

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.08.013

# 茶叶萎凋装置的温度场分布仿真与 反馈调节系统设计\*

张 瑞, 计时鸣, 张 利\*

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310014)

**摘要:**针对茶叶萎凋过程中生产效率低以及自动化程度不高的问题,对茶叶萎凋装置及其温度场分布、反馈调节系统、茶鲜叶可用萎凋时间等方面进行了研究,通过控制萎凋条件将茶鲜叶的萎凋时间与整个生产线的工作连贯性结合起来,提出了一种基于在线检测和反馈调节的茶叶萎凋装置,采用网状传送带运输茶鲜叶,实时检测茶叶含水率并根据含水率反馈调节风量与温度。设计了反馈调节系统,利用 Fluent 对萎凋室内气流速度场及温度场进行了数值模拟,并进行了实验研究。研究表明,该装置萎凋室内热风分布均匀,流动顺畅,温度场分布呈梯度分布,能对茶鲜叶形成有效的萎凋加工,验证了萎凋机构设计合理。该茶叶萎凋装置具有萎凋均匀性好、生产效率高优点,保证了整个流水线的连贯运行,提高了萎凋效率。

**关键词:**茶叶;萎凋机;反馈调节;数值模拟

中图分类号:TH122;TS272.3

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)08-0979-05

## Temperature field simulation and feedback regulation system design of tea leaves withering device

ZHANG Rui, JI Shi-ming, ZHANG Li

(Key Laboratory of E&M, Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of  
Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of low productivity and consistency of production line, tea withering device and its temperature field distribution, feedback regulation system and the withering time of fresh tea leaves etc. were researched. By controlling the withering conditions, the wilting time of fresh tea leaves and the continuity of the whole product line was combined. A new tea leaves withering device was proposed based on on-line detection and feedback regulation. The mesh conveyor belt was used to transport fresh tea leaves. Moisture content of tea was real-time detected. The temperature and air volume were feedback controlled based on the detected moisture content. The feedback regulation system was designed. The velocity profile and temperature field of hot-air in withering room was simulated by Fluent and Experimental study was carried out. The results indicate that the distribution of hot air is uniform and smoothly and the distribution of temperature is gradient in withering room, which ensured the effective wilting processing of fresh tea leaves. The reasonability of physical design is proved. The better withering homogeneity and high production efficiency are the advantages of the device. The coherent running of the whole pipeline is ensured and withering efficiency of the machine is improved.

**Key words:** tea; withering device; feedback regulation; simulation

收稿日期:2016-03-21

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划项目(2014BAD06B06)

作者简介:张瑞(1989-),男,湖北宜昌人,硕士研究生,主要从事机械制造及自动化和精密加工领域的研究。E-mail:13757124990@163.com

通信联系人:张利,博士,副教授,硕士生导师,E-mail:zhangli@zjut.edu.cn

## 0 引 言

我国是茶叶主要生产大国,各地不同的环境因素及饮茶习性造就了我国茶叶品种的多样化<sup>[1]</sup>。茶鲜叶萎凋在茶叶加工过程中发挥着重要作用,茶鲜叶在萎凋过程中,鲜叶内水分逐步散失,酶活性增强,并引发一系列生化反应,有利于增进茶叶的色、香、味<sup>[2]</sup>。在萎凋过程中,要求被加工鲜叶的理性变化程度均匀且适当,尤其要保证茶鲜叶在处理之后不劣变,不变红,具有较好的芬芳,因此萎凋环境就显得尤为重要<sup>[3]</sup>。在生产实际中,茶鲜叶的萎凋程度根据茶叶品种不同、茶叶采摘季节不同而有较大差异,为了保证茶叶口感及感官,研究人员对茶鲜叶萎凋程度制定了相应标准,绿茶一般萎凋至含水率 70% 左右为适度,功夫红茶要求萎凋至含水率 60% 左右,白茶要求萎凋至含水率 30% 左右<sup>[4]</sup>。

