

球罐型 360°茶叶摇青机设计及实验验证

Design of spherical type 360° of tea stirring machine, flow field analysis and experimental analysis

杨 君^{1,2} 刘木华³ 阮承治^{1,2} 张 渤⁴ 叶江华⁴

YANG Jun^{1,2} LIU Mu-hua³ RUAN Cheng-zhi^{1,2} ZHANG Bo⁴ YE Jiang-hua⁴

(1. 武夷学院机电工程学院, 福建 武夷山 354300; 2. 农机智能控制与制造技术福建省高校重点实验室, 福建 武夷山 354300; 3. 江西农业大学工学院, 江西 南昌 330045; 4. 武夷学院茶与食品学院, 福建 武夷山 354300)

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Wuyi University, Wuyishan, Fujian 354300, China; 2. Agricultural Machinery Intelligent Control and Manufacturing Technology of Fujian Provincial Key Laboratory, Wuyishan, Fujian 354300, China; 3. College of Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi, 330045, China; 4. College of Tea and Food Science, Wuyi University, Wuyishan, Fujian 354300, China)

摘要:针对现有滚筒式摇青机工作过程中流场分布不均匀导致茶叶做青品质参差不齐的问题,设计了一种新型球罐型 360°茶叶摇青机,并优化其热风输送管结构;采用计算流体动力学软件 STAR-CCM+ 对摇青机球罐体流场进行数值模拟,并通过样机做青验证。结果表明:球罐型 360°茶叶摇青机送风管加装导流板,球罐内部不同点的实测最高温度与最低温度偏差 2 K,气流分布均匀。在做青吹风时间、摇青时间、晾青时间和做青次数等工艺参数相同条件下,新型摇青机茶叶做青品质优于传统滚筒式摇青机。

关键词:球罐型摇青机;计算流体力学;流场分析;样机试验

Abstract: In order to solve the problem of uneven distribution of flow field in the working process of traditional cylindrical tea stirring machine, a new type of 360° spherical tea stirring machine is designed, and the structure of hot air conveying pipe of the tea stirring machine is optimized. The computational fluid dynamics software STAR-CCM+ is used to simulate the flow field of the

spherical tank of the stirring machine. And the prototype is tested and verified. The results show that after the installation of annular guide plate on the air supply pipe of the 360° stirring machine, the temperature offset between the highest and lowest points is 2 K, and airflow is steady distributed. With the same prototype stirring parameters (blowing time, shaking time, air drying time and times of green making), the stirring quality of tea made by the new type of machine is better than that by the traditional stirring machine.

Keywords: spherical type of tea stirring machine; computational fluid dynamics; flow field analysis; prototype test

茶叶做青也称摇青,是武夷岩茶形成乌龙茶香高、味醇的特有加工工序,是保证武夷岩茶茶叶品质最重要的工艺流程^[1]。传统摇青机摇青滚筒在电机带动下旋转,滚筒内的鲜叶茶青随滚筒转动,茶叶与茶叶、茶叶与摇青滚筒内壁发生相互接触和碰撞,在摇青的机械运动力和机械摩擦力内外效应下,促使茶叶组织结构发生破坏变化,细胞液泡中的物质相互接触,合适温度下茶多酚发生酶促氧化,进而达到武夷岩茶“绿叶红镶边”做青发酵、茶叶滋味物质及香气物质形成转化的目的,提高茶叶香气、降低茶汤苦涩味^[2-4]。

武夷岩茶传统摇青工艺中,摇青机由摇青滚筒、传动装置、机架组成,使用炭火作为热源。摇青筒依茶叶品种、等级不同投入相应鲜叶量,以恰好盖过笼体轴心为宜,在电机带动下,摇青筒体旋转,滚筒内的鲜叶茶青随滚筒一起转动^[5]。由于传统摇青机结构及热风输送风管结构原因,热风在离心风机作用下从送风管前端吹送至

