

文章编号: 1000-4750(2011)11-0244-07

# 透镜式缠绕肋压扁缠绕过程数值模拟及参数研究

\*李瑞雄, 陈务军, 付功义, 赵俊钊

(上海交通大学空间结构研究中心, 上海 200030)

**摘 要:** 利用 ABAQUS 首先建立了透镜式复合材料缠绕肋整体压扁缠绕有限元模型, 实现了压扁缠绕非线性数值模拟分析, 并得到应力特征。进而对复合材料缠绕肋不同材料参数(铺设角度、层数、厚度)和不同几何参数(卷轴直径、肋圆弧直径、扁平率)下整体缠绕过程进行了数值模拟分析, 并比较分析各种情况下的应力特征, 得到各种情况下缠绕肋缠绕过程应力、应变及变化规律, 以及缠绕弯矩。该文对缠绕肋截面的合理设计及系统样机的研制具有指导和参考价值。

**关键词:** 透镜式缠绕肋; 压扁缠绕; 碳纤维复合材料; 材料铺设角度; 缠绕弯矩

中图法分类: V214 文献标志码: A

## NUMERICAL SIMULATION AND PARAMETRIC STUDY ON FLATTENING AND WRAPPING PROCESS OF LENTICULAR WRAPPED-RIB

\*LI Rui-xiong, CHEN Wu-jun, FU Gong-yi, ZHAO Jun-zhao

(Space Structures Research Centre-SSRC, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** By using ABAQUS package, a complete finite element model was built for the flattening and wrapping process of a CFRP composite lenticular wrapped-rib, the strong nonlinear numerical simulation analysis was achieved successfully, and the structural behavior was evaluated comprehensively. The parametric study was carried out subsequently through the analysis of a whole flattening and wrapping process, including different parameters for CFRP composite (ply lay-out, layers, thickness) and different geometrical parameters (reel diameter, sectional diameter, flatness ratio) of the lenticular wrapped-rib. The structural characteristics were investigated and compared for each case, and the essential behavior features were obtained for each case, such as the stress, strain, energy and wrapping moment. The numerical procedure and results are available to the rational design of the wrapped-rib and development of a prototype.

**Key words:** lenticular wrapped-rib; flattening and wrapping; CFRP laminates; ply lay-out; wrapping moment

透镜式截面缠绕肋是一种基本的空间可展构件, 其原理简单、轻质、收纳效率高、重复性精度高等优点, 可用于空间可展抛物面索网天线支撑肋、平面阵面框架、探测器等<sup>[1-7]</sup>。美国 NASA、欧洲 EADS(ESA)、前苏联、日本 ISAS 和 NASDA

等都曾研制此类结构<sup>[4-9]</sup>。美国 1974 年发射的 ATS-6 卫星采用透镜式缠绕肋索网天线, NASA JPL 并于 1980 年研制出口径为 55m 的缠绕肋天线样机<sup>[5-6]</sup>。

我国在“十五”期间便开展空间可展结构的研

收稿日期: 2010-03-16; 修改日期: 2010-05-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878128)

作者简介: \*李瑞雄(1981—), 男, 呼和浩特市人, 博士生, 从事空间结构、索网张力结构分析研究(E-mail: ruixiong\_li@126.com);

陈务军(1969—), 男, 重庆云阳人, 教授, 博士, 博导, 从事轻结构、超轻空间结构分析理论与技术研究开发(E-mail: cwj@situ.edu.cn);

付功义(1957—), 男, 浙江义乌人, 教授, 博士, 博导, 从事大跨空间结构非线性稳定特性研究、高空飞艇总体设计关键技术研究开发(E-mail: gyfu@situ.edu.cn);

赵俊钊(1981—), 男, 河北衡水人, 博士生, 从事大跨索张力结构分析理论研究(E-mail: zhaozhao0726@163.com).

究,并研制出缠绕肋、径向肋样机,并取得了一些技术成果<sup>[1,10]</sup>。董志强、段宝岩等对缠绕肋在展开状态下结构力学特性进行了研究<sup>[10]</sup>。William R<sup>[4]</sup>对缠绕肋截面几何特征和力学特征进行了分析。但缠绕肋过程数值模拟分析以及缠绕肋参数分析未见报道。本文将研究缠绕肋缠绕过程数值模拟分析方法和缠绕肋材料与几何参数特征,可为缠绕肋截面设计、系统样机设计提供参考。

### 1 缠绕肋缠绕展开机理

缠绕肋如图 1,肋由上下两肋片粘合而成,横截面中空、薄壁、对称透镜状。缠绕肋在展开后的稳定工作状态为透镜形截面,其收展过程是:由捆压机构施加肋片挤压力,使肋两凸面弹性屈曲成为扁平肋,实际中在卷轴带动下同时压扁卷进,可绕中心卷轴切向偏转弯曲缠绕实现缠绕收拢折叠。可反转电机,被压扁平状的肋释放弯曲产生的应变能逐渐回弹展开。