在现代茶叶加工中,已经形成了从萎凋、杀青、揉捻到成型等一整套加工流水线,在整个流水线中除了要求控制调节萎凋环境,如光照<sup>[5-6]</sup>、温度、湿度等,控制,还要结合流水线中各工序间的配合关系,把握好茶鲜叶的加工时间,保证整个流水线的连贯性。在现代茶叶生产流水线中,萎凋作为茶叶加工的首个步骤,萎凋叶萎凋程度的判断主要靠人工经验,且茶叶生产流水线自动化程度不高<sup>[7]</sup>。

本研究提出一种基于在线检测和反馈调节的茶叶萎凋方法,并设计相应装置,结合自动化生产线要求,计算茶鲜叶可用萎凋时间,依据在线红外水分测量仪实时测量结果,实时调整茶鲜叶萎凋环境,从而控制茶鲜叶萎凋时间,保证整个加工流水线的连贯性。

## 1 萎凋装置研制及控制系统介绍

### 1.1 萎凋装置结构

为了保证加工效率、缩短加工时间,本研究所用的萎凋方式为热风萎凋。整体结构示意图如图 1 所示。

整个机构主体包括机体框架,机体框架内装有多个隔板,其下方有网状传动带,网状传送带与隔板构成一个个萎凋单元,每一萎凋单元内茶鲜叶量相当,这样便于精确控制每一单元内茶鲜叶堆的萎凋情况,使得萎凋效果最佳;每个萎凋单元顶部安装一个数字摄像头;传送带下方设有热风气腔腔。

每个热腔均设有风道入口,在热风气腔入口装有流量调节阀,同时热风气腔入口处装有加热器,可以调

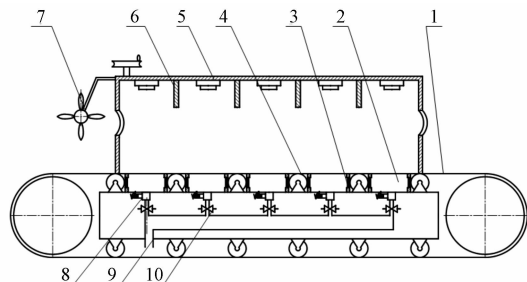


图 1 萎凋装置结构简图

- 1—网状传送带;2—热风气腔;3—气腔挡板;4—传送带滚轮;  
5—数字摄像头;6—挡板;7—手调式匀叶器;  
8—流量调节阀;9—鼓风机通风口;10—加热器

节热风温度,所有热风气腔由鼓风机提供风源。

为了避免热风过多逸散,本研究在每个滚轮的两侧均装有热腔挡板,局部放大图如图 2 所示。

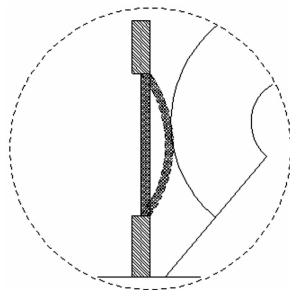


图 2 热风气腔侧壁挡板和滚轮的局部放大图

热风气腔挡板的中间部分由弹性橡胶制成,当通入热风时,弹性橡胶受挤压膨胀紧贴滚轮,防止热风从滚轮两侧溢出保证热风能够更多的吹入茶叶堆中;当热腔停止通入热风时,弹性橡胶恢复原状并与滚轮分离。

### 1.2 反馈调节系统分析

反馈调节控制系统主要包括:检测系统和控制调节系统几大部分。检测系统主要由两部分组成:①含水率初步预测系统,实验室前期建立了茶叶形貌特征库,茶鲜叶上方的数字摄像头拍摄叶貌特征后,计算机匹配茶叶形貌特征库,预测该批次茶鲜叶含水率;②在线检测系统,茶鲜叶上方的在线红外水分测量仪实时测量其照射部分的茶叶含水率,并将测量结果送至计算机。

控制调节系统包括计算机以及加热器等功能器件,主要的工作为:①预测计算,包括预测茶叶含水率预以及茶叶剩余萎凋时间;②调节萎凋环境,根据预测结果对比可用萎凋时间,调节加热器以及鼓风机功率。

