

高分子颗粒孔隙结构材料的吸声特性研究*

刘吉轩 陈天宁 张升陞 黄协清

(西安交通大学振动与噪声控制研究所 西安 710049)

1995年3月13日收到

摘要 在噪声控制与治理工程中,许多场合为了消除由物体表面产生的反射声波,往往需要在物体表面敷设具有吸声性能的材料或结构,以吸收入射声波的声能。本文对一种新型的以高分子材料为基底的颗粒型微孔结构进行了吸声特性研究。首先对颗粒微孔结构的吸声机理进行分析,认为由于受材料自身的化学性质与结构特征所决定,这种颗粒微孔结构除了具有一般多孔吸声材料的空气粘滞阻力作用吸声外,还存在颗粒材料内部的弹性弛豫效应吸声,因而吸声系数高,尤其是低频吸声系数较高。然后着重对影响颗粒微孔结构吸声特性的若干因素进行了实验研究。与其它吸声材料进行定性比较可见,颗粒微孔结构具有一系列独特优点,有广泛的应用前景,值得进一步研究开发。

关键词 颗粒材料,微孔结构,吸声特性

Sound absorbing properties of a functional material with polymer pellet structure

Liu jixuan, Chen Tianning, Zhang Shengbi, Huang Xieqing

(Institute of Vibration and Noise Control Xi'an Jiaotong University, Xian 710049)

Abstract This paper studies sound absorbing properties of a functional material possessing pellet structure. The sound absorbing mechanism is qualitatively analysed, and then some major factors affecting the sound absorbing properties are examined by experimental method. Compared with other sound absorbing materials, functional material has some unique advantages and practical value. The present results should lay foundation for further development of the material.

Key words Pellet material, Porous structure, Sound absorbing properties

1 引言

现代科学技术的飞速发展和物质生活水平的不断提高,促使人们的环境意识增强,

噪声污染已列入当今世界影响人类生态的三大环境公害之一。低噪声也已成为评价机电产品的质量乃至人们生存环境优劣的一项重要指标。近年来,噪声控制技术得到了极大的发

* 陕西省自然科学基金资助项目

展,其中最显著的成果就是研究开发了诸如:纤维类吸声材料、泡沫类吸声材料、微穿孔板吸声结构、蜂窝吸声结构等等一大批吸声降噪功能材料与器件,并在噪声控制工程中得到广泛的应用。但是,应当看到,不同的降噪工程环境,对吸声材料和结构的性能要求是大不相同的,在一些特殊环境下,不仅要求吸声性能优良,同时还要求耐温、耐腐蚀、耐冲刷、机械性能好(强度、刚度等),有些场合还要求材料易于加工成型,便于安装,或有较好的装饰效果等。现有的吸声材料往往很难同时满足上述多种要求,因此,研究开发能够适用于某些特殊环境要求,总体性能更优的新型吸声材料和结构是十分必要的。国内外对此已进行一些开拓性工作,据报道日本最近几年已开发出一种颗粒塑料,并成功地应用于低噪声风扇上,国内目前尚未见有关报道。本文将着重对一种高分子颗粒微孔结构的功能材料吸声特性进行研究。

2 性能特点

颗粒微孔结构的吸声材料是将一种颗粒状高分子聚合塑料通过一定的工艺方法粘接压制成型的,它的性能特点可通过与目前广泛使用的纤维类和泡沫类吸声材料的比较加以说明。

目前常用的纤维类多孔吸声材料有玻璃纤维、矿渣棉、岩棉板等,具有容重较小、吸声系数高等特点,但它们的力学性能(强度、刚度等)较差,在运输、安装和使用过程中容易造成破碎,不能承受外力,并且容易引起安装人员刺痒扎手,皮肤过敏。因此适用于不直接承受外载荷、以高频声为主的场合。泡沫类吸声材料随其基底不同,性能有较大差异。象泡沫塑料的容重小、缓冲性能好,但刚性很差,比较适合于声密封,以及作为薄壁结构,(如汽车厢体)的内衬吸声降噪。泡沫玻璃是一种具有较好装饰效果的新型材料,但是它的容重较大、质脆、吸声系数较低,特别是低频吸声系数很低,主要是作为有一定吸声要求的室内装饰材料之用。近几年新开发的泡沫金属的机械性应用声学

