

铺放压力和铺放压辊对丝束铺放质量影响的研究*

马志涛, 李初晔, 冯长征, 张 省

(中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

[摘要] 探讨了规则形和不规则形空间曲面产生铺丝轨迹线的方法,借助有限元的自由网格划分技术,在CAE环境下产生曲面的规则网格划分,提取节点位置信息顺序建立铺丝轨迹线。在铺丝轨迹基础上,导出了筒形件的理论铺丝间隙,采用非线性接触有限元技术模拟了铺丝压辊与筒形件模具力学模型,得到最佳铺丝压力与铺丝参数之间的变化规律,通过调节铺丝参数使丝束与模具表面完全贴合,为提高铺丝质量与精度奠定了基础。

关键词: 铺丝; 复合材料; 空间曲面; 非线性接触; 超弹性

Effect of Placement Pressure and Placement Roller on Quality of Tows Placement

MA Zhitao, LI Chuye, FENG Changzheng, ZHANG Sheng

(AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] The subject discussed the method of generating trajectory line of regular shape and irregular shape space surface. By means of the finite element powerful free meshing technique, the regular meshing of the surface was generated in the CAE environment, and the node position information was extracted to establish the trajectory line. On the basis of the trajectory of the laying track, the theoretical gap of the tubular piece was deduced, and the mechanical model of the roller and the cylindrical mold was simulated by the nonlinear contact finite element method. Get the best rolling pressure and the laying parameters change rule, by adjusting the parameters of the fiber laying to make gap to reach the allowable range, which establishes foundation to improve the quality of fiber laying and accuracy.

Keywords: Fiber laying; Composite material; Space surface; Non-linear contact; Superelasticity

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.20.088

复合材料自动铺放技术是工业发达国家近30年来逐步发展和广泛应用的自动化制造技术,包括自动铺带和自动铺丝技术^[1]。自动铺丝技术综合了自动铺带和纤维缠绕技术的优点,铺丝头把缠绕技术中多条预浸丝束独立输送和自动铺带技术的压实、切割、重送功能结合在一起,由铺丝头将多根预浸丝束在铺放压辊下集束成为一条宽度可变的预浸带后铺放在模具表面,并压实成型^[2-3],是近年来发展最快的复合材料自动化制造技术之一,主要适用于成型复杂外形的复合材料构件,并获得较高的成型效率^[4-5],已成为发达国家航空复合材料构件首选的先进制造技术。在复合材料构件铺丝成型过程中,铺丝质量与模具曲率、铺丝路径规划、铺放压辊性能、铺放压力、铺放速度、加热温度等有关,如果计算完备合理,则可以做到铺叠层与模具均匀贴合,保证层间良好结合、表面不起皱褶。本文以大曲率回转

形零件为对象,研究铺丝压辊性能和铺丝滚压力对丝束铺放的影响,为提高铺丝质量提供理论依据。

1 铺丝轨迹设计

丝束自动铺放系统由三旋转轴机构、丝束铺放头等组成。三旋转轴机构一端与滑枕相连,另一端与丝束铺放头相连,能够带动铺放头灵活运动,实现复杂的运动轨迹。丝束铺放头将丝束铺叠到加热的丝束铺放表面上。

对于规则空间曲面,如圆柱筒体,完全可以采用解析法来实现铺丝轨迹。图1是圆柱内曲面的不同铺丝方向的定义,在任意时刻铺丝压辊的轴线始终与铺丝轨迹线以及零件表面法向垂直,采用等距平面截割铺丝面的方法产生铺丝轨迹线,对于规则空间曲面或小曲率曲面,等距平截法是有效且方便的铺丝轨迹设计方法^[6-8]。图2为圆筒件0°铺丝示意,假设从0°位置开始沿轴向间隔 s 弧长距离连续铺丝,则铺丝点 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ 在

