

基于树脂基复合材料自动铺丝工艺的轨迹设计技术探讨*

王显峰¹, 刘卫平², 梁文萍¹, 居相文¹, 肖军¹

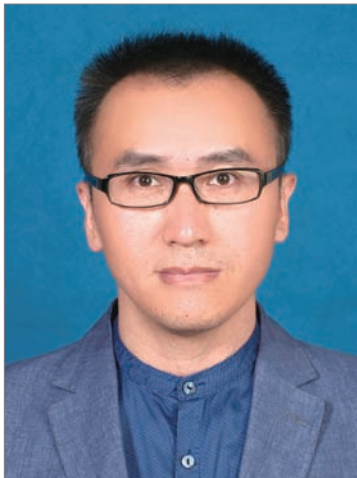
(1. 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京 210016)

2. 中国商用飞机有限责任公司, 上海 200210)

[摘要] 针对树脂基纤维增强复合材料自动铺丝过程中出现的纤维褶皱、分层等工艺缺陷, 着重探讨不同轨迹设计方法(固定角、测地线、变曲率)在抑制工艺缺陷上的优劣。对不同轨迹规划方法进行了比较, 最终给出针对不同曲面特征、不同铺丝工艺要求的轨迹设计方法。

关键词: 复合材料; 铺丝工艺; 轨迹设计; 抑制缺陷

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.04.079



王显峰

副教授, 中国复合材料学会理事、中国复合材料装备制造委员会理事。长期从事缠绕、铺带、铺丝等复合材料自动化成型技术研究, 先后参与研制国内第一台缠绕用摆杆式张力控制器、第一台卧式自动铺带机、第一台龙门式自动铺丝机以及多种结构形式的特种数控复合材料成型装备; 完成飞机中后机身、尾椎、翼身融合机身、尾翼以及复杂S型进气道等复杂构件的轨迹设计工作, 搭建了国内第一套自动铺带/铺丝软件系统。

连续纤维增强复合材料因其各向异性、可设计强、轻质高强等优点, 主要应用在航空航天领域^[1-3], 目前正逐步向军工、船舶、民用等领域扩展^[4-6]。自动铺丝成型技术作为近年来发展最为迅猛的复合材料自动化制造技术之一, 因其自身的生产制造数控化、自动化和低成本等突出优点, 特别适合于机身、机翼、S进气道、承力锥等大型复合材料构件的制造, 目前已成为发达国家航空航天工业领域中大型复合材料构件制造研究的热点。

西方发达国家关于自动铺丝成型技术的研究起步较早, 目前已经成功将该项技术推广到工业化生产过程中, 主要应用于机身、翼身融合体、S进气道、尾锥等铺丝成型的典型复合材料结构件的制造。国内面向该工艺的研究较国外晚了近20年, 作为国内率先开展铺丝机相关技术探

索的南京航空航天大学已成功研制多台8丝束、16丝束、24丝束大型铺丝机及8丝束铺放机器人, 相继完成了火箭舱段、进气道、尾锥试验件等制件的自动铺丝制造成型, 实现了铺丝技术的工业化应用^[7]。哈尔滨工业大学于2007年完成了多丝束铺丝原理样机的研制, 并开发了多种轨迹规划方法并对仿真系统、后置处理与铺丝机张力控制系统进行了一系列研究^[8-10]。西安交通大学从2008年开始逐步搭建了8丝束、16丝束铺丝机器人, 并深入研究了原位光固化纤维铺放成型技术^[11-12]。武汉理工大学开展了铺丝轨迹规划与仿真, 自动铺丝控制系统及铺丝监测系统等基础研究^[13]。然而, 从铺丝工艺技术、自动化装备效率、过程稳定性、轨迹设计软件技术等方面均与国际先进水平仍有一定的差距, 尤其体现在铺丝工艺技术方面。

*基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2014CB046501); 院高校联合创新基金(F19171246)。

Cooper^[14]发现纤维沿内力方向分布可提高构件的结构强度。Katz等研究了带孔复材层合板,发现在沿着曲线铺放时纤维的拉伸强度、屈服强度、承载能力等均高于单一方向铺放得到的层合板^[15-16]。由于变角度轨迹规划不但可以减少应力集中,而且能够提高振动性能与声学性能,Gurdal等^[17-18]开发出了“变刚度设计”,Nagendra^[19]和Eschenauer^[20]等提出了以几何参数或拓扑为变量的结构设计概念与纤维丝束路径优化,拓展了Fibersteel的铺丝工艺方向。

本文以铺丝过程中产生的褶皱、脱层等工艺缺陷为对象,在分析缺陷产生原因的基础上,网格化曲面,通过对固定角、测地线、变角度3种轨迹规划算法进行研究分析,得到了轨迹生成角度的计算方法,确定了不同类型算法的适用范围。

