

材料声学特性的典型参数测试技术研究进展

张福林, 董玲抒, 李忠盛, 孙彩云, 黄安畏, 聂嘉兴, 舒露, 吴永鹏

(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: 吸声系数和隔声量是描述材料声学特性的典型参数, 首先分析了材料吸声系数和隔声量测试技术的研究意义, 指出提高材料吸声系数和隔声量测试技术符合我国先进武器装备的发展需求。梳理了国内外吸声系数和隔声量的主要实验室测试方法及标准, 具体介绍了阻抗管法、混响室法、Alpha 舱法测量材料吸声系数, 阻抗管法、混响室-混响室法、混响室-消声室法、Alpha 舱法测量材料隔声量的研究进展, 分析了各种测试方法的优缺点, 最后展望了该领域的发展趋势。

关键词: 吸声系数; 隔声量; 阻抗管; 混响室; 混响室-消声室; Alpha 舱

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.08.021

中图分类号: TU112.2+11 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2020)08-0131-09

Research Progress on Typical Parameters Testing Techniques for Acoustic Properties of Materials

ZHANG Fu-lin, DONG Ling-shu, LI Zhong-sheng, SUN Cai-yun, HUANG An-wei,
NIE Jia-xing, SHU Lu, WU Yong-peng

(Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039)

ABSTRACT: Absorption coefficient and sound insulation are typical parameters of acoustic properties of materials. Firstly, the significance of absorption coefficient and sound insulation testing techniques was analyzed, which pointed out that the improvement of sound absorption coefficient and sound insulation testing techniques met the development demand of advanced weapon equipment in China. Then, the main laboratory test methods and standards of absorption coefficient and sound insulation at home and abroad were combed. The impedance tube method, reverberation chamber method and Alpha cabins method for measuring sound absorption were introduced in detail and the research progress on impedance tube method, reverberation chamber method, reverberation chamber-Anechoic chamber method and Alpha cabin for measuring sound insulation were also analyzed and the advantages and disadvantages of various testing methods were analyzed. Finally, the development trend of this field was prospected.

KEY WORDS: sound absorption coefficient; sound insulation; impedance tube; reverberation chamber; reverberation chamber-Anechoic chamber, Alpha cabin

吸声系数和隔声量是描述材料声学特性的典型参数。吸声系数指在某频率范围, 声波经过媒介透射的声功率以及被媒质或媒介表面吸收的声功率之和

与声波入射总声功率的比值。隔声量是入射到材料上的声功率, 与通过样件的声功率和辐射到另一侧的声功率之比。车辆、船舶、飞机等武器装备的升级换代,

收稿日期: 2020-03-21; 修订日期: 2020-04-15

Received: 2020-03-21; Revised: 2020-04-15

作者简介: 张福林(1963—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为工程管理。

Biography: ZHANG Fu-lin(1963—), Male, Senior engineer, Research focus: engineering management.

对噪声控制的要求提高,舱内声学设计是噪声控制的重要部分,与材料的吸声系数和隔声量密不可分,需要更高精度和更广范围地测量材料的吸声系数和隔声量,以满足实际需求。

材料的吸声系数与流阻、孔径、背腔厚度等因素有关,隔声量与密度、刚度、阻尼等因素有关。本

文梳理了国内外的主要实验室测试方法及标准(见表1),介绍了阻抗管法、混响室法、Alpha 舱法测量材料吸声系数,阻抗管法、混响室-混响室法、混响室-消声室法、Alpha 舱法测量隔声量的研究进展,分析了各种测试方法的优缺点,展望了该领域的发展趋势。

表 1 吸声系数、隔声量实验室测试方法及标准

Tab.1 Laboratory test methods and standards for sound absorption coefficient and sound insulation

典型参数	测试方法	测试标准
吸声系数	阻抗管法	ISO 10534-1:1996《声学 吸声系数和阻抗测定的阻抗方法 第1部分:驻波比法》
		ISO 10534-2:1998《声学阻抗管中吸声系数和比阻抗率的测量 第2部分:传递函数法》
		ASTM C384—2004(2016)《采用阻抗管法测定声学材料的阻抗和吸收的标准试验方法》
		GB/T 18696.1—2004《声学阻抗管中吸声系数和声阻抗的测量 第1部分:驻波比法》
隔声量	混响室法/ Alpha 舱法	GB/T 18696.2—2002《声学阻抗管中吸声系数和声阻抗的测量 第2部分:传递函数法》
		ASTM C423—2009(2017)《基于混响室法的吸声和吸声系数的标准测量方法》
		GB/T 20247—2006/ISO 354:2003《声学中混响吸声测量》
		GB/Z 27764—2011《声学阻抗管中传声损失的测量 传递矩阵法》
隔声量	混响室- 混响室法	GB/T 19889.3—2005/ISO 140-3:1998《声学建筑和建筑构件隔声测量 第3部分:建筑构件空气声隔声的实验室测量》
		GB/T 50121-2005《建筑隔声评价标准》
		SAE J1400《汽车材料和总成空气声隔声性能的实验室测量》
		GB/T 31004.1—2014/ISO 15186-1:2000《声学建筑和建筑构件隔声声强法测量 第1部分:实验室测量》

