

采用微扰法测试碳泡沫的电磁参数

方志刚¹ 李处森² 孙家言² 张劲松²

(1 台州学院机械工程学院,台州 318000)

(2 中国科学院金属研究所,沈阳 110016)

文 摘 利用网络分析仪连接矩形谐振腔组成材料电磁参数微扰法测试系统。由谐振腔微扰理论出发,得到以托管装载小样品测试时复介电常数和复磁导率的计算公式。对碳泡沫进行电磁参数测试。结果表明,随着碳泡沫电导率的增加,其介电常数缓慢增加,电损耗先增加后减小,而磁损耗不断增加。碳泡沫具有介电常数小、电损耗大、随电导率增加而增加的非本征磁损耗,这种独特的电磁损耗特征使得碳泡沫有用作宽频带高温结构吸波材料的可能性。

关键词 吸波材料,碳泡沫,电磁参数,微扰法

Measurement of Electro-Magnetic Parameters of Carbon Foams by Perturbation Method With Application of Network Analyzer

Fang Zhigang¹ Li Chusen² Sun Jiayan² Zhang Jinsong²

(1 College of Mechanical Engineering, Taizhou University, Taizhou 318000)

(2 Institute of Metal Research, Academy of China, Shenyang 110016)

Abstract Network analyzer was connected with rectangular resonant cavity to build up a perturbation measurement system for electro-magnetic parameters of materials. Based on perturbation theory, the measurement equations for the complex permittivity and permeability of small volume materials loaded into sample holders for measurement were obtained. The electro-magnetic parameters of a novel radar absorbing material, carbon foams, were measured. It shows that the ϵ_r and μ_r value of carbon foams increase gradually with the increase of electric conductivity, while the ϵ_i value increases firstly and then decreases. Carbon foams are characterized by small permittivity, large electric loss and extrinsic magnetic loss. The unique electro-magnetic loss characteristics of carbon foams make it possible to be used as structural radar absorbing materials with wide absorbing bandwidth at elevated temperatures.

Key words Radar absorbing materials, Carbon foam, Electro-magnetic parameters, Perturbation method

1 引言

当前应用的大部分吸波材料还存在频带窄、效率低、密度大等缺点,使其应用范围受到一定限制,拓宽吸波波段,是吸波材料研究的主要方向之一。吸收频带宽要求吸波剂具有多种电磁损耗机制。同时要求吸波材料既能承载又能吸波,即具有宽频带、高效率的结构型吸波材料成为研究与发展的重点^[1]。此外,对于应用于高温场合的吸波材料,其吸波性能在高温下能够依然保持也是吸波材料研究的重点,即要求吸波材料耐高温^[2]。磁性吸波材料具有较强的磁

损耗能力,甚至具有电磁双重损耗机制,但是磁性材料的磁损耗在环境温度超过其居里转变温度 T_c 时因发生居里转变而消失,因而磁性吸波材料一般难以作为高温吸波材料使用。

碳泡沫是一种具有三维联通开孔结构的多孔材料,具有质量轻、比表面大、热胀系数低、热导率高、耐高温、耐腐蚀等特点,且具有各向同性,对其制备、结构控制、力学及导热性能,国内外有很多报道,表明其用作结构和热功能材料将具有广阔的应用前景^[3~5]。也有文献提到碳泡沫用作吸波材料,但研究并不深

收稿日期:2009-04-29;修回日期:2009-06-23

基金项目:浙江省自然科学基金(74090009)资助

作者简介:方志刚,1979年出生,讲师,博士,研究方向:先进碳材料、吸波材料。E-mail:zhgfang@tzc.edu.cn

入^[5]。对碳泡沫的数值模拟结果表明,碳泡沫具有优异的宽频带吸波性能和特殊的电磁损耗特征,吸波性能与碳泡沫的电导率有密切关系,碳泡沫不仅能够消耗入射电磁场中电场分量的能量,而且还能够部分消耗磁场分量的能量,具有电磁双重损耗机制^[6-7]。碳泡沫的电磁损耗特征的数值模拟结果尚缺乏实验验证。本文通过微扰法测试出碳泡沫的电磁参数,揭示其电磁损耗特征。全频段的电磁参数的测试相对比较困难,本文仅通过比较成熟的谐振腔微扰法测试 2.45 GHz 点频下碳泡沫的电磁参数。