### 1.3 萎凋环境反馈调节原理

加工流程图如图 3 所示。结合加工流程图介绍萎凋装置萎凋环境调节原理。

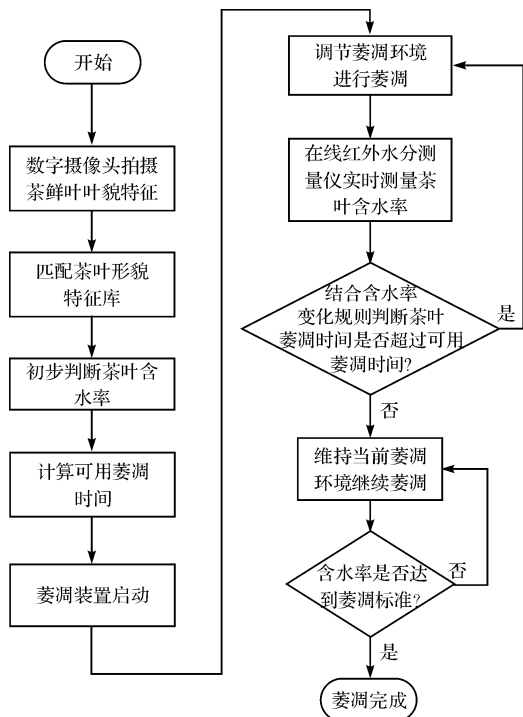


图3 萎凋环境反馈调节流程图

(1) 根据加工流水线中,下一工序机器运行状况(一般是杀青机),计算茶鲜叶可用萎凋时间;

(2) 本研究在前期研究中建立了茶叶形貌特征库,将茶叶的形貌特征与当前含水率相匹配。在每批茶鲜叶堆放至萎凋机传送带上时,数字摄像头拍摄茶鲜叶叶貌纹理照片,对比茶叶形貌特征库预测茶鲜叶初始含水率;

(3) 加工过程中,本研究通过在线红外水分测量仪实时测量每一萎凋单元内茶叶平均含水率,结合前文所提茶叶萎凋程度标准,计算机系统结合茶叶失水规律预测该批次茶叶加工完成还需多少时间<sup>[8]</sup>,若所需时间超过可用萎凋时间,则增加温度和通风量,否则继续维持该萎凋环境,直至检测到茶鲜叶实际含水率在适当值(绿茶在70%左右,红茶在60%左右,白茶在30%左右)时,停止加工。

## 2 茶鲜叶可用萎凋时间计算

现代茶叶多采用大规模生产线进行加工,整个生产线的第一道工序即茶鲜叶的萎凋或摊青,本研究将茶鲜叶的萎凋时间与整个生产线的工作连贯性结合起来,通过控制萎凋条件来改变茶鲜叶萎凋速率,从而保证生产线第二道工序设备加工完成需要上料时,茶鲜叶正好完成萎凋进入上料设备,保证生产线设备加工连贯。

一般说来,在茶叶加工中,茶叶完成萎凋之后会进

行杀青加工,在现代茶叶流水线生产中,茶叶杀青多采用滚筒式杀青机对茶叶进行杀青,而一台滚筒杀青机能够加工的茶叶量有限,因此,本研究在流水线中常使用多台杀青机同时进行杀青。为了保证整个流水线的连贯性及杀青机的高效利用,计算茶叶可用萎凋时间并根据可用萎凋时间控制茶叶加工时间是非常有必要的。

根据茶叶萎凋摊青工艺,一般茶鲜叶萎凋以统一批次茶叶进行萎凋,萎凋完后该批次茶鲜叶送入杀青机内,然后进行下一批次茶鲜叶的萎凋,以3台杀青机同时进行杀青为例,可用萎凋时间计算过程如下:

有 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 3台杀青机,每台杀青完成加工所需时间分别为 $T_i$  ( $i=1,2,3$ ),杀青量为 $X_i$  ( $i=1,2,3$ ),杀青机工作完成剩余时间分别为 $t_1, t_2, t_3$ ;一批次茶鲜叶重量为 $M$ ,将该批次茶鲜叶平摊在 $n$ 个萎凋单元内,每个萎凋单元长 $L$ ,萎凋槽总长度为 $s$ ,传送带运动速度为 $v$ 。则,该批次茶鲜叶的可用萎凋时间 $T$ 的计算公式为:

$$T = \left( s - \frac{\sum X_i \times L \times n}{M} \right) \times v^{-1} + t_i \quad (1)$$

