

复合材料锥壳螺旋向铺层自动铺带成型方法

李勇 肖军 还大军 文立伟

(南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京 210016)

文 摘 提出了一种基于两步法的复合材料锥壳螺旋向铺层自动铺带的成型方法,对锥壳螺旋向铺层几何原理进行了分析并对预浸带的预切割进行了设计和验证,对预切割装置进行了原理方案设计并利用 CATIA 软件进行了自动铺带验证。结果表明:两步法锥壳螺旋向铺带成型技术方案合理可行,预切割装置可以实现预浸带的切割、转录,采用通用铺带头即可以完成螺旋向铺层的自动铺带过程,采用锥壳等厚度铺叠、均匀加压和降低废料率等措施,大大提高制品质量并降低了构件加工成本。

关键词 复合材料锥壳,自动铺带,预浸带,铺带头,预切割设备

Laminating Method of Manufacturing Spiral-Path Plies in Composite Conical Shell by Automated Tape Laying

Li Yong Xiao Jun Huan Dajun Wen Liwei

(College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract A laminating method of manufacturing spiral-path plies in composite conical shell by automated tape laying with two steps was introduced, the geometry of spiral-path plies in conical shell was analysed, and cutting parameters of prepreg tape were designed and verified. The precutting equipment of prepreg tape was designed in theory and the manufacturing process of composite conical shell with spiral-path plies by automated tape laying was verified by CATIA. Results show that the cutting and the shift of prepreg tape can be completed by the precutting equipment, the manufacturing process of composite conical shell can be achieved by normal automated tape laying head, with this method and the device, spiral-path plies in composite conical shell can be manufactured automatically with uniformity of the thickness and even pressurization, low scrap, high quality and low cost.

Key words Composite conical shell, Automated tape laying, Prepreg tape, Automated tape laying head, Precutting equipment

1 引言

圆锥型壳体复合材料构件在军工及民用领域有着广泛的应用。如火箭发动机喷管、各类运载器与载荷的过渡承力锥、人造卫星碳纤维缠绕的锥壳、飞机的雷达罩等^[1]。

目前,用于航空航天领域的高性能复合材料锥壳的主要制造方法包括预浸布手工铺叠成型^[2]和纤维缠绕成型^[3]。一般 θ 向采用手工铺叠,其他方向采用缠绕。但缠绕工艺需要满足落纱稳定、纤维连续缠绕、提供正缠绕压力等三个前提条件,造成纤维方向

设计自由度受限、成型厚度不均,且不能进行凹曲面缠绕,成型压力也随曲面路径和纤维路径的变化而变化,难以保证所设计的成型压力。为了改进圆锥型壳体复合材料构件的工艺,提高质量,文献 [4] 针对锥壳 θ 向铺层提出了自动铺带工艺方法,本文主要针对锥壳螺旋向铺层,在原有的缠绕工艺基础上提出基于自动铺带成型工艺方法^[5],在自动铺带成型过程中,采用预浸带设计剪裁、定位、铺叠、压辊均匀加压等数控技术,实现等厚度铺叠、均匀加压、降低废料率等措施,提高制品质量、降低成本。

收稿日期:2008-04-21

基金项目:国防科工委重点项目(D03200605408)