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:61903288);福建省科技厅高校产学研合作项目(编号:2019N503);福建省自然科学基金面上项目(编号:2018J01471);福建省高校杰出青年科研人才培育计划(编号:闽教科[2018]47号);福建省教育厅中青年教师教育科研项目(编号:JAT170587);武夷学院科研项目(编号:XP201804);南平市科技计划项目(编号:N2017DG01)

作者简介:杨君,男,武夷学院讲师,硕士。

通信作者:刘木华(1969—),男,江西农业大学教授,博士。

E-mail: 714874481@qq.com

收稿日期:2020-08-13

末端,风管末端与摇青筒侧壁镶接,气流堵塞导致热风反弹回流,热风经送风管无数小孔吹向摇青筒内部,造成摇青筒不同部位风力强度及温度不均衡。温度和风力不均匀会影响茶叶做青发酵,风管末端一侧温度高,茶叶做青发酵更快、引发茶叶红变和发酵过重^[6-7]。为保证武夷岩茶做青发酵品质均匀一致,在茶叶摇青工艺中需人工不时翻动,将摇青筒左右侧茶青相互交换,劳动强度极大,耗时耗力。

针对目前传统滚筒式摇青机的缺点和不足,文章拟提出一种新型的球罐型 360°摇青机设计,并对其热风输送管结构进行优化,分别对加装挡风圈导流板前后两种工况的球罐型摇青室流场进行数值模拟,并制作样机验证其效果,旨在为球罐型 360°茶叶摇青机的结构设计优化提供一定理论依据和技术支撑。

1 总体方案及三维建模

1.1 总体方案及工作原理

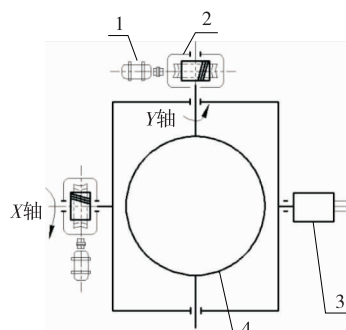
摇青机传动方案及总体结构如图 1 所示,整个摇青筒采用球罐型外形,球体外壳上开有进出料口,方便茶青鲜叶进出料。摇青过程中球罐型滚青筒同时在外轴(X轴)、内轴(Y轴)电机带动下各自作旋转运动,整个球罐型摇青筒呈 360°全方位旋转,实现茶叶无死角摇青。

工作原理:整个球罐型 360°摇青机 X 轴、Y 轴电机分别与蜗轮蜗杆减速器组合安装于内机架和外机架轴上。球罐体在 Y 轴电机和减速器带动下沿 Y 轴方向作圆周运动,在 X 轴电机和减速器带动下,Y 轴电机、减速器及内机架整体绕 X 轴方向作圆周运动。X 轴另一侧安装导电滑环,与外机架相连,其作用是避免 Y 轴电机在随内机架沿 X 轴方向转动时造成电线缠绕,确保电力通过导电滑环能持续传送至 Y 轴电机。整个球罐体在电机作用下同时沿 X、Y 两个方向各自转动,实现球罐内茶叶 360°摇青。离心风机吸入空气经电热丝加热,输送至球罐中心送风管,送风管开有无数小孔,热风通过送风管小孔扩散输送至整个球罐内部,提供茶叶球罐内摇青过程中做青需要的温度。球罐内壁结构亦开有无数小孔,实现做茶工艺中罐体内热空气与外界空气交换流通,保证罐体内空气通透及做青鲜茶叶的生物活性。

