

doi: 10.7690/bgzdh.2019.12.017

纤维复合材料缠绕导向装置结构与受力分析

段学俊¹, 吴庆堂¹, 修冬¹, 陈洪海¹, 卢忠², 李珊¹, 张瑞君²

(1. 长春设备工艺研究所超精密加工技术研究室, 长春 130012;

2. 内蒙古第一机械集团有限公司第四分公司, 内蒙古 包头 014000)

摘要: 为满足复合材料纤维缠绕的要求, 对纤维缠绕机的纤维导向装置进行结构设计及受力分析。通过对纵向运动机构、旋转装置机构和分线机构的设计, 利用 solidworks 进行 3 维建模, 将设计出的纤维导向装置各零件进行装配, 调节各零部件尺寸, 实现缠绕功能, 利用 simulation 对装置中受力较大零件的 3 维模型进行受力分析, 并通过缠绕设备进行气瓶缠绕验证。实验结果表明, 各部件均能满足设备使用要求。

关键词: 复合材料; 气瓶缠绕; 结构设计; 受力分析

中图分类号: TP202 **文献标志码:** A

Structural Design and Force Analysis of Fiber Composite Material Cylinder Winding Guide Device

Duan Xuejun¹, Wu Qingtang¹, Xiu Dong¹, Chen Honghai¹, Lu Zhong², Li Shan¹, Zhang Ruijun²

(1. Research Department of Ultra-precision Manufacture Technology, Changchun Institute of Equipment & Process, Changchun 130012, China; 2. No. 4 Factory, Inner Mongolia First Machinery Group Co., Ltd., Baotou 014000, China)

Abstract: For satisfying the requirements of composite material fiber winding, the fiber guide device of the fiber winding machine is carried out structure design and pressure analysis. Through design of longitudinal and horizontal motion structure, rotation equipment structure and branching structure, use Solidworks for 3D modeling. The designed parts of the fiber guide device were assembled, and the sizes of the parts were adjusted for winding function. Use simulation to carry out pressure analysis for pressed part 3D model. Use winding equipment for cylinder winding verification. The test result shows that the parts can meet the equipment operation requirement.

Keywords: composite materials; cylinder winding; structural design; force analysis

0 引言

CNG 气瓶作为汽车能源盛装容器的基本技术要求是耐高压、质量轻、高可靠性、容量大, 纤维缠绕机作为气瓶的纤维缠绕装置, 向着高效率、多轴联动、张力精密控制、多轴缠绕的方向发展。笔者针对 CNG 气瓶纤维缠绕要求, 开展复合材料缠绕设备纤维导向装置的设计研究。合理的纤维导向装置能够大幅度提高缠绕质量、精度和可靠性^[1-8]。通过对纤维导向装置整体结构的设计以及对关键部件的受力分析, 对纤维导向装置进行加工、组装和调试, 达到了高精度纤维缠绕要求, 使纤维缠绕设

备具备了高精度、高质量和高可靠性。

1 缠绕导向装置的总体设计

纤维复合材料缠绕导向装置主要包括横向运动机构、纵向运动机构和旋转装置机构, 主要作用是配合缠绕芯模进行匹配运动并对纤维进行导向, 进而实现缠绕功能。

1.1 横向运动机构设计

为满足缠绕功能, 纤维导向装置必须具有横向进给功能, 并根据设备设计要求具备一定行程。在设计横向运动机构时, 进行了 2 种直线传动方案的比较如表 1 所示。

表 1 直线传动方式优缺点对比

方案	导向	传动方式	优点	缺点
1	直线导轨	齿轮齿条传动	传递动力矩大、承载力大、精度高、寿命长、长距离传动和保持恒定的传动比等。	若安装精度差时, 传动噪声大、磨损大, 相比丝杆传动精度低, 运动稳定性较差。
2	直线导轨	丝杆传动	短距离中高精度传动, 噪声低, 适合高速往返传动。	成本高, 长距离水平传动时, 应考虑丝杠自重下垂变形。

通过对比分析, 结合缠绕芯模的长度范围要求, 最终采用方案 1 为横向运动机构的传动方式。

收稿日期: 2019-09-11; 修回日期: 2019-10-18

基金项目: 吉林省重点科技攻关项目(2016020405GX)

