

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.90181

# 以碳基发热涂层为热源的新型炒茶机

## A new tea roasting machine with carbon-based coating as heating source

秦灿珂 陈星蔓 张金瑶 吴慎将 李党娟

QIN Can-ke CHEN Xing-man ZHANG Jin-yao WU Shen-jiang LI Dang-juan

(西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710032)

(Xi'an Technological University, School of Optoelectronic Engineering, Xi'an, Shaanxi 710032, China)

**摘要:**目的:解决传统炒茶装置加热不均、热损失及功耗高等问题。方法:采用碳基高温发热涂层新材料,在微晶玻璃炒茶器皿底部通过喷涂的方式,形成面状加热源,设计了集炒茶、杀青和传送为一体的新型炒茶机;基于 STM32 设计了温度探测、温度控制及显示、炒茶揉茶切换等电路模块。结果:新型炒茶机的整机功耗最大 1 kW,整机尺寸 350 mm×150 mm×280 mm,温控范围 20~400 °C,温控精度±1 °C;解决了传统手工制作茶叶过程中炒茶温控不精确、揉茶工序力度不可控的缺点。结论:将杀青和揉茶两道工序结合起来,能够实现“三杀三揉”工艺的自主动作切换青茶制作过程的自动化。

**关键词:**茶叶制作;发热涂层;传送装置;揉茶;炒茶机

**Abstract: Objective:** Solve the problems of uneven heating, heat loss and high power consumption of traditional tea frying device. **Methods:** Using carbon based high temperature heating coating material, a surface heating source was formed at the bottom of the glass-ceramic tea frying vessel by spraying. The corresponding tea roasting device, green removing device and conveying device were innovatively designed. Based on STM32, the circuit modules of temperature detection, temperature control and display, stir frying and rubbing tea switching were designed. **Results:** The maximum power consumption of the whole machine was 3 kW, and the size of the whole machine was 350 mm×150 mm×280 mm. The temperature control range was 20~400 °C, and the temperature control accuracy was ±1 °C. The shortcomings of the traditional manual tea making process such as temperature control inaccurate and tea kneading process uncontrollable were solved. **Conclusion:** The machine combines the two processes of killing green tea and kneading tea, which can realize the independent action switching of "three kill-

ing and three kneading" process, and realizes the automation of green tea production process.

**Keywords:** tea making; exothermic coating; conveyor; knead tea; tea frying machine

中国传统茶叶制作过程主要包括杀青和揉茶,杀青即炒茶,是指在翻炒锅中使茶叶逐渐干燥的一种手法<sup>[1]</sup>,揉茶即在每次杀青后手工揉捻使茶叶的水分快速蒸发并塑形的过程,杀青和揉茶要根据不同的茶叶种类往复进行多次<sup>[2]</sup>。这种传统手工制茶制作过程全凭炒茶师傅的经验判断,存在茶叶品质不一,灶火加热不环保,卫生状况不能保证,高温可能对工人造成伤害等缺点<sup>[3]</sup>。

在 1958 年研制出的“58 型锅式杀青机”,经不断改进定型为 6CS84 型杀青机后曾被广泛应用<sup>[4]</sup>,这种机器虽然可以模拟人工炒茶,但是温度不可控,次品率高。为了克服锅式炒茶机的缺点,陈尊诗等<sup>[5]</sup>研制出了滚筒式茶叶杀青机,其在茶叶杀青机器中占据了大部分市场。微波茶叶杀青机是利用微波进行加热<sup>[6]</sup>,具有加热均匀且对茶叶损伤较小的优点,但其造价过高。热风式茶叶杀青机是利用高温热风来炒制茶叶,杀青效率高,但是碎茶率过高<sup>[7]</sup>。基于碳基涂层发热材料已被应用于电加热取暖、烘箱及烤炉等领域,是一种面状加热新技术,具有加热面积大、急速发热、热场均匀、安全性高、耗电少、控温精确、安装方便等优点<sup>[8]</sup>。研究拟设计一种以碳基发热涂层为加热源的杀青装置,将杀青和揉茶过程结合起来的传送装置,实现茶叶制作过程全自动化,旨在减少茶叶制作过程人工劳动量以及提高茶叶成品质量。

## 1 结构设计

以茶叶制作工艺中“三杀三揉”的工艺要求为标准,设计具有杀青、揉捻、翻炒等功能的炒茶机,同时实现茶叶由杀青皿→揉捻盘→杀青皿的转移功能。装置总体结构如图 1 所示。

