doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.050

变厚度碳纤维复合材料孔隙率超声衰减模型*

李　钊[1]　周晓军[1]　杨辰龙[1]　王建龙[1]　徐建勇[1]　郑慧峰[2]

(1.浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室, 杭州 310027; 2.中国计量学院计量测试工程学院, 杭州 310018)

摘要: 根据超声波透射法检测原理,在一定的假设基础上,针对层数不同的层板碳纤维复合材料,建立了孔隙率与材料层数、超声衰减量的关系模型,利用 5 组不同层数样本试块的孔隙率和超声衰减量的试验数据,给出了基于模型的孔隙率拟合公式。分析和试验结果表明,拟合公式具有一定的精度,满足工程检测的要求。该模型可用于检测同批次下不同层数复合材料的孔隙率,且不需要制备大量的试验样本,既方便快捷又节约成本。在此基础上,对模型进行了修正,建立了变厚度层板复合材料孔隙率与材料厚度、超声衰减的关系模型,并对模型进行了讨论,该模型适合于大曲率半径结构件。

关键词: 碳纤维复合材料　孔隙率　变厚度　超声衰减

中图分类号: TB553; TP391　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2014)07-0325-08

引言

孔隙是碳纤维增强型复合材料(CFRP)最为重要的缺陷之一,其大小直接影响着复合材料的强度和刚度[1-2],因此对孔隙率的检测成为人们关注和研究的热点。国内外学者大都针对特定层数试块,采用超声反射或透射法,建立基于该试块的孔隙率与超声衰减的相关模型,而后对其进行孔隙率检测,进而对模型进行试验拟合和验证[3-9]。

然而实际中,由于样本试块数量和种类有限,因而只能对某些特定厚度和层数下的材料进行孔隙率和超声衰减量的评估,如需要对其它厚度的材料进行分析,则需要制备相应厚度的样本试块,进行测量并计算关系曲线,这无疑会带来不便和相应的经济损失。特别是对于变厚度复合材料,若要制备各种厚度的样本试块,更是不可能的。

针对这个问题,本文根据某飞机制造公司提供的试验数据,建立等厚度(与变厚度相对应,即对某一试块其厚度相同,而不同试块由于层数不同厚度可以不同)层板孔隙率、材料层数和超声衰减量之间的关系模型,拟合出相应的关系曲线,从而可以对相同生产条件下各种层数的复合材料进行孔隙率计算。实际中对同批次材料,只需测量出某层数下的超声衰减率即可,而无需针对该层数材料制造样本试块并进行相应的检测和拟合。在此基础上,对该模型进行扩展和修正,推出变厚度复合材料孔隙率、材料厚度和超声衰减量的关系模型,进而可以将该方法推广到变厚度复合材料的孔隙率检测中。

1　试验数据和方法

试验采用超声透射法,试验装备如图 1 所示,左右两侧机器臂上分别装有发射探头和接收探头,探头频率均为 5 MHz,试验中以水为耦合剂,通过探头旁边的喷水装置实现自动喷水。

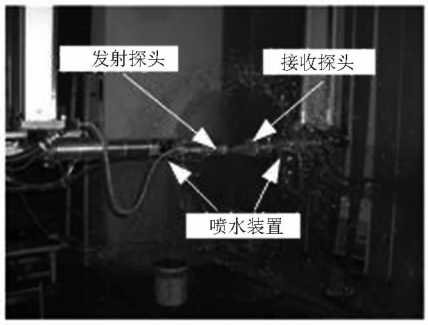

图 1　试验装置

Fig. 1　Test equipment

试验对 5 组碳纤维层板样本标准试块进行检测,该试块由某飞机制造公司提供,并由波音公司进行了孔隙率精确标定,且该公司实际复合材料的生产均按此孔隙率检测标准进行。试块分别为 8 层、

收稿日期: 2013-06-20　修回日期: 2013-08-02

*国家自然科学基金资助项目(51075358)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(201001011200155)、浙江省"仪器科学与技术"重中之重学科开放基金资助项目(JL130012)和浙江省自然科学基金资助项目(LY14E050013)

作者简介: 李钊,博士生,主要从事信号处理和无损检测研究, E-mail: lizhaoaza@163.com

通讯作者: 周晓军,教授,博士生导师,主要从事检测和信号处理研究,E-mail: cmeesky@163.com

16 层、24 层、32 层和 40 层,其中 8 层样本的孔隙率分别为 0%、0.91%、2.36%、3.11%、5.11%,16 层样本的孔隙率分别为 0%、0.98%、2.46%、3.54%、7.74%,24 层样本的孔隙率分别为 0%、0.95%、2.21%、3.73%,32 层样本的孔隙率分别为 0%、1.13%、1.74%、3.93%、4.21%,40 层样本的孔隙率分别为 0%、1.56%、2.30%、3.48%、5.57%,试块除孔隙外没有别的人工缺陷和自然缺陷。