作者简介: 段学俊(1985—), 男, 吉林人, 硕士, 副研究员, 从事精密机械制造研究。E-mail: Dxj19850612@163.com。

横向运动机构包括立板、上板、伺服电机、直角减速器、齿轮齿条和直线导轨等。纤维导向装置中的旋转装置和纵向运动机构安装在立板下方。为了保证纤维导向装置的旋转轴线与主轴轴线等高，对立板进行配做来补偿装配过程中的累积误差。立板通过螺钉连接在上板下方，上板上方安装导轨滑块、伺服电机和直角减速器。齿轮齿条的相对运动和直线导轨的导向实现了纤维导向装置的横向进给运动。横向运动机构 3 维模型及实物如图 1 所示。

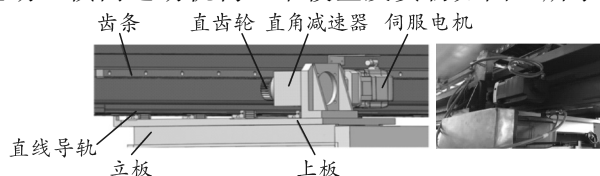


图 1 横向运动机构 3 维模型及实物

1.2 纵向运动机构设计

纵向运动机构是保证能够顺利完成纤维缠绕的关键机构。纤维导向装置的出纱环在配合芯模转动进行缠绕的过程中，由于出纱点和落纱点不重合，必然会形成悬纱长，而出纱环在纵向上的移动可以调整悬纱长。当出纱环移动到气瓶圆弧段部位时，出纱环会根据圆弧段的外轮廓尺寸在保证悬纱长不变的情况下，进行 X 轴和 Z 轴的插补运动，需要纤维导向装置进行纵向移动。

现有纤维缠绕机可以缠绕的 CNG 气瓶最大直径为 600 mm，缠绕不同直径的气瓶时，纤维导向装置的出纱环距离气瓶中心轴的纵向距离不同；因

此，纵向运动机构行程必须大于缠绕 CNG 气瓶最大半径。在进行圆弧段缠绕时，为了对出纱环在纵向上的坐标进行精确控制，在尽量减小纵向机构尺寸的原则下，参考表 1 直线传动优缺点对比，采用伺服电机、丝杠传动和直线导轨结合的传动方式进行设计，考虑空间布局的合理性，采用圆弧齿同步带进行传动，将动力传递到丝杠上，进而带动丝杠螺母驱动用于安装 U 轴旋转装置的滑台做往复进给运动。

在该运动机构中，丝杠导向座采取了一体式焊接结构，整体强度高，一次装夹可完成所有安装孔的加工，同时增大了静止惯量，减小上滑板运动冲量对整套机构的不良影响。纵向运动机构 3 维模型及实物如图 2 所示。

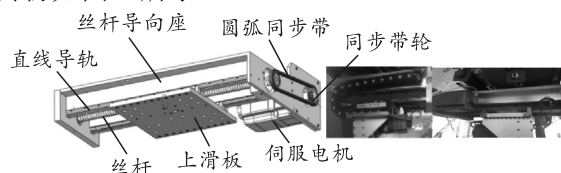


图 2 纵向运动机构 3 维模型及实物

1.3 旋转装置机构设计

旋转装置由上下旋转轴 (U 轴) 及辅助零部件组成，U 轴用来控制纤维在出纱环与芯模进行匹配运动的过程中随缠绕方向变化而进行相应的角度旋转。设计旋转装置时，在传动方面考虑了齿轮传动、链轮传动和带传动 3 种设计方案，其优缺点比较情况如表 2 所示。

表 2 传动优缺点对比

方案	传动方式	优点	缺点
1	齿轮传动	传动比准确，效率高，结合紧凑，寿命长，瞬间传动比恒定且稳定性高	润滑条件要好，不适合灰尘较多以及远距离传动
2	链轮传动	可以在高温、重载、低速、尘埃较大的环境应用，适合远距离传动，传递功率大，传动比准确	瞬时链速和瞬时传动比不是常数，工作中有冲击和噪声，磨损后容易跳齿，不易在载荷变化很大和急速反向的传动中使用。
3	带传动	噪声小，传动比准确，无需润滑保养，寿命长，远距离传动	弹性滑动，皮带打滑

