

文章编号: 1001-4888(2010)06-0712-05

整体化复合材料结构残余应力实验研究^{*}

李君¹, 吴清¹, 温品晶¹, 姚学锋¹, 寇哲君², 戴棣²

(1. 清华大学 工程力学系, 北京 100084; 2. 北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

摘要: 通过钻孔法测试了 T 型整体化复合材料结构件在不同固化工艺方案下的残余应力, 并研究了多墙类加筋壁板的腹板和蒙皮的残余应力分布, 以及不同钻孔深度对结构件内部残余应力测试结果的影响。研究表明: 共固化方式下产生的残余应力要小于胶结共固化方式下的残余应力。

关键词: 整体化复合材料结构; 残余应力; 钻孔法

中图分类号: V423.41

文献标识码: A

0 引言

整体化复合材料结构是指结构在设计制造时尽量采用一次成型的技术取代由零部件经紧固件进行连接组合而形成的整体化结构, 分共固化、胶结共固化、二次胶结三种方式^[1]。由于材料的热胀冷缩效应、基体树脂的化学反应放热效应、树脂的化学收缩以及复合材料与成型所用模具材料在热膨胀系数上的显著差异等原因^[2,3], 整体化复合材料结构脱模后必然存在一定的残余应力。因此准确测试结构件在固化过程中产生的残余应力对其寿命评估及强度预测有着重要的意义。

钻孔法是残余应力测试的经典方法之一。Bert^[4]首先将小孔法推广应用于正交各向异性材料残余应力测量; Prasad^[5,6]对小孔法进行了理论分析和实验标定, 确定了各向异性材料的释放应变矩阵; Schajer^[7]进一步发展了各向异性材料残余应力的小孔法实验原理; Sicot^[8]运用逐层钻孔法测试了不同冷却速率下复合材料层合板的固化残余应力, 并运用数值方法计算了释放应变矩阵。

本文主要通过钻孔法测试不同工艺方案下整体化复合材料结构的残余应力, 研究不同工艺方案与残余应力的关系, 并探讨不同钻孔深度对多墙类加筋壁板内部残余应力测试结果的影响。

1 复合材料残余应力钻孔法测试原理

复合材料是正交各向性的, 采用 0°, 45°, 90°残余应变花, 如果三个应变片的应变值分别为: ϵ_1 , ϵ_2 和 ϵ_3 , 残余应力可由下式得到:

$$\frac{1}{\sqrt{E_x E_y}} \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \tau_{12} \\ \sigma_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 E_x , E_y 分别为材料弹性对称轴方向的两个弹性模量; σ_1 , τ_{12} , σ_2 为三个方向残余应力分量; c_{ij} ($i=1, 2, 3$; $j=1, 2, 3$) 为应变释放系数, 取决于试件的正交弹性性质、孔的直径以及应变花的几何性质。本实验使用的纤维复合材料弹性参数如表 1 所示。

^{*} 收稿日期: 2010-06-27; 修订日期: 2010-08-08

通讯作者: 姚学锋(1966—), 男, 教授, 研究领域: 实验力学, 复合材料力学。E-mail: yxf@mail. tsinghua. edu. cn

表 1 T300/QY8911 复合材料的弹性参数

Tab. 1 Material property of T300/QY8911

E_1 (GPa)	$E_2 = E_3$ (GPa)	$\nu_{23} = \nu_{32}$	ν_{12}	$G_{23} = G_{13}$ (GPa)	G_{12} (GPa)
135	9.12	0.31	0.3	5.67	3.51

表中 $E_i (i=1,2,3)$ 为材料的弹性模量; $\nu_{ij} (i=1,2,3; j=1,2,3)$ 为材料的泊松比; $G_{ij} (i=1,2,3; j=1,2,3)$ 为材料的剪切模量。

根据文献^[7]提供的正交各向异性材料无量纲弹性参数,运用插值得本文实验材料参数对应的应变释放矩阵为:

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1947 & 0 & 0.078443 \\ -0.12511 & 1.244082 & -0.6119 \\ 0.188219 & 0 & -1.39054 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2 实验测试

