

综 述

聚合物纤维类吸声材料研究进展

向海帆^{1,2}, 赵 宁^{1*}, 徐 坚^{1*}

(1. 中国科学院化学研究所北京分子科学国家实验室, 高分子物理与化学实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 噪声污染问题不但制约着经济的发展, 还严重影响着人们的身心健康, 因此如何有效地控制噪音, 开发出降噪性能优异的吸声材料是一个十分重要且亟待解决的课题。本文从纤维类吸声材料的发展出发, 重点论述了该类材料的一个重要分支—聚合物纤维类吸声材料的研究现状, 同时结合吸声机理及影响吸声性能因素, 阐述了聚合物纤维类吸声材料的结构与其声学性能的相互关系, 并展望了其发展趋势。

关键词: 聚合物; 纤维; 结构; 吸声

噪声污染已经成为 21 世纪仅次于废水、废气的世界第三大污染, 其不仅缩短了设备的使用寿命, 而且严重影响着人们的身心健康。根据世界卫生组织的报告^[1], 噪声污染除了影响人的听力以外, 还能导致高血压、心脏病、记忆力衰退、注意力不集中及其它精神综合症等多种疾病的产生。因此如何有效地控制噪音, 开发出降噪性能优异的吸声材料是十分重要且亟待解决的课题。常见的吸声材料按组成一般可分为无机材料(如矿渣棉^[2]、玻璃棉^[3,4]等)、金属材料(如泡沫铝^[5]、铝纤维^[6,7]等)和有机高分子材料(如聚氨酯泡沫^[8]、聚酯纤维^[9,10]等)。相对于无机材料易污染环境, 金属材料比重大而言, 高分子材料以其特有的力学性质和声学性质正日益受到重视, 成为研究的热点。此外, 吸声材料按结构形态可分为: (1) 泡沫类材料^[11,12]; (2) 纤维类材料^[13~15]; (3) 颗粒类材料^[16]; (4) 新型结构类材料(如膜, 穿孔板, 吸声体等)^[17~21]。其中, 纤维类吸声材料因其来源丰富多样, 吸声性质优异而成为上述四种材料中成本较低、应用较广的材料, 备受关注^[22~27]。近年来, 聚合物纤维类吸声材料作为纤维类吸声材料的一个分支, 因其优异的性质而日益受到关注, 其研究也由最初的单一性质研究逐渐转向装饰化和多功能化研究。具备如既吸声又防水^[28,29]、既吸声又阻燃^[30]、既吸声又隔热^[31]等特性的聚合物纤维类吸声材料的研制成功极大地拓宽了其应用范围。尽管该领域发展迅速, 但是聚合物纤维类吸声材料的结构与其声学性质的相互关系依旧是研究的关键。在此基础上, 如何通过结构设计在获得最优化声学性质的同时实现吸声材料的多功能化也是最近几年学者研究的重点。

1 纤维类吸声材料的发展及聚合物纤维类吸声材料分类

人类利用纤维作为吸声材料可以追溯到远古时代^[32], 当时所使用的纤维主要是动植物纤维及其制品(如棉、麻纤维、木质纤维、羊毛毡等), 这些天然聚合物纤维虽然吸声频带宽, 但其耐火、耐潮、耐腐蚀性差, 存在一定的使用局限。后来人们开始采用价格低廉的玻璃棉、岩棉、矿渣棉等无机纤维材料。此类材料很大程度上改善了天然纤维的耐火耐腐蚀性, 但近些年的研究表明, 此类材料易造成环境污染, 且危害人体健康, 因此广受环境和卫生专家的指责^[33]。随着材料技术和产业的发展, 合成聚合物纤维(如聚丙烯、聚酯纤维等)给吸声材料带来了新的曙光, 其不易老化腐蚀, 吸声性能优异, 日益受到学者的关注。除

基金项目: 国家自然科学基金(50821062, 51073166, 50673097); 中国科学院创新基金项目(2007CB936400);

作者简介: 向海帆(1983—), 男, 博士研究生, 研究方向为声阻尼材料;

* **通讯联系人:** E-mail: zhaoning@iccas.ac.cn, jxu@iccas.ac.cn.

此之外,近年来还出现了聚合物纤维复合吸声材料,这些材料往往兼具吸声和其它功能^[13,31]。与此同时,金属纤维(如铝纤维等)也被成功研制^[7,34],但此类材料成本相对较高。综上所述,纤维类吸声材料的发展经历了由天然到人工,由组分单一到组分多样化的发展历程(见图 1),而聚合物纤维在其中占据着至关重要的一席。

天然纤维→无机纤维→合成聚合物纤维→聚合物纤维复合材料以及金属纤维

图 1 纤维类吸声材料的发展示意图

Figure 1 Schematic diagram of the development of fibrous sound absorption materials

根据聚合物纤维类吸声材料的不同组成,大致可将其分为以下三类:(1)天然纤维;(2)合成聚合物纤维;(3)聚合物纤维复合材料。

1.1 天然纤维

人类最早使用的吸声材料便是诸如棉、麻等天然高分子,此类材料最大的特点在于其高频吸声性能优异^[35],同时材料具备环境友好性,生物可降解性,因此时至今日仍有广泛的应用。近年来又出现了竹纤维^[36,37]、木纤维^[38]、羊毛纤维^[39,40]、胶原质纤维^[41]、茶叶纤维^[42]等吸声性能优异的其它天然高分子纤维材料。天然纤维材料耐火、耐潮、耐腐蚀性较差,在一定程度上其使用范围受到了限制。

