碳化硅颗粒增强铝基复合材料弹性常数测量

周正干 高翌飞 吕 炎 何方成

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191) (北京航空材料研究院 无损检测研究室, 北京 100095)

摘 要: 为研究粉末冶金制备的碳化硅颗粒增强铝基复合材料(SiCp/Al)中SiCp含量对材料机械性能的影响, 使用弹性波法测量了SiCp含量不同的标准试样的弹性常数矩阵. 利用Christoffel方程建立了横观各向同性材料波速与弹性常数之间的关系, 介绍了水浸斜入射法测量准横波和准纵波波速的基本原理和测量过程, 基于上述原理进行了试验, 计算出了被测试件的弹性常数. 结果表明, SiCp/Al沿挤压方向的机械性能最高, 并且随着SiCp含量的增加, 弹性常数变大, 材料的强度升高.

关 键 词: 超声测量; 粉末铝合金; 弹性波

中图分类号: TB 331

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2009)02-0162-04

Elastic constant matrix measurement of SiCp reinforced aluminum metal matrix composites

Zhou Zhenggan Gao Yifei Lü Yan

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

He Fangcheng

(Department of Non-destructive Testing, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: In order to reveal the relationship between SiCp volume content and mechanical property of SiCp reinforced aluminum metal-matrix composites (MMC) fabricated by powder metallurgy, the elastic constant matrix of the standard samples with different SiCp volume content were measured with elastic wave method. The relationship between the velocities of ultrasonic waves travelled in the material and the elastic constant matrix was deduced with Christoffel equation in transverse isotropy model. The basic principle of velocity measurement of quasi-longitudinal waves and quasi-transverse waves with the oblique incidence immersion method was introduced. The experiments based on the above-mentioned principle and method were carried out and the elastic constant matrixes of the standard samples were calculated out. The results show that the mechanical property of material in the extrusion direction is better than the other directions, and with the increasing of SiCp content, the elastic constant rises and the intensity of the material enhances.

Key words: ultrasonic testing; powder metallurgy aluminum; elastic waves

碳化硅颗粒增强铝基复合材料(SiCp/Al)具有强度中等偏高、密度较小、比强度和比刚度较高等特点, 可以替代钛合金和钢等材料, 实现产品减重和降低成本, 在航空航天领域有较好的应用前景. SiCp/Al中的SiCp含量对材料性能具有重要的影响, 不同SiCp体积分数的材料机械性能存在明显区别. 材料的弹性常数不仅可以表征材料的机械性能[1-2], 还可用于材料和结构的有限元分析. 采用粉末冶金工艺制备的SiCp/Al是一种各向异性复合材料, 利用应变仪等设备可以测量其弹性常数, 但操作复杂, 且必须破坏试样; 使用弹性波测量法, 通过测量材料内不同类型超声波的

收稿日期: 2008-07-20

基金项目: 无损检测技术教育部重点实验室开放基金资助项目; 北京市教育委员会共建项目专项资助项目

作者简介: 周正干(1967-), 男, 湖南湘潭人, 教授, zzhenggan@buaa.edu.cn.

波速, 求解弹性常数矩阵, 无须破坏试样, 操作较简便, 成本较低, 适合实际生产应用. 本文研究了基于弹性波测量的 SiCp/Al的弹性常数测量原理和方法, 对研究 SiCp/Al中 SiCp含量与材料机械性能之间的关系、改进材料性能、提高材料研制水平、缩短研制周期及提高制件的质量等方面具有重要的意义.

