

广州市科学技术协会
广州市南山自然科学学术交流基金会
广州市合力科普基金会

资助出版

高分子复合材料 隔声学导论

梁基照 — 著

 科学出版社

广州市科学技术协会
广州市南山自然科学学术交流基金会
广州市合力科普基金会

资助出版

高分子复合材料 隔声学导论

梁基照 — 著

科学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统论述了高分子复合材料隔声理论、隔声性能测量原理与方法 and 主要内容包括固体材料隔声的基本理论和高分子复合材料隔声过程及其表征, 高分子复合材料隔声性能测量, 高分子/无机粒子复合材料隔声性能, 高分子/中空微球复合材料隔声性能, 高分子/无机粒子复合材料隔声量方程。

本书可供材料科学与工程、化学工程等学科的高校师生阅读使用, 也可供从事高分子复合材料研究与应用的工程技术人员使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

高分子复合材料隔声学导论/梁基照著. —北京: 科学出版社, 2017.6

ISBN 978-7-03-053364-7

I. ①高… II. ①梁… III. ①高分子材料—复合材料—吸声材料
IV. ①TB324②TB34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 132563 号

责任编辑: 郭勇斌 肖 雷 / 责任校对: 刘亚琦
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 黄华斌

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2017 年 6 月第一次印刷 印张: 9 3/4

字数: 165 000

定价: 58.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

噪声污染是当今三大主要污染之一。目前，控制噪声常用的方法是吸声和隔声。高分子复合材料的声学性能是其使用性能的重要指标之一。声学性能主要包括隔声性能和吸声（或消声）性能等。高分子复合材料的隔声过程及其机制十分复杂，影响高分子复合材料隔声性能的因素众多，如填充材料自身的隔声性能、含量、大小及其在基体中的分散与分布状态。因此，揭示高分子复合材料的隔声过程及机制，进而定量地预测其隔声性能，有助于指导具有隔声功能的新型聚合物复合材料的研制和加工，以及加工机械设计与优化，是高分子复合材料研究者和工程技术人员长期努力的目标之一。

本书内容共分为 10 章。第 1 章绪论；第 2 章固体材料隔声的基本理论；第 3 章高分子复合材料隔声过程及其表征；第 4 章高分子复合材料隔声性能的测量；第 5 章高分子/实心无机粒子复合材料隔声性能；第 6 章高分子/中空无机粒子复合材料隔声性能；第 7 章高分子/实心无机粒子复合材料隔声量方程；第 8 章高分子/中空无机粒子复合材料隔声量方程；第 9 章高分子/实心无机粒子复合材料隔声量预测；第 10 章高分子/中空无机粒子复合材料隔声量预测。

迄今，有关高分子复合材料隔声理论方面系统的著述甚少。本书全面阐述了高分子复合材料的隔声理论及隔声量的定量表征，可用于指导隔声高分子复合材料的研究、设计与制备，既适合从事高分子材料加工行业的工程技术人员使用，又可作为高校相关专业师生的参考用书。

作者自 2000 年起从事高分子复合材料隔声机制的研究，指导了多届研究生课题研究。本书是基于这些研究及参考有关文献资料撰写而成的。限于作者的学识和水平，书中难免有疏漏之处，真诚地希望读者指正。

本书的出版获得广州市科学技术协会、广州市南山自然科学学术交流基金会、广州市合力科普基金会共同设立的 2016 年度出版资助项目的资助。

在本书的撰写过程中，得到了家人与同事的关心和支持。此外，研究生蒋兴华和朱波等也给予了协助。在此，对所有曾经帮助过本书出版的人士致以最衷心的感谢！

作 者

2016 年 12 月

于广州

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 概述.....	1
1.2 隔声材料与隔声构件.....	2
1.3 隔声高分子复合材料.....	4
1.4 隔声理论研究.....	9
1.5 隔声高分子复合材料的发展趋向	11
参考文献.....	14
2 固体材料隔声基本理论	17
2.1 概述.....	17
2.2 声波的基本概念	17
2.3 声波传播的基本方程	21
2.4 固体材料隔声的基本原理	22
2.5 固体材料隔声的定量描述	24
2.6 分析与讨论	28
参考文献.....	29
3 高分子复合材料隔声过程及其表征	31
3.1 概述	31
3.2 隔声过程	31
3.3 隔声性能的主要表征方法	33
3.4 隔声物理模型	35
3.5 隔声量的一般定量表示	40
3.6 分析与讨论	43
参考文献.....	46
4 高分子复合材料隔声性能的测量	47
4.1 概述	47
4.2 噪声及其测量	47