1.2 合成聚合物纤维

合成高分子的出现拓展了纤维类吸声材料的研究领域,这类材料结构设计的多样性将会带来声学性能的可调,而其本身的特性(如力学,热学性质等)与声学性质相结合将极大地拓展该材料在建筑、交通、军事等诸多领域的应用。最具代表性的合成聚合物纤维吸声材料是聚丙烯纤维^[43]和聚酯纤维^[44-46]。Tejima 等^[47]用热塑性合成纤维构成具有优异吸声性能的防水性无纺布。Kosuge 等^[48]将含孔的对位芳纶纸粘在密度不超过 0.15 g/cm^3 的无纺布上,发现频率在 2000 Hz 以上其吸声性质要优于玻璃棉。Narita 等^[49]将平均细度为 $0.8 \sim 8 \text{ dtex}$,长度为 $30 \sim 100 \text{ mm}$ 的聚乳酸短纤维构成穿刺无纺布,并将含有微孔的膜覆盖在穿刺无纺布的表面,该材料显示出优异的吸声性质,在频率为 1000 Hz 和 1250 Hz 的吸声系数都超过 0.8 ,并且该短纤维还可回收利用。

1.3 聚合物纤维复合材料

聚合物纤维复合材料一般包括两方面:不同纤维之间的复合以及聚合物纤维与基体(树脂、板材等)的复合。研究表明将天然纤维与合成聚合物纤维(如聚丙烯、聚酯)混合可形成声学性能更优异的复合纤维材料,从而应用于汽车内饰以及建筑领域^[50-52]。此外,聚合物纤维与树脂复合,能够充分发挥各自特性,制备出吸声性能优良的复合材料。如将天然纤维与热塑性基体复合^[53],得到的复合材料比玻璃纤维和该热塑性基体复合的材料具有更好的冲击强度和吸声性质,可用于汽车工业;将玉米壳纤维和聚丙烯复合^[26],得到的材料与麻和聚丙烯复合材料相比,不但拉伸和弯曲性能得以改善,而且降噪性能也有提高。最近的研究表明聚合物纤维复合材料吸声性能的提高不仅来自于二者之间的复合,更来自于纤维在树脂中的分布和树脂微相结构的形成。Chen 等^[54]制备了苧麻纤维增强聚乳酸复合材料,发现吸声性能提高,他们认为增塑剂与基体的微观相分离,苧麻纤维的孔隙以及短苧麻纤维在基体的分布共同促使了材料声学性能的改善。

2 聚合物纤维类材料吸声机理及常见理论模型

聚合物纤维类材料的吸声机理主要源于以下三个方面(如图 2 所示):(1)当声波入射到纤维材料的内部,会引起纤维之间空隙内的空气振动,空气与管壁产生摩擦,形成的粘滞阻力作用使声能变成热能衰减;(2)声波通过介质时会导致质点的疏密程度不同,使质点之间存在温度梯度,从而通过热传导也会消耗一部分声能;(3)纤维本身的振动导致声能的耗散^[55,56]。

建立纤维类吸声材料的结构与声学特性之间的关系,从而通过材料的物理结构预测其吸声性质是声学预测模型或理论的出发点。常见的声学预测模型或理论有^[27,56-63]:

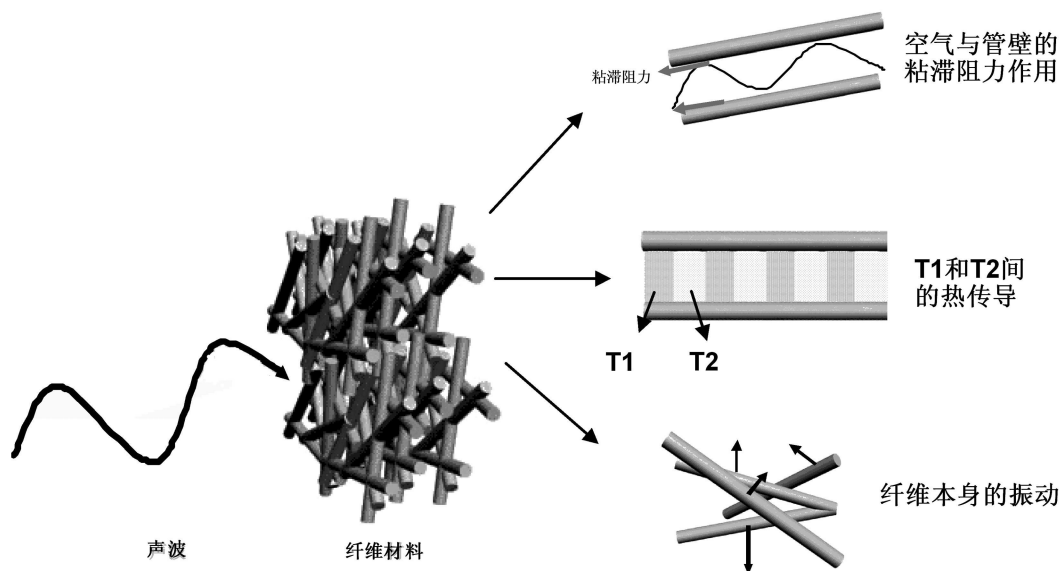


图2 聚合物纤维类吸声材料吸声机理示意图

Figure 2 Schematic diagram of sound absorption mechanism of sound absorption materials based on polymer fibers