1　弹性常数矩阵超声测量原理

1.1　横观各向同性材料的弹性常数矩阵

通过粉末冶金工艺制备的标准试样在压制过程中使用圆型包套, 因此沿 x 和 y 轴所受侧向压力近似相同, 而通常沿 z 轴所受正压力与侧向压力大小不相等[3], 因此在这种工艺下制备的材料可根据其对称性按照横观各向同性材料建立相应的模型. 横观各向同性材料中, 弹性常数矩阵共包含 5个独立弹性常数, 记为 C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{33}和 C_{44}, 于是弹性常数矩阵可写为[1]

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0\\ C_{13} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0\\ C_{13} & C_{12} & C_{33} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \tag{1}$$

其中 $C_{66}=(C_{11}-C_{12})/2$ 将式(1)代入 Christoffel方程:

$$[\Gamma_{ij}-\rho c^2\delta_{ij}][v_j]=0 \qquad i,j=1,2,3 \tag{2}$$

ρ为材料密度; c为声波速度; δ_{ij}为 Kronecher张量; v_j为质点位移分量; Γ_{ij}为 Christoffel声张量, 定义为

$$\Gamma_{ij}=C_{ikjl}n_k n_l \qquad i,j,k,l=1,2,3 \tag{3}$$

弹性常数 C_{ij}即为 C_{ikjl}的简化形式. 式中, n_k和 n_l为波前法向量的方向余弦. 为使式(2)具有非平凡解, 则必须使系数矩阵行列式为零, 即

$$|\Gamma_{ij}-\rho c^2\delta_{ij}|=0 \qquad i,j=1,2,3 \tag{4}$$

于是可得:

$$\begin{bmatrix} C_{11}n_1^2+C_{66}n_2^2+C_{44}n_3^2-\rho c^2 & (C_{12}+C_{66})n_1n_2 & (C_{13}+C_{44})n_1n_3\\ (C_{12}+C_{66})n_1n_2 & C_{66}n_1^2+C_{11}n_2^2+C_{44}n_3^2-\rho c^2 & (C_{13}+C_{44})n_2n_3\\ (C_{13}+C_{44})n_1n_3 & (C_{13}+C_{44})n_2n_3 & C_{44}n_1^2+C_{44}n_2^2+C_{33}n_3^2-\rho c^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_1\\ v_2\\ v_3 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0\\ 0\\ 0 \end{bmatrix} \tag{5}$$

因此, 通过测量超声波在介质中已知传播方向上的速度, 就可以通过式(5)计算出材料的弹性常数矩阵. 通过选择不同的入射方向和极化方向, 可得到下列结果:

$$C_{11}=\rho c_{11}^2 \tag{6}$$

$$C_{33}=\rho c_{33}^2 \tag{7}$$

$$C_{44}=\rho c_{31}^2 \tag{8}$$

$$(C_{11}\cos^2\theta+C_{66}\sin^2\theta-\rho c^2)(C_{66}\cos^2\theta+C_{11}\sin^2\theta-\rho c^2)-(C_{12}+C_{66})^2\cos^2\theta\sin^2\theta=0 \tag{9}$$

$$(C_{11}\cos^2\theta+C_{44}\sin^2\theta-\rho c^2)(C_{44}\cos^2\theta+C_{33}\sin^2\theta-\rho c^2)-(C_{13}+C_{44})^2\cos^2\theta\sin^2\theta=0 \tag{10}$$

式中, c_{ij}表示在 x_i 方向传播而极化方向在 x_j 方向的波的相速度. 式(9)和式(10)可通过代入式(6)~(8)的结果进行求解.

1.2　超声声速测量方法

为求解横观各向同性材料的弹性常数矩阵, 需测量沿 x(或 y)及 z轴方向的横波和纵波声速及在 xy平面内和 yz平面内传播的准横波或准纵波声速.

测量材料中沿 x轴和 z轴方向传播的横波和纵波声速, 可采用脉冲反射法. 首先测量出待测部位的厚度, 然后分别使用横波和纵波探头测量超声波穿过试样需要的时间, 最后计算出声速. 为计算方便, 设 x, y, z 分别对应式(5)中的方向 1、方向 2和方向 3, 因此, 沿 x 轴的纵波声速即为 c_{11}, 横波声速为 c_{13}, 沿 y轴的纵波声速为 c_{33}.