1 材料吸声系数测量技术现状

1.1 基于阻抗管法的吸声系数测量

100多年前,已经有人开始采用阻抗管进行材料的声学性能的测量。19世纪80年代,Beranek在《声学测量》一书中详细介绍的驻波比法和传递函数法,已得到广泛的认同,并成为国际标准^[1]。比较常见的阻抗管测试系统如图1所示,其测量得到的是样件垂直入射吸声系数,且测试样件小。



图 1 阻抗管测试系统

Fig.1 Test system of impedance tube

驻波比法是传统的阻抗管吸声系数测量方法,在一个管长大于圆形(或矩阵)横截面半径几倍的导管中,驻波管一端为声源,另一端放置样件,两端保持密封状态。当开启声源激励后,阻抗管中将会产生驻波声场,通过移动探管,沿纵向找到该驻波的极值,从而求出驻波比,然后便可计算出材料的吸声系数。

测试设备布局见图2,阻抗管中驻波图见图3。

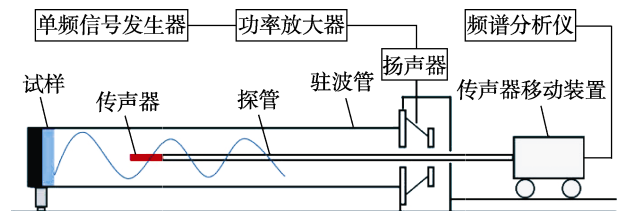


图 2 驻波比法测试设备布局

Fig.2 Test equipment layout of standing-wave method

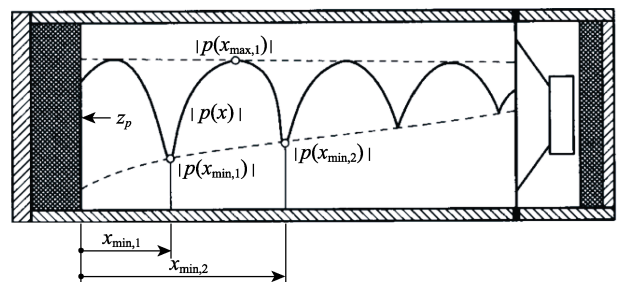


图 3 阻抗管中驻波图

Fig.3 Standing-wave in impedance tube

当入射声波 $p_i(x)$ 与反射声波 $p_r(x)$ 同相位时,驻波图上出现极大值,即:

$$|p_{max}| = |p_0| \cdot (1 + |r|) \tag{1}$$

当入射声波 $p_i(x)$ 与反射声波 $p_r(x)$ 反相时,出现极小值,即:

$$|p_{min}| = |p_0| \cdot (1 - |r|) \tag{2}$$

计算驻波比为：

$$s = \frac{|p_{\max}|}{|p_{\min}|} = \frac{1+|r|}{1-|r|} \quad (3)$$

用驻波比 s 表示材料反射系数的模 $|r|$ 为：

$$|r| = \frac{s+1}{s-1} \quad (4)$$

样件材料的吸声系数为入射声波吸收能量与入射声波的能量之比，由式(4)可得到吸声系数与 $|r|$ 和 s 的关系：

$$\alpha = 1 - |r|^2 = \frac{4}{s+1/s+2} \quad (5)$$

由于驻波比法在测试时难以获得准确的驻波极大值与极小值，测试精确程度略低，且仅能够完成单频测量。1980 年，Chung 等^[2]发展了双传声器理论，将传递函数法用于材料吸声系数的测量。传递函数法的出现也得益于频谱分析方法的发展，实现了吸声系数从单频到多频的测量，同时提高了精度与效率，节省了大量的测量时间。王毅刚等^[3]在双传声器的基础上，提出了可以解决之前半波长整数倍问题的三传声器法。陈克安等^[4]分析了在测量斜入射吸声系数时，双传声器法受到的各影响因素。Chu^[5]在 Chung 的研究基础上，发展了单传声器传递函数法，优化了两个问题：一是由于传声器间距产生的高频时相位失配问题；二是低频时因采样不足导致的误差。Schultz 等^[6]对双传声器法测量材料吸声系数不确定度进行了理论研究。

传递函数法中得到吸声系数的基础是可根据两个传声器测得的传递函数 H_{12} ，确定反射系数 r 。测试设备布局见图 4，测试原理见图 5。

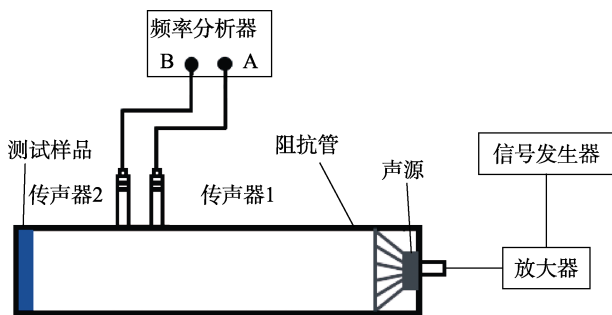


图 4 传递函数法测试设备布局

Fig.4 Test equipment layout of transfer-function method

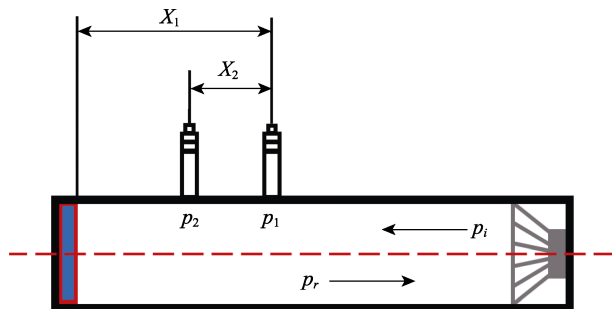


图 5 传递函数法测试原理示意

Fig.5 Schematic diagram of transfer-function method

两个传声器位置处测得的声压可由入射声压 $p_i(x) = p_i \cdot e^{jkx}$ 和反射声压 $p_r(x) = p_r \cdot e^{-jkx}$ 分别表示为：