2.1 经验模型

在声学理论模型中,一个重要的声学参量是流体阻抗(简称流阻)。很多学者都是从流阻的角度入手研究材料的声学性能。例如,1969年 Delany 和 Bazley 等^[57]首次提出了经验模型,通过对大量纤维吸声材料声学数据的测量与研究,将特性阻抗(z)和传播系数(γ)归结为频率(f)除以流体阻抗(σ)的函数,从而预测一定流阻值范围($10 \leq \frac{f}{\sigma} \leq 1000$)的单层材料的吸声系数,同时他们还绘制了可直接从材料的本体密度预测材料流阻的经验图。后来 Miki 等^[64,65]对该模型进行了修正,拓宽了其适用范围,并考虑了材料的孔隙率、弯曲度、孔形状因子比等参数的影响,使得该模型更加适合于纤维材料的吸声性能预测。Voronina 等^[66]通过对实验结果的分析(纤维直径 $1 \sim 10 \mu\text{m}$),引入结构特征参数 Q ,得出纤维的特性阻抗(z)和传播系数(γ)与纤维的直径 d 和孔隙率 σ 的函数关系。因此,只需通过纤维直径 d 和密度 ρ 就能够预测材料的声阻抗和吸声系数。1995年 Narang^[67]研究了聚酯纤维的声学性能,指出玻璃纤维的经验模型并不适合于聚酯纤维,他提出了通过单位体积聚酯纤维的数量来计算材料流阻的公式,利用该公式预测的聚酯纤维声学性能与实际结果较为吻合。Massimo^[58]则对聚酯纤维提出了一种新的模型,该模型通过材料的密度和厚度等物理参数值计算聚酯纤维材料的流阻,并且利用改进的 Delany 和 Bazley 幂律关系(power-law relationship)的相关参数计算出声阻抗和吸声系数,发现该模型的预测值与样品的实际测试结果较一致。

2.2 现象模型或微结构模型

现象模型指的是用等效耗散流体来替代流体饱和和多孔介质^[58]。而微结构模型则是从材料的内部结构来预测材料的声学性质,一般需要五个模型参数(如流阻,孔隙率,弯曲度,动态和静态形状因子),如果使用“孔形状因子比”,参数可以降到四个。虽然这两种模型的研究较多^[68~71],且比经验模型有更大的应用范围,但往往较为复杂。

2.3 有效压缩模量和有效密度理论

这个理论建立于多孔吸声材料的微观吸声理论上。通常可以用有效密度 ρ ,有效压缩模量 B ,复特性阻抗 ρc 和复声速 c 四个声学参数来描述,其中有两个量是互相独立的,另外两个量可以从中导出。根据这四个声学参数随频率变化的定量计算公式即可预测材料的声学性能^[72]。

2.4 振动吸声模型

张新安等^[73~75]研究发现单层纤维作为吸声无纺布时吸声较弱,而在其与刚性背衬之间存在一定空气层(简称“背空”,下同)时吸声性能较好。他们认为薄纤维层材料吸收声波是通过材料波动造成的声能损失。其结合穿孔板、薄膜共振吸收理论提出了纤维材料振动吸收理论,纤维材料受声波作用而产生的弹性变形以及变形时纤维之间的摩擦损耗将声能转为热能。通过膜振动方程计算得出的纤维层特性阻抗值以及吸声系数与测试结果较符合。

2.5 其它模型

近年来也有学者提出了关于纤维吸声材料的其它模型。如 Yakir 和 Yakubov 等^[61]根据 Zwikker 和 Kosten 提出的多孔柔性介质模型,用流体力学方法计算得出在可听频率范围内能达到的最高吸声系数的无纺布纤维的内在特征值,其结果对于纤维设计具有指导意义。Genis 等^[62]通过实验数据分析,发现纤维类吸声材料在 1000~2000 Hz 区域有一个明显的最大吸收。他们用空气动力学方法提出了从吸声材料结构参数来预测纤维类材料吸声系数的方程,模型拟合结果和实际较符。Tascan 等^[27]则提出了一种适合于聚酯纤维的理论—柔性纤维骨架理论,并很好地解释了聚酯纤维的声学特性。