测量材料中准横波和准纵波声速的方法主要有立体切割法、单面法和水浸斜入射法等[1, 4-5]. 立体切割法要求将试样按相对于其主轴的各种方位进行切割[1], 虽然测量结果精确, 但须破坏试样. 单面法采用超声导波进行测量, 操作简单, 但计算复杂, 误差较大. 相对于上述 2种方法, 水浸斜入射法操作简单, 精度较高, 且无须破坏试样.

水浸斜入射法原理如图 1所示, T为发射探头, R为接收探头. 浸没在水中的探头 T发射出的超声波以角度 θ_i入射到试样中, 在界面处产生波形转换. 由于试样材料为横观各向同性材料, 且波的传播被制约在介质的对称面中, 沿着非对称的方向, 因此将产生一束准横波(QT)和一束准纵波(QL). QT波与 QL波的传播速度不同, 其中, QT波的速度小于 QL波的速度. 根据 Snell定律, 这两束波在传播平面内将有速度和方向的分化现

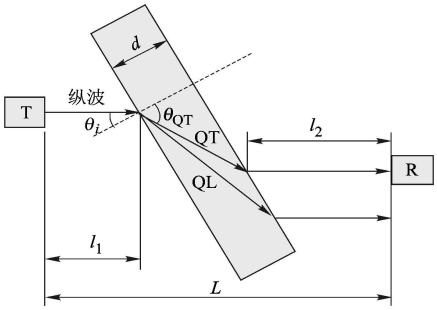


图 1 水浸斜入射法超声波在介质中传播时间的测量

象.

式(6)~(10)中的声速均指超声波在试样中传播的相速度,在 SiCp/Al中,超声波的频散现象非常微弱,因此可认为群速度近似等于相速度.

下面以 QT 波为例分析图 1中的传播过程,对于 QL波而言下列方程同样成立. 未放置试样时,声波由发射探头 T至接收探头 R之间的传播时间为

$$t_1 = L/V_w \tag{11}$$

式中, t_1表示声波的传播时间; L 表示接受探头与发射探头之间的垂直距离; V_w表示水中的声速.

放入试样后,声波从发射探头 T至接受探头 R之间的传播时间变为

$$t_2 = \frac{l_1 + l_2}{V_w} + \frac{d}{\cos\theta_{QT} \times V_{QT}} \tag{12}$$

式中, l_1为发射探头与试样间的距离; l_2为接收探头与试样的距离; d 为试样厚度; θ_{QT}为折射角; V_{QT}为准横波波速.

同时存在如下关系

$$L = l_1 + l_2 + d\cos(\theta_{QT} - \theta_i)/\cos\theta_{QT} \tag{13}$$

式中 θ_i为纵波入射角.

式(11)和式(12)相减后,再代入式(13),可得放置试样前后的超声波传播时间差为

$$\Delta t = \frac{d}{\cos\theta_{QT}}\left[\frac{\cos(\theta_{QT} - \theta_i)}{V_w} - \frac{Q}{V_{QT}}\right] \tag{14}$$

由 Snell法则可知

$$V_{QT} = V_w \sin\theta_{QT}/\sin\theta_i \tag{15}$$

将式(15)代入式(14),可得折射角 θ_{QT}:

$$\theta_{QT} = \arctan\left(\frac{\sin\theta_i}{\cos\theta_i - \Delta t V_w/d}\right) \tag{16}$$

再根据 Snell法则和式(16)可得

$$V_{QT} = \left(\frac{1}{V_w^2} - \frac{2\Delta t\cos\theta_i}{dV_w} + \frac{\Delta t^2}{d^2}\right)^{-1/2} \tag{17}$$

因此,通过测量未放置试样时发射探头和接收探头之间声波的传播时间及放入试样后以入射角为 θ_i时的声波传播时间,再结合其它可测参数,就可计算出 QT 波的声速. 在实际测量中,为了准确测量放置试样后声波斜入射时在两探头之间的传播时间,接收探头应位于实际的能流射出位置(与折射角 θ_{QT}有关),如图 1所示. 为测量出正确的 t_2值,将接收探头沿垂直于入射波的方向移动,当接收到的信号为极大值时测得的传播时间即为 t_2.