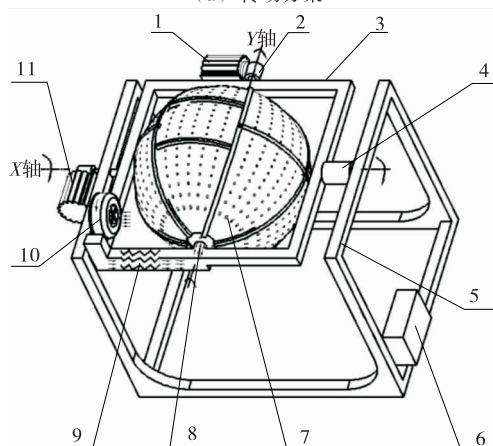
电机连接减速器带动球罐体绕内轴(Y轴)与外轴(X轴)两个方向同时作圆周运动,茶叶在球罐筒内实现全方位无死角摇青。球罐型 360°茶叶摇青机增强了茶叶做青机械运动力和机械摩擦力,大大提高了摇青质量及效率,降低了传统摇青工艺中的劳动强度。

1.2 三维建模与虚拟装配

球罐型 360°摇青机主要由送风管、球体罐和球罐架、机架、离心风机等组成。球罐型 360°摇青机按相关零件尺寸及结构形状建立各零件三维模型,根据各零件相互



1. 电机 2. 涡轮减速器 3. 导电滑环 4. 球体罐
(a) 传动方案



1. Y轴电机 2. 减速器 3. 内机架 4. 导电滑环 5. 外机架
6. 控制器 7. 球形滚筒 8. 送风管 9. 电加热丝 10. 离心风机 11. X轴电机

(b) 总体结构

图 1 摇青机传动方案及总体结构

Figure 1 Transmission principle and general structure of stirring machine

间的装配和约束关系逐个进行组装,最后完成整机的虚拟装配。完成球罐型 360°摇青机整机三维造型的关键是对其各零件准确建模并保证各零部件间的合理装配关系。如图 2 所示,通过 Pro/E 拉伸、旋转、阵列等命令建立球罐型 360°摇青机送风输送管、球体罐和球罐架、整体机架、离心风机等主要零件的三维模型。

根据各部件运动关系选择合适的约束条件,将球罐型 360°摇青机各部件虚拟装配成整机。通过虚拟装配,检查零件之间的干涉,对零件的结构尺寸和安装尺寸进行检查和修改,保证摇青机的可装配性及装配质量,其整机虚拟装配如图 3 所示。

2 摇青机球罐流场数值模拟

2.1 仿真建模与控制方程

为了研究摇青机球罐内部温度均匀性,借助 STAR-CCM+软件分析整个球罐内部流场特性,了解摇青机球罐内的流场和温度场分布。通过 Pro/E 建立三维模型并导入网格划分软件 ANSA,将划分完成的表面网格导入

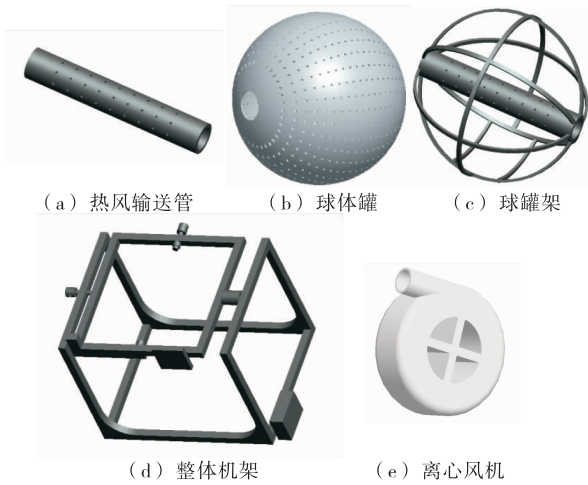


图 2 摇青机主要零部件三维模型

Figure 2 Main components with 3D model of stirring machine

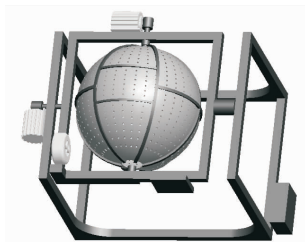


图 3 摇青机整机装配

Figure 3 Assembly model of stirring machine

STAR-CCM+软件中,球罐计算几何模型由送风管、球罐模型、进出口组成(图4)。为使进口的流动充分发展,结合实际球罐体进口风处接离心风机的出风口,将球罐体的进口处加装一定长度的圆形管道,延长的管道段作为静止处理(不旋转),球罐和内部的送风管以一定转速绕中心轴旋转,通过CFD数值模拟加装环形导流板及不加装环形导流板送风管两种工况下球罐内流场,分析对比摇青机球罐内的流场分布结果。