试验分别对每个试块在不同位置随机测量 10 个点的超声衰减值,以透射波波幅达到 80% 波高时的增益分贝值作为测量指标,而后取 10 个测量值的算术平均值,以此来衡量该试块的超声衰减量。

2 等厚度 CFRP 孔隙率建模

2.1 模型假设

(1) 建模对象为同一批次复合材料,制造工艺和流程大致相同,材料结构也大致相同。

(2) 除孔隙外没有别的人工缺陷和自然缺陷。

(3) 每层复合材料厚度大致相同,且每层中纤维和树脂分布均匀。

(4) 采用同一超声探头,或采用性能参数(频率、声压等)相同的超声探头进行测量,检测人员检测水平大致相同。

(5) 每次测量时,入射探头距入射面以及接收探头距透射面的距离都保持一致。

2.2 孔隙率为零时超声波衰减模型

图 2 中 p_0 为发射探头的发射声压,p_1 为接收探头接收到的声压,对于同一个超声波发射探头或同型号探头 p_0 为定值,设超声波在入射面和透射面的衰减系数分别为 r_1 和 r_2,材料层间的衰减系数为 r_3,每层材料的衰减系数为 r_4。对于层数为 n 的复合材料,在孔隙率为零时,超声波衰减率 $\alpha_1(n)$ 可表示成

$$\alpha_1(n)=\frac{p_1}{p_0}=r_1r_2r_3^{n-1}r_4^n \tag{1}$$

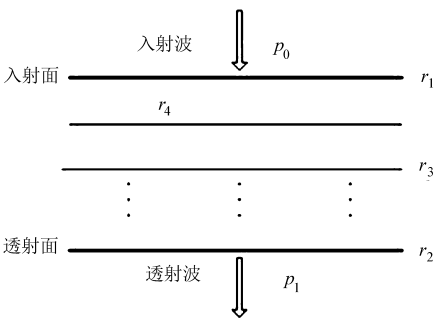

图 2 层板超声衰减模型

Fig. 2 Ultrasonic attenuation model of laminates

由于所采用的数据为透射波声压达到 80% 波高时的增益分贝值,因而假设 80% 波高时的声压为 $p_{80\%}$,对于同一系统的同批次采集过程,$p_{80\%}$ 为定值,从而可得

$$p_{80\%}=f_0(n)p_1 \tag{2}$$

式中 $f_0(n)$——孔隙率为零、层数为 n 的复合材料透射波波幅达到 80% 波高时的增益

对应的增益分贝值为 $F_0(n)=20\lg f_0(n)$。

将式(2)代入式(1)可得

$$\frac{1}{f_0(n)}=\frac{p_0}{p_{80\%}}\alpha_1(n)=u_1u_2^{n-1} \tag{3}$$

其中 $u_1=\dfrac{p_0}{p_{80\%}}r_1r_2r_4 \quad u_2=r_3r_4$

对于同一批次、同一采集过程的材料 u_1 和 u_2 可视为定值,对上式两边取对数,并用 $F_0(n)$ 代替 $f_0(n)$,可得

$$F_0(n)=-20\lg u_1-20(n-1)\lg u_2 \tag{4}$$

令 $a_1=-20n\lg u_2$,$b_1=-20\lg u_1+20\lg u_2$,则式(4)可化简为

$$F_0(n)=a_1n+b_1 \tag{5}$$

从式(5)可以看出,孔隙率为零时,透射波幅值到达 80% 波高时的增益分贝值与复合材料层数 n 呈线性关系,提取孔隙率为零时的不同层数增益分贝值,如表 1 所示。

表 1 孔隙率为零时不同层数衰减增益

Tab. 1 Attenuation gains of various laminates at porosity 0 dB

层数	8	16	24	32	40
$F_0(n)$	38.83	43.05	44.40	46.85	50.40

对表 1 中数据按式(5)进行拟合,即可得到层数与增益的关系式,为了验证模型的精度,拟合时分别只采用其中的某 4 组数据,然后用剩余的一组数据进行验证,拟合结果如表 2 所示,其中最后一行为采用所有数据进行拟合的结果,均方根误差只采用拟合的数据进行计算,验证数据不计算在内。

由表中数据可知,模型具有很高的精度,用所给数据进行验证最大误差(除 16 层数据)只有实际值的 3.4%,而均方根误差都小于 1,采用除 24 层数据拟合出的参数更接近采用所有数据拟合出的参数,且误差相对较小。前 5 组数据只是为了方便验证模型的精度,综合考虑,选取采用所有数据拟合的结果,即 $a_1=0.337$,$b_1=36.624$,于是可得到 $F_0(n)$ 以及 $f_0(n)$ 的表达式