3 影响聚合物纤维类材料吸声性能的因素

3.1 化学结构

从最初的棉、麻等天然聚合物到聚丙烯、聚酯等合成高分子,化学组成以及结构的差异导致了它们内聚能与粘弹特性的不同,从而使得它们在骨架强度、弯曲度等诸多物理性质上存在区别,最终影响其吸声性质^[76]。Youngjoo 等^[77]研究了聚合物纤维的粘弹性和吸声系数的关系,发现中空聚酯纤维以及黄麻纤维的损耗因子要大于普通聚酯纤维以及洋麻纤维,因此前者吸声系数要高于后者。Jiang 等^[39]将棉无纺布作为基体层,用碳化后的棉无纺布作表层获得的复合材料在 100~6400 Hz 的吸声系数为 0.795,比用玻璃纤维或者单纯的棉纤维作表层的复合材料的吸声系数(玻璃纤维:0.689,棉纤维:0.744)要高。作者认为碳化过程中,材料化学结构有所变化,C—O 和 C—C 键的断裂虽导致了无纺布强度的下降,但碳化后的无纺布既具有纤维之间的空隙,又在碳化纤维表面存在微孔,因此显示出更优异的声学性能。

3.2 微观物理结构

相比化学结构,物理结构参数对于吸声性质更为重要。调控这些物理参数是调控聚合物纤维类吸声性能的重要手段之一。对于单根纤维而言,微观物理参数包括:(1)纤维尺寸;(2)纤维横截面。

3.2.1 纤维尺寸 Tascan 等^[78]指出无纺材料中纤维的细度以及横截面积直接关系到纺织品的表面积。细度越小,单位质量内的纤维数量越多,总体表面积越高,导致声波进入到材料内部可以与更多的纤维进行相互作用,从而获得优异的吸声效果。他们通过对不同细度的聚酯纤维声学性能研究发现,细度为 3 denier 的聚酯纤维在同等条件下要比细度为 15 denier 的聚酯纤维的声学效果优异。Ballagh 等^[79]比较了直径为 22 μm、28 μm、35 μm 的纤维样品的声学性能。结果发现在 200~1000 Hz 频率范围内,吸声系数随着纤维直径的减小而增加了约 0.1。除此之外,近些年来有关超细纤维作为吸声材料的研究也日益增多^[80]。Iwasaki 等^[81]制备了表面层含有超细纤维的无纺布,该无纺布在 1000 Hz 的声吸收率大于或等于 50%。捷克的 Elamarco 公司^[82]利用自行研发的静电纺丝装置在微米级别的聚酯纤维上制备聚合物纳米纤维层,获得的微纳多级结构纤维既保持传统纤维材料优异的高频吸声特性,又利用纳米纤维的共振提高了材料在中低频段的吸收。上述研究表明不同细度的纤维材料其吸声性质不同,因此可以通过调节纤维的细度来实现吸声性质的可调。相对于天然高分子而言,合成聚合物纤维材料在纤维直径调节方面更具优势,简单方便的成型过程使获得不同直径的聚合物纤维类材料更加容易,从而最终制备出吸声性能优异的材料。

3.2.2 纤维横截面 纤维横截面的不同将会导致材料的比表面积出现差异,从而影响声波与纤维的接触与摩擦。Tascan 等^[78]研究了三种不同横截面(树枝型、三角型、圆形)聚酯纤维的声学性能,得出结论:树枝型的聚酯纤维要比其它两种纤维的声学效果好,原因在于前者拥有较大的比表面积,能增加声波与

纤维的接触和相互作用。

3.3 宏观物理结构

3.3.1 厚度 纤维材料的厚度增加,声波与材料的相互作用时间增长,摩擦损失增大,声学性能尤其是低频吸声性能将随之提高。赵松龄等^[72]提出当吸声材料层背面是刚性体时,材料吸声曲线所对应的第一共振频率 f_r 与厚度 D 的乘积略等于材料中声速的四分之一,即对于同一种吸声材料来说,材料层厚度加倍时,第一共振频率会向低频方向移一个倍频程。阎志鹏等^[45]通过对不同厚度,相同规格的聚酯纤维进行测试,发现随着厚度的增加,材料的吸声性能逐渐提高。其认为厚度增加,材料的比流阻下降,导致声学性能提高。此外,当纤维类材料有一定的背空距离时,其起到的作用和增加厚度等效。

3.3.2 孔隙率 影响聚合物纤维类材料吸声性能的一个重要的因素是材料的孔隙率。孔隙率过大,声波与材料的相互作用减小,导致声波易透过材料,声学性能下降;孔隙率过小,材料太密实,反射的声能较多,吸声性能也会下降。因此对于聚合物纤维类材料而言一般有最优的孔隙率范围。由于材料的孔隙率和材料的体积质量(或者叫堆积密度)成反比,因此马大猷先生等^[83]认为纤维制品的吸声系数有一个最佳体积质量,它与频率有关。例如,纤维毡的最佳体积质量约为 $150\text{kg}/\text{m}^3$ 。Yang等^[84]通过实验研究发现纤维聚集体的堆积密度增加时,吸声系数的峰值将移向低频。

3.3.3 纤维表面平整度 粗糙的表面将会增加材料与声波的接触面积从而提高声学性能。闫志鹏等^[45]对聚酯纤维进行表面平整处理后发现吸声系数下降。他们认为平整处理后表面孔隙率以及声波与材料的接触面积的下降导致了吸声性能的减弱。Fujii等^[85]用纸浆纤维和纸制备了吸声材料,然后通过绉纱,压花工艺使表层起皱,使材料的吸声性能提高。因此从材料的制备角度而言,如果能制备出表面粗糙的纤维,将有利于改善其吸声性能。