球罐型茶叶摇青机稳定工作时,摇青室内部热空气流动表现为三维湍流,计算模拟时可选取 $k-\epsilon$ 模型^[8-10]:



图 4 球罐计算几何模型

Figure 4 Computational geometry model of spherical tank

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{ut}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + Gk - \rho \epsilon, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{ut}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} Gk - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \quad (2)$$

式中:

$C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ ——模型常数;

G_k ——气流速度变化导致的湍流动能, m^2/s^2 ;

σ_k 、 σ_ϵ ——湍动能 k 与耗散率 ϵ 的湍流普朗特数,文中球罐体内空气流体视为不可压缩流体,取 $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$;

ϵ ——耗散率, m^2/s^3 ;

k ——湍动能, m^2/s^2 。

2.2 边界条件与网格划分

流体为不可压缩气体,其中空气密度 1.165 kg/m^3 ,空气黏度 $1.859 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。进口采用速度入口边界条件,风管入口实测风速 15 m/s ,风温 50°C (根据茶叶做青工艺要求);出口采用压力出口边界条件,球罐体出口绝对压力为外界环境大气压 0.101325 MPa ,温度 30°C 。送风管壁面边界转速 15 r/min ,球罐壁面边界转速 15 r/min ,环境温度 30°C ,考虑到进口热气流与送风管道进行共轭换热,即固体域与流体域之间通过 interface 交接作共轭换热。根据风管道的材料属性,将管道的导热系数定为 $50.2 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 。

网格划分借助 ANSA 软件进行,首先将几何进行前处理,即修补几何面,使其符合实际模型^[11-12]。几何面处理后,进行面网格的划分,其中孔特征采用 $1 \sim 2 \text{ mm}$,风管采用 6 mm 。体网格类型为 trimmer 网格,网格数为 $5\,866\,261$ 个网格单元。

2.3 两种工况数值模拟对比分析

为对比两种送风管道的摇青效果,分析管道内部不加装环形导流板送风管(工况1)与加装环形导流板送风管(工况2)球罐体内流场分布。

2.3.1 中间断面速度云图 由图5可知,工况1中间送风管的速度相对工况2更均匀,但工况2中球罐内的负压区明显比工况1小,且工况2靠近球罐的顶部有部分气流从中间送风管出来进入到球罐内,工况1气流主要贴球罐运动,在球罐中间区域基本无较大风速气流。综合评估,相对工况1,工况2的气流对茶叶的摇青较好,但工况2底部仍存在少部分气流吹不到的气流死区,后续将进一步对此区域进行合理优化。

2.3.2 中间断面速度矢量图 由图6可知,工况1在球罐两侧出现两个较大的涡流区,此分布区域基本无气流,影响茶叶做青效果,相对工况1,工况2仅在球罐底部和中间区域形成较小的涡流区,其余部分气流可与茶叶进

行充分热对流,有利于球罐摇青机对茶叶摇青。

2.3.3 中间断面压力云图 由图 7 可知,工况 1 和工况 2 由于送风管和球罐镶接在一起,风管底部气流堵塞,造成压力区域较大。其中,工况 2 球罐的送风管加入了环形导流板,避免了气流直接冲击到球罐底部,使气流缓慢地从四周小孔分散至罐体中间区域。虽在导流板处出现局部高压区,但主要关注点在球罐区域,球罐内气流负压区较小,有利于茶叶摇青通风对流。

2.3.4 中间断面温度云图 由图 8 可知,工况 2 相对工况 1 的球罐体内整体温度分布更均匀,同时顶部气流的温度相对更高且分布较均匀,整个球罐中的茶叶摇青更均匀且效率更高。

