

缠绕角度对碳/环氧厚壁管件轴压性能影响的实验研究

彭超义 菊 苏 曾竟成 杜 刚 肖加余

(国防科学技术大学航天与材料工程学院,长沙 410073)

文 摘 采用缠绕工艺制备了 20°、30° 和 40° 三种缠绕角度的碳/环氧厚壁管件,通过轴压实验研究了缠绕角度对厚壁管件的轴压模量和轴压强度的影响,并对轴压破坏模式进行了分析。实验测得轴向模量值比有限元模型计算值偏小,破坏模式为纤维层向外崩裂破坏与有限元分析结果一致。

关键词 缠绕,轴压,模量,强度,破坏

Experimental Investigation of Effect of Winding Angles on Axially Compressive Properties of Thick-Walled C_f/Epoxy Tubes

Peng Chaoyi Ju Su Zeng Jingcheng Du Gang Xiao Jiayu

(College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract Filament winding process is used to fabricate the thick-walled C_f/epoxy tubes with three different winding angles which are 20, 30 and 40 respectively. Effect of the winding angles on the axial stiffness and compressive strength and the failure mode of the thick-walled tubes are investigated by axial compression test. The stiffness values obtained from the experiment test are smaller than those calculated by the finite element analysis model. The failure mode coincides very well with the finite element analysis results.

Key words Filament winding, Axial compression, Modulus, Strength, Failure

1 引言

碳/环氧复合材料在航空航天领域已经获得了广泛的应用,并且由次承力构件开始逐步应用于主承力构件^[1~3]。对于文献[2~3]中提到的桁架结构碳/环氧支架管,主要采用缠绕工艺和内膨胀软模工艺成型。缠绕工艺一般广泛应用于压力容器以及类似于压力容器的复合材料构件的制备,同时在对轴向承载性能有较高要求的构件制备上也有应用,如导弹连接裙、航天飞机的机械臂、电线杆、跳高运动员用的撑竿以及船桅杆等^[4]。相对于内膨胀软模工艺^[5]而言,缠绕工艺具有模具简单、自动化程度高、省时省力、可以连续作业等优点。本文采用缠

绕工艺制备了 20°、30° 和 40° 三种缠绕角度的碳/环氧厚壁管件,通过轴压实验研究了缠绕角度对厚壁管件的轴向刚度和轴压强度的影响,并对轴压破坏模式进行了分析。

2 实验

2.1 原材料和设备

E-51 环氧树脂:CYD-128,岳阳石油化工总厂环氧树脂厂;固化剂:三氟化硼单乙胺,二乙烯三胺;碳纤维:T-700,12K,日本东丽公司。

缠绕设备:3FW800,哈尔滨复合材料公司;万能试验机:WDW-100,长春实验机厂。

2.2 缠绕工艺和试样制备

收稿日期:2004-11-16;修回日期:2005-01-05

基金项目:国家 863 高技术项目资助(2003AA724052)

作者简介:彭超义,1977 年出生,博士研究生,主要从事复合材料结构设计及成型工艺研究

缠绕用钢制芯模直径 42 mm,长度 750 mm,缠绕角度为 20°、30° 和 40°。缠绕完成后把管件置于烘箱中,90 固化 40 min,120 固化 90 min,160 固化 3 h。缠绕管件两端各锯除 100 mm,取中间段制备压缩试样,试样端面打磨平整,端面与轴线垂直。如图 1 所示,压缩试样尺寸为:内径 $d=42$ mm,外径 $D=50$ mm,长度 $L=80$ mm, $l=10$ mm (试样总长度为 $L+2l=100$ mm,其中加固层长度为 l 加固层厚度 $t_0=5$ mm)。