能优良,但提高孔隙率和吸声系数仍是在研究的课题,目前尚未见有工程应用的报道^[1, 2]。

颗粒微孔结构吸声材料的筋络是一种高分子硬塑料颗粒,本身质底较硬,模压成型后,颗粒微孔结构的稳定性较好,因而整体机械性能明显优于纤维类和泡沫塑料,可承受较大的负荷力,容易安装、并可模制成不同形状的吸声器件,在某些情况下还可以制成低噪声机电产品的某些零部件。颗粒微孔材料由于内部是相互连通的微孔隙结构,有效地增加孔隙内空气粘滞阻力,同时,由于高分子塑料颗粒本身的粘性内摩擦作用和弹性弛豫过程作用,所以吸声性能好,尤其是中、低频吸声系数较高。图1所示为在材料尺寸厚度相同($H=10\text{ mm}$)的情况下,用驻波管法测得的颗粒微孔结构吸声材料(Pellet)、超细玻璃棉(Class fibre)和泡沫塑料(Foamed plastics)的吸声特性曲线。可以看出,在300 Hz—1100 Hz的频率范围内颗粒微孔材料吸声系数高于超细玻璃棉,而在整个频段内,颗粒微孔材料的吸声系数均远高于泡沫塑料。

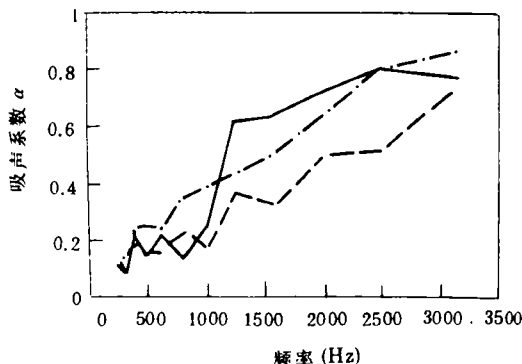


图1 三种材料的吸声特性曲线($H=10\text{ mm}$)
—超细玻纤, --泡沫塑料, -·-颗粒微孔

3 吸声机理

3.1 粘滞阻力作用吸声

颗粒微孔材料与其它多孔类吸声材料类似,材料的孔隙相当于众多毛细管,声波在毛细管中传播的特性方程为^[1,3]:

$$V = V_0 e^{\alpha_1 z} e^{j(\omega t - kx)} \quad (1)$$

式中, v ——媒质质点在毛细管中平均质点速度振幅; v_0 —— $x=0$ 处平均质点速度振幅; α_1 ——孔隙中声波衰减系数, ω ——声波角频率; k ——波数. α_1 的值由下式确定:

$$\alpha_1 = 2(\gamma\eta_0\omega/\rho_0)^{1/2}/C_0a \quad (2)$$

式中, C_0 ——声波在空气中传播的速度; η_0 ——孔道中空气的粘滞系数; ρ_0 ——空气密度; γ ——比热比; a ——毛细管半径.

从上式可知, 多孔吸声材料的吸声系数与孔隙中空气粘滞系数 η_0 的平方根成正比, 与孔隙的半径 a 成反比. 减小毛细孔的孔径和增大孔隙壁的粗糙度可以提高孔隙中空气的粘滞性, 有利于提高粘滞阻力作用吸声系数. 对于颗粒微孔结构材料, 孔径的大小可通过改变颗粒的粒度等参数加以调整. 由于各颗粒之间的粘连不规则, 每个孔隙周围又分布一些更微细的孔隙, 这种结构特点就使得入射声波一旦透入材料内部, 就象进入众多微小的迷宫式阻性消声器, 有效地吸收了入射的声能量.

3.2 弛豫效应吸声

颗粒微孔材料的筋络是高分子聚合类塑料颗粒, 与金属等材料相比, 它的弹性模量较低, 内阻尼较大. 因此, 在声波作用下塑料颗粒材料发生形变, 由于其内部的粘性内摩擦作用和弹性弛豫过程作用, 把声能转变为热能而损耗, 起到吸声作用.

