基于 TIRP法的铝基复合材料均匀性检测

高翌飞 周正干 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: 为检测碳化硅颗粒增强铝基复合材料的均匀性,利用与厚度无关声反射板(TIRP, Thickness Independent Reflector Plate)法对材料声速进行成像,排除了材料厚度的影响,提高了检测精度.介绍了TIRP法的基本原理和试验系统的结构,提出了一种基于双次扫描方式的TIRP实时成像方法,进一步提高了精度.利用底面反射回波法、单次扫描TIRP法和双次扫描TIRP法进行了试验,并对成像结果进行了比较,能够看出基于双次扫描的TIRP法可获得更准确清晰的声速图像.最后对误差来源进行了分析,指出了改进的方向.

关 键 词: 超声声速测量; 金属基复合材料; "与厚度无关声反射板"法

中图分类号: TB 331

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2009)08-1031-04

Homogeneity testing of aluminum metal matrix composites by TIRP method

Gao Yifei Zhou Zhenggan

(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 evaluate the homogeneity of SiCp reinforced aluminum metal-matrix composites (MMC) fabricated by powder metallurgy, an ultrasonic velocity imaging was carried out with the method of thickness independent reflector plate (TIRP). Accuracy and precision were improved and the thickness was unnecessary in the velocity imaging with TIRP method. Firstly, the purpose of ultrasonic velocity imaging of MMC and basic principle of TIRP were introduced. Secondly, the structure of ultrasonic scan system was described. A double-scan method was applied to improve accuracy. Thirdly, the experiment results of ultrasonic velocity imaging of MMC specimen obtained with back surface echo (BSE), single-scan and double-scan method of TIRP respectively were compared and discussed. The images generated with double-scan method of TIRP have more details than those with BSE and single-scan method. Finally, the factors affecting accuracy and precision in the implementation were considered which may be used to advance the experiment.

Key words ultrasonic velocity measurement; metal-matrix composites; thickness independent reflector plate (TIRP)

碳化硅颗粒增强铝基复合材料(SiCp/Al)具有中等或高强度、较小的密度、较高的比强度和比刚度的特点,有较好的塑性、韧性及疲劳性能,可以部分代替航空和航天上使用的钛合金、钢等零件,实现减重和降低成本,具有较好的应用前景.

但是采用铸锭冶金法或粉末冶金工艺制备的SiCp/Al均有可能产生SiC颗粒分布不均匀等缺陷.传统的方法是利用金相,通过测定不同位置SiC颗粒的体积分数判断材料的均匀性[1-2],这种方法需破坏试样,操作复杂,且无法对试样进行整体扫描,易发生漏检.超声在SiCp增强体中的传播速度大于在铝合金基体中的传播速度,因此

收稿日期: 2008-06-20

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: 高翌飞(1978-),男,北京人,博士生, zzhenggan@buaa.edu.cn.

SiCp/Al中的超声声速大于纯铝合金,并且随着SiCp含量的增高,SiCp/Al的硬度和弹性模量也随之上升,材料中的声速也逐渐变大[3],因此在相同制造工艺下,通过对材料进行声速成像,根据图像的均匀性就可判断出SiC颗粒分布是否均匀.厚度无关声反射板法(TIRP, Thickness Independent Reflector Plate)是一种利用放置试样前后声反射板至探头之间回波的时间差来代替试样厚度进行声速计算的一种方法,因此无须测量试样厚度,对待测试样加工要求不高,可用于高精度的声速成像[4].

1 TIRP法原理

TIRP法是在回波反射法的基础上加入一块声反射板,反射板置于试样下方且与超声波入射方向垂直,如图1所示.在未放置试样时,声反射板上表面的界面回波到达探头的时间为$T_{W'}$,结合水中声速c,可得到探头至反射板间距为

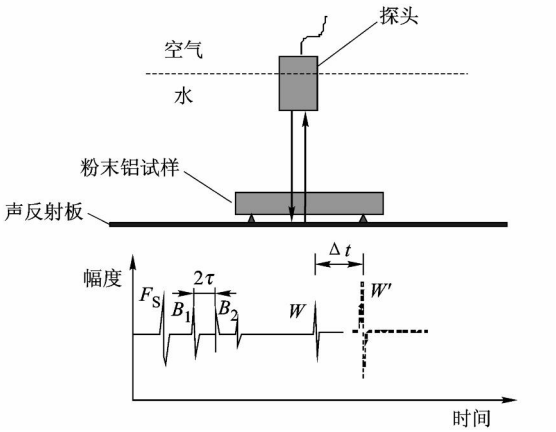
$$L = \frac{c \times T_{W'}}{2} \tag{1}$$

放入试样后,设试样厚度为d,试样中的超声声速为v,试样一次底波与二次底波间的时间差为2τ,则有

$$d = v\tau \tag{2}$$

同时,声反射板界面回波时间变为

$$T_W = \frac{2(L-d)}{c} + \frac{2d}{v} \tag{3}$$



F_S—试样上表面回波; B_1—试样第1次底波; B_2—试样第2次底波; W—有试样时声反射板界面回波; W'—无试样时声反射板界面回波.

