴面作为装饰,正面开槽背面钻孔形成一种表面新颖别致的条形穿孔装饰板,随后国产条形穿孔装饰板很快面世并推向市场,价格也比进口板材低很多,现已成为一种室内装修广泛使用的材料。此吸声板是一种共振吸声体,其吸声特性与板的穿孔率、空腔及板后背填充的吸声材料有关。此类吸声板吸声的频带较宽,对中频的吸声能力最强,吸声系数(NRC)一般为 0.4~0.6。而早期使用的吸声材料主要为植物纤维制品,如棉麻纤维、毛毡、甘蔗纤维板、木质纤维板以及稻草板等有机天然纤维材料。天然纤维材料成本低、吸声频带宽、生产简单,但其防火、防潮以及防腐性能差。随后,人们以无机多孔材料来取代天然纤维材料,发展了颗粒型、泡沫型多孔吸声材料如矿渣砖、泡沫玻璃、吸声陶瓷以及无机纤维材料。矿渣砖等材料吸声性能较差,且笨重不便使用。无机矿物纤维材料如玻璃棉等,吸声性能好,阻燃、耐腐蚀,但存在污染环境、危害健康等问题,于是,以木纤维材料为原料的吸声材料受到重视。

木质材料自身有着优良的物理性质和受人喜爱的自然视觉效果,在厅堂设计和高档装饰场所常常被优先考虑,而具有良好装饰效果的木质类吸声材料更一直被人们所关注,已成为近年来研究发展的重点。

虽然木质类吸声材料及相关功能产品极具市场前景,但目前有关木质材料吸声特性的研究还不完善,仅见个别树种木材、木基材料、定向结构刨花板、轻质麦秸板、竹木复合材、麦秸复合板、水泥木丝板等的有关报道。对木质吸声材料及其相关研究国内仍处于起步和发展阶段。

天然植物纤维是最容易获得的材料,国内早些年大量用作吸声材料使用(高玲和尚福亮,2007)。天然纤维材料具有良好的吸声性能,由于具有多孔性吸声特性,轻质

纤维板具有良好的吸声降噪性能,降噪系数(noise reduction coefficient, NRC)可达到 0.7(王军锋, 2013)。以往在许多建筑装饰材料中随处可见,但其防火性能低下,易燃,火灾隐患大;吸水吸湿性强,吸水膨胀率大,容易变形;抗潮能力差,容易变质;密度小,扩散能力强,容易漂浮于空气中引起污染,对人体健康危害大。因此产量逐年锐减,许多工厂都已停产。

20 世纪以来,木质吸声材料发展迅速,目前市场上较为常见的吸声材料包括木丝板、轻质纤维板和木质穿孔吸声板。据统计,我国的木质吸声材料在各种建筑装饰材料中占有相当比例,每年产量达到 1000 万 m^2 以上。在国内总体上对木质材料吸声性能的研究已比较多,陈瑞英等(1994)对福建 10 种常用木材的不同厚度、不同切面的垂直入射吸声性能进行了测试研究,结果显示吸声系数与入射声波的频率有一定的相关关系。1982 年,赵立采用驻波仪对人造板的特性和吸声性能进行了研究,结果表明材料的容重、厚度等因数的改变对板材的吸声性能有一定的影响,因此可选取适宜的制备工艺参数以得到吸声性能良好的板材,通过理论分析与实验测试相结合,结论对提高人造板的吸声效率具有一定指导意义。江贵军(2008)对 3 种常用木质人造板(MDF、胶合板和刨花板)的吸声性能进行了研究,实验表明在整个频率范围内,3 种材料的低频吸声系数非常低,基本上没有吸收效果,高频的吸声系数高一点,但平均吸声系数小于 0.2,不是理想的吸声材料。阳杰和蒋国荣(2004)研究了长纤维木绒和天然的菱镁矿粉混合压制而成的一种新型木丝板吸声性能,该木丝板具有多孔性吸声材料的特点,在板后留一定的空气层或加入玻璃棉、无纺布等吸声性能优异的多孔吸声材料,可改善整个结构的吸声性能,拓宽了木丝板的使用范围。周晓燕等(2000)研究了定向结构刨花板的吸声性能,具有典型的多孔吸声材料特点,高频吸声性能较优,相比之下,低频吸声性能较差;密度越小,吸声性能越好,密度和声波频率对吸声性能有较大的影响;除此之外,还采用驻波管法研究了轻质麦秸板的吸声性能,其吸声性能良好,且 10 倍优于传统的建筑材料(周晓燕等, 2001),而且麦秸秆成本低,被作为新型建筑材料,实现变废为宝。Jiang 等(2004)以人工林木材为主要材料,用驻波管法测试了 5 种桉树(尾叶桉、尾巨桉、尾园桉、尾赤桉和大花序桉)的吸声系数。隋仲义等(2006)以 4 种不同结构的竹木复合板为基础,采用爱华集团生产的驻波管测试了它们的吸声系数,根据实验结果分析了不同结构竹木复合板材的吸声性能,总结了不同厚度竹木复合材的吸声特性。

在国内,阳杰和蒋国荣(2004)完成了新型木丝板吸声性能的测试研究,该材料具有良好的物理特性和吸声性能,在不同安装条件下,对该产品的吸声系数进行了实验室对比测试研究。周晓燕等(2001)采用驻波管法研究了轻质麦秸板的吸声性能,发现轻质麦秸板具有良好的吸声性能。陈瑞英等(1994)对杉木、马尾松等福建十种主要用材树种的法向吸声性能进行研究,表明木材法向吸声系数与声波频率的关系是有规律可循的。盛胜我等(2004)对木质装饰微孔板的声学特性进行了理论预测,导出了各项结构参数与表面声阻抗率和法向吸声系数之间的关系。

周晓燕等(2000)采用驻波管法测定了 3 种定向结构板(OSB)复合墙体的吸声系数;分析了用定向结构板装饰内墙或用定向结构板复合墙体作内隔墙的房间的吸声量及混响时间,并与砖、混凝土结构建筑做了比较。常乐和吴智慧(2011)采用驻波管法测