茶叶在杀青过程中需不断搅拌,搅拌力度通过步进电机控制。茶叶在杀青皿内完成一次杀青后,需要转移

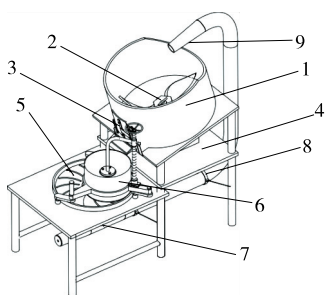
**基金项目:**国防科技重点实验室基金项目(编号:WDYX21614260204);陕西省教育厅重点科学研究计划项目(编号:20JS061)

**作者简介:**秦灿珂,男,西安工业大学在读硕士研究生。

**通信作者:**李党娟(1978—),女,西安工业大学副教授,硕士。

E-mail: licy@xatu.edu.cn

**收稿日期:**2021-09-25 **改回日期:**2022-01-29



1. 加热器皿 2. 搅拌器 3. 可闭合开口 4. 机架 5. 揉搓盘  
6. 揉搓块 7. 橡胶塞 8. 流转管道 9. 管道收缩开口

图 1 装置总体图

Figure 1 General drawing of the device

至揉搓装置进行揉搓。在杀青皿侧壁设计一个可控制开合的通道,如图 2 所示,通过滚珠丝杠电机控制滑动挡板上下移动。利用杀青皿和揉搓盘的高度差,将杀青皿的机架倾斜 $20^\circ$ ,在杀青完成后,茶叶即可在自身重力作用下由杀青皿滑入揉搓盘。

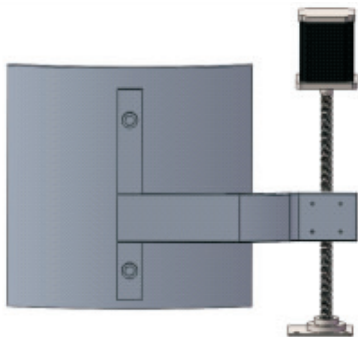


图 2 杀青皿侧壁通道

Figure 2 Side wall channel of sterilizer

传统的茶叶加工机均是杀青装置与揉捻装置分离式的,茶叶从杀青到揉搓环节还需要人工转移,为了实现整个茶叶制作过程的自动化,设计了一套传输装置。该传输装置以一个 U 型管道为基础,将揉茶机构与杀青机构结合起来,在管道内部放入一枚橡胶塞,在电机的牵引下可以在管内做往复运动。在橡胶塞的推动下,茶叶可以在揉捻后再次进入杀青器皿,从而实现多次杀青和揉捻。

## 2 碳基发热涂层

### 2.1 涂层涂覆工艺

利用金属电热丝加热方式不能覆盖整个杀青器皿,不可避免出现温度不均匀的情形,采用发热涂层作为热源可以保证整个器皿加热均匀。

为了提高发热涂层发热效率,通常将发热浆料直接涂敷在石英玻璃基底上,但是由于界面结合力弱,容易造成涂层在工作过程中,特别是急速升温急速降温情况下,涂层脱落。为了解决这个问题,将碳基发热涂层采用以下工艺<sup>[9]</sup>涂覆到石英玻璃制成的杀青器皿底部。

(1) 器皿选则:选用可见光到近红外波段透过率较高的石英玻璃,超声波清洗干净后,用氮气吹干,放置在具有离子源的镀膜机内。

(2) 等离子体预处理:使真空度达到 $2.0 \times 10^{-2}$  Pa,打开离子源,预热 5 min,将离子源 3 的能量设置为 1 000 eV,对基底进行 5 min 轰击后,关闭离子源 3 及电源。离子源 3 生成的等离子体轰击石英玻璃表面,将石英玻璃表面的杂质以及不稳定的分子轰击掉,使得石英玻璃表面局部形成微孔。

(3) 涂覆发热涂层:在等离子体处理过的石英玻璃表面涂覆一层浓度为 10% 的低浓度发热涂层浆料,放置于充入含量 95% 以上氮气的烘烤箱中,250 $^\circ$ C 低温烘烤 30~60 min。因此,基底材料的微孔内会渗入发热涂层浆料,相当于在微观上增大了浆料与基底的附着力,经过加热烘烤,加热涂层能更加充分地渗入基底微孔,与基底充分接触,附着力进一步增大。最后,均匀涂覆正常浓度的发热涂层浆料,并于含氮气烘烤箱中 250 $^\circ$ C 烘烤 30 min,使得浆料与基底的热变形相适应,不会因热差导致塑性断裂,提高了石英玻璃的稳定性。