4.3	隔声量	50
4.4	隔声量的测定	50
4.5	分析与讨论	56
	参考文献	58
5	高分子/实心无机粒子复合材料隔声性能	59
5.1	概述	59
5.2	聚丙烯/纳米碳酸钙复合材料	59
5.3	丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物/碳酸钙复合材料	62
5.4	聚氯乙烯/玻璃微球复合材料	65
5.5	聚丙烯/黏土复合材料	67
5.6	分析与讨论	69
	参考文献	72
6	高分子/中空无机粒子复合材料隔声性能	74
6.1	概述	74
6.2	聚丙烯/中空玻璃微珠复合材料	74
6.3	聚丙烯/碳纳米管复合材料	76
6.4	丙烯腈-丁二烯-苯乙烯/碳纳米管复合材料	78
6.5	聚氯乙烯/中空玻璃微珠复合材料	80
6.6	聚丙烯多元复合材料	81
6.7	分析与讨论	84
	参考文献	85
7	高分子/实心无机粒子复合材料隔声量方程	87
7.1	概述	87
7.2	隔声机制	87
7.3	隔声物理模型	88
7.4	单元隔声量确定	90
7.5	复合体系隔声量方程	95
7.6	分析与讨论	96
	参考文献	97
8	高分子/中空无机粒子复合材料隔声量方程	99
8.1	概述	99
8.2	理论描述	100
8.3	隔声模型	102

8.4	隔声量方程	107
8.5	分析与讨论	107
	参考文献	108
9	高分子/实心无机粒子复合材料隔声量预测	110
9.1	概述	110
9.2	聚丙烯/碳酸钙复合体系隔声量预测	110
9.3	聚丙烯/纳米碳酸钙复合体系隔声量预测值与实测值的比较	115
9.4	丙烯腈-丁二烯-苯乙烯/碳酸钙复合体系隔声量预测值与实测值的 比较	117
9.5	聚氯乙烯/玻璃微珠复合体系隔声量预测值与实测值的比较	119
9.6	分析与讨论	124
	参考文献	126
10	高分子/中空无机粒子复合材料隔声量预测	128
10.1	概述	128
10.2	聚丙烯/中空玻璃微球复合体系	128
10.3	丁腈橡胶/中空玻璃纤维复合体系	134
10.4	丙烯腈-丁二烯-苯乙烯/碳纳米管复合体系	138
10.5	聚氯乙烯/中空玻璃微球复合体系	141
10.6	分析与讨论	142
	参考文献	144

1 绪 论

1.1 概 述

噪声污染是当今三大主要污染之一。随着工业的发展,噪声对人类社会的影响日益严重。例如,各种生产噪声、施工噪声、交通噪声及社会生活噪声日益影响人类的生活环境和工作环境,严重危害人类的身体健康。一般强度的噪声可使人产生烦恼、焦躁,干扰语言交谈;强噪声可引起耳聋,进而诱发各种疾病。医学测试表明:当人类在睡眠状态时,在 40~60 dB 的噪声作用下,其自主神经出现反应。换言之,40~60 dB 的噪声就开始对人的正常睡眠产生影响。日常谈话的声音强度一般为 60~70 dB;当噪声声级达 60~70 dB 时,电话通话有一定困难;当噪声声级大于 75 dB 时,电话通话非常困难;噪声声级 85 dB 以上时完全无法通话。目前,我国城市的交通噪声、工厂生产过程的噪声、建筑施工中的机械设备噪声等常常大于 70 dB,对居民正常生活影响甚大,严重影响人们的身体健康。总而言之,噪声已成为人类生活中的大敌,严重影响人类的生活质量,使人类的生活环境日益恶化。噪声污染的防治与控制已成为当今全球关注的亟待解决的重大课题之一。因此,有关高效吸声、隔声材料的开发也被提升到一个优先的研究方向。