$$F_0(n)=0.337n+36.624 \tag{6}$$

$$f_0(n)=10^{0.017n+1.831} \tag{7}$$

由式(6)即可计算出孔隙率为零时,其它层数

表 2　孔隙率为零时拟合结果及误差分析

Tab. 2　Fitting results and error analysis when the porosity is 0

拟合数据组	a_1	b_1	验证数据	$F_0(n)$/dB		误差/dB	均方根误差
				计算值	实际值		
除 8 层数据	0.306	37.600	$n=8$	40.05	38.83	1.22	0.55
除 16 层数据	0.355	35.883	$n=16$	41.57	43.05	−1.48	0.26
除 24 层数据	0.337	36.701	$n=24$	44.78	44.40	0.38	0.65
除 32 层数据	0.347	36.545	$n=32$	47.64	46.85	0.79	0.59
除 40 层数据	0.318	36.930	$n=40$	49.64	50.40	−0.76	0.63
所有数据	0.337	36.624					0.60

复合材料透射波幅值达到 80% 波高时的增益分贝值，该式反映材料除孔隙率外其它因素引起的超声信号的衰减。

2.3　孔隙率不为零时超声波衰减模型

当复合材料内部存在孔隙时，超声波在传播过程中遇到孔隙会发生反射和散射，定义孔隙率为 P_s，孔隙率对超声波的衰减关系为 $\varphi(P_s)$，由于孔隙的影响，对于每层复合材料，超声波的衰减与孔隙率之间存在关系

$$\alpha'(n)=\frac{1}{\varphi(P_s)} \tag{8}$$

式中　$\alpha'(n)$——超声波入射后幅值与入射前幅值的比值

由孔隙率造成的衰减越大，该比值越小，因而式中取倒数关系。对于层数为 n 的复合材料，由孔隙引起的衰减 $\alpha_2(n)$ 为

$$\alpha_2(n)=\left[\frac{1}{\varphi(P_s)}\right]^n \tag{9}$$

综合 2.2 节无孔隙时的模型，对于层数为 n、孔隙率为 P_s 的复合材料，超声波衰减系数 $\alpha(n)$ 为

$$\alpha(n)=\alpha_1(n)\alpha_2(n)=r_1r_2r_3^{n-1}r_4^n[\varphi(P_s)]^{-n} \tag{10}$$

设 $f_{P_s}(n)$ 为层数为 n、孔隙率为 P_s 的复合材料透射波波幅达到 80% 波高时的增益，$F_{P_s}(n)$ 为相应的增益分贝值，由 2.2 节的相似推导可得

$$\frac{f_{P_s}(n)}{f_0(n)}=[\varphi(P_s)]^n \tag{11}$$

$$\varphi(P_s)=10^{[F_{P_s}(n)-F_0(n)]/(20n)} \tag{12}$$

为了得到 $\varphi(P_s)$ 的表达式，将实验数据代入到式(12)中，所得结果如表 3 所示。

随着孔隙率的不同，孔隙的平均长度、宽度和平均面积也发生变化。文献[8]指出，对于层板复合材料，孔隙的几何尺寸与孔隙率呈近似对数正态分布关系，文献[9]还发现，孔隙的几何尺寸与超声衰减系数呈近似线性关系。

表 3　不同层数材料孔隙率及超声衰减率

Tab. 3　Porosity and attenuation rate of various laminates

8 层		16 层		24 层		32 层		40 层	
P_s/%	$\varphi(P_s)$	P_s/%	$\varphi(P_s)$	P_s/%	$\varphi(P_s)$	P_s/%	$\varphi(P_s)$	P_s/%	$\varphi(P_s)$
0.00	1.000 0	0.00	1.000 0	0.00	1.000 0	0.00	1.000 0	0.00	1.000 0
0.91	1.037 2	0.98	1.022 2	0.95	1.025 4	1.13	1.031 3	1.56	1.037 9
2.36	1.061 4	2.46	1.075 1	2.21	1.062 1	1.74	1.051 7	2.30	1.050 0
3.11	1.116 2	3.54	1.101 8	3.73	1.114 5	3.93	1.135 2	3.48	1.078 9
5.11	1.214 8	7.74	1.285 6			4.21	1.141 0	5.57	1.137 9

综合孔隙形态及孔隙分布的影响，国内外学者对孔隙率与超声波衰减的关系做了大量研究，推出了各种形式的复杂模型，考虑到同批次下生产和检测的复合材料，其超声检测频率、纤维直径以及相关的声学系数等均可视为定值，因而可以应用一些现有的经验公式进行拟合，若以孔隙率为变量，这些公式主要分为一次型[5]、二次型[4,6]和三次型[3]。文献[3]指出，相对于二次型拟合，三次型拟合精度只是略有提高，但完全可由二次拟合公式代替，且三次型计算量较大，因此对表 3 数据分别进行一次型拟合和二次型拟合，拟合结果如图 3 所示。

