

纤维缠绕的曲面架空分析及其应用

李 勇 肖 军

(南京航空航天大学材料科学与技术学院 南京 210016)

摘 要 针对诸如壳体—喷嘴一体化的固体火箭发动机过渡段、环壳燃料箱等复杂型面的缠绕,应用曲面理论和力学分析方法,研究了纤维缠绕的成型压力与曲面几何的关系,进而确定了一般曲面、负高斯曲面、环壳以及过渡段缠绕过程的纤维架空条件与判据,为复杂型面的缠绕成形奠定基础。

关键词 复合材料,纤维缠绕,缠绕张力,曲面架空

Fiber Suspension in Filament Winding and Its Application

Li Yong Xiao Jun

(College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aviation and Aerospace Nanjing 210016)

Abstract In accordance with filament winding on complicated curved surface, such as the transition section between shell and nozzle of solid rocket engine and the torus of fuel tank, the correlation between formation pressure in the process of filament winding and mould surface geometry is analyzed by using mechanics and geometric theories. The criteria for fiber suspension in filament winding are determined and several application examples for general curved surface, curved surface with negative Gauss curvature, torus and transition section are given for filament winding on complicated curved surface.

Key words Composite, Filament winding, Tension of filament, Fiber suspension

1 引言

缠绕复合材料结构具有比强度高、高度自动化成型和质量稳定可靠的突出优点,在航天器结构应用中越来越多,如固体火箭发动机、导弹发射筒、轨道站燃料箱及各类气瓶、卫星承力筒、太阳能电池帆板等。随着缠绕技术的进步,缠绕结构已不限于以往的正回转体,如壳体—喷嘴一体化的固体火箭发动机、环壳燃料箱等。复杂形体的缠绕不仅需要先进的缠绕设备和缠绕软件,而且对缠绕工艺提出了新课题。对于曲面变化较大会出现缠绕成型压力变化影响制品质量,而对于非正回转面会出现纤维架空而无法实施缠绕,如环壳内侧及壳体—喷嘴一体化的固体火箭发动机过渡段,若缠绕角过小将出现

架空。一些研究者对个别形体的制件进行了简单几何分析^[1~4],但系统的分析及给出的一般判据尚未见报道。

本文应用曲面理论和力学分析方法,研究了纤维缠绕的线压力与曲面几何的关系,进而确定了缠绕过程的纤维架空条件与判据。

2 曲面、缠绕张力与成型压力分析

对于缠绕成型,成型压力系由缠绕张力在成型面上产生的正压力提供。成型压力是缠绕张力和曲面几何的函数,这是纤维缠绕工艺力学分析的核心所在。

为了使分析具有一般性,取任一曲面上的一个微面,如图1所示,曲面上的主曲率线分别为 u 和

收稿日期:2001-09-25;修回日期:2002-01-07

李勇,1970年出生,硕士,主要从事航空航天复合材料成形工艺的研究工作

(对于一般回转体, u 为经线、 v 为纬线), 曲面法线为 n ; 其上 ds 为纱线微元, 与经线 u 的夹角即缠绕角为 θ 。

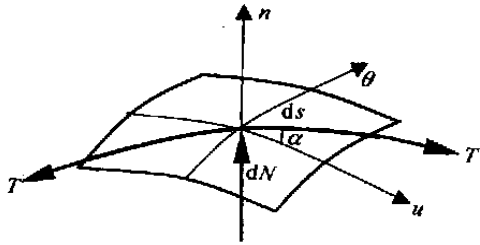


图1 分析微元面

Fig. 1 Analysis of the cured micro-surface

根据曲面微分几何^[5], 纱线微元 ds 的曲率为

$$k = k_u \cos^2 \theta + k_v \sin^2 \theta \quad (1)$$

式中, k 为曲率, 下标 u 、 v 分别代表经线、纬线和缠绕角为 θ 的纱线。

考察纱线在缠绕张力 T 与曲面对纱线的约束抗力 dN 下的平衡关系, 并定义 dN/ds 为纱线的单位长度的线抗力, 则有

$$\frac{dN}{ds} = k T \quad (2)$$

若纱片宽度为 b , 成型表面由于纱线缠绕张力产生的成型压力为

$$p = \frac{dN}{bd s} = T(k_u \cos^2 \theta + k_v \sin^2 \theta) \quad (3)$$

分析上式, 成型压力 p 是曲面特性、缠绕张力和缠绕角的函数。对于多线型缠绕, 为保证成型压力一致, 应根据缠绕角确定不同的缠绕张力。

3 曲面架空的一般判据

分析曲面上纤维架空, 从几何意义上讲是纤维不再密合成型表面, 从力学上讲则是架空段成型压力为 0, 据此原理, 在式(3)中令 p 为 0, 则得到纤维架空的一般关系式

$$k_u \cos^2 \theta + k_v \sin^2 \theta = 0 \quad (4)$$

和不架空判据

$$k_u \cos^2 \theta + k_v \sin^2 \theta > 0 \quad (5)$$

分析式(4), 有三种情况:

(1) $k_u = k_v = 0$, 曲面为平面, 无论缠绕角多大, 缠绕张力不产生成型压力;

(2) $k_u < 0$ 、 $k_v < 0$, 相当于在负曲面上缠绕, 无论缠绕角多大, 均产生架空;

(3) $k_u \cdot k_v < 0$, 曲面为负 GAUSS 面, 当满足

$$\tan^2 \theta = -\frac{k_u}{k_v} \quad (6)$$

时, 曲面产生纤维架空。这种曲面是最常见的, 如环壳的内侧、不同直径间的过渡段等。

4 负 GAUSS 面架空举例

为从几何上充分理解纤维架空, 考察如图 2 所示的负 GAUSS 面, 图中主曲率线 u 的曲率 k_u 和主曲率线 v 的曲率 k_v 符号相反, 即 $k_u \cdot k_v < 0$ 。当缠绕角 θ 很小时, 即满足式(6)时, 纤维将架空在模具的表面, 这时缠绕张力不产生成型压力。