本实验使用青海电动工具厂生产的型号为 JIZ-QD-6A 的双鸽牌电钻,钻头直径为 1.5mm。使用的应变仪为 YE2538A 程控静态应变仪,灵敏系数 $k_{仪}$ 为 2.0。实验件为:

(1) T 型整体化复合材料结构件,采用的固化方式为共固化和胶结共固化两种;其材料体系为 T300/QY8911,具体的铺层方式是:角材 1 的铺层为 $[-45/0/45/90/-45/0]$;角材 2 的铺层为 $[-45/0/45/90/-45/0]$;蒙皮的铺层方式为 $[45/0-45/90/45/0/-45/0]_s$ 。

(2) 多墙类加筋壁板。具体的工艺过程及结构尺寸见参考文献[2]所述,布片方案如图 1 所示。

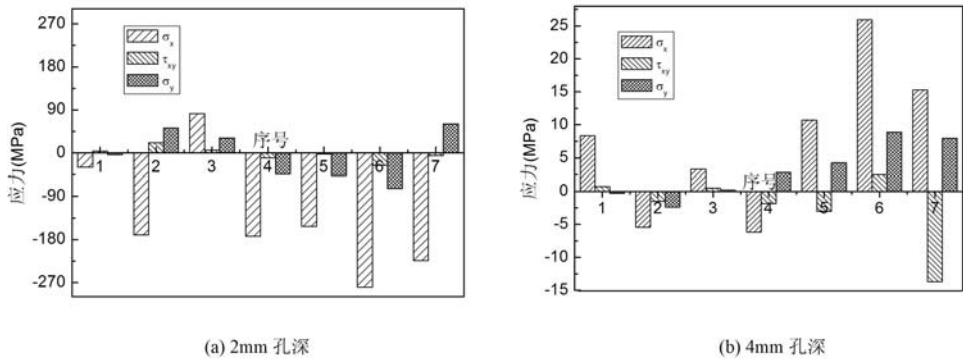


图 1 整体化复合材料结构件

Fig. 1 Integrated composite structure

对于 T 型整体化复合材料结构件四个测试点的布置如图 2(a),(b)所示。对于多墙类加筋壁板,四块腹板上各有一个测点,两个腹板之间的蒙皮处设一测点,其分布如图 2(c)所示;其中 1、3、5、7 为腹板之间蒙皮的钻孔位置;2、4、6 为腹板处的钻孔位置。在此次实验中,钻孔深度分别取为 2mm、4mm。

3 实验结果与讨论

对于采用共固化和胶结共固化两种方式的 T 型整体化复合材料结构件,所测得的释放应变如表 2 所示。同时运用 CHILE 模型对共固化方式下 T 型整体化复合材料结构的残余应力进行了计算,计算采用三维八节点单元,相关的工艺及材料参数见文献[2],实验和计算结果如图 2(a)所示,残余应力计算云图如图 2(b)所示。进一步证明了实验和计算结果吻合较好,其中点 1 的测试误差最大为 27.03%。

根据式(2)计算得不同固化方式下结构件的残余应力值如表 3 所示。

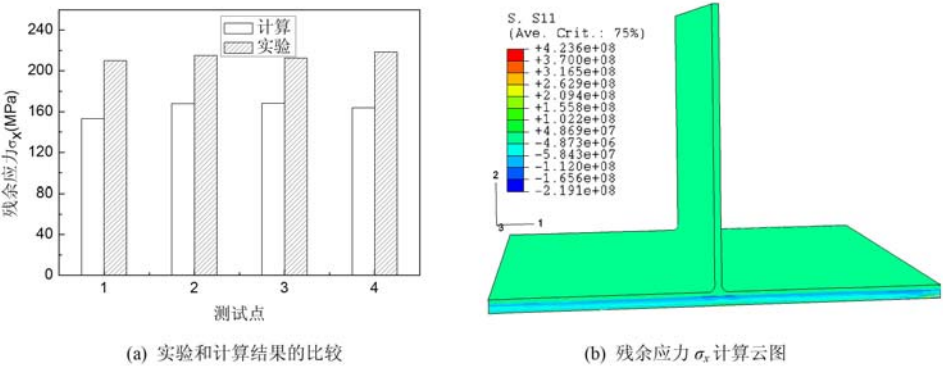


图 2 残余应力 实验和计算结果的比较

Fig. 2 The comparison of residual stress between the prediction results and test data

