

金属基复合材料超声无损检测 及评价技术的发展*

Development of Metal Matrix Composite Ultrasonic Non-destructive Testing and Evaluation Techniques

北京航空航天大学 周正干 高翌飞



周正干

博士,教授,博士生导师。主要研究方向为无损检测、信号处理及计算机测控技术等,发表论文 70 余篇。

金属基复合材料同时具有金属的性能(塑性和韧性)和陶瓷的优点(高强度和高刚度)^[1],如硼或碳化硅增强的铝或钛在性能上比基体材料均有明显的改善,除比强度、比刚度和工作温度提高外,还具有耐磨损、抗老化、不吸湿、不放气、尺寸稳定等特点,它在工业中的应用有利于提高

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

利用超声技术对金属基复合材料多种特征参数进行评价,操作较简便,设备要求不高,成本较低,且无须破坏试样,适合于实际的生产应用,对提高材料研制水平、缩短研制周期及提高制件的质量等方面具有重要的意义。

零件强度,减轻产品重量^[2]。从 20 世纪 60 年代开始,金属基复合材料就受到了广泛的关注,但由于制造工艺复杂,成本较高,它主要被应用于航空航天领域。

金属基复合材料通常采用铸锭冶金法或粉末冶金工艺制备,均有可能产生增强体分布不均匀等缺陷,从而导致材料的性能下降或性能分散度大。传统的方法是通过金相照片观察材料的组织结构与形态,从而确定材料是否包含缺陷,或采用力学性能试验机等仪器设备直接测量材料的机械性能。上述这些方法都必须破坏试样,甚至造成材料无法使用,且存在操作复杂,费时费力,检测区域受限等问题,严重限制了材料使用范围。因此,迫使人们开展金属基复合材料的无损检测和评价方法的

研究,以满足工程实际的需要。

金属基复合材料的 超声无损检测

超声波检测技术在金属基复合材料方面的应用主要分为 2 类:一是探测材料或构件中是否存在缺陷,并对缺陷的形状、大小、方位、取向、分布和内含物等情况进行判断,即超声无损检测(Ultrasonic Non-destructive Testing, UNDT);二是借鉴有损测试手段获得的信息,在材料的力学性能、微观结构与无损检测参量之间建立相关联系,进而对材料进行评价,即超声无损评价(Ultrasonic Non-destructive Evaluation, UNDE)^[3]。

由于 UNDT 操作简单,成本较低,对人体无害,已被广泛应用于金

属基复合材料的检测。UNDT 检测的缺陷对象除裂纹、内孔等普通缺陷外,还包括增强体偏聚等金属基复合材料特有的缺陷。利用聚焦探头进行超声 C 扫描,可以获得存在团聚、气孔等缺陷的分布图像。P. K. Liaw 在对粉末冶金工艺制造的 SiCp 增强 6013 铝合金(增强体体积百分比为 25%)坯料进行无损检测中,首先使用 5MHz 聚焦探头对试样进行了超声 C 扫描成像,从图像中可以清晰地辨认出 SiCp 的团聚,其中最小的团聚体直径为 1.6mm;然后利用扫描电镜观察了对应位置的微观结构形貌,验证了 C 扫描结果的正确性^[4]。K. Lemster 在研究 X38CrMoV5-1/Al₂O₃ 金属基复合材料的机械性能时



使用超声 C 扫描对材料内部的均匀性和裂纹进行了检测^[5]。国内魏勤等人利用超声 C 扫描对 SiCp/Al 试样进行了检测,可以清晰地看出材料中的团聚和孔洞^[6]。

金属基复合材料的超声无损评价是通过可测的声学参量,如声速、声衰减系数、回波频率等对材料的弹性常数、SiCp 体积百分比含量、孔隙率等特征进行测量,从而对材料的力学性能、成分或微观结构等方面做出评价。在对材料进行超声无损评价前通常会首先进行缺陷检测,以免夹杂、气孔等缺陷影响评价结果,因此 UNDT 是 UNDE 的基础,而 UNDE 是 UNDT 的延伸。由于 UNDE 可以从不同视角对被评价对象的固有属性、功能、状态、潜能及其趋势等做出完整、准确的评价和预测,因此成为目前无损检测技术研究的一个热点。

金属基复合材料的超声无损评价

在超声无损评价的研究中,最重要的步骤就是建立可测声学参量与材料特征参数之间的关系。针对金属基复合材料,研究的对象主要有弹性常数矩阵或弹性模量、增强体的体积百分比、孔隙率和增强体颗粒大小等。由于在评价中针对的材料特征不同,测量的声学参量不同,因此所使用的理论也不同,涉及的范围十分广泛。

