

石墨烯电热膜刮膜影响因素与响应机构的研究

王基圆¹, 房灵申², 李天文³

(1. 沈阳理工大学 机械工程学院, 沈阳 110159; 2. 昆山智能装备研究院, 江苏 苏州 215347;

3. 昆山燎原自动化设备有限公司, 江苏 苏州 215316)

摘要:石墨烯电热膜采暖具有绿色、灵活、控制方便等优势,是国家目前推行“煤改电”清洁采暖的产品之一。为提高石墨烯电热膜生产线的自动化水平,设计开发一种电极处自动刮膜装置。分析研究影响因素并设计试验,从温度和压力两个角度确定刮膜装置的工艺窗口。从理论上分析刮刀的受力过程,将石墨烯电热膜的厚度误差转换成压力差,设计一种误差补偿机构,成功开发一种基于石墨烯电热膜自动化生产的热熔刮膜装置。

关键词:石墨烯电热膜;热熔刮膜装置;误差补偿机构;自动化生产;试验

中图分类号:TH162 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)12-0143-05

自国家提出碳达峰碳中和的目标^[1-2],各企事业单位纷纷响应,提出多项措施,煤改电清洁采暖工程便是其中之一。《山东省供热条例》^[3]指出,鼓励和扶持安全、高效、节能环保供热新技术、新工艺、新材料、新设备的研究开发和推广使用。石墨烯电热膜从供热方式上属于分布式供热,从供热用途上属于清洁供暖,从热源分类上属于电力供暖,符合国家目前倡导的清洁供暖产品,具有政策的推广性^[4]。2016 年中国北方地区电供暖面积约 4 亿 m² 占比 2%;2019 年清洁取暖率达到 20%;2021 年清洁取暖率计划达到 40% 以上^[5]。随着国家对电供暖的积极推广和石墨烯电热膜导电导热性能的提高^[6-8],其在供暖市场的占有量越来越大,因此对石墨烯电热膜企业的生产能力也提出了更高的要求^[9]。目前哈尔滨理工大学对于自动化生产线的装配、裁剪等装置已做相应研究^[10-11]。本文主要针对电热膜电极上覆盖的 PET (聚对苯二甲酸乙二醇酯) 薄膜刮离工序进行研究。目前工业上剥膜工艺主要有机械式和电热式^[12]。机械式通过控制锋利的刀片来刮离电热膜表面的 PET 薄膜,由于 PET 薄膜厚度仅 0.1 mm,因此机械式工作时容易在载流条表面造成刮痕或损坏涂层;而电热式在机械式的基础上做出改进,降低刮刀的锋利程度,同时提高刮刀的温度,将 PET 薄膜熔化去除。电热式刮膜工艺保持了机械式的低成本,并解决了机械式刮伤石墨烯电热膜的问题,更能保证产品的质量。但目前市场上广泛采用的是手持式电热刀。手持式电

热刀依靠工人手动刮膜,具有安全隐患且无法完成自动化生产工序之间的衔接,进行大批量生产。因此需要设计一种基于自动化生产线的热熔刮膜装置,降低刮伤率和安全隐患,提高质量的稳定性,达到自动化高效生产的目的。

1 主要工艺要求

石墨烯电热膜为多层结构(图 1),上、下两层为半透明 PET 薄膜,中间是石墨烯涂层和两条相互平行的载流条(铜带),经涂布、覆合、裁切等工序后,在载流条上焊接导线。焊线之前刮离电极处的 PET 薄膜。以山东省某公司的产品为研究对象,其刮离薄膜的主要工艺要求和技术参数为:①电极处 PET 薄膜去除干净;②石墨烯涂层和载流条保持完整;③PET 薄膜刮离尺寸为宽(15 mm±1 mm)长(18 mm±2 mm),其周围 PET 薄膜不能塌落、熔化变形;④及时清理切屑,避免粘刀或滴落在电热膜上;⑤生产过程中避免有烟雾、明火产生。