其中线性拟合结果为 $\varphi_1(P_s)$，抛物线拟合结果为 $\varphi_2(P_s)$，经拟合计算表达式为

$$\varphi_1(P_s)=3.635P_s+0.985 \tag{13}$$

$$\varphi_2(P_s)=14.4P_s^2+2.531\,7P_s+1.000\,3 \tag{14}$$

将式(13)和式(14)分别代入式(12)，可求解出线性拟合时的孔隙率 P_{s1} 和抛物型拟合时的孔隙率 P_{s2} 的表达式

$$P_{s1}=\frac{P_m-0.985}{3.635} \tag{15}$$

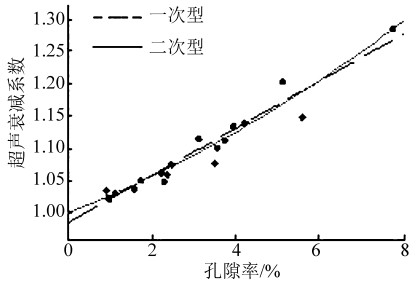

图 3 孔隙率与超声衰减系数拟合曲线

Fig. 3 Curves between porosity and attenuation rate

$$P_{s2}=\frac{\sqrt{2.531\,7^2-57.6(1.000\,3-P_m)}-2.531\,7}{28.8} \tag{16}$$

其中 $P_m=10^{[F_{P_s}(n)-F_0(n)]/(20n)}$,由于 $P_s>0$,故求解 P_{s2} 时略去负根。

将试验数据分别代入式(15)和式(16)进行计算,并将计算结果与试验值进行对比,所得结果如表 4 所示。

表 4 不同层数孔隙率及拟合误差

Tab. 4 Porosity and fitting error of various laminates

层数	实际值/%	一次型计算值/%	相对误差/%	二次型计算值/%	相对误差/%
8	0.91	1.05	15.38	0.98	7.69
	2.36	2.11	10.59	2.15	8.90
	3.11	3.62	16.40	3.77	21.22
	5.11	6.33	23.87	6.25	22.31
16	0.98	1.03	5.10	0.83	15.31
	2.46	2.49	1.22	2.58	4.88
	3.54	3.22	9.04	3.36	5.08
	7.74	8.28	6.98	7.80	0.78
24	0.95	1.12	17.90	0.94	1.05
	2.21	2.13	3.62	2.17	1.81
	3.73	3.57	4.29	3.72	0.27
32	1.13	1.28	13.27	1.15	1.77
	1.74	1.84	5.75	1.84	5.75
	3.93	4.14	5.34	4.28	8.91
	4.21	4.30	2.14	4.44	5.46
40	1.56	1.47	5.77	1.38	11.54
	2.30	1.80	21.74	1.83	20.43
	3.48	2.59	19.83	2.69	16.95
	5.57	4.28	23.16	4.36	21.72
均值			11.13		9.57
标准差			7.54		7.78

从表中可以看出,对于大部分拟合数据,相对误差均在 10% 以内,二次型拟合的精度略高于一次型,对于二次型最大相对误差为 22.31%,且出现在孔隙率为 5.11% 处,对于绝大多数场合,孔隙率大于 5% 的材料已属于报废品,若除去孔隙率超过 5% 的数据,则拟合精度将进一步提高。对于主承力结构件,孔隙率不大于 2%,若获取该类型试块试验数据,则精度将会更高。

当需要对孔隙率进行数值分析时,一般要求孔隙率不超过 4.5%,当取上述最大误差时,孔隙率误差约为 1%,因此上述精度可以达到一般工程分析的要求[3],因而模型可以用来计算同批次下不同层数材料的孔隙率值,实际只需测出该层数试块透射波波幅达到 80% 波高时的增益 $F_{P_s}(n)$,由式(6)计算出孔隙率为零时的增益 $F_0(n)$,而后一起代入式(16)计算即可。

2.4 试验验证

试验采用该公司提供的同批次的两个普通试块,试块层数分别为 16 层和 32 层,试块孔隙率未知。超声检测方法与标准试块检测时相同,采用 5 MHz超声发射和接收探头,并采用水浸法进行超声透射试验。经试验检测,16 层试块的超声平均衰减增益为 54.82 dB,32 层试块的平均衰减增益为 58.13 dB。将试块层数和衰减增益代入式(15)和式(16)进行计算,分别求出采用一次拟合和二次拟合时的孔隙率值,16 层试块孔隙率计算结果为 3.03% 和 3.17%,32 层试块孔隙率计算结果为 1.47% 和 1.40%。

对两个试块进行金相试验,在 NK-5000 型倒置金相显微镜下进行观察拍照,并采用 NK-100 专业金相分析软件,参照文献[10]进行孔隙率统计计算。图 4 和图 5 分别为 16 层试块和 32 层试块中的典型孔隙形态。观察发现,16 层试块中层间孔隙多呈扁平状,而 32 层孔隙以小的圆形孔隙为主。经统计计算,16 层试块孔隙率为 2.95%,32 层试块孔隙率为 1.44%,孔隙形态与孔隙率符合文献[8]中的统计规律。