根据高分子化学的理论^[4], 高分子聚合塑料是由长分子链组成的, 每个分子链又由许多链段联结而成. 因此, 颗粒微孔结构受外力作用时, 由众多高分子塑料颗粒组成的固体筋络将产生形变, 此形变的有关性能与颗粒材料本身的分子链段的持续位移及快速振动有关. 在声波作用下, 塑料颗粒发生形变, 颗粒内部的高分子链即发生伸长或卷曲的构象分布状态变化, 这一变化需要一定时间, 即表现为弹性弛豫过程, 使得形变的变化落后于应力的变化. 在不大的交变应力作用达到稳态时, 形变与应力之间是非线性关系, 形成弹性滞后回线. 根据动力学原理, 在一个周期中所做的功正比于滞后回线所包围的面积. 受声波作用颗粒材料

发生交替的形变, 使部分声能转变为热能而损耗, 即弹性弛豫效应吸声.

设声波垂直入射于材料表面, 在材料中产生平面压缩波. 考虑材料中平行于其表面的一无限薄片, 设在片的两面受到材料其他部分作用的压力可表示为

$$p(x, t) = -\tilde{E}\epsilon(x, t) \quad (3)$$

式中: $\epsilon(x, t)$ 是材料薄片的应变; $\tilde{E}$ 是动态弹性模量, $\tilde{E} = E_s(1 + j\eta)$; η 是颗粒材料内部损耗因子.

当考虑到颗粒材料的弹性弛豫效应时, 其传播的复数波数为:

$$\begin{aligned} \bar{k} &= \frac{\omega}{c} = \frac{\omega}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + j\eta}} \approx \frac{\omega}{c} \\ &\cdot (1 - j\eta/2) = \frac{\omega}{c} - j\frac{\omega}{2c}\eta \end{aligned} \quad (4)$$

上式中 c 为颗粒材料中纵波波速; 高分子颗粒材料内部由于弹性弛豫效应所生产的吸收系数 α_2 为:

$$\alpha_2 = \frac{\omega}{2c}\eta \quad (5)$$

上式表明, 由弹性弛豫效应所引起的声波的吸收系数 α_2 与颗粒材料本身的损耗系数 η 成正比, 损耗系数 η 越大, 其吸收系数 α_2 也越大. 可见, 颗粒材料内部在声波作用下所发生的弹性弛豫效应使声波得以吸收, 最终提高了颗粒微孔结构吸声材料的吸声性能.

通过上述吸声机理的分析, 可看到高分子颗粒微孔结构吸声材料的吸声作用主要是由上述两种吸声机理共同起作用的结果. 采用材料内损耗系数较大的高分子颗粒作为多孔吸声材料的固体筋络, 是提高材料吸声系数的有效途径. 实际上是孔隙中空气流体和颗粒固体相互耦合, 共同作用的吸声过程, 这种耦合关系的规律较复杂, 是需要进一步作理论和实验研究的内容. 在一定的条件下, 当高分子固体颗粒的波阻抗与孔隙中空气流体的波阻抗适当配合, 能有效地提高颗粒微孔结构的吸声系数. 颗粒微孔结构的有关参数改变对吸声系数的影响在下面实验研究中讨论.

4 影响吸声性能的若干因素实验研究

颗粒微孔结构吸声材料的成型特点和吸声机理表明,有关颗粒的粒度、形状、材料配方以及结构尺寸、孔隙率、表面质量、乃至成型工艺方法等诸多因素都将对其吸声特性产生不同的影响.有关这些因素的影响规律的深入研究对提高和改进颗粒微孔材料的总体性能具有重要意义.这里对颗粒粒度、材料厚度及表面饰层三种因素的影响进行实验分析.

