

DOI: 10.7652/xjtuxb201405021

适用于高温阻抗管的修正传递函数法

张哲^{1,2}, 王小鹏^{1,2}, 陈天宁^{1,2}, 奚延辉^{1,2}

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安;

2. 西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为预测高温阻抗管中能否产生平面波进而使用传递函数法计算材料的吸声系数,对自制高温阻抗管内空气的温度场进行了数值仿真,利用仿真得到的温度场建立了阻抗管内声场分布的仿真模型;根据求解结果,将材料前端面至较远传声器之间的空气温度梯度近似为只有轴向温度梯度,求出了轴向温度梯度时的平面波解析解,进而对传递函数法进行了修正。通过某种多孔材料的吸声系数的仿真结果,验证了修正算法的正确性。修正与未修正算法的结果比较表明,当材料前端空气的轴向温度梯度较小时,其对吸声系数计算的影响可以忽略,从而拓宽了高温阻抗管的设计空间。

关键词: 金属多孔材料;阻抗管;吸声系数;传递函数法;高温;温度梯度

中图分类号: O121.8; G558 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)05-0118-05

Modified Transfer Function Method for High Temperature Impedance Tube

ZHANG Zhe^{1,2}, WANG Xiaopeng^{1,2}, CHEN Tianning^{1,2}, XI Yanhui^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To predict plane wave propagating in high temperature impedance tube and to calculate sound absorption coefficient with transfer function method, temperature field simulation is performed for impedance tube made in our own laboratory. Then sound pressure field is modeled according to the achieved temperature field. The air temperature gradient between the front face of the material and the distant microphone in the impedance tube is assumed to exist axially, thus the transfer function method can be used and the modified analytic formula is obtained and verified by the simulation. It is found that the impact of temperature gradient on the calculated absorption coefficient can be ignored in the case of small axial temperature gradient. This study may facilitate the design of high temperature impedance tube.

Keywords: porous metallic material; impedance tube; sound absorption coefficient; transfer function method; high temperature; temperature gradient

金属多孔材料在新型汽车、高速列车、航空航天器等高能耗装备的消声降噪技术中均具有重要的应用价值^[1-3]。目前,多孔金属材料的吸声性能研究大多在常温常压条件下进行,而对高温或材料前、后端面间有温度梯度条件下的吸声性能研究则相对不

足^[4],国内外已发表的相关研究成果寥寥无几,其中一个主要原因是缺少相应的测试技术。由于目前市场上没有可以工作在高温环境(高于 150℃)的扬声器,因此在用阻抗管测量吸声材料高温吸声系数时,总是扬声器处于低温,而吸声材料处于高温,从而在

收稿日期: 2013-09-27。 作者简介: 张哲(1989—),男,硕士生;陈天宁(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2011CB610306);教育部长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT1172)。

网络出版时间: 2014-03-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.7652/xjtuxb201405021.html>

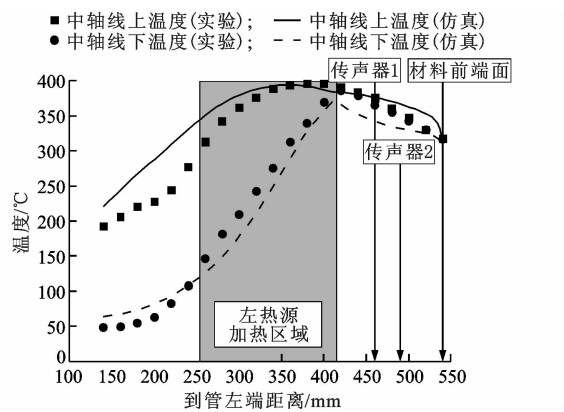
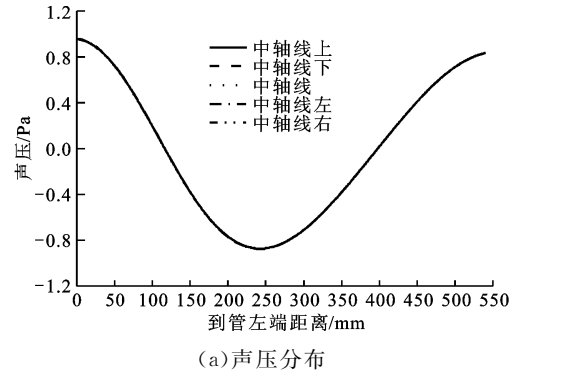