$$p(x_1) = p_i \cdot e^{jkx_1} + p_r \cdot e^{-jkx_1} \quad (6)$$

$$p(x_2) = p_i \cdot e^{jkx_2} + p_r \cdot e^{-jkx_2} \quad (7)$$

从而得到入射波的传递函数为：

$$H_i = \frac{p_i(x_2)}{p_i(x_1)} = e^{jk(x_1-x_2)} \quad (8)$$

同样地，反射波的传递函数为：

$$H_r = \frac{p_r(x_2)}{p_r(x_1)} = e^{-jk(x_1-x_2)} \quad (9)$$

阻抗管内的传递函数为：

$$H_{12} = \frac{p(x_2)}{p(x_1)} = \frac{e^{jkx_2} + r \cdot e^{-jkx_2}}{e^{jkx_1} + r \cdot e^{-jkx_1}} \quad (10)$$

式中， $r = P_r/P_i$ ，为正反射系数，有：

$$r = \frac{H_{12} - H_i}{H_r - H_{12}} \cdot e^{2jkx_1} \quad (11)$$

因此，由反射数与吸声系数之间的关系可得到吸声系数 α ：

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (12)$$

两种方法中驻波比法仅适用于测试单频声波吸声系数，若需要测试较多频率下吸声系数，则需要花费大量的时间。同时，驻波比法测试中难以得到精确的声压最大值和最小值，从而使得吸声系数存在较大的误差。传递函数法可以仅凭一次测试得到某频率范围内的吸声性能参数，效率高，准确性高，目前使用较普遍。

1.2 基于混响室法的吸声系数测量

19 世纪初，Sabine 提出赛宾混响公式，如式(13)，解决了某博物馆内部混响问题，公式表明室内体积、总吸声量的倒数与混响时间成正比。

$$T_{60} = \frac{0.163V}{A} \quad (13)$$

式中： T_{60} 为混响时间，表示室内声能密度降低 60 dB 的时间； V 为室内体积； A 为总吸声量，是吸声系数与吸声面积的乘积。

经过一段时间的发展，Eyring 等研究认为，吸声系数较大时就不适合应用赛宾混响公式进行计算，于是给出新的混响时间求解公式。

$$T_{60} = \frac{0.163V}{-\sum S_i \ln(1-\alpha_i) + 4mV} \quad (14)$$

式中： S_i 为吸声系数为 α_i 时的面积； m 为空气中单位距离的能量吸收系数。

工程中，混响室法测量吸声系数的计算公式为：

$$\alpha = \frac{0.163V}{S} = \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (15)$$

式中： T_2 和 T_1 分别为有吸声材料和没有吸声材

料两种情况下的混响时间。

混响室法是一种经典的吸声系数测试方法,可以进行大件、非均质材料的无规则入射吸声系数测试,仅通过测试试验样件放置前后的混响时间,再利用赛宾公式便可计算出所需的吸声系数。但需要特定的测试房间,测试成本较高,不同混响室测量同一材料得到吸声系数值有时差别很大,且测得的吸声系数可能大于1。图6、图7分别给出了混响室法的测试设备布局与真实混响室。

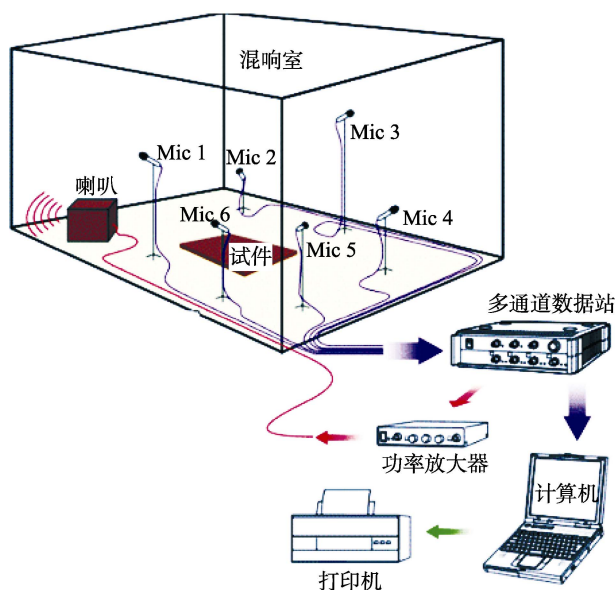


图6 混响室法测试设备布局

Fig.6 Test equipment layout of reverberation chamber method



图7 混响室

Fig.7 Reverberation chamber

混响室中材料的吸声系数测量时会产生误差,其主要原因是混响室中声场扩散不均匀^[7]。理想的扩散场需要满足混响室中均匀分布声场的能量密度,以及混响室内射线穿过各个空间位置与沿各个方向传播的概率是相等的这两个条件。

Toyoda 等^[8]探究了材料吸声系数的测试受房间形状与扩散场的扩散程度的影响,结果表明吸声系数较大时,扩散场的扩散程度降低,室内放置散射板可以明显增加扩散场散射程度。王季卿等^[9]针对此问题

