

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.08.011

基于机器视觉的三维织造张力控制方法

杜悟迪,刘丰,单忠德,吴晓川,陈哲

(机械科学研究总院集团有限公司先进成形技术与装备国家重点实验室,北京 100083)

摘要:为实现三维结构复合材料的高质量成型,提出了一种基于机器视觉的复合材料预制体三维织造张力控制方法并搭建了试验装置。采用机器视觉技术检测并计算织造纤维束偏角,根据织造偏角大小自动控制张紧电机转动,通过电机转动牵引张力边棒进而实现织造张力的控制。进行织造张力标定试验,将张力控制目标标定在 16.75~18.15 cN。采用基于机器视觉的三维织造张力控制方法进行纤维束张力的控制试验,织造张力控制在 16.40~18.15 cN,纤维织造张力与标定控制张力的最大相对误差为 6.42%,织造张力最大波动 10%。使用成型机进行张力主动控制试验发现,织造过程中纤维束之间无缠结,不与边棒发生干涉,织造过程顺利,织造偏角控制在 $-4^{\circ}\sim 4^{\circ}$,实现了复合材料三维织造过程中的纤维束张力控制。

关键词: 三维织造; 张力控制; 复合材料; 机器视觉

中图分类号: TB332 ; TP29 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)08-0061-05

Three-Dimensional Weaving Tension Control Method Based on Machine Vision

Du Wudi, Liu Feng, Shan Zhongde, Wu Xiaochuan, Chen Zhe

(State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment, China Academy of Machinery Science and Technology Group Co. Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract : In order to realize the high quality forming of three-dimensional structure composites, the tension control method and experimental device based on machine vision technology were studied, which were used for forming of the three-dimensional composite preform. The fiber weaving angle was recognized by the machine vision technology. The rotation of tension motor was automatically controlled according to the fiber weaving angle. Then the tension bar was controlled by the tension motor to realize the control of weaving tension. The weaving tension calibration test was carried out, and the tension control target was calibrated between 16.75 cN and 18.15 cN. The control test of weaving tension was carried out by using the method of 3D weaving tension control based on machine vision. The test results showed that the weaving tension was controlled between 16.40 cN and 18.15 cN, and the maximum relative error between fiber weaving tension and calibrated tension was 6.42% and the maximum fluctuation of weaving tension was 10%. The control test of weaving tension based on the forming machine was carried out. During the weaving process there is no entanglement between fiber bundles and no interference with the side bar. The weaving angle is controlled between -4° and 4° . The tension control method based on the machine vision technology can realize the fiber tension control during the composite preform three-dimensional weaving process.

Keywords : 3D weaving ; tension control ; composite ; machine vision

20 世纪 70 年代以来,三维结构增强的复合材料相对于二维复合材料,由于其抗分层能力强的优势受到了广泛关注^[1]。目前已经应用于 LEAP 发动机风扇叶片^[2]、猎户座飞行器热防护系统^[3]等航空

航天、国防军工领域。随着大型飞机、重载火箭的需求牵引,对复合材料提出了尺寸大型化、结构复杂化的发展要求。预制体作为决定复合材料性能的关键部分,对其成型工艺与装备也提出了更高的要求。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51675213)

通讯作者: 刘丰,博士,研究员,硕士研究生导师,主要研究方向为先进成形技术及装备 E-mail: liufengcam@126.com

收稿日期: 2020-05-14

引用格式: 杜悟迪,刘丰,单忠德,等. 基于机器视觉的三维织造张力控制方法 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(8):61-65, 70.

Du Wudi, Liu Feng, Shan Zhongde, et al. Three-dimensional weaving tension control method based on machine vision[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(8):61-65, 70.