* 基金项目: 国防基础科研计划(A0520131001)。

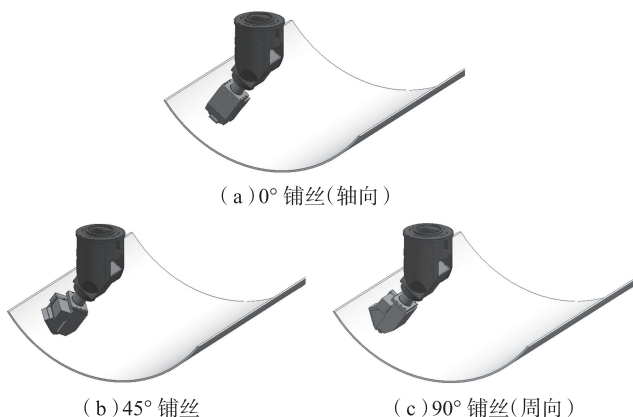


图1 不同铺丝方向的定义

Fig.1 Definition of different laying directions

X 方向的位置为:

$$\begin{aligned}
 \theta &= S/R \\
 P_{1x} &= R\sin\theta \\
 P_{2x} &= R\sin 2\theta \\
 P_{3x} &= R\sin 3\theta \\
 &\dots\dots \\
 P_{nx} &= R\sin n\theta
 \end{aligned}
 \quad (1)$$

分别从 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ 沿 X 向进行截割, 得到的交线即铺丝轨迹线。同理由等距平截法可得到 45° 及 90° 铺丝轨迹线。

对于复杂且不规则曲面, 一般不能通过解析函数进行表达, 可以通过扫描技术得到曲面的点集, 采用样条插值构造曲面, 借助有限元强大的自由网格划分技术, 在 CAE 环境下产生曲面的规则网格划分, 提取节点位置信息顺序建立铺丝轨迹线, 图 3 为不规则曲面的扫描点云, 图 4 为曲面的有限元网格。

2 铺丝压力计算仿真

对于规则曲面比如筒形件的铺丝轨迹, 当沿 90° 方向铺丝时, 压辊与柱面完全贴合, 铺丝压力的大小对丝束与模具的贴合质量影响不大。沿角度方向铺丝筒形件的内曲面时, 压辊两端贴合工件表面, 压辊中间部位悬架在工件表面上, 由于压辊的弹性, 铺丝压力作用前后, 压辊与模具的贴合质量有很大的不同, 如图 5 所示, 在铺丝压力作用下, 压辊发生弹性压缩变形, 若铺丝压力合适, 压辊与模具内表面完全贴合。设筒形模具半径 R , 压辊长度 L , 当铺丝压力为零时, 沿 0° 铺丝时压辊与铺丝面之间的理论间隙 s_e 为:

$$s_e = R - \sqrt{R^2 - L^2 / 4} \quad (2)$$

铺丝压辊是用抗粘涂层涂覆的具有超弹性的柱体, 通过施加铺丝压力将丝束滚压到丝束铺放表面上, 滚辊的弹性应符合铺放要求, 以确保在整个铺放宽度范围

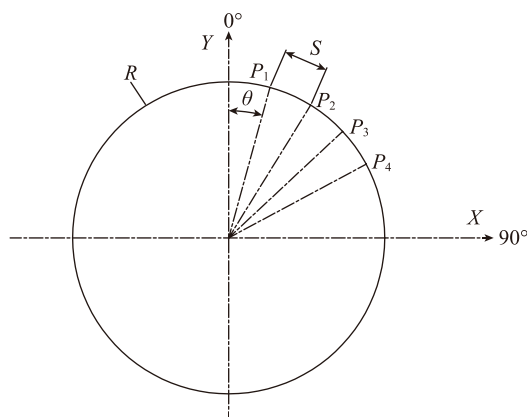


图2 0°铺丝时的轨迹点计算

Fig.2 Track point calculation when 0° fiber laying

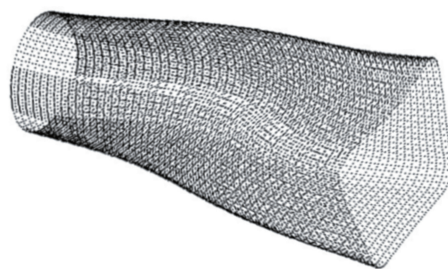


图3 不规则曲面的扫描点云

Fig.3 Irregular surface scanning point cloud

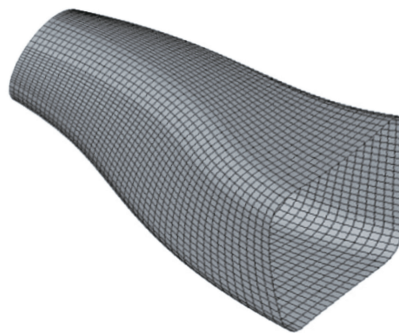


图4 不规则曲面的网格

Fig.4 Irregular surface grid

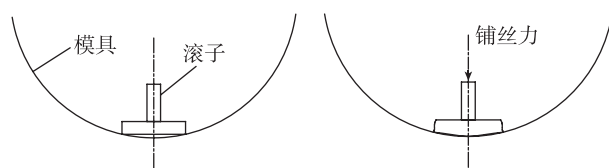


图5 铺丝压辊与模具表面的接触状态

Fig.5 Contact state of the roller and the mold surface

内能够将丝束均匀压实在模具上。超弹性材料由长链分子构成, 具有以下特点:

- (1) 超弹性体可以承受大弹性变形;
- (2) 超弹性体几乎不可压缩, 泊松比接近 0.5;
- (3) 力与变形关系表现出高度非线性, 如图 6 所示。超弹性材料一般通过弹性势能函数来描述:

$$[S] = \frac{\partial W}{\partial [D]} \quad (3)$$

式中, $[S]$ 为应力张量, W 为单位体积应变能函数, $[D]$ 为拉格朗日应变张量。根据应变不变量得到的 Mooney-Rivlin 应变能密度函数:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + \frac{1}{d}(J - 1)^2 \quad (4)$$

式中, C_{10} , C_{01} , d 为材料常数; I_1 、 I_2 为第一、第二阶应变不变量; J 为变形梯度。

铺丝过程中压辊滚压力 F 与压辊材料性能常数 E 、压辊长度 L (压辊长度近似等于丝束数 n 与丝束宽度 k 的乘积)、压辊半径 R_L 、铺放模具半径 R 有关。建立压辊及筒形件模具的接触单元模型, 分析压辊在铺丝压力下与模具表面的贴合状态, 图 7 反映了随滚压力的增加压辊与模具间接触压力的变化情况 (图 7 (a)~图 7 (f) 滚压力逐渐增大)。当铺丝压力较小时, 压辊只在两侧边缘区域与模具接触, 中间区域不能压实丝束; 随着铺丝压力逐渐加大, 贴合区域逐步增大, 图 7 (f) 表明压辊与模具内表面完全接触贴合, 此时模拟得到的滚压力为最佳铺丝滚压力。将铺丝参数改变, 研究铺丝滚压力随压辊半径 R_L 变化, 模具半径 R 、压辊长度 L 之间的变化关

