

卷绕式磁控溅射镀膜机张力控制系统分析与优化

孙智慧, 肖 玮, 林 晶, 智 慧, 张 莉, 董文丽, 朱 琳

(哈尔滨商业大学 包装科学与工程技术实验室, 哈尔滨 150028)

摘要: 为避免卷绕式磁控溅射镀膜过程中张力引起的薄膜缺陷, 以及原有张力系统响应速度慢、稳定性差等不足, 对张力系统进行了分析与优化。通过分析确定了影响张力的关键因素是收(放)卷的速度和卷径变化, 建立了张力系统动力学模型, 采用 simulink 对张力控制系统进行仿真分析, 利用实验验证的方法, 分别在原设备和改造后的设备上制备 Al_2O_3 薄膜, 并对比其 SEM 图像。改造后的系统可在 0.65 s 内实现薄膜张力实时调整, 而原系统需要 8 s。改造后的系统能够保证镀制过程中的张力恒定, 膜层致密均匀、卷材层间无空隙和皱纹。

关键词: 张力; 磁控溅射; 镀膜; 卷绕; simulink

中图分类号: TB486 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)23-0072-05

Analysis and Optimization of Tension Control System of Winding Magnetron Sputtering Coating Machine

SUN Zhi-hui, XIAO Wei, LIN Jing, ZHI Hui, ZHANG Li, DONG Wen-li, ZHU Lin

(Packaging Science and Engineering Technology Laboratory, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

Abstract: In order to avoid the film defect caused by tension in the process of winding magnetron sputtering coating as well as the slow response and poor stability of original tension system, the tension system was analyzed and optimized. It was determined through analysis that the key factors influencing tension are the speed of winding and unwinding as well as the change of the roller's diameter. The dynamics model of tension system was established and Simulink was used for simulation analysis of the tension control system. Al_2O_3 films were prepared in original equipment and transformed equipment respectively for experimental verification. The SEM images of Al_2O_3 prepared in different ways of tension control were compared. The result showed that the reconstructed system can realize real-time adjustment of the film tension in 0.65 s, but the original system need 8 s; the reconstructed system can ensure constant tension, compact and uniform film layer, and no wrinkle and gap between the film layers.

Key words: tension; magnetron sputtering; coating; winding; simulink

卷绕式磁控溅射镀膜是能够使产品具有优于基材本身性能的技术, 如耐磨损、耐腐蚀、阻隔性、导电性、绝缘性等, 从而提高产品质量、延长产品寿命, 其广泛应用于航空航天、电子、食品包装等领域^[1]。张力控制是卷绕式磁控溅射镀膜的关键技术, 其稳定性和精度直接影响产品的质量。由于大中型磁控溅射镀膜机的张力系统结构复杂, 影响因素多, 系统参数具有时变性和不确定性。现有设备的张力控制、自动跟踪系统和调偏装置不完善, 在卷制过程中无法保持

恒张力, 导致卷材供送不稳定, 直接影响镀膜质量。该研究通过对卷绕式磁控溅射镀膜设备张力控制技术的研究, 设计出具有在线调整功能的卷材张力控制系统。

1 卷绕式真空镀膜设备的工作原理

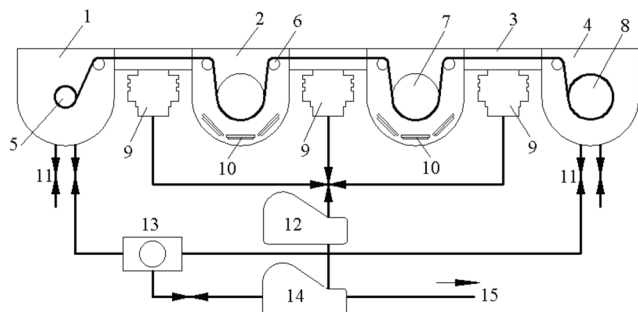
镀膜机可在柔性基材上镀制金属膜或非金属膜, 设计的卷绕式磁控溅射镀膜实验样机结构见图 1, 主