1 弹性常数矩阵或弹性模量的测量

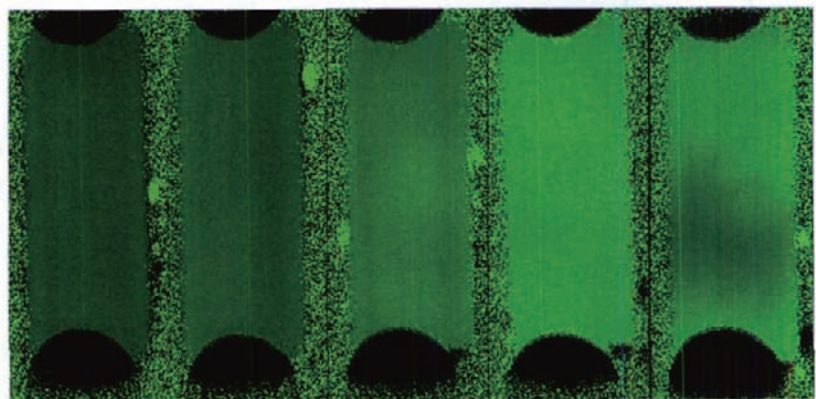
金属基复合材料中增强体颗粒或晶须在不同方向上的排列往往不同,因此它通常属于各向异性材料。Hyunjo Jeong 对金属基复合材料的微观结构进行了研究,通过扫描电镜观察了挤压面和另外 2 个平面的晶相图像,可以明显地看出增强体颗粒的形状、大小和排布在不同方向均存在差异,从而导致材料性能的各向异性^[7]。对于各向异性介质,确定弹性常数较为复杂,利用拉伸试验虽可测定某些弹性常数,但必须破坏试样,并且操作复杂,成本较高。为克服上述问题,常利用弹性波传播法来测量金属基复合材料的弹性常数矩阵或弹性模量。在弹性波传播法中,常利用体波波速求解弹性常数矩阵,而较少使用导波、次表面准纵波和表面波,其主要原因是使用导波、次表面准纵波和表面波时计算复杂,误差较

大。在体波波速的测量中,准横波和准纵波的测量方法主要有立体切割法和水浸斜入射法,其中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,虽然测量结果精确,但须破坏试样,且成本较高^[8]。而水浸斜入射法无须破坏试样,操作简单,且精度较高,因此应用更为广泛。

Hyunjo Jeong 等人深入研究了各向异性材料 SiCp/Al 的弹性常数测量方法,通过试验和计算得到了不同 SiCp 体积百分比含量试样的弹性常数,并根据 Eshelby 和 Mori-Tanaka 理论推导出了 SiCp/Al 中弹性常数矩阵的理论表达式,用数值计算的方法对不同 SiCp 体积百分比含量材料的弹性常数进行了预测,与实测数值较吻合^[9-10]。

P. K. Liaw 等人对粉末冶金制备的 SiCp/Al 进行了研究,根据加工工艺选择了正交各向异性作为材料的对称模型,从而确定在弹性常数矩阵中存在 9 个独立常数。通过测量材料不同方向的横波、纵波、准横波和准纵波的波速对弹性常数矩阵进行求解,进而得到了含有不同 SiCp 体积百分比的 SiCp/Al 的杨氏模量和剪切模量^[11-12]。

D. Ducret 等人对氧化铝纤维增强的铝基复合材料的弹性常数矩阵进行了测量。由于使用按一定方向排列的纤维作为增强体,材料表现出横观各向同性的性质,在弹性常数矩



6600 7200
SiCp/Al 均匀性检测图像
(由左至右 Si 含量分别为 10%、15%、20%、25%、30%)

阵中只有5个独立参数。分别利用体波和表面波对弹性常数矩阵中的不同参数进行了测量,同时研究了在水浸斜入射时入射角与准纵波波速之间的关系。最后采用拉伸试验验证了弹性波测量法结果的正确性^[13]。

李子金等人利用激光超声技术对 $Al_2O_3/f/SAE321$ 和 $SiCp/ZA-27$ 等材料中的纵波和横波声速进行了测量,计算出了材料的杨氏模量、剪切模量、泊松比和拉梅常数。结果表明,这2种复合材料的声速随着增强体的体积分数和颗粒大小而变化,并且还会受界面结构和冶金缺陷的影响^[14]。

P. Burgholzer等人利用激光超声技术对连续纤维增强的金属基复合材料的弹性常数进行了测量,并与其他测量方法获得的弹性模量进行了比较,证明了结果的正确性。运用激光超声这种非接触的测量方法可对产品进行在线质量控制^[15]。

国内姜传海等人采用超声声速

法,测量了不同晶须体积分数下压铸态 $SiCw/6061Al$ 的弹性模量,结果表明,复合材料中不同方向上的超声声速存在明显差异,晶须体积分数越高则超声声速越大,而且在不同方向超声声速的差异也越大^[16]。