为了有效地防治噪声和控制噪声,应从声源、传播途径及接受者三个环节组成的声学系统进行考虑。但由于客观原因,第一及第三个环节是目前难以改变的。所以,人们大多聚焦于如何因应噪声的传播途径,采取适当的措施。换言之,着重研究噪声的传播途径及其规律,以尽可能降低噪声声级。目前,常用的控制噪声方法主要有吸声和隔声。即:①优化吸声材料、设计及优化吸声制品结构,以更有效地降低反射引起的混响声,从而达到控制噪声声强或音量的目的;②利用隔声材料制成隔声装置,把噪声与其他环境隔离开,营造适合人类工作和生活的环境,以达到噪声的防治及控制^[1-3]。显然,吸声与隔声在原理上存在明显的差别,故吸声材料与隔声材料的设计也不一样。吸声的目标是减弱声音在同环境里的反

射,即减弱室内的混响声,缩短混响声的延续时间,即混响时间。所以,吸声材料主要是尽可能地减少反射声能或在材料中尽可能多地消耗声能。吸声材料要达到对入射声能的反射能尽可能的小,这意味着声能容易进入和透过这种材料。因此,吸声材料一般是多孔、疏松和透气的,如多孔性吸声材料,它在工艺上通常是用纤维状、颗粒状或发泡材料形成多孔性结构。它的结构特征是材料中具有大量的、互相贯通的、从表到里的微孔,具有一定的透气性。当声波入射到多孔材料表面时,引起微孔中的空气振动,由于摩擦阻力和空气的黏滞阻力及热传导作用,将一部分声能转化为热能,从而起到吸声作用。

应该指出的是,由于吸声材料和隔声材料均能达到控制噪声声强的效果,故在选择使用声学材料时,吸声材料和隔声材料并不截然划分。例如,吸声材料也可应用于隔声场合,即应用吸声材料制备隔声构件。本书的重点是阐述隔声材料及其隔声过程机制。

1.2 隔声材料与隔声构件

隔声就是利用隔声材料制备的隔声构件(如板材)隔离、阻挡声波(尤其是噪声)的传播,把声源(尤其是噪声源)引起的吵闹环境限制在局部区域内或把吵闹的环境隔离出来,或降低噪声声级,以营造一个安静的场所。因此,隔声材料应尽可能地增加材料的反射声能,也可以通过增加其材料内部对噪声声能的转化和损耗达到更好的隔声效果。显然,隔声材料和吸声材料在研究和开发方面存在一定的差异。

1.2.1 传统隔声材料及其构件

对于隔声材料,要尽可能地减弱噪声透射声能,阻挡噪声的传播,不能如吸声材料那样多孔、疏松、透气;相反,它的材质应该是重而密实的,如铜板、铅板等。因此,传统的隔声材料及其隔声构件一般根据质量定律进行设计加工。例如,一般采用一些高密度材料作为隔声材料,如金属材料等;隔声构件(如板材)的厚度通常较大,如黏土砖、实心砖墙等^[4]。由于实心砖墙的厚度大、面密度重,所以,根据隔声质量定律可知砖墙具有良好的隔声性能。通常砖墙的隔声指数约52 dB,能够很好地满足住宅建筑一级隔声标准要求,但是这种隔声材料的生产会浪费大量的自然资源。目前,我国建筑面积居世界首位,由于大量生产实心黏土