表 2 不同固化方式下残余应变测量结果

Tab. 2 The residual strain data under different manufacturing process

固化方式	序号	$\epsilon_x (\mu\epsilon)$	$\epsilon_y (\mu\epsilon)$	$\epsilon_{xy} (\mu\epsilon)$
共固化	1	740	1309	1054
	2	853	739	1125
	3	830	780	1149
	4	865	1037	805
胶结共固化	1	625	1856	1102
	2	977	1076	1382
	3	201	1123	857
	4	852	1771	915

表 3 不同固化方式下残余应力结果

Tab. 3 The residual stress data under different manufacturing process

固化方式	序号	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	τ_{xy} (MPa)
共固化	1	209.95	-36.92	54.69
	2	-215.13	-20.81	-49.68
	3	-212.70	-22.00	-50.67
	4	-218.69	-29.25	-45.52
胶结共固化	1	-206.70	53.35	-62.50
	2	-256.17	-30.35	-62.68
	3	-96.20	31.67	-40.99
	4	-242.43	49.95	-58.75

由表 3 可以发现,对于共固化方式,结构件面内的最大应力(218.69MPa)要小于胶结共固化的最大应力(256.17MPa)。对于胶结共固化方式,除孔 3 的应力外,其余的正应力基本都在 200MPa 以上,造成此偏差的原因有可能是结构件制造过程在此处存在缺陷所致。在忽略孔 3 应力的前提下,共固化方式的应力均值为 214.12MPa,胶结共固化方式的应力均值为 235.10MPa。此结论和文献[2]的计算结果一致。

对于多墙类加筋壁板,不同钻孔深度下所测得的应变如表 4 所示。将钻孔深度为 2mm 和 4mm 时

所对应的残余应力值作为 y 轴,应变花的位置序号作为 x 轴,得到其关系如图 3。

表 4 多墙类加筋壁板不同深度下残余应变测量结果

Tab. 4 The residual strain data of multi-wall panel-stiffener structure

孔序	孔深 2mm 应变 ($\mu\epsilon$)			孔深 4mm 应变 ($\mu\epsilon$)		
	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_{xy}	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_{xy}
1	158	295	-24	-47	1	57
2	830	780	1149	25	8	65
3	388	1047	799	-18	2	11
4	865	1037	805	28	7	79
5	740	1309	1054	-50	-220	-111
6	1387	1391	1421	-124	-163	-214
7	1108	1688	1218	-67	-244	-234