开展了进一步研究,得出混响室内放置扩散板的单面面积,占地面面积 60%~70%时即可达到足够的扩散效果。

另外,环境因素对混响室的混响时间也存在较大影响,Hidaka 等^[10]对此进行了相关研究,提出湿度与温度对混响时间影响的修正公式。杨小军^[11]探究了混响室法测量结果重复性偏差问题,得出了可以减小混响时间测量偏差的测量条件。王季卿等^[12]研究了混响室测试时测点位置的影响,结果表明角点位置处测量混响时间可以减小标准偏差。

在传统混响法已经得到了广泛应用的同时,部分学者对混响法进行了新的应用。贺加添等^[13]不同于传统混响法中材料平放的方法而垂直放置两试验样件,并提出了修正公式以计算材料的吸声系数。David 等^[14]采用动能密度替换势能密度的方法进行声功率的测量,动能密度相比于势能密度具有更佳的空间均匀性,所以该方法在进行测量时可以减少一定的发射/接收位置,并且可以测量截止频率以下的声功率。

2 材料隔声量测量技术现状

2.1 基于阻抗管法的隔声量测量

阻抗管测试的是材料对垂直入射的平面波的隔声能力,包括双传声器法、三传声器法和四传声器法。朱蓓丽等^[15]利用双传声器法,对水声声管进行了隔声量测试,并给出声管复反射系数曲线与等相位角,研究表明,恰当的间距能够显著提升信噪比,得到更准确的结果。双传声器法原理是先在有样件的条件下测量传感器3的透射声压 p_t (见图8),然后在无样件的条件下测量传感器3的直达声压 p_i 作为入射声压,两者相比求出声压透射系数(见式(20)),从而计算出隔声量(见式(21))。

王毅刚等^[3]在测试材料隔声量时采用了三点测量技术,解决了由于声场影响而导致的测量结果误差问题。朱蓓丽等^[16]研究发现,使用双传声器法测试时,声源和材料左端表面都会产生反射,相同方向相同频率的声波叠加导致材料的入射声波比实际的更大,使得材料隔声量测试结果受到吸声性能的影响。因此引入三传声器法,把驻波场中的入射波与反射波区分开,测试结果显示,三传声器法可提高测试精度,减少工作量,吸声末端的吸声系数大于0.99时,可使隔声量测试误差小于 ± 1 dB。三传声器测量原理见图8,声源产生的声压信号经过功率放大器后进入管中形成入射波 p_i , p_i 向前直到样件处,声波一部分透过样件继续传播,形成透射波 p_t ,一部分被吸收,最后一部分被反射回来形成反射波 p_r ,透射波又继续向前传播,到达声学末端,吸声尖劈结构具有良好的吸声性能,到达末端的声波完全被吸收掉。具体计算过程如下。

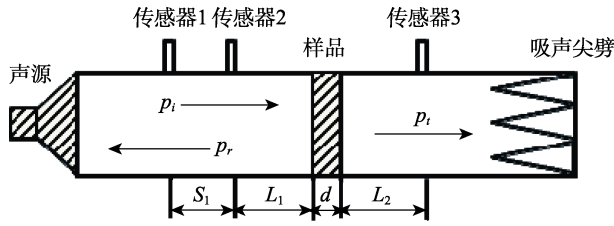


图 8 三传感器法测试原理示意图

Fig.8 Schematic diagram of three-sensor method

传感器 1、传感器 2、传感器 3 测的声压分别为 p_1 、 p_2 、 p_3 ，由声压传播规律得：

$$\begin{cases} p_1 = p_i e^{jk(S_1+L_1)} + p_r e^{-jk(S_1+L_1)} \\ p_2 = p_i e^{jkL_1} + p_r e^{-jkL_1} \\ p_3 = p_t e^{jkL_2} \end{cases} \quad (16)$$

由式(17)可得：

$$p_i = \frac{p_1 - p_2 e^{-jkS_1}}{e^{jkS_1} - e^{-jkS_1}} e^{-jkL_1} \quad (17)$$

$$p_t = e^{-jkL_2} \quad (18)$$

样件的声压透射系数为：

$$t_p = \frac{p_t}{p_i} \quad (19)$$

样件的隔声量为：

$$R = -20 \lg |t_p| \quad (20)$$

曲波等^[17]在三传感器测量方法的基础上加以改进，研究了四传感器法测试隔声量，可以有效地消除透声部分末端反射波，低频范围内隔声量的测试精度能够显著提升。图 9 为四传感器法测量原理图，通过功放处理后的声源信号进入阻抗管内，最终透射声波 p_t 才能到达声学末端处，声波一部分反射回来形成 p_{2r} ，另一部分则被末端吸收。在样件的两边分别布置了两个传声器，可以将反射波与入射波分离。具体计算过程如下。