3.3.4 成型方式 成型方式的不同将使材料的聚集形态发生变化,从而对材料的声学性能产生影响。对聚合物纤维类材料而言,最常见的成型方法是织造成型以及非织造成型。由于这两种方法简单,适用范围广,故在纤维类吸声材料的研究领域被广泛采用^[86,87]。Shoshiani等^[88]研究发现将织造成型与非织造成型纤维复合获得的材料比分别单独使用声学性能更优异。此外,对于纤维复合材料而言,成型方式需要根据材料的特性以及应用目的进行选择,一些常见的获得优异吸声性能的成型方式包括:

(1)纤维共混成型:将聚合物纤维(聚丙烯、聚酯)与天然纤维(洋麻、黄麻、羊毛、亚麻)进行共混^[89],或者将非弹性卷曲聚酯短纤维与聚合物热粘结纤维混合后^[90]能有效地降低噪音;Seo等^[91]通过将热塑性树脂纤维和天然纤维共混后压成多层结构材料,具有轻质和优异的吸声性能;

(2)纤维填充成型:Good等^[92]用纤维增强热塑性树脂,同时混有聚合物珠。相比玻璃纤维增强热塑性聚合物,这种复合材料吸声性能更优异,特性流阻提高50%以上;

(3)树脂填充成型:Tanaka等^[93]发明了一种由无纺布和树脂膜($30\sim 200\mu\text{m}$ 厚)组成的复合材料。该材料质轻,声吸收性能优异。Kosuga等^[94]用直接喷涂的方法将包含颜料、阻燃剂和抗水剂的合成树脂纤维喷到吸声层无纺布上,从而使其粘在无纺布上,形成兼具隔热、阻燃、吸声的多层结构。

3.4 外界条件

3.4.1 温度 从材料的角度而言,温度会影响聚合物纤维类材料的性质,因为不同种类的聚合物在其特征温度(如玻璃化转变温度等)有着不同的性质;从声学的角度而言,温度将影响声波的传播,引起声速和波长的变化,同时会引起空气粘滞性的变化,从而导致流阻改变,最终影响材料对声波的吸收。此外,吸声系数的频率特性也会随温度作相应的移动。温度升高,共振频率向高频移动;温度降低,共振频率向低频移动^[95]。

Nishada等^[96]用玻璃化转变温度在 $55\sim 75^\circ\text{C}$ 范围内的聚酯纤维制成无纺吸声布,应用于洗衣机、空调等有马达的区域。因为马达的高速运转将会带来温度的升高,使材料经历玻璃化转变,损耗因子达最大,从而通过分子的热运动消耗声能,故在该温度范围内无纺吸声布具有优异的吸声性质。

3.4.2 材料压缩 材料受到压缩后,其物理参数如厚度、孔隙率等将会发生变化,从而影响到材料的吸声性能。Castagnède等^[97]认为在纤维垫的压缩过程中吸声性质下降。如图3所示。他们为了预测这种

变化,用标准的等价流体模型描述了在压缩过程中物理参数的改变(如孔隙率、阻抗、弯曲度、热特征长度和粘性特征长度等),并计算出吸声系数。通过测试汽车工业常用的纤维材料(压缩和被压缩)的实验数据,发现其与理论值较为吻合。

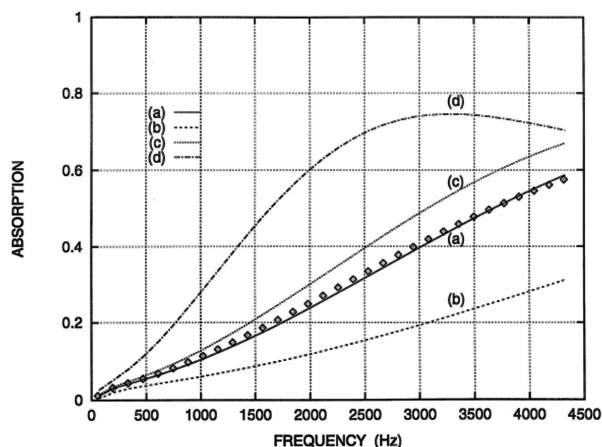


图 3 不同压缩比条件下纤维材料的吸声系数模拟

(a-压缩比 $n=1.133$, b-压缩比 $n=2$, c-压缩比 $n=0.944$, d-压缩比 $n=0.5$)

Figure 3 Numerical simulations of the absorption coefficient as a function of frequency for a compressed fibrous material (a-compression rate $n=1.133$; b-compression rate $n=2$; c-compression rate $n=0.944$; d-compression rate $n=0.5$)