2 碳泡沫的制备

碳泡沫通过有机泡沫浸渍法制备^[8]。以树脂为黏接剂,按一定比例加入平均粒径为 5 μm 的 SiC 粉和固化剂调制成一定黏度的浆料。用不同孔径的聚氨酯泡沫均匀挂浆,用压缩空气吹出多余的浆料,置于烘箱中固化,然后置于碳管炉中,通入 99.99% Ar 气作为保护气体,以 2 °C/min 的升温速率将样品加热到系列不同预定炭化温度,保温时间 1 h,得到碳泡沫,图 1 是孔径为 1 mm 左右碳泡沫的 SEM 形貌。从图 1 可以看出,有机泡沫浸渍法制备的碳泡沫复制了有机泡沫的孔结构特征,形成网孔分布比较均匀的三维联通开孔网络结构。碳泡沫孔筋中心的孔洞则是由于炭化过程中聚氨酯泡沫的排除、逸出而留下的空位。

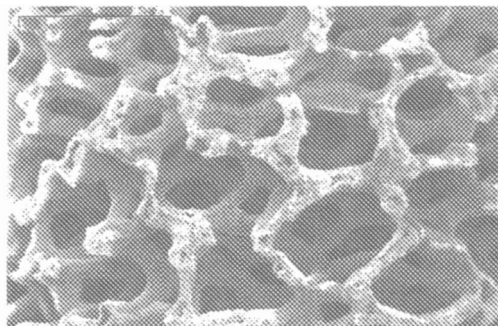


图 1 碳泡沫的 SEM 形貌

Fig 1 SEM image of carbon foams

3 微扰法测试的理论基础及测试装置

谐振腔微扰的基本理论基础方程是^[9-10]

$$\frac{f_0}{f_0} + j \left(\frac{1}{2Q_0} \right) = \frac{\int_{V_s} [\epsilon_0 (\epsilon_r - 1) EE^* + \mu_0 (\mu_r - 1) HH^*] dV}{\int_{V_c} (\epsilon_0 EE^* + \mu_0 HH^*) dV} \quad (1)$$

式中, E 、 E^* 、 H 、 H^* 分别是谐振腔中置入样品前后的电场强度和磁场强度, V_s 、 V_c 分别是样品和谐振腔的体积, ϵ_r 和 μ_r 便是待测材料的复数形式的电磁参数。通过读取谐振腔载入测试样品前后的谐振频率 f_0 和品质因数 Q_0 的变化,并求解上述方程就可以计算出被测材料的电磁参数。

将样品分别置于电场最强而磁场为零处和磁场最强而电场为零处,上面的微扰理论方程分离为以下两个独立的方程

$$\frac{f_0}{f_0} + j \left(\frac{1}{2Q_0} \right) = \frac{\int_{V_s} \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) EE^* dV}{\int_{V_c} (\epsilon_0 EE^* + \mu_0 HH^*) dV} \quad (2)$$

和

$$\frac{f_0}{f_0} + j \left(\frac{1}{2Q_0} \right) = \frac{\int_{V_s} \mu_0 (\mu_r - 1) HH^* dV}{\int_{V_c} (\epsilon_0 EE^* + \mu_0 HH^*) dV} \quad (3)$$

进一步分离这两个方程的实部和虚部,便可分别得到复数介电常数 $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ 和复数磁导率 $\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$ 的实部和虚部。

TE₁₀₃ 模式矩形谐振腔中电磁场的分布为

$$\begin{cases} E_y = E_0 \sin\left(\frac{x}{a}\right) \sin\left(\frac{3z}{l}\right) \\ H_x = -j \frac{E_0}{2a} \sin\left(\frac{x}{a}\right) \cos\left(\frac{3z}{l}\right) \\ H_z = -j \frac{E_0}{2a} \cos\left(\frac{x}{a}\right) \sin\left(\frac{3z}{l}\right) \end{cases}$$