4.1 粒度的影响

粒度(即颗粒直径 d ,单位 mm)主要影响到材料的孔隙率、平均孔径和由颗粒构成的固体筋络受声波作用时的形变等.为了排除颗粒形状的影响,本文实验所用试件均采用球形颗粒制作.采用驻波管法对尺寸厚度相同($H=15\text{ mm}$)粒度不同(包括单粒度和混合粒度)的颗粒微孔结构的材料试件的吸声系数进行测试.表1为实测数据.图2为其中几种单粒度颗粒微孔结构的材料试件吸声特性曲线.

由图2可见,粒度较小时,中、低频吸声性

能较好.事实上,粒度较小的颗粒容易使孔隙分布均匀,孔隙毛细管直径较小,材料内部结构的声阻抗匹配较好.因而吸声性能优良.例如粒度为 $d<1\text{ mm}$,厚度 $H=15\text{ mm}$ 时,在 $500\text{ Hz}-3.5\text{ kHz}$ 频率范围内,平均吸声系数可达0.56,最高吸声系数为0.975(2 kHz).

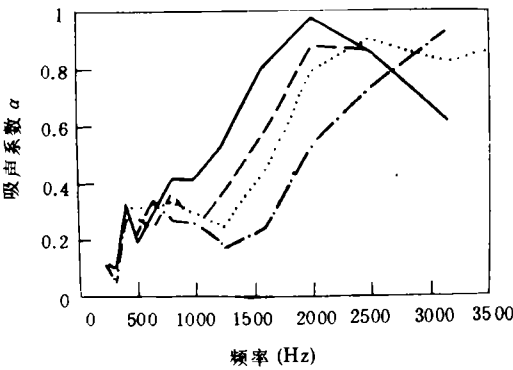


图2 不同粒度的材料吸声特性曲线($H=15\text{ mm}$)
—— $\alpha<1$, --- $1<\alpha<2$, $2<\alpha<3$, ·-·- $3<\alpha<4$

从表1数据可知,采用不同粒度混合制成的材料,吸声特性改变趋势不尽相同,从总体

表1 实测的吸声系数值(驻波管法测量)

频率 (Hz)	各编号的颗粒材料吸声系数(α)										
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]	9 [#]	10 [#]	11 [#]
250	0.12	0.11	0.10	0.10	0.11	0.12	0.12	0.12	0.09	0.10	0.12
315	0.10	0.10	0.05	0.05	0.11	0.08	0.11	0.10	0.12	0.15	0.07
400	0.33	0.27	0.25	0.30	0.24	0.22	0.24	0.27	0.22	0.25	0.32
500	0.19	0.27	0.23	0.31	0.20	0.24	0.22	0.15	0.25	0.24	0.15
630	0.29	0.23	0.34	0.31	0.37	0.39	0.33	0.31	0.35	0.30	0.42
800	0.42	0.37	0.27	0.33	0.40	0.39	0.41	0.38	0.35	0.34	0.31
1000	0.41	0.24	0.26	0.29	0.45	0.37	0.36	0.28	0.29	0.29	0.34
1250	0.53	0.37	0.18	0.25	0.51	0.52	0.41	0.34	0.36	0.19	0.39
1600	0.81	0.58	0.25	0.44	0.66	0.73	0.68	0.54	0.41	0.47	0.32
2000	0.98	0.88	0.53	0.79	0.85	0.85	0.89	0.81	0.73	0.74	0.80
2500	0.86	0.86	0.73	0.91	0.79	0.81	0.97	0.96	0.90	0.95	0.83
3150	0.61	0.47	0.93	0.82	0.82	0.74	0.62	0.54	0.73	0.66	0.43
250 ↓ 4 k	0.48	0.42	0.45	0.35	0.51	0.48	0.44	0.42	0.42	0.41	0.40
500 ↓ 2.5 k	0.56	0.48	0.45	0.35	0.54	0.54	0.53	0.47	0.46	0.44	0.44

注:表中1[#]、2[#]、3[#]、4[#]分别为粒度 $d<1$ 、 $1<d<2$ 、 $2<d<3$ 、 $3<d<4$ 的材料,其余编号为粒度混合材料, $H=15\text{ mm}$.