2.3.5 X 断面温度场云图 因整个球罐体直径为 1.2 m,为分析 X 方向的温度流场,分别截取 $X=0.4, 0.6, 0.8$ m 处球罐断面温度场云图进行分析,结果如图 9、10 所示。由图 9、10 可知,工况 2 各截面的温度较为均匀,且相对工况 1 的温度更高,这是由于工况 1 的高温区主要集中在罐壁面,球罐中间区域气流较少。综上,送风管增设环形导流板,摇青机对茶叶摇青效果更佳。

3 样机做青实验验证

为了进一步论证数值模拟的准确性,在武夷山香江茶业有限公司进行球罐型摇青机样机做青试验,做青鲜叶为 2019 年 5 月初采摘的武夷岩茶肉桂品种茶鲜叶。做

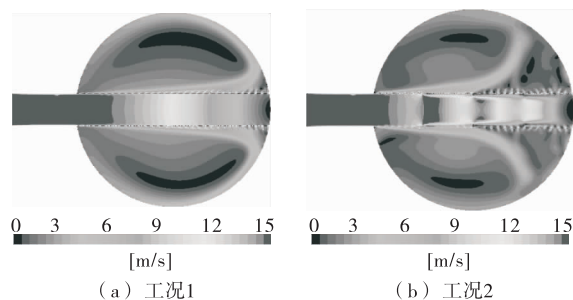


图 5 球罐体 Y 断面速度分布云图
Figure 5 Velocity distribution of Y section in spherical tank

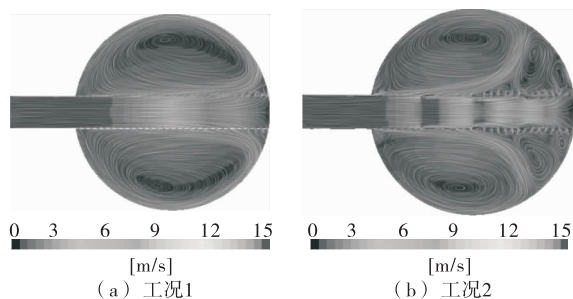


图 6 球罐体 Y 断面速度矢量图
Figure 6 Velocity vector distribution of Y section in spherical tank

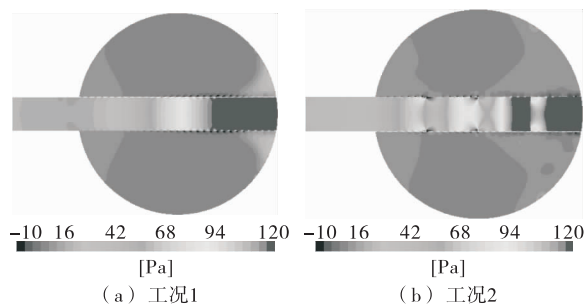


图 7 球罐 Y 断面压力分布云图
Figure 7 Pressure distribution of Y section in spherical tank

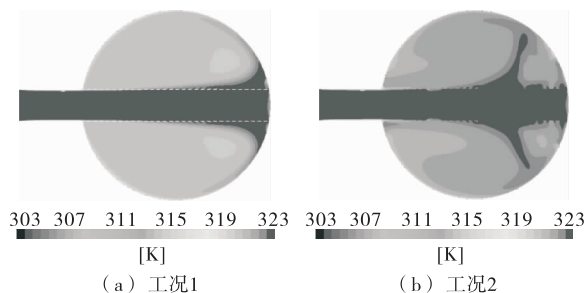


图 8 球罐 Y 断面温度分布云图
Figure 8 Temperature distribution of Y section in spherical tank