收稿日期: 2013-10-21

基金项目: 哈尔滨市科技创新人才研究专项资金项目(2011RFXG018)

作者简介: 孙智慧(1962-), 男, 辽宁人, 硕士学位, 哈尔滨商业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为包装机械设计理论及智能化。

要由收(放)卷室、3个气氛隔离腔、2个溅射室、真空系统、充气系统、卷绕装置、气动系统、水冷系统和电控系统等组成。



1-收卷室;2-镀膜室;3-气氛隔离室;4-放卷室;5-收卷辊;6-导向辊;7-主辊;8-放卷辊;9-分子泵;10-溅射靶材;11-电磁阀;12-维持泵;13-罗茨泵;14-机械泵;15-排气口

图1 卷绕式磁控溅射镀膜机

Fig.1 Diagram of winding magnetron sputtering coating machine

镀膜前将卷材安装在放卷辊上,设计的试验样机适合卷径范围在 100 ~ 450 mm 之间的卷材,真空系统由机械泵、罗茨泵、维持泵和分子泵组成。卷材在放卷辊、主辊和收卷辊的带动下进行卷绕,此张力系统为开环控制,各辊虽采用伺服电机进行驱动,其转速可根据需求进行调节,但其无法完成张力在线实时控制,卷材易在镀膜过程中产生断裂、皱纹等现象。针对这些缺陷对张力系统的结构和控制方式进行了改进,整个系统由 PLC 进行程序控制,执行元件之间软件互锁,可避免手动错误操作造成事故。

2 卷绕式磁控溅射镀膜过程中张力问题的分析

2.1 张力控制的重要性

影响镀膜质量的因素众多,如工作气压、电源功率、镀膜时间、卷材张力等。该研究着重对张力控制的精度与稳定性进行研究。由于薄膜放卷与收卷时的卷径此消彼长,在整个镀膜过程中是不断变化的,这将引起卷材张力的变化,如果对张力不加以控制,过大、过小或不稳定的张力会严重影响镀膜质量,见图2。

为了保证镀膜质量与卷绕效果,应不断调整薄膜张力以保证材料行走速度的稳定性,防止滑动与起伏;确保厚度、宽度等尺寸精度,防止皱纹和伸缩;确

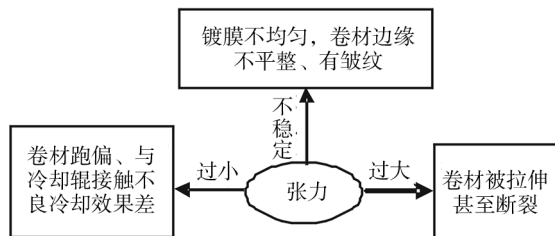


图2 张力对镀膜质量的影响

Fig.2 Impact of tension on quality of the coating

保收卷边缘整齐和缠绕密度合适,不发生错位、不产生间隙。

2.2 张力控制系统的设计

2.2.1 张力系统的动力学分析

张力是卷材受到外力作用时的内应力,与材料的弹性系数有关。影响张力变化的因素除了卷筒圆度不够、料辊偏心等,卷绕时所受牵引力引起的牵引速度的变化,是导致薄膜张力变化最主要的原因,张力的产生及受力模型见图3。

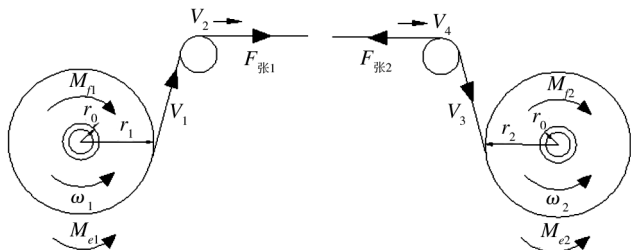


图3 张力的产生及受力模型

Fig.3 Tension formation and the stress model

放卷时的力学模型为:

$$F_{张1}r_1 - M_{e1} - M_{f1} = \frac{d}{dt}(J_1\omega_1) \quad (1)$$

收卷时的力学模型为:

$$M_{e2} - F_{张2}r_2 - M_{f2} = \frac{d}{dt}(J_2\omega_2) \quad (2)$$

式中: $F_{张}$ 为卷材张力; r 为卷材卷径; M_e 为电机转矩; M_f 为阻力矩; ω 为放(收)卷辊角速度; J 为等效转动惯量。其中,

$$J = J_0 + J_r + J_{\rho_0} \quad (3)$$

式中: J_0 为电机轴的转动惯量; J_{ρ_0} 为空轴转动惯量,是固定值; J_r 为卷材转动惯量。由于 r 是不断变化的,所以 J_r 是时变值,在设计张力控制系统时,应对动态转矩进行相应的补偿,其函数表达式为:

$$J_r = \int_0^r d(mr^2) \quad (4)$$

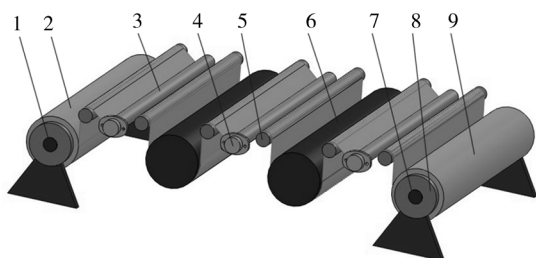
为了避免由张力引起的薄膜质量缺陷,应控制公式(1)和(2)中的 ω_1, ω_2 的大小,使上述公式中的 $F_{\text{张}1}$ 和 $F_{\text{张}2}$ 相等,即实现恒张力控制的条件为:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{M_{e1} + M_{f1} + \frac{d}{dt}(J_1 \omega_1)}{M_{e2} - M_{f2} - \frac{d}{dt}(J_2 \omega_2)} \quad (5)$$

2.2.2 卷材张力系统的设计

张力的控制有间接和直接2种方法,其中直接张力控制是用张力传感器构成的闭环调节,根据传感器的不同分为位置式和反馈式控制。该研究薄膜总是处于运动状态,而且要求张力恒定,这就要求系统能够准确补偿由于加、减速及摩擦所带来的动态力矩,因此选择反馈式张力控制方法,实现卷绕式磁控溅射镀膜过程中张力的闭环控制。

设计的卷绕式磁控溅射镀膜设备的张力系统由收(放)卷辊、导向辊、传感器、水冷主辊、磁粉制动器、调速电机等组成,见图4。其中冷却主辊的速度决定



1-放卷辊;2-基材母卷;3-张力辊;4-传感器;5-导向辊;
6-水冷主辊;7-收卷辊;8-磁粉制动器;9-成品卷

图4 卷绕式磁控溅射镀膜设备张力系统结构

Fig. 4 The structure diagram of tension system of winding magnetron sputtering coating equipment

了镀膜速度,磁粉制动器利用激磁电流来控制收放卷辊转矩和线速度,使基材张力恒定,运动平稳,镀制平整均匀^[2]。采用张力辊两端轴承下方的应变式力传感器对张力进行实时检测,通过检测结果的反馈值来控制放(收)卷辊电机的转速,实现闭环控制。卷材在镀膜过程中的运动包括基材从放卷辊放出,经过张力辊、导向辊等过渡辊,在带有冷却功能的主辊上完成磁控溅射镀膜,最后经过张力辊和导向辊等回到收卷辊上。

2.2.3 卷材张力控制系统的仿真分析

卷材张力系统的分析需注意:基材母卷质量大,

镀膜前应主动放卷,避免启动瞬间卷筒惯性带来的影响;各辊间互相影响,某一区域的张力变化会导致相邻部分产生速度波动;在镀膜过程中,为保证图3中 V_2 与 V_4 相等, ω_1 应随卷材直径减小而增大,若 ω_1 不变, $F_{\text{张}1}$ 会导致卷材被拉伸,甚至断裂; ω_2 则应随卷材直径增大而减小,如 ω_2 不变, $F_{\text{张}2}$ 会造成膜卷内松外紧,产生皱纹^[3]。

