

# 纤维缠绕复合材料弯管强度分析\*

崔海涛<sup>1</sup> 温卫东<sup>1</sup> 佟丽莉<sup>2</sup>

(1 南京航空航天大学能源与动力学院,南京 210016)

(2 哈尔滨玻璃钢研究所,哈尔滨 150036)

**文 摘** 基于 ANSYS 有限元分析软件,利用其中的层合板单元,对纤维缠绕复合材料弯管的强度进行分析,并进一步预测了弯管的破坏压力。通过与试验结果的对比,验证了分析模型和分析方法的有效性,为分析纤维缠绕弯管结构的强度提供了一种有效的途径。

**关键词** 复合材料,纤维缠绕,管道强度

## Strength Analysis of Filament-wound Pipe

Cui Haitao<sup>1</sup> Wen Weidong<sup>1</sup> Tong Lili<sup>2</sup>

(1 Department of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016)

(2 Harbin FRP Institute, Harbin 150036)

**Abstract** The strength of filament-wound pipe is evaluated by ANSYS. With properties of its layer element and the maximum stress criterion, the pressure failure load is obtained. Validity of the analysis model and method are verified by several experiments respectively, which provides an efficient approach for analyzing strength of filament-wound pipes.

**Key words** Composite, Filament winding, Pipe strength

### 1 引言

自 20 世纪 40 年代第一条玻璃钢管道安装用于防化学腐蚀以来,复合材料管道得到了迅速发展。目前,玻璃钢管道已进入成熟阶段,成为通用管道。由于采用纤维缠绕复合材料弯管具有强度高、模量高、质量稳定、生产效率高和成本低等特点,并已经成为发达国家主要的弯管成型工艺。我国从 20 世纪 70 年代初开始小批量生产玻璃钢管道,工艺以缠绕和手糊为主。近年来,我国也开始采用纤维缠绕方式进行复合材料弯管的生产。目前,对于纤维缠绕结构工艺的研究较多,例如:纤维缠绕过程中的曲面架空问题<sup>[1]</sup>;纤维缠绕过程中的张力<sup>[2]</sup>;纤维缠绕圆柱壳的前屈曲变形问题<sup>[3]</sup>;通过考虑材料的非线性因素,对纤维缠绕壳体的变形进行分析和计算<sup>[4]</sup>;以及对纤维缠绕压力容器结构,基于网络理论,给出了纤维缠绕圆筒压力容器和封头爆破压强的计算方法,并给出了用模拟实验压力容器确定纤维发挥强度的方法<sup>[5]</sup>。

本文提出采用商用有限元分析软件 ANSYS,利用其中的层合板单元,对纤维缠绕复合材料弯管的强度进行分析,并进一步预测了弯管的破坏压力。通过与试验结果的对比,验证了分析模型和分析方法的有效性,为分析纤维缠绕弯管结构的强度提供了一种有效的途径,该方法可为纤维缠绕结构的设计提供有价值的参考。

2 弯管的强度分析

收稿日期:2003-05-09

\*国家“九五”重点攻关课题

崔海涛,1971 年出生,副教授,主要从事复合材料结构强度分析和优化设计工作

## 2.1 弯管结构

90°弯管,无碱玻璃纤维/环氧树脂缠绕单向板材料常数如表1所示。芯模结构尺寸为:内径为315

mm,弯头曲率半径为457.5 mm。直管段长度为150 mm,缠绕角为78.6°,纱片宽度为20 mm。

表1 材料常数

Tab.1 Material properties

拉伸模量/ GPa		泊松比	面内剪切模量 / GPa	拉伸强度/ MPa		压缩强度/ MPa		纵横剪切强度 / MPa
纵向	横向			纵向	横向	纵向	横向	
31.0	6.88	0.297	2.84	767	19.8	392	69.8	16.3

## 2.2 弯管强度的有限元分析

将弯管视为层合板,铺层为 $[(\pm)_4]_T$ ,弯管最薄处为6.2 mm,最薄处铺层的平均厚度为0.775 mm。将整个弯管共划分为9 264个节点和3 234个单元。其中弯管复合材料结构部分采用SHELL99单元类型,其直管段沿圆周方向划分为44个单元,沿轴向划分为10个单元,两段直管段共分为880个单元;90°弯管段沿圆周方向分为44个单元,沿母线方向划分为48个单元,共计分为2 112个单元。弯管的两个端部为金属板,厚度为10 mm,采用SHELL63单元,共划分为242个单元。有限元分析的网格如图1所示。