丝束铺放工艺缺陷产生机理

自动铺放成型轨迹设计时存在的主要矛盾为丝束高质量铺放工艺性与保证构件设计强度方向之间的矛盾。预浸料可变形范围很小,对复杂曲面进行铺放时只能沿特定的轨迹,否则会产生褶皱或脱层,继而影响构件的铺放质量。在复杂曲面构件自动铺放轨迹规划时,其算法必须根据构件曲面外形综合考虑预浸料在铺放过程中的变形因素。以下主要分析铺放过程缺陷产生的原因并通过合理的轨迹设计抑制缺陷。

1 预浸料褶皱、分层产生机理

在自动铺放过程中,由于预浸料中纤维的弹性模量较高,纤维的纵向拉伸能力有限,因此预浸料发生变形主要是纤维纵向受压缩而产生的微屈曲,如图1所示。最外侧纤维受拉应力,产生刚性制约,产生的变形非常小可近似为零;预浸料内测纤维由于压缩产生微小的屈曲变形,如图2所示,宏观的褶皱是由于压缩变形的逐渐变大,并且超过了一定的极

值。运用理论力学梁弯曲的理论,以铺放轨迹圆弧的最外侧作为中层层,预浸丝束的变形控制值可以定为**b**点处的应变最大值。为:

$$\varepsilon = -\frac{w}{(R + w/2)} \quad (1)$$

式中,*w*为预浸丝束宽度,*R*为轨迹的测地曲率半径。式(1)表明,预浸料宽度为定值时,纤维应变绝对值与铺放曲率成正比,铺放过程中纤维的可铺放性随着轨迹的测地曲率变小而提高。

以自由曲面为例,如图3所示,曲线*C*为自由曲面上的一条曲线,*t*为*P*点处单位切向量,*n*为单位法向量,

*K*为曲率向量。根据几何原理,某点处曲率向量可分解为*n*方向上的法向曲率和*u*方向上的测地曲率,为:

$$K = K_n \times n + K_g \times u \quad (2)$$

可知,*K_g*、*K_n*分别为测地曲率与曲线的法向曲率。由于预浸纱宽度大于厚度,按照材料力学梁弯曲理论,同样的大小的曲率将在宽度方向引起更大的应变、引起屈皱,因此应重点关注并研究预浸纱的测地曲率。*K_g*在铺放过程中会使预浸丝束在侧向产生弯曲变形,进而损害轨迹的可铺放性。因此,复杂曲面的铺放轨迹,将测地曲率的大小作为评判轨迹可铺性好坏的判据。

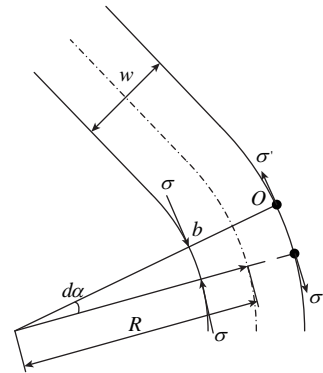


图1 轨迹上预浸料应变与曲率的关系

Fig.1 Relationship between strain and curvature of prepreg on track

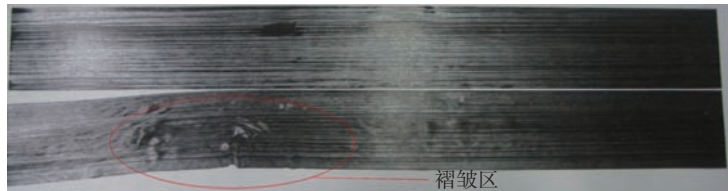


图2 平面铺放时预浸料的变形(褶皱)

Fig.2 Deformation (fold) of prepreg during flat laying

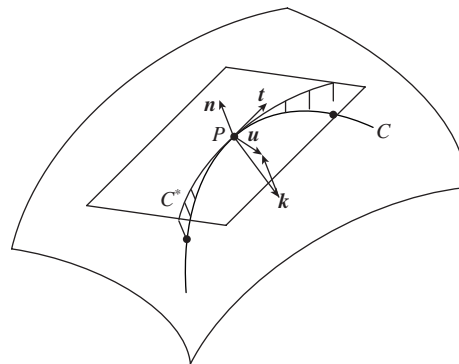


图3 自由曲面上曲线的曲率

Fig.3 Curvature of curve on freeform surface

2 铺丝曲率半径计算

为了保证预浸料在宏观上不产生褶皱,纤维存在着最大应变。在轨迹上表现为铺放轨迹曲率存在极值,即是存在最小曲率半径 R_{\min} 为:

$$R_{\min} = \frac{w}{\varepsilon_{\max}} - \frac{w}{2} \quad (3)$$

式中, R_{\min} 与预浸丝束的宽度有关,容许轨迹最小测地曲率随着带宽增大而减小。同一种预浸料, ε_{\max} 为定值,设 $N_{\min} = R_{\min}/w = 1/\varepsilon_{\max} - 1/2 =$ 常数。引入参数 N (容许的最小测地曲率半径 R 与预浸料带宽 w 之间的比值),以便根据强度要求和铺放效果对该数值进行调整(图4)。