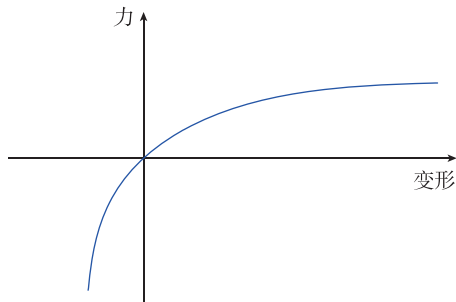


图6 超弹性材料铺丝压辊的力与变形关系

Fig.6 Relationship between force and deformation of superelastic material

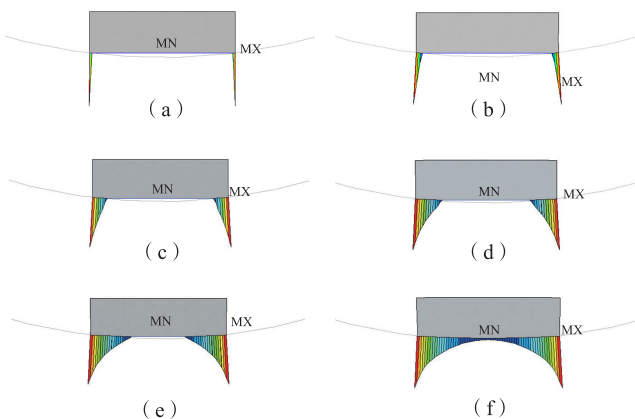


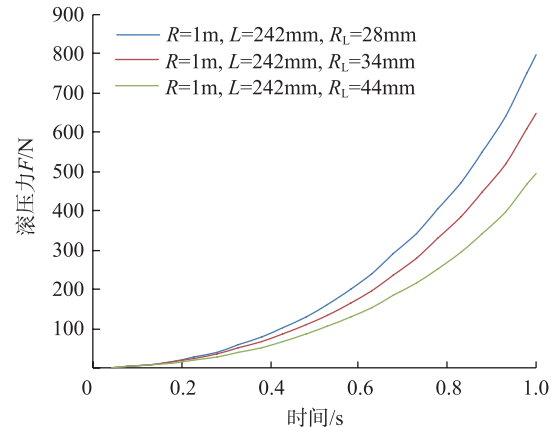
图7 压辊与模具间接触压力分布随滚压力变化情况

Fig.7 Pressure distribution between the roller and the mold varies with the rolling force

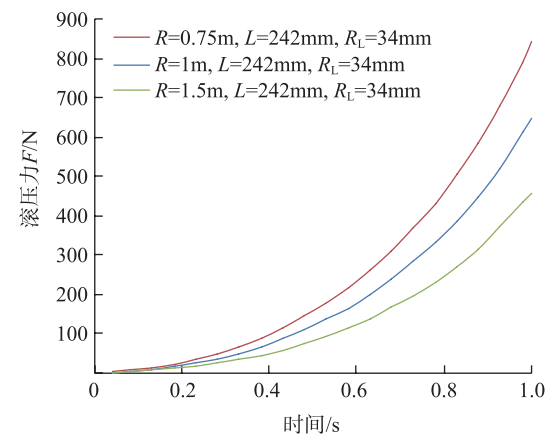
系, 得到变化关系曲线如图 8 所示。采用插值和函数逼近, 将多种条件下的有限元计算结果进行综合, 拟合得到沿 0° 铺丝时最佳滚压力与铺丝参数之间的拟合公式:

$$F = C_p \times \frac{L^{2.5}}{R \times R_L} \quad (5)$$

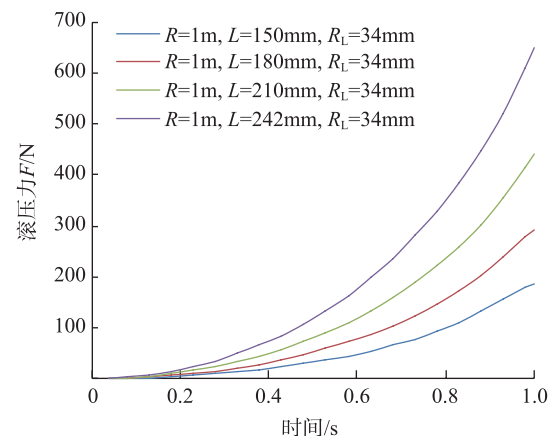
式中, F 为铺丝滚压力, L 为压辊长度, R 为模具半径, R_L 为压辊半径, C_p 为铺丝常数, 与压辊及模具材料有