通过分析表 2 可知：齿轮传动的缺点为占用空间大，不适合分配尺寸要求，而链轮传动不仅会产生大的噪声，而且具有传动不稳定等因素。相比齿轮传动和链轮传动，带传动的优势显得尤为突出，同时满足远距离传动、噪声小、传动比准确等特点。为了满足缠绕机的双工位缠绕，旋转装置需要有设计上、下 U 轴。考虑到结构和空间布局的合理性，采用 3 个同步带轮用一根同步带进行传动的方式，通过增大包角及增多啮合齿数的方法来增加同步带传动的可靠性和平稳性，旋转装置如图 3 所示。

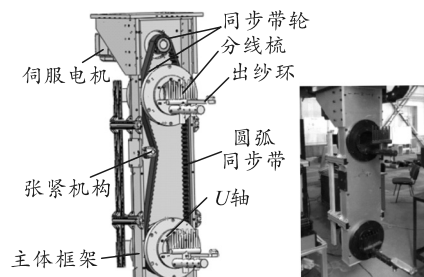


图 3 旋转装置

1.4 分线机构的设计

纤维缠绕中，可能会有多束纤维同时进行缠绕

的情况，纤维浸胶之后会穿过旋转装置的 U 轴中孔后再缠绕至芯模上；因此，在 U 轴中孔前后分别设有纤维导向机构和分线梳机构。纤维导向机构由分线架、分线板和过渡环组成；分线梳机构配合分线板防止纤维束与 U 轴中孔壁发生刮碰。分线板上装有多个过渡圆环便于纤维束通过。圆环两端经倒圆角处理并加以精密抛光，达到了较高的表面粗糙度，避免了纤维和金属尖角因刮蹭而产生的起丝现象发生。分线梳机构和过渡圆环如图 4 所示。

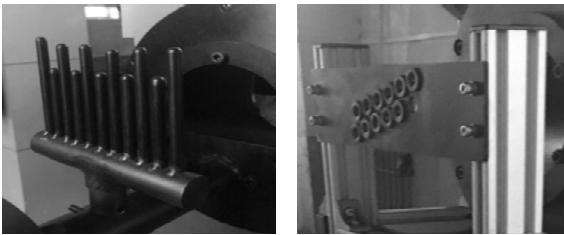


图 4 分线梳及导向过渡圆环

2 关键构件受力分析

2.1 上板受力分析

由于铝合金材料的优良特性，上板材料采用 6061 铝合金以达到降低上板质量、减小上板运动冲量的目的。已知上板承受纤维导向装置的质量为 364.69 kg，对上板进行单独的受力分析，纤维导向装置静止时，上板所承受的力 $F=3\ 573.962\text{ N}$ 。将绘制好的上板 3 维模型图进行赋材，利用 simulation 对上板进行固定约束、施加作用力、网格生成和运行分析。施加的固定约束为导轨滑块固定端，作用力的大小为上板下方纤维导向装置的重力。分析得到受力云图和位移云图如图 5 所示。

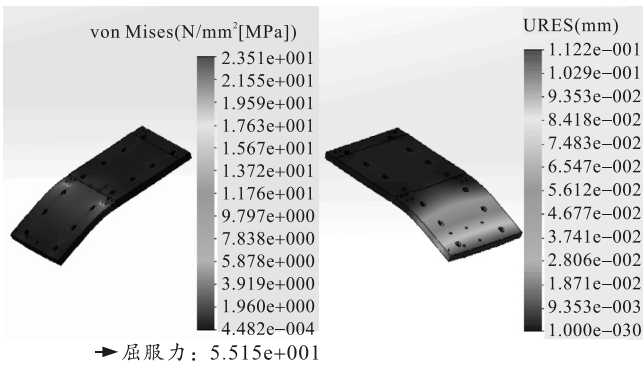


图 5 上板静力学云图

上板的最大应力发生在直线导轨滑块固定端点，最大应力为 23.51 MPa，小于 6061 铝合金的屈服极限。上板的最大变形发生在上板悬臂的一端，最大变形量为 0.112 mm，在允许范围之内，所以上板的设计符合要求。