当 $N \geq N_{\min}$ 时,预浸料根据规划的轨迹铺放时不会产生褶皱,最小测地曲率半径 R 表示为:

$$R = N \times w \quad (4)$$

对于自动铺丝,由于预浸料内侧处曲率数值最大(铺放轨迹的曲率非零),保证内侧不发生宏观褶皱即可保证整个丝束的铺放质量。

$$R = r + d = r + \frac{(n-1)}{2} \times w \quad (5)$$

式中,丝束数量为 n ,最内侧预浸料中心线的曲率半径为 r , d 为内侧预浸料中心线与铺放轨迹的间距。可得铺放容许的最小测地曲率半径 R 为

$$R = \left(N + \frac{(n-1)}{2} \right) \times w = \left(\frac{1}{\varepsilon_{\max}} + \frac{(n-2)}{2} \right) \times w \quad (6)$$

试验时,以铺丝机内侧的第3丝束为研究对象来进行试验,即 $n=4$,预浸料宽度 w 为 6.35,带入式(6)可得式(7):

$$R = \left(\frac{6.35}{\varepsilon} + 6.35 \right) \quad (7)$$

式中, R 为铺丝半径,即为压辊中心位置所走的圆弧半径; ε 为预浸料的最大应变。采用铺丝机进行铺放试验时,将预浸料变形的最大应变 ε 作为铺放半径 R 的选取基准,根据上式进行计算,结果如表1所示。

图5为按照表中铺放半径进行铺放的效果图,试验中共采用11种圆弧半径进行铺放试验,选取的预浸料为 T300/603。铺放后预浸料的形貌逐渐从光滑状态过渡到脱黏状态。当圆弧的半径 R 为 6350mm 时,预浸料表面较为光滑未出现褶皱现象,当圆弧半径 R 减小至 1270mm 时,预浸料逐渐出现褶皱,即预浸料出现

褶皱的圆弧极限半径 R 为 1270mm,极限最大应变为 5%; 当圆弧半径 R 为 640mm 时,预浸料未出现脱黏,半径为 580mm 时,预浸料出现脱黏,即预浸料发生脱黏的极限圆弧半径为 640mm,可知极限最大应变值为 1%。

本文将预浸料的铺放状态定为 1~4 级,等级越高表示预浸料褶皱脱黏越严重。预浸料分级照片如 6 所

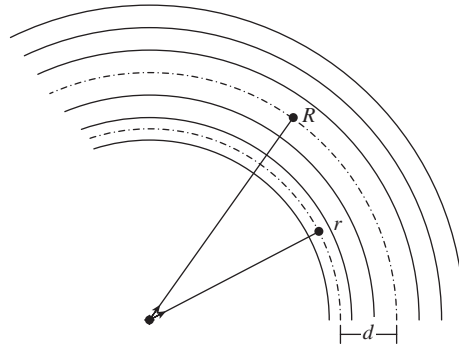


图4 轨迹的最大测地曲率

Fig.4 Maximum geodesic curvature of trajectory

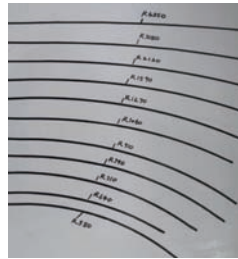


图5 铺放半径效果图

Fig.5 Effect diagram of placement radius

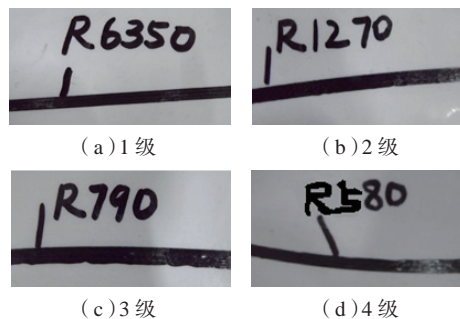


图6 不同变形等级的铺放效果图

Fig.6 Distribution effect diagram of different deformation levels

表1 最大应变与铺放半径对应值

Table 1 Maximum strain and corresponding values of placement radius

| 最大应变 | 1/1000 | 2/1000 | 3/1000 | 4/1000 | 5/1000 | 6/1000 | 7/1000 | 8/1000 | 9/1000 | 10/1000 | 11/1000 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 铺放半径/mm | 6350 | 3180 | 2120 | 1590 | 1270 | 1060 | 910 | 790 | 710 | 640 | 580 |

示。图6(a)为1级,即预浸料不出现褶皱等缺陷光滑地铺覆在模具的表面;图6(b)为2级,即预浸料的局部区域发生褶皱, $\pi/2$ 圆心角的铺放圆弧上褶皱少于10个;图6(c)为3级,即预浸料出现大量褶皱, $\pi/2$ 圆心角的铺放圆弧上褶皱数量多于10个,局部区域出现连续褶皱区;图6(d)为4级,连续褶皱区大量存在,且伴随有贯穿丝束宽度方向上的脱粘。