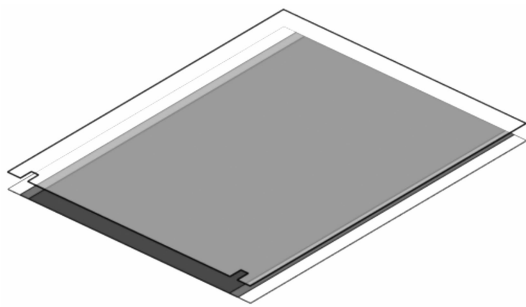


图 1 石墨烯电热膜结构

收稿日期:2022-07-10

作者简介:王基圆(1997—),男,湖南常德人,沈阳理工大学机械工程学院,硕士研究生,研究方向为石墨烯电热膜智能产线优化。

2 热熔刮膜装置的研制

2.1 确定刮膜温度和压力极限

2.1.1 热熔刮膜理论分析

石墨烯电热膜在刮膜时能量主要从加热的刮膜刀片传递到 PET 薄膜上。其中热传递主要发生在刀片和 PET 薄膜以及刀片和载流条之间,热传递的方式主要以热传导为主。因此分析中主要考虑刮膜过程的热传导,对于一个封闭的系统,根据热力学第一定律:

$$Q - W = \Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p \tag{1}$$

式中: Q 为热量; W 为做功; ΔU 为系统内能; ΔE_k 为系统动能; ΔE_p 为系统势能。由于系统中 $W \ll Q$ 、 $\Delta E_k \ll Q$ 、 $\Delta E_p \ll Q$,令 $\Delta E_p = \Delta E_k = W = 0$ 即系统内能 ΔU 近似等于刀片热传导的热能 Q [13]。由于刮膜过程中热传递是一个复杂的非线性瞬态过程,因此在本系统中内能的变化效率约等于刀片的热传递效率,即 $q = dU/dt = dQ/dt$,即刀片的温度越高,传导的热能越快,PET 薄膜熔化的速率越快。同时根据手持式电热刀的刮膜经验可知,力也是影响刮膜质量的重要因素,因此找出石墨烯电热膜温度和压力的响应规律是设计本装置的关键。

2.1.2 试验

试验中采用的主要仪器设备有天平(松净精密天平 ZG-TP203,精度 0.001 g)、手持式电热刀(荣特热刀-P12 分离式电热刀)、石墨烯电热膜 10 m,红外

热像仪(FLIR E53)、万用表(FLUKE-117C 数字万用表)。其中 PET 薄膜厚度为 0.1~0.2 mm,载流条厚 0.04 mm、宽 18 mm;试验压力为 10、15、20、30 N;试验温度为 140~500 ℃。

试验步骤:首先将石墨烯电热膜平铺,一端固定,然后将另一端放在天平上,天平和石墨烯电热膜中间用隔板分开。加热手持式电热刀,直到红外热像仪测定其温度稳定。刮离 PET 薄膜,观察天平的读数,重复试验直至读数相对稳定(±10%),剪下石墨烯电热膜,观察刮膜效果,使用万用表测试导电性,记录数据完成一次试验。

不同温度和压力参数试验结果统计见表 1。
①当温度小于等于 180 ℃时,刀片无法刮离 PET 薄膜,表面仅有划痕或局部熔化。此时压力若大于 30 N,则石墨烯涂层刮坏。
②当温度处于 220~260 ℃时,刀片能刮离 PET 薄膜但是阻力较大,切屑易粘在刀片上且最大压力为 30 N。
③当温度在 300 ℃时,刮膜较为顺畅,切屑轻微粘刀,最大压力为 20 N。
④当温度在 340 ℃时,刮膜过程顺畅、切屑不粘刀且呈熔融状态,最大压力为 20 N。
⑤当温度在 380 ℃时,PET 薄膜熔化速度快,切屑不粘刀,当压力为 10 N 时石墨烯涂层遭到破坏。
⑥当温度在 400 ℃时,刮膜过程中有烟雾产生,与力无关。
⑦当温度在 420~500 ℃时,刮膜过程中有明火产生。