由式(1)可以解读一批茶鲜叶摊放至萎凋槽后,其可用萎凋时间的计算规则:将一批茶鲜叶摊放于萎凋机萎凋槽内,此时,下一工序的3台杀青机正在加工上一批此的茶叶,传送带缓慢地匀速运动,茶鲜叶随着传送带移动并开始萎凋(茶鲜叶在传送带输送途中进行萎凋),当杀青机完成杀青并下料后,此时,需要传送带将萎凋完成的茶叶送至杀青机上料处,则可以看出,新鲜茶鲜叶的可用萎凋时间即杀青机剩余工作时间 $t_i$ 加上传送带输送茶鲜叶途中的时间。在实际加工中,传送带的运动速度一般根据传送带长度以及杀青机数量进行设置。

## 3 萎凋室速度场及温度场仿真分析

在萎凋过程中,热风的风速以及温度是萎凋机构所要控制的两个主要环境因素,为了研究本研究所提萎凋机构内热风分布是否均匀,萎凋室内萎凋温度分布是否合理,笔者借助Fluent流体仿真软件对萎凋室内的热风运动情况及温度场分布情况进行数值模拟分析。

### 3.1 连续相气体运动模型构建

在茶叶萎凋过程中,茶鲜叶堆连续相气体有较大影响,本研究在考虑到茶鲜叶与空气两相之间的质量传递的情况下,气体相的联系方程和动量守恒方程分

别为<sup>[9]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi \rho_g) + \nabla \cdot (\varphi \rho_g \mathbf{v}_g) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi \rho_g \mathbf{v}_g) + \nabla \cdot (\varphi \rho_g \mathbf{v}_g \mu_g) = -\nabla p +$$

$$\nabla \cdot (\mu_g \varphi \nabla \mathbf{v}_g) + \rho_g \varphi g - \frac{\sum_i^n F_{D_i}}{V} \quad (3)$$

式中: $\varphi$ —体积分项, $\rho_g$ —气体密度, $\mu_g$ —空气动力粘度, $F_{D_i}$ —气体阻力。

### 3.2 热传递模型构建

萎凋过程中,热传递主要存在于茶鲜叶之间的热传导和热风与茶叶之间的对流换热,尤其是热风对茶鲜叶的对流换热是茶鲜叶萎凋过程中,茶鲜叶水分损失的主要形式,热传递的能量方程为:

$$m_p C_p \frac{dT}{dt} = h_c \Delta T_{p1p2} + h_{pg} A_p \Delta T_{pg} \quad (4)$$

式中: $C_p$ —茶鲜叶的比热容; $T$ —茶鲜叶的温度; $h_c$ —茶鲜叶间的传热系数; $h_{pg}$ —两相间热传递系数; $A_p$ —茶鲜叶表面积; $\Delta T_{p1p2}$ 、 $\Delta T_{pg}$ —茶鲜叶间温度差和两相间的温度差。

### 3.3 数值模拟结果分析

在进行数值模拟时,假设热风从每个热风气腔内均匀进入萎凋室,平均流速为 4 m/s,设定的平均温度为 45 °C;萎凋室出口直接面向外部环境,压力为一个标准大气压。同时,考虑热风与茶鲜叶之间的动量交换以及能量交换,在仿真模型选择上,本研究在 Fluent 软件中,多相模型采用 Eulerian 模型,湍流模型选用标准 k- $\epsilon$  模型。萎凋室基本仿真参数如表 1 所示<sup>[10-11]</sup>。

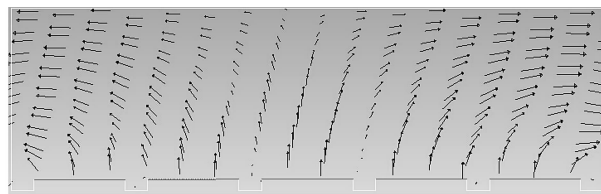
表 1 萎凋室基本仿真参数

名称	参数
热风气腔入口数/个	5
热传导率/(W·(m·°C) <sup>-1</sup> )	0.058
茶叶颗粒比热容/(kJ·(kg·°C) <sup>-1</sup> )	3.8
萎凋室高度/m	1
萎凋室长度/m	20
热风温度/°C	45
热风初速度/(m·s <sup>-1</sup> )	4