铺丝角度的确定方法

1 固定角轨迹规划算法

根据目前所提出的固定角算法,采用不同方式定义参考线,则不同的铺放点参考线可异可同。对于曲面上确定的铺放点,若铺放准则确定,则参考线是唯一的。因此,在同一面片上,固定角轨迹规划为与某一方向成固定的铺放角。对于网格化曲面的固定角算法,分为参考线处于曲面内与曲面外两种情况。

(1) 面外参考线固定角度算法。

根据曲面的类型,曲面可分为封闭式曲面和开放式曲面。可定义某一坐标轴方向作为开放式曲面参考线,将芯模夹持轴、重心线、中心线作为封闭曲面参考线。由于参考线的位置处于所铺放曲面外,于是将此算法称为面外参考线的固定角自动铺丝轨迹规划算法(简称算法1)。

算法1将参考轴线与参考线等价来方便进行轨迹规划。具体算法如图7所示,位于三角面片 Π_1 内的铺放轨迹点 P , d 为参考轴线方向, n_1 为面片的法向量, θ_f 为铺放角度,则铺放轨迹方向则为 v_{f1} ,其中, d 与 v_{f1} 的夹角为 α_f 。一般情况下,可求得两个满足条件的解。为了得唯一解,将 d 投影至面片上得到 d' ,对比法向量 n_1 与 $v_{f1}d'$ 的方向,保持两者始终相反或相同。

对于算法一,若 n 与 d 夹角为 θ_f ,且 $\theta_f \in [0, \pi/2]$ 。 d' 为 d 在 Π_1 上

投影,则 d' 代表了 Π_1 内与 d 呈最小夹角的方向,夹角大小为 $\pi/2 - \theta$ 。则在该面片内所取的轨迹方向与 d 所呈夹角范围为 $[\pi/2 - \theta, \pi/2 + \theta]$,即铺放角度取值范围为 $(-\pi/2, \theta - \pi/2] \cup [\pi/2 - \theta, \pi/2]$ 。综合考虑模型表面各三角面片与参考轴线的位置关系,其中最小的 θ_f 值记为 θ_{min} ,则该方法的轨迹规划角度范围为 $(-\pi/2, \theta_{min} - \pi/2] \cup [\pi/2 - \theta_{min}, \pi/2]$ 。

(2) 面内参考线固定角度算法。

本算法的参考线与算法1不同,位于曲面的内部,算法1中参考线在曲面上的投影是此类参考线的生成方式。在类回转体曲面中,可取重心线、中心线、芯模夹持轴线等在曲面上的投影作为参考线;在开放式曲面中,可将曲面上某坐标轴在曲面上的投影作为参考线。称此类算法为面内参考线的固定角轨迹规划算法(简称算法2)。

算法2中,由于参考线为直线的

投影时,比折线或曲线更加方便计算,故选某一直线作为参考轴线,确保算法的通用性。通常将参考线与某一坐标轴重合方便进行轨迹规划。

如图8所示,以 Π_1 面片为例, d' 为参考轴线方向 d 在 Π_1 三角面片内的法向投影。为方便求解,可将该问题转化成在 Π_Δ (Π_Δ 为任何一个三角形面片)内求与 b (b 为 $d \times n_1$)成夹角为 $b_f = p/2 - a_f$ 的方向 v_{f1} 。选择参考轴线时应使其不垂直与任一三角面片,来确保 d 在三角面片 Π_1 内有投影线。

2 测地线轨迹规划算法

用解析方法求解复杂曲面的测地线轨迹运算量过大,效率低,无法满足实际工程需要。在网格曲面中,每个面片都可看作为平面,其内部的任何一条直线均为测地线,因此引入网格曲面使得测地线求解更加简单。如图9可知,位于自由曲面上的任意一点 P ,给定其在曲面上法向量 n 与