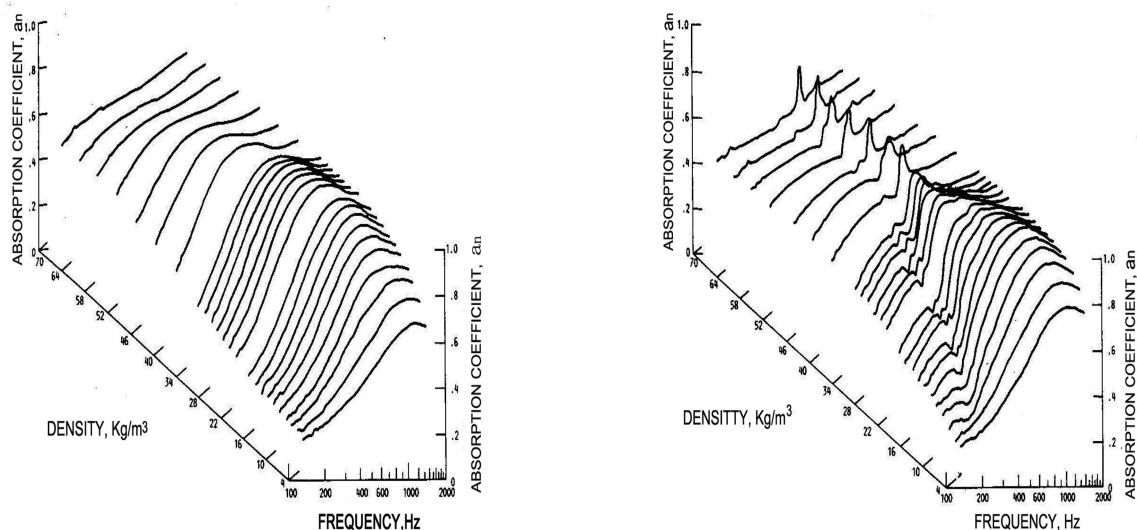


图 4 与声源方向呈不同排列的 kevlar 纤维在不同密度下获得的吸声系数图

(左:平行于声源方向;右:垂直于声源方向)

Figure 4 Normal absorption coefficient curves as a function of density for parallel (left) and normal (right) fiber measurements

3.4.3 材料的安置方式 纤维与声源的不同安置方式,将会带来吸声性能的差异。Dahl 等^[98]研究了容重为 $4.6 \sim 66.7 \text{ kg/m}^3$ 的 Kevlar 纤维垂直声源方向和平行声源方向两种条件下的声学性能。其发现垂直于声波传播方向排列纤维时,当入射声波进入材料后,材料内部的粘滞阻力以及声压梯度将产生足够的力使垂直声源方向纤维共振,从而消耗声能,故吸声图谱上存在结构共振峰;而在平行声源排列时,纤维所受到的粘滞阻力以及声压梯度不足以使材料压缩或弯曲形成共振,故共振峰不存在(如图 4 所示)。另外,在最低容重 4.6 kg/m^3 时,平行于声波传播方向排列的纤维的吸声系数低于或接近于相同密度下垂直声源方向的声学性能,但随着密度的增加,垂直声源方向纤维的结构共振峰越来越明显,而平行于声波传播方向排列的纤维的吸声系数将高于垂直声源方向纤维 $3.5\% \sim 14\%$ 。

4 聚合物纤维类吸声材料的发展趋势

随着时代的发展,人们对减振降噪的要求日趋强烈,因此吸声材料的研究开发也日益紧迫。在未来很长的一段时间内,聚合物纤维类吸声材料仍然将是声阻尼领域一个重要的研究方向。从结构上来说,通过设计并调控聚合物纤维的尺度及结构,进而调控材料的吸声性能将是发展趋势之一;从功能上来说,多功能化的聚合物纤维类吸声材料必将成为研究的重点,它将赋予传统吸声材料新的性能,从而拓展该类材料的应用领域。此外,复合纤维的研制将给吸声材料领域带来新的曙光;能够结合共振结构在中低频吸声性能优异的特点,并保持本身高频吸声特性的新型聚合物纤维吸声材料也是未来重要发展方向之一。总而言之,厚度薄、质量轻、结构强、吸声频带宽、综合性能优异的聚合物纤维材料将是未来吸声材料总的发展趋势。

参考文献:

- [1] Birgitta B, Thomas L, Dietrich H S. Guidelines for Community Noise. World Health Organization, 1999; 21~35.
- [2] 年洪恩, 李金洪, 刘同义. 保温材料与节能技术, 2006, 2; 24~29.
- [3] Tarnow V. J Acoust Soc Am, 2000, 108(51); 2243~2247.
- [4] Tarnow V. J Acoust Soc Am, 1995, 97(4); 2272~2281.
- [5] 王录才, 王芳. 金属功能材料, 2004, 11(5); 17~18.
- [6] Kamisaka K. JP, 2000234314-A, 2000.
- [7] 汤慧萍, 奚正平, 敖庆波, 朱纪磊, 王建永, 李程, 支浩. 中国专利, 101740022-A, 2010-06-16.
- [8] Yoshio I T. J Appl Polym Sci, 1982, 27(1); 183~195.
- [9] Byun H S, Lee T G. Polym-Korea. 2001, 25(3); 427~434.
- [10] Lee J, Lee Z X, Anon. KR 2010086584-A, 2010.
- [11] Sung C H, Lee K S, Lee K S, Oh S M, Kim J H, Kim M S, Jeong R M. Macromol Res, 2007, 15(5); 443~448.
- [12] Gardner G C, O L M, Hansen S, Sun J Q. Appl Acoust, 2003, 64(2); 229~242.
- [13] 李晶, 郭秉臣. 非织造布, 2007, 15(1); 8~13.
- [14] 谢晓丽, 狄剑锋. 五邑大学学报: 自然科学版, 2007, 21(3); 7~11.
- [15] Masuda T, Numata R, Anon. JP, 2010120830-A, 2010.
- [16] Li B, Zhou H, Huang G S. J Mater Sci, 2007, 42; 199~206.
- [17] Shuichi A, Taiki T, Yoichi T, Shigeo A, Masao S. J Appl Polym Sci, 2005, 99; 2878~2884.
- [18] 张会萍, 盛美萍, 陈晓利. 电声技术, 2007, 31(1); 13~15.
- [19] Kim J J, Jeong J H, Sohn J Y. Build Serv Eng Res T, 2009, 30(3); 213~226.
- [20] Lee Y Y, Lee E W. Int J Mech Sci, 2007, 49(8); 925~934.
- [21] 王季卿. 声学技术, 2003, 22(4); 213~218.
- [22] Youn E L. J Appl Polym Sci, 2004, 92(4); 2295~2302.
- [23] Parikh D V, Sachinvala N D, Chen Y, Sun L, Bhat G, Ramkumar S. Aatce Rev, 2006, 6(1); 43~48.
- [24] 金雪莉, 曾令可, 李萍, 侯来广. 华南理工大学学报, 2007, 35(12); 97~101.
- [25] Youngjoo N, Lancaster J, Casali J, Cho G. Text Res J, 2007, 77(5); 330~335.
- [26] Huda S, Yang Y. Macromol Mater Eng, 2008, 293(3); 235~243.
- [27] Tascan M. Acoustical properties of nonwoven fiber network structures, USA; Clemson University, 2005.
- [28] Yoshida M, Anon. JP 2010031404-A, 2010.
- [29] Yoshida M, Anon. JP 2010046394-A, 2010.
- [30] Cho N W, Lee J C, Min B Y, Oh J S, Suh H S, Anon. KR 2009121859-A, 2009.
- [31] Fukuhara T, Yoneda K, Ogami H. JP 2006307608-A, 2006.
- [32] 乔明. 山西建筑, 2003, 29(1); 103~104.
- [33] National Occupational Health and Safety Commission. National Standard for synthetic Mineral Fibres. Canberra; Australian Government Publishing Service, 1990.
- [34] Sugimoto T. JP 2008020864-A, 2008.
- [35] 马大猷. 噪声与振动控制工程手册. 北京: 机械工业出版社, 2002; 452.
- [36] Koizumi T, Tsujiuchi N, Adachi A. High Performance Structures and Materials. United Kingdom; WIT Press, 2002.