2.2 出纱环受力分析

纤维束在通过出纱环缠绕至芯模上的过程中，纤维束需施加 0~90 N 的张力。所以，纤维束在纤维缠绕过程中会对出纱环施加反向作用力^[9-11]。对出纱环的 3 维模型进行赋材，材料为 45#钢，受力后的云图如图 6 所示。

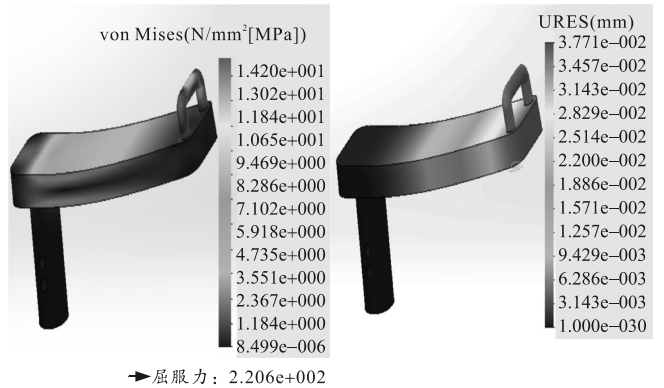


图 6 出纱环静力学云图

通过受力云图可知：出纱环最大应力为 14.2 MPa，小于屈服强度，最大变形量为 0.037 mm，在允许范围之内，所以出纱环满足使用要求。

2.3 纤维导向装置横向受力分析

纤维导向装置在进行纵向缠绕和螺旋缠绕的过程中需要进行芯模的直筒段缠绕和圆弧段缠绕。在进行芯模直筒段缠绕时，导向装置进行匀速运动，设速度为 v ，运动到圆弧段时需要减速，运动至芯模极孔位置时，速度降速为 0，再反向加速，运动至直筒段时速度达到 v 。为了便于计算，设纤维导向装置在圆弧段为匀减速和匀加速运动，设加速度为 a ，则纤维导向装置在极孔位置停止后再反向移动的瞬时位置，横向受力最大，由此可知：

$$\left. \begin{aligned} v &= at \\ F_{\max} &= 2F = 2ma \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中： m 为纤维导向装置的质量，kg； a 为加速度， m/s^2 ；时间为 t ，s；速度为 v ， m/s 。

通过计算得到最大力为 $F_{\max}=1\ 536\text{ N}$ ，纤维导向装置的主体框架材料为 6061 铝合金材质，对纤维导向装置主体框架进行静力学分析。利用 simulation 对模型进行材料选定、绘制网格、施加固定约束和施加作用力 F_{\max} ，为了将变形放大，间接增加使用安全系数，将重心受力点下移，将力施加在下端 U 轴上，变形若在允许范围内，则纤维导向装置的设计符合要求。分析结果如图 7 所示。

Low-molecular-weight Siloxanes in Polydimethyl-siloxane[C]. 中国化学会第十二届全国量子化学会议论文摘要集, 北京: 中国化学会, 2014: 1.

- [35] SRIHAKULUNG, Or. The Study of Com-putational Chemistry Simulation of Ferrocene for Solid Propellant [C]//Asian Conference on Defence Technology, 2015: 143-146.
- [36] LIU Q Z. Application of the Clustering Method in Molecular Dynamics Simulation of the Diffusion Coefficient[J]. Journal of Ocean University of China, 2008(1): 43-47.

- [37] GROOT, ROBERT D, WARREN, et al. Dissipative particle dynamics: Bridging the gap between atomistic and mesoscopic simulation[J]. The Journal of Chemical Physics, 1997, 107(11): 4423-4435.
- [38] 虞振飞, 付小龙, 蔚红建, 等. 聚氨酯弹性体中 NG 和 BTTN 迁移的介观模拟[J]. 含能材料, 2015, 23(9): 858-864.
- [39] 张艳丽, 姬广富, 龚自正, 等. TATB 基 PBX 介观结构的耗散粒子动力学模拟[J]. 含能材料, 2008, 16(6): 659-662.