上看吸声系数介于大粒度试件与小粒度试件之间,个别情况略优于小粒度.例如5[#]试件(由 $d<1$ 和 $2<d<3$ 两种颗粒各半混合)在250 Hz—4 kHz频段内,平均吸声系数 $\bar{\alpha}\approx 0.51$ 优于 $d<1$ 的1[#]试件($\bar{\alpha}\approx 0.483$).此外在颗粒中掺入极少量玻纤材料(12[#]试件),总体上平均吸声系数略低于1[#]试件,但在低频段250—800 Hz范围内平均吸声系数却比1[#]试件高0.1左右,这可以认为是由于玻璃纤维的掺入改变了内部孔隙的分布和表面粗糙度所致.从上述实验分析还可发现,通过改变不同粒度混合百分比级数,可以对颗粒微孔结构吸声材料的主要吸声频段予以适当调整.这其中的规律尚须进一步的理论分析和实验研究.

4.2 厚度的影响

多孔材料的共同特点是低频吸声系数偏低,增加材料的厚度可以增大声阻抗,改善低频吸声性能.对于颗粒微孔材料其基本规律相同,随着厚度增大,低频吸声系数增加,高频部分吸声系数略有下降,即主要吸声范围下移,如图3所示.

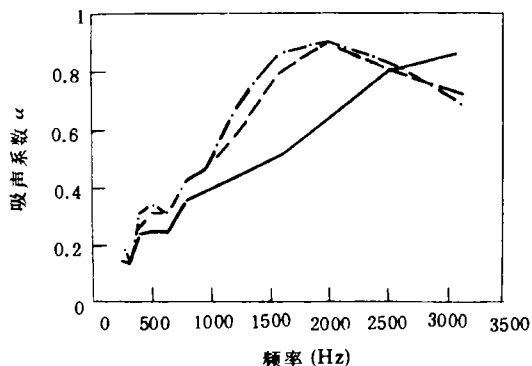


图3 不同厚度的影响曲线
— $H=10$, -- $H=15$, ·-· $H=20$

由图3可见,材料厚度从10 mm增加到20 mm时,吸声系数超过0.8的起始频率从2.5 kHz下移到1.5 kHz左右,平均吸声系数也有较大的提高.从图中还可见,厚度由10 mm增加到15 mm时的吸声特性变化远比厚度从15 mm增大到20 mm时的变化明显,这

说明厚度对吸声特性的影响是非线性的.

4.3 饰面层的影响

考虑到在工程实际使用中,有时为了美观,需要改善吸声材料的装饰效果.对于颗粒微孔结构吸声材料而言,由于本身的机械性能较好,如果在材料表面直接涂上某种装饰涂料,即可起到改善装饰效果的作用.为了考察涂料饰面层对吸声性能的影响,本文进行了试件表面有无涂料的吸声系数对比测试.对同一试件,先测试其无涂料时的吸声系数,然后在其表面涂上一层培德丽涂料(英国产品),待干燥后再测试及其吸声系数,结果见图4所示.

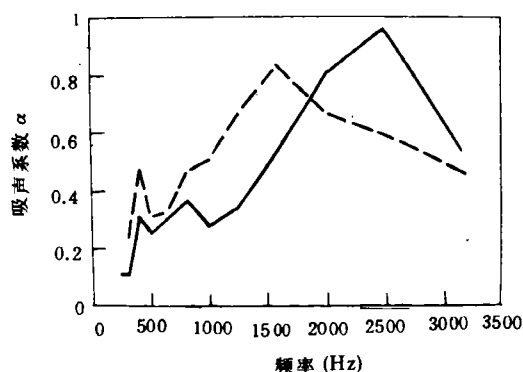


图4 饰面层的影响曲线
—无涂料, ---有涂料

从图4可见,涂料层使1.6 kHz以上高频段的平均吸声系数降低0.1左右,而在1.5 kHz以下的中、低频段反而使吸声系数略有增大.在全频段内的平均吸声系数基本不变.因此,从实用角度讲,如果颗粒微孔材料表面处理得当,涂上一层合适的装饰涂料,既可起到装饰美化作用,又有利于改善低频吸声效果.