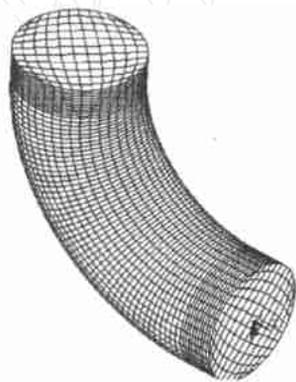


图1 弯管的有限元网格图

Fig.1 Finite element mesh of pipe

由于90°弯管段在缠绕过程中,其厚度和缠绕角随着坐标的变化而变化。因此,在生成单元时,采用直接生成方法,即先依次给出各节点的坐标,然后由节点生成单元,并指定单元的厚度和铺层角度。每一个单元即为一个层合板,其铺层均为8层,每一层的厚度和缠绕角取纤维缠绕芯模时布满一次的平均厚度和平均缠绕角。

弯管两端固支,内压为0.6 MPa。应力分析结果如图2和图3所示。图2给出了弯管轴向应力的分布图,从图2中可以看出,轴向应力最大值为6.06 MPa,位于最大曲率处,较小的轴向应力位于曲率最小处,而且轴向应力沿弯管由中心向两端逐渐减小。图3给出了弯管周向应力的分布,其中最大的周向应力为16 MPa,最小的周向应力为5.99 MPa,均位于弯管中与直管相连接处附近。

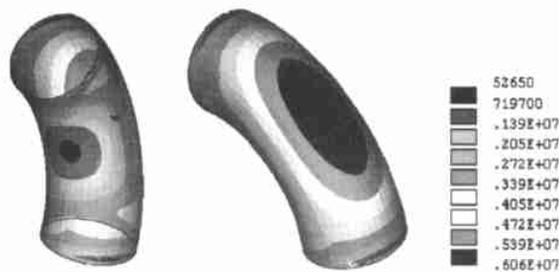


图2 弯管轴向应力分布图

Fig.2 Axial stress of pipe



图3 弯管周向应力分布图

Fig.3 Tangential stress of pipe

图4为弯管在0.6 MPa内压作用下,最大应力判据值的分布图。从图4中可以看出,此时结构的最大应力判据值为0.8808,位于弯管中与直管相连接处附近。

接处附近。在弯管曲率最大处附近,最大应力判据值为 0.741。

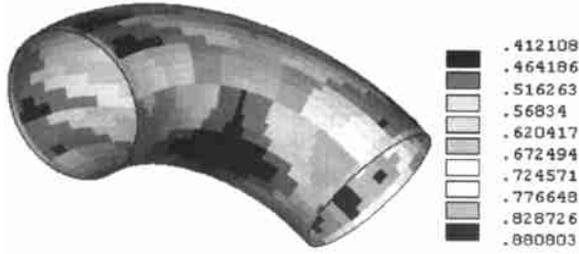


图 4 最大应力判据值分布图

Fig. 4 Distribution of the maximum stress criterion

### 2.3 弯管应变分析结果的比较

为验证弯管应变分析结果的合理性,将弯管在 0.6 MPa 内压载荷作用下的应变分析结果与试验值(试验测量点如图 5 所示)列于表 2 和表 3 中。

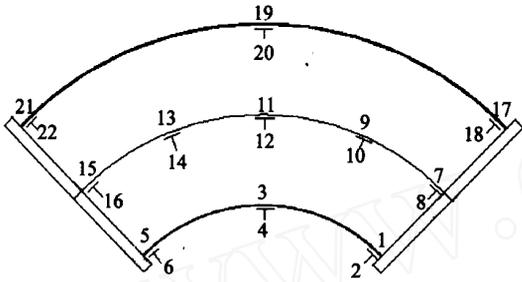


图 5 应变测量点位置图

Fig. 5 Distribution of strain-testing points

表 2 轴向应变分析结果的对比

Tab. 2 Comparisons of axial strain analysis with tests

测试点号	测试值/ %	计算值/ %	相对误差/ %
7	0.0220	0.0211	4.09
9	0.0525	0.0520	0.95
11	0.0554	0.0543	1.98
13	0.0585	0.0579	1.02
15	0.0283	0.0271	4.24

表 3 弯管周向应变分析结果的对比

Tab. 3 Comparisons of tangential strain analysis with tests

测试点号	测试值/ %	计算值/ %	相对误差/ %
8	0.0514	0.0532	3.50
10	0.0712	0.0723	1.54
12	0.0776	0.0775	0.13
14	0.0542	0.0551	1.66
16	0.0354	0.0368	3.95

从表 2 和表 3 可以看出,对纤维缠绕复合材料弯管的应变分析中,测试点 9~14 的应变的分析结果较为准确,其变化趋势与测试结果基本一致。在 0.6 MPa 内压载荷作用下,轴向应变和周向应变的最大的相对误差分别为 1.98 % 和 1.66 %。在弯管两端与直管段相连接处附近,有限元的分析结果与测试值之间误差较大,轴向应变和周向应变的最大相对误差分别为 4.24 % 和 3.95 %。误差较大的原因如下:

(1) 由于试验时,为防止管体径向变形过大,在管体直线段处制作了加强带,这使得有限元的分析模型与试件的物理模型之间存在一定的差别,因而分析结果误差较大;