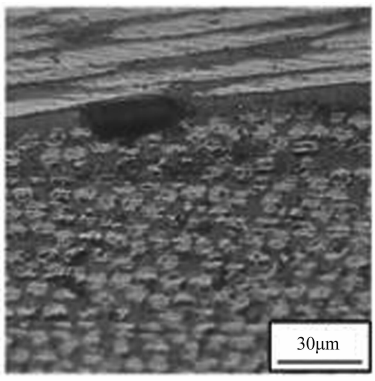

图 4 16 层试块中的孔隙

Fig. 4 Voids in 16 layer laminate sample

将金相试验得到的孔隙率值与模型计算值进行比较,对于 16 层试块,一次拟合时偏差为 2.71%,二次拟合时的偏差为 7.46%;对于 32 层试块,一次

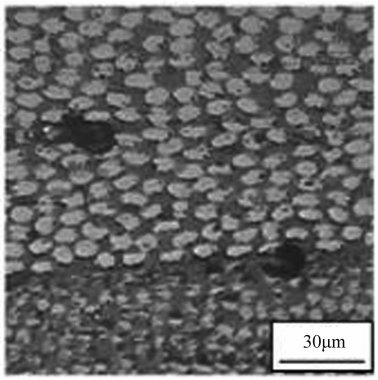

图 5　32 层试块中的孔隙

Fig. 5　Voids in 32 layer laminate sample

拟合时偏差为 2.04%，二次拟合时的偏差为 2.9%。结果表明，模型具有很高的精度，从而验证了该模型的可行性。

3　变厚度 CFRP 孔隙率建模

3.1　模型假设

变厚度 CFRP 孔隙率模型是在等厚度模型基础上建立起来的，因而等厚度模型中的假设在此处同样成立，此外为了建立变厚度模型还需做如下假设：

（1）超声波斜入射时，超声波在层与层间的折射忽略不计，只计算超声波在材料表面的折射。

（2）接收探头方向与声束一致，且与透射面的距离保持一致，该假设可通过调节机械手的位姿或人工操作实现[11-12]。

3.2　孔隙率为零时超声衰减模型

3.2.1　变厚度复合材料模型

在变厚度复合材料中，材料的厚度可连续变化，而非一层一层的变化，因而需要对 2.2 节中的模型进行修正。

以二维情况为例，如图 6 所示，设变量 H 表示复合材料某处的厚度，$H=H(x)$ 为材料表面形态函数或厚度变化函数，工程中对于大型复合材料生产制造前 $H(x)$ 为已知的，x 为材料长度方向上的坐标，n_x 为材料在 x 处存在的完整的层数，h_x 为该处除 n_x 层厚度外的剩余厚度，H_n 为 n 层完整复合材料厚度，H_n 可通过对 n 层数的复合材料进行测量得到，h 为一个完整层的厚度，从而有

$$h=\frac{\frac{H_8}{8}+\frac{H_{16}}{16}+\frac{H_{24}}{24}+\frac{H_{32}}{32}+\frac{H_{40}}{40}}{5} \tag{17}$$

$$n_x=\left[\frac{H(x)}{h}\right] \tag{18}$$

$$h_x=H(x)-n_x h \tag{19}$$

式中 $\left[\frac{H(x)}{h}\right]$ 表示不超过 $\frac{H(x)}{h}$ 的最大整数，若 h_x 为零则表示材料刚好有 n_x 个完整层。

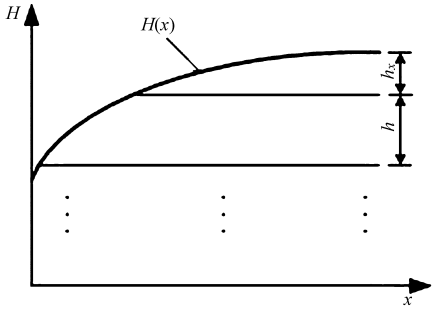

图 6　变厚度复合材料模型

Fig. 6　Model of variable thickness composite

对于变曲面工件，超声检测一般采用发射探头垂直入射面入射，根据假设（2），接收探头与声束方向一致，如图 7 所示。与 2.2 节模型相比，变曲面模型有两处不同：超声波声程发生变化，超声波透射系数发生变化。因而需要对 2.2 节模型进行修正。由假设（1）知超声波在材料内部沿直线传播，入射波声束与透射面的夹角为 θ_1，透射波声束与透射面夹角为 θ_2，其中 θ_1 与变厚度面斜率有关，有