如图 1,肋片缠绕过程中上片肋的外表面与卷轴外表面接触由点、线逐渐扩展为面,肋上下片内表面之间由两边向中间逐渐接触扩展,肋片产生大位移使截面逐渐压扁直至完全接触,但肋片本身处于弹性小应变阶段,可恢复截面形态。

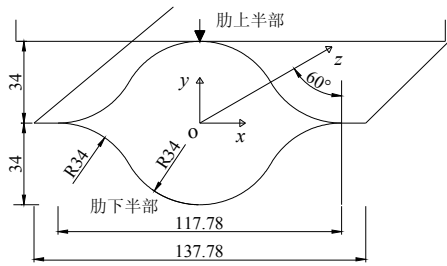


图 1 缠绕肋截面 /mm

Fig.1 Cross-section of a wrapped-rib

### 2 缠绕肋缠绕数值模拟分析

#### 2.1 有限元分析模型和难点

采用图 1 截面缠绕肋建立有限元模型及边界条件如图 2。肋片采用碳纤维复合材料,如表 1。

铺设与几何特征如图 3(a),采用 4 层 90°/0°/90°/0° 铺设,每层厚 0.1mm,肋圆弧半径 34mm,上下部肋片之间用粘接胶模拟,厚 0.1mm,宽 10mm,肋长 850mm,卷轴、外壳和导向轮采用解析刚体模拟,卷轴直径 200mm,长 100mm,卷轴与外壳导向之间间隙 5mm。肋与卷轴初始连接处之间间隙 2mm。

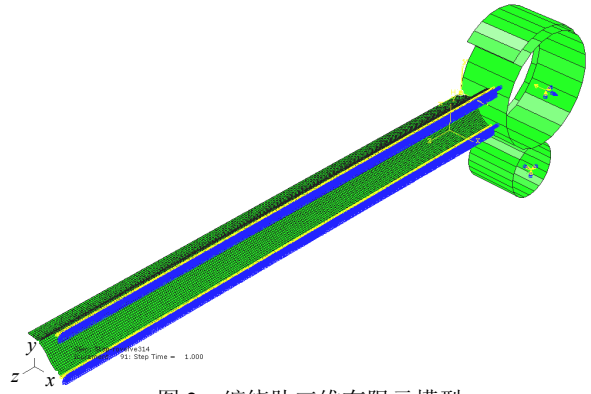


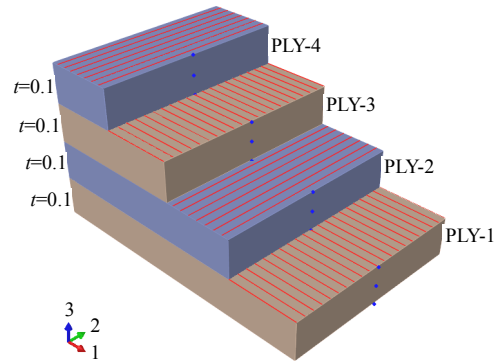
图 2 缠绕肋三维有限元模型

Fig.2 3-D finite element model of wrapped-rib

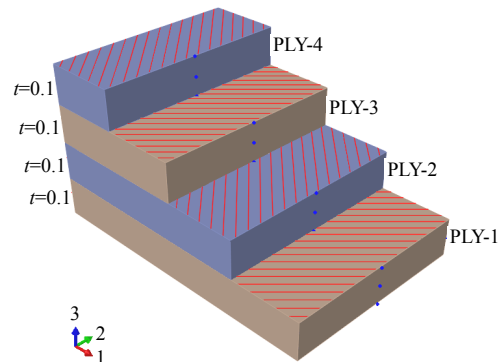
表 1 肋片复合材料参数

Table 1 Material parameters of composite rib

参数	复合材料肋	粘剂
$E_1/\text{GPa}$	140.0	
$E_2/\text{GPa}$	9.40	0.06
$E_3/\text{GPa}$	9.40	
$\mu_{12}$	0.31	
$\mu_{13}$	0.31	0.30
$\mu_{23}$	0.33	
$G_{12}/\text{GPa}$	4.60	
$G_{13}/\text{GPa}$	4.6	-
$G_{23}/\text{GPa}$	3.0	
$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1600	1600



(a) 肋四层 90°/0°/90°/0° 铺设



(b) 肋四层 45°/-45°/45°/-45° 铺设

图 3 肋片各层材料铺设布置图

Fig.3 Ply lay-out of wrapped-rib material

取与  $y$  轴对称 1/2 模型, 肋采用 S4R 单元<sup>[11]</sup> 划分为 22283 个单元, 粘结胶采用 cohesive 粘结单元划分为 1049 个。