砖, 严重毁田, 消耗大量煤炭。据有关资料报道, 我国每年因为烧砖而毁田面积约 8 万亩, 耗煤约 6000 万吨。

尽管这些传统的隔声材料及其构件在很大程度上满足了工程的需要, 但是也浪费了很多自然资源。因为生产这些传统的高密度、大厚度、单一的隔声材料及其构件的缺点之一就是耗资大、生产效率低, 为了保护土地资源, 节约能源, 减轻交通运输负荷, 提高结构抗震能力, 改善建筑性能, 加快建设速度, 政府部门积极鼓励发展轻质、高强度、高效的新型墙体隔声材料。此外, 随着隔声材料密度和厚度的增加, 其隔声量对面密度及厚度的依赖性明显减弱。这种高密度、大厚度的隔声材料在实际应用中还存在许多缺陷, 如造价高、加工和施工不方便等。基于这些原因, 隔声材料的研究经历了一个漫长且不断发展提高的过程, 隔声材料也由传统的隔声材料逐步发展成现在具有高效、轻质、高强度、易加工等各种优良性质于一体的新型隔声材料。

1.2.2 现代隔声材料及其构件

自 20 世纪 80 年代以来, 我国结合实际, 引进国际先进的生产线生产新型的隔声材料。例如, 北京新型建材总厂于 20 世纪 80 年代初从德国引进国际先进的石膏板和与之配套的轻钢龙骨生产线, 开始大量生产石膏板隔声材料, 成为我国建筑隔声材料的最大生产基地。20 世纪 80 年代中期, 吴江新型建材厂从国外引进一台 9000 吨压机作为加压设备, 使板材质量大大提高, 板材具有材质致密、强度高、耐冲击、防水、防火等优点, 在噪声控制工程中, 特别是在一些隔声屏障隔声间中被广泛地使用。近年来, 硅酸钙板隔声材料在国内也逐步发展起来, 这种板材由于采用无机的硅质和钙质材料, 并加入纤维增强材料, 具有稳定的晶体结构, 所以材质稳定, 受温度、湿度影响引起的变形极小, 板面比较平整不会翘曲, 抗水性能好, 在水中不会腐蚀, 适合在潮湿环境下使用, 防火隔热板最高使用温度可达 600°C 。福建三明新型建材总厂是生产硅酸钙板的重要厂家, 年产板材约 220万 m^2 , 而且有配套的轻钢龙骨生产线^[3]。

为满足工程上的各种需要, 以及对隔声材料各种性能要求的不断提高, 近年来, 很多科研机构在隔声材料方面的研究做出了大量努力, 并取得了巨大的进展。科研人员根据声学原理开发研制了很多新型隔声材料、新技术, 包括隔声材料和隔声构件组成。在隔声材料方面, 除了已广泛使用的岩棉、矿棉、珍珠岩外, 还从国外引进先进技术生产空心玻璃棉, 最近还开发了集阻燃、防老化和吸声等性能于

一体的聚氨酯声学泡沫材料^[5-10]。这些泡沫材料不但隔声效果好，而且具备质量轻、价格便宜、易加工、防潮防腐等多种性能，与传统的重金属隔声材料相比有很多有用的工程使用价值，因而在现在的工程应用上越来越广泛。在隔声构件组成方面则趋于结构复合化，如钢塑复合板材、纸塑复合板材和混凝土塑料复合板材等。钢塑轻型墙板又称泰拍板，它是由焊接三维空间网架和中间填充轻质保温的聚苯乙烯芯材组成，板的两面用水泥砂浆粉刷或喷涂而成型的新型墙体。板中的夹心材料聚苯乙烯厚度一般为 6 cm，板两侧钢丝网架的钢丝直径为 2 mm，间距 6 cm，面层为 100 号水泥砂浆，厚度为 2.6 cm，墙板厚度为 10 cm，面密度为 86~99 kg/m²，约为墙砖的 20%，隔声指数可达 40 dB。泰拍板轻质、隔声、隔热、防水、防火、强度高、耐冲击、结构简单，不需要龙骨，施工方便，可加快建设速度，因此受到国内设计、科研机构的重视，并正在被建筑施工单位广泛采用。20 世纪 80 年代，江阴车船配件厂生产的钢质岩棕复合板也是一种轻质高效的隔声板材。这种隔声材料不但隔声效果好、质量轻，而且耐高温，因此在工程上被广泛使用。纸蜂窝芯复合板也是一种质量轻、强度高、刚度大、稳定好的隔声板材。因为它具有轻、强、刚、稳、隔热、隔声、抗疲劳等优良特性，所以成为航空结构的重要材料。20 世纪 60 年代，我国许多地方已开始研制纸质蜂窝复合材料，取得很大进展并被广泛用于实际生产中^[4]。近年来，徐州市环境保护科学研究所研制出一种新型轻质塑料薄膜隔声结构，它是由双层均质半透明 PVC 薄膜密封热合而成，薄膜厚度为 0.23 cm、0.32 cm 和 0.5 mm，面积大小分别为 2.1 m×1.8 m、2.4 m×2.2 m 和 3.0 m×3.4 m，空气层的厚度利用木框夹限制在 10 cm 和 16 cm。当薄膜厚度为 0.55 mm 时，隔声指数 $R=21$ dB，这种结构在较宽的频率范围内均有一定的隔声效果，并具有质量轻、安装方便和价格低廉等特点。