表 1 不同温度和压力参数试验结果

温度/℃	压力/N	PET 膜仅有划痕	局部熔化	切屑粘刀	速度慢	不导电	载流条或涂层刮坏	烟雾	明火
140	10	●	—	—	—	●	—	—	—
	15	●	—	—	—	●	—	—	—
	20	●	—	—	—	●	—	—	—
	30	●	—	—	—	●	—	—	—
180	10	—	●	—	—	●	—	—	—
	15	—	●	—	—	●	—	—	—
	20	—	●	—	—	●	—	—	—
	30	—	●	—	—	●	●	—	—
220	10	—	—	●	●	●	—	—	—
	15	—	—	●	●	—	—	—	—
	20	—	—	●	—	—	—	—	—
	30	—	—	●	—	—	●	—	—
260	10	—	—	●	●	●	—	—	—
	15	—	—	●	●	—	—	—	—
	20	—	—	●	●	—	—	—	—
	30	—	—	●	—	—	●	—	—
300	10	—	—	●	—	●	—	—	—
	15	—	—	●	—	—	—	—	—
	20	—	—	—	—	—	●	—	—
	30	—	—	—	—	—	●	—	—

续表 1

温度/℃	压力/N	PET 膜仅有划痕	局部熔化	切屑粘刀	速度慢	不导电	载流条或涂层刮坏	烟雾	明火
340	10	—	—	—	—	—	—	—	—
	15	—	—	—	—	—	—	—	—
	20	—	—	—	—	—	●	—	—
	30	—	—	—	—	—	●	—	—
380	10	—	—	—	—	—	●	—	—
	15	—	—	—	—	—	●	—	—
	20	—	—	—	—	—	●	—	—
	30	—	—	—	—	—	●	—	—
400	10	—	—	—	—	—	—	●	—
420	10	—	—	—	—	—	—	—	●
460	10	—	—	—	—	—	—	—	●
500	10	—	—	—	—	—	—	—	●

注：●表示出现此现象；—表示不出现此现象。

综上所述,石墨烯电热膜在不同温度时会呈现图 2 所示的不同现象。温度较小时,PET 薄膜达不到熔融状态,出现局部熔化、表面仅有划痕、切屑粘刀等现象。温度较大时,出现 PET 薄膜刮边塌落、石墨烯涂层刮伤等现象。同时温度变化时,石墨烯电热膜能承受的最大压力也发生变化。根据表 1 试验结果,340 ℃时刮膜效果最好。因此,热熔刮膜装置设计中,其温度上限应囊括 340 ℃,由其对应的压力数据可知,此时的压力极限小于 20 N。

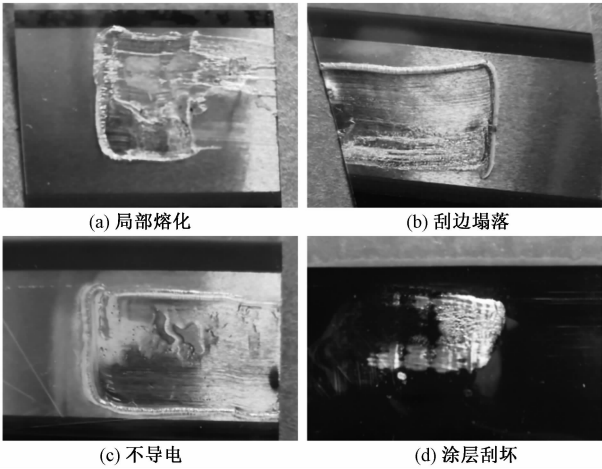


图 2 热熔刮膜的不同现象

2.2 热熔刮膜装置设计

2.2.1 结构设计

如图 3 所示,热熔刮膜装置机械结构主要由水平移栽机构、垂直移栽机构、误差补偿机构、电热刮刀和底座等组成^[14]。其中水平移栽机构由直线导轨组成;垂直移栽机构由电机、丝杆、丝杆螺母和误差补偿机构组成;误差补偿机构安装在垂直移栽机构上,由弹簧、直线导轨、滑块和调节螺栓组成。其