(a) 滚压力随压辊半径的变化关系



(b) 滚压力随模具半径的变化关系



(c) 滚压力随压辊长度的变化关系

图8 滚压力随各参数的变化关系
Fig.8 Relationship of rolling force with parameters

关,模拟得到 $C_p=24.2$ 。图9中,滚压力 F 曲线是由有限元仿真得到的,滚压力 F_c 曲线是由公式(5)拟合得到。任意给定一组参数: $R=1200\text{mm}$, $R_L=38\text{mm}$, $L=215\text{mm}$, 带入式(5)得到滚压力拟合值 $F_c=360\text{N}$, 采用仿真模拟得到 $F=358\text{N}$, 两者具有很好的近似度。通过模拟得到的计算公式,在后期的设计计算中,用公式(5)求解最佳铺丝压力具有很好的精确度。对于不同的铺丝参数,通过计算最佳铺丝压力,提高铺丝精度。

沿 45° 或其他角度方向铺丝时(见图10),压辊与工件表面铺丝间隙的计算较为复杂,通过计算压辊轴线方向的曲线方程以及压辊轴线的直线方程,联立得到不同铺丝角度下压辊到模具的间隙。角度 α 时铺丝间隙为 0° 方向铺丝间隙在角度方向的投影:

$$s_{\alpha} = (R - \sqrt{R^2 - L^2/4}) \cos \alpha \quad (6)$$

公式(6)适合铺丝角度 $0^\circ \sim 90^\circ$ 时的理论间隙计算。铺丝压力的大小与压辊到模具的间隙直接相关,由公式(4)得到角度 α 铺丝时最佳滚压力与铺丝参数之间的拟合公式:

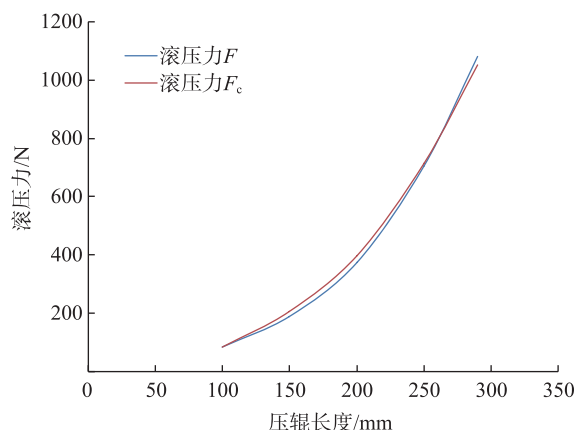


图9 铺丝滚压力的数值拟合

Fig.9 Numerical fitting of the roll pressure

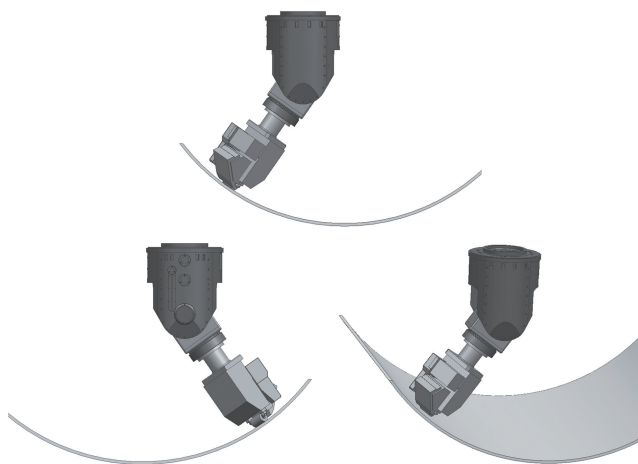


图10 45° 铺丝位置示意

Fig.10 Sketch map of 45° fiber laying position

$$F = C_p \times \frac{L^{2.5}}{R \times R_L} \cos \alpha \quad (7)$$

3 结论

自动铺丝技术已广泛应用于飞机复杂型面复合材料构件的制造,是发展最快的复合材料低成本自动化制造技术之一。本文通过对铺丝轨迹路径的解析,采用非线性接触有限元技术模拟了铺丝压辊与回转类筒形件模具力学模型,得到最佳铺丝压力与铺丝压辊参数之间的变化规律,为提高丝束铺放质量奠定了基础。