图1 TIRP法声路原理图

将式(1)和式(2)代入式(3)消去L与d可得

$$v = c\left(\frac{\Delta t}{2\tau} + 1\right) \tag{4}$$

式中,v为材料纵波声速;c为水的声速;$\Delta t = T_{W'} - T_W$,为放置试样前后声反射板界面反射回波时间差;$2\tau = t_2 - t_1$,为试样底面第1次反射与第2次反射的时间差.

由式(4)可以看出,TIRP法中声速的测量只需获得水的声速、有无试样时声反射板前表面反射时间以及声波在试样中经过的时间,而试样厚度则由上述参数计算而得,无需事先测量并代入计算.

2 基于TIRP法的声速成像系统

根据TIRP法声速测量原理,采用类似C扫描的成像方式,对试样某一平面进行逐点扫描,即可获得试样垂直于扫描方向上的纵波声速.基于TIRP法的声速成像系统结构如图2所示,主要包括:泛美5800PR超声脉冲信号源;工控机;凌华PCI9820高速数据采集卡;泛美V309-SU水浸探头,频率为5MHz,焦距101.6mm.声反射板由钛合金制成,不锈且表面光洁,使用3个水平调节螺栓支撑,通过调节螺栓的高度即可调整声反射板平面的位置.

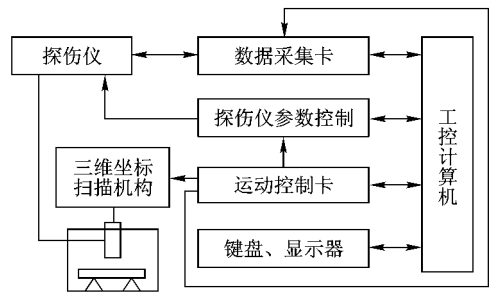


图2 基于TIRP法的超声扫描系统

TIRP法在计算声速过程中需首先测量未放置试样时探头至声反射板之间的超声传播时间,较常用的方法为调整声反射板的上表面,使其与探头的扫描平面平行,然后测量出探头位于某个位置的$T_{W'}$,并假设整个扫描过程中每点的$T_{W'}$均一致.这种方法可简化操作过程,提高测量速度,但由于驱动探头移动的丝杠存在弯曲、声反射板表面不平整等问题会导致误差,误差大小与系统设计及扫描的方式和位置等因素有关.为了提高精度,消除因机械结构带来的影响,利用双次扫描的方法,第1次扫描时逐点测量未放置试样时声反射板到探头的声程时间,第2次扫描时,将试样置于探头与反射板之间,扫描获得相关数据,综合利用2次扫描的数据对声速进行计算并成像.这种方法虽然效率较低,但是通过对每个检测位置$T_{W'}$的测量消除了因探头移动轨迹与声反射板平面不平行或声反射板不平整等因素造成的误差,

能够获得较高精度的声速图像, 更适合应用于 SiCp/Al均匀性的检测.

基于双次扫描的 TIRP法声速成像的流程如下:

1) 调整探头的移动轨迹平面与声反射板平面平行, 选取平行度较高的区域作为实验中实际使用的区域 (以下简称为"实验区");

2) 放入试样前, 对实验区进行第 1次扫描, 获得每个扫描点探头与声反射板之间的渡越时间 $T_{W'}$;

3) 将探头移至原点, 放入试样, 进行第 2次扫描, 计算时根据当前位置由第 1次扫描的结果中取出对应位置的 $T_{W'}$, 根据式 (4)代入当前测量出的 T_W、τ和 c即可求得材料的声速, 进行成像.

3　试验与结果分析

所用 SiCp/Al试样如图 3所示, 利用控制 SiCp含量的方法, 在相同工艺下人为地添加 10%, 15%, 20%, 25%, 30% 体积分数的 SiCp颗粒, 加工成相同厚度 (误差小于 0.1mm)和表面状态的试样.

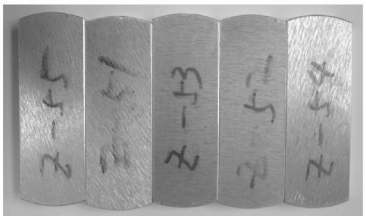


图 3　不同 SiC体积分数 (由左至右分别为: 10%, 15%, 20%, 25%, 30%) SiCp/Al试样

对 5块试样分别应用单次和双次 TIRP法进行成像, 扫描方向垂直于挤压方向. 使用温度计测量水温 T, 代入式 (5)即可求得水中的声速[5]:

$$c = 1402.9 + 4.835T - 0.047016T^2 + 0.00012725T^3 \quad (5)$$

实测水温为 18℃, 声速为 1475.44m/s.