缠绕模拟分析主要分 3 步: 第 1, 卷轴带动肋压扁, 使肋端部边缘刚好接触,  $x$  向拉伸位移  $-12.9\text{mm}$ ; 第 2, 实现肋整体移动与导向轮切线平齐; 第 3, 卷轴带动肋逐渐缠绕卷进。

建模时使用 \*Rigid Body 建立卷轴外表面及连接参考点和控制点, 采用 \*Kinematic coupling 建立肋水平段上下边与参考点的运动耦合约束, 上下肋片与 cohesive 单元表面采用 \*tie 约束, 采用 \*Connector Section, 建立 hinge 连接单元, 可用相对自由度为 4, 约束其余自由度, 建立卷轴与肋的连接。设置允许不连续迭代次数为 24 次。

### 2.2 有限元数值模拟结果分析

因模型单元、节点多, 且有强几何非线性和复杂的四面接触非线性, 在配置内存 4GB, CPU4 核(频率 10GHz)的 HP3650 服务器上完成缠绕一周的模拟分析, 需耗时约 21h。

缠绕肋在宽度方向与  $y$  轴对称, 因此取 1/2 肋宽如图 4, 沿截面 1、截面 2、截面 3 进行数值特征分析。截面 1(缠绕弧度 3.83)以 1/2 肋边缘为  $x$  坐标零点, 截面 2、截面 3 为周向, 以连接边为零度起顺时针转, 根据截面 1 最大应力处进行周向分析, 此处取 51mm 处。肋初始宽度为 137.78mm, 高度为 34mm, 压扁后宽度为 162.35mm, 高度为 0.4mm。肋缠绕过程应力由卷轴带动拉力与弯曲应力综合作用的结果。

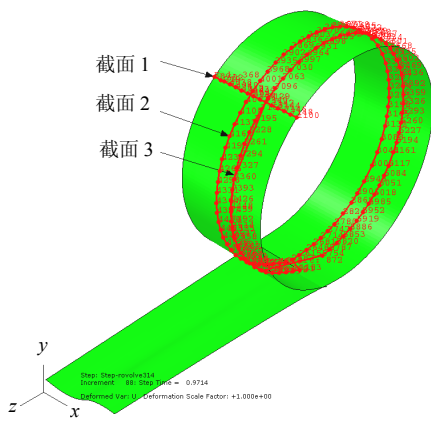


图 4 缠绕肋分析截面及单元  
Fig.4 The section and element of numerical analysis along wrapped-rib

图 5 给出了完成缠绕一周后肋下半部等效应力云图, 沿缠绕方向呈带状分布。图 6 给出了缠绕肋上半部各层沿截面 1 等效应力, 第 4 层最大, 第 2 层、第 4 层分布规律一致, 在拐点两侧较大, 圆弧

段均匀, 第 1 层、第 3 层分布规律一致, 应力分布也较均匀。图 7 给出了肋宽度向 51mm 位置(应力最大), 沿截面 3 一周内等效应力-缠绕角度关系, 由于肋端部和连接的特殊性, 此处应力变化大, 在缠绕开始和结束应力变化大, 缠绕中段均匀, 在周向上 2 层、4 层应力较大, 分布均匀。

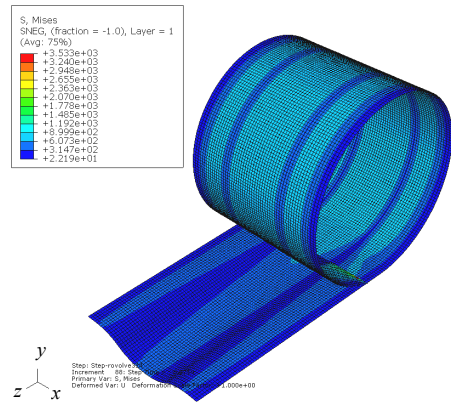


图 5 肋缠绕一周后下半部等效应力云图  
Fig.5 Mises stress of the bottom half wrapped-rib after wrapping a circle

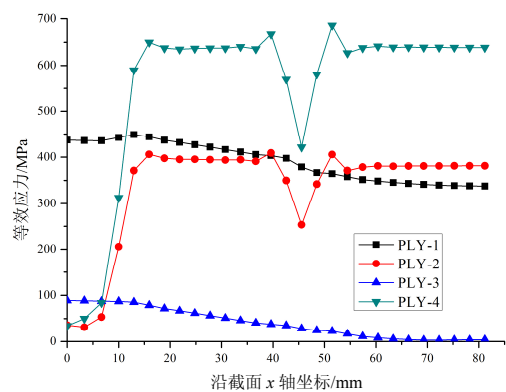


图 6 缠绕肋上半部各层沿截面 1 等效应力图  
Fig.6 Mises stress of the top half wrapped-rib at Section-1