近年来，应用颗粒填充或纤维增强高分子材料来制备具隔声功能的高分子复合材料（可称为隔声高分子复合材料），日渐受到人们的关注。

1.3 隔声高分子复合材料

颗粒填充或纤维增强聚合物基复合材料是近些年备受关注的新型的高效隔声材料，它甚至突破了传统质量定律的隔声原理，不但具有高效的隔声、吸声性能及隔热性能，还具有质量轻、加工性能好、耐腐蚀、施工方便等许多优点^[11-13]。其中，颗粒或纤维可以是有机材料、无机材料、金属材料、非金属材料；颗粒或纤维可以

是实心的,也可以是空心的;填料可以是单一的,也可以是多种的或混杂的。此外,基体可以是单一的树脂,也可以是两种或以上树脂通过共混而成。随着开发研究的深入,这些复合材料在工程中将得到日益广泛的应用。本书着重以颗粒填充或纤维增强聚合物基隔声复合材料为研究对象,就其隔声原理及规律进行探讨和分析。

1.3.1 纤维增强高分子隔声复合材料

通常,纤维类织物具有优良的机械性能和灵活性,并且其内部能够滞留空气,同时其声波传播速度和比重都较大,具有较大的声阻抗,所以当声波从较小声阻抗的物质入射到较大的纤维织物表面时,因二者较大的阻抗差而发生较多的反射。由于纤维类织物具有以上特性,常被作为填料制备高分子复合材料,既可改善聚合物的强度和韧性,又可增加树脂的隔声性能,这为研制轻质、薄型、柔软的隔声材料提供了可能^[14]。若采用中空纤维作为填料制备高分子复合材料,其隔声性能(或隔声效果)则更为优越。