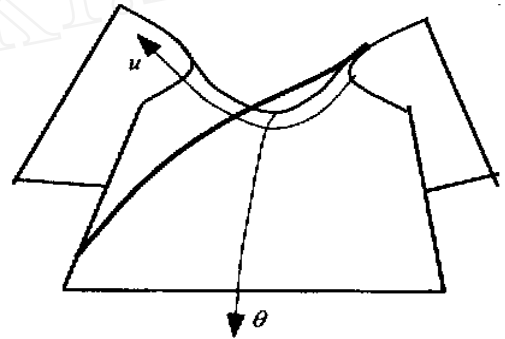


图2 负 GAUSS 面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of curved surface with negative GAUSS curvature

考察环壳内侧, 如图 3 所示, R 为弯管中心线与曲面回转轴线之间的距离, r 为弯管半径。则

$$k_u = r$$

$$k_v = R - r$$

则架空缠绕角界限为

$$\tan \theta = \sqrt{\frac{r}{R-r}} \quad (7)$$

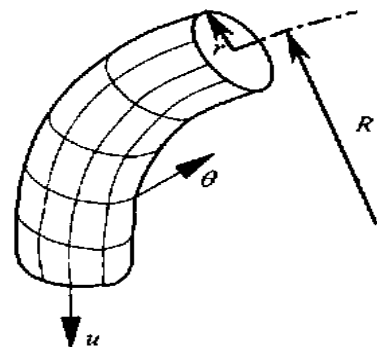


图3 环壳示意图

Fig. 3 Geometric drawing of the torus

再考察柱面与单叶双曲面(可以保证曲面一阶连续)间的过渡段,如图4所示。柱面半径为 r_0 ,单叶双曲面开口尺寸参数为 t ,单叶双曲面方程为

$$r = \sqrt{\frac{r_0^2 y^2}{t^2} + r_0^2} \quad (8)$$

则过渡段主曲率为

$$k_u = t^2 / r_0$$

$$k = r_0$$

因此架空缠绕角界限为

$$\text{tg} \quad \frac{t}{r_0} \quad (9)$$

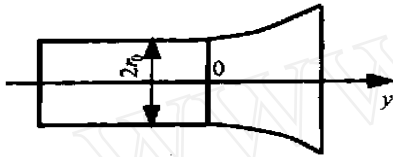


图4 过渡段示意图

Fig. 4 Geometric drawing of the transition section

5 结论

(1) 纤维缠绕工艺中,成型压力 p 是曲面特性、缠绕张力和缠绕角的函数。对于多线型缠绕,为保证成型压力一致,应根据缠绕角确定不同的缠绕张

力。

(2) 当 $k_u = k = 0$ 时,曲面为平面,无论缠绕角多大,缠绕张力不产生成型压力;当 $k_u < 0, k < 0$ 时,相当于在负曲面上缠绕,无论缠绕角多大,均产生架空,也不产生成型压力;当 $k_u \cdot k < 0$ 时,曲面为负 GAUSS 面,要产生成型压力,缠绕角必须大于某一值 $[\alpha = \text{tg}^{-1}(\frac{k_u}{k})^{1/2}]$,缠绕角小于该值,则纤维架空。

参考文献

- 1 冷兴武. 纤维缠绕原理. 济南: 山东科技出版社, 1990:116~117
- 2 Mazumdar S K, Hoa S V. Analytical modes for low cost manufacturing of composite components by filament winding. Journal of Composite Materials, 1995;29(11):1515~1541
- 3 Lauder A J. Manufacture of rocket motor cases using advanced filament winding processes. Materials and Manufacturing Processes, 1995;10(1):75~87
- 4 刘荣梅. 复合材料弯管缠绕数值分析及计算机辅助设计. 南京航空航天大学硕士论文, 2000:6~20
- 5 吴大任. 微分几何讲义. 北京: 人民教育出版社, 1981:227~233

(编辑 马晓艳)

热胀法复合材料成型新工艺

复合材料产品的固化成型,一般采用真空袋热压罐法。热压罐造价高、设备大、要求技术熟练的人员操作,产品质量难以保证。

本成果热胀成型法以热胀材料为芯膜,刚体材料为阴模,复合材料置于芯膜与阴模之间,当模具受热后,由于芯膜的体积膨胀受到阴模的限制,而在模腔内产生压力,实现对复合材料固化过程的加压。靠芯膜热胀产生压力,无需外压源,只需热源即可。此法适合于复合材料产品的共固化。如直升机的水平尾翼、卫星结构件等复合材料制品,就是采用热胀成型法制造成型的。热胀压力与芯膜几何形状、芯膜材料的物理性能和力学性能、凝固能力、叠层压实程度、凝胶温度和固化温度、模具组合系统的间隙、各种辅料和模具的热胀性能等因素相关。选择适宜的芯膜材料是实现热胀成型的关键所在。本成果对有机硅橡胶的应用性能进行了研究并取得可喜的进展。

通过应用研究试验,说明 R-10301 硅橡胶可以用做热胀成型法的芯膜,在 120 ~ 130 下,热胀压力可达到 0.72 MPa ~ 0.85 MPa。而制成的芯膜,经重复使用后,热压力下降。实验证明,经过 20 次使用,在 125 下热胀压力下降了 13.84%,而 164 时下降 4.25%。采用热胀成型法成型形状较复杂的复合材料制品,比使用真空袋热压罐法能更好地保证工艺质量。

· 李连清 ·

宇航材料工艺 2002 年 第 3 期