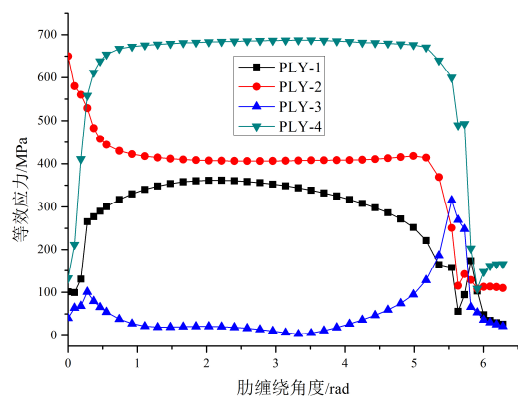


图 7 缠绕肋上半部各层沿截面 3 等效应力图  
Fig.7 Mises stress of the top half wrapped-rib at Section-3

图 8 给出了沿截面 1 各层剪应力 S12 分布, 在 36mm 位置最大, 1 层、3 层分布一致, 2 层、4 层

分布一致。图 9 给出了在肋宽度向 36mm 位置沿截面 2 一周内剪应力分布，端部和导向轮位置连接的特殊性，剪应力最大，后逐渐减小变向，在 3.1 弧度位置接近 0。

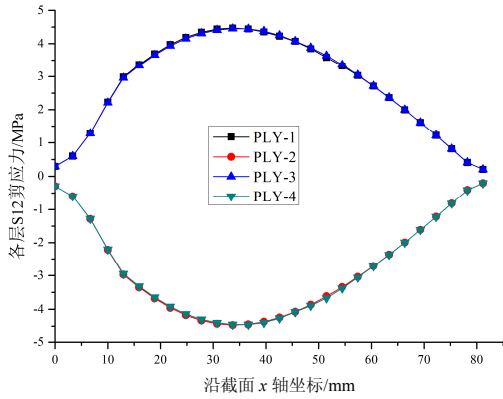


图 8 缠绕肋上半部各层沿截面 1S12 剪应力图

Fig.8 Shear stress S12 of the top half wrapped-rib at Section-1

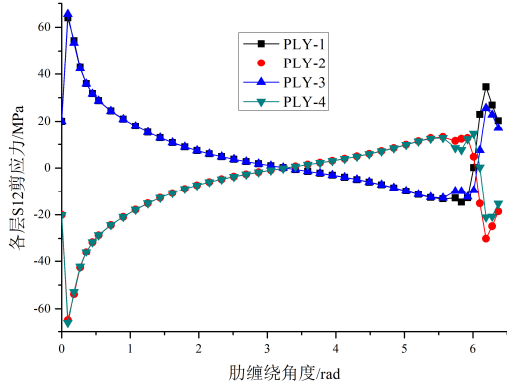


图 9 缠绕肋上半部各层沿截面 2S12 剪应力图

Fig.9 Shear stress S12 of the top half wrapped-rib at Section-2

### 3 缠绕肋参数分析

基于第 2 节分析方法和定义的特征截面、单元，本节进行缠绕肋几何、材料参数分析，评价其对缠绕过程缠绕肋应力、应变、缠绕弯矩的影响，包括复合材料铺设层数和角度、缠绕卷轴直径、缠绕肋圆弧直径、厚度、扁平率。缠绕肋缠绕的数值模拟各参数下耗时约 20h~30h。沿图 4 所示截面 1 和周向截面(截面 1 应力最大处)进行数值特征各参数比较分析。

#### 3.1 缠绕肋材料铺设角度和层数

采用图 1 截面，缠绕肋分别采用 3 层、4 层、5 层铺设，总厚度都为 0.4mm，每层厚度分别为 0.13mm、0.1mm、0.08mm，分别分析了各层材料铺设为 90°/0°/90°/0° 和 45°/-45°/45°/-45°，如图 3，材料、模型及边界条件同前。

图 10 给出不同材料铺设和层数肋上半部截面 1

最大等效应力，在拐点处应力小，在拐点两侧附近较大，材料 4 层 90°/0° 铺设应力最大，材料 45°/-45° 铺设中间圆弧段应力大于两侧圆弧段应力。

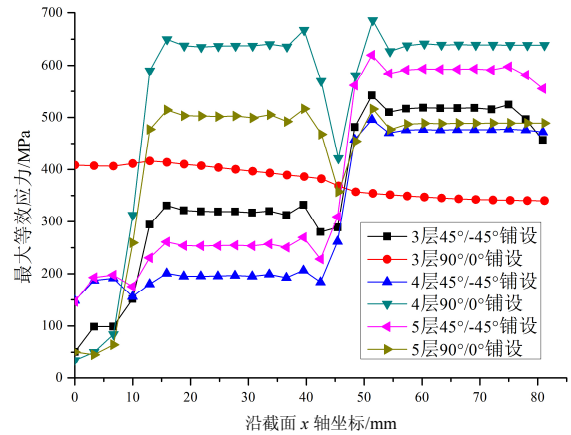


图 10 不同铺设和层数肋上半部截面 1 最大等效应力图

Fig.10 Max Mises stress of the top half wrapped-rib at Section-1 with various layers and ply lay-out