作者简介:李勇,1970年出生,副教授,主要从事先进复合材料自动化成型工艺、特种夹层结构工艺及性能研究。E-mail:lyong@nuaa.edu.cn

2 锥壳螺旋向铺层几何原理及设计

2.1 几何原理分析

以右手法则建立笛卡儿坐标系,以锥体顶点为原点,锥体的表示方式如图 1 所示。

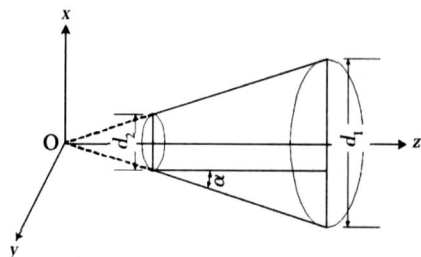


图 1 锥壳的笛卡儿坐标系

Fig 1 Descartes coordinate of conical shell

以锥体顶点为原点,以图 1 中锥体与面 xOz 相交的母线为 u 轴,建立平面坐标系,将锥壳展开。图 2 即为锥壳沿该条母线展开后得到的扇形展开示意图。

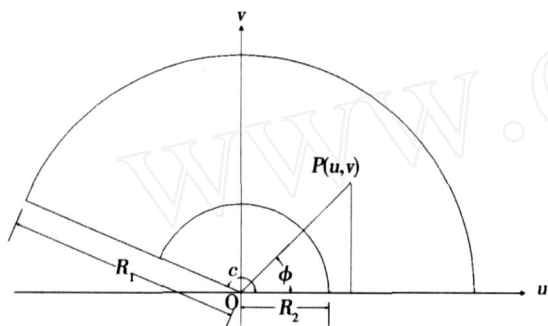


图 2 锥壳展开面示意图

Fig 2 Fanlike expandedness of conical shell

展开面上的各参数与锥体圆柱坐标系上各参数的关系如下:

$$c = 2 \sin \alpha \quad (1)$$

$$R_1 = \frac{d_1}{c} \quad (2)$$

$$R_2 = \frac{d_2}{c} \quad (3)$$

根据锥壳为回转面的特性,可以得到,以锥壳小端处同一圆周上相邻且间隔角度相同的起点上出发的、以螺旋角为 β 的螺旋线中任意相邻的两条螺旋线所围的锥体曲面相同。根据锥壳上的测地线在其展开面上为一条直线且其测地线为锥体螺旋线的特性,可以得到:其两条相邻的螺旋线所围的锥壳曲面在其展开图上可以扩展成一个直角梯形。

以锥壳上两条相邻的螺旋线分别为其直角边与斜边,将其覆盖在锥壳表面,第二片直角梯形预浸带片的直角边与第一片的斜边所在的螺旋线重合,如此重复铺放,直至将锥壳表面完全覆盖,从而得到锥壳宇航材料工艺 2008年 第 5期

的螺旋向铺层,其前两片直角梯形预浸带片的铺放方式如图 3 所示。

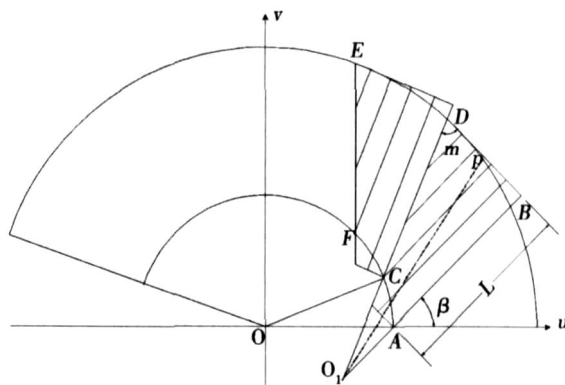


图 3 螺旋向铺层直角梯形预浸带片的排列方式示意图

Fig 3 Arrangement of right angle trapezoid shaped prepreg tape on to conical shell with spiral path

根据图 3 可以得到,螺旋线通过锥壳上某点时,螺旋线与该点处母线的夹角即螺旋角的角度是随该点处锥壳圆周半径的变化而变化的,所以螺旋向铺层为变铺放角铺层,其物理性能随锥壳半径的变化而变化。自动铺带成型锥壳螺旋向铺层解决了锥壳缠绕过程中产生的稳定缠绕与等壁厚缠绕不能同时实现的问题,可以得到质量较稳定的锥壳制品。

2.2 预浸带的切割设计

预浸带的切割参数包括:切割角度 m ,切割长度 L ,下底边 $|EF|$,上底边 $t - |EF|$ 。切割角度的定义:本文提出的切割角度是指预浸带切割轨迹与等宽预浸带纱束方向之间夹角的余角 m ,如图 4 所示。