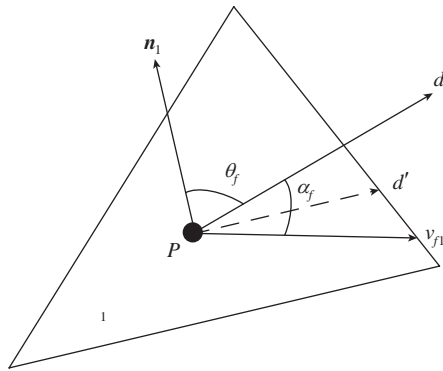


图7 算法1示意图

Fig.7 Schematic diagram of algorithm 1

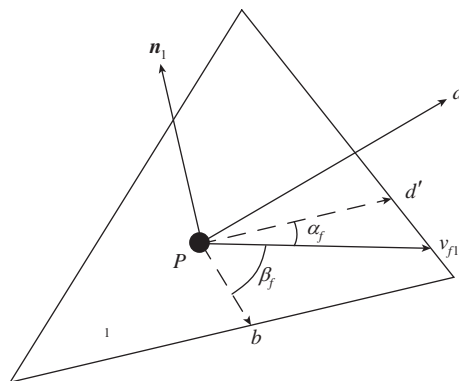


图8 算法2示意图

Fig.8 Schematic diagram of algorithm 2

切向量 t 可构造平面 S 。

将曲面三角网格化(图 10), $N_0, N_1, N_2, N_3, \dots$ 为各网格的单位法向量。轨迹起点为 P_0 , 根据起始方向便可得到 $P_1(x_1, y_1, z_1)$, 两相邻网格的法向量平均值为 P_1 的单位法向量, 可得式 (8)。式中 $D_1(a_1, a_2, a_3)$ 、 $D_0(a_0, b_0, c_0)$ 分别为边 E_1 的两个顶点, 根据 P_1 点的副法矢 x_b, y_b, z_b 可得参数 q 。

$$q = \frac{X_b \times (X_1 - a_0) + Y_b \times (Y_1 - b_0) + Z_b \times (Z_1 - C_0)}{X_b \times (a_1 - a_0) + Y_b \times (b_1 - b_0) + Z_b \times (C_1 - C_0)} \quad (8)$$

当 $0 < t < 1$, 说明下段轨迹相交于 E_1 内, 将 t 值代入公式可得下一轨迹点坐标; 当 $t=1$ 或 0 说明轨迹经过网格顶点, 需要进一步讨论; 当 t 不在 $(0, 1)$ 范围内说明轨迹不相交于 E_1 内, 则轨迹于 E_2 必相交。再将 D_1 、 D_0 的坐标值换为 E_2 的顶点坐标后计算即可。

3 变角度轨迹规划算法

变角度轨迹规划算法, 是基于复材工件内力分布和承载特征而进行的轨迹设计优化方法, 可通过调整轨迹来提高构件的力学性能。变角度算法是为了克服预浸丝束有限的变形而让预浸丝束的轨迹方向由测地线方向向强度设计方向靠, 而角度变化的程度则由偏角大小和预浸丝束的可变形量来控制。为便于研究, 本文将强度设计方向设定为各轨迹点与加工轴成的角度方向。

根据网格化曲面得到的轨迹为连续的折线段, 衡量其曲率半径很难, 将某点测地线方向与轨迹方向之间能容许的最大偏角替代所选的曲率半径。一般情况下, 网格内选定的曲率半径远大于轨迹段的长度, 所以在计算时可将轨迹的长度作为弧长处理, 如图 11 所示。

R 为最小测地曲率半径, L' 为铺放轨迹点 P 与前一轨迹点间的连线投影到 P 点切平面后的投影长度, α'

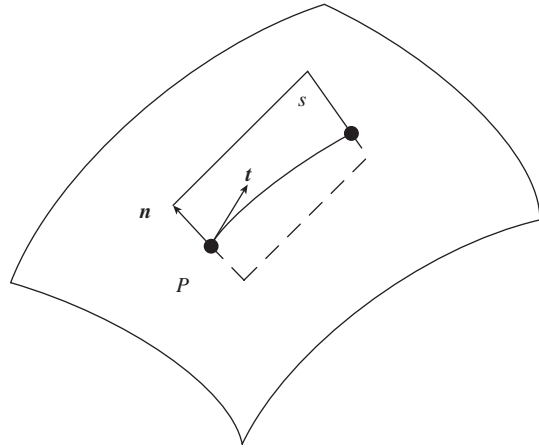


图9 自由曲面上的测地线
Fig.9 Geodesic on freeform surfaces

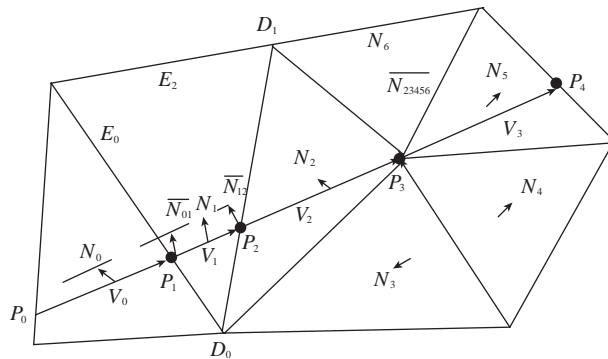


图10 三角网格上的测地线
Fig.10 Geodesic on triangular grid

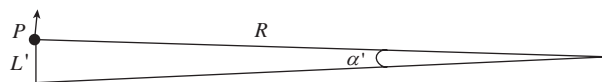


图11 偏角和曲率半径间的关系
Fig.11 Relationship between declination and radius of curvature

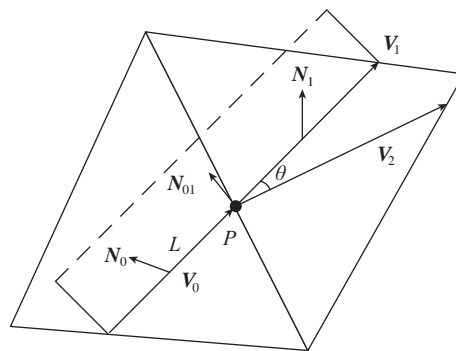


图12 固定角度方向和测地线方向偏差示意图
Fig.12 Schematic diagram of deviation between fixed angular direction and geodesic direction