$$\tan\theta_1=\mathrm{d}H(x)/\mathrm{d}x=H'(x) \tag{20}$$

由斯奈儿定律[13]可知

$$\sin\theta_1/c_1=\sin\theta_2/c_2 \tag{21}$$

式中　c_1——超声波在复合材料中的声速

c_2——超声波在耦合剂中的声速

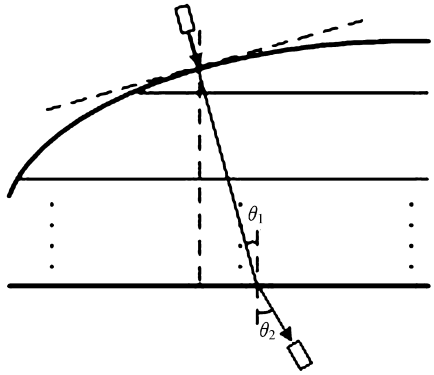

图 7　变厚度材料超声检测模型

Fig. 7　Ultrasonic test model for variable thickness composite

3.2.2　声程变化的修正

无孔隙时，材料内部的衰减主要来自树脂和纤维的吸收及扩散，当超声波频率与纤维直径一定时，衰减的程度与树脂和纤维的含量成正比关系[14]。当超声波声程发生变化时，相当于沿声束方向上树脂和纤维的含量发生变化，可以认为纤维和树脂含量与声程成正比例关系，从而对式（1）进行修正

$$r_3^{n-1}=\begin{cases}r_3^{n_x} & (h_x>0)\\ r_3^{n_x-1} & (h_x=0)\end{cases} \tag{22}$$

$$r_4^n=\begin{cases}\dfrac{h_x}{h}\left(\dfrac{r_4}{\cos\theta_1}\right)^{n_x+1} & (h_x>0)\\ \left(\dfrac{r_4}{\cos\theta_1}\right)^{n_x} & (h_x=0)\end{cases} \tag{23}$$

3.2.3 透射系数变化的修正

由于声波与透射面并不垂直,因而声波经过透射面时会发生折射,与垂直入射相比透射系数将发生变化。设超声波斜入射时在后表面的透射系数[15]为 r_2',则有

$$r_2=\frac{2\rho_2c_2}{\rho_1c_1+\rho_2c_2} \tag{24}$$

$$r_2'=\frac{2\dfrac{\rho_2c_2}{\cos\theta_2}}{\dfrac{\rho_2c_2}{\cos\theta_2}+\dfrac{\rho_1c_1}{\cos\theta_1}} \tag{25}$$

式中 ρ_1——复合材料密度

ρ_2——所用耦合剂密度

3.2.4 修正后模型

修正后孔隙率为零时变曲面复合材料超声波衰减模型为

$$\alpha_1'=\begin{cases}r_1r_2'r_3^{n_x}\dfrac{h_x}{h}\left(\dfrac{r_4}{\cos\theta_1}\right)^{n_x+1} & (h_x>0)\\ r_1r_2'r_3^{n_x-1}\left(\dfrac{r_4}{\cos\theta_1}\right)^{n_x} & (h_x=0)\end{cases} \tag{26}$$

设 $s_0(x)$ 和 $S_0(x)$ 分别为孔隙率为零、位置为 x 的透射波波幅达到 80% 波高时的增益和增益分贝值,且有 $S_0(x)=20\lg s_0(x)$,由式(3)和式(26)可得:

当 $h_x>0$ 时

$$\frac{s_0(x)}{f_0(n_x+1)}=k(\theta_1,\theta_2)\cos\theta_1^{n_x+1}\frac{h}{h_x} \tag{27}$$

当 $h_x=0$ 时

$$\frac{s_0(x)}{f_0(n_x)}=k(\theta_1,\theta_2)\cos\theta_1^{n_x} \tag{28}$$

其中

$$k(\theta_1,\theta_2)=\frac{r_2}{r_2'}=\frac{\dfrac{\cos\theta_2}{\cos\theta_1}\rho_1c_1+\rho_2c_2}{\rho_1c_1+\rho_2c_2} \tag{29}$$

另有 $S_0(x)=F_0(n_x)+20\lg s_0(x)-20\lg f_0(n_x)$,因而 $s_0(x)$ 和 $S_0(x)$ 可由 2.2 节中的 $f_0(n_x)$ 以及 $F_0(n_x)$ 计算求得。

3.3 孔隙率不为零时超声波衰减模型

与 2.3 节模型相比,变曲面模型不同之处在于超声波声程的变化引起的孔隙含量的变化,与 2.3 节方法相似,对式(9)进行修正,结果为

$$\alpha_2'(x)=\begin{cases}\dfrac{h_x}{h}\left[\dfrac{1}{\varphi(P_s)\cos\theta_1}\right]^{n_x+1} & (h_x>0)\\ \left[\dfrac{1}{\varphi(P_s)\cos\theta_1}\right]^{n_x} & (h_x=0)\end{cases} \tag{30}$$

设 $s_{P_s}(x)$ 和 $S_{P_s}(x)$ 分别为孔隙率为 P_s、位置为 x 的透射波波幅达到 80% 波高时的增益和增益分贝值,由式(12)类比可推出:

当 $h_x>0$ 时

$$\varphi(P_s)=\frac{h_x}{h\cos\theta_1}10^{\frac{S_{P_x}(x)-S_0(x)}{20n_x+20}} \tag{31}$$