### 2.2 涂层发热原理

将碳基发热涂层涂覆至基材上固化成膜后,给涂膜的两端通过施加一定的外加电压形成导电回路,实现发热升温,涂层固化后在一定电场作用下实现电阻加热,发热功率为:

$$P = \frac{U^2}{R}, \quad (1)$$

式中:

$P$ ——发热功率, W;

$U$ ——外加电压, V;

$R$ ——涂层电阻,  $\Omega$ 。

试验所用碳基涂层方阻为 30  $\Omega$ ,涂覆层数 10 层,因此总电阻为 300  $\Omega$ ,所接电压为 220 V,总功率为 161.3 W。

碳基发热涂层材料发热性能优良,相比金属电热丝热转换效率更高<sup>[10]</sup>。同时碳基发热涂层温度响应时间非常短,例如石墨烯制成的电热材料在 1.61 V 的外加电压下只需要 7.5 s 就可以使其表面温度达到 200 $^\circ$ C 以上<sup>[11]</sup>。

## 3 系统控制设计

炒茶装置控制部分的设计最主要就是对茶叶杀青时涂层温度的测量及控制,对电机的控制以及温度显示,设计的炒茶装置电路系统总方案如图 3 所示,主要包括温度采集、温度控制、主控、显示输入、电机控制等模块。

主控模块是以 STM32ZET6 作为主控芯片,对整个茶叶制作过程进行控制;温度采集包括 K 型热电偶和 MAX6675 数模转换芯片,对需要采集的锅底温度进行一次 200 ms 的采集;温度控制是由通过驱动 SSR 固态继电器控制发热涂层加热完成的,主要是对锅底温度进行恒

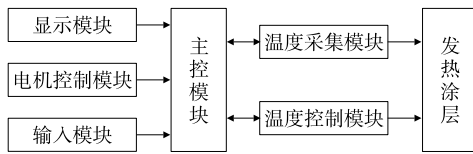


图3 系统方案图

Figure 3 System scheme diagram

温控制,达到杀青所需温度;显示屏对当前锅底的温度值进行显示,以保证可以实时观测当前锅底的温度,以便于进行调整;电机控制模块起到控制搅拌力度和揉茶力度,以及对茶叶传输的控制。

温度的测量方式有两种:接触式温度测量和非接触式温度测量。该设计炒茶锅与整体设计为一体,处于相对静止的状态,故采用K型热电偶接触式温度测量。

设计多采用的发热涂层可以通过固态继电器进行温度控制,可以在使用时做到无触点、无火花的接通和断开电路。固态继电器SSR各个引脚和主控芯片的连接如图4所示。SSR的输入端1接高电平,4接I/O口。利用I/O口输出具有高低电平特性的PWM信号,来控制SSR接通和断开的时间从而控制发热涂层加热功率,进而控制炒茶温度。输出端3接220V交流电源,2接发热涂层。

根据茶叶制作流程,设计炒茶装置工作流程控制程序如图5所示。

设置好温度、时间、电机转速后,主程序将会调用温度采集模块对应的温度采集程序,完成温度信号的采集工作,并将采集到的温度显示至OLED显示屏上,采集到锅底温度后,与设定的温度进行对比,通过PID算法进行温度的控制<sup>[12]</sup>。加热时间也可以根据不同的制茶工艺设

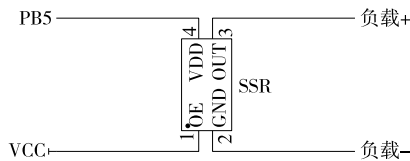


图4 固态继电器引脚连接图

Figure 4 Solid state relay pin connection diagram

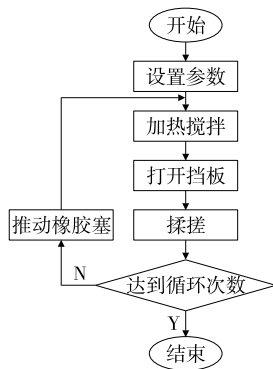


图5 炒茶流程图

Figure 5 Flow chart of tea frying

置,加热的同时,主控芯片控制电机转动搅拌茶叶。加热完成后,打开滑动挡板,茶叶进入揉搓装置,电机控制模块控制揉搓电机工作,揉搓时间也可以自由设定。揉搓完成后,可以控制牵引橡胶塞的电机,将茶叶再次转进杀青器皿进行下一次加热揉搓,循环次数可以设置。