为 P 点切平面处实际轨迹线与测地线得到的轨迹方向, V_0 为 P 点处的线间容许的最大偏角。

如图 12 所示, 在网格化曲面上得到测地曲率, 其中 V_1 为根据测地

线得到的轨迹方向, V_0 为 P 点处的上一段轨迹方向, V_2 则为按照与加工轴成某角度的轨迹段方向。

变角度轨迹规划算法, 可通过优

化轨迹来提高构件的力学性能,其优化方法是基于构件内力将容许的最大偏角 α 与 V_1 和 V_2 的实际夹角来对比。如图 13 所示,当 $\alpha < \theta$, 轨迹可不完全按照固定角法来求来满足可铺性的要求。若 V_1 方向(测地线方向)的铺放角绝对值大于 V_2 方向铺放角绝对值(初始设定的铺放角,记 β), 则最终轨迹方向 V 的铺放角取: $\beta + \beta(\theta - \alpha) / |\beta|$ 。

若 V_1 方向的铺放角绝对值小于 V_2 方向铺放角绝对值, 则最终轨迹方向 V 的铺放角取: $\beta - \beta(\theta - \alpha) / |\beta|$ 。

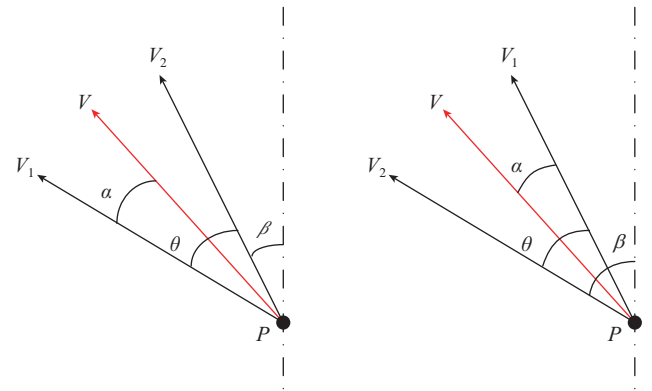
当 β 时轨迹方向 V 的铺放角为 $\theta - \alpha$, V_1 方向可确定正负; 当 $\alpha \geq \theta$, 最大曲率能使铺放轨迹由固定角法得到, 轨迹的最终方向为 V_2 方向, 即为固定角法所得到的轨迹方向。

算法筛选原则

以形状复杂的进气道为例, 不仅纤维角度有明确要求, 同时需要兼顾铺放工艺效果。固定角算法是备选方案之一, 但由于该构件结构复杂, 大部分轴心位于模具外侧, 所以基于测地线或变曲率的轨迹算法较难得到完整的轨迹, 这两种算法有着相同的特质, 但测地线算法的工艺效果更好一些, 因此将测地线算法也作为备选方案; 下面便对两种算法进行分析。图 14 和图 15 给出了基于固定角与测地线算法生成的 45° 铺丝轨迹。

$\pm 45^\circ$ 度轨迹, 固定角与测地线算法都能实现, 但是由于根据测地线算法得到的轨迹角度在进气道端部严重偏离设计角度; 而固定角算法由于忽略了预浸料的工艺性仅仅关注了轨迹的走向, 实际铺放时容易出现褶皱现象, 如图 16 所示。

实际铺放时, 需综合构件性能要求、原材料变形能力以及运动可实现性等多方面的因素, 确定最终的轨迹规划算法。不同的构件有其对应的轨迹算法(表 2), 这需要通过实际的