图 11 给出不同铺设和层数肋上半部截面 3(宽度向 51mm)最大等效应力与缠绕角度关系，由于肋端部连接的特殊性，在连接处应力最大，中间段较均匀，材料 4 层 90°/0° 铺设应力最大，材料 3 层 90°/0° 铺设应力最小。

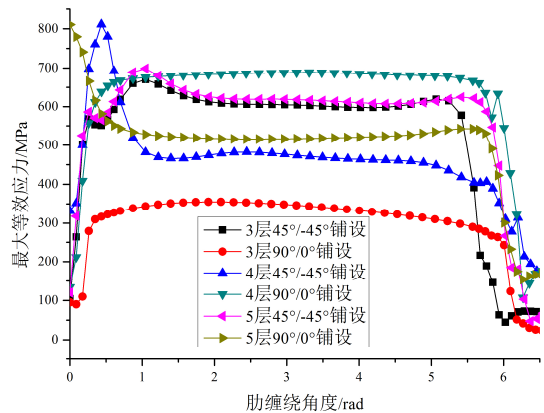


图 11 不同铺设和层数肋上半部截面 3 应力-角度关系图

Fig.11 The relation of Mises stress-wrapping radian at the top half wrapped-rib Section-3 with various layers and ply lay-out

#### 3.2 缠绕肋卷轴直径

采用图 1 截面，材料 90°/0°/90°/0° 四层铺设，厚度 0.4mm，分别实现了卷轴直径 150mm、200mm、250mm、300mm、350mm 肋压扁缠绕的数值模拟分析，材料、模型及边界条件同前。

图 12 给出不同卷轴直径肋上半部截面 1 最大等效应力，随着卷轴直径增大两侧圆弧最大等效应力略有减小，由于中间圆弧与两侧圆弧初始弯曲方向相反，且材料厚度向 4 层不对称铺设，缠绕肋压扁后两段圆弧变化规律相反，但几组分析结果整体



沿截面变化规律一致。

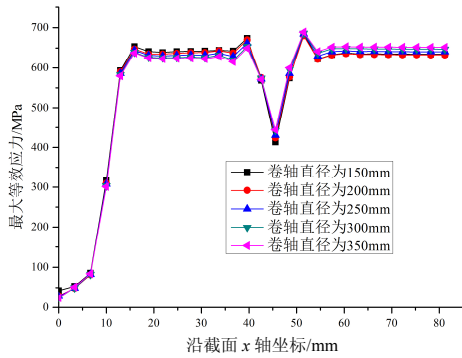


图 12 不同卷轴直径肋上半部截面 1 最大等效应力图  
 Fig.12 Max Mises stress of the top half wrapped-rib with various wrapping radius

图 13 给出不同卷轴直径肋上半部截面 3(宽度向 51mm)最大等效应力与缠绕角度关系,在连接处最大,中间段应力相差很小,变化规律一致。

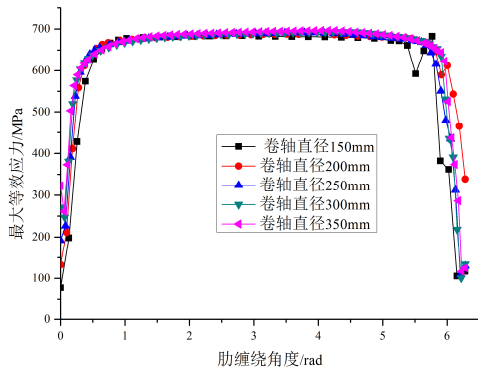


图 13 不同卷轴直径肋上半部截面 3 应力-角度图  
 Fig.13 The relationship of Mises stress-wrapping radian at the top half wrapped-rib Section-3 with various wrapping radian