5 结语

(1) 高分子颗粒微孔结构吸声材料由于其自身化学性能和物理特征所决定,具有两种最主要的吸声机理,即孔隙中空气粘滞阻力作用吸声和颗粒弹性弛豫效应吸声,因此它的吸声性能良好,尤其是中、低频吸声系数较高.

(下转第46页)

5.3 最大声压级

主楼立体声区声柱,在调声控制台预留 12 dB 电平储备条件下,10 个测试点平均值为 89.4 dB,达到设计要求。

5.4 强度型立体声场分析

左右两路声柱共同开启,形成强度型立体声准平衡区声场。在满足听者处声强差和时间差都是最小时,以左右声柱位置为焦点所形成的双曲线围成的面积,在左右两路声柱间距增大时亦增大。因此强度型立体声准平衡区能容纳更多的聆听者。

(上接第 9 页)

并展开的第一回波的波形。由于换能器的机械品质因素 Q_M 的存在,脉冲回波波形的前后沿都呈现瞬态过程,需要一定的上升时间和下降时间。所以确定脉冲持续时间 τ 应从声能量的观点考虑,我们是根据 IEC1102:1991 规定的定义来测定脉冲持续时间 τ 。即以声脉冲波形中声压平方的时间积分函数值从其终值的 0.1 倍上升到终值的 0.9 倍所经历的时间的 1.25 倍作为脉冲持续时间 τ 。

经过计算,本文提出的测量方法,估计的测量不确定度优于 $\pm 20\%$ 。本方法与其它测量方法的比对将由另文发表。

5 结语

本文提出的基于互易校准原理的测量换能

(上接第 42 页)

(2) 由于这种功能材料的机械性能远优于玻璃纤维和泡沫塑料等常用的吸声材料,成型容易,便于安装,不必外加护面板,大大方便了工程应用。若将其制成机电产品的某些零部件(如罩壳、箱体内衬板等)时,可以在不增加产品成本和结构尺寸重量的前提下使噪声降低。这种功能材料的开发具有实用价值。

(3) 研究表明通过改变材料的粒度、结构参数以及配方等因素,可将颗粒微孔结构吸声材料的吸声特性和整体性能进行提高和调整,

致谢 主楼立体声区调测后效果完好。在设计调试过程中,得到校党委副书记李因、团委书记韩颖、保卫处处长李克芳及物理系领导等同志的大力支持,在此一并致以谢意。

参 考 文 献

- [1] 管善群,电声技术基础.北京:人民邮电出版社,1987. 12.
- [2] 马大猷,沈豪,声学手册.北京:科学出版社,1983. 113.
- [3] 王立雪,首都师范大学学报自然科学版,1994. 15(3): 41—44.

器声功率的方法,可用于平面活塞型换能器的辐射声功率的测量。其优点是只要通过电压和电流的测量就可获得声功率。尤其适用占空比很低的猝发纯音脉冲超声功率的测量。对于强超声功率的测量,它受到短路发射电流测量的困难和可能出现的换能器非线性效应的限制,尚待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Kossoff G. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1965, **38**: 880—881.
- [2] Haran M E, Cook B D, Stewart H F, *J. Acoust. Soc. Am.*, 1975, **57**, 1436—1440.
- [3] Mikhailov I G, Shutilov V A, *Soviet Phys. Acoust.*, 1957, **3**, 410—411.
- [4] Carstensen E L. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1947, **19**, 961.
- [5] Beissner K. *Acustica*, 1980, **46**, 162—167.
- [6] Fay B *Acustica*, 1976/1977, **36**, 209—213.

以满足不同的噪声治理工程要求。

参 考 文 献

- [1] 赵松龄,噪声的降低与隔离,上海:同济大学出版社,1985. 153—169.
- [2] 金卓仁,噪声与振动控制,1993. 6(3). 31—35.
- [3] Zwicker CW. *Sound Absorbing Materials*. New York: Elsevier Publishing Co Inc, 1969, 79—85.
- [4] 穆腊亚马 T 著,谌福特译.聚合物材料的动态力学分析.北京:轻工业出版社,1988. 123—139.
- [5] 何祚镛,赵玉芳.声学理论基础,北京:国防工业出版社,1981. 385—390.