在单次扫描法中, 使用扫描原点的 $T_{W'}$值作为探头至声反射板之间的渡越时间, 并假设各点均相同. 扫描得到的图像如图 4所示, 声速在 6700~ 7 200 m/s范围内逐渐变化, 随着试样中 SiCp含量的升高, 图像颜色逐渐变浅, 所代表的声速变大, 材料的硬度升高. 对应单一 SiCp含量的试样声速图像中的颜色存在深浅不一的现象, 这表明在试样内部存在不同程度的 SiCp分布不均匀的情况.

基于双次扫描的 TIRP法成像在第 1次扫描中可获得扫描区域每点的 $T_{W'}$值, 对这些 $T_{W'}$进行成像可反映出扫描平面与声反射板之间的距离变化. 扫描结果图像如图 5a所示, 存在明显的网格状图案, $T_{W'}$变化的范围为 147.8~ 148.5 μs. 将 $T_{W'}$的扫描结果作为参数进行第 2次扫描, 获得图像如图 5b所示, 颜色变化趋势与图 4相同, 但由于消除了 $T_{W'}$变化带来的影响, 因此图像颜色更加均匀.

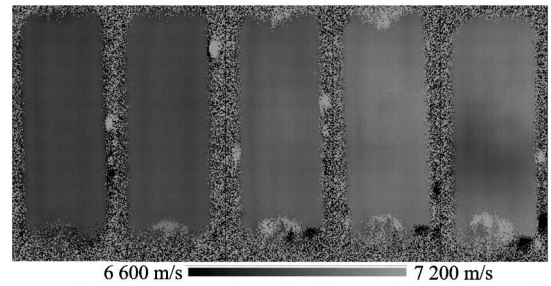
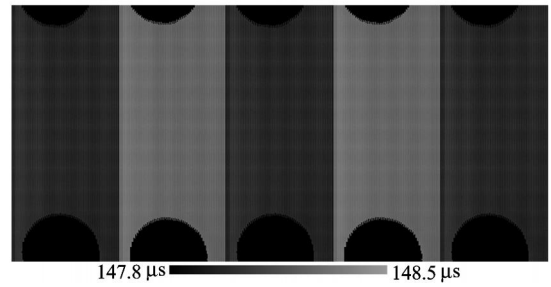
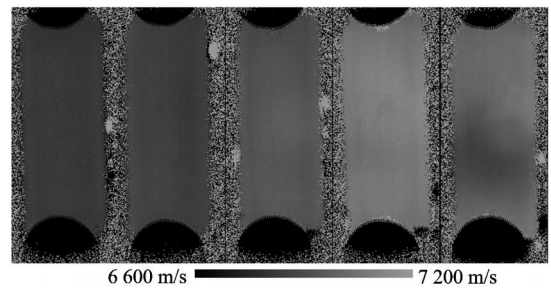


图 4　单次扫描 TIRP法声速 C扫描图像 (SiCp体积分数由左至右分别为: 10%, 15%, 20%, 25%, 30%)



a　未放置试样时探头至声反射板之间的渡越时间 $T_{W'}$图像

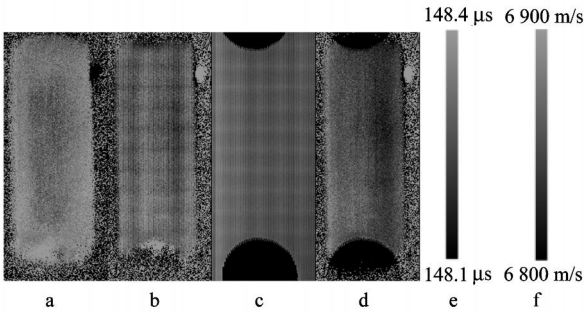


b　双次扫描 TIRP法声速图像

图 5　$T_{W'}$图像及双次扫描 TIRP法声速图像 (SiC体积分数由左至右分别为: 10%, 15%, 20%, 25%, 30%)

为更明显地观察单次扫描与双次扫描所获得声速图像的差异, 将 SiCp体积分数为 15% 的试样扫描数据缩小颜色映射范围后重新成像, 以显示出更多的细节. 图 6a为底面反射回波法 (BSE, Back Surface Echo)声速图像, 与 TIRP法相比, 由于受试样厚度变化的影响较大, 因此难以反映声速的细微变化, 图像颜色趋于一致, 并且由于 SiCp体积分数的变化和试样厚度的变化均可影响测量结果, 因此难以区分声速变化的根本原因.