工作流程如下:①石墨烯电热膜运送到刮膜工位;②控制刮刀温度,将刀片加热到 340 ℃;③利用 PLC 程序控制电机带动刀片运动至电热膜上方;④垂直移栽机构带动误差补偿机构垂直下降,刀片挤压 PET 薄膜;⑤水平移栽机构通过直线导轨水平往回运动,刮离载流条表面 PET 薄膜,刮刀回到初始位置;⑥电热膜运送到下一个工位,完成一个刮膜周期。

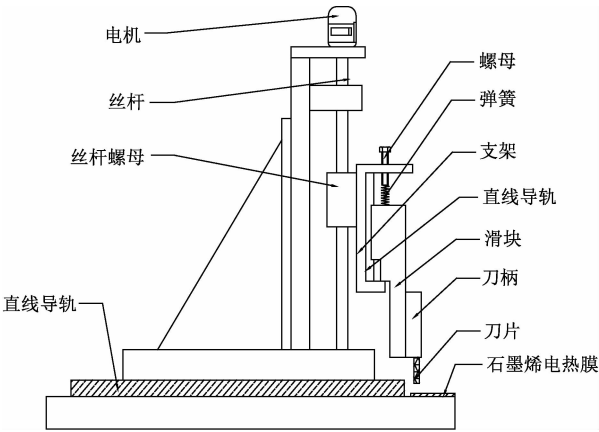


图 3 热熔刮膜装置结构组成

精度方面,热熔刮膜装置水平精度主要由直线导轨保证;垂直精度由电机、丝杆、丝杆螺母和误差补偿机构保证。由于基材、载流条、石墨烯涂层等都会产生一定的制造误差,导致落刀点在 Z 轴方向的精度存在偏差。在 Z 轴方向上,实际落刀点是任意电热膜的载流条上表面的高度位置;设定落刀点是根据标准电热膜的载流条上表面而设定的高度位置。当石墨烯电热膜较厚时,刀片会嵌入电热膜更深,导致载流条刮伤;当电热膜厚度比标准厚度薄时,刀片嵌入更浅造成 PET 薄膜刮不干净。因此,热熔刮膜装置在垂直方向上需要误差补偿机构来包容电热膜的厚度误差。

2.2.2 工作过程分析计算

刮膜过程中,刀片在整个运动周期中和刀柄、滑块一起共同运动,可将刀柄、滑块和刀片简化成一体,简称为刮刀。如图 4 中,在 3 种不同状态时,在 Z 轴方向分别对其进行受力分析如下。

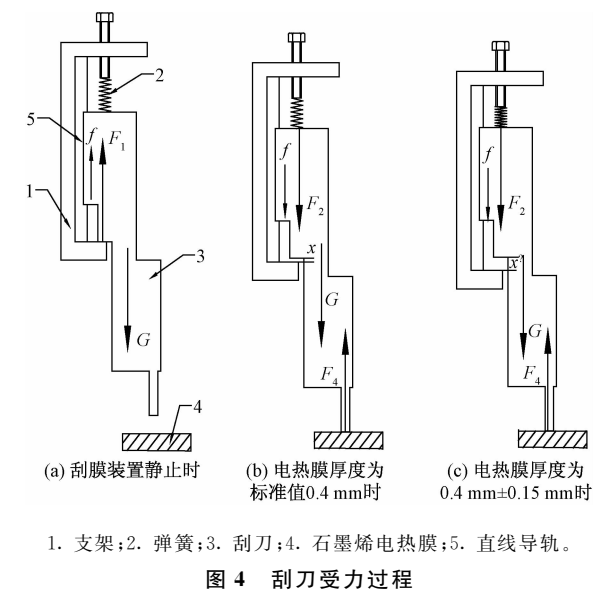


图 4 刮刀受力过程

图 4(a)为热熔刮膜装置静止时刮刀的简化受力分析,此时刮刀在 Z 轴方向受到的静力平衡有

$$G = F_1 + f \tag{2}$$

式中: G 为刮刀的重力; f 为滑动静摩擦力,有润滑时摩擦系数为 0.1~0.12; F_1 为支架 1 提供的支撑力。此时刮刀未与电热膜接触,弹簧处于自然伸长阶段,支架提供的支撑力约等于刮刀重力。