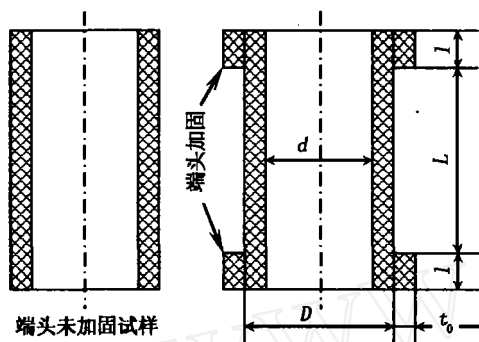


图 1 管件压缩试样形状及尺寸

Fig 1 Dimension and shape of compressed tubes

2.3 管件轴压性能试验

管件试样置于力学试验机两平行板之间进行加载,加载试验板平整光洁,安装球铰调整上下加载板的平行程度,试样的轴线与试验机上下压板的中心对齐,避免试样受力不均匀,以保证所施加载荷为纯轴向载荷。测定弹性模量时,加载速度为 2 mm/min,分 5 级加载,施加的最大载荷不超过管件的弹性形变范围。测定强度时,加载速度为 5 mm/min,均匀连续加载至试样破坏。分别测试缠绕角度为 20°、30° 和 40° 端头加强和未加强管件模量和强度。

3 结果分析与讨论

3.1 管件轴压模量分析

轴压模量表征管件在轴向载荷作用下抗变形能力的大小,其计算公式为^[6]:

$$E_c = \frac{4L_0 \cdot P}{L(D^2 - d^2)} \quad (1)$$

式中, E_c 为轴向压缩弹性模量; P 为材料弹性范围内的载荷增量; L_0 为引伸计的标距,本文 $L_0=50$ mm; L 为与载荷增量 P 对应的标距 L_0 内的形变增量。

宇航材料工艺 2006年 第 1期

表 1 列出了不同缠绕角度管件的轴向压缩模量的有限元分析值^[7]和试验测定值。从表 1 可见,随着缠绕角度增大,管件的轴向压缩模量显著下降,下降幅度与有限元分析结果基本上一致,但是模量的实验值比有限元分析计算结果要偏小,原因是所制备的管件试样为厚壁管件试样,所存在的缺陷比有限元分析采用基本性能参数所用的单向板的缺陷要多一些。而端部加强之后管件的轴向压缩模量反而比未加强的要低一些,其原因主要在于引伸计所测的应变位置是受压管件的中部,而不是整个管件的应变。对于未加强管件,承受大的轴向压缩载荷时,端头部分会产生一定的径向形变,使轴向载荷在径向产生了分量,而加强管件端头的径向形变则受到了约束,轴向载荷基本上直接传递到管件的中部位置,因此,在相同的应力条件下,引伸计所测得管件中部位置的应变,未加强管件反而要比加强后的略小,导致由式(1)计算出来的加强管件模量反而要低一些。

表 1 不同缠绕角度管件的轴向压缩模量

Tab 1 Axial compressive modulus of tubes with different winding angles

缠绕角度 / (°)	有限元分析值 /GPa	试验测定值 /GPa	
		端部加强	未加强
20	78.1	73.4	74.6
30	49.8	46.5	47.1
40	29.5	26.2	27.8

3.2 管件轴向压缩强度与破坏模式分析

管件轴向压缩强度计算公式^[6]:

$$\sigma_c = \frac{4P}{(D^2 - d^2)} \quad (2)$$

式中, σ_c 为轴向压缩强度, P 为破坏载荷, D 为试样平均外径, d 为试样平均内径。

表 2 列出了不同缠绕角度管件的轴向压缩强度的测定值。从表 2 可见,随着缠绕角度的增大,管件轴向压缩强度明显降低,其原因有两个方面:一方面是随着缠绕角度增大,纤维在轴向的分量减少了;另一方面是随着缠绕角度的增大,对于未加强管件来说,端头部位剪应力也显著增大,导致管件容易从端头开始发生剪切破坏,对于端头加强管件来说,则由