近年来,在国家科技重大专项和国防基础科研项目资助下,科研人员以飞机复合材料典型结构件铺放成型为研究对象,相继完成大型桥式结构复合材料自动铺带、铺丝设备与工艺技术研究,解决了纤维丝束铺放设备整体结构设计优化和控制等关键技术,为复合材料构件研制提供一整套解决方案。压辊最大设计压力可达 2000N ,用于实现 32 丝束、 16 丝束、 8 丝束纤维铺放压实,压辊变形量控制在 5mm 左右,丝束铺放各项指标能够满足工程应用要求。

参考文献

- [1] 安鲁陵,周焱,周来水. 复合材料纤维铺放路径规划与丝数求解[J]. 航空学报, 2007, 28(3): 745-750.
AN Luling, ZHOU Yi, ZHOU Laishui. Composite fiber placement path planning and fiber number determination[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(3): 745-750.
- [2] 邵冠军,游有鹏,熊慧. 自由曲面构件的纤维铺放路径规划[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(S1): 144-148.
SHAO Guanjun, YOU Youpeng, XIONG Hui. Optimal fiber placement paths for free-form surface parts[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37(S1): 144-148.
- [3] 王念东,刘毅,肖军. 复合材料管状结构自动铺丝路径算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(2): 228-233.
WANG Niandong, LIU Yi, XIAO Jun. Fiber placement path design for composite structures in pipe-form[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2008, 20(2): 228-233.
- [4] 周焱,安鲁陵,周来水. 复合材料自动铺丝路径生成技术研究[J]. 航空精密制造技术, 2006, 42(2): 39-41.
ZHOU Yi, AN Luling, ZHOU Laishui. Research on composite fiber placement path generation algorithm[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2006, 42(2): 39-41.
- [5] 张振甫,肖军,吴海桥,等. 复合材料锥壳 0° 铺层的自动铺放成型方法研究[J]. 宇航材料工艺, 2007, 37(2): 55-57.
ZHANG Zhenfu, XIAO Jun, WU Haiqiao, et al. Study on laminating method for 0° plies in composite conical shell manufactured by automated tape laying[J]. Aerospace Material & Technology, 2007, 37(2): 55-57.

(下接第101页)

[4] ZHAO L Z, ZHANG Y H, WU X H, et al. Virtual assembly simulation and ergonomics analysis for the industrial manipulator based on DELMIA[C]//Proceedings of the 6th International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation. Paris: Atlantis Press, 2016.

[5] GAO Y J, WEI X B, MA B F, et al. Ergonomic simulation and optimization during the body assembly[C]//Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress. Berlin: Springer: 1419–1427.

[6] 柴春雷, 黄琦, 董占勋, 等. 面向家电产品的人机工程分析与评价系统 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(4): 580–584.

CHAI Chunlei, HUANG Qi, DONG Zhanxun, et al. Ergonomic analysis and evaluation system for home appliance product[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2006, 18(4): 580–584.

[7] 洪涛, 王申康. 人体正面运动的尺度骨架模型初始化算法研究 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2004, 38(12): 1585–1588.

HONG Tao, WANG Shenkang. The study on the initial algorithm of the scale skeleton model of the human body positive movement[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2004, 38(12): 1585–1588.

[8] YANG M, YIN M D. Ergonomics simulation and application in virtual assembly based on DELMIA[J/OL]. Agricultural Development & Equipments, 2009. http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotal-NJJY200907005.htm

[9] 王巍, 高雪松, 穆志国, 等. 人机工程仿真技术在飞机零组件装配中的应用 [J]. 航空制造技术, 2017, 60(9): 92–96.