当 $h_x=0$ 时

$$\varphi(P_s)=\frac{1}{\cos\theta_1}10^{\frac{S_{P_x}(x)-S_0(x)}{20n_x}} \tag{32}$$

$\varphi(P_s)$ 的具体形式已经在 2.3 节中求出,因而通过式(13)、式(14)和式(31)、式(32)可以解出 P_s 的表达式,进而在实际中如果测出位置 x 处的透射波波幅到达 80% 波高时的增益分贝值 $S_{P_s}(x)$,即可计算出该处的孔隙率。

3.4 模型分析

由式(24)~(30)可以看出,相对于等厚度复合材料,变厚度复合材料模型中 θ 值起着很大的作用,即曲面斜率会对测试结果产生较大影响。以水作耦合剂为例,则 $c_2=1\,480$ m/s,$\rho_2=1\,000$ kg/m^3,对碳纤维复合材料,取 $c_1=2\,500$ m/s,取材料密度 $\rho_1=1\,800$ kg/m^3,在透射面由于入射角小于折射角,令 $\theta_2=90°$,由式(21)解得 $\theta_1=36.87°$,所以当入射角大于该角度时,透射面声波将发生全发射,即该方法不再适用,由式(20)可以求得在透射法使用范围内变厚度面的最大斜率绝对值 $|H'(x)|=0.75$。

令 $K(\theta_1)=k(\theta_1,\theta_2)\cos\theta_1^{n_x}$,$K(\theta_1)$ 可以理解为相同层数下孔隙率为零时变曲面相对于等厚度材料的超声波衰减率,对不同 n_x 绘制出 $K(\theta_1)$ 曲线,如图 8 所示。从图中可以看出,随着 n_x 的增大,$K(\theta_1)$ 越来越陡峭,即当 θ_1 变大或者曲面斜率变大时,孔隙率为零的情况下超声波衰减量较等厚度板时增大许多,显而易见当孔隙率不为零时超声波衰减量将更大。对于实际超声检测,若信号衰减量过大,则信号很容易被噪声淹没而给检测带来不便。

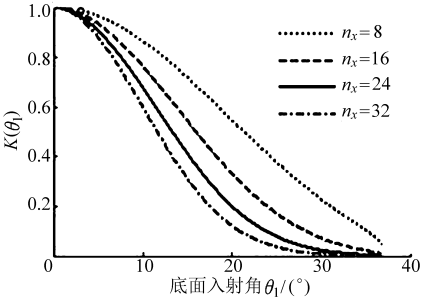

图 8 不同 n_x 下的 $K(\theta_1)-\theta_1$ 关系曲线

Fig. 8 Curves of $K(\theta_1)-\theta_1$ under different n_x

因此该模型适合于大曲率半径结构件的检测,例如翼面类构件的检测,并且厚度越大的材料,对其

曲率要求越严格。

由于变曲面复合材料试块制备困难且价格昂贵，对变厚度模型还只能做定性的分析，对变厚度材料的测试方法以及模型完善还有待进一步的研究。

4　结束语

建立了等厚度层板复合材料孔隙率与材料层数、超声衰减量之间的关系模型，并根据已有试验数据拟合出了基于模型的孔隙率公式。该方法适合于工程实际的检测计算，可以解决同批次生产条件下不同层数复合材料孔隙率检测问题，且无需制作各种样本试块，检测方便且节约成本，通过试验数据验证分析发现，该方法具有一定的精度，符合一般实际工程的要求。在此基础上，对变厚度复合材料建立了孔隙率与材料厚度、超声衰减量的关系模型，并讨论模型的应用范围和局限性，由于缺乏变厚度复合材料的孔隙率及超声衰减数据，以及试验条件的限制，未能对该模型进行验证，有待于进一步的完善。

需要补充说明的是，如果针对不同批次及制造工艺下的复合材料，本文建模方法仍然有效，只需对这些材料制造相应的样本试块，按本文试验方法测出数据后重新拟合曲线即可。

参　考　文　献

1　Judd N C W, Wright W W. Voids and their effects on the mechanical properties of composites [J]. SAMPE Journal, 1978, 14(1): 10 – 14.

2　Vizzini A J. Strength of laminated composites with internal discontinuities parallel to the applied load [J]. AIAA Journal, 1992, 30(6): 1515 – 1520.

3　刘继忠，周晓军，华志恒. 碳纤维复合材料孔隙率的脉冲反射法超声衰减测试模型[J]. 浙江大学学报：工学版，2006，40(11)：1878 – 1882.
Liu Jizhong, Zhou Xiaojun, Hua Zhiheng. Puls-echo based ultrasonic attenuation model for porosity test of carbon fiber composites [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2006, 40(11): 1978 – 1882. (in Chinese)

4　周晓军，莫锦秋，游红武. 碳纤维复合材料分布孔隙率的超声衰减检测方法[J]. 复合材料学报，1997，14(3)：107 – 113.
Zhou Xiaojun, Mo Jinqiu, Cheng Yaodong. Ultrasonic attenuation testing method for NDE of void content based on theoretical model and experiment calibration [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1997, 14(3): 107 – 113. (in Chinese)

5　Martin B G. Ultrasonic attenuation due to voids in fiber reinforced plastic [J]. NDT International, 1976,9(5): 242 – 246.