于距离端头 20~25 mm 的部位径向变形明显增大, 导致管件容易在此部位发生剥离破坏。

表 2 不同缠绕角度管件的轴向压缩强度

Tab 2 Axial compressive strength of tubes with different winding angles

缠绕角度 / (°)	试验测定值 / GPa	
	未加强	端部加强
20	246.0	318.5
30	187.4	228.6
40	159.7	182.3

从破坏模式来看(图 2), 未加强管件主要是从端面开始发生层间剪切破坏, 破坏层向管件中部扩展, 加强管件由于端部得到增强而没有发生剪切破坏, 破坏部位发生在距离端面 20~25 mm 处, 并且表现为纤维层向外崩裂破坏, 这与文献 [7] 中的径向形变分析结果和剪应力分析结果是一致的。

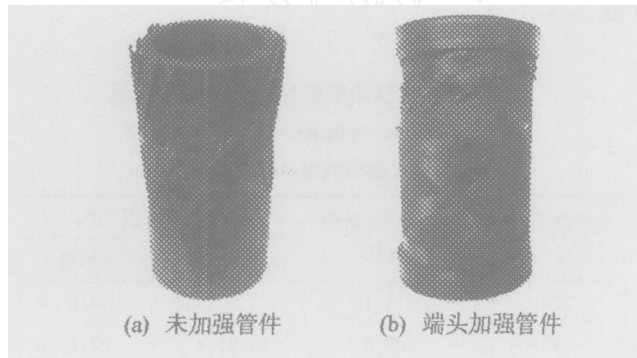


图 2 管件典型压缩破坏形式

Fig 2 Typical failure modes of tubes

4 结论

(1) 随着缠绕角度的增大, 管件的轴向压缩模量和强度都明显下降, 而模量降低的幅度比强度降低的幅度更大, 这与文献 [7] 中有限元分析结果一致。

(2) 加强管件的轴向压缩模量比未加强管件的轴向压缩模量要略低, 模量的试验测定值比文献 [7] 有限元分析值要偏低。

(3) 加强管件的轴向压缩强度比未加强轴向压缩强度显著提高, 这与文献 [7] 中有限元的径向形变分析和剪应力分析结果一致。

参考文献

- 肖加余, 曾竟成, 彭超义. 碳纤维复合材料作为主承力结构在航空航天上的应用. 第十三届全国复合材料学术会议论文集, 2004: 1 258
- 彭超义, 杜刚, 曾竟成等. 大载荷下空间桁架结构主承力用碳/环氧推力管的重量优化设计. 玻璃钢/复合材料, 2003; (6): 33
- 彭超义, 曾竟成, 肖加余等. 航天器发动机推力支架桁架结构的有限元分析与优化设计. 宇航材料工艺, 2003; 33(6): 21
- 沃丁柱, 李顺林, 王兴业等. 复合材料大全. 第 1 版. 北京: 化学工业出版社, 2000年: 299
- 杜刚, 曾竟成, 张长安等. 硅橡胶热膨胀模塑成型法制备碳/环氧复合材料管研究. 纤维复合材料, 2003; 20(2): 26
- 沃丁柱, 李顺林, 王兴业等. 复合材料大全. 第 1 版. 北京: 化学工业出版社, 2000: 459
- 彭超义, 杜刚, 曾竟成等. 缠绕角度对碳/环氧厚壁管件轴压性能影响的有限元分析. 宇航材料工艺, 2005; 35(6): 27~30

(编辑 任涛)

过滤式自救器

煤矿井下发生火灾和瓦斯爆炸时, 产生大量一氧化碳, 造成工人中毒甚至死亡。本成果研制的过滤式自救器可将一氧化碳转化成二氧化碳, 避免中毒, 保护了矿工的生命; 体积小、质量轻、携带方便, 价格低 (相当于进口产品的 1/3), 性能可靠, 水平先进, 能有效滤除各种有害烟雾, 过滤效率大于 90%, 属国内首创。曾获山西省科技成果二等奖。社会效益、经济效益明显。

(中国兵器工业集团公司 908 厂, 太原 030000)

(李连清)