图 14 给出不同卷轴直径缠绕弯矩-缠绕角度关系,随着卷轴直径增加使缠绕肋弯曲所需力较小,

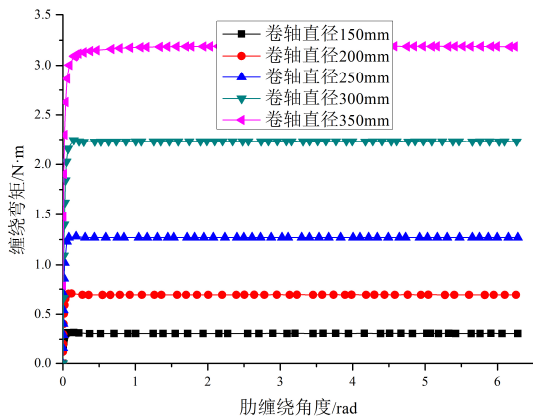


图 14 不同卷轴直径电机缠绕弯矩-缠绕角度关系图  
 Fig.14 Wrapping moment-radian relationship of motor with various wrapping radian

但卷轴直径增大力臂增大,电机综合压扁缠绕弯矩随卷轴直径在一定范围内增大还是呈增大趋势。

### 3.3 缠绕肋截面圆弧直径

采用图 1 截面,材料 90°/0°/90°/0° 四层铺设,厚度 0.4mm,分别实现了肋截面圆弧直径为 34mm、51mm、68mm、102mm 压扁缠绕数值模拟分析,材料、模型及边界条件同前。

图 15 给出不同圆弧直径肋上半部截面 1 最大等效应力,每种直径变化规律与前一致,且随着肋圆弧直径增大应力减小,直径小于 50mm 后应力增加迅速,应避免采用。

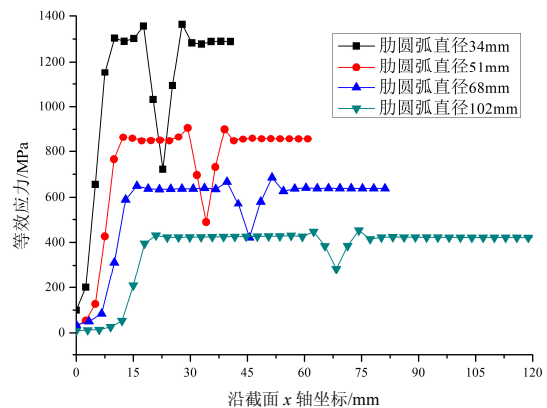


图 15 不同圆弧直径肋上半部截面 1 最大等效应力图  
 Fig.15 Max Mises stress of the top half wrapped-rib at Section-1 with various sectional radius

图 16 给出了不同圆弧直径肋上半部截面 2 应力-角度关系,在连接处及端部应力较大且有波动,中间段分布均匀,随着圆弧直径增大应力减小。图 17 给出了肋不同直径缠绕弯矩-缠绕角度关系,随着圆弧直径增大缠绕弯矩增大,分布较均匀。

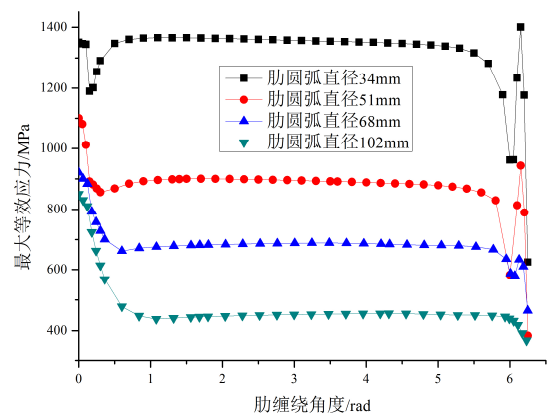


图 16 不同圆弧直径肋上半部截面 2 应力-角度图  
 Fig.16 The relationship of Mises stress-wrapping radian at the top half wrapped-rib Section-2 with various sectional radius

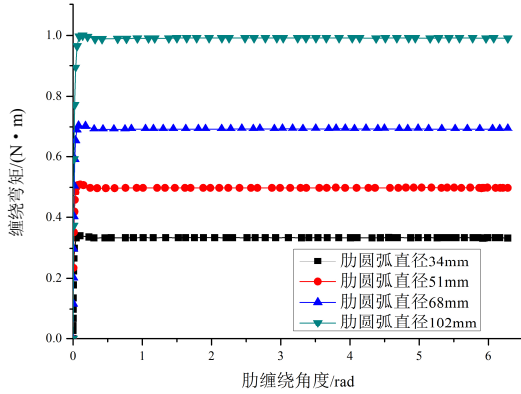


图 17 肋不同圆弧直径电机缠绕弯矩-缠绕角度关系图  
Fig.17 Wrapping moment-radian relationship of motor with various sectional radian

### 3.4 缠绕肋厚度

采用图 1 截面, 材料  $90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$  四层铺设, 分别实现了肋厚度为 0.32mm, 0.4mm, 0.48mm, 0.6mm 压扁缠绕数值模拟分析, 每层厚度分别为 0.08mm, 0.1mm, 0.12mm, 0.15mm, 材料、模型及边界条件同前。