6　Stone D E, Clark B. Ultrasonic attenuation as a measure of void content in carbon-fiber reinforced plastics [J]. NDT International, 1975, 8(3): 137 – 145.

7　罗明. 碳纤维增强树脂基复合材料孔隙率超声无损检测[D]. 大连：大连理工大学，2007.
Luo Ming. The ultrasonic non-destructive test on the porosity of the carbon fiber reinforced polymer matrix composite [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese)

8　华志恒，周晓军，刘继忠. 碳纤维复合材料(CFRP)的孔隙形态特征[J]. 复合材料学报，2005，22(6)：103 – 107.
Hua Zhiheng, Zhou Xiaojun, Liu Jizhong. Morphology of pores in carbon fiber reinforced plastics [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(6): 103 – 107. (in Chinese)

9　高晓进，张峥. CFRP 中孔隙几何形貌与超声衰减系数关系的研究[J]. 材料工程，2012(7)：59 – 63.
Gao Xiaojin, Zhang Zheng. Research of the relationship between pore morphology and ultrasonic attenuation coefficient in CFRP [J]. Journal of Materials Engineering, 2012(7): 59 – 63. (in Chinese)

10　GB/T 3365—2008　碳纤维增强塑料孔隙含量和纤维体积含量试验方法[S]. 2008.

11　郑慧峰，周晓军，李雄兵. 基于本体多关节的超声检测机器人误差补偿[J]. 农业机械学报，2008，39(4)：164 – 167.
Zheng Huifeng, Zhou Xiaojun, Li Xiongbing. Research on error compensation of multi-joint ultrasonic robot based on ontology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(4): 164 – 167. (in Chinese)

12　张杨，周晓军，杨辰龙，等. 基于声束追踪的变厚度曲面工件超声探头位姿规划[J]. 农业机械学报，2012，43(9)：230 – 234.
Zhang Yang, Zhou Xiaojun, Yang Chenlong, et al. Ultrasonic probe position and orientation planning for curved components with variable thickness based on ultrasonic beam analysis [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(9): 230 – 234. (in Chinese)

13　中国机械工程学会无损检测分会. 超声波检测[M]. 2 版. 北京：机械工业出版社，2000.

14　周晓军，游红武，程耀东. 含孔隙率碳纤维复合材料的超声衰减模型[J]. 复合材料学报，1997，14(3)：99 – 106.
Zhou Xiaojun, You Hongwu, Cheng Yaodong. Ultrasonic attenuation model of void contained carbon fiber reinforced plastics [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1997 14(3): 99 – 106. (in Chinese)

15　杜功焕，朱哲民，龚秀芬. 声学基础[M]. 3 版. 南京：南京大学出版社，2012.

Ultrasonic Attenuation Model for Porosity Test of CFRP with Variable Thickness

Li Zhao[1] Zhou Xiaojun[1] Yang Chenlong[1] Wang Jianlong[1] Xu Jianyong[1] Zheng Huifeng[2]

(1. *The State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control*, *Zhejiang University*, *Hangzhou* 310027, *China*
2. *College of Metrology and Measurement Engineering*, *China Jiliang University*, *Hangzhou* 310018, *China*)

Abstract: Based on the principle of ultrasonic transmission method with some hypothesis, a relationship model between porosity, the number of layers and the ultrasonic attenuation was established for different CFRP laminates. Firstly, under several assumed conditions, a relationship model between the number of layers and the ultrasonic attenuation was established without porosity. This model can reflect effect of other factors on the ultrasonic attenuation. Then, considering the effect of voids, the model was improved with the factor of porosity. Finally, using the test data of the porosity and ultrasonic attenuation for 5 different laminate test blocks, a fitting porosity mode was given. The analysis and test result show the model has enough precision and can certify the requirement of engineering test. This model can be used to test the porosity of different composite laminates in same bath and doesn't need to prepare too many samples, so it is convenient and fast, as well as cost saving. On the basis, a relationship model between porosity, thickness and ultrasonic attenuation was established by revising the porosity model. As for composites with variable thickness, it is needed to replace the number of layers by thickness. What's more, refraction phenomenon may occur while the ultrasound propagates at the back wall. So other factors should be revised. The analysis shows that, the included angle between the propagation direction and the normal direction of back wall plays an important part in the model. And the attention will increase rapidly with the angle increases. So the model is suitable for the composites with big curvature radiuses.

Key words: Carbon fiber composite Porosity Variable thickness Ultrasonic attenuation