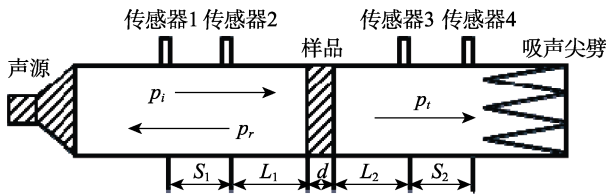


图 9 四传感器法测试原理示意图

Fig.9 Schematic diagram of four-sensor method

传感器 1、传感器 2、传感器 3、传感器 4 测的声压分别为 p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 。由平面声波传播规律，可得以下公式：

$$\begin{cases} p_1 = p_i e^{jk(S_1+L_1)} + p_r e^{-jk(S_1+L_1)} \\ p_2 = p_i e^{jkL_1} + p_r e^{-jkL_1} \\ p_3 = p_t e^{jkL_2} + p_{2r} e^{-jkL_2} \\ p_4 = p_t e^{jk(S_2+L_2)} + p_{2r} e^{-jk(S_2+L_2)} \end{cases} \quad (21)$$

k 是波数， $k = \frac{2\pi f}{c}$ 。由以上式子可以计算出入射声压 p_i 、反射声压 p_r 、透射声压 p_t 、反射声压 p_{2r} ：

$$\begin{cases} p_i = \frac{p_1 - p_2 e^{-jkS_1}}{e^{jkS_1} - e^{-jkS_1}} e^{-jkL_1} \\ p_r = \frac{p_1 - p_2 e^{jkS_1}}{e^{-jkS_1} - e^{jkS_1}} e^{jkL_1} \\ p_t = \frac{p_3 e^{jkS_2} - p_4}{e^{jkS_2} - e^{-jkS_2}} e^{jkL_2} \\ p_{2r} = \frac{p_3 e^{-jkS_2} - p_4}{e^{-jkS_2} - e^{jkS_2}} e^{-jkL_2} \end{cases} \quad (22)$$

样件的声压透射系数为：

$$t_p = \frac{p_t}{p_i} = \frac{\sin(kS_1)}{\sin(kS_2)} \frac{p_3 e^{jkS_2} - p_4}{p_1 - p_2 e^{-jkS_1}} e^{jk(L_1+L_2)} \quad (23)$$

样件的隔声量为：

$$R = -20 \lg |t_p| \quad (24)$$

吴海军等^[18]在探究四传声器法应用时发现，隔声量测试结果受到波数和传声器间距乘积的影响。陶猛等^[19]在使用四传声器测量多层复合材料这种性能较好的样件时发现，透射管中的传声器的信噪比较低，使得测量结果误差增大，因此研究了双传声器间接测量声学材料的隔声量。通过测量不同背衬条件（即待测样件的后表面阻抗）下对应的前表面阻抗，可以求解与传递矩阵四个元素相关的中间变量，即可计算声学材料的隔声量。

2.2 基于混响室法的隔声量测量

基于混响室法的材料隔声量测量方法主要包括混响室-混响室法、混响室-消声室法、Alpha 箱法，不同于阻抗管测试中声源方向为垂直入射，该四种方法的声源是无规则的，其考虑了样件的结构特性以及不均匀性，从而更加贴合于实际应用的情况。

最初，隔声量的测试是应用在建筑隔墙上，逐渐发展成了在混响室中进行材料样件的隔声量测试^[20-21]。到 19 世纪 60 年代，ISO 颁布了通过混响室法测量材料隔声量的标准 ISO^[22]。混响室-混响室法的测试原理如图 10 所示，测试室由两部分组成，声源室与接收室。声源室发射出特定的声波通过两室之间安装测试样件的空间，并由接收室接收。声源发出噪声后需要经过滤波器、功率放大器后再传送至扬声器，此时的电信号将通过扬声器转换为声信号通过声源室发出，声信号经过样件传到接收室。声场稳定后，通过传声器测量两个室的室内声压大小，然后在功率放大后进行后续的滤波处理。

