

复合材料孔隙率超声检测方法综述*

Ultrasonic Testing Method for Porosity in Composite

北京航空航天大学无损检测与机电工程研究所
南昌航空大学航空检测与评价航空科技重点实验室

周正干 黄凤英 魏 东



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。

孔隙是复合材料最常见的微小缺陷。孔隙的出现会降低材料的性能,如层间剪切强度、纵向和横向的弯曲强度和拉伸强度、抗疲劳性,以及高温下的抗氧化性能等。即使孔隙含量很小,也会对材料的寿命造成很大的影响^[1-4],因此对于复合材料

孔隙是复合材料最常见的微小缺陷。孔隙的出现会降低材料的性能,如层间剪切强度、纵向和横向的弯曲强度和拉伸强度、抗疲劳性,以及高温下的抗氧化性能等。

的性能保证来说,孔隙率的检测非常重要。目前比较常用的无损检测方法是超声波检测,国内外已对此种检测方法做了不少研究,并取得了一定的进展。

孔隙的形成及对材料的影响

由于复合材料加工工艺比较复杂,完全没有孔隙的复合材料是没有的。一般来说,空隙的形成有 2 种原因^[5]:一是制作过程中树脂未完全浸润或叠层间空气未完全排除,造成空气存留,这种原因形成的孔隙一般数量较多,形状为扁圆形或拉长形;二是工艺过程中产生挥发性物质,这时形成的孔隙一般呈圆形,孔隙数量较少,孔隙尺寸较小,直径为几微米到几百微米。评定孔隙对材料影响程度大小的定量指标是孔隙率,分面积孔隙率和体积孔隙率 2 种:面积孔隙

率是单位面积所含孔隙的面积百分比,体积孔隙率是单位体积所含孔隙的体积百分比。根据实际检测技术的不同采取不同的指标描述。

复合材料的机械性能对孔隙十分敏感。Almeida^[6]等人试验证明,即使孔隙的存在对材料的静态强度只有中等程度的影响,也可以使疲劳寿命显著下降。研究指出,孔隙率在 0~5%,每增加 1%,复合材料的层间剪切强度平均下降 7% 左右;弯曲强度以 10% 左右的比例下降,弯曲模量则以 5% 左右的比例下降。不过孔隙的存在并不是对材料都具有有害的影响,对大多数材料来说,2% 是一个可以接受的上限。

孔隙率超声检测方法

孔隙在材料中的分布、形状和大小很复杂,这就使得孔隙率的检测十

* 航空检测与评价技术重点实验室开放基金课题资助。

分困难。通常,复合材料孔隙率的无损检测方法分2类:超声检测法和射线检测法。由于超声波具有穿透能力强、方向性好、灵敏度高、对人体无害等优点,超声检测法是目前用于复合材料最通用的无损检测技术。当复合材料中含有孔隙缺陷时,超声波的衰减会很厉害,并影响超声波的传播速度,超声波的衰减会很厉害,因此孔隙率与超声波衰减量和速度存在一定的相关性。大多数超声检测方法都是通过建立超声特征参数变化与孔隙含量之间的关系来对复合材料孔隙含量进行评估的。另外,背散射和超声波导波也是目前复合材料孔隙率的新型检测方法。

传统超声波测量

1 超声波速度变化测量法

在 Stone 和 Clarke^[7] 等人所做的试验中,假设超声波入射前的速度是 2980m/s,试样厚度为 2mm 的碳纤维复合材料板,当试样无孔隙时超声波穿透时间为 1.342 μs;当试样孔隙率为 1% 时,超声波穿透时间为 1.359 μs。由于孔隙率不同而引起的超声波穿透时间变化为 17ns,大多数的测试仪器很难达到这种检测精度。另外,超声波的传播速度还受测试条件、环境的影响,所以,通过超声波速度的变化检测孔隙率的方法较少采用。目前,普通的孔隙率检测方法是通过对检测超声衰减量来判定复合材料的孔隙率。

2 超声波衰减量测量法

在孔隙率变化相同时,引起的超声波衰减量的测量相对速度变化而言较容易,采用超声波衰减反映复合材料内部的孔隙率也更为灵敏。下面几种方法主要从超声波的衰减与复合材料内部孔隙率的关系方面进行了研究。