针对上述易出现的问题,利用simulink采用模糊-PID相结合的控制方式对卷材张力控制系统进行仿真设计^[4-7],以收卷辊为例,设计的仿真模型见图5。

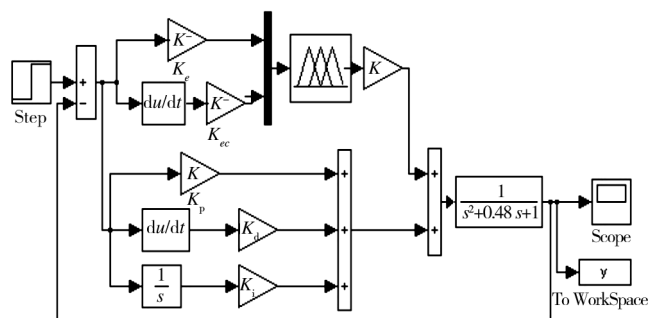


图5 张力控制系统仿真模型

Fig. 5 Simulation model of tension control system

假设镀制高质量薄膜所需张力为 $F_{\text{张}}$,当收卷张力 $F_{\text{张}2}$ 与 $F_{\text{张}}$ 相等时,系统不予调节;随着收卷直径的增大, $F_{\text{张}2}$ 与 $F_{\text{张}}$ 会出现不相等的情况^[8],此时系统以张力偏差 e 及偏差变化值 ec 为输入参数,伺服电机根据控制指令对收卷辊转速 ω_2 进行调节,从而达到对 $F_{\text{张}2}$ 的控制^[9]。当 e 或 ec 范围较大时采用模糊控制以提高响应速度;当 e 或 ec 范围较小时转成PID控制以提高系统的精度与稳定性。系统根据实时监测的张力值及经过反复调试确定的阈值自动切换控制方式,2种方式不会同时出现,互不影响^[10-14]。这种方式能够有效避免常规PID控制无法在线调整不断变化的张力值以及模糊控制抗干扰性差,不能实现最优控制等缺陷。

系统运行后,利用scope输出的仿真结果见图6。在simulink中,把图5中的反馈连线、微分器、积分器和模糊控制器的输出连线都断开,则为原设备的控制方式,其仿真结果见图7。

比较图6和图7的结果可以看出,该设计改进的控制系统超调量小,响应速度快,0.65 s即可达到稳定状态,而现有设备要达到此状态则需要近8 s。基于此,对控制系统进行改造,改进后的张力控制系统