将其代入公式 (1) ~ (3) 中,从公式 (2)、(3) 分别分离复介电常数和复磁导率的实部和虚部得到:

$$\begin{cases} \epsilon_r' = 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{f_0 - f_s}{f_0} \right) \frac{V_0}{V_s} \\ \epsilon_r'' = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_0} \right) \frac{V_0}{V_s} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \mu_r' = 1 + \frac{1}{1 - (\epsilon_0/2a)^2} \left(\frac{f_0 - f_s}{f_0} \right) \frac{abl/2}{r^2 \left[\frac{h}{2} + \frac{a}{2} \sin\left(\frac{h}{a}\right) \right]} \\ \mu_r'' = \frac{1}{2} \frac{1}{1 - (\epsilon_0/2a)^2} \left[\frac{abl/2}{r^2 \left[\frac{h}{2} + \frac{a}{2} \sin\left(\frac{h}{a}\right) \right]} \right] \left(\frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_0} \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中, a 、 b 分别是谐振腔的截面宽、窄边尺寸, l 是谐振腔的长, $V_0 = abl/2$ 为谐振腔的体积。 λ_0 是电磁波波长的, f_0 、 f_s 是置入样品前后腔体的谐振频率, Q_0 、 Q_s 是置入样品前后腔体的品质因数,将样品制作成半径为 r 、长度为 h 的小圆柱, V_s 是样品的体积。磁导率测试时样品在谐振腔 a 方向上居中放置,得到公式(5),介电常数测试时样品在谐振腔 b 方向上任意放置,公式(4)保持形式不变。

对于 TE_{103} 模式的矩形谐振腔,在谐振腔的长度中心 $z = l/2 = 3 \lambda_g/4$ 处, E_z 取得最大值, $H_z = 0$, $H_x = 0$,即电场强度最大,磁场强度为零;而在谐振腔的长度 $z = l/3 = \lambda_g/2$ 处磁场强度最大,电场强度为零,刚好分别符合谐振腔微扰法测试材料介电常数时分离公式(1)所要求电磁场分布条件,也即 TE_{103} 模式是能够在腔体中通过在不同位置分别测试而能够分别得到材料复介电常数和复磁导率的最简易模式。

在微扰法测试中,要求样品置入后引起的谐振频率漂移不大于中心谐振频率 f_0 的1%,这一点可通过调整取样体积做到,所以样品体积 V_s 往往较小。对于小体积样品,通常将其置入一个电磁参数已知材料做成的样品托中并一起置于谐振腔中进行测试。为了减小对谐振腔体的微扰效果,可选用介电常数较小、磁导率可视为1.0、介电损耗和磁损耗均很小的薄壁聚四氟乙烯塑料管作为样品托,此时腔体受到样品托的微扰和被测样品的微扰,根据式(4)、(5)并进行系列推导得到此时被测材料的复介电常数的计算公式为

$$\begin{cases} \epsilon_r = 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{f_s}{f_0} \right) \frac{V_0}{V_s} = 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{f_s - f_i}{f_0} \right) \frac{V_0}{V_s} \\ \mu_r = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_0} \right) \frac{V_0}{V_s} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $f_s = f_i + f_j$ 是样品托和被测样品共同产生的频率漂移, f_i 是由样品托使谐振腔产生的频率漂移, f_j 是由被测样品使谐振腔产生的频率漂移, Q_0 是样品托置入谐振腔后腔体的品质因数,可见在计算测试材料的介电常数实部时,只需要在总的频率漂移 f_s 中将由样品托产生的频率漂移 f_i 直接扣除即可,而计算样品的介电损耗时只需要把 Q_0 当作 Q_s 代入公式计算,所得结果就是样品本身的介电常数和介电损耗。将样品托视为磁导率1.0、磁损耗视为零的材料,则在电场为零磁场最强的位置样品托对谐振腔中的磁场分布没有微扰作用,对谐振腔的微扰完全由被测样品置入所引起,故磁导率的计算公式不变。