付雅琴等^[14]运用常压浇注工艺制备了聚氯乙烯糊树脂/玻璃纤维(EPVC/GF)复合材料,测试并分析了复合材料的隔声特性。结果表明,复合材料隔声特性明显要好于纯GF和纯EPVC的隔声特性;在测试的频率条件下,只有复合材料试样的实验隔声值大于质量法的预测值;试样在面密度为 0.678 kg/m^2 、厚度为 0.5 mm 时,隔声量大于 10 dB 。姚跃飞等^[15]将炼钢炉渣粉填充到EPVC/GF中制备了聚氯乙烯糊树脂/玻璃纤维/炼钢炉渣粉复合材料,研究发现,在厚度较小的情况下,复合材料试样的隔声量与炼钢炉渣粉的关系不大;当厚度增加($>1\text{ mm}$),频率在 $500\sim 1000\text{ Hz}$ 范围内,填充炼钢炉渣粉的复合材料试样隔声量比没有填充的聚氯乙烯糊树脂稍大,在大于 1000 Hz 范围内,二者的隔声量相差不大。Kucuk等^[16]研究了不同类型的纤维与聚酯复合材料的吸声性能。结果表明,厚度为 16.38 mm 、空气磁导率为 584 mm/s 的试样,在频率为 1200 Hz 时,试样的吸声系数为 0.2 ,之后有轻微下降,在频率为 6300 Hz 时,试样的吸声系数最大达到 0.6 ;70%羊毛和30%的双组分聚酯复合材料在试样厚度为 16.35 mm 时,其吸声性能在频率 $640\sim 6300\text{ Hz}$ 线性增加。高蕴等^[17]将涤纶机织物、涤纶非织造布及玻璃纤维机织物分别填充到EPVC中,研究发现,EPVC/涤纶非织造布复合材料比其他两种复合材料的隔声性能都要好。张娟等^[18]利用双通道阻抗管分析丁腈橡胶/玻纤和丁腈橡胶/芳纶浆粕纤维两种材料的隔声特性。结果表明,玻璃纤维作为增强材料添加到丁腈橡胶材料中,复合材料的吸声性能有所提高,但其隔声量的提高不明显;玻璃纤维含量为

6%时, 复合材料可以获得相对较为理想的隔声效果; 芳纶浆粕纤维作为增强材料添加到丁腈橡胶材料时, 材料的吸声性能与隔声量均有所提高; 在芳纶浆粕纤维含量为 9%时, 复合材料隔声效果达到最佳。

1.3.2 实心无机粒子填充高分子隔声复合材料

实心无机粒子常用于填充改性聚合物的声学性能, 这不仅是由于实心无机粒子的添加使得无机粒子本身的特性能够移植到复合材料中, 从而提高材料的流变、力学及导热等性能, 而且会使进入材料的声波增加反射的次数, 消耗声能, 达到隔声的效果^[19]。

Yan 等^[20]研究了聚丙烯 (PP) / 纳米黏土复合材料的隔声性能, 发现纳米黏土质量分数在 7% 以内时, 复合材料的隔声量随着纳米黏土质量分数的增加而增大; 纳米黏土质量分数在 9%~15% 时, 复合材料的隔声量随着纳米黏土质量分数的增加而减小; 在频率为 3400 Hz 时, 纳米黏土质量分数为 1% 和 7% 的复合材料隔声量比纯 PP 分别高了 24% 和 78%。俞来明等^[21]研究发现, 核桃壳颗粒对聚氯乙烯 (PVC) 材料的隔声性能有较大的影响, 当填充少量核桃壳颗粒时, 能明显提升 PVC 材料隔声性能, 但随着核桃壳颗粒的添加, 填充物对基体的作用也在下降, 核桃壳颗粒的添加量小于 7.5% 时复合材料隔声效果好。王星等^[22]研究得出, 聚氯乙烯/云母复合隔声材料的低频隔声性能较 PVC 基体有明显的提高, 当 PVC 与云母的质量比为 60:40 时, 复合材料具有最大的隔声量, 与 PVC 相比提高了约 40%。

李康等^[23]研究了蛭石含量、热压时间和样品厚度对丁腈橡胶的声学性能的影响。结果表明, 在蛭石粉含量为 35% 时, 丁腈橡胶试样的吸声性能有显著提高; 在蛭石粉含量为 45% 时, 虽然声学性能在高频得到提高, 但是在中低频却损失很大。Lee 等^[24]发现, 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯 (ABS) / 炭黑复合材料的隔声量与材料的弹性模量密切相关, 随着炭黑体积分数增加到 3% 时, 复合材料的隔声量有较大的提高。

1.3.3 实心有机颗粒填充高分子隔声复合材料

Zhao 等^[25]制备了木质颗粒与橡胶屑质量比分别为 60:40 和 50:50 的两种复合材料板, 同时利用四声阻抗管测试仪对这两种复合材料板、木质复合地板及木质刨化板的隔声性能进行了测试。结果表明, 每种板的隔声量都随着频率的增加而增大, 且在频率为 1250 Hz 处达到最大值, 当频率进一步增加时, 木质复合地板和木