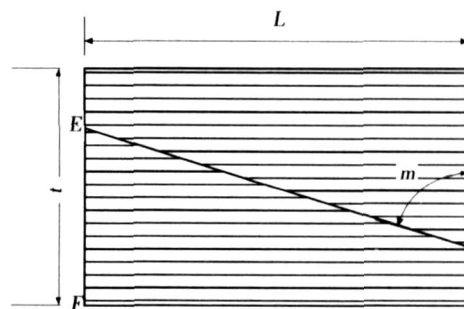


图 4 等宽预浸带的切割示意图

Fig 4 Schematic drawing of full-width tape cutting

预浸带的切割角度 m ,切割长度 L 与预浸带带宽 t ,锥壳扇形展开图的外径 R_1 、内径 R_2 之间的关系如下:

$$R_1 c \operatorname{tg} m + R_2 \cos m = t \quad (0 < m < \frac{\pi}{2}) \quad (4)$$

$$L = R_1 - R_2 \sin m \quad (5)$$

$$|EF| = R_1 \operatorname{ctgn} \quad (6)$$

根据图 3, 直线 AB、CD 为从锥体小径端圆周上出发的上两条相邻角度为 α 且起始螺旋角 β 相同的螺旋线在锥壳展开面上的表示形式, P 点为角平分线 O_1P 与锥壳展开面外圆的交点。根据各点的坐标分量可以求出 $|O_1A|$ 、 $|O_1B|$ 、 $|O_1D|$ 和 $|O_1P|$ 。设等宽预浸带的带宽为 t , 可以得到:

(1) 如果 $|O_1P| < |O_1D| \sin m$

$$|O_1A| \operatorname{ctgn} + |O_1D| \cos m = t \quad (7)$$

$$L = |O_1D| \sin m - |O_1A| \quad (8)$$

则有: 切割得到的直角梯形预浸带片的上底长为 $|O_1A| \operatorname{ctgn}$; 下底长为 $t - |O_1A| \operatorname{ctgn}$ 。

(2) 如果 $|O_1P| > |O_1D| \sin m$

$$|O_1A| \operatorname{ctgn} + |O_1B| \operatorname{ctgn} = t \quad (9)$$

$$L = |O_1B| - |O_1C| \sin m \quad (10)$$

则有: 切割得到的直角梯形预浸带片的上底长为 $|O_1C| \cos m$; 下底长为 $t - |O_1C| \cos m$ 。

一般情况下, 只有当螺旋线的起始螺旋角很小的情况下才可能发生 (2) 情况, 而一般螺旋角的范围为 $30^\circ \sim 60^\circ$; 故当初始螺旋角 $> 15^\circ$ 时, 情况 (2) 可以不予考虑。

根据 t 的值与公式 (1) ~ (10), 可以求得预浸带的切割角度 m 与切割长度 L 。该方程如直接计算, 不易求解, 本文采用牛顿法求方程, 并编写程序段, 以一定的精度要求来得到满足精度要求的近似值, 得到预浸带的切割角度 m 与切割长度 L 。

根据公式 (1) ~ (3) 可以知道, 一片直角梯形预浸带片可以覆盖相邻的两条螺旋线之间的曲面。

$$= \frac{2R_2 \operatorname{COA}}{d_2} = \frac{(c - 2m)}{c} \quad (11)$$

可以得到: 铺满一层螺旋向铺层需要的直角梯形预浸带片的个数 N 为: $N = \frac{2}{\alpha}$ 。根据前面求出的需要的直角梯形预浸带片的个数 N , 当 N 为整数时, 直角梯形预浸带片的参数如上文所述。如果 N 为非整数, 则取最接近且小于 N 的整数 N_1 条, 所需预浸带片的个数为 $N_1 + 1$ 条。最后一条的切割参数求法如下:

最后一条直角梯形预浸带片所覆盖的锥壳曲面的锥体转角为:

$$\alpha_1 = 2\alpha - N_1 \alpha \quad (12)$$

根据几何关系可以得到, 最后一片直角梯形预浸带片的切割角度为:

$$m_1 = \frac{\alpha_1}{2} - \frac{c_1}{2} \quad (13)$$

预浸带的切割长度 L_1 , 根据公式 (4) ~ (6) 中的切割参数的求解方法, 取 $m = m_1$ 时, 求得其切割长度 L_1 及切割成的直角梯形预浸带片的上底长和下底长。

2.3 预浸带的切割算例验证

根据上述方法, 编程计算出直角梯形预浸带片的切割参数, 然后按照图 3 所示的直角梯形预浸带片的排列方式将其铺放至锥壳的扇形展开面上, 即可以验证所求的直角梯形预浸带片的参数是否满足要求。