2 试验与结果分析

2.1 试验过程与方法

利用控制 SiCp含量的方法,在相同工艺下制造出 SiCp体积分数分别为 10%, 15%, 20%, 和 25%的铝基复合材料,然后加工成相同厚度和表面状态的试样,对应试样编号为 55, 51, 53, 52 如图 2所示.



图 2 不同 SiCp体积分数粉末铝基复合材料试样

声速测量系统结构见图 3,主要包括超声发射/接收仪、计算机、高速数据采集卡(采样频率 120MB/s)、四轴运动控制卡、三坐标扫描架、收发两用纵波直探头以及相关控制/扫描软件等.

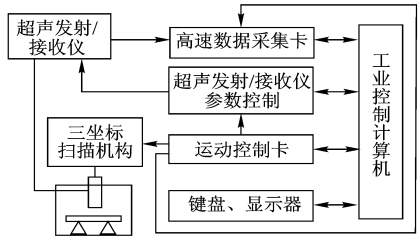


图 3 声速测量系统结构框图

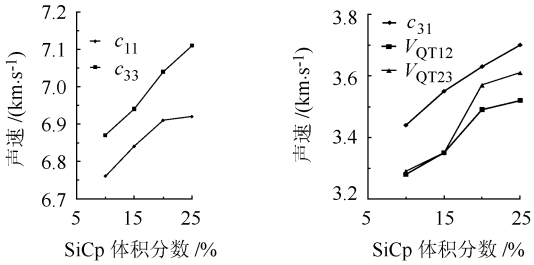
采用脉冲反射法测量试样中横波和纵波声速. 试样中准横波声速的测量需沿垂直于入射波的方向移动接收探头,当接收到的回波能量达到极大值时,所在的位置就是准横波能流的实际射出位置,此时声波从发射探头到达接收探头的时间即为 t_2.

2.2 试验结果与分析

声速测量结果见表 1,在同一传播方向和极化方向,声速值均随 SiCp含量的增加而升高,见图 4. 由于 z 轴为挤压方向,所受压力较大,材料较致密,SiCp浓度较高,因此沿 z 轴传播的超声波声速要大于沿 x 轴和 y 轴方向传播的声速.

表 1　SiCp/Al声速测量结果　km/s

声速	SiCp体积分数/%			
	10	15	20	25
c_{11}	6.76	6.84	6.91	6.92
c_{33}	6.87	6.94	7.04	7.11
c_{31}	3.44	3.55	3.63	3.70
V_{QT12}	3.28	3.35	3.49	3.52
V_{QT23}	3.29	3.35	3.57	3.61



a　c_{11}和 c_{33}声速曲线　　b　c_{31}, V_{QT12}和 V_{QT23}声速曲线

图 4　不同 SiCp体积分数试样的声速

由弹性常数矩阵 $\boldsymbol{C}$ 可得柔度矩阵 $\boldsymbol{S}$:

$$\boldsymbol{S} = \boldsymbol{C}^{-1} \tag{18}$$

不同方向上的杨氏模量可表示为

$$E_{ij} = 1/S_{ij} \qquad i, j = 1, 2, 3 \tag{19}$$

计算结果见表 2, 除 C_{12}和 C_{13}外, 其它参数变化趋势与声速的变化趋势基本一致, 说明材料的刚度随着 SiCp含量的升高而增大, 且 z 轴方向的刚度要大于 x 轴和 y 轴方向的刚度. C_{12}和 C_{13}的计算较复杂, 需求解高次方程, 且所需中间变量较多, 容易造成误差积累, 因而变化趋势不明显. 对同一试样而言, 各弹性常数之间的关系为: $C_{33} > C_{11} > C_{13} > C_{12} > C_{44} > C_{66}$, 说明挤压方向的刚度较高, 垂直于挤压方向刚度最低, 这与理论分析相符.