(2) 由于端盖与管体为承插式连接,而管体的直管段较短,这势必使得端盖的受力情况影响到直管段以及与直管段相连接的弯管附近区域的应力分布,因此也使得有限元的分析结果与试件的实测数据有较大的出入。随着测试点远离直管段,应变的有限元分析结果与试件的实测数据比较一致。

### 2.4 弯管破坏载荷的预测方法

基于弹性结构假设,预测破坏载荷方法如下:

(1) 在复合材料弯管内表面施加任一内压载荷,对结构进行应力分析,给出应力判据值较大的几个节点的应力判据值;

(2) 在前一级载荷的基础上,施加任意载荷增量,对结构进行应力分析,仍给出相应几个节点上的最大应力判据值;

(3) 利用载荷与节点应力的线性相关的性质,预测结构的破坏载荷。

对该纤维缠绕复合材料弯管,给定内压 0.5 MPa,利用最大应力判据,计算出最大应力判据值较大的三个节点(节点号分别为 1 782, 2 589 和 2 611)的判据值分别为 0.659、0.625、0.617。由此,可求得最大应力判据值的平均值分别为 0.634。根据最大应力判据,当判据值为 1 时,结构处于临界破坏状态,此时弯管结构的破坏载荷为 0.788 MPa。

### 3 结论

(1) 采用最大应力准则基本上可以预测纤维缠绕复合材料弯管的破坏载荷。

(2) 无碱玻璃纤维/环氧树脂缠绕弯管的耐压值为 0.788 MPa,破坏基本上都发生在弯管的表面区

域,主要是由环向拉伸应力引起的。

(3) 由于弯管缠绕过程比较复杂,应将其应力、应变分析与结构的缠绕过程相结合,具体分析特征点的结构形式及其应力和应变值。

(4) 纤维缠绕复合材料弯管的连接形式对其结构中的应力分布影响较大;在对实际弯管结构进行应力、应变分析时应注意考虑弯管连接形式的影响。

#### 参考文献

1 李勇,肖军.纤维缠绕的曲面架空分析及其应用.宇

航材料工艺,2002;32(3):30~32

2 王春香,付云忠,杨汝清等.纤维缠绕过程中的张力分析.复合材料学报,2002;19(3):120~123

3 杨佑发,许绍乾.纤维缠绕圆柱壳前屈曲变形分析.重庆大学学报(自然科学版),2001;24(3):61~64

4 段登平,刘正兴,罗海安.纤维缠绕壳体材料非线性及大变形分析计算.复合材料学报,1999;16(1):142~148

5 陈汝训.纤维缠绕压力容器爆破压强计算.宇航材料工艺,2000;30(6):28~31

(编辑 任涛)

(上接第 11 页)

设计的必然趋势。金属盖板式防热结构克服了陶瓷瓦强度低、性脆和易吸水等缺点,其较高的强度和韧性使其在恶劣的环境中更加显示出结构的高度完整性和可重复使用性,其必将成为世界各国研究的重点。多层复合防热结构代表了今后各类可重复使用航天器防热结构的研究方向。它是综合利用多种防热结构和材料达到最佳的防热效果。总之,开展多种新型防热材料的研究以及多种防热材料在可重复使用航天器上并用,仍然是热防护系统设计的必由之路。

#### 参考文献

1 邱惠中.美国空天飞机用先进材料最新进展.宇航材料工艺,1994;24(6):5~9

2 王克秀.固体火箭发动机复合材料基础.宇航出版社,1994:173~203

3 Korb L J,Marant C A. X-33:Testing the future, part 2: hardware, tests, dates and delays. Spaceflight,1999;(41):212~217

4 Whetsone W D. Follow-on plan key to X-33 win. Aviation Week and Space Technology,1996;(8):20~22

5 Hinkle Karrie A,Staszak Paul R,Watts E T. Advanced ceramic materials development and testing,AIAA Paper 96-1426. In: 37<sup>th</sup> Structures,structure dynamics,and materials conference,1996:957~961

6 Gorton M K,Shideler J L,Webb G L. Static and aerothermal tests a superalloy honeycomb prepackaged thermal protection system. NASA,TP-3257,1993:50~51

7 黄品秋,王亚文.使神号防热系统内部多层隔热材料.国外导弹与航天运载器,1992;(10):50~55

8 Frank Bokulich. Heat shield ready for X-33. Aerospace Engineering,1999;(4):23~24

9 Bouslog S A,Moore B,Sawyer J W. X-33 metallic TPS tests in NASA-LaRC high temperature tunnel,AIAA Paper 99-1045. In: 37<sup>th</sup> AIAA aerospace sciences meeting and exhibit,1999:1~22

10 Maahs H G,Vaughn W I,Kowel W. Four advances in carbon-carbon materials technology. N94-30481,1994:1~15

(编辑 李洪泉)