

**编者按** C/E 复合材料网格缠绕结构是先进材料、先进结构型式及先进工艺成型技术相结合的结构,是航天结构的重要发展方向。此方面的内容将分模具设计、结构设计、开口加强及一体化设计四部分进行介绍。模具设计方面,运用数字化设计技术对网格结构及模具进行三维建模,实现了数字化模装及结构空间协调,给出了切实可行的模具加工方法。结构设计方面,对不同的网格结构采用有限元方法进行了承载能力计算,并进行了静力试验。结合具体结构的功能应用,提出了网格结构型式的选择原则。开口加强方面以无开口结构为目标,为复合材料壁板开口处结构的补强设计提供了高效率的加强方案。一体化设计方面,提出了一体化设计设想,给出了一体化研制流程,并对各个环节进行了探讨。以上内容是作者多年设计生产实践经验的总结,具有较强的工程应用价值。

## C/E 复合材料网格缠绕结构三维建模与模具设计

提亚峰<sup>1,3</sup> 董波<sup>2</sup> 郭永辉<sup>3</sup> 王婧超<sup>3</sup>

(1 西北工业大学航天工程学院, 西安 710072)

(2 航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

(3 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

**文 摘** 通过对圆柱螺旋线和圆锥螺旋线参数方程的推导,实现了网格结构及模具的三维建模。三维模型的建立,可实现结构空间协调,缩短设计周期,节省研制经费,提高生产效率。在此基础上提出了可行的金属模具设计方案,找到了切实可行的模具加工方法,并在工程中加以应用,取得了较好效果。

**关键词** C/E 复合材料网格缠绕结构, 三维建模, 模具设计及加工

### 3D Simulation of C/E Composite Trellis Wound Structure and Mold Design

Ti Yafeng<sup>1,3</sup> Dong Bo<sup>2</sup> Guo Yonghui<sup>3</sup> Wang Jingchao<sup>3</sup>

(1 College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

(2 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

(3 Beijing Institute of Astronautical System Engineering, Beijing 100076)

**Abstract** The solid model of the C/E composite trellis wound structure and the mold of the structure were created by a 3D design software through deduction of the cylindrical helix and conical spiral parameter equation. Space correspondence can be realized on the base of the 3D model of the structure. It can reduce the development cycle and the development cost. It also can increase efficiency. The mold design method is feasible and is a kind of practical mold processing method. This method has been applied in project design.

**Key words** C/E composite trellis wound structure, Three-dimension simulation, Mold design

#### 1 前言

将 CAD/CAM 技术应用于缠绕成型工艺中,可以提高生产效率,降低废品率。复合材料网格缠绕结构充分体现了复合材料结构设计与工艺密不可分的特点,为得

到合格的复合材料网格缠绕结构,设计时必须同时考虑成型工艺问题。本文对内加筋网格结构筋条空间轨迹方程进行推导,并运用所推导的空间轨迹方程建立网格结构的三维模型及模具三维模型。同时提出可行的金

属模具设计方案,对膨胀量的计算、螺旋角的修正及节点处的设计进行讨论,得到了切实可行的方法<sup>[1-7]</sup>。

## 2 圆柱螺旋线与圆锥螺旋线参数方程的推导

新一代火箭要求数字化设计与制造,完成箭体结构的数字化三维建模及协调。

C/E 复合材料网格缠绕结构根据受力特征和实际应用情况可设计成不同网格形式,例如,60°网格横向(正三角)、60°纵向、120°纵向、斜置正交、正置正交等网格形式,如图1所示。

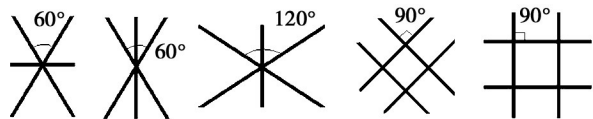


图1 不同的网格形式

Fig.1 Different forms of grid

圆柱段内加筋正置正交网格结构和圆锥段内加筋正置正交网格结构,因其纵筋为母线方向的直线,环筋为垂直母线方向的圆环,在 PRO/E 软件中通过拉伸、旋转即可实现圆柱段和圆锥段内加筋正置正交网格结构的三维建模。