复合材料三维预制体成型方法主要有三维机织技术、三维编织技术、数字化柔性导向三维织造技术等^[5-7]。由于成型过程中的纤维束张力对预制体成型质量有着重要影响,织造过程中纤维束张力过大会使纤维束过量磨损^[4],因此成型过程中的张力调控得到了业界的关注。卢绪凤^[8]基于三维角联机织技术,建立了机织过程中各个部件对于织造张力影响的数学模型,提出使用模糊PID策略进行机织张力的控制。陈云军^[9]通过对多经轴主动卷绕配合摆动辊进行调控,实现了经纱张力的实时调控。扈昕瞳等^[10]建立了三维圆编织中关于携纱器放线速度对编织张力影响的数学模型,给出了合理的放线速度选择区间。Zhang Y J等^[11]针对三维径向圆编织技术,分析了内外表面编织工艺中计算纤维束摩擦和张力的数学模型,认为在大型编织预制体编织时内表面编织技术有利于降低磨损提高预制体质量。王晗等^[12]分析了圆编织工艺中张力骤变的原因,对编织携纱锭子的产生张力原理进行了探讨,给出了编织携纱锭子的优化方向。Xu Q等^[13]通过采集纺纱过程中的纱线气圈特征,建立张力与气圈参数的拟合关系,实现了非接触式的纺纱纱线张力检测,拓展了张力检测的方式。陈海波^[14]直接对纤维束施加载荷产生张力,分析了不同张力条件下织造过程对纤维束拉伸强度的影响,给出了纤维束张力调控的合理区间。

在数字化柔性导向三维织造技术中三维多针织造方法是以导向阵列作为节点,同时将多束纤维束由织造针引导铺设在导向阵列内部,铺设一定层数后进行压实致密化,重复进行铺设和压实,最终形成致密的三维结构预制体^[15]。在成型过程中需要对多束纤维同时进行张力的调控,其调控效果的好坏会影响到致密化压实工艺的顺利进行和导向阵列的变形,决定了预制体的成型质量。因此对复合材料预制体柔性导向三维多针织造过程中进行张力调控方法的研究具有重要意义。

1 试验装置设计

1.1 装置原理设计

复合材料预制体柔性导向多针三维织造张力控制试验台根据图1张力调控方法进行设计,碳纤维束一端与织造针相对固定,另一端与已织造预制体相连,张力边棒作用在碳纤维束上,受到张力施加线的牵拉使织造偏角发生变化,从而导致碳纤维束上受力情况发生变化产生张力。在织造过程中织造

偏角为正时,易将已经铺平的预制体内纤维束向上拽开,织造偏角为负时,碳纤维束易与预制体外侧的固定边棒发生干涉,因此织造偏角控制目标为 0° 。为减少纤维束损伤,纤维束织造张力一般不大于 20 cN ^[12]。复合材料预制体柔性导向多针三维织造张力控制试验台主要包括机械结构和控制系统两部分,如图2所示。其中,机械结构主要包括模拟织造运动机构、纤维束张力控制机构。控制系统包括图像采集模块、单片机控制模块、张力传感采集模块、执行驱动模块等。

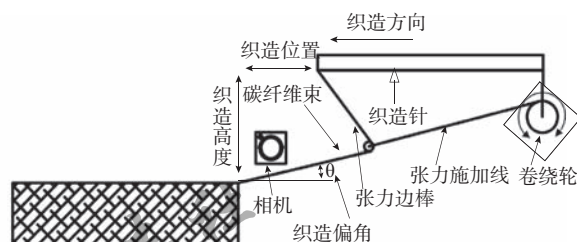


图1 张力调控方法示意图



图2 织造张力控制试验台

1.2 机械结构设计

模拟织造运动机构使用丝杠模组来模拟织造针水平移动和竖直移动。张力控制机构如图3所示,采用步进电机配合卷绕轮实现张力线的卷绕,从而

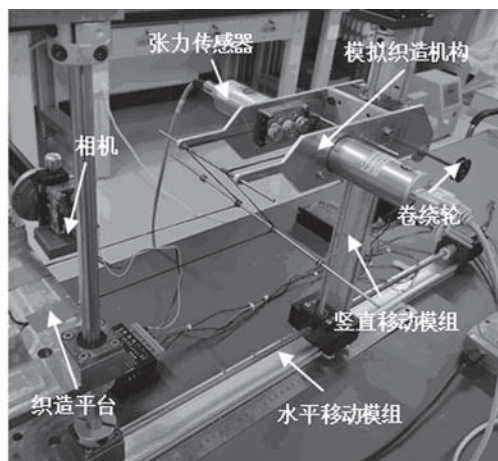


图3 织造张力控制试验台机械结构实物图

收紧或放松张力施加线,控制张力边棒位置,实现对织造偏角和织造张力的调控。碳纤维束一端固定在模拟织造机构上,一端固定在织造平台上来模拟织造高度和预留织造碳纤维束长度。

