

缠绕角度对碳/环氧厚壁管件轴压性能影响的有限元分析

彭超义 鞠 苏 杜 刚 曾竟成 肖加余

(国防科学技术大学航天与材料工程学院,长沙 410073)

摘 要 建立厚壁缠绕管件的轴压有限元模型,分析相同压缩载荷条件下不同缠绕角度对管件轴压模量、径向变形和剪应力的影响,并对厚壁缠绕管件在轴压载荷下的破坏模式和部位进行了预测分析。结果表明:受轴压管件的缠绕角度宜控制在 20° 以内,对管件端头进行环向缠绕加强可以提高管件的轴压强度和刚度。

关键词 缠绕角度,厚壁,碳/环氧,轴压,有限元分析

FEA for Effect of Winding Angles on Axially Compressive Properties of Thick-Walled C/E Tubes

Peng Chaoyi Ju Su Du Gang Zeng Jingcheng Xiao Jiayu

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

Abstract Finite element analysis (FEA) model of the filament winding tubes is built to analyze the effect of different winding angles on the axially compressive modulus, radial deformation and shearing stresses of the tubes under the same compression loads, and the failure mode and position of the compressed tubes are predicted and analyzed according to the FEA results. The results show that the filament winding angles should be less than 20° for axially compressed tubes and hoop winding reinforcement can improve the axially compressive strength and stiffness.

Key words Winding angle, Thick wall, C/E, Axial compression, FEA

1 引言

缠绕成型工艺能够按产品受力状况设计缠绕规律,具有比强度高、可靠性高、生产效率高和成本低等优点,因而获得了广泛应用,如用于火箭发动机壳体、烧蚀衬套、火箭发射筒、鱼雷仪器舱及飞机机头雷达罩等,民品上多用于高压气瓶及管道工程等。缠绕工艺也应用于非容器型受力状态的构件,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,这些构件通常要承受较大

的轴向载荷或者弯曲载荷,对构件的轴向承载性能具有很高的要求^[1]。本文采用缠绕工艺制备了文献[2~3]中提到的主承力用碳/环氧(C/E)管件。采用通用有限元软件 ANSYS 7.0 对不同缠绕角度的管件轴压性能进行了分析,对缠绕工艺和铺层方式进行了优化。

2 管件轴压实验有限元建模

C/E管试样置于万能力学性能试验机两平板间测试压缩性能。由于对管件施加轴向大载荷($>$

收稿日期:2004-11-16;修回日期:2005-01-05

基金项目:国家863计划项目资助(2003AA724052)

作者简介:彭超义,1977年出生,博士研究生,主要从事聚合物基复合材料成型工艺及结构设计的研究工作

宇航材料工艺 2005年 第6期

— 27 —

100 kN)以后,管件的端面与平板之间存在着很大的摩擦力,对管件的端面产生很大束缚力,限制了管件端面的形变,因此,建立 C/E 管压缩试样有限元模型时,边界约束为试样的下端截面采用固支约束,上端面也限制管件的径向位移。压缩载荷均匀施加于管件试样上端面,如图 1 所示。实验中,当压缩载荷达到 200 MPa 时,个别管件试样开始发响,但没有破坏。本文取 116 kN 作为有限元分析的压缩载荷。建立外径为 50 mm、内径为 42 mm、高度为 100 mm 的空心圆柱体,表示 C/E 压缩试样的实体模型。采用 ANSYS7.0 元素库中三维层合单元 Solid 46^[4]对模型进行网格划分。因为管件模型为规则空心圆柱体,为了精确控制网格划分后节点的位置,使每种铺层方式的有限元模型网格划分精确一致,采用六面体单元 (Hexahedra) Solid46 对圆柱壳实体模型进行扫掠网格划分 (Swept)^[5],轴向划分 50 个单元,环向划分 96 个单元,共 4 800 个单元,9 898 个节点。缠绕层数为 20 层,单层厚度 0.2 mm,单层材料参数见表 1。

表 1 单向板的性能参数

Tab 1 Properties of unidirectional laminate

E_x / GPa	E_y / GPa	E_z / GPa	ν_{xy}	G_{xy} / GPa
110.5	8.6	8.6	0.3	7.0

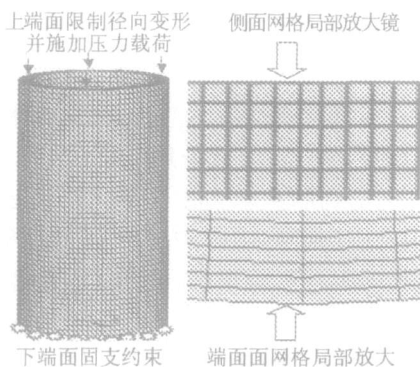


图 1 有限元分析模型及网格划分

Fig 1 FEA model and meshing

3 有限元分析结果讨论

如图 2 所示,取值路径表示沿着管件壁的中面,从下端面开始,每隔 5 mm 取一个点的形变和应力

数据,共 21 个点。

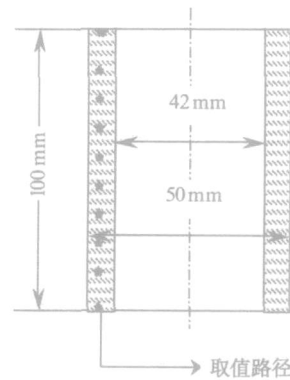


图 2 管件试样尺寸及取值路径

Fig 2 Tube dimension and test points

3.1 轴压模量分析

轴压模量表征管件抵抗轴向形变能力的大小,其计算公式为:

$$E_{\text{轴}} = F_{\text{轴}} / (A \cdot \epsilon_{\text{轴}})$$

式中, $E_{\text{轴}}$ 为轴压模量, $F_{\text{轴}}$ 为轴向载荷, A 为管件截面积, $\epsilon_{\text{轴}}$ 为最大轴向应变。依次计算 $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, \dots, 90^\circ$ 共 19 种不同缠绕角度的管件轴压模量 (其中 0° 和 90° 为理想状态的缠绕角度), 结果如图 3 所示。由图 3 可见, 随着缠绕角度的增大, 轴压模量先略微减小, 当缠绕角度大于 15° 时开始急剧下降, 当缠绕角度大于 40° 以后, 轴压模量下降趋势又趋缓, 此时轴压模量已经小于理论最大轴压模量的 $1/4$ 。因此, 要想获得较高的轴压模量, 缠绕角度宜控制在 20° 以内。典型角度的轴压模量值如表 2 所示。

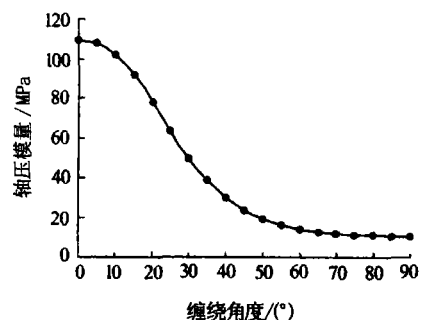


图 3 缠绕角度对管件轴压模量的影响

Fig 3 Effect of filament winding angles on axial compressive stiffness

表 2 轴压模量与缠绕角度的关系

Tab 2 Relationships between winding angles and axially compressive stiffness

缠绕角度 / (°)	轴压模量 / GPa	缠绕角度 / (°)	轴压模量 / GPa
10	101.5	60	13.8
20	78.1	80	10.6
40	29.5		

3.2 径向形变分析

在相同的轴压载荷条件下,不同缠绕角度的管件,所发生的径向形变不同,而且在承受轴压管件的不同部位所发生的径向形变也不同。对于壁厚与直径之比大于 1/20 的管件来说,可以看作是厚壁结构^[6],一般不考虑局部屈曲失稳。径向形变主要导致管件沿径向的层间剥离破坏。因此,在相同的轴压条件下,径向形变值越大,越容易发生剥离破坏。按图 2 所示的取值路径计算不同缠绕角度,管件不同部位的径向形变值,结果如图 4 所示。

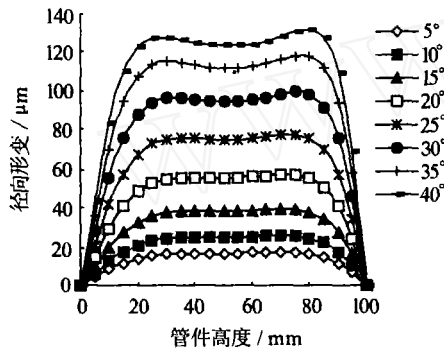


图 4 不同缠绕角度导致的径向形变在管件高度方向的分布

Fig 4 Radial deformation caused by different winding angles distributing along tube length

由图 4 可见,在缠绕角度 40 时,随着缠绕角度的增大,径向形变相应增大,最大径向形变发生在受压管件距离两个端面约 20 mm 的部位,因此,该部位是最容易发生剥离破坏的区域。对于缠绕角度大于 40 的情况,由于考虑到轴压模量已经非常小(只有理论最大模量的 1/4),故未进行计算分析。

3.3 剪应力分析

对于复合材料厚壁结构件而言,剪切破坏是一种常见的破坏形式。对于对称的轴压管件,面内剪切应力很小,可以不予考虑,主要考虑 xz 剪应力和

yz 剪应力,如图 5 所示,其中, xz 剪应力表示层间剪应力, yz 剪应力表示管件在 xy 面上沿 z 向剪应力 (x, y, z 方向分别为管件的径向、环向和轴向)。