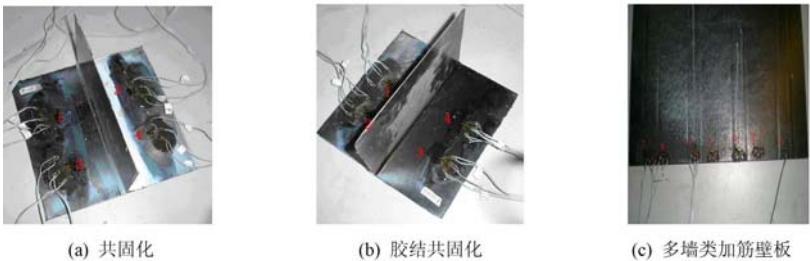


图 3 不同孔深时测得的残余应力

Fig. 3 The residual stress for different drilling depth

由图 3(a)可知:当钻孔深度为 2mm 时,除孔 1,3 处外,其余孔处正应力绝对值基本都在 150MPa 以上,孔 1,3 的数据与其它孔相比偏差较大,可能是实验测量过程中人为因素造成的。如果不考虑孔 1,3,另外 5 个孔处的残余正应力值远远大于切应力值,且残余正应力皆为负值,由此可知该复合材料构件存有压缩残余应力。残余切应力的绝对值最大也只有 25.62MPa,由此可知此种铺层方式下整体化复合材料结构固化成型冷却过程产生的面内扭转变形很小。图 3(b)中所展示的残余应力是在原有的 2mm 孔深的基础上再沿垂直于试件表面的方向钻 2mm 得到的,此举目的是为了判断钻孔的深度对测试残余应力的影响。对比孔 5、孔 6 和孔 7 处的正应力,发现再钻 2mm 所释放的残余应力只有初始钻 2mm 深时残余应力的 10%左右,摒弃实验误差的影响,而由文献^[2]可知,对于此工艺方案下的结构件面内的应力基本在 200MPa 左右,说明钻 2mm 深应变花测得到的应变值及计算得到的残余应力基本能够反映出材料内部存在的原始残余应力。进一步由图 3 可见,孔 2、孔 4 和孔 6 是蒙皮处,孔 3、孔 5 和孔 7 是腹板处,显然蒙皮处的残余应力最大绝对值为 279.66MPa 要大于腹板处的最大残余应力值 224.30MPa。

4 小结

- (1) 确定了整体化复合材料结构钻孔法测量残余应力的应变释放矩阵;研究表明:复合材料结构件内部的残余应力测试和计算结果吻合较好。
- (2) 首先测量了不同制造工艺方案下 T 型整体化复合材料结构件内部的残余应力分布。对于共固化方式,结构件面内的最大应力为 218.69MPa,胶结共固化的最大应力为 256.17MPa。共固化方式下产生的残余应力要小于胶结共固化方式下的残余应力。
- (3) 进一步测量了多墙类加筋壁板整体化复合材料结构的残余应力,分别得到了蒙皮处和腹板处的残余正应力和残余切应力。实验结果表明残余正应力都为负值,即材料存有的残余应力是压缩应力。残余切应力的值相对于正应力很小,表明材料在本铺层方案下其加工成型过程中自身的扭曲变形很小。

参考文献:

- [1] 李君, 姚学锋, 刘应华, 等. 复合材料 T 型整体化结构固化翘曲变形模拟[J]. 复合材料学报, 2009, 26(1):156—161 (Li Jun, Yao Xuefeng, Liu Yinghua, et al. Simulation on curing warpage deformation of composite T-shaped integrated structure[J]. Acta Materialia Composita Sinica, 2009, 26(1):156—161(in Chinese))
- [2] Li J, Yao X F, Liu Y H, et al. A study of the integrated composite material structures under different fabrication processing[J]. Compos Part A-Appl S, 2009, 40(4):455—462.
- [3] Li J, Yao X F, Liu Y H, et al. Curing deformation analysis for the composite T-shaped integrated structures[J]. Appl Compos Mater, 2008, 15(4-6):207—225.
- [4] Bert C W, Thompson G L. A method for measuring planar residual stresses in rectangularly orthotropic materials [J]. J Compos Mater, 1968, 2(2):244—253.
- [5] Prasad C B, Prabhakaran R, Tompkins S. Determination of calibration constants for the hole-drilling residual stress measurement technique applied to orthotropic composites—Part I: Theoretical considerations[J]. Compos Struct, 1987, 8(2):105—118.
- [6] Prasad C B, Prabhakaran R, Tompkins S. Determination of calibration constants for the hole-drilling residual stress measurement technique applied to orthotropic composites—Part II: Experimental evaluations[J]. Compos Struct, 1987, 8(3):165—172.
- [7] Schajer G S, Yang L. Residual stress measurement in orthotropic materials using the hole-drilling method[J]. Exp Mech, 1994, 34(4):324—333.
- [8] Sicot O, Gong XL, Cherouat A, Lu J. Determination of residual stress in composite laminates using the incremental hole-drilling method[J]. J Compos Mater, 2003, 37(9):831—844.

Experimental Study of the Residual Stress of Integrated Composite Structure

LI Jun¹, WU Qing¹, WEN Pin-jing¹, YAO Xue-feng¹, KOU Zhe-jun², DAI Di²

(1. Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

Abstract: Using hole-drilling method, the residual stress of T-type integrated composite structures manufactured by different solidifying technics was measured, and the residual stress distribution for web and skin of multi-wall panel-stiffener structure was also studied. Then, the relationship between the drilling depth and the tested data of structure was studied. Results show that the residual stress in structure manufactured by co-cure method is smaller than that in structure manufactured by co-bonding methods.

Keywords: Integrated composite structure, residual stress; hole-drilling methods