选用型号为BJ-22铜质矩形谐振腔进行电磁参数微扰法测试,工作模式为 TE_{103} ,中心谐振频率 f_0 为2.45 GHz, Q_0 为4900。在谐振腔长度介电常数的测

试在谐振腔长度 l 方向 $1/2$ 处的截止圆波导中进行,而复磁导率的测试在长度方向的介电常数的测试在谐振腔长度 l 方向 $1/2$ 处的截止圆波导中进行,而复磁导率的测试在长度 $1/2$ 处和介电常数的测试在谐振腔长度 l 方向 $1/2$ 处的截止圆波导中进行,而复磁导率的测试在长度 $1/3$ 处开有截止圆波导,圆波导内径 $\phi = 10$ mm。复介电常数的测试在谐振腔长度 l 方向 $1/2$ 处的截止圆波导中进行,而复磁导率的测试在长度 l 方向 $1/3$ 处的圆波导中进行。被测样品在截止圆波导中的位置借助于样品托和游标卡尺轻松实现。使样品托的外端与截止圆波导的断面平齐,用游标卡尺的深度尺可以将被测样品方便地推至任意位置从而实现被测样品的定位。

一般谐振腔微扰法测试材料的电磁参数是通过在谐振腔两端连接示波器并从示波器上获得谐振腔谐振频率 f_0 和 Q_0 的改变。这种测试系统简便易操作,但容易产生读数误差,测试结果不太精确。本文利用网络分析仪连接矩形谐振腔组成测试系统。网络分析仪是全数字化设备,能对谐振波的波峰波谷位置及峰值进行数字化标定,可以对 f_0 及 Q_0 的变化实现量化采集,由此得到的测试结果比较精确和稳定。

4 结果及分析

对碳泡沫的电磁参数进行了测试。将不同电导率的碳泡沫样品磨制成直径为8 mm的小圆柱形状,并用薄壁聚四氟乙烯塑料管托住一起置入谐振腔中进行电磁参数测试,样品取同质量,测量结果取3次测试结果的平均值。

图2是两个不同孔径、相同体积分数的碳泡沫的介电常数实部 ϵ_r 随它们电导率的变化曲线。从图2可以看出,碳泡沫的 ϵ_r 值总体较小,其变化趋势都是随碳泡沫电导率的提高而逐渐增加,但增加幅度逐步变小。图3还表明,在体积分数相同的情况下,两碳泡沫在电导率大致相等的点上, ϵ_r 值差别不大,这说明碳泡沫的孔径对其介电常数实部影响不大。

图2所示碳泡沫的 ϵ_r 随电导率提高而增加表明它们在2.45 GHz下的极化能力随电导率的增加而增强,这应与它们的结构变化有关系。碳泡沫的主要组成是无定型热解炭。随着热解温度的提高,热解炭的导电性提高,其原因是在这个过程中热解炭的结构逐步向完整石墨结构转变,分子结构中的六角碳网层面逐步增加,且排列逐步规整^[11]。在这个过程中,首先要将树脂高分子链中具有空间交联结构的C—H键逐步打开。所以,热解炭的分子结构在热解初期的变化幅度最大,之后变化幅度逐渐减小。与此相对应,碳泡沫及其同质粉末的极化能力开始增加很快,尔后

增加逐步变缓,就表现为随电导率上升, ϵ_r 开始快速增加,然后趋缓。

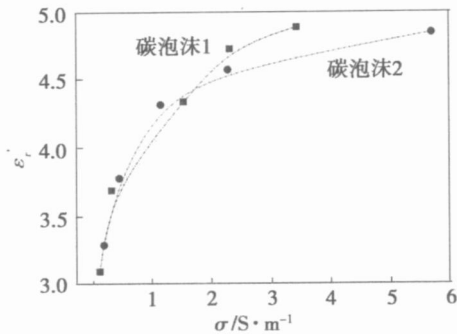


图 2 碳泡沫的 ϵ_r 随电导率的变化

Fig 2 ϵ_r of carbon foams vs their electric conductivity

图 3 给出了两不同孔径、相同体积分数碳泡沫的 ϵ_r 随电导率的变化曲线。可以看出,两碳泡沫的 ϵ_r 随电导率的增加先增加,达到一个极值后开始减小。同样孔径的因素对碳泡沫电损耗的影响远不如电导率的影响大。