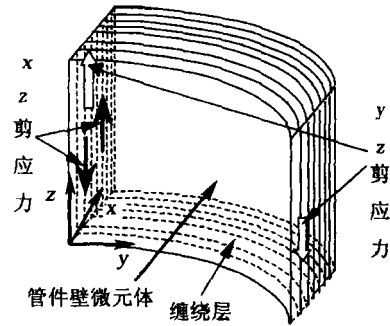
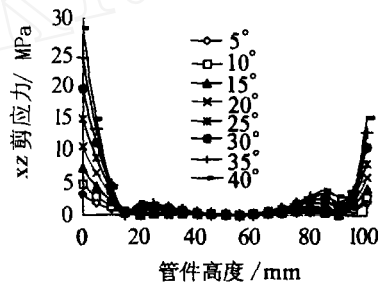


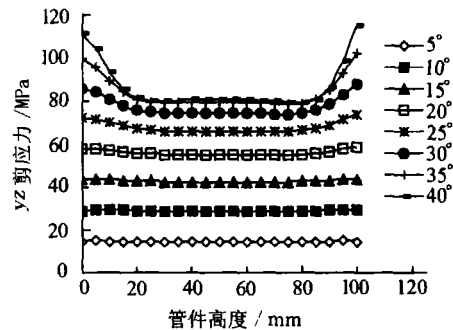
图 5 剪应力作用于管壁上的示意图

Fig 5 Sketch of shearing stresses on tube wall

按图 2 所示的取值路径计算不同缠绕角度、管件不同部位的剪应力,结果如图 6 所示。



(a) xz 剪应力



(b) yz 剪应力

图 6 不同缠绕角度导致的 xz, yz 剪应力在管件高度方向上的分布

Fig 6 xz and yz shearing stresses caused by different winding angles distributing along the tube length

由图 6(a)可知,缠绕角度对 xz 剪应力的影响主要体现在受轴压管件的端面及其附近位置,管件中间部分(20~80 mm)的 xz 剪应力相对于端面的很小,而且缠绕角度越大, xz 剪应力也越大,因此由于 xz 剪应力导致的层间剪切破坏主要发生在轴压管件的端面位置。

由图 6(b)可知,随着缠绕角度增大, yz 剪应力沿管件高度方向的分布(20 时)总体上都增大,当缠绕角度 >25 后, yz 剪应力在管件的端面及其附近位置比管件中间部分显著偏高,因而当缠绕角度 >25 时,由于 yz 剪应力导致的破坏主要发生在管件端面及附近位置,当缠绕角度小于 25 时, yz 剪应力对管件各部位的影响基本相当,破坏位置是随机的。综合 xy 剪应力和 yz 剪应力看来,厚壁管件在轴压条件下受剪应力作用的脆弱区域在管件的两个端面及附近位置,如对端面及附近位置加强,将能够提高厚壁管件的轴压破坏强度和刚度。

4 结论

(1)随着缠绕角度的增大,管件轴压模量呈反 S 形减小趋势,即缠绕角度小于 15 和大于 40 时,轴压模量减小幅度比较平缓,缠绕角度在 15°~40° 时,轴压模量减小幅度较大。缠绕角度大于 40 时,管件轴压模量已不足理论最大模量的 1/4。对于承受轴向大载荷的管件,缠绕角度宜控制在 20 以内。

(2)轴向压缩导致管件在径向发生形变,在缠绕角度小于 40 的范围内,缠绕角度越大,径向形变也越大,在距离管件两个端面 20 mm 的部位是径向形变的最大区域,也是管件最容易发生剥离分层破

坏的区域。

(3)缠绕角度对受轴压管件的剪应力的影响也非常明显,在缠绕角度小于 40 的范围内,缠绕角度越大,剪应力也越大,并且剪应力最集中的部位在管件的两个端面及其附近区域,该区域是最容易发生剪切破坏的区域。

(4)对管件两个端面附近采用环向缠绕进行加强或其他加强方式,将有利于提高轴压管件的破坏强度和模量。

参考文献

- 1 沃丁柱,李顺林,王兴业等. 复合材料大全. 北京:化学工业出版社,2000: 299
- 2 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
- 3 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
- 4 张朝晖. ANSYS8.0 结构分析及实例解析. 第一版. 北京:机械工业出版社,2005: 402~409.
- 5 陈晓霞. ANSYS7.0 高级分析. 北京:机械工业出版社,2004: 249
- 6 李顺林,王兴业著. 复合材料结构设计基础. 武汉:武汉理工大学出版社,1993: 151
- 7 Matthews F L, Davis G A O, Hitchings D et al Finite element modeling of composites materials and structures the first edition. England: Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, 2000, : 35

(编辑 吴坚)

YD、YN 新型硬质合金

本成果研制的 YD 系列硬质合金是添加 TaC 的切削钢牌号新型硬质合金。它比相应牌号的 YT 类合金耐用度高,而弯曲强度基本相同,主要用于钢材的粗加工、半精加工及精加工,特别适合加工高强度钢及超高强度钢的零件;YN 系列合金是以 TiC 为主要成分,主要用于一般钢材的精车和半精车,耐用度比 YT 类高。

(北京理工大学,北京 100037)

·李连清·