### 4 理论分析

茶叶在杀青过程中需要不停地搅拌以使茶叶受热更加均匀。搅拌力度过小达不到均匀加热的效果,搅拌力度过大则会破坏茶叶的结构,造成碎茶率过高。因此,根据式(2)计算需要负载最大扭矩。

$$T = (m_1 + m_2) \mu g \sin \theta \cdot r, \tag{2}$$

式中:

$T$ ——负载最大扭矩,  $N \cdot m$ ;

$m_1, m_2$ ——茶叶质量和搅拌器质量,  $kg$ ;

$\mu$ ——摩擦系数;

$\theta$ ——杀青器皿与地面夹角,  $^\circ$ ;

$r$ ——搅拌器半径,  $m$ 。

加热皿与地面夹角为  $20^\circ$ ,根据传统炒茶经验,制作  $1\text{ kg}$  成品茶叶需要  $4\text{ kg}$  左右新茶,搅拌器转速  $60\text{ r/min}$ ,搅拌器半径  $0.06\text{ m}$ ,搅拌器质量为  $1\text{ kg}$ ,  $g$  取  $9.8\text{ m/s}^2$ ,摩擦系数  $0.15$ ,代入式(2)可求得负载最大扭矩约为  $1.51\text{ N} \cdot m$ 。

按式(3)可计算出所需电机功率。

$$P = Tn/9.55, \tag{3}$$

式中:

$P$ ——搅拌电机功率,  $W$ ;

$n$ ——电机转速,  $r/min$ 。

电机转速为  $1\ 200\text{ r/min}$ ,可求出所需电机功率为  $189.74\text{ W}$ ,综合考虑,选取功率为  $200\text{ W}$  的电机即可。

### 5 试验与结果

#### 5.1 揉搓塑形试验

为了验证炒茶机的使用性能,进行炒茶试验,并对茶叶成品品质进行分析。选取绿茶作为试验对象,选取相同品种、相同嫩度的茶叶分别以人工和炒茶机进行茶叶制作。人工试验由一名熟练工进行操作,炒茶机则按照制茶工艺经验,将制茶的工艺参数输入计算机,包括杀青温度、揉捻机构转速、工作时间等。为确保试验结果的准确性,每种茶叶进行两组试验取平均值,试验结果见表1。

由表1可知,炒茶机制作的茶叶成条率比人工制作的高  $1\%$ ,两种制作方式的茶叶断裂率和碎末率相差不大。但人工制茶对于工人的熟练程度要求很高,且工作效率较低,人工成本较高;炒茶机在开启参数设置后运转正常,工作效率较高。

#### 5.2 杀青效果试验

选取品种相同,同批采摘的绿茶鲜叶进行杀青试验。茶叶分别由采用电热丝加热的传统炒茶机和由发热涂层加热的新型炒茶机进行杀青,每组机器投放湿茶叶各

表 1 茶叶制作试验  
Table 1 Tea making test %

制作方式	成条率	半成条率	断裂率	碎末率	总成条率
人工	67	21	7	5	88
炒茶机	69	20	7	2	89

5 kg, 杀青时间均为 3 min, 温度设置为 200 °C。参照 GB/T 23776—2009 和文献[13]对杀青后茶叶的外形、香气及叶底进行感官审评。外形、香气和叶底占总评比重分别为 30%, 35%, 35%。

由表 2 可知, 经涂层加热制作的茶叶在外形、香气和

表 2 茶叶杀青试验

Table 2 Experiment on green elimination of tea

加热方式	外形		香气		叶底		总分
	品质	评分	品质	评分	品质	评分	
传统电热丝加热	黄绿尚紧	87.0	清香	87.0	绿尚亮	88.0	87.35
涂层加热	黄绿紧结	88.0	清香持久	87.5	绿亮	89.0	88.18