图 4(b)为石墨烯电热膜厚度为标准值 0.4 mm 时,刮膜过程中,刮刀在 Z 轴方向上的瞬时静力平衡状态。当电机通过丝杆螺母传动将刮刀下降到设定落刀点时,此时刮刀接触石墨烯电热膜后沿直线导轨向上压缩弹簧长度 X ,同时令刮刀和支架分离 X 距离,此时电热膜受到的力即为设定压力 15 N。其垂直方向简化的受力平衡方程为

$$\begin{cases} F_4 = F_2 + G + f \\ F_2 = kX \end{cases} \tag{3}$$

式中: F_4 为刮刀和石墨烯电热膜挤压后产生的压力; F_2 为弹簧压缩的弹力; X 为弹簧压缩的长度; 弹簧的弹性系数 k 设计为 5 N/mm。石墨烯电热膜垂直方向上的压力即和 F_4 大小相等、方向相反。因此设计中取压力大小为 $F_4 = 15 \text{ N} < 20 \text{ N}$,符合刮膜要求。

图 4(c)为石墨烯电热膜厚度 0.4 mm ±

0.15 mm 极限厚度时,热熔刮膜装置在 Z 轴方向的瞬时静力平衡状态。静力平衡方程简化为

$$\begin{cases} F_4 = F_2 + G + f \\ F_2 = kX_2 \end{cases} \tag{4}$$

式中: X_2 为石墨烯电热膜极限厚度时弹簧压缩的长度。当电热膜最大厚度为 0.4+0.15=0.55 mm 时,刮刀下降到电热膜表面后继续向下运动,挤压电热膜。忽略载流条的弹性形变,产生的最大压力设为 $F_{4\max}$,此时弹簧向上压缩的最大长度为 $X_{2\max}$ 。膜厚为 0.4 mm 时 $F_4 = 15 \text{ N}$;膜厚为 0.55 mm 时,石墨烯电热膜最大压力为

$$F_{4\max} = F_2 + G + f = 15 + (X_{2\max} - X)k = 15 + 0.15 \times 5 = 15.75 \text{ N} \tag{5}$$

当电热膜最小厚度为 0.4-0.15=0.25 mm 时,刮刀下降到标准膜厚的落刀点,由于电热膜厚度小,因此弹簧向上挤压长度 X_2 小,设为 $X_{2\min}$ 。此时石墨烯电热膜最小承受力为

$$F_{4\min} = F_2 + G + f = 15 - (X - X_{2\min})k = 15 - 0.15 \times 5 = 14.25 \text{ N} \tag{6}$$

即电热膜的厚度为标准厚度 0.4 mm 时,其理想刮膜压力为 15 N;当电热膜厚度为 0.25~0.55 mm 时,通过误差补偿机构将压力范围调整 14.25~15.75 N。因此根据石墨烯电热膜的压力范围,热熔刮膜装置的压力设计范围应该为 14.25~15.75 N。

3 小批量试产

根据研究结果设计热熔刮膜装置,待装配完成后,将其安装在自动化生产线上进行小批量试产。调试装置直至整机(图 5)能够稳定作业,随机选取生产线上厚 0.25~0.55 mm 的 100 片合格石墨烯电热膜进行实验。



图 5 装配整机

将局部熔化、切屑粘刀、电热膜刮坏、烟雾、明火、导电性能等作为检验标准,统计各现象数量见

表 2. 实验结果表明产品合格率为 93%，满足企业生产要求。

表 2 实验结果						%
刮膜效果	合格	局部熔化	粘刀	不导电	刮坏	烟雾、明火
数量	93	0	2	1	4	0

4 结论

1)本文设计了一种基于石墨烯电热膜自动化生产的热熔刮膜装置,该装置结构简单,经实验表明满足生产要求。配合电气控制可完成石墨烯电热膜自动化生产线的上下工序连接,提高企业生产效率。