2 增强体体积百分比测量

由于增强体含量对材料性能具有很大的影响,因而建立声学参量与增强体体积百分比之间的关系一直是研究的重点之一。

P. L. Rohatgi利用脉冲反射法对陶瓷颗粒增强的铝基复合材料的纵波声速进行了测量,得到了纵波声速与增强体体积分数之间的关系,进而求解出杨氏模量并与利用Hashin-Shtrikman公式计算出的理论值进行了比较,并在结论中指出超声检测可用于确定增强体颗粒的体积百分比^[17]。

D. F. Lee对 $SiCp$ 增强的8091、7064和6061铝合金进行了研究,结

果表明超声吸收系数随着 $SiCp$ 体积分数的升高而增大,并且对于不同的基体材料,增大的比率基本一致^[18]。

C. H. Gür研究了 $SiCp$ 增强铝基复合材料微观结构和超声声速的关系,用不同尺寸的粉末铝颗粒($180\mu m$ 、 $100\mu m$ 、 $25\mu m$)和 SiC 颗粒($10\mu m$ 、 $40\mu m$)组合制作试样,测量了各试样的横波和纵波波速,研究结果表明,声速随 SiC 颗粒体积分数的提高而增大^[19]。

J. H. Tweed以真空热挤压方式制备的2014/ SiC 和8090/ SiC 金属基复合材料为对象,对增强体体积分数为0%、20%、30%的材料进行了超声声速和超声衰减的测量。结果显示超声衰减在增强体体积含量在0%~20%之间逐渐升高,而在30%时回落^[20]。

国内魏勤和张迎元在试验中对 SiC 含量为5%、7%、9%和12%的4块6066型 $SiCp/Al$ 试样分别

英国品质 国产价格

深孔钻系统
 我公司为国内用户成功改造了近5000多台机床,解决了许多大型工件和复杂工件的深孔加工。
具有多项功能:
 钻孔直径: $\phi 3mm - \phi 52mm$
 钻孔深度: 可达钻头直径的30-210倍,无需中途退屑,最深可达3000mm
 高精度度: 公差通常在H8-H9之间
 直线度: 固定工件孔深的1/1000
 旋转工件孔深的1/2000
 粗糙度: 通常为0.5-3.0 μ RMS

英国哈曼深孔钻、枪钻、快速钻

WDF系列三坐标深孔钻机床
 WDF系列深孔钻机床,是哈曼公司最新开发的柔性组合深孔钻机床系列,采用组合式、模块化设计,可根据客户的不同需要进行组合,灵活组合成单坐标、二坐标或三坐标深孔钻机床,从而满足轴类、板类排孔和模具类坐标孔系的加工要求。

WDS/BQ 1200-CNC 大型落地式深孔钻床
 枪钻 $\phi 8 - \phi 32$
 BTA $\phi 16 - \phi 50$

WDI 系列深孔钻床 **WT-32U 台式工具磨** **重磨夹具**

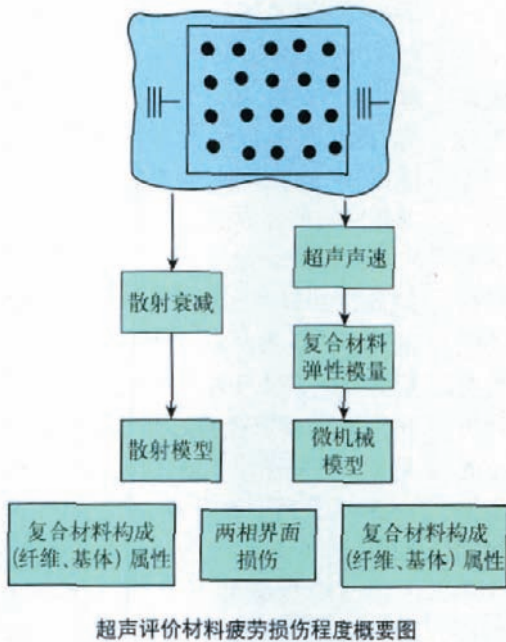
HAMMOND AND COMPANY 英国哈曼公司

北京哈曼深孔技术有限公司
 北京 Beijing Office
 北京市顺义区南彩祥东12号(哈曼工业园)
 电话: 010-5165 7833 (多线) 8947 7458
 传真: 010-5165 7833
 电子信箱: info@haman.cn

上海 Shanghai Office
 上海市江宁路1076号玉佛城5楼8座
 电话: 021-6299 1453
 传真: 021-6299 1452
 电子信箱: shanghai@haman.cn