1.3 控制系统设计

控制系统硬件采用计算机作为上位机对织造过程中织造张力和织造偏角进行记录,织造偏角通过 MT9V034 传感器,搭配 F2.0–3.6 mm 无畸变镜头实现图像的采集。张力的测量采用两个 Schmidt 的 TS-100-CE2 型张力传感器对两束碳纤维束同时进行测量,使用 YAV UMS 8AD PLUS 数据采集卡对张力传感器发出的电压信息进行采集,并上传给上位机。电机和相机的控制采用 STM32H7 单片机进行控制,采用 TB6600 驱动器实现电机驱动。控制系统框架如图 4 所示。

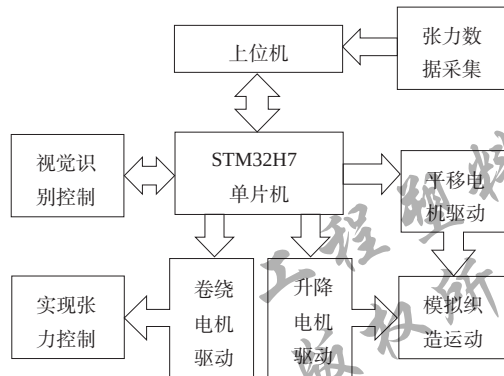
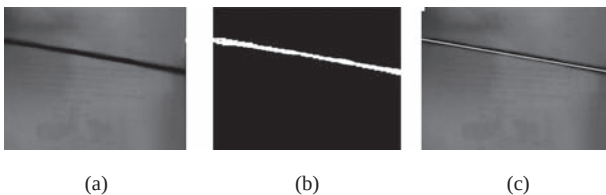


图4 张力控制系统框架图

采用 OpenMV IDE 进行控制程序的开发。首先将相关传感器完成初始化后采集灰度图像信息,使用霍夫变换检测图片中的纱线偏角。纱线偏角检测效果如图 5 所示。将纱线偏角与设定值比较,根据误差采用比例微分 PI 控制策略对电机进行速度和旋转方向的调整,进而调整张力边棒位置,实现织造偏角控制,控制流程如图 6 所示。



a—原图;b—二值图;c—霍夫变换检测出直线

图5 碳纤维束偏角检测效果

2 结果与讨论

使用织造张力控制试验台进行试验,试验环境温度为 20~25℃,湿度为 30%~70%。张力边棒使用直径为 3 mm 的 304 不锈钢圆棒,质量为 20.5 g。

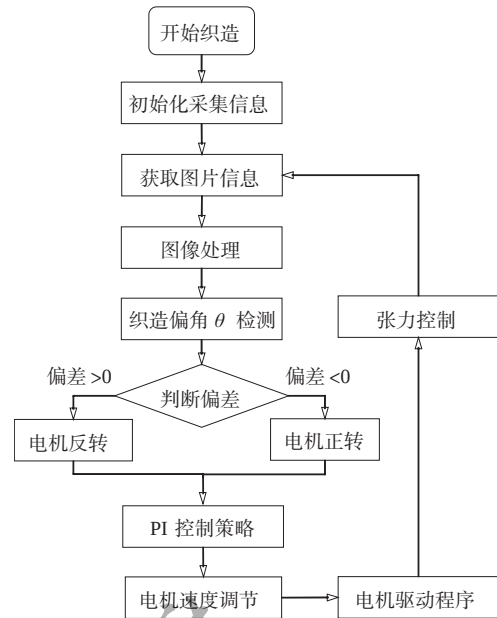
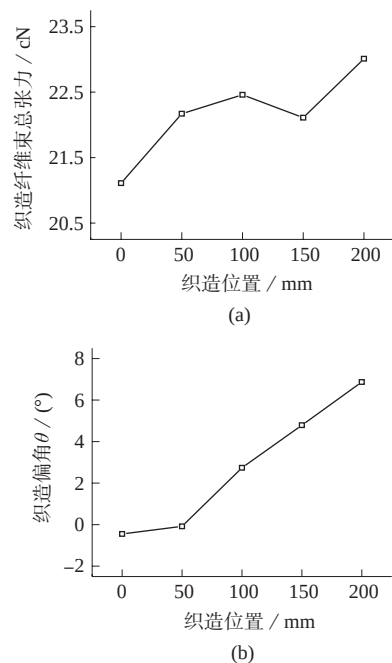