图 18 给出了肋不同厚度上半部截面 1 最大等效应力, 随着肋厚度增加应力增大, 厚度达 0.6mm 时, 应力较大, 变化规律同前。图 19 给出了不同

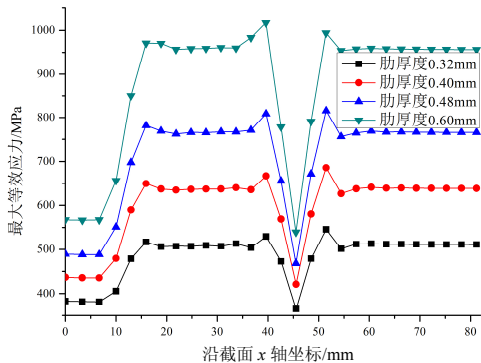


图 18 不同厚度肋上半部截面 1 最大等效应力图  
Fig.18 Max Mises stress of the top half wrapped-rib at Section-1 with various thickness

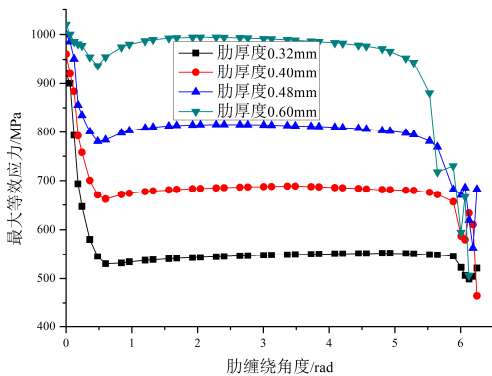


图 19 不同厚度肋上半部截面 3 应力-角度关系图  
Fig.19 The relationship of Mises stress-wrapping radian at the top half wrapped-rib Section-3 with various thickness

厚度肋上半部截面 3 最大等效应力, 在连接处及端部应力较大且有波动, 随着肋厚度增大应力增加, 中间段分布均匀。

图 20 给出了肋不同厚度电机缠绕弯矩与缠绕角度关系, 随着肋厚度增大缠绕弯矩增大。

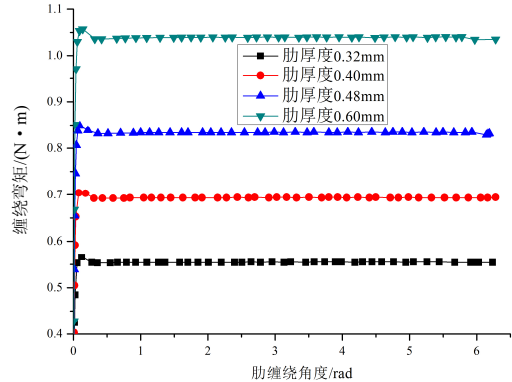


图 20 肋不同厚度电机缠绕弯矩-缠绕角度关系图  
Fig.20 Wrapping moment-radian relationship of motor with various thickness

### 3.5 缠绕肋扁平率

采用图 21 截面形式, 取  $R=50\text{mm}$ ,  $B=10\text{mm}$ , 扁平率  $f = \lambda/R$  取 0.4、0.5、0.6。根据几何关系可推导出:

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{\sqrt{4 - (1 + f)^2}}{2} \right) \quad (1)$$

$$\lambda = R - \frac{W}{2}, \quad H = 2\sqrt{4R^2 - (R + \lambda)^2} \quad (2)$$

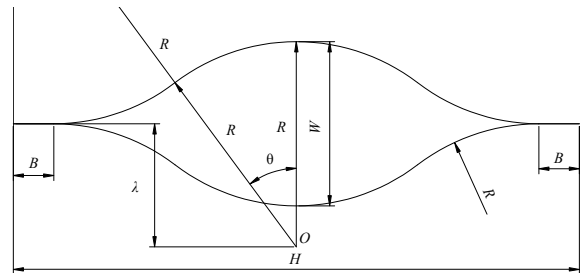


图 21 肋横截面图  
Fig.21 Cross-section of a wrapped-rib

由式(1)、式(2)可得  $\theta$  分别为  $45.57^\circ$ 、 $41.41^\circ$ 、 $36.87^\circ$ ,  $H$  分别为 162.82mm、152.29mm、140mm。材料  $90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$  四层铺设, 厚度 0.4mm, 其它条件同前。实现了 3 种不同扁平率下缠绕肋的数值模拟分析。

图 22 给出了不同扁平率肋上半部截面 1 最大等效应力, 在肋宽度方向端部应力最大, 在中间圆弧拐点处最小, 拐点两侧应力有波动, 中间圆弧段应力较小, 随着扁平率增加肋宽度方向端部应力减