以大端直径 500 mm、小端直径 200 mm、半锥角 30° 的锥壳为例, 以带宽为 100 mm 的预浸带从锥壳小端进行铺放, 从锥壳小端开始的起始铺放角度为 45° ; 通过编程计算求得其切割参数。根据该程序计算出的直角梯形预浸带的切割参数, 利用 CATIA 的绘图功能, 绘出该锥壳沿其一条起始螺旋角为 45° 螺旋线展开的扇形展开图, 并将所有的直角梯形预浸带片铺放排列在其上, 可以得到图 5 所示的排列示意图。

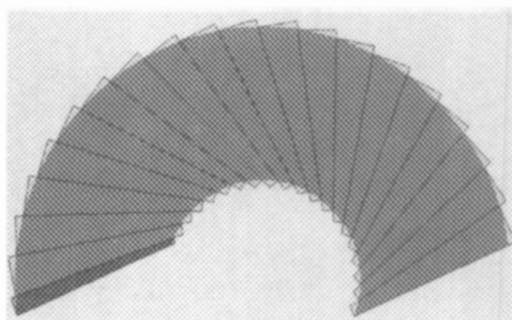


图 5 直角梯形预浸带片在展开图上的排列验证示意图

Fig 5 Result of right angle trapezoid shaped prepreg tape arranged on to conical shell with spiral path

可以看到, 按照切割参数求出的直角梯形预浸带片可以将锥壳展开面完全覆盖并且没有重叠和间隙。根据切割参数可以求得其废料率仅为 4.45%。

3 锥壳螺旋向自动铺带实现与装置

3.1 预切割装置设计

采用两步法, 即先采用预切割设备进行预浸带的切割和转录, 再采用专用铺带头进行铺叠。对预浸带预切割设备各部件进行了设计, 利用 CATIA 软件绘制出的预切割设备的实体模型如图 6 所示。这种预切割设备, 不仅能够对预浸带进行切割, 而且可以对预浸带进行转录及废料回收, 结构较为简单, 可实现如下功能: (1) 根据预浸带切割参数对预浸带进行切割, 得到需要的直角梯形预浸带片; (2) 根据需要将部分直角梯形预浸带片进行转录, 分别收卷转录后与未转录的直角梯形预浸带片, 备用; (3) 废料回收, 无

需手工干预,将边界切割时产生的废料回收。

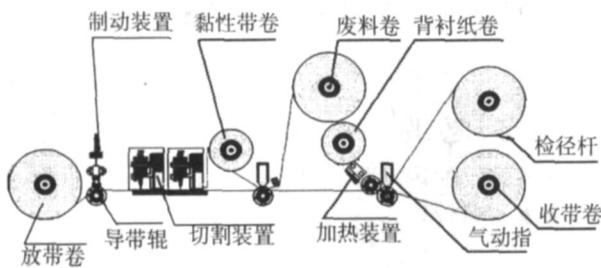


图 6 预切割设备的实体模型示意图

Fig 6 Schematic drawing of practical precutting equipment

根据图 7 所示的直角梯形预浸带的排列方法,结合预切割设备的工作原理,提出等宽预浸带片的连续切割模式。经转录后,预浸带上只剩下预浸带片 B。铺放时只需将第一片直角梯形预浸带片以锥壳上两个相邻的同螺旋角螺旋方向的测地线为边界进行铺放,然后将后一片直角梯形预浸带片的直角边紧挨上一片直角梯形预浸带片的斜边一片连续铺放在芯模表面,即可得到锥壳的螺旋向铺层。采用这种切割方法虽然切刀的工作较复杂,但是铺带头进行铺带时可以从锥壳两端进行连续铺带,提高了铺带效率。

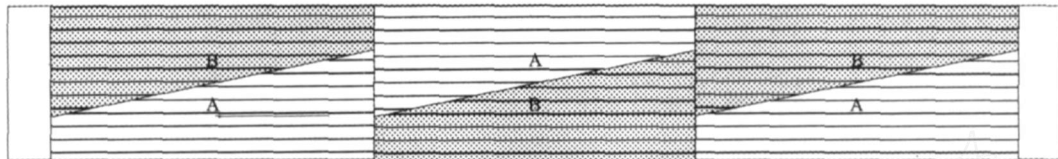


图 7 螺旋向铺层预浸带片的连续切割模式

Fig 7 Schematic drawing of continued cutting on prepreg tape for spiral path plies