图6 织造张力控制流程图

使用两束长度为 310 mm 的 T300-3K 碳纤维束进行模拟织造,织造系统的运动速度 20 mm/s,织造高度为 75 mm。

进行无张力边棒位置控制的织造张力调控试验作为对比试验,在织造过程中,对张力边棒施加 31.2 g 的恒定外部载荷,采用张力控制试验台进行恒定外部载荷条件下的模拟织造,获得不同织造位置处的纤维织造偏角和织造张力,结果见图 7。



a—织造张力;b—织造偏角

图7 无偏角控制织造张力及织造偏角变化

由图7可看出,随着织造过程的进行,织造张力由23.01 cN逐渐减小至21.11 cN,张力波动幅值1.9 cN,织造偏角由6.87°逐渐减小至-0.45°。

在进行织造张力调控试验前,先进行织造张力的标定试验,首先获得不同织造位置处织造偏角为0°时的织造张力,如图8所示。当织造偏角为0°时,织造张力在16.80~18.10 cN,平均织造张力17.54 cN,张力波动幅值1.3 cN,织造张力最大波动仅为7.4%,所以可以采用控制织造偏角的方法来控制织造张力。

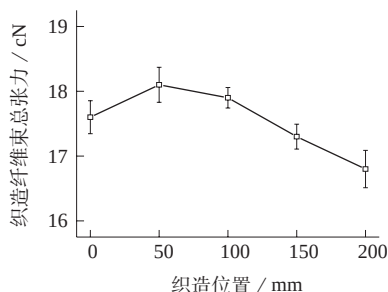
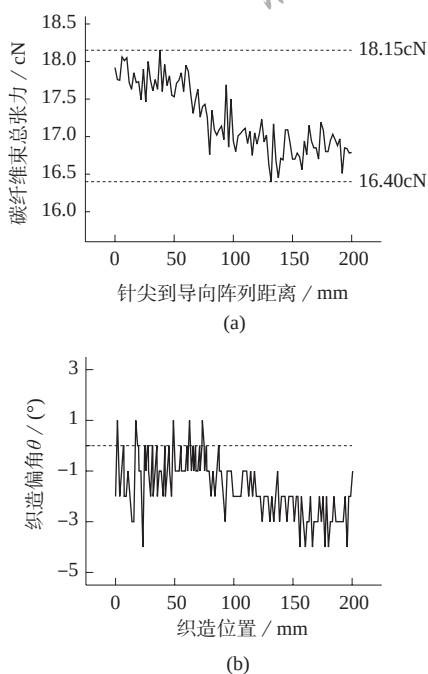


图8 织造偏角0°时的织造张力

使用织造张力控制试验台模拟织造过程,以织造偏角为0°为控制目标,利用电机实时收放张力施加线控制织造张力。采集织造张力信息和织造偏角信息,获得织造过程中织造张力和织造偏角的控制效果,如图9所示。



a—织造张力;b—织造偏角

图9 张力控制下的织造张力和织造偏角变化

在模拟织造过程中对碳纤维束进行基于机器视觉的张力控制,织造张力实际控制在16.40~18.15 cN,纤维织造张力与标定控制张力的最大相对误差为6.42%,张力波动幅值1.75 cN,平均织造张力为17.23 cN,织造张力最大波动为10%。织造偏角最大误差为-5°,织造偏角波动6°,平均织造偏角为-1.51°。即在织造过程中,张力边棒保持在预制体高度以下偏角仅为1.51°,既不会影响已铺设纤维层,也不会与固定边棒发生干涉。