- [37] Koizumi T, Tsujiuchi N, Fujita K. *High Performance Structures and Materials*. United Kingdom: WIT Press, 2004.
- [38] Kikuchi S, Komazawa K, Kohashi K. *Journal of the Hokkaido Forest Products Research Institute*, 2002, 16(3): 1~6.
- [39] Jiang N, Chen J Y, Parikh D V. *Bioresource Technol*, 2009, 100(24): 6533~6536.
- [40] Jang S, Anon. KR 2010011473-A, 2010.
- [41] 刘正伟, 张美云, 钟林新, 孙丽红. *中国造纸*, 2008, 27(5): 19~23.
- [42] Ersoy S, K H. *Appl Acoust*, 2009, 70(1): 215~220.
- [43] 金雪莉, 曾令可, 税安泽, 侯来广, 李萍, 王慧, 刘平安, 张明. *硅酸盐学报*, 2006, 34(12): 1475~1480.
- [44] Kosuge K, Takayasu A, Hori T. *J Mater Sci*, 2005, 40(20): 5399~5405.
- [45] 闫志鹏, 靳向煜. *产业用纺织品*, 2006, 24(12): 13~16.
- [46] Koga S, Fujimoto K, Anai K. *J Acoust Soc Am*, 2006, 120(5): 3147.
- [47] Tejima T, Suzuki Y. JP 2008006999-A, 2008.
- [48] Kosuge K. *Sehi Gakkaishi*. 2006, 62(1): 54~60.
- [49] Narita S, Matsumura K, Kajiyama H. JP 2007314906-A, 2007.
- [50] Thilagavathi G, Pradeep E, Kannaian T, Sasikala L. *J Ind Textil*, 2010, 39(3): 267~278.
- [51] Parikh D V, Chen Y, Sun L. *Text Res J*, 2006, 76(11): 813~820.
- [52] Seo D. WO 2006112599-A1, 2006.
- [53] Mueller D H, Krobjilowski A. *J Ind Textil*, 2003, 33(2): 111~129.
- [54] Chen D K, Li J, Ren J. *Compos Part A-Appl Sci Manuf*, 2010, 41(8): 1012~1018.
- [55] Jean F. Allard, Claude Depollier, Philippe Guignouard P R. *J Acoust Soc Am*, 1991, 89(3): 999~1001.
- [56] Tarnow V. *J Acoust Soc Am*, 1999, 105(1): 234~240.
- [57] Delany M E, Bazley E N. *Appl Acoust*, 1970, 3(2): 105~116.
- [58] Garai M, Pompoli F. *Appl Acoust*, 2005, 66(12): 1383~1398.
- [59] 马大猷. *现代声学理论基础*. 北京: 科学出版社, 2004.
- [60] 张新安. *振动吸声理论及声学设计*. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [61] Shoshani Y, Yakubov Y. *Appl Acoust*, 2000, 59(1): 77~87.
- [62] Genis A V, Kostyleva E Y, Kostylev V A. *Fibre Chemistry (English Translation of Khimicheskie Volokna)*, 1990, 21(5): 389~392.
- [63] Kato D. JP 2007199270-A, 2007.
- [64] Tang C Y, Chen P P, Liu H Q. *Polym Eng Sci*, 2008, 48(7): 1296~1303.
- [65] Esrafilzadeh D, Jalili R, Morshed M. *J Appl Polym Sci*, 2008, 110(5): 3014~3022.
- [66] Voronina N. *Appl Acoust*, 1994, 42(2): 165~174.
- [67] Narang P P. *Appl Acoust*, 1995, 45(4): 335~358.
- [68] Ma B. *J Acoust Soc Am*, 1956, 28: 168~191.
- [69] Lambert R F. *J Acoust Soc Am*, 1982, 72(3): 879~887.
- [70] Attenborough K. *J Acoust Soc Am*, 1983, 73(3): 785~799.
- [71] Wilson D K. *J Acoust Soc Am*, 1993, 94(2): 1136~1145.
- [72] 赵松龄. *噪声的降低与隔离*. 上海: 同济大学出版社, 1985: 130.
- [73] Zhang X A. *Journal of Donghua University (English Edition)*, 2007, 24(3): 375~380.
- [74] Zhang X A. *J Acoust Soc Am*, 2008, 123(5): 3497.
- [75] 张新安. *西安工程科技学院学报*, 2006, 20(2): 135~138.
- [76] Ford R D. *Introduction to Acoustics*, New York: Elsevier Publishing, 1970.
- [77] Na Y, Cho G. *Fiber Polym*, 2010, 11(5): 782~789.
- [78] Tascan M, Vaughn E A. *Text Res J*, 2008, 78(4): 289~296.
- [79] Ballagh K O. *Appl Acoust*, 1996, 48(2): 101~120.
- [80] Inagaki K, Anon. JP 2010102236-A, 2010.
- [81] Iwasaki H, Anon. JP 2010128005-A, 2010.
- [82] Stranska D, Mares L, Jirsak O, Kalinova K. WO 2008083637-A1, 2008.
- [83] 马大猷. *声学手册*. 北京: 科学出版社, 2004.
- [84] Yang S, Yu W D, Pan N. 2010 International Forum on Biomedical Textile Materials. *Proceedings*, 2010: 322~327.
- [85] Fujii M, Mizutani N, Ogawa M, Anon. JP 2010096979-A, 2010.
- [86] Anon. *Appl Acoust*, 1990, 30(4): 321~333.
- [87] Kannan A J, Banks-lee P, Jones M. Joint INDIA-TAPPI Conference - INTC 2005; International Nonwovens Technical Conference, United States; Association Nonwoven Fabrics Industry, 2005.

- [88] Shoshiani Y K. J Text Inst, 1991, 82(4); 500~503.
[89] Parikh D V, Chen Y, Sun L. Text Res J, 2006, 76(11); 813~820.
[90] Suzuki A, Watanabe N. JP 2008068799-A, 2008.
[91] Seo D. WO 2008044892-A1, 2008.
[92] Good B T, Ebeling T A. US 2008008869-A1, 2008.
[93] Tanaka S, Tanabe H, Otsuki T. JP 2007083923-A, 2007.
[94] Kosuga K, Yamamoto T. JP, 2007279649-A, 2007.
[95] 康玉成. 使用建筑吸声设计技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
[96] Nishida S, Inagaki N, Sakamoto H, Okazaki N. JP 2006144159-A, 2006.
[97] Castagnede B, Aknine A, Brouard B, Tarnow V. Appl Acoust, 2000, 61(2); 173~182.
[98] Dahl M D, Rice E J, Groesbeck D E. J Acoust Soc Am, 1990, 87(1); 54~66.

Recent Progress in Sound Absorption Materials Based on Polymer Fibers

XIANG Hai-fan^{1,2}, ZHAO Ning^{1*}, XU Jian^{1*}

(1. Laboratory of Polymer Physics and Chemistry, Beijing National Laboratory for Molecular Sciences,
Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Noise pollution is becoming a serious problem due to its great adverse effects on the development of economy and human health. Therefore, how to control the noise and develop excellent sound absorption materials to prevent the noise pollution is an important and urgent issue. Recent progress in sound absorption materials based on polymer fibers is reviewed. This paper begins with the development of acoustical fibers, and then focuses on the research of polymer fibers. The sound absorption mechanism, the influence factors in acoustic performance and the relationship between the structure and acoustic properties of the polymer fibers are introduced. The prospect of these materials is proposed.

Key words: Polymer; Fiber; Structure; Sound absorption