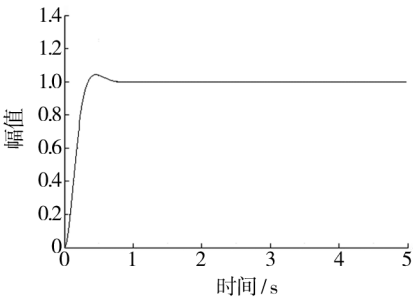


图6 改进后的控制系统仿真结果

Fig. 6 Simulation results of improved control system

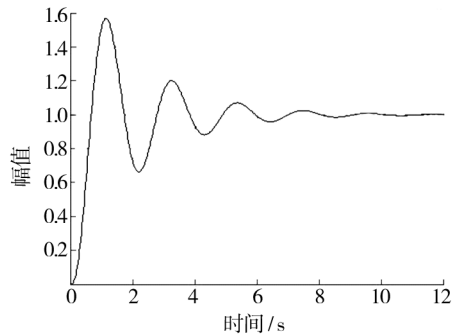


图7 原控制系统仿真结果

Fig. 7 Simulation results of original control system

动态性能稳定,在加减速瞬间能够较好地控制张力及速度大小。

3 实验验证

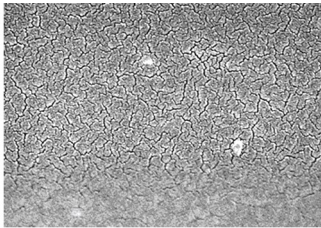
实验基材选择 PET 薄膜,其膜厚为 20 μm ,长度方向弹性模量为 0.67 GPa,屈服强度为 28.11 MPa,基材卷外径为 $\phi_1=265\text{ mm}$ 、孔径为 $\phi_2=75\text{ mm}$ 、膜宽为 400 mm。在 PET 上磁控溅射镀制透明 Al_2O_3 薄膜,薄膜的制备工艺参数见表 1。实验分为 A、B 2 组,A 组采用原有的张力控制系统,在实验前根据经验设定参数^[15],为开环控制;B 组采用本研究中设计的张力控制系统进行闭环控制。

表1 磁控溅射沉积 Al_2O_3 薄膜的工艺参数

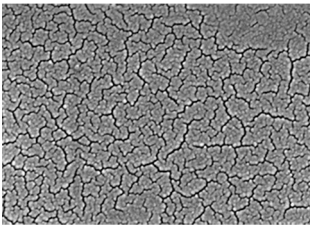
Tab.1 Process parameters of Al_2O_3 film deposited by magnetron sputtering

镀膜时间 /min	直流电流 /A	本底气压 /Pa	氩气流量/($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)	放膜张力 /N	收膜张力 /N	张力辊张力 /N
30	2	7.5×10^{-3}	105	35	30	9

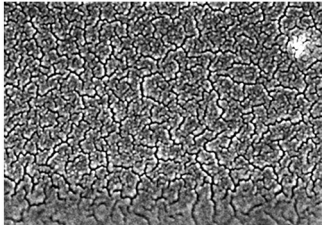
为了验证系统的控制速度、精度以及稳定性,每组实验采用 3 个样品,分别在卷材线速度为 2,4,6 m/min 时进行镀膜实验,其薄膜的 SEM 图像见图 8-9。



a 2 m/min



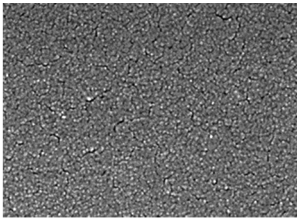
b 4 m/min



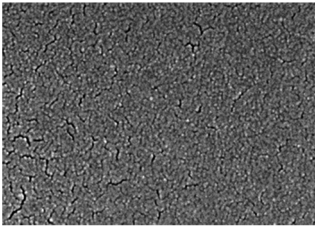
c 6 m/min

图8 A 组不同线速度下镀膜的 SEM 图像

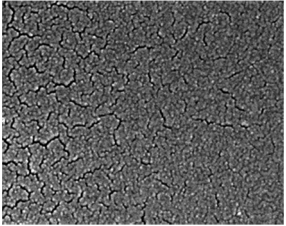
Fig. 8 SEM image of group A of coating under different linear velocity



a 2 m/min



b 4 m/min



c 6 m/min

图9 B 组不同线速度下镀膜的 SEM 图像

Fig. 9 SEM image of group B of coating under different linear velocity

由 SEM 图像可以看出 A 组的薄膜裂纹较大,且不均匀性较明显,B 组在低速时几乎没有裂纹,随着速度的增大虽有裂纹和不均匀现象,但相对 A 组已有明显改善。这说明改进后的控制系统能够实现镀膜过程中张力的快速、准确、稳定的控制。

4 结语

对卷绕式磁控溅射镀膜设备的张力系统进行了详细分析与设计。采用 simulink 对控制系统进行仿真设计,实现了闭环张力控制系统,补偿了由于收(放)卷半径变化、惯性变动和卷绕速度所引起的张力变化。通过 2 组实验对所研究内容进行验证,实验结果可以明显看出,采用该设计的控制系统,薄膜运行速度平稳、镀制的薄膜几乎没有裂纹,且膜层致密均匀,没有褶皱。