(1) 时域分析法。

人们在进行试验研究的同时,也试图建立超声波在材料中传播的模

型,进而找出超声波的衰减量或传播速度的变化与孔隙率大小之间的关系,首先在时域中对孔隙率检测的超声波信号进行了分析。

Stone 和 Clarke^[7] 等人建立了超声波衰减与孔隙率的关系,他们认为超声波的衰减包括在前表面的损失、后表面的损失以及在复合材料内部的损失。由于孔隙率不同时孔隙的形状有所不同,他们的模型以孔隙率 1.5% 为界呈 2 个线性关系:

$$\alpha = a_1(f)V_v + b_1(f)V_v, V_v < 1.5\%;$$

$$\alpha = a_2(f)V_v + b_2(f)V_v, V_v > 1.5\%.$$

其中, α 是材料的超声衰减系数; a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 是频率的函数,对于给定的频率,它们是常数; V_v 是孔隙率。试验结果说明,双线性关系可以对试验数据进行更好的拟合。

另外, Martin^[8] 也建立了一种模型,该模型认为孔隙形状为球形,所有孔隙的半径都是相同的,且衰减率与半径的 4 次方成正比。该种模型误差较大,只在孔隙率小于 1.5% 时近似成立。

理论公式法虽然可以直接应用公式来建立超声波衰减与孔隙率的关系,但由于含有某种假定,公式中的常数并非试验得来,而是直接计算出来的,因此,当材料的特征未知或试验情况有变化时,这种方法计算出的结果误差较大。

(2) 频域分析法。

除了在时域内进行分析外, H. Jeong^[9]、K. Hsu^[10-11] 和 M. S. Hughes^[12] 等人在频域内对孔隙率引起的超声参数变化进行了分析。他们通过分析超声波的衰减和频率的一阶导数得到了超声波的衰减与孔隙率的关系:

$$\frac{d\alpha}{df} = k(s)V_v,$$

其中, k 是孔隙形状 s 的函数,又是材料的超声衰减系数, V_v 是孔隙率。

在频域分析法中,把超声波的衰减看作整个频带上对频率的函数,根

据衰减率对频率的导数确定材料中的孔隙率。由于材料中孔隙分布的不均匀性,为得出衰减率对频率的导数,往往需在多个位置进行测量,然后计算平均值。从试验结果来看,衰减率对频率的导数与孔隙率之间有良好的线性关系,而且随着孔隙率的增加,中心频率单调下降,中心频率的下降与孔隙率也存在线性关系。对于不同的材料,乘以不同的常数(由材料中孔隙的分布和材料决定)确定相应的线性系数。另外,他们还将速度的改变与孔隙率联系起来。应用他们建立的这种模型时首先用同种材料对公式中的常数进行标定,然后用公式来确定被测材料的孔隙率。由于模型能够由试验来标定,这种方法有较强的实用性。

(3) 法宇航的检测方法^[13]。

此方法的基本原理是:首先测量超声波在水中的衰减以及该材料的相关参数,然后利用测得数据确定复合材料的面积孔隙率。超声波的衰减主要由以下几个方面的原因:不同介质界面间的反射、材料本身及其他类型缺陷对超声波的吸收;由孔隙引起的超声衰减与孔隙面积有关,而与孔隙体积无关。只要事先测得该种材料表面处的衰减,及在无孔隙时复合材料一层引起的衰减,并且知道该材料的层数,在测出材料对超声波的总衰减后即可计算出其面积孔隙率。

该方法要求用不含孔隙的材料对每层材料的超声衰减系数进行测定,但由于不含孔隙的材料本身就难以制造,因此这种方法不易实现。

(4) 待定系数法。

待定系数法是将超声波的衰减看作 4 方面的综合效果:树脂对超声波的衰减 α_s , 碳纤维对超声波的衰减 α_f , 孔隙对超声波的衰减 α_v 和其他方面引起的衰减 α_o 。且假定这 4 项衰减各自独立,互不相干,则有

$$\alpha_t = \alpha_s + \alpha_f + \alpha_v + \alpha_o.$$

通过建立以上模型,并考虑不同大小孔隙率对衰减的影响,同时引入“等效分布孔隙率”,将其他缺陷引起的衰减折算成孔隙率引起的衰减。

浙江大学的宋立军^[13]和周晓军^[14]等采用了时域中的待定系数法对碳纤维复合材料孔隙率检测进行了试验研究。他们首先用超声波检测系统测出复合材料板各处的超声衰减系数,然后利用破坏性试验得出相应位置的孔隙率。根据已得到的数据可以求出上述公式中的系数,然后以此公式来对同一批复合材料进行孔隙率的检测,检测结果比较不错。

3 偏振背反射法

医学领域超声研究表明,超声背反射信号比超声传播速度和宽带超声衰减能够更好地表示骨质情况^[15]。同样的研究也用在复合材料孔隙率检测中。人们做了很多工作研究背反射与孔隙率的关系,验证说明超声波背反射对纤维增强复合材料中的孔隙率比较敏感。