(a) V_1 方向铺放角大于 β 的情况 (b) V_1 方向铺放角小于 β 的情况

图13 铺放轨迹方向的确定

Fig.13 Determination of direction of paving track

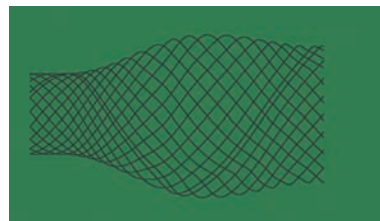


图14 固定角轨迹

Fig.14 Fixed angle trajectory

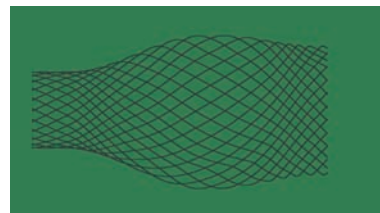


图15 测地线轨迹

Fig.15 Geodesic trajectory



图16 固定角算法铺放时出现褶皱

Fig.16 Wrinkles when placed with fixed angle algorithm

铺放试验进行确定。

结论

对于树脂基纤维增强复合材料, 自动铺丝成型轨迹设计与材料的工艺性是相互约束的, 材料的工艺性限制了轨迹设计的范围, 同时复杂构件的轨迹设计对材料的工艺性设计提

出了更高的要求。

(1) 在设计铺丝路径时, 其轨迹的测地曲率半径不得小于材料容许的曲率极限, 否则就会出现褶皱和内应力, 尤其在复杂异形件轨迹设计方面或变刚度构件轨迹设计方面。

(2) 另外轨迹的设计必须以构件载荷方向为依据, 兼顾方向与工艺

表2 常用轨迹规划算法比较

Table2 Comparison of commonly used trajectory planning algorithms

| 轨迹规划算法 | 适用范围 | 局限性 | 特点 |
|--------|--------------------------|----------------------------------|---|
| 固定角算法 | 适用任意角度平面构件的回转体 | 复杂曲面和变截面回转体需考虑铺放工艺性问题 | 为保证构件强度最接近设计强度,严格按照设计角度进行铺放 |
| 测地线算法 | 适用于曲率变化不大的构件 | 曲率突变的复杂曲面和大锥度类回转体难以实现任意角度的轨迹设计 | 预浸纱铺放质量较好 |
| 变角度算法 | 相比测地线算法范围更大,适用于曲率变化不大的构件 | 须基于试验进行曲率带宽比设置,否则设计出的轨迹铺放可能会出现褶皱 | 适用于变刚度复合材料层合板轨迹设计,可通过调节曲率带宽比灵活调整可铺放性与方向性要求在规划中所占的比重 |

性。反之,轨迹设计对材料工艺性的约束主要体现在工艺本身和铺层工艺设计两个方面,材料铺丝工艺的宽窗口适应性以及其更小极限曲率半径是轨迹设计追求的目标。

参考文献

[1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2006, 24(1): 1-12.

DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materialia Composita Sinica, 2006, 24(1): 1-12.

[2] 李勇, 肖军. 复合材料纤维铺放技术及其应用[J]. 纤维复合材料, 2002, 19(3): 39-41.

LI Yong, XIAO Jun. The technology and application of fiber placement[J]. Fiber Composites, 2002, 19(3): 39-41.

[3] 肖军, 李勇, 文立伟, 等. 树脂基复合材料自动铺放技术进展[J]. 中国材料进展, 2009, 28(6): 28-32.

XIAO Jun, LI Yong, WEN Liwei, et al. Progress of automated placement technology for polymer composites[J]. Materials China, 2009, 28(6): 28-32.

[4] 陈祥宝. 先进树脂基复合材料的发展和应[J]. 航空材料学报, 2003, 23(S1): 198-204.

CHEN Xiangbao. The development and applications of advanced polymer matrix composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003, 23(S1): 198-204.

[5] 谭必恩, 益小苏. 航空发动机用PMR聚酰亚胺树脂基复合材料[J]. 航空材料学报, 2001, 21(1): 55-62.

TAN Bien, YI Xiaosu. High-temperature polyimide composites and its application in aeronautical engine[J]. Journal of Aeronautical

Materials, 2001, 21(1): 55-62.

[6] 李建利, 赵帆, 张元, 等. 碳纤维及其复合材料在军工领域的应用[J]. 合成纤维, 2014, 43(3): 33-35.

LI Jianli, ZHAO Fan, ZHANG Yuan, et al. Application of carbon fiber and its composites in military industry[J]. Synthetic Fiber in China, 2014, 43(3): 33-35.

[7] 还大军, 肖军, 李勇. 复合材料自动铺放CAD/CAM软件技术[J]. 航空制造技术, 2010, 53(17): 33-36.

HUAN Dajun, XIAO Jun, LI Yong. CAD/CAM software technology for composites automated placement[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(17): 33-36.

[8] 富宏亚, 韩振宇, 路华. 纤维缠绕/铺带/铺丝成型设备的发展状况[J]. 航空制造技术, 2009, 52(22): 43-46.

FU Hongya, HAN Zhenyu, LU Hua. Development of the filament winding/tape layer/fiber placement machine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(22): 43-46.

[9] 韩振宇, 孙守政, 付云忠, 等. 热塑性FRP自动铺放成型缺陷的多尺度研究进展[J]. 材料工程, 2017, 45(7): 118-127.

HAN Zhenyu, SUN Shouzheng, FU Yunzhong, et al. Multi-scale research progress of manufacturing defects for thermoplastic FRP fabricated by automated fiber placement[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(7): 118-127.

[10] 韩振宇, 李玥华, 富宏亚, 等. 锥壳零件自动铺丝变角度轨迹规划算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(3): 400-405.

HAN Zhenyu, LI Yuehua, FU Hongya, et al. Variable-angles trajectory planning algorithm

of automated fiber placement for conical shell[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(3): 400-405.

[11] 段玉岗, 董肖伟, 葛衍明, 等. 基于CATIA生成数控加工路径的机器人纤维铺放轨迹规划[J]. 航空学报, 2014, 35(9): 2632-2640.