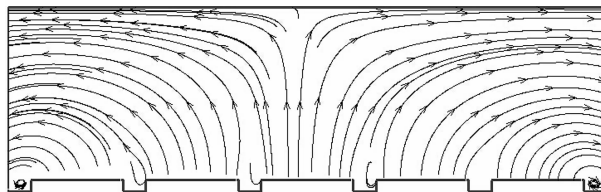
热风萎凋过程中,热风在萎凋室内的气流矢量图和流场流线图如图 4 所示。

从图 4 可以看出,热风从萎凋机构网状传送带下方的热风气腔内通入,流入萎凋室内,萎凋室内气流整体顺畅,分布均匀,能够使茶鲜叶均匀受热。

在萎凋过程中,热风对茶鲜叶表面的对流辐射是茶



(a) 萎凋室气流速度矢量图



(b) 萎凋室气流流场流线图

图 4 萎凋室气流分布

鲜叶水分散失的主要形式,因此,研究萎凋机构内萎凋室的温度场分布能够很好地判断本研究所用热风鼓吹方式是否合理。萎凋室内的温度场分布如图 5 所示。

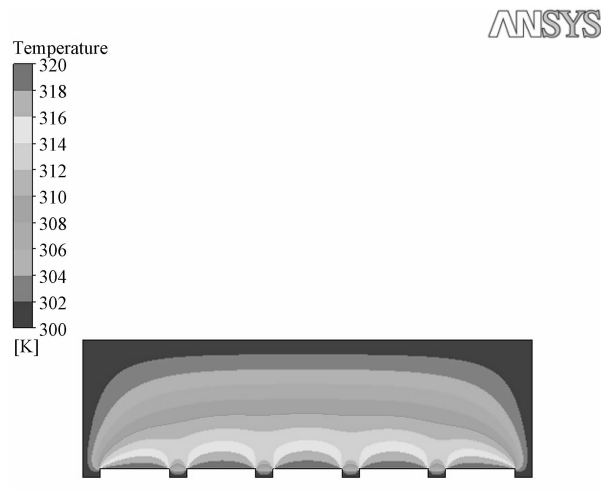


图 5 萎凋室温度场云图

从图 5 可以看出,热风初始温度设置在 45 °C,通过温度换算,初始温度维持在 320 K 左右,温度从热风气腔吹入茶鲜叶堆以后,由于热交换使得热风温度下降,整个萎凋室内温度程梯度下降变化,其中,热风刚从热风气腔内吹出时,温度维持在 316 K 左右,此时热风正好吹入茶鲜叶堆,能够对茶鲜叶形成良好的热交换,保证茶鲜叶萎凋效率。

从萎凋室速度场矢量图以及流线图,萎凋室温度场云图可以判断,该机构结构设计较为合理,热风能够均匀在萎凋室内流动,且温度分布合理。

## 4 实验及结果分析

实验样品:杭州龙井绿茶两叶一芯夏茶;

实验器材: Sartorius 快速水分测定仪,精度为

0.000 1 g的电子天平, CCD 摄像头、在线红外水分测量仪。

本研究将采摘的茶鲜叶分 10 个萎凋单元, 茶叶平摊于萎凋槽内进行萎凋, CCD 摄像头拍摄茶鲜叶的初始形貌, 使用 Sartorius 快速水分测定仪测量水分测试组的茶叶真实含水率, 根据计算公式得出茶叶可用萎凋时间为 3 h, 而绿茶的预期萎凋效果是含水率降低到 60% 左右。实验中采用课题组构建的茶叶形貌特征库, 并对比绿茶含水率失水规律后, 得出此时需提高热风温度以提高茶叶失水速率。通过在线红外水分测量仪的实时水分测量, 可以知道茶叶在萎凋过程中的实时含水率, 实验过程中, 根据这些信息对比失水规律再矫正萎凋环境, 从而控制茶叶实际萎凋时间。