(上接第 76 页)

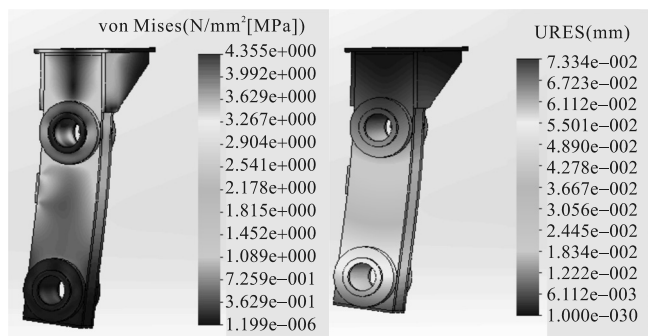


图 7 纤维导向装置静力学云图

通过应力云图可以看出: 最大应力发生在上 U 轴上端, 最大应力为 4.355 MPa, 在允许范围内。根据位移云图可知: 纤维在芯模极孔位置时, 纤维导向装置的最大变形位置为 U 轴的下端, 最大变形量为 0.073 mm, 在允许范围内, 即整体结构在横向最大力作用下的使用符合设计要求^[9-11]。

3 缠绕实验

利用研发的纤维缠绕设备进行气瓶缠绕实验, 纤维缠绕之后, 气瓶上的纤维紧密排列不松散, 纤维缠绕均匀, 符合预期精度要求, 缠绕设备的稳定性和一致性高, 证明了纤维导向装置结构设计是合理可行的。缠绕后的气瓶成品如图 8 所示。

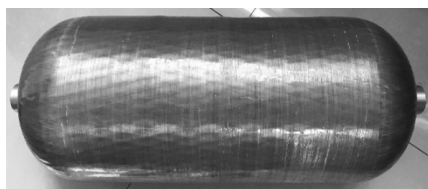


图 8 气瓶纤维缠绕成品

4 结束语

笔者根据纤维复合材料气瓶缠绕的特点, 对缠绕导向装置的结构进行了设计方案说明及受力分析, 研制出纤维复合材料气瓶缠绕的导向装置, 并

应用该装置进行了气瓶缠绕实验, 得到满足要求的复合材料气瓶。实验结果表明: 纤维导向装置结构合理, 能够保证导向装置与各伺服轴的相对运动精度, 对使用纤维缠绕设备进行高精度气瓶的缠绕实验研究及工程化应用具有重要意义。

参考文献:

- [1] 郑津洋, 李静媛, 黄强华, 等. 车用高压燃料气瓶技术发展现状和我国面临的挑战[J]. 压力容器, 2014, 31(2): 43-51.
- [2] 徐君臣, 银建中. 纤维缠绕复合材料气瓶研究进展[J]. 应用科技, 2012, 39(4): 64-71.
- [3] 邓京兰. 汽车用全复合材料天然气(CNG)气瓶[C]//中国硅酸盐学会玻璃钢分会. 第十四届玻璃钢/复合材料学术年会. 中国硅酸盐学会玻璃钢分会, 2001: 4.
- [4] 何亚飞, 矫维成, 杨帆, 等. 树脂基复合材料成型工艺的发展[J]. 纤维复合材料, 2011, 28(2): 7-13.
- [5] 蔡金刚, 于柏峰, 杨志忠, 等. 我国纤维缠绕技术及产业发展历程与现状[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(9): 42-51, 18.
- [6] ABDALLA F H, MUSTASHER S A, KHALID Y A, et al. Design and fabrication of low cost filament winding machine[J]. Mater Des, 2007, 28(1): 234.
- [7] 王瑛琪, 盖登宇, 宋以国. 纤维缠绕技术的现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2011, 25(5): 110-113.
- [8] 谢霞, 邱冠雄, 姜亚明. 纤维缠绕技术的发展及研究现状[J]. 天津工业大学学报, 2004(6): 19-22, 29.
- [9] 王春香, 王永章, 路华, 等. 精密张力控制系统及其控制精度的研究[J]. 仪器仪表学报, 2000(4): 407-408, 415.
- [10] COSTA V A F, SOUSA A C M. Modeling of flow and thermo-kinetics during the cure of thick laminated composites[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2003, 2(4): 15-22.
- [11] 王世寰, 蔡志刚, 张克国. 数控缠绕机床嵌入式纤维张力控制系统研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2008(12): 52-54.