DUAN Yugang, DONG Xiaowei, GE Yanming, et al. Robotic fiber placement trajectory planning based on CATIA CNC machining path[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(9): 2632-2640.

[12] 张小辉, 段玉岗, 葛衍明, 等. 整体式风电叶片紫外光原位固化纤维铺放制造技术[J]. 机械工程学报, 2014, 50(11): 37-42.

ZHANG Xiaohui, DUAN Yugang, GE Yanming, et al. Novel fabrication method of integral wind turbine blades by in-situ UV curing automated fiber placement[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(11): 37-42.

[13] 徐东亮, 吴耀楚, 刘雪红, 等. 纤维缠绕张力微机控制系统[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(10): 71-73.

XU Dongliang, WU Yaochu, LIU Xuehong, et al. Microcomputer control system on filament winding tension[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2003, 25(10): 71-73.

[14] COOPER A A G. Trajectory fiber reinforcement of composite structure[D]. St. Louis: Washington University, 1972.

[15] KATZ Y, HAFTKA R T, ALTUS E. Optimization of fiber directions for increasing the failure load of a plate with a hole[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2005, 30(6): 413-421.

[16] HYER M W, CHARETTE R F. Use of curvilinear fiber format in composite structure design[J]. AIAA Journal, 1991, 29: 1011-1015.

[17] GURDAL Z, OLMEDO R. In-plane response of laminates with spatially varying fiber orientations: variable stiffness concept[J]. AIAA Journal, 1993, 31(4): 751-758.

[18] WALDHART C, GURDAL Z, RIBBENS C. Analysis of tow placed, parallel fiber, variable stiffness laminates[C]// The 37th AIANASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Washington, 1996.

[19] NAGENDRA S, KODIYALAM S, DAVIS J E, et al. Optimization of tow fiber paths for composite design[C]//36th AJAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and materials Conference and AIAA/

ASME Adaptive Structures Forum. Washington, 1995.

[20] E S C H E N A U E R H , S C H U H M A C H E R G , K R A M M E R J .

Constructive design models for multidisciplinary optimization of fiber composite structures[C]// Proceedings at the 4th AIAA/USAF/NASA/OAI Multidisciplinary Analysis and Optimization

(MOO) Symposium. Washington, 1992.

通讯作者: 王显峰, E-mail : wangxf@nuaa.edu.cn。

Discussion on Trajectory Design Technology Based on Automated Composites Fiber Placement Process

WANG Xianfeng¹, LIU Weiping², LIANG Wenping¹, JU Xiangwen¹, XIAO Jun¹

(1. School of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Commercial Aircraft Corporation of China, Ltd., Shanghai 200210, China)

[ABSTRACT] During the process of automatic fiber placement, aiming at the technological defects such as fiber folding and delamination in laying of resin-based fiber reinforced composites, this paper emphasizes on the advantages and disadvantages of different trajectory design methods (fixed angle, geodesic line, variable curvature) in technological defects. The different trajectory planning methods are compared. Finally, a trajectory design method for different surface characteristics and different wire laying process requirements is given.

Keywords: Composite material; Fiber placement process; Trajectory design; Defect Suppression

(责编 大漠)

(上接第78页)

丝用预浸丝制备工艺研究 [J]. 固体火箭技术, 2014(5): 718-723.

ZHAO Cong, LU Nannan, YAN Xitao, et al. Research on the process of preparation of prepreg tow applied in automatic fiber placement[J]. Journal of Solid Rocket

Technology, 2014(5): 718-723.

[7] 孙天峰, 文立伟, 肖军, 等. 碳纤维预浸料自动分切复卷系统设计与研究 [J]. 航空制造技术, 2015, 58(16): 66-70.

SUN Tianfeng, WEN Liwei, XIAO Jun, et al. Design and research on automatic slitting and

rewinding mechanism of carbon fiber prepreg[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(16): 66-70.

通讯作者: 黄晓川, E-mail: huangxiaochuan1992@126.com。

Research on Slitting Property of Prepreg Tow Applied in Automated Fiber Placement for Grid

HUANG Xiaochuan, ZHANG Jianbao, ZHAO Wenyu, LIU Yongjiao, WANG Junfeng, SUN Hongjie

(Aerospace Research Institute of Material & Processing Technology, Beijing 100076, China)

[ABSTRACT] According to the characteristic of prepreg tow applied in grid automatic fiber placement, the prepreg by domestic T800/603B is slit into tows which is suitable for mesh laying width according to grid size. Taking slitting width of 5mm and 10mm prepreg tow for example, the preparation technology of which was researched. In addition the accuracy of slitting width, the strength of overlap joint and damage situation of slitting prepreg tow edge were studied. Results showed that different widths of the tows cut out can meet the requirements of prepreg tow applied in grid automated fiber placement.

Keywords: Automated fiber placement into grid; Prepreg tow slitting; Accuracy of slitting width; Strength of overlap joint; Damage situation of slitting prepreg tow edge

(责编 大漠)