60°横向、60°纵向、120°纵向、斜置正交等圆柱段内加筋网格结构,除纵筋和环筋外,其余筋均为圆柱螺旋线。

设有直角三角形纸片的一个锐角为  $\alpha$ , 将此纸片卷在一正圆柱面上,使角  $\alpha$  的直角边与圆柱的母线重合,角  $\alpha$  的斜边则在圆柱面上盘旋上升,这样在圆柱面上就形成一条空间曲线,这条空间曲线就是圆柱螺旋线。设正圆柱的半径为  $r$ , 并设正圆柱底圆圆心为坐标原点、角  $\alpha$  的顶点为正圆柱底圆周与  $x$  轴的交点,  $y$  轴与  $x$  轴都位于正圆柱底圆周内,  $z$  轴沿正圆柱中心线指向正圆柱顶端,  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴构成右手系坐标,如图2所示。

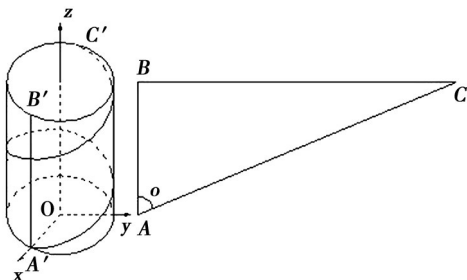


图2 圆柱螺旋线简图

Fig.2 Cylindrical spiral curve

圆柱螺旋线关于  $\theta$  的参数方程如下:

$$\begin{cases} x = r \cos \theta \\ y = r \sin \theta \\ z = r \cot \alpha \cdot \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\alpha$  为螺旋角,可定义为母线与曲线切线的夹角。

由圆柱螺旋线参数方程的推导过程,可得到 60°横

向、60°纵向、120°纵向、斜置正交等圆柱段内加筋网格结构的三维模型创建方法,其主要思路是:

- (1) 做圆柱面的切平面,在切平面内通过初始点做一条线,使其与圆柱面母线的夹角为  $\alpha$ ;
- (2) 将此直线包络到圆柱面上,形成筋条轨迹曲线;
- (3) 给定筋条截面,沿此轨迹曲线扫描形成筋条特征。

但对于 60°横向、60°纵向、120°纵向、斜置正交等圆锥段内加筋网格结构,除纵筋和环筋外,其余筋均为圆锥螺旋线。由于圆锥各处曲率不一致,适用于圆柱段的方法不再适用。为实现正确有效的三维建模设计和数控加工制造,对圆锥螺旋线轨迹方程推导如下。

如图3所示,母线与曲线切线的夹角为螺旋角  $\alpha$ , 半锥角为  $\beta$ 。取空间曲线上任意一点  $A(x, y, z)$ , 极坐标  $A(r, \theta, z)$ , 并假设坐标  $z$  关于  $\theta$  的参数方程为  $z = f(\theta)$ , 则极坐标与直角坐标的几何关系为:

$$\begin{cases} x = r \cos \theta \\ y = r \sin \theta \\ z = f(\theta) \end{cases} \quad (2)$$

$$\tan \beta = \frac{r}{z} \quad (3)$$

$$m = \tan \beta \quad (4)$$

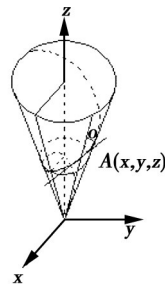


图3 圆锥螺旋线简图

Fig.3 Conical spiral curve

将式(3)和(4)代入式(2),得到通过  $A$  点的母线的方向向量的坐标为  $(x, y, z)$ :

$$\begin{cases} x = mf(\theta) \cos \theta \\ y = mf(\theta) \sin \theta \\ z = f(\theta) \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)对参数  $\theta$  求导,得到通过  $A$  点且与曲线相切的直线的方向向量的坐标为  $(x', y', z')$ :

$$\begin{cases} x'(\theta) = m[f'(\theta) \cos \theta + f(\theta)(-\sin \theta)] \\ y'(\theta) = m(f'(\theta) \sin \theta + f(\theta) \cos \theta) \\ z'(\theta) = f'(\theta) \end{cases} \quad (6)$$