J.Qu 和 J.D.Achenbach^[16]对多重纤维增强材料中的孔隙率与背反射的关系进行了研究。研究表明,孔隙率越高,背反射越高。在复合材料方位角为 45°的倍数时,信号的背反射幅度对数值有很剧烈的变化。

R. A. Roberts^[17]等人在前人研究的基础上,把极角背反射检测孔隙率的方法推广到多方向纤维增强叠层

复合材料的孔隙率检测中。通过各方位角的背反射扫描得出结论,在较大极角和较低频率的条件下,孔隙率的分辨率情况最好。超声背反射方法一般把探头固定在某一极角上,让浸在水中的复合材料试样沿着一定的方位角旋转,通过单探头或双探头接收信号,改变方位角,从而获得试样全部方向的背反射信号,如图 1 所示。

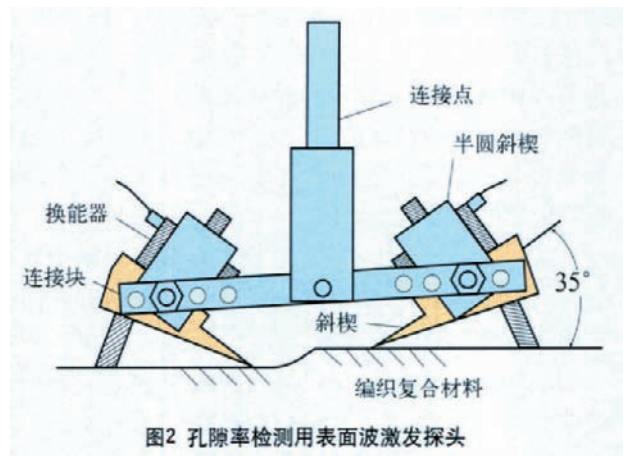
导波测量法

对于复杂的构件,由于结构表面形状的复杂性,传统超声波测量方法不再有效。而由于导波测量法衰减量低、与厚度无关,可以用来处理复杂外形构件的孔隙率检测问题。

对于表面曲率突变或不平整的工件,典型的加工过程为:使用数控机床把预浸料坯切成薄片,然后以特定的顺序叠在一起,在高压锅里冷却,并在可控的温度压力周期下使用真空包排出里面可能的空气和挥发气体。加工过程中温度压力周期的变化导致复合材料中孔隙的出现,特别在次表面区域孔隙率较高。所以,采用导波测量法的一种——表面波测量可对次表面的孔隙率进行检测。

文献 [18] 详细介绍了采用表面波测量复杂结构孔隙率的方法。建立并分析了孔隙模型,对复杂构件的表面波边界条件也作了详细的讨论,并通过试验数据验证得到了重要结论:在石墨环氧织物互相垂直的方向上,表面波的速度和

频散在没有孔隙的结构中和在有孔隙的结构中明显不同。相对于没有孔隙的结构,在有孔隙的结构中传播的表面波速度和频散要大一些。此外,这里所用的表面波探头也与常规的表面波探头不同。针对复杂的构件,设计了一种特殊的线源斜楔换能器,通过一种中间块的作用,换能器可与结构表面很好地耦合,并在复合材料中产生表面波。其结构见图 2。



结束语

上述几种复合材料孔隙率检测方法各有优势,根据孔隙模型和材料的假设条件不同,每种方法都有各自的适用范围。但是到目前为止,还没有一种方法可以对纤维增强复合材料孔隙率进行在线检测。基于超声波衰减量和背散射测量的检测方法很有发展前景,但必须仔细考虑到:第一,孔隙率测量需详细研究气孔的结构,建立比较合适的数学模型;第二,理想的检测方法应该独立于树脂基体结构和纤维层结构。另外,随着计算机技术和信号处理技术的发展,由于超声导波技术具有较高的检测效率,越来越受到无损检测界的关注,有很大的发展潜力。

本文有参考文献 18 篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 小颖)

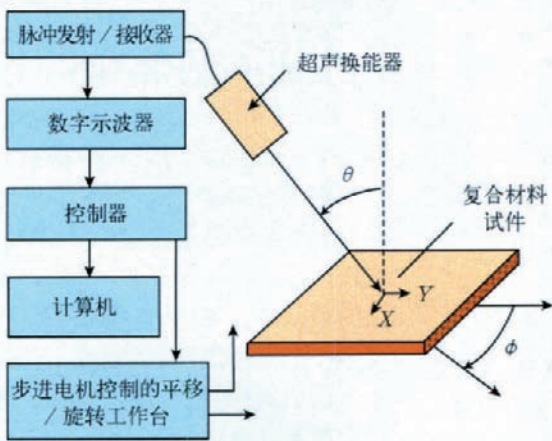


图1 R. A. Roberts使用的背反射试验装置示意图