基于织造张力控制试验台的模拟织造结果分析,在3DCFW-240M型复合材料预制体三维织造成型设备上搭建张力控制机构,并进行张力控制试验。三维织造成型设备将101束310 mm长的T300-3K碳纤维束同时铺设进导向阵列内,织造高度75 mm,张力边棒使用直径为3 mm的304不锈钢圆棒,质量为20.5 g。

在未进行张力控制时,101束织造纤维随织造系统运动,进入织造阵列之前,预留纱线发生相互缠结等现象,无法顺利进行铺放,影响织造进程,如图10所示。

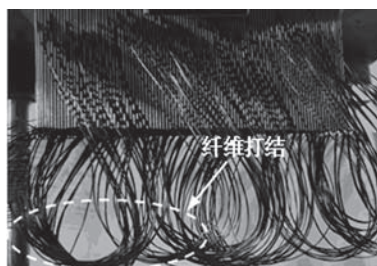


图10 无张力控制的织造过程中纤维束打结现象

为改善纤维缠结情况,需采用张力边棒进行织造纤维束整理,张力边棒具有一定自重,织造纤维束虽未相互缠结,但紧贴于导向阵列边缘,如图11所示。此时,未对张力边棒施加张力控制,因此张力边棒产生倾斜,导致纤维束与导向阵列两侧边棒发生干涉。

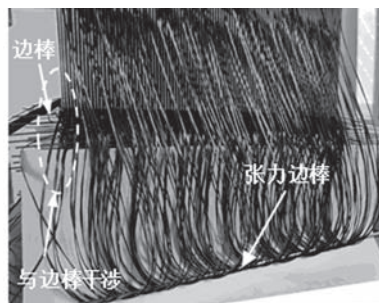


图11 仅施加张力边棒的织造过程中纤维束与边棒干涉

在 3DCFW-240M 型复合材料预制体三维织造成型设备上搭建张力控制机构并施加张力调控,织造过程中控制效果如图 12 所示。可知,张力边棒保持平直,纤维束沿张力边棒均匀排布,未见明显缠结,由于张力边棒位置的控制,使得织造纤维束一直保持在已织造纤维层的上方,利于纤维束在导向阵列内部的顺利铺放。

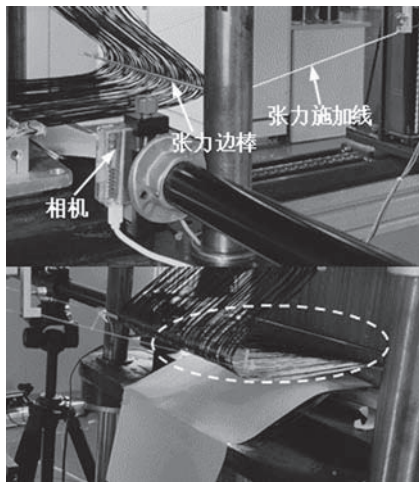


图 12 进行张力控制的三维织造过程

织造偏角的控制结果如图 13 所示。由图 13 可看出,在使用复合材料预制体三维织造成型设备进行织造时,利用张力控制装置进行织造偏角的控制能够有效控制碳纤维束的织造偏角,织造过程中织造偏角在 $-4^{\circ} \sim 4^{\circ}$ 波动,织造偏角控制较好,织造过程中未发生纤维束打结等现象,织造过程顺利。

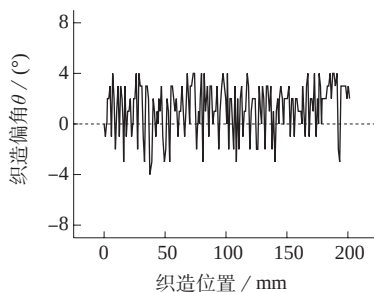


图 13 实际织造张力控制效果

3 结论

基于复合材料预制体柔性导向多针三维织造成型工艺,提出了一种基于机器视觉和嵌入式系统控制技术的张力控制方法,设计并搭建了张力控制试验台,能够实现对三维多针织造张力控制的试验模拟。采用基于机器视觉技术进行纤维束张力控制的方法进行了织造纤维张力控制试验。经过机器视