将式(3)和(4)代入两直线的夹角公式,求得通过  $A$  点的母线的方向向量和通过  $A$  点且与曲线相切的直线方向向量之间夹角  $\alpha$  的余弦:

$$\begin{aligned} \cos\alpha &= \frac{\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}}{|\mathbf{A}| |\mathbf{B}|} = \frac{X_1 X_2 + Y_1 Y_2 + Z_1 Z_2}{\sqrt{X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2} \sqrt{X_2^2 + Y_2^2 + Z_2^2}} \\ &= \frac{m^2 [f(\theta) f'(\theta) \cos^2\theta - f^2(\theta) \sin\theta \cos\theta] + m^2 [f(\theta) f'(\theta) \sin^2\theta + f^2(\theta) \sin\theta \cos\theta] + f(\theta) f'(\theta)}{\sqrt{m^2 f^2(\theta) \cos^2\theta + m^2 f^2(\theta) \sin^2\theta + f^2(\theta)} \sqrt{m^2 [f'(\theta) \cos\theta - f(\theta) \sin\theta]^2 + m^2 [f'(\theta) \sin\theta + f(\theta) \cos\theta]^2 + f'^2(\theta)}} \\ &= \frac{(m^2 + 1) f(\theta) f'(\theta)}{\sqrt{(m^2 + 1) f^2(\theta)} \sqrt{(m^2 + 1) f'^2(\theta) + m^2 f^2(\theta)}} \end{aligned} \quad (7)$$

其中向量  $\mathbf{A} (X_1, Y_1, Z_1)$ ,  $\mathbf{B} (X_2, Y_2, Z_2)$  为两直线的方向向量。

等式两边平方并整理,得:

$$\sin^2\alpha \sec^2\beta f'(\theta)^2 = \cos^2\alpha \cdot \tan^2\beta f^2(\theta) \quad (8)$$

整理并开方,得:

$$f'(\theta) = \frac{\sin\beta}{\tan\alpha} f(\theta) \quad (9)$$

方程的解为:

$$f(\theta) = c e^{\frac{\sin\beta}{\tan\alpha} \theta} \quad (10)$$

设  $r_0$  为截锥体前端面的半径,  $\rho_0$  为坐标原点到截锥体前端面的母线长度,并假设圆锥螺旋线如图 3 所示,经过截锥体前端面与  $XOZ$  面的交点,则:

$$r_0 = f(\theta_0) \tan\beta = c e^{\frac{\sin\beta}{\tan\alpha} \theta_0} \tan\beta \quad (11)$$

将  $\theta_0 = 0^\circ$  代入式(11)得:

$$c = r_0 \cot\beta = \rho_0 \sin\beta \cot\beta = \rho_0 \cos\beta \quad (12)$$

将式(12)代入式(10)得:

$$f(\theta) = \rho_0 \cos\beta e^{\frac{\sin\beta}{\tan\alpha} \theta} \quad (13)$$

综合式(2)和式(13),可得出圆锥段螺旋线三维曲线方程关于  $\theta$  的参数方程:

$$\begin{cases} x = \rho \sin\beta \cos\theta \\ y = \rho \sin\beta \sin\theta \\ z = \rho \cos\beta \\ \rho = \rho_0 e^{\frac{\sin\beta}{\tan\alpha} \theta} \end{cases} \quad (14)$$

### 3 截锥段 60° 横向网格结构的三维建模

圆锥段螺旋线三维曲线方程能够解决复合材料网格结构壳体三维建模及模具(硬模成型)数控加工问题。利用圆锥段螺旋线三维曲线方程,在 PRO/E 中沿螺旋筋条轴线创建圆锥段螺旋曲线,再草绘筋条截面,沿圆锥段螺旋曲线完成螺旋筋截面扫描,就可完成螺旋筋条的三维建模。模具是在结构筋条所在位置加工筋槽。