通过该实验加工方法, 本研究对新采摘的初始含水率为 90% 的夏茶进行萎凋, 经过 3 h 的萎凋, 该批次 10 个单元内的茶叶含水率全部降至 62% 左右, 达到了预期萎凋效果, 10 个单元内的茶叶萎凋程度均匀, 且保证了茶叶实际萎凋时间在 3 h 内, 满足了流水线连贯性要求, 达到了较理想的效果。

## 5 结束语

本研究提出了一种基于在线检测与反馈调节的茶叶萎凋装置, 通过构建茶叶形貌特征库匹配茶叶含水率来预测茶鲜叶初始含水率, 通过在线红外水分测量仪实时测量茶鲜叶含水率, 根据测量结果反馈调节萎凋机构萎凋环境, 从而控制茶鲜叶萎凋时间, 使得茶鲜叶萎凋时间与整个生产线连贯地联系起来, 提高了生长线的加工效率, 同时保证了茶叶的萎凋质量, 对现代茶叶加工具有重要意义。

同时, 本研究借助 Fluent 流体仿真软件对萎凋机构萎凋室内的速度场及温度场分布进行数值模拟分析和实验研究, 验证了机构设计的合理性。

下一步研究, 笔者将在茶叶形貌特征库以及茶叶初始含水率预测的准确性进行优化, 期望实现通过数

字摄像头拍摄的茶叶叶貌特征实时判断茶叶当前含水率的目的, 从而与在线红外水分测量仪的测量结果相印证。

## 参考文献(References):

- [1] 尹军峰, 许勇泉, 袁海波, 等. 名优绿茶鲜叶摊放过程中主要生化成份的动态变化[J]. 茶业科学, 2009, 29(2): 102-110.
- [2] JAYASEKERA S, MOLAN A L, GARG M, et al. Variation in antioxidant potential and total polyphenol content of fresh and fully-fermented Sri Lankan tea [J]. **Food Chemistry**, 2011, 125(2): 536-541.
- [3] ULLAH M R, ROY P C. Effect of withering on the polyphenol oxidase level in the tea leaf[J]. **Journal of the Science of Food & Agriculture**, 1982, 33(5): 492-495.
- [4] 滑金杰, 袁海波, 江用文, 等. 萎凋过程鲜叶理化特性变化及其调控技术研究进展[J]. 茶叶科学, 2013, 33(5): 465-472.
- [5] 范仕胜, 晋 秀, 杨 清, 等. 人工光照萎凋对茶叶主要品质成分与酶活性的影响[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(6): 1152-1155.
- [6] 陈济斌, 金心怡, 郝志龙, 等. 节能日光萎凋设施及其对白茶萎凋效果研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 171-177.
- [7] 李文萃, 任广鑫, 何 鑫, 等. 茶鲜叶摊放与萎凋技术及设备应用现状与改进[J]. 中国茶叶加工, 2013(3): 44-48.
- [8] 黄藩, 董春旺, 高明珠, 等. 功夫红茶萎凋中温度对鲜叶失水率影响的预测模型[J]. 中国农学通报, 2014, 30(34): 193-198.
- [9] 施重驹, 张 宪, 钟 江, 等. 基于多相流耦合的热风杀青过程与杀青机结构优化研究[J]. 机电工程, 2015, 42(8): 1050-1055.
- [10] 杨卫平, 袁梦涵, 刘思明, 等. 江西白茶加工机械现状及发展分析[J]. 包装与食品机械, 2016, 34(1): 56-60.
- [11] 何磊, 张宪, 赵章凤, 等. 基于 PFC3D 的茶叶杀青过程数值模拟和设备参数分析[J]. 茶叶, 2013, 39(1): 17-23.

[编辑: 张 豪]

### 本文引用格式:

张 瑞, 计时鸣, 张 利. 茶叶萎凋装置的温度场分布仿真与反馈调节系统设计[J]. 机电工程, 2016, 33(8): 979-983.

ZHANG Rui, Ji Shi-ming, ZHANG Li. Temperature field simulation and feedback regulation system design of tea leaves withering device[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, 33(8): 979-983.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>