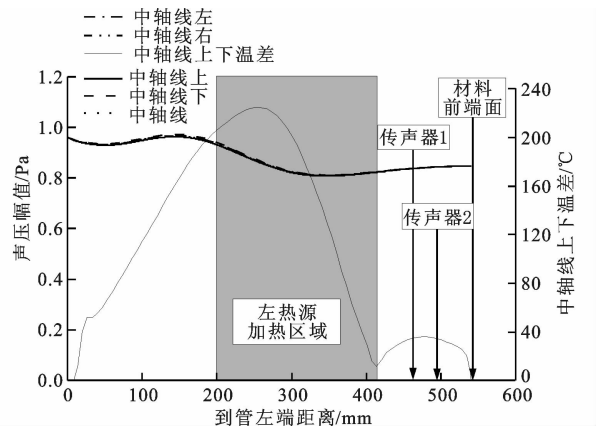
图 3 温度场的仿真与实验结果对比

1.2 高温下的阻抗管声场分析

将 Fluent 所得到的空气温度场导入 comsol 软件中,计算区域为阻抗管内的圆柱空气柱。通过行波来研究声波在空气轴向温度梯度下是否满足平面波的传播特性,将 2 个圆柱端面设为平面波辐射边界条件,即平面波无反射,采用单频信号,入射波幅值为 1 Pa,管壁为硬边界条件,频率分别设为 800 Hz 和 4 800 Hz,管壁为硬边界条件。仿真结果见图 4、图 5,图中同时画出了中轴线上、下的温度差,用来代表径向温度梯度的大小。