觉检测调控的纤维织造张力与标定控制张力的最大相对误差为 6.42%,织造张力最大波动 10%,实现了复合材料预制体三维织造过程中的纤维束张力控制。在 3DCFW-240M 织造设备上基于机器视觉技术的张力调控和纤维束偏角控制,织造过程纤维束整齐排布在张力边棒上,纤维束之间无缠结,控制效果良好,能够为三维复合材料的高质量、高精度成型提供技术支撑。

参考文献

- [1] 益小苏,杜善义,张立同. 复合材料手册[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
Yi Xiaosu, Du Shanyi, Zhang Litong. Composite materials manual[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2009.
- [2] 关留祥,李嘉禄,焦亚男,等. 航空发动机复合材料叶片用 3D 机织预制体研究进展[J]. 复合材料学报,2018,35(4):748-759.
Guan Liuxiang, Li Jialu, Jiao Yanan, et al. Review of 3D woven preforms for the composite blades of aero engine[J]. Acta Materiae Composite Sinica,2018,35(4):748-759.
- [3] Gardiner G. First 3D woven composite for NASA thermal protection systems[EB/OL].<https://www.compositesworld.com/blog/post/first-3-d-woven-composite-for-nasa-thermal-protection-systems>,2016-3-3.
- [4] 李潭,顾铁卓,王绍凯,等. 碳纤维束起毛量测试方法[J]. 材料工程,2017,45(7):84-90.
Li Tan, Gu Yizhuo, Wang Shaokai, et al. Measuring method for fuzz mass of carbon fiber tow[J]. Journal of Materials Engineering, 2017,45(7):84-90.
- [5] Unal P G. 3D woven fabrics[M]. London: InTech Open Access Publisher,2012.
- [6] Sontag T, Yang H, Gries T, et al. Advances in 3D Textiles[M]. London: Elsevier,2015.
- [7] Shan Zhongde, Liu Feng, Dong Xiaoli, et al. Three-dimensional weave-forming method for composites:US,8600541B2[P]. 2013-12-03.
- [8] 卢绪凤. 碳纤维立体织机多层经纱张力研究[D]. 天津:天津工业大学,2018.
Lu Xufeng. Research on multilayer warp tension of carbon fiber three-dimensional loom[D]. Tianjin:Tiangong University,2018.
- [9] 陈云军. 碳纤维多层角联织机多经轴送经系统关键技术研究[D]. 天津:天津工业大学,2015.
Chen Yunjun. Research on the key technologies in the multi-layer-angle-interlock carbon-fiber weaving machine multi-shaft warp system[D]. Tianjin:Tiangong University,2015.