通过测量得到声源室声压级 L_1 ，受声室声压级 L_2 ， S 为样件面积， V 为受声室体积， T 为混响时间，通过下式计算隔声量：

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{ST_2}{0.163V} \quad (25)$$

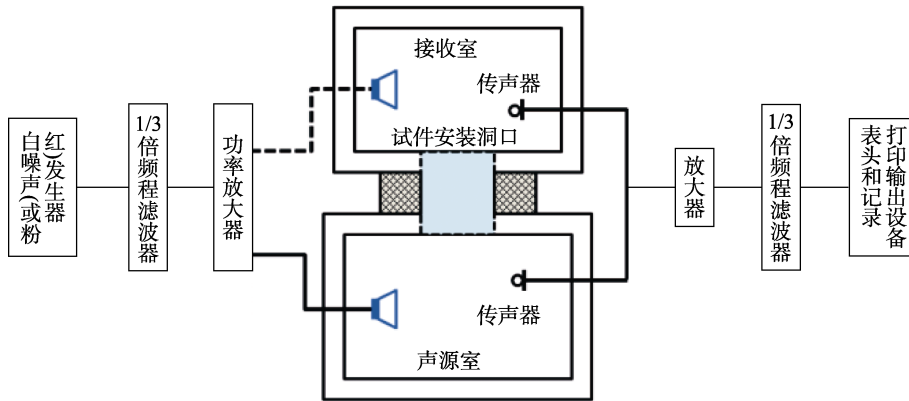


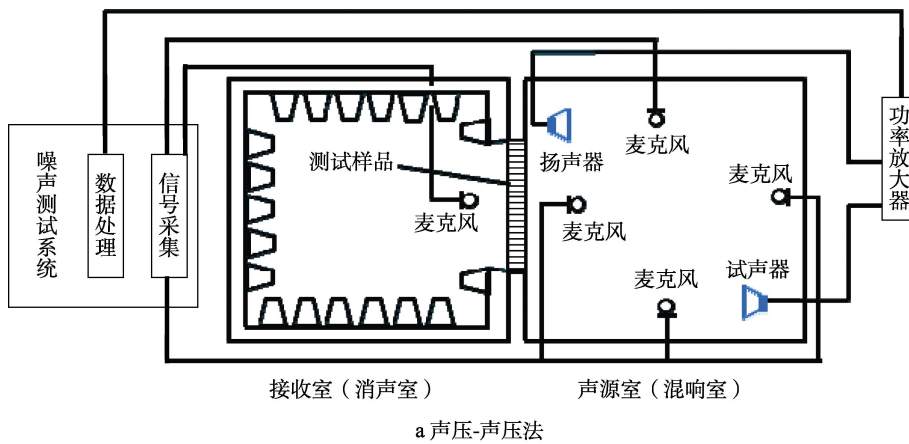
图 10 混响室-混响室法测试原理

Fig.10 Schematic diagram of reverberation chamber-reverberation chamber method

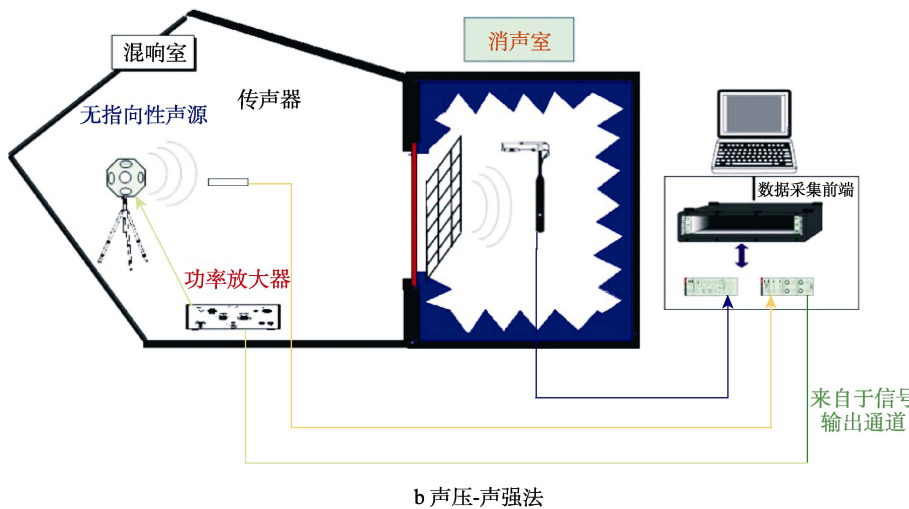
因为传统的混响室-混响室法中接收室是混响室，室内的声波多次反射且相互影响，稳定状态下的各处空间声压是均匀分布的，故难以获得样件声传播指向性与声透射性。而半消声室模拟的是半无限声场，在半消声室中声波传播至吸声尖劈时被吸收，不存在反射干扰，所以声波在空间内只传播一次，从而选择混响室-半消声室中进行样件声传播指

向性与声透射性的测试试验。混响室-消声室法可采用声压-声压法或声压-声强法获得隔声量，测试原理见图 11。

张学飞等^[23]利用混响室-半消声室进行了 1.5 mm 厚度匀质铁板 1/3 倍频程隔声特性试验，测量了声透射性、声传播指向性，有利于找出材料的薄弱之处，有针对性地对材料进行优化。周国建等^[24]使用混响



a 声压-声压法



b 声压-声强法

图 11 混响室-消声室法测试原理

Fig.11 Schematic diagram of reverberation chamber-anechoic chamber method: a) sound pressure-pressure method, b) sound pressure-intensity method

室-消声室对大尺寸平板样件实施隔声量测试, 预估了超材料对低频噪声的衰减能力。上官文斌等^[25]在混响室-全消室中测试多层平板材料隔声量, 与计算结果一致性良好。

混响室-消声室法即便存在较多优点, 但其成本高昂, 占用空间大, 对测试样件有一定的要求。基于混响室-消声室原理设计的 Alpha 舱则能较好地解决上述问题。同时, 该方法在一个测试系统中包含了垂直入射以及无规则入射, 比较方便结果的对比分析。

冯瑀正等^[26]提出一种“混响室-消音箱法”, 该方法能够测量 $1 \times 1 \text{ m}^2$ 大小的样件隔声量, 并将样件的高限隔声提升 20 dB。郑辉等^[27]对混响室-消音箱法测隔声量进行了讨论, 消音箱内吸声修正项关乎测试的可靠性, 同时对于高隔声材料, 一定要考虑侧向传声的修正。侯兆平等^[28]对 Alpha 舱法测试结果做了系统分析, 并结合 SEA 仿真计算值, 结果表明 Alpha 舱法在 800~4000 Hz 的中高频段内能较准确反映材料的隔声性能。张磊等^[29]采用了混响箱的设计, 采用低频段的声固耦合法、中高频段的统计能量法对设计的混响声场进行声学分析, 提高混响水平。

利用混响室-消音箱法测试消音箱内声强能够降低材料透射声一侧近场效应的影响, 但是消音箱内部空间大小并不足够大, 测量系统也不能完全匹配, 因此还是会存在一定的误差, 从而需要对测试结果进行修正^[30-31]