图 6b为单次扫描 TIRP法声速图像,可以清晰地看到由于探头至声反射板之间的距离不固定而造成的网格状图案,直接影响到了测量的精度和成像的效果.图 6c所示 T_W 的扫描图案与图 6b中的网格状图案相对应,证明在成像时 T_W 对精度存在较大影响.图 6d为双次扫描 TIRP法声速图像,图像中无明显的网格状图案,且图像细节较丰富,由于在成像时通过参数替换降低了试样厚度变化的影响,因此可近似认为计算结果中的声速变化仅与 SiCp体积分数有关.



a—SiCp体积分数为 15% 的试样的 BSE声速图像; b—使用单次扫描法,设定 T_W 为 148.3μs获得的声速图像; c—T_W 扫描图像; d—使用基于双次扫描的 TIRP方法获得的声速图像; e—c对应调色板; f—a b和 d对应的调色板.

图 6 BSE、单次扫描 TIRP法及双次扫描 TIRP法声速图像

4 TIRP法声速成像误差分析

在 TIRP法中所需的计算参数包括超声在水中的传播速度 c,一次底面回波和二次底面回波的时间差 2τ及放置试样前后声反射板界面反射时间差 Δt.声速 c主要受水的纯净度和水温的影响,在试验过程中应使用纯净水,并根据水温来修正声速 c.2τ的影响因素主要有 3个[6]:试样厚度和位置影响,检测时底面回波可能与其它信号距离较近,若此时电子门设置不合理,同时覆盖多个回波信号,则可能造成峰值的误判;两次底面回波之间的时间差受峰值探测器类型的影响,选择峰值绝对值、正峰值或回波上升沿与电子门交点等不同类型的峰值探测器会得到不同的结果,必须根据回波形状等因素选择合适的峰值探测器以保证结果的准确性;噪声信号使回波信号产生变形,会导致误差.对于单次扫描方式下的 TIRP法而言,Δt的影响因素较多,其中主要包括:声反射板表面不平整;探头移动平面与声反射板平面不平行和驱动探头移动的丝杠存在弯曲等.基于双次扫描的 TIRP法在很大程度上消除了上述误差,但由于二次扫描的原点必须重合,因此受扫描机构重复定位精度的影响.

因此,提高 TIRP法成像精度可从以下几方面入手:利用高精度温度传感器测量水温或直接测定水中声速;改进扫描器机械结构设计,例如采用双导轨替代悬臂式设计,减少探头扫描时移动轨迹的变形等;提高声反射板的加工精度,降低反射面的粗糙度;试验时根据回波信号形状、噪声大小等因素,合理地设置电子门位置和选择峰值探测器类型.

5 结束语

作为一种新兴材料,SiCp/Al正被越来越广泛地应用于航空航天领域,对这种材料在关键应用中的无损检测需求也越来越迫切.利用双次扫描的 TIRP法声速成像对 SiCp/Al进行均匀性检测,无需破坏试样,操作简单,不受试样厚度参数的影响,适合于研制和生产中对毛坯件和成品的检测.试验结果表明,双次扫描的 TIRP法与 BSE法和单次扫描 TIRP法相比,获得的声速图像精度更高,细节更丰富,可更精确的反映出材料中 SiCp体积分数的变化.

参考文献 (References)

[1] Lemster K, Graule T, Minghetti T, et al. Mechanical and machining properties of X38CrMoV5-1/Al_2O_3 metal matrix composites and components[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 420(1/2): 296-305

[2] 魏勤,张迎元. SiCp/Al复合材料中增强体 SiC含量的测定方法研究[J].华东船舶工业学院学报:自然科学版, 2005, 19(4): 86-89
Wei Qin, Zhang Yingyuan. Research on volume fraction mensuration of SiC reinforcer in SiCp/Al composites[J]. Journal of East China Shipbuilding Institute: Natural Science Edition, 2005, 19(4): 86-89(in Chinese)

[3] Liaw P K. Determining material properties of metal-matrix composites by NDE[J]. JOM, 1992(10): 36-40

[4] Dong Fei, Hsu D K, Wardhol M. Simultaneous velocity thickness and profile imaging by ultrasonic scan[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2001, 20(3): 95-112

[5] 他得安,王威琪,余建国.松质骨中两种纵波的传播特性分析[J].中国生物医学工程学报, 2005, 24(1): 17-20
Ta Dean, Wang Weiqi, Yu Jianguo. Analysis of the propagation properties of two compressional waves in cancellous bone[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2005, 24(1): 17-20(in Chinese)

[6] Hsu D K. Simultaneous velocity and thickness imaging by ultrasonic scan[J]. QNDE, 2001, 20B: 695-702

(责任编辑:文丽芳)