- 2007(10):937-944.
- Lyu Ang, Zhang Lina. Advance in solvents of cellulose[J]. Acta Polymerica Sinica, 2007(10):937-944.
- [8] 温敬运,邱晓宇,李明飞,等. 半纤维素基水凝胶制备及应用研究进展[J]. 材料工程, 2020, 48(2):1-10.
- Wen Jingyun, Qiu Xiaoyu, Li Mingfei, et al. Research progress in preparation and application of hemicellulose-based hydrogels[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(2):1-10.
- [9] 许杜亮,莫秀梅. 3D 打印技术制备明胶纳米微球基复合凝胶支架[J]. 东华大学学报:自然科学版, 2014, 40(6):718-722.
- Xu Duliang, Mo Xiumei. Scaffolds made of composite gels based on gelatin nanoparticles by 3D printing technology[J]. Journal of Donghua University: Natural Science, 2014, 40(6):718-722.
- [10] Qin X, Lu A, Zhang L. Gelation behavior of cellulose in NaOH / urea aqueous system via cross-linking[J]. Cellulose, 2013, 20(4):1669-1677.
- [11] Jin H, Zha C, Gu L. Direct dissolution of cellulose in NaOH / thiourea / urea aqueous solution[J]. Carbohydrate Research, 2007, 342(6):851-858.
- [12] Cai J, Zhang L. Unique gelation behavior of cellulose in NaOH / urea aqueous solution[J]. Biomacromolecules, 2006, 7(1):183-189.
- [13] 毕永豹,杨兆哲,许民. 3D 打印 PLA / 麦秸粉复合材料的力学性能优化[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(4):24-28.
- Bi Yongbao, Yang Zhaozhe, Xu Min. Optimization for mechanical properties of PLA / wheat straw flour composites applied in 3D printing[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(4):24-28.
- [14] 刘洋子健,夏春蕾,张均,等. 熔融沉积成型 3D 打印技术应用进展及展望[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(3):130-133.
- Liu Yangzajian, Xia Chunlei, Zhang Jun, et al. Application progress and prospect of fused deposition molding 3D-printing[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(3):130-133.
- [15] 冯韬,陈继飞,王超,等. 激光固化纤维素凝胶的 3D 打印研究[J]. 纤维素科学与技术, 2020, 28(1):42-47.
- Feng Tao, Chen Jifei, Wang Chao, et al. 3D printing study of laser-cured cellulose gel[J]. Journal of Cellulose Science and Technology, 2020, 28(1):42-47.
- [16] 刘晓军,苗剑飞,向声毅,等. 醋酸纤维素试样 3D 打印成型性能分析[J]. 塑料, 2017, 46(5):62-65.
- Liu Xiaojun, Miao Jianfei, Xiang Shengyi, et al. Performance analysis of cellulose acetate samples formed by 3D printing[J]. Plastics, 2017, 46(5):62-65.
- [17] 李昆, Yoann De Rancourt De Mim, 郭嘉. 软物质材料 3D 打印技术及应用进展[J]. 塑料, 2019, 48(5):101-106.
- Li Kun, Yoann De Rancourt De Mim, Guo Jia. 3D printing technology and application progress of soft material[J]. Plastics, 2019, 48(5):101-106.
- [18] 邓斌,黄文艺,邓鑫. 3D 打印用聚合物材料的进展[J]. 塑料, 2019, 48(4):127-131.
- Deng Bin, Huang Wenyi, Deng Xin. Research progress of polymer materials for 3D printing[J]. Plastics, 2019, 48(4):127-131.

(上接第 65 页)

- [10] 扈昕瞳,张玉井,孟焯,等. 编织锭子放线速度对纱线张力调控的建模与影响[J]. 纺织学报, 2017, 38(6):111-117.
- Hu Xintong, Zhang Yujing, Meng Chuo, et al. Modeling and influence about speed of released-yarn in braiding spindles on yarn tension[J]. Journal of Textile Research, 2017, 38(6):111-117.
- [11] Zhang Y J, Meng Z, Hu X, et al. Modeling and analysis of friction in end-face / inner-face circular braiding processes[J]. Journal of the Textile Institute, 2018:1-9.
- [12] 王晗,孟焯,孙以泽,等. 碳纤维编织机携纱锭子编织过程纱线张力分析[J]. 毛纺科技, 2017, 45(12):61-65.
- Wang Han, Meng Chuo, Sun Yize, et al. Analysis of yarn tension in the braiding process of yarn carrier of carbon fiber braiding machine[J]. Wool Textile Journal, 2017, 45(12):61-65.
- [13] Xu Q, Mei S Q, Zhang Z M. Measurement method of yarn tension based on CCD technology[J]. Advanced Materials Research, 2011, 230-232:89-93.
- [14] 陈海波. 复合材料柔性导向三维织造成形机送丝系统研究[D]. 北京:机械科学研究总院, 2013.
- Chen Haibo. Research on fibers feeder system for 3D flexible oriented composite forming machine[D]. Beijing:China Academy of Machinery Science and Technology Group Co. Ltd., 2013.
- [15] 单忠德,刘丰. 复合材料预制体数字化三维织造成形[M]. 北京:机械工业出版社, 2019.
- Shan Zhongde, Liu Feng. Composites preforms digital 3-dimensional woven forming[M]. Beijing:china Machine Press, 2019.