3 经济性分析

阻抗管通常用来测试材料的垂直入射吸声系数和隔声量, 测试样件小, 制样成本低, 测试周期短, 阻抗管测试系统价格较高, 设备占用面积小, 维护成本低。Alpha 舱通常用来测试材料、部件的无规则入射吸声系数和隔声量, 测试样件较大, 制样成本低, 测试周期较长, 测试系统价格较高, 设备占用面积较大, 维护成本低。混响室通常用来测试材料、部件、构件的无规则入射吸声系数和隔声量, 测试样件大, 制样成本较高, 大多数时候需额外设计及制造测试样件的夹具工装, 测试周期长, 混响室和消声室建造成本高, 场地占用面积大, 维护成本较高。

4 结语

随着车辆、船舶、飞机等武器装备的升级换代, 对舱内噪声设计和控制提出了更高要求, 需要更高精度和更广范围地测量材料的吸声系数和隔声量, 以满足真实的需要。近年来, 虽然越来越多的学者投入材料声学特性的典型参数测试技术研究, 但我国材料声学特性的典型参数测试技术研究起步较晚, 主要依赖于国外基础理论研究及相关测试标准。对此, 我国未

来的材料声学特性典型参数测试技术可从以下几方面发展: 加强声学基础理论研究, 建立标准测试方法; 提高测试设备的设计和开发能力, 打破国外先进技术垄断; 积极推广材料声学特性的典型参数测试技术, 扩大该技术在更多领域的应用。

参考文献:

- [1] WILSON P. Sound Propagation and Scattering in Bubbly Liquids[D]. Boston: Boston University, 2002.
- [2] CHUNG J Y, BLASER D A. Transfer Function Method of Measuring In-Duct Acoustic Properties[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 68(3): 907-913.
- [3] 王毅刚, 俞梧周, 盛胜我. 阻抗管中采用为随机信号的三点测量技术[J]. 声学技术, 1995, 14(4): 158-161.
WANG Yi-gang, YU Wu-zhou, SHENG Sheng-wo. Three-point Measurement Technique Using Random Signal in Impedance Tube[J]. Acoustic Technology, 1995, 14(4): 158-161.
- [4] 陈克安, 曾向安. 双传声器测量斜入射吸声系数研究[J]. 应用声学, 1998, 18(4): 28-32.
CHEN Ke-an, ZENG Xiang-an. Study on the Measurement of Oblique Incidence Sound Absorption Coefficient with Two Microphones[J]. Applied Acoustics, 1998, 18(4): 28-32.
- [5] CHU W T. Transfer Function Technique for Impedance and Absorption Measurements in an Impedance Tube Using a Single Microphone[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1986, 80(2): 555-560.
- [6] SCHULTZ T, SHEPLAK M, CATTAFESTA L N. Uncertainty Analysis of the Two-microphone Method[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 304(12): 91-109.
- [7] 张武威, 汤伟红. 室内声场扩散程度对测定吸声系数影响的研究[J]. 电声技术, 200, 31(5): 7-8.
ZHANG Wu-wei, TANG Wei-hong. Study on the Influence of the Diffusivity of Indoor Sound Field on the Determination of Sound Absorption Coefficient[J]. Electroacoustic Technology, 200, 31(5): 7-8.
- [8] TOYODA E, SAKAMOTO S, TACHIBANA H. Effects of Room Shape and Diffusing Treatment on the Measurement of Sound Absorption Coefficient in a Reverberation Room[J]. Acoust Sci & Tech, 2004, 25(4): 255-266.
- [9] 王季卿, 顾墙国. 混响室中悬挂扩散板和试件面积对吸声测量结果的影响[J]. 声学学报, 1984(6): 38-50.
WANG Ji-qing, GU Qiang-guo. Influence of Suspended Diffuser and Specimen Area on Sound Absorption Measurement in Reverberation Chamber[J]. Journal of Acoustics, 1984(6): 38-50.
- [10] HIDAKA Y, YANO H, Tachibana H. Correction for the Effect Atmospheric Sound Absorption on the Sound Absorption Coefficients of Materials Measured in a Rever-