对吸波材料而言,从其表面反射的电磁波也和其电导率有直接的关系^[12-13]。当材料的电导率较小时,材料与自由空间的阻抗匹配性较好,电磁波能够比较容易进入材料内部,但是材料本身对进入其中电磁波的欧姆损耗能力低,因此进入材料中的电磁波较大部分又直接从材料中透射出去,反映在材料的电损耗上,其值较低。而当材料的电导率较大时,材料与自由空间的阻抗匹配性较差,入射电磁波在界面上被直接反射回去的比例增大,尽管此时材料对进入到其中的电磁波的欧姆损耗能力较强,反映在材料的电损耗上,其值也较低。只有当材料的电导率适中时,入射电磁波既能较多地进入到材料中,又能够较多地被材料吸收消耗掉,材料因而具有较大的电损耗。

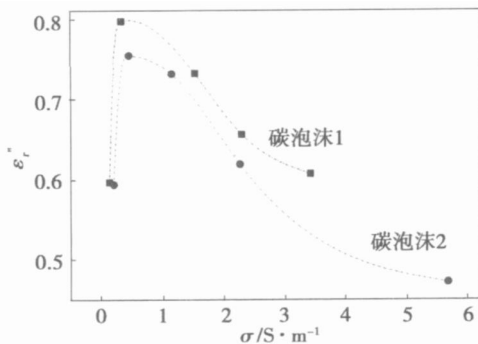


图 3 碳泡沫的 ϵ_r 随电导率的变化

Fig 3 ϵ_r of carbon foams vs their electric conductivity

图 4 是两碳泡沫的 μ_r 及 $\tan \delta_m$ 随它们电导率的变化曲线。结果表明碳泡沫的磁导率实部 μ_r 都是 1.0,这正好符合该材料是非磁性的这一基本事实,因此 μ_r 和 $\tan \delta_m$ 在数值上相等。但是从图 4 中可以明

显看出,两碳泡沫具有明显的 $\tan \delta_m$, 它们的 μ_r 及 $\tan \delta_m$ 值都不为零,且随电导率的增加而不断增加,两碳泡沫孔径的差别对其磁损耗能力影响甚微。

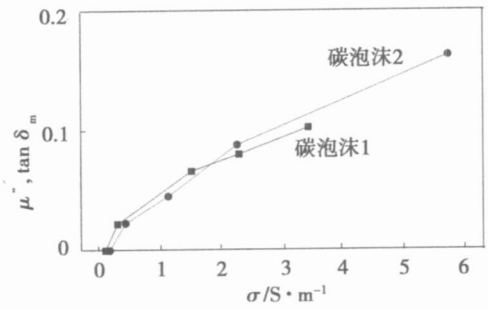


图 4 碳泡沫的 μ_r 、 $\tan \delta_m$ 随电导率的变化

Fig 4 μ_r and $\tan \delta_m$ of carbon foams vs their electric conductivity

碳泡沫的特殊三维连通导电网络结构是使其产生上述磁损耗的根本原因^[5-6],这种特殊的结构使得入射电磁场在碳泡沫中产生多向散射并通过电磁感应现象而产生的,这一作用机理使得在非磁性的碳泡沫中也能产生类似磁性材料中的磁矩作用而能够消耗电磁波中的部分磁场能量,这种效果在一些国外文献中有类似的报道^[14-15],并把这种特性称为“伪磁性”,把这类材料称为伪磁性材料,把它们具有的这种不是由材料本身的磁性所产生的磁损耗称之为非本征磁损耗。