叶底评分上均略优于传统电热丝加热制作的茶叶, 可以有效提高茶叶的制作品质。

## 6 结论

使用碳基发热涂层作为茶叶杀青热源, 提高了茶叶杀青效率和质量, 降低了茶叶杀青功耗。优化的炒茶机整机功耗最大 1 kW, 整机尺寸为 350 mm×150 mm×280 mm。基于 STM32 设计了温度探测、温度控制及显示、炒茶揉茶切换等电路模块, 温控范围为 20~400 °C, 温控精度±1 °C。使用试验装置进行揉搓茶叶可以得到略高于人工的成条率, 杀青效果也优于传统的杀青方式。后续可以研究增加容器体积情况下发热涂层的加热效果, 进一步提高茶叶制作的生产效率。

### 参考文献

- [1] 宋宪颖, 黄艳梅, 崔俪丹, 等. 杀青方法对紫色芽叶加工绿茶品质的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(11): 19-27.  
SONG X Y, HUANG Y M, CUI L D, et al. Effects of different fixation methods on the quality of green tea processed by purple bud leaves[J]. Food & Machinery, 2021, 37(11): 19-27.
- [2] 胡源, 刘梦圆, 周秦羽, 等. 干燥工艺对红茶品质的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(6): 191-200, 232.  
HU Y, LIU M Y, ZHOU Q Y, et al. Effects of different dring process on the quality of black tea[J]. Food & Machinery, 2021, 37(6): 191-200, 232.
- [3] 杨君, 刘木华, 阮承治, 等. 球罐型 360°茶叶揉青机设计及实验验证[J]. 食品与机械, 2020, 36(10): 81-86.  
YANG J, LIU M H, RUAN C Z, et al. Design of spherical type 360° of tea stirring machine, flow field analysis and experimental analysis[J]. Food & Machinery, 2020, 36(10): 81-86.
- [4] 廖可造. 6CS-60 型滚筒式茶叶杀青机定型[J]. 农业机械, 1984(3): 6.  
LIAO K Z. 6CS-60 drum type tea green killing machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1984(3): 6.
- [5] 权启爱. 我国茶叶杀青机的研制和发展[J]. 中国茶叶, 2017, 39(10): 19-21.  
QUAN Q A. Research progress of tea smashing machine in China[J]. China Tea, 2017, 39(10): 19-21.
- [6] 吴全金, 孙威江, 吴占富. 远红外加热技术在茶叶加工及制品中的研究进展[J]. 农机化研究, 2014, 36(4): 220-224, 228.  
WU Q J, SUN W J, WU Z F. Research progress of far infrared heating technology in tea processing and products[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(4): 220-224, 228.
- [7] 张成茂, 陈子超, 庄少林. 热风式茶叶滚筒杀青机优化设计[J]. 农业开发与装备, 2018(2): 95-96.  
ZHANG C M, CHEN Z C, ZHUANG S L. Optimization design of hot air tea drum green killing machine[J]. Agricultural Development & Equipments, 2018(2): 95-96.
- [8] 庆奕良, 王国志, 刘文兴, 等. 导电涂料的简介及研究现状[J]. 现代涂料与涂装, 2020, 23(11): 41-44.  
QING Y L, WANG G Z, LIU W X, et al. Introduction and research of conductive coatings[J]. Modern Paint & Finishing, 2020, 23(11): 41-44.
- [9] 吴慎将, 李党娟, 王娜, 等. 一种提高玻璃基底发热涂层工作稳定性的方法: 201910430409.X[P]. 2019-07-19.  
WU S J, LI D J, WANG N, et al. A method for improving the working stability of heating coating on glass substrate: 201910430409.X[P]. 2019-07-19.
- [10] HE X, YU X, WANG Y, et al. Significantly enhanced thermal conductivity in polyimide composites with the matching of graphene flakes and aluminum nitride by in situ polymerization[J]. Polymer Composites, 2020, 41(2): 740-747.
- [11] CHANG H, JIA Y, XIAO L, et al. Three dimensional crosslinked and flexible graphene composites paper with ultrafast electrothermal response at ultra-low voltage[J]. Carbon, 2019, 154: 150-155.
- [12] GRASSI E, TSAKALIS K. PID controller tuning by frequency loop-shaping: Application to diffusion furnace temperature control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 8(5): 842-847.
- [13] 施兆鹏. 茶叶审评与检验[M]. 4 版. 北京: 中国农业出版社, 2010: 85-89.  
SHI Z P. Tea evaluation and inspection[M]. 4th ed. Beijing: China Agricultural Press, 2010: 85-89.