- beration Room[J]. Journal of the Acoustical Society of Japan, 1988, 9 (5): 217-223.
- [11] 杨小军, 沈勇, 乐意. 混响室中混响时间测量偏差的研究[J]. 声学技术, 2011, 30(1): 93-97.
YANG Xiao-jun, SHEN Yong, LE Yi. Study on the Measurement Deviation of Reverberation Time in Reverberation Chamber[J]. Acoustic Technology, 2011, 30(1): 93-97.
- [12] 王季卿, 顾墙国. 混响室中用角点传声器测量材料的吸声系数[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1983(2): 99-105.
WANG Ji-qing, GU Qiang-guo. Sound Absorption Coefficient of materials measured by Corner Microphone in Reverberation Chamber[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 1983(2): 99-105.
- [13] 贺加添. 混响室法测量材料吸声系数的有效性[J]. 烟台大学学报: 自然科学与工程版, 1995(3): 65-72.
HE Jia-tian. Effectiveness of Reverberation Chamber Method for Measuring Sound Absorption Coefficient of Materials[J]. Journal of Yantai University: Natural Science and Engineering, 1995(3): 65-72.
- [14] NUTTER D B, LEISHMAN T W, SOMMERFELDT S D, et al. Measurement of Sound Power and Absorption in Reverberation Chambers Using Energy Density[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2007, 121(5): 2700-2710.
- [15] 朱蓓丽, 肖今新. 双水听器传递函数法低频测试及误差分析[J]. 声学学报, 1994, 19(5): 351-360.
ZHU Bei-li, XIAO Jin-xin. Low Frequency Measurement and Error Analysis of Double Hydrophone Transfer Function Method[J]. Journal of Acoustics, 1994, 19(5): 351-360.
- [16] 朱蓓丽, 罗晓辉. 驻波管中的隔声量测试方法[J]. 噪声与振动控制, 2000(6): 41-43.
ZHU Bei-li, LUO Xiao-hui. Test Method for Sound Insulation in Standing Wave Tubes[J]. Noise and Vibration Control, 2000(6): 41-43.
- [17] 曲波, 朱蓓丽. 驻波管中隔声量的四传感器测量法[J]. 噪声与振动控制, 2002(6): 41-43.
QU Bo, ZHU Bei-li. Four-sensor Measurement of Sound Insulation in Standing Wave Tube[J]. Noise and Vibration Control, 2002(6): 41-43.
- [18] 吴海军, 蒋伟康, 李良军. 驻波管法四传声器测量隔声量的误差分析[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(8): 1265-1269.
WU Hai-jun, JIANG Wei-kang, LI Liang-jun. Error Analysis of Standing Wave Tube Four-microphone Measuring Sound Insulation Quantity[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2008, 42(8): 1265-1269.
- [19] 陶猛, 王广玮. 驻波管中测量声学材料的隔声量[J]. 噪声与振动控制, 2013(5): 210-212.
TAO Meng, WANG Guang-wei. Measurement of Sound Insulation of Acoustic Materials in Standing Wave Tube[J]. Noise and Vibration Control, 2013(5): 210-212.
- [20] SHRESTHA B, HOSSAIN A Z E, CAMORLINGA S G, et al. Method and System for Allocation Guaranteed Timeslots for Efficient Transmission of Time-Critical Data in IEEE 802.15.4 Wireless Personal Area Networks: US, US20110158206 A1[P]. 2011.
- [21] KWON H J, SEO H B, KIM S W, et al. Apparatus and Method for Transmitting Data in Wireless Communication System: US, 8873532 B2[P]. 2014-01-25.
- [22] LEE M H, SON J, SEOL J Y. Apparatus and Method for Transmitting Signal in Wireless Communication System: US, 8588161B2[P]. 2013-02-04.
- [23] 张学飞, 李晔, 王瑞乾, 等. 基于混响室-半消声室的 V 型声屏障隔声测试与分析[J]. 噪声与振动控制, 2015, 35(4): 199-223.
ZHANG Xue-fei, LI Hua, WANG Rui-qian, et al. Sound Insulation Test and Analysis of V-type Sound Barrier Based on Reverberation Chamber-semi-anechoic Chamber[J]. Noise and Vibration Control, 2015, 35(4): 199-223.
- [24] 周国建, 吴九汇, 路宽名, 等. 多态反共振协同型薄膜声学超材料低频隔声性能[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(1): 64-73.
ZHOU Guo-jian, WU Jiu-hui, LU Kuan-ming, et al. Low-frequency Sound Insulation Performance of Thin Film Acoustic Metamaterials with Polymorphic Anti-resonance Synergy Type[J]. Journal of the Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(1): 64-73.
- [25] 上官文斌, 熊冬, 谢新星, 等. 车用多层平板材料吸隔声特性的测试与计算分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(1): 241-248.
SHANGGUAN Wen-bin, XIONG Dong, XIE Xin-xing, et al. Test and Calculation Analysis of Sound Absorption and Insulation Characteristics of Multi-layer Flat Panel Materials for Vehicles[J]. Vibration and Shock, 2018, 37(1): 241-248.
- [26] 冯瑀正, 蔡秀兰, 郑大瑞, 等. 轻结构隔声测量的新方法[J]. 物理学报, 1978(5): 516-523.
FENG Yu-zheng, CAI Xiu-lan, ZHENG Da-rui, et al. A New Method for Sound Insulation Measurement of Light Structure[J]. Journal of Physics, 1978(5): 516-523.
- [27] 郑辉. 隔声测量的混响室-消声箱法讨论[J]. 噪声与振动控制, 1994(1): 8-12.
ZHENG Hui. Discussion on Reverberation Chamber-anechoic Chamber Method for Sound Insulation Measurement[J]. Noise and Vibration Control, 1994(1): 8-12.
- [28] 侯兆平, 莫天石, 付年, 等. 车用声学材料隔声性能测试方法研究[J]. 汽车科技, 2019, 5(11): 55-60.

- HOU Zhao-ping, MO Tian-shi, FU Nian, et al. Study on Test Method of Sound Insulation Performance of Vehicle Acoustic Materials[J]. *Automotive Technology*, 2019, 5(11): 55-60.
- [29] 张磊, 郑旭, 陈军, 等. 基于 SEA 分析验证的混响箱-消声室实验方法设计及隔声性能研究[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(8): 258-264.
- ZHANG Lei, ZHENG Xu, CHEN Jun, et al. Design of Reverberation-anechoic Chamber Experiment Method Based on SEA Analysis and Sound Insulation Performance Research[J]. *Vibration and Shock*, 2020, 39(8): 258-264.
- [30] 冯瑀正. 轻结构隔声原理与应用技术[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- FENG Yu-zheng. Principles and Applications of Sound Insulation for Light Structures[M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [31] 张智博. 声学材料性能测试及评价实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- ZHANG Zhi-bo. Experimental Study on Performance Test and Evaluation of Acoustic Materials[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.