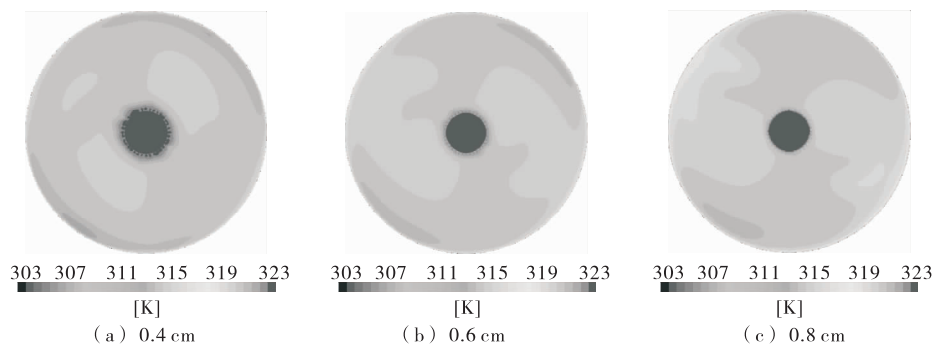


图 9 工况 1 球罐 X 断面温度场云图
Figure 9 Model 1 temperature distribution of X section in spherical tank

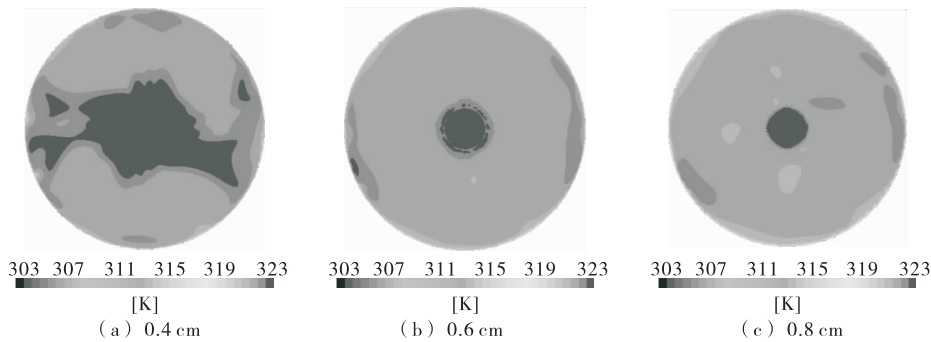


图 10 工况 2 球罐 X 断面温度场云图

Figure 10 Model 2 temperature distribution of X section in spherical tank

茶过程中采用 MEASURE FINE 慧谱温度巡检仪,铂电阻温度传感器 PT100WZP 探头安置于摇青机球罐体内壁面、风管等处,监测茶叶做青温度,记录球罐内壁、风管外壁及风管中心等 12 个不同采样位置点做青温度数据,两种工况下温度监测数据见表 1、2。

由表 1、2 可知,工况 1 送风管无导流板,球罐内部不同点温度的实测值与计算值波动较大,最高温度与最低温度相差 4 K。工况 2 风管加装环形导流板,球罐内部不同点温度的实测值与计算值较均匀,最高温度与最低温度相差 2 K,气流均匀,流场分布均匀。

表 1 工况 1 球罐型 360°摇青机茶叶做青温度
计算值与实测值

Table 1 Model 1 calculated value and measured value with stirring temperature of spherical type 360° of tea stirring machine K

采样点	计算值	实测值	采样点	计算值	实测值
1	323	323	7	320	321
2	323	323	8	320	321
3	323	323	9	323	323
4	323	322	10	322	322
5	319	319	11	321	320
6	319	320	12	320	321

表 2 工况 2 球罐型 360°摇青机茶叶做青
计算值与实测值温度

Table 2 Model 2 calculated value and measured value with stirring temperature of spherical type 360° of tea stirring machine K

采样点	计算值	实测值	采样点	计算值	实测值
1	323	323	7	321	321
2	323	323	8	322	321
3	323	323	9	323	323
4	323	323	10	323	322
5	321	321	11	322	321
6	321	322	12	322	322

传统摇青机与球罐型摇青机在相同做青工艺参数(吹风时间、摇青时间、晾青时间、做青次数)下进行做茶品质比较,做青茶样经杀青、揉捻、烘干工艺最终形成毛茶。参照 GB/T 23776—2009 及文献[13]对毛茶茶样的外形、香气、滋味、汤色及叶底进行感官审评。