表 2　SiCp/Al弹性常数矩阵和杨氏模量测量结果 GPa

弹性常数和杨氏模量	SiCp体积分数/%			
	10	15	20	25
C_{11}	124	127	130	131
C_{33}	128	131	135	138
C_{44}	32.1	34.2	35.9	37.4
C_{12}	65.5	66.0	63.7	63.2
C_{13}	68.0	68.7	63.3	60.4
C_{66}	29.2	30.6	33.1	33.8
E_{11}	58.3	61.4	83.0	81.7
E_{33}	61.2	64.4	87.3	87.7

在弹性常数矩阵的计算结果中, 一些弹性常数没有显示出随 SiCp体积分数增加而升高的趋势, 这主要是因为: 试样存在一定的不均匀现象, 如图 5所示, 从声速 C 扫描图像中可看出各试样的 SiCp含量均存在一定程度的不均匀, 因此在不同位置测量的声速存在一定的差异, 影响了结果的准确性; 测量中存在误差, 而 C_{12}和 C_{13}等常量计算较复杂, 所需中间变量较多, 易造成误差累积.

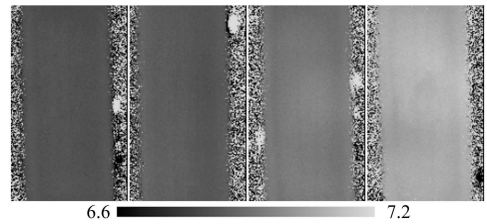


图 5　不同 SiCp体积分数试样的声速图像 (km/s)

3　结　论

利用弹性波测量法对横观各向同性的 SiCp/Al的弹性常数矩阵进行了无损测量. 根据 Christoffel方程建立了弹性波波速与弹性常数之间的关系, 通过测量波速求解了 SiCp/Al的弹性常数. 试验结果表明, SiCp/Al中 SiCp的体积分数与材料的机械性能密切相关, 随着 SiCp含量的升高, 弹性模量也随之升高, 材料的刚度变大; 此外, SiCp/Al具有明显的横观各向同性特征, 弹性常数和刚度沿挤压方向最大, 而垂直于挤压方向则最低, 因此, 在使用过程中应考虑材料的受力方向等问题. 在采用弹性波法测量材料弹性常数矩阵的过程中, 材料本身的不均匀性将影响测量结果的准确程度, 故在对 SiCp/Al进行无损评价时, 应首先对材料的缺陷进行扫查.

参考文献 (References)

[1] 罗斯 J L. 固体中的超声波 [M]. 何存富, 吴斌, 王秀彦译. 北京: 北京科学技术出版社, 2004
Rose J L. Ultrasonic waves in solid media[M]. Translated by He Cunfu, Wu Bin, Wang Xiuyan. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 2004 (in Chinese)

[2] 宋国荣, 何存富, 黄垚, 等. 小试件材料弹性常数超声测量方法的研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2007, 15(2): 226-234
Song Guorong, He Cunfu, Huang Yao, et al. On the measurement of the elastic constants of small-size samples by ultrasonic method[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2007, 15(2): 226-234 (in Chinese)

[3] 王盘鑫. 粉末冶金学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005: 131-142
Wang Panxin. Powder metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 131-142 (in Chinese)

[4] Jeong H, Hsu D K, Shannon R, et al. Characterization of anisotropic elastic constants of silicon carbide particulate reinforced aluminum metal matrix composites: part I: experiment[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1994, 25A: 799-809

[5] Burgholzer P, Hofer C, Reitinger B, et al. Non-contact determination of elastic moduli of continuous fiber reinforced metals[J]. Composites Science and Technology, 2005, 65: 301-306