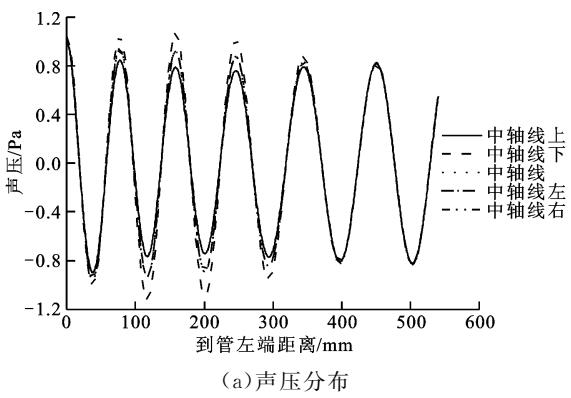


(a) 声压分布

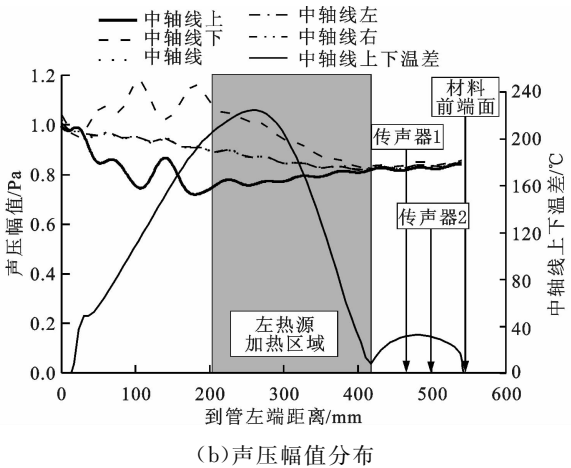


(b) 声压幅值分布

图 4 入射声波频率为 800 Hz 时的管内声场分布



(a) 声压分布



(b) 声压幅值分布

图 5 入射声波频率为 4 800 Hz 时的管内声场分布

从图 4 和图 5 可以看出:低频时温度梯度对声波的影响只体现在声压幅值的变化上,管内仍为平面波,体现了低频声波的越障性;当入射波为高频时,在径向温度梯度大的地方,如在加热区域和扬声器之间,同一截面不同位置的声压及其幅值产生了较大的变化,不再是平面波,而在径向温度梯度小的地方,如传声器附近,则产生了近似平面波。对于阻抗管中远离传声器的非平面波,可以认为是产生平面波的声源部分,故只需要考虑 2 个传声器处的平面波。因此,可将阻抗管内空气的均温要求扩宽到仅有轴向温度梯度。

由于实验测得材料前端空气几乎只有轴向温度梯度,因此可认为自制装置满足产生平面波的要求,能够使用传递函数法计算吸声系数。为了考虑轴向温度梯度对传递函数法的影响,需要在该梯度下对传递函数法进行修正。

2 空气有轴向温度梯度时对传递函数法的修正

2.1 修正公式推导

文献[8-10]研究了在介质的密度和声速仅沿一

个方向变化时平面波的解析解。但是,文献[8]中推导解析公式时采用了均温波导管理论^[11]中的处理办法,将公式(8)中的 $f(z)$ 当作常项,因而得到的结果是错误的。与文献[9]相比,文献[10]给出的方法更为简单易懂——只需要通过温度场计算出密度场和声速场,然后用选定的密度和声速拟合函数进行拟合,就可以得到一个简单的解析解。密度拟合函数和声速拟合函数分别为

$$\rho = \frac{Qe^{\alpha x}}{(e^{\alpha x} + a)^2} \tag{1}$$

$$c = \frac{c_1}{(1 + \delta x)^{1/2}} \tag{2}$$

式中: Q 、 a 、 α 、 c_1 、 δ 均为待拟合参数。本文采用文献[10]中的方法,最终获得的空气轴向温度梯度下的平面波解析解为

$$p = (CA(\eta) + DB(\eta))\rho^{1/2} \tag{3}$$

式中: A 、 B 为艾里函数; η 为位置 x 的函数; C 、 D 为与温度场有关的常数。将正向波、负向波分别表示为

$$p^+(x) = (C_1A + D_1B)\rho^{1/2} \tag{4}$$

$$p^-(x) = (C_{-1}A + D_{-1}B)\rho^{1/2} \tag{5}$$

式中: C_1 、 D_1 、 C_{-1} 、 D_{-1} 均为与温度场有关的常数。由此,可写出空气中驻波的形式为

$$p = rp^+(x) + p^-(x) \tag{6}$$

式中: r 为反射系数。从传声器 2 处到传声器 1 处的传递函数为

$$H_{12} = \frac{p(x_2)}{p(x_1)} = \frac{rp^+(x_2) + p^-(x_2)}{rp^+(x_1) + p^-(x_1)} \tag{7}$$

从而可求出反射系数的修正公式为

$$r = \frac{p^-(x_2) - H_{12}p^-(x_1)}{H_{12}p^+(x_1) - p^+(x_2)} \tag{8}$$

2.2 仿真验证

在 comsol 中分别用声强法、传递函数法以及修正传递函数法计算某多孔材料的吸声系数。声强法是通过进入材料的声强与总声强之比来计算吸声系数。利用 comsol 计算全场节点的声压及振速,进而计算出实际的声强,将其与入射平面波的总声强(设定值)相比可计算出吸声系数。仿真模型如图 6 所示。多孔材料的参数值如下:孔隙率为 0.8;流阻率为 $10.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^2$;黏性特征长度参数为 0.49;热特征长度为 $470 \text{ }\mu\text{m}$;黏性特征长度为 $240 \text{ }\mu\text{m}$;曲折度为 1.005 9。采用 Johnson-Champoux-Allard 等效流体模型计算其等效密度和等效声速。