2)该热熔刮膜装置可根据生产需求调节刮膜速度和尺寸,通过调节上下位移和弹簧参数提高产品的容差范围,也可以适应其他行业的薄膜刮离工作。因此本设计具有较好的适用性和工程应用价值。

3)科学、系统地分析了温度和压力对热熔刮膜的影响。通过对温度和压力的计算与试验,找出热熔刮膜的主要影响因素和响应条件,为此类装置的研究提供了理论基础。同时也为设计其他类型的刮膜装置提供了一种设计思路。

参考文献

[1] 中国政府网, 中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL]. [2021-09-22]. www. gov. cn.

[2] 毛莹,屈梦杰,曾利珍. 碳排放权交易试点的区域减排效应:基于 PSM-DID 模型[J]. 科技和产业, 2022, 22(5): 235-240.

[3] 山东省供热条例[S]. 山东:山东省人大常委会, 2021.

[4] JIN J, TANG Z, GAO L, et al. Feasibility analysis on the integrated application of solar energy, biogas, coal-fired boiler and radiant floor heating for rural residence[J]. Journal of Landscape Research, 2013(4): 83-89.

[5] 发展改革委, 能源局, 财政部, 等. 北方地区冬季清洁取暖规划(2017—2021 年)[R]. 北京, 2017.

[6] SUI D, HUANG Y, HUANG L, et al. Flexible and transparent electrothermal film heaters based on graphene materials[J]. Small, 2011, 7(22): 3186-3192.

[7] 李金焕, 陆建辉, 王玉丰, 等. 碳浆油墨的制备及少量石墨烯对碳浆油墨性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(14): 92-96.

[8] 王闽茜, 赵振宇. 新能源及可再生能源对能源效率及节能减排效果的影响研究[J]. 科技和产业, 2016, 16(12): 88-93.

[9] 李茂东. 石墨烯及功能产品标准体系现状分析与对策[J]. 化工新型材料, 2020(3): 17-22.

[10] 马泽坤. 电热膜装配自动线多工位回转台设计技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.

[11] 张艳慧. 电热膜装配自动线设计及其剪切机构可靠性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020.

[12] 程森林, 黄建淞, 王建锋. 基于有限元法的电热式剥线工艺工程最优温度研究[J]. 兵工学报. 2008, 29(8): 956-959.

[13] 姚仲鹏, 王瑞军. 传热学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995: 17-20.

[14] 蔡新海, 肖通虎, 陈珊妹. 新型科研用自动平板刮膜机的设计与应用[J]. 膜科学与技术, 2014, 34(3): 92-95.

Study on the Influencing Factors and Response Mechanism of Graphene Electrothermal Film Scraping

WANG Jiyuan¹, FANG Lingshen², LI Tianwen³

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;
2. Kunshan Intelligent Equipment Research Institute, Suzhou Jiangsu 215347, China;
3. Kunshan Liaoyuan Automation Equipment Co., LTD., Suzhou Jiangsu 215316, China)

Abstract: Graphene electric heating film has the advantages of green, flexible, convenient control and so on. It is one of the clean heating products that the country is currently implementing “coal to electricity”. In order to improve the automation level of graphene electrothermal film production line, to design and develop an automatic film scraping device at the electrode. The influencing factors are analyzed and the experiment is designed to determine the process window of the film scraping device from two angles of temperature and pressure. The stress process of the scraper is analyzed theoretically, the thickness error of graphene electrothermal film is converted into pressure difference, an error compensation mechanism is designed, and a hot melt film scraping device based on automatic production of graphene electrothermal film is successfully developed.

Keywords: graphene electrothermal film; hot-melt curettage device; error compensation mechanism; automated production; test