质刨化板隔声量的变化很小,并且表现为略微下降。这种现象可能是所测试频率范围和驻波管直径受限造成的,也可能是四声驻波管分裂底部的长度不够长,导致一些反射波进入透射区域,从而严重影响隔声测量的结果。

1.3.4 中空微粒填充高分子隔声复合材料

中空微粒主要包括有机中空微粒和无机中空微粒两种。无机中空微粒其实为无机粒子的一种,但又与其他无机粒子有较大区别,这是由于中空微粒是由外围材料包裹气体而成。当其作为填充材料添加到聚合物中时,由于中空微粒气固声阻抗的巨大差异,使得进入微球内部的声波能几乎被耗尽,从而在隔声降噪上具有突出的效果。就结构形态而言,中空微粒可分为中空微球和中空短纤维(如碳纳米管等)。

1. 中空微球填充高分子复合体系

Liang 等^[26]用双螺杆挤出机制备了纳米碳酸钙填充聚丙烯(PP/nano-CaCO₃)复合材料和空心玻璃微球填充聚丙烯(PP/HGB)复合材料,并用简化声波传递损失测量装置测试了复合材料的隔声性能。结果表明,当声波频率一定时,PP/nano-CaCO₃复合材料试件的隔声量随着 nano-CaCO₃ 体积分数增大而轻微增加;声波频率小于 500 Hz 时,PP/nano-CaCO₃ 复合材料试样隔声量随声波频率的增加而急剧增大;声波频率处于 500~1000 Hz 区域时,隔声量随声波频率增加而减小;声波频率大于 1000 Hz 时,隔声量随声波频率增加而略有增大。当 HGB 体积分数小于 6%时,PP/HGB 复合材料试件隔声量随 HGB 体积分数增加而增大,HGB 体积分数大于 6%后,复合材料试件隔声量基本不变。声波频率小于 2000 Hz 时,PP/HGB 复合材料试件的隔声量随声波频率增加而增加得较快;声波频率大于 2000 Hz 后,隔声量随声波频率的增加而略有增大。在相同的填料含量下,PP/HGB 复合材料试件的隔声效果优于 PP/nano-CaCO₃ 复合材料试件。

2. 碳纳米管填充体系

李晨曦等^[27]以环氧树脂/碳纳米管(EP/CNT)复合材料和纯环氧树脂材料作为基板,分别制备了不同穿孔率和厚度的试样,并利用 B&K4206 阻抗管及脉冲回波法进行隔声性能的测量。结果表明,频率在 0~3000 Hz 范围内,随着 CNT 含量的增加,EP/CNT 复合材料试样的隔声量显著增加,CNT 含量为 2.5%时试样的隔

声性能最优；在 3000~6000 Hz 内，试样的隔声量变化较大，CNT 含量为 0.5% 时，在 5700 Hz 左右隔声量达到最大值（24 dB）；当 CNT 含量为 1.5% 和 2.5% 时，试样的隔声量则分别在 5800 Hz 与 3900 Hz 附近达到最大值，其中 CNT 含量为 2.5% 时，试样的隔声量最大，为 33.5 dB。Kim 等^[28]利用溶液混合法制备了脱落石墨纳米片（Exfoliated Graphite Nanoplatelets, xGnPs）填充聚丙烯（PP/xGnPs）、PP/CNT 和 PP/xGnPs/CNT 3 种复合材料，研究发现，在整个频率范围内，当 xGnPs 的质量分数为 0.3%~0.5% 时，PP/xGnPs 复合材料的隔声量高于纯 PP；当 xGnPs 质量分数为 0.5% 时，复合体系隔声量达最大值；在 PP/xGnPs 复合材料中增加 CNT，则当 CNT 质量分数为 0.1%~0.5% 时，PP/xGnPs/CNT 复合材料隔声量亦高于纯 PP 树脂。Lee 等^[29]以碳纳米管为填充料，丙烯腈-丁二烯-苯乙烯树脂（ABS）为基体，采用常压浇注方法，制备了 CNT 体积分数为 0%、5%、10% 及 15% 的 4 种 ABS/CNT 复合材料，并利用阻抗管法对复合材料进行了隔声性能的测试。研究发现，随着所测声波频率的增加，复合材料试件的隔声量逐渐变大；频率为 3400~4400 Hz 范围内，复合材料试件的隔声量随 CNT 体积分数的增加而增大；CNT 填充体积分数为 15% 时，尽管 ABS/CNT 复合材料试件的隔声量得到了很大提高，但其在质量上与纯 ABS 树脂基本上没有变化，这是由于体积分数为 15% 的 CNT 折算为质量分数仅为 2.18%，对 ABS/CNT 复合材料整体的质量影响不大。