图 4 为一个完成建模的 60° 横向(正三角)网格结构截锥段壳体的三维模型。

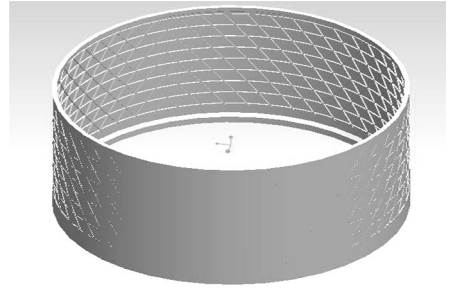


图 4 60° 横向(正三角)网格结构截锥段壳体的三维模型

Fig. 4 3D model of isogrid truncated conical shell

## 4 复合材料缠绕成型网格结构的模具设计

### 4.1 复合材料缠绕成型网格结构模具的基本要求

由于复合材料构件必须用专门设计制造的模具来使材料的复合过程和构件的成型过程同时完成,制件固化成型后几乎不再作任何加工,其内部结构、力学性能应达到设计要求,表面质量、外表尺寸应满足装配协调要求,不允许强迫装配,因而成型复合材料模具的优劣对制品的外形及内部质量起着决定性作用。模具的设计及制造是复合材料结构成型工艺的基础。

在满足复合材料结构模具基本要求的基础上,复合材料网格结构的模具设计需要满足如下要求:模具材料的线胀系数能满足脱模要求,制作成形后尺寸也能符合图纸要求,并尽可能避免复合材料产生过多残余应力。模具材料应具有较高的耐热性,在较高温度和压力下,保持足够低的粗糙度和气密性,且能长期工作。模具壁厚不宜太厚,使模具成型温度均匀,以减少制件热应力,提高制件质量。模具材料具有较高的热导率,这样模具在加温时传热迅速、模具升温快,从而减少模具和制件的固化周期,使热压力利用率提高。

模具是保证该产品尺寸及形面精度的关键,是复合材料构件制作的重要组成部分,并关系到复合材料构件制造、固化、脱模等工艺过程的难易。

### 4.2 复合材料缠绕成型正三角网格结构金属模具的基本组成

金属模具成型的产品尺寸控制精确,生产过程中大部分产品为金属模具热压罐外加压式复合材料结构固化成型方式。

柱段与锥段的金属成型模具组成相同,均由芯模、阳模、轴、法兰、固定套、阴模、压环等组成。以60°横向(正三角)网格结构截锥段壳体的模具为例,介绍成型模具组成。其中图5为锥段模具三维模型图,图6为锥段产品缠绕成型时模具各零件装配三维模型图,图7为锥段产品固化时模具各零件装配三维模型图。

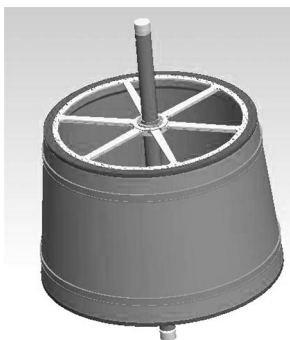


图5 锥段模具三维模型

Fig. 5 3D model of truncated conical mold

结构缠绕成型时,前后法兰连接在芯模前后端面,阳模拼装于芯模外侧壁,轴穿过法兰,由键和固定套固定。

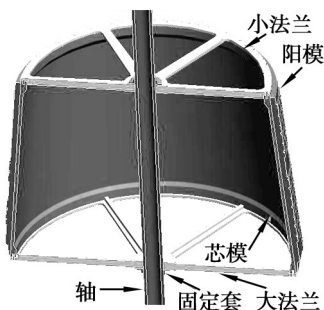


图6 锥段产品缠绕成型时模具各零件装配三维模型

Fig. 6 3D model of assembly truncated conical mold when structure is trellised

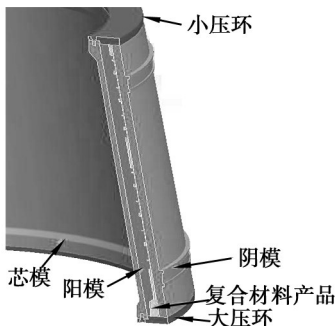


图7 锥段产品固化时模具各零件装配三维模型

Fig. 7 3D model of assembly truncated conical mold when structure is cocured

固化时,在压力作用下两个压环与阴模共同挤压产品外表面使产品固化成型。

对模具进行三维建模,可缩短设计周期,方便模具生产,提高生产效率。

### 4.3 金属模具阳模的膨胀量计算及螺旋角的修正

膨胀量按下式计算:

$$\Delta l = l_0 \times (\alpha_m - \alpha_c) \times (T_{gel} - t) \quad (15)$$

式中, $\Delta l$ 为模具膨胀量; $l_0$ 为产品尺寸; $\alpha_m$ 为模具材料线胀系数; $\alpha_c$ 为产品线胀系数; $T_{gel}$ 为树脂凝胶点温度; $\Delta\alpha = (\alpha_m - \alpha_c)$ 为线胀系数差,按铝合金线胀系数与碳材料线胀系数的差计算。

正置正交网格结构热膨胀成型后,节点处环筋切线与纵筋的夹角仍为90°;而正三角形网格结构热膨胀成型后,由于膨胀量的存在,且模具长度的线胀系数与直径方向上的线胀系数不同,节点处环筋切线与螺旋筋切线及双向螺旋筋切线间的夹角不再是60°。为使产品满足设计要求,需通过修正螺旋角以解决此问题。由于柱段考虑膨胀量后仍是柱段,而锥段考虑膨胀量后,锥段半锥角发生变化,因此柱段与锥段螺旋角的修正方法不同。

柱段螺旋角的修正方法是:将模具柱段展开,在一个三角网格内,三角形底边长的一半与高的比即是螺旋角的正切  $\tan\alpha$ 。

锥段螺旋角的修正方法是:由圆锥段螺旋线三维曲线关于  $\theta$  的参数方程可知:

$$h = z = \rho_0 \cos\beta e^{\frac{\sin\beta}{\tan\alpha}\theta} \quad (16)$$

设同一环筋上两个相邻节点之间的间距为  $n^\circ$ , 并设圆锥螺旋线如图3所示,经过截锥体前端面与  $XOZ$  面的交点。当  $\theta = 0^\circ$  时,在三筋条的交点上,当  $\theta = n^\circ/2$  时,正好在下一个三筋条的交点上。设  $\Delta h_1$  为产品在  $\theta = n^\circ/2$  与  $\theta = 0^\circ$  之间的高度差, $\Delta h_2$  为模具在  $\theta = n^\circ/2$  与  $\theta = 0^\circ$  之间的高度差,则  $\Delta h_1$  与  $\Delta h_2$  之间应只差一个膨胀量  $\Delta l$ 。即:

$$\Delta h_1 - \Delta h_2 = \Delta l \quad (17)$$

设产品的螺旋角为  $\alpha_1$ ,半锥角为  $\beta_1$ ,上端面距原点距离为  $h_1$ ,模具的螺旋角为  $\alpha_2$ ,半锥角为  $\beta_2$ ,上端面距原点距离为  $h_2$ ,则:

$$\Delta h_1 = \rho_1 \cos\beta_1 e^{\frac{\sin\beta_1}{\tan\alpha_1} \frac{n^\circ}{2 \times 180^\circ} \cdot \pi} - \rho_1 \cos\beta_1 e^0 = h_1 e^{\frac{\sin\beta_1}{\tan\alpha_1} \frac{n^\circ}{2 \times 180^\circ} \cdot \pi} - h_1 \quad (18)$$

$$\Delta h_2 = \rho_2 \cos\beta_2 e^{\frac{\sin\beta_2}{\tan\alpha_2} \frac{n^\circ}{2 \times 180^\circ} \cdot \pi} - \rho_2 \cos\beta_2 e^0 = h_2 e^{\frac{\sin\beta_2}{\tan\alpha_2} \frac{n^\circ}{2 \times 180^\circ} \cdot \pi} - h_2 \quad (19)$$

综合式(17)-式(19),仅  $\alpha_2$  为未知量,可求解。

生产实践证明,如果不对螺旋角进行修正,螺旋筋的交叉点与环筋之间的距离误差会在长度方向积累。在840 mm长度内螺旋筋的交叉点与环筋之间的距离误差沿长度方向积累达到3 mm,对结构网格节点处的成型产生不利影响。

(下转第43页)