广告索引号 09-072
www.haman.cn

在 1.25MHz、2.5MHz、5MHz 和 10MHz 4 种频率下进行了测试,研究了超声衰减系数与 SiCp/Al 中增强体 SiC 含量之间的关系,得到了相应的衰减系数表达式^[21]。



超声评价材料疲劳损伤程度概要图

3 其他方面的研究

D. F. Lee 对 SiCp/Al 中超声波的频散现象进行了研究,认为频散程度与波数和 SiCp 散射体大小的乘积有关^[22]。

Philip L. Blue 研究了在不同真空热压工艺下制备的 SiCw/Al 的孔隙率(密度)与横波和纵波波速之间的关系,可以看出当密度下降时声速也随之下落,并且纵波速度比横波速度对孔隙率的变化更为敏感。因此,可以通过测量试样不同位置的声速对加工工艺进行评估^[23]。

由于增强体颗粒的大小与分布情况对材料的机械性能影响明显,比较小的 Al/SiC 颗粒尺寸比可以使增强体的分布更均匀,从而提高材料的强度,因此基体与增强体尺寸比率也是影响材料性能的重要因素之一。C. H. Gür 对粉末冶金制备的铝基复合材料中 Al/SiC 颗粒尺寸比与纵波波速之间的关系进行了研究,结果表明在 SiCp 体积百分比含量较

低时, SiCp/Al 的尺寸比对声速影响不大,而当 SiCp 体积百分比含量较高时,尺寸比率越高,纵波波速的测量值与理论值的比率越低^[19]。

S. I. Rokhlin 研究了 SiC/Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn 在疲劳损伤过程中不同阶段的超声声速、回波信号的反射谱、超声衰减系数、弹性常数矩阵等参数的变化。研究表明,在疲劳损伤过程中,材料的性能不断下降,微观结构的变化导致超声声速等可测声学参量随之发生变化,因此可用超声检测方法对材料的疲劳损伤进行评价^[24]。

杨治国利用超声纵波波速对粉末冶金工艺制备的 SiCp/Al 的损伤程度进行了表征,利用损伤后试样的纵波波速和初始完好试样的纵波波速定义了损伤参数,可以看出当损伤程度加剧时损伤参数也逐渐变大,并且损伤试样的回波信号与完好试样的回波信号的相关系数逐渐减小^[25]。

P. N. Bindumadhavan 对 SiC 颗粒含量为 3%~15% 的铝合金 A356-SiCp 复合材料的脱粘系数与纵波波速之间的关系进行了研究。根据 Mackenzie 方程得到了脱粘系数与纵波波速之间的关系,使用 2MHz 频率的超声波进行了测量。结果表明,随着脱粘系数的降低,纵波波速逐渐变大^[26]。

存在的问题

经过多年的研究,金属基复合材料的超声无损评价技术获得了长足的进展,已被应用于实际的材料研制与生产中,但是,这种技术在许多方面仍有待进一步研究和完善。

(1) 由于金属基复合材料的制备方法多样,工艺复杂,因此在不同条件下生产的材料性能差异较大,所

建立的材料特征与可测声学参量之间的关系存在一定差异,因此不存在普遍适用性,这对建立统一的评价标准十分不利。

(2) 超声波在金属基复合材料中的传播理论还不完善,大多数学者的研究仍停留在利用试验建立相关的阶段,对于理论模型和预测研究较少;此外,在颗粒或纤维增强的金属基复合材料中,由于声波在基体和增强体界面发生的反射和折射以及不同方向声束之间的干涉,使得具体传播过程的数值计算和仿真过程非常复杂^[27],难以得到理想的结果。

(3) 受材料性能各向异性影响,测量过程复杂;为了对材料进行全面的超声无损评价,需经过多次测量才能得到结果,大大降低了检测效率。

展望

利用超声技术对金属基复合材料多种特征参数进行评价,操作较简便,设备要求不高,成本较低,且无须破坏试样,适合于实际的生产应用,对提高材料研制水平、缩短研制周期及提高制件的质量等具有重要意义。

美国等西方发达国家对金属基复合材料的研究和开发起步较早,针对这类材料的超声无损评价工作也开展的较为广泛,研究的热潮在 20 世纪末达到了顶峰,理论和技术相对比较成熟,近年来的研究集中在利用激光超声等新技术,结合现有的成果进行理论和应用研究。国内金属基复合材料的研究起步较晚,相关的无损检测和评价方法研究较少,涉及的内容单一,理论深度较浅,且缺乏系统化。随着此类材料的发展,市场需求广阔,相关领域的研究也必然会吸引更多国内学者的投入。

注:本文有参考文献 27 篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向编辑部索取。

(责编 金卯)