磁性吸波材料所具有的磁损耗是一种本征磁损耗,当环境温度超过材料的居里转变温度时磁性材料发生居里转变磁性消失,其磁损耗也消失,因而磁性吸波材料一般难以作为高温吸波材料使用。与磁性材料的本征磁损耗不同,碳泡沫的非本征磁损耗是源于其特殊的三维导电网络结构,与材料本身有无磁性没有关系,因此将不会具有居里温度转变特性,因此其磁损耗机制应该在高温下会依然存在,这需要实验的进一步证实。如果确实如此,碳泡沫的这种磁损耗特征对吸波材料的开发具有特别重要的意义,碳泡沫在高温下依然兼具电磁双重损耗机制,使得它有用作高温宽频吸波材料的可能性。

5 结论

利用网络分析仪连接矩形谐振腔组成材料电磁参数测试系统。由谐振腔微扰理论出发,得到以托管装载小样品测试时复介电常数和复磁导率的简易计算公式。碳泡沫的电磁参数测试结果表明,随着碳泡沫电导率的增加,其介电常数缓慢增加,电损耗先增加后减小,磁损耗不断增加,而碳泡沫的孔径大小对上述电磁参数的影响均不显著。碳泡沫具有介电常数小、电损耗大、兼具电损耗和磁损耗双重损耗机制等特征,这种电磁损耗特征表明碳泡沫是很有可能符

合吸波材料“宽、轻、强”及“耐高温”的发展方向,是具有重要研究和开发价值的新型吸波材料。

参考文献

- 1 胡爱军,王志媛,金铮等. 泡沫夹芯型吸波隐身结构复合材料的发展趋势. 宇航材料工艺, 2009; 39(1): 1~4
- 2 罗发,周万城,焦桓等. 高温吸波材料研究现状. 宇航材料工艺, 2002; 32(1): 8~11
- 3 James Klett, Rommie Hardy, Emie Romine et al High-thermal-conductivity, mesophase-pitch-derived carbon foams: effect of precursor on structure and properties Carbon, 2000; 38(7): 953~973
- 4 Klett J W, McMillan A D, Gallego N C et al Effects of heat treatment conditions on the thermal properties of mesophase pitch-derived graphitic foams Carbon, 2004; 42(8~9): 1849~1852
- 5 沈曾民,戈敏,迟伟东等. 中间相沥青基碳泡沫的制备、结构和性能. 新型炭材料, 2006; (3): 193~207
- 6 Fang Zhigang, Cao Xiaoming, Li Chusen et al Investigation of carbon foams as microwave absorber: numerical prediction and experimental validation Carbon, 2006; 44(15): 3368~3370
- 7 Zhang Hongtao, Zhang Jinsong, Zhang Hongyan Electromagnetic properties of silicon carbide foams and their composites with silicon dioxide as matrix in X-band Composites: Part A, 2007; 38(2): 602~608
- 8 朱新文,江东亮,谭寿洪. 碳化硅网眼多孔陶瓷的制

备. 无机材料学报, 2001; 15(6): 1055~1060

- 9 Andrzej W, Kraszewski, Stuart O N. Observations on resonant cavity perturbation by dielectric objects IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1992; (1): 151~155
- 10 廖承恩. 微波技术基础. 西安:西安电子科技大学出版社, 2000: 260
- 11 Hirose T, Fujino T, Fan T X. Effect of carbonization temperature on the structural changes of woodceramics impregnated with liquefied wood Carbon, 2002; (5): 761~765
- 12 Dishovskya N, Grigorovab M. On the correlation between electromagnetic waves absorption and electrical conductivity of carbon black filled polyethylenes Mater Res Bull, 2000; 35(3): 403~409
- 13 Unsworth J, Kaynak A, Lunn B A. Microwave transmission, reflection and dielectric properties of conducting and semi-conducting polypyrrole films and powders J Mater Sci, 1993; 28(12): 3307~3312
- 14 Baena J D, Marques R, Medina F. Artificial magnetic material design by using spiral resonators Physics Review B, 2004; (1): 1~5
- 15 Grkuonov M, Lapine M, Shamonina E. Effective magnetic properties of a composite material with circular conductive elements European Physics Journal B, 2002; (2): 263~269

(编辑 吴坚)