空气的密度及声速用实验测得的材料前端到较

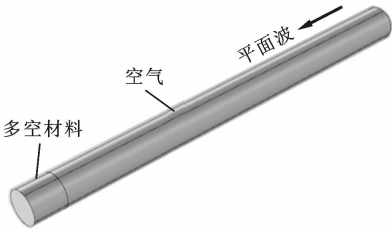
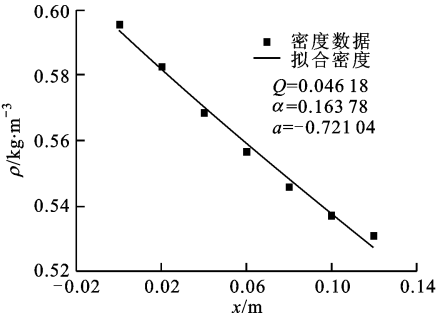
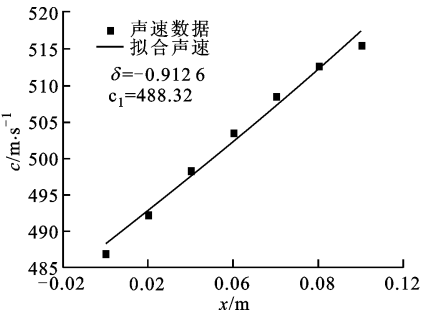


图 6 声场仿真模型

远传声器之间的温度进行计算^[12],用式(1)、式(2)进行拟合可得到相应的曲线,如图 7 所示。



(a) 密度拟合结果



(b) 声速拟合结果

图 7 密度和声速拟合结果

设多孔材料后端面及圆柱面为硬边界条件,空气柱另一端面为平面波入射,采用单频信号,幅值为 1 Pa。仿真结果如图 8 所示。

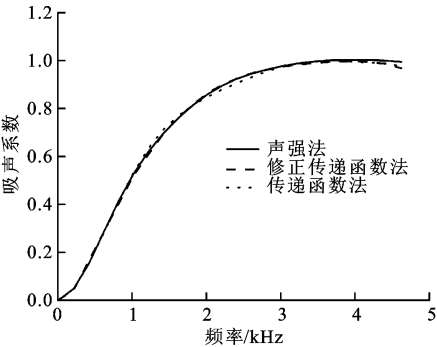


图 8 吸声系数计算结果对比

从图 8 可知,声强法和修正传递函数法所得结果完全重合,证明了修正传递函数法的正确性。同

时,修正与未修正传递函数法所得曲线的差异很小,说明材料前端空气有较小轴向温度梯度(本例为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}/0.140\text{ m}\approx 428.6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$)对吸声系数的影响不大。此结论从另一方面也说明,在设计高温阻抗管时,阻抗管前端空气有轴向温度梯度的工况是允许的,可由上述修正后的公式计算吸声系数。

3 结 论

本文对使用传递函数法时的均温要求做了推广,允许在传声器测量段空气仅有轴向温度梯度,并给出了修正公式。研究结果表明,当材料前端空气轴向温度梯度较小时,其对吸声系数计算的影响可以忽略不计。这一结论拓宽了高温阻抗管的设计空间,具有一定的潜在应用价值。

参考文献:

- [1] 卢天健,何德坪,陈常青,等.超轻多孔金属材料的多功能特性及应用[J].力学进展,2006,36(4):517-535.
LU Tianjian, HE Deping, CHEN Changqing, et al. The multi-functionality of ultra-light porous metals and their applications [J]. Advances in Mechanics, 2006, 36(4): 517-535.
- [2] 彭锋,王晓林,孙艳,等.高声压级时多孔金属板的吸声特性研究[J].声学学报,2009,24(3):266-274.
PENG Feng, WANG Xiaolin, SUN Yan, et al. Investigation on the sound absorption characteristics of porous metal plates at high sound pressure levels [J]. Acta Acustica, 2009, 24(3): 266-274.
- [3] 张波,陈天宁,冯凯,等.烧结金属纤维多孔材料的高温吸声性能[J].西安交通大学学报,2008,42(11):1327-1331.
ZHANG Bo, CHEN Tianning, FENG Kai, et al. Sound absorption properties of sintered fibrous metals under high temperature conditions [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(11): 1327-1331.
- [4] 张波.多孔金属材料吸声性能研究[D].西安:西安交通大学,2008:3-8.
- [5] 全国声学标准化技术委员会. 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[S].北京:中国标准出版社,2002.
- [6] 冯凯.多孔金属材料高温吸声性能实验装置及吸声性能研究[D].西安:西安交通大学,2008.
- [7] 薛昌意.变参数温度场下多孔金属材料吸声性能研究[D].西安:西安交通大学,2010.
- [8] 田晓培,金韬.声波在非均匀介质波导中的传播[J].复旦学报:自然科学版,2011,50(4):527-532.

TIAN Xiaopei, JIN Tao. Acoustic wave propagates in nonuniform medium waveguides [J]. Journal of Fudan University: Natural Science, 2011, 50(4): 527-532.

- [9] SUJITH R I, WALDHERR G A, ZINN B T, An exact solution for one-dimensional acoustic fields in ducts with an axial temperature gradient [J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 184(3): 389-402
- [10] Robins A J. Reflection of a plane wave from a fluid layer with continuously varying density and sound speed [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1991, 89(4): 1686-1695.
- [11] 杜功焕,朱哲民,龚秀芬.声学基础[M].3版.南京:南京大学出版社,2012:190-191.
- [12] SÁNCHEZ-DEHESA J, ANGELOV M I, CERVERA F, et al. Sound control by temperature gradients [J]. Applied Physics Letters, 2009, 95: 204102(1-3).

[本刊相关文献链接]

- 张健,赵桂平,卢天健.泡沫金属在冲击载荷下的能量吸收特性.2013,47(11):105-112. [doi:10.7652/xjtuxb201311019]
- 谷伟,张虎,李增耀,等.混合气体在典型多孔介质内扩散过程的数值模拟.2012,46(3):107-112. [doi:10.7652/xjtuxb201203019]
- 张虎,谷伟,李增耀,等.氧化硅纳米多孔材料表面的水蒸气吸附动力学研究.2012,46(3):1-8. [doi:10.7652/xjtuxb201203001]
- 于雪梅.气体静压轴承用多孔 SiC 陶瓷的制备及静态性能.2011,45(3):117-120. [doi:10.7652/xjtuxb201103022]
- 张健,赵桂平,卢天健.闭孔泡沫铝应变率效应的试验和有限元分析.2010,44(5):97-101. [doi:10.7652/xjtuxb201005020]
- 张波,陈天宁.高声压激励下多孔金属材料的吸声性能数值计算.2010,44(3):58-62. [doi:10.7652/xjtuxb201003012]
- 屈治国,徐治国,陶文铨,等.通孔金属泡沫中的空气自然对流传热实验研究.2009,43(1):1-4. [doi:10.7652/xjtuxb200901001]
- 张波,陈天宁,冯凯,等.烧结金属纤维多孔材料的高温吸声性能.2008,42(11):1327-1331. [doi:10.7652/xjtuxb200811003]
- 张波,陈天宁.烧结金属纤维材料的吸声模型研究.2008,42(3):328-332. [doi:10.7652/xjtuxb200803016]
- DUPÈRE Iain D J, 卢天健, DOWLING Ann P. 声学多孔材料的孔结构优化.2007,41(11):1251-1256. [doi:10.7652/xjtuxb200711001]
- DOWLING Ann P, 卢天健, DUPÈRE Iain D J. 多孔泡沫材料的声吸收特性.2007,41(9):1003-1011. [doi:10.7652/xjtuxb200709001]

(编辑 葛赵青)