由表 3 可知,新机型茶叶做青品质明显优于传统滚筒式摇青机,茶叶品质提升一个等级,说明球罐型摇青机在 X、Y 轴两个方向全方位旋转实现了无死角摇青,茶叶与茶叶、茶叶与摇青滚筒内壁相互接触碰撞,强化了茶叶做青机械动力和机械摩擦力,摇青质量高。同时,加装环形导流板送风管能改善流场、适当增加风阻,热风更容易从风管导流进入球罐,球罐通风对流效果好,整个球罐气流更均匀。球罐体流场温度均匀、空气通透能保证做青鲜茶叶的生物活性,有利于茶叶做青品质。

4 结论

(1) 针对现有滚筒式摇青机工作过程中流场分布不均匀导致茶叶做青品质参差不齐的问题,设计了球罐型 360°茶叶摇青机总体方案、摇青机球罐体和球罐架、机架、送风管等结构并整机虚拟装配。

(2) 对球罐型 360°茶叶摇青机送风管进行优化,采用数值模拟方法对送风管加装环形挡风圈导流板前后的球

表 3 传统摇青机与球罐型 360°摇青机毛茶审评结果
Table 3 Organoleptic evaluation results on semi-made tea between traditional cylindrical tea stirring machine and spherical type 360° tea stirring machine (the same batch samples)

设备	审评结果	综合得分
传统摇青机	外形乌褐油润,尚浓欠爽,滋味甘爽略带有青味,汤色浅橙红、尚亮,叶底略暗、红边欠匀	89
球罐型 360°摇青机	外形乌褐油润,具有花香、馥郁,滋味醇厚鲜爽,岩韵明显,汤色浅橙红、明亮,叶底匀齐红边明显	92

† 外形、香气、滋味、汤色、叶底的得分权重分别为 20%, 30%, 35%, 5%, 10%。

罐体流场和温度场进行计算对比。结果表明:送风管中合理布置环形挡风圈导流板,在小幅度提高流阻的前提下能够增加球罐内部气流向罐内四周流动,整个球罐温度场和速度场的气流均匀性得到有效改善,茶叶做青温度均匀及增加通风对流能有效提升茶叶品质,有利于茶叶摇青工艺。

(3) 球罐型 360°茶叶摇青机风管加装导流板,球罐内部不同点的实测最高温度与最低温度相差 2 K,球罐内气流分布均匀,与模拟仿真结果相吻合。在相同做青工艺参数(吹风时间、摇青时间、晾青时间、做青次数)下,新机型茶叶做青品质明显优于传统滚筒式摇青机,茶叶品质提升了一个等级。

(4) 球罐型 360°茶叶摇青机送风管结构还有待优化,如进一步优化风管中第 2 块导风圈的尺寸以及第 3 块导风圈轴向距离,可以改善此区域送风管周边的流场。此外,在送风管内外部加倾斜式的导风板,可改善罐体内气流流动,避免顶部气流冲向罐底部。

参考文献

- [1] 金心怡,郭雅玲,孙云,等.摇青不同机械力对青叶理化变化及乌龙茶品质的影响[J].福建农业大学学报,2003,32(2):201-204.
- [2] 刘宝顺,占仕权,刘欣,等.武夷岩茶制茶环境与品质[J].农产品加工,2016(11):54-56.
- [3] 王赞,郭雅玲.做青工艺对乌龙茶特征香气成分影响的研究