3. 中空短纤维填充体系

李鸿顺等^[30]研究了玻纤芯材的结构对环氧树脂/中空玻纤复合材料隔声性能的影响。研究发现，当玻纤芯材增大其高度时，整体中空夹层试样的隔声效果增强；当整体中空夹层试样的厚度从 8 mm 增加至 10 mm 时，极大地增强了环氧树脂/中空玻纤复合材料试件的隔声效果。

4. 发泡复合体系

李新新等^[31]研究了发泡剂对三元乙丙橡胶复合材料隔声性能的影响。结果表明，在发泡剂加入后，三元乙丙橡胶复合材料的声学性能有较大提高；随发泡剂添加量的逐渐增加，复合材料试件的吸声系数呈现先变大后减小的规律；在发泡剂添加量为 1% 时，三元乙丙橡胶复合材料的吸声系数达到最大值。

1.4 隔声理论研究

自 19 世纪以来,材料科学与工程邻域的科学家及工程技术人员在固体材料隔声学领域进行了长期的探索。他们根据声学理论基础,建立相应的隔声物理模型,进而推导出极具参考价值的隔声数学模型(如隔声量方程)。这些隔声数学模型或隔声理论公式为隔声材料的设计与制备、隔声构件的开发乃至相关工程技术的提升提供了良好的理论基础和依据,有效地推动该学科领域的发展。

1.4.1 一般固体材料

对于一般固体材料的隔声过程、隔声行为及其机制,人们进行了系统而深入的研究,并创立或提出了各自的学说^[3]。19 世纪末, Rayleigh 在其名著《Theory of Sound》中,提出不可压缩无限大墙体的隔声理论,并导出计算薄墙体声音的传输损失(transmission loss, R)的著名的“质量定律”(Mass Law)。1942 年, Gremer 引用弹性力学理论对无限大板传声损失进行研究,发现斜入射声波投影波长与板的弯曲波波长符合时的吻合效应,使原先质量定律不能描述的现象——出现在实际构件传声损失曲线上的低谷——得到解释。随后, London 提出了混响声场中单层墙和双层墙的隔声计算理论, Gremer 和 London 分别引入复弹性模量和阻尼力阻,以研究材料内阻尼对传声损失的影响。Heckl 讨论了有限尺寸墙对传声损失的影响,弥补了过去隔声理论不适于低频域的不足。Matdanjk 和 Walhce 提出混响声场中板的振动模态辐射阻抗概念,为振动板的声辐射特性给出了合理的描述。这些代表性的研究工作及理论成果为一般固体材料乃至复合材料隔声构件传声损失现代理论奠定了良好的基础^[3]。

1.4.2 高分子/实心无机粒子复合材料隔声模型

与金属材料相比,高分子材料具有来源丰富、价格低、加工成型方便和成型周期短等特点,因而在隔声材料方面的应用日渐广泛。声音的传输损失又称为隔声量,是材料隔声特性的主要表征。Liang 和 Jiang^[19]研究了声波在实心无机粒子填充高分子复合材料中的传播过程及规律,分析隔声行为及其影响因素,提出高分子/实心无机粒子复合材料隔声机制。基于声学基本理论,建立高分子/实心无机粒