WANG Wei, GAO Xuesong, MU Zhiguo, et al. Application of man-machine engineering simulation technology in aircraft component assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(9): 92–96.

[10] 郝天峰, 贾晓亮. 面向 PLM 的飞机虚拟协同维修性分析及评价 [J]. 航空制造技术, 2015, 58(18): 80–85.

HAO Tianfeng, JIA Xiaoliang. Analysis and evaluation of virtual co-maintenance of aircraft for PLM[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(18): 80–85.

[11] 曾毅, 尚建忠, 曹玉君, 等. 维修性设计中的可视性评价方法研究 [J]. 工程图学学报, 2009, 30(1): 70–74.

ZENG Yi, SHANG Jianzhong, CAO Yujun, et al. Study on the method of visibility evaluation in maintainability design[J]. Journal of Engineering Graphics, 2009, 30(1): 70–74.

通讯作者: 张永建, 硕士、助理工程师, 研究方向为飞机数字装配技术, E-mail: zyj_harry@163.com。

(责编 逸飞)

(上接第91页)

[6] 邵忠喜, 富宏亚, 韩振宇. S形进气道纤维铺放轨迹规划和优化方法 [J]. 宇航学报, 2010, 31(3): 855–861.

SHAO Zhongxi, FU Hongya, HAN Zhenyu. Path planning and optimization algorithm for fiber placement of S-shaped inlet[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(3): 855–861.

[7] 王显峰, 富宏亚, 韩振宇. 复杂形体面片缠绕成型方法的分析与实现 [J]. 宇航材料工艺, 2006, 36(6): 39–41.

WANG Xianfeng, FU Hongya, HAN Zhenyu. Analysis and realization of patch winding method for complex form[J]. Aerospace Material & Technology, 2006, 36(6): 39–41.

[8] 党旭丹, 肖军, 还大军. 自动铺丝平行等距轨迹规划算法实现 [J]. 武汉大学学报 (理学版), 2007, 53(5): 613–616.

DANG Xudan, XIAO Jun, HUAN Dajun. Implementation on fiber placement parallel equidistant path generation algorithm[J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2007, 53(5): 613–616.

[9] 林福建. 自动铺丝束成型的关键技术 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2005(3): 25–26.

LIN Fujian. The key technology about automatic fiber placement[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2005(3): 25–26.

[10] 邵忠喜, 富宏亚, 韩振宇. 纤维铺放轨迹规划的两种方法及其比较研究 [J]. 材料工程, 2009(S2): 349–353.

SHAO Zhongxi, FU Hongya, HAN Zhenyu. Comparative study on two methods of fiber placement path planning[J]. Material Engineering, 2009(S2): 349–353.

通讯作者: 马志涛, 高级工程师, 研究方向为数控机床、复合材料构件成型、航空专用装备等, E-mail: 808s@sina.com。

(责编 逸飞)

(上接第95页)

[7] 杨胜群. VERICUT 数控加工仿真技术 [M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2013: 1–18.

YANG Shengqun. VERICUT numerical control machining simulation technology [M]. 2nd edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 1–18.

[8] 史琦. TC21 钛合金高性能铣削工艺基础研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

SHI Qi. Research on high performance milling of titanium alloy TC21[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.

[9] 何宁. 高速切削技术 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2012: 38–50.

HE Ning. High speed cutting technology[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2012: 38–50.

[10] 汤爱君, 刘战强. 铣削加工系统三维稳定性理论研究进展 [J]. 工具技术, 2008, 42(5): 3–5.

TANG Aijun, LIU Zhanqiang. Perspectives and progress in three-dimensional stability lobes in milling chatter system[J]. Tool Engineering, 2008, 42(5): 3–5.

[11] ZHOU L R, LI J F, LI F Y, et al. Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 3721–3734.

通讯作者: 李亮, 博士、教授、博士生导师, 研究方向为高速、高效切削加工, E-mail: liliang@nuaa.edu.cn。

(责编 大漠)