小。与前比较可见,扁平率增大对截面上等效应力的减小作用明显。

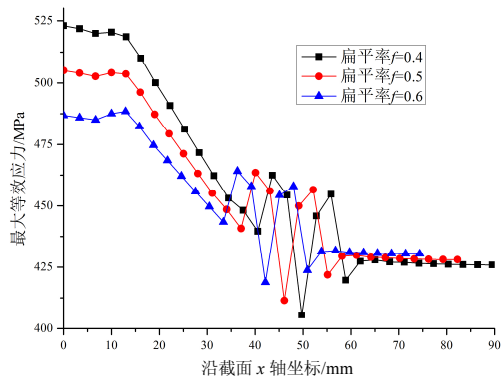


图 22 不同扁平率肋上半部截面 1 最大等效应力图  
Fig.22 Max Mises stress of the top half wrapped-rib at Section-1 with various flatness of lenticular cross section

图 23 给出了肋不同扁平率电机缠绕弯矩-缠绕角度关系,随着扁平率增加缠绕弯矩减小,分布较均匀。

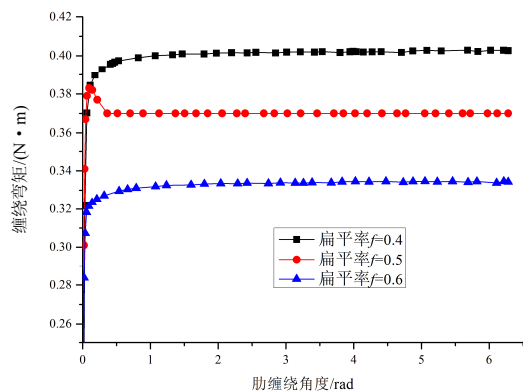


图 23 肋不同扁平率电机缠绕弯矩-缠绕角度关系图  
Fig.23 Wrapping moment-radian relationship of motor with various thickness flatness of lenticular cross section

## 4 结论

通过对缠绕肋建立三维有限元模型,可以采用 S4R 壳单元实现复合材料缠绕肋缠绕一周的数值模拟分析,缠绕模拟分析既可得到缠绕肋缠绕过程各层纤维应力、应变特征,又可得到电机启动弯矩和缠绕弯矩。对缠绕肋截面几何、材料参数的研究可以得到各参数对各层纤维应力、应变和缠绕弯矩的影响特征,可为缠绕肋截面的合理设计和整体样机的研制提供依据。基于此数值分析法,缠绕肋收展显式动力特征分析,以及试验尚在研究。

## 参考文献:

- [1] 陈务军. 空间可展结构体系与分析导论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2006: 1—60.  
Chen Wujun. Deployable space structures and analysis theory [M]. Beijing: China Astronautics Press, 2006: 1—60. (in Chinese)
- [2] Woods A A, Wade Jr W D. An approach toward design of large diameter offset-fed antennas [C]. The 20th AIAA Structures Conference. Chicago, USA, 1979.
- [3] Mark E Lemak, Arun K Banerjee. Comparison of simulation with test of deployment of a wrapped-rib antenna [C]. The 35th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures Conference. Orlando, Florida, 1994.
- [4] William R Brett, Agnes Gregory S. Lightweight deployable sunshade concepts for passive cooling for space-based telescopes [C]. The 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures Conference, Schaumburg, IL, 2008.
- [5] Murphey Thomas W. Historical perspectives on the development of deployable reflectors [C]. The 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures Conference, Palm Springs, California, 2009.
- [6] Higgins John E, Wegner Peter M, West Barry Van. Post-buckling test response and analysis of fiber composite grid-stiffened structures [C]. The 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures Conference, Palm Springs, California, 2009.
- [7] Freeland R E, Helms R G, Mikulas M M. The applicability of past innovative concepts to the technology for new extremely large space antenna/telescope structures [P]. SAE International: 06ICES-224, 2006.
- [8] Chiara Bisagni, Potito Cordisco. Testing of stiffened composite cylindrical shells in the post-buckling range until failure [J]. AIAA Journal, 2004, 42(9): 1806—1817.
- [9] Chiara Bisagni. Experimental buckling of thin composite cylinders in compression [J]. AIAA Journal, 1999, 37(2): 276—278.
- [10] 董志强, 段宝岩. 星载天线缠绕肋条的力学特性研究 [J]. 西安电子科技大学学报, 2001, 28(6): 755—758.  
Dong Zhiqiang, Duan Baoyan. Study of the behavior mechanics of the extendible satellite antenna with the type of twinning ribs [J]. Journal of Xi'an University, 2001, 28(6): 755—758. (in Chinese)
- [11] ABAQUS Compony. Analysis user's manual [EB]. <http://pc-200812161526:2080/v6.9/index.html>, 2010.