- 进展[J].食品安全质量检测学报,2017,8(5):1603-1609.
- [4] 黄意生.武夷岩茶现代做青技术研究[J].福建茶叶,2015,37(1):11-14.
- [5] 黄志政,刘安兴,杨林海.武夷岩茶机械做青技术探讨[J].蚕桑茶叶通讯,2019(4):19-23.
- [6] 周子维,游芳宁,刘彬彬,等.摇青机械力对乌龙茶脂肪族类香气形成的影响[J].食品科学,2019,40(13):52-59.
- [7] 郝志龙,陈济斌,金心怡,等.乌龙茶振动做青设备研制与做青环境调控性能试验[J].农业工程学报,2013,29(10):269-275.
- [8] KNOPP T, AALRUTZ T, SCHWAMBORN D. A grid and flow adaptive wall-function method for RANS turbulence modelling[J]. Journal of Computational Physics, 2005, 220(1):19-40.
- [9] 于洋,李若兰,夏治新,等.热风式枸杞烘干机烘干室结构优化及流场分析[J].农机化研究,2019(9):214-221.
- [10] 张立贤,刘庆鑫.烟风道布置低温省煤器流场均匀性分析[J].东北电力大学学报,2020,40(3):88-92.
- [11] 虞文俊,吴瑞梅,李红,等.基于 Fluent-EDEM 耦合的茶叶红外杀青机滚筒内流场数值模拟[J].食品与机械,2019,35(8):104-120.
- [12] ROMERO V M, CEREZO E, GARCIA M I, et al. Simulation and validation of vanilla drying process in an indirect solar dryer prototype using CFD fluent program[J]. Energy Procedia, 2014, 57:1651-1658.
- [13] 施兆鹏.茶叶审评与检验:第4版[M].北京:中国农业出版社,2010:85-89.

(上接第 52 页)

- [10] MCKAY M, BAUER F F, PANZERI V, et al. Perceptual interactions and characterisation of odour quality of binary mixtures of volatile phenols and 2-isobutyl-3-methoxypyrazine in a red wine matrix[J]. Journal of Wine Research, 2020, 31(1):49-66.
- [11] 张敏,甘瑛琳,吴恩宁,等.连续流动注射分析法同时测定水中挥发酚、氰化物及阴离子合成洗涤剂[J].医学动物防制,2020,36(4):404-407.
- [12] 陈慧玲,毛丽莎,许欣欣,等.间隔流动分析法同时检测生活饮用水中的挥发酚类和氰化物[J].食品安全质量检测学

报,2019,10(20):6997-7000.

- [13] 柴丽月,钟惠英,柳海,等.宁波市水产品中挥发酚含量分析[J].中国渔业质量与标准,2015,5(1):61-65.
- [14] 王红梅,李小定,熊善柏,等.直接蒸馏/4-氨基安替比林法检测淡水鱼体内挥发酚的含量[J].食品科学,2011,32(4):196-199.
- [15] 林凯,罗若荣,陈裕华,等.间隔流动注射分析仪测定鱼中挥发酚的实验研究[J].职业与健康,2009,25(9):925-926.
- [16] 罗若荣,林凯,陈方舟,等.深圳市不同鱼体中挥发酚污染及评价[J].中国公共卫生,2008(6):689-690.

(上接第 70 页)

- [10] SUN Zhi-li, WANG Qi-fan, SU Dan-dan, et al. Comparative analysis of thermodynamic performance of CO₂ cascade refrigeration system assisted with expander and mechanical subcooling[J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43(14):7891-7907.
- [11] MASSUCHETTO L H P, DO NASCIMENTO R B C, DE CARVALHO SM R, et al. Thermodynamic performance evaluation of a cascade refrigeration system with mixed refrigerants: R744/R1270, R744/R717 and R744/RE170[J].

International Journal of Refrigeration, 2019, 106:201-212.

- [12] ROY R, MANDAL B K. Energetic and exergetic performance comparison of cascade refrigeration system using R170/R161 and R41/R404A as refrigerant pairs[J]. Heat and Mass Transfer, 2019, 55(3):723-731.
- [13] 刘寒,谢品,王金锋. R404A/R23 复叠式超低温制冷系统试验[J].食品与机械,2019,35(9):111-115,121.
- [14] 董晓强,李坤,刘玉婷,等.氨制冷机房氨气泄漏扩散的数值模拟[J].制冷学报,2017,38(6):12-19.