参考文献:

- [1] 高德铨. 国外高真空卷绕镀膜设备发展现状[J]. 包装工程, 1997, 18(2): 120-122.
GAO De-quan. Current Situation of Development of High Vacuum Winding Coating Equipment in Abroad[J]. Packaging Engineering, 1997, 18(2): 120-122.
- [2] 王春香. 以磁粉离合器为执行的张力控制系统[J]. 机械与电子, 1993(3): 5-7.
WANG Chun-xiang. Tension Control System with Magnetic Powder Clutch for Execution[J]. Machinery and Electronics, 1993(3): 5-7.
- [3] EDOUARD L, DOMINIQUE K, HAKAN K, et al. Web Winding System Robustness Analysis, 2001. (余不详)
- [4] 刘白雁. 机电系统动态仿真-基于 MATLAB/Simulink[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 199-208.
LIU Bai-yan. Dynamic Simulation of Mechanical and Electrical System Based on MATLAB/Simulink[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2005: 199-208.
- [5] 宋晓峰. 高精度卷绕真空镀膜设备张力控制技术研究[D]. 上海: 上海大学 2007.
SONG Xiao-feng. The Research of Tension Control for High-accuracy Winding Vacuum Film Coating Machine[D]. Shanghai: Shanghai University 2007.
- [6] 张青, 贾宇申, 刘俊峰. 果袋机的恒张力控制[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(15): 3677-3680.
ZHANG Qing, JIA Yu-shen, LIU Jun-feng. Research on Tension Control System for the Fruit-bag Machine[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52(15): 3677-3680.
- [7] JOHN B. YERASHUNAS A D, HARTLEY T T. Control of Lateral Motion in Moving Webs[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2003, 11(5): 684-693.
- [8] LYNCH A F, BORTOFF S A, ROBENACK K. Nonlin-ear Tension Observers for Web Machines[J]. Automatica, 2004, 42(3): 1517-1524.
- [9] 杨梅. 滑模变结构在收卷张力控制系统中的应用与仿真[J]. 包装工程, 2013, 34(3): 44-48.
YANG Mei. Application and Simulation of Sliding Mode Control in Winding Tension Control System[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(3): 44-48.
- [10] 雷菊珍, 王保升, 汪木兰. 基于 CMAC 的恒张力控制系统研究[J]. 包装工程 2009, 30(8): 12-15.
LEI Ju-zhen, WANG Bao-sheng, WANG Mu-lan. Study of Constant Tension Control System Based on CMAC[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(8): 12-15.
- [11] OKADA K, SAKAMOTO T. An Adaptive Fuzzy Control for Web Tension Control System[J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 1998, 34(4): 1762-1767.
- [12] JANABI-SHARIFI F. A Neuron-fuzzy System for Looper Tension Control in Rolling Mills[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(1): 1-13.
- [13] 李钢, 孙宇. 摩擦收卷中柔幅材料力学建模及张力控制策略研究[J]. 包装工程, 2009, 30(10): 90-93.
LI Gang, SUN Yu. Study of Mechanical Model and Tension Control Strategy of Soft and Wide Sheet in New Surface Winder[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(10): 90-93.
- [14] 赵庆海, 贾中华. 模糊自适应 PID 控制在张力控制中的应用[J]. 包装工程, 2008, 29(1): 87-89.
ZHAO Qing-hai, JIA Zhong-hua. Application of Self-adaptive Fuzzy-PID in the Tension Control[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(1): 87-89.
- [15] 徐克非, 朱鸿, 孙智慧. Al_2O_3 薄膜包装材料工艺参数与阻隔性的实验研究[J]. 中国印刷与包装研究, 2009(1): 92-96.
XU Ke-fei, ZHU Hong, SUN Zhi-hui. Experimental Study on the Relationship Between Technological Parameters and Barrier Property of Al_2O_3 Film Packaging Material[J]. China Printing and Packaging Research, 2009(1): 92-96.