3.2 螺旋向自动铺带过程及验证

铺带头用于将经预切割设备处理后的预浸带片铺放到芯模表面,因为无需切割、转录等装置,因此,该铺带头仅需完成预浸带的加热、铺放、压紧即可,其结构较为简单,体积较小。为保证边界加压,该铺带头应采用“主-辅”压辊对预浸带进行铺放压紧。该铺带头可以实现如下功能:对预浸带片进行加热,利于铺放;将预浸带片铺放压紧在芯模表面。

以大端直径 500 mm、小端直径 200 mm、半锥角为 30°的锥壳为例,设定其边界螺旋线起点螺旋角大小为 45°,螺旋方向为左手螺旋,预浸带带宽为 100 mm。根据测地线的计算方法,求出铺带自然路径并离散成等分点,可以得到芯模坐标系下自然路径上的各点的坐标,采用两步法铺带系统进行锥壳螺旋向铺层的自动铺带成型,以图 7 所示的切割模式切割得到的预浸带片 B 为例,其铺放过程如下:

(1)调整铺带头姿态,从锥壳的小端开始进行铺放。铺放完毕后,铺带机停止工作,铺带头抬起,压辊

离开芯模。

(2)芯模逆向转动。

(3)铺带头调整姿态,从锥壳大端开始进行铺放。铺放完毕后,铺带机停止工作,铺带头抬起,压辊离开芯模。

(4)芯模逆向转动角度。为两条直角梯形预浸带片边的测地线的起点坐标相隔角度的大小为:

$$= \frac{2}{c} \left(\frac{1}{2} - m \right) \quad (14)$$

铺带验证过程采用 CATIA 软件进行了验证,验证过程如图 8 所示。图 8(a)表示第一片直角梯形预浸带片的铺放,铺放方向从锥壳小端至锥壳大端;自然路径沿图中所示的白线。图 8(b)表示第二片直角梯形预浸带片的铺放,铺放方向从锥壳大端至锥壳小端;自然路径沿图中所示的白线。图 8(c)表示直角梯形预浸带片铺放完毕后的锥壳螺旋向铺层。芯模两端的圆周为所需成型的锥壳,将废料沿该圆周进行切割即可得到成型的锥壳。

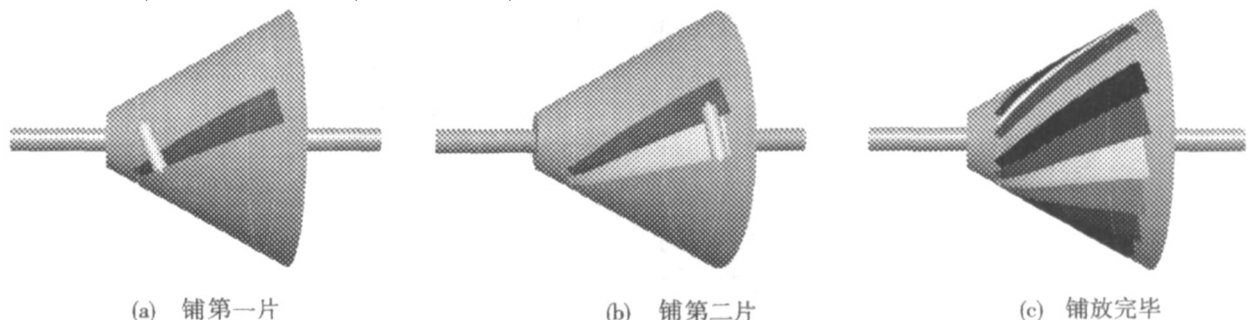
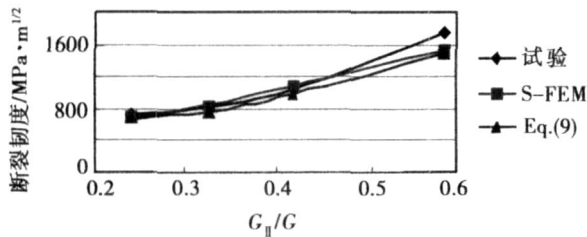


图 8 螺旋向铺层成型过程示意图

Fig 8 Process of manufacturing 0 plies in conical shell

(下转第 20 页)



(b) 多向层合板

图 4 不同混合模态比 (G_{II}/G)下的层合板断裂韧性

Fig 4 Fracture toughness under different mode mixture

5 结论

通过对不同的求解单向及多向层合板断裂韧性变化曲线方法进行比较可以看出,相对于梁理论,重合网格法都能够得到更为精确的应变能释放率。尤其当混合模态比较大时,其计算结果更接近于试验数据。因此重合网格法是一种有效的计算复合材料裂纹尖端应变能释放率的方法,有助于进一步精确的预测裂纹扩展行为。

参考文献

- 1 Ducepta F, Gamby D, Davies P. A mixed-mode failure criterion derived from tests on symmetric and asymmetric specimens Compos Sci Technol, 1999; 59 (4): 609 ~ 619
- 2 Kim Ben W, Arnold H. Mixed mode I + II interlaminar fracture of glass-epoxy multidirectional laminates part I analysis Compos Sci Technol, 2003; 63 (5): 695 ~ 713

- 3 Oliveira JM Q, de Moura M F S F, Silva M A L et al Numerical analysis of the MMB test for mixed-mode I- II wood fracture Compos Sci Technol, 2007; 67 (9): 1764 ~ 1771
- 4 Pereira A B, de Moraes A B. Mixed mode I+ II interlaminar fracture of carbon-epoxy laminates Composites Part A, 2008; 39: 322 ~ 333
- 5 Schon J. A model of fatigue delamination in composites Compos Sci Technol, 2000; 60 (4): 553 ~ 558
- 6 Sjogren A, Asp L E. Effects of temperature on delamination growth in a carbon/epoxy composite under fatigue loading Int J. Fatigue, 2002; 24 (24): 179 ~ 184
- 7 Fish J, Markolefas S, Guttal R et al On adaptive multilevel superposition of finite element meshes for linear elastostatics Appl Numer Math, 1994; 14: 135 ~ 164
- 8 Okada H, Endoh S, Kikuchi M. Application of s-version finite element method to two-dimensional fracture mechanics problems J. Solid Mech Mater Eng, 2007; 1 (5): 699 ~ 710
- 9 Reeder J R, Crews J H J. Redesign of the mixed-mode bending delamination test to reduce nonlinear effects J. Compos Tech Res, 1992; 14: 12 ~ 19
- 10 Rybicki E F, Kanninen M F. A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral Eng Fract Mech, 1977; 9: 931 ~ 938

(编辑 吴坚)

(上接第 11 页)

4 结论

- (1) 锥壳螺旋向铺层几何原理分析表明,采用直角梯形预浸带片的铺放方式可以实现锥壳的螺旋向铺层的铺叠;
- (2) 预切割设备结构方案的设计表明,可以实现对锥壳螺旋向铺层的预浸料的连续预切割;
- (3) 利用 CATIA 软件自动铺带验证结果表明,采用通用铺带头即可以实现螺旋向铺层的自动铺带过程;
- (4) 两步法锥壳螺旋向铺带成型系统的技术方案合理可行,可以采取锥壳等厚度铺叠、均匀加压和降低废料率等措施,大大提高制品质量并降低了构件加工成本。

参考文献

- 1 甄华生. 复合材料在航天器中的应用近况. 宇航材料工艺, 1997; 27 (4): 14 ~ 16
- 2 霍肖旭, 刘红林, 曾晓梅. 碳纤维复合材料在固体火箭上的应用. 高科技纤维应用, 2000; (6): 1 ~ 7
- 3 刘炳禹, 王晓洁. 碳纤维复合材料锥形壳体成型技术初探. 宇航材料工艺, 2004; 34 (4): 26 ~ 29
- 4 张振甫, 肖军, 文立伟. 复合材料锥壳 0 铺层的自动铺放成型方法研究. 宇航材料工艺, 2007; 37 (2): 55 ~ 57
- 5 Klein, Allen J. Automated tape laying Advanced Composites, 1989; (1): 44 ~ 52

(编辑 李洪泉)