

# 基于气味在线检测的绿茶锅式杀青系统研究

## Study on pot type fixation process of green tea based on online flavor detection

蒋建军<sup>1</sup> 李臻峰<sup>1,2</sup> 宋飞虎<sup>1,2</sup>

JIANG Jian-jun<sup>1</sup> LI Zhen-feng<sup>1,2</sup> SONG Fei-hu<sup>1,2</sup>

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

**摘要:**在传统的锅式杀青装置基础上,植入 PEN3 电子鼻进行气味在线检测,通过研究不同锅温下 PEN3 电子鼻代表性传感器响应值与杀青品质的关系,提出基于气味在线检测的绿茶锅式杀青系统,根据酶促氧化物以及绿茶香气的测量值来反馈控制杀青锅温。结果表明:杀青锅温过低会导致前期酶促氧化严重,过高会导致香气散失过多,因此在前期灭酶完成后立刻将杀青锅温降低,可提升杀青品质;对比发现杀青锅温由 180 °C 降低到 140 °C 的控制方案下品质最佳,此时茶多酚和氨基酸分别为 20.85% 和 3.66%, 酚氨比为 5.85, 氧化酶活性为 5.19 U/mL。

**关键词:**绿茶;锅式杀青;锅温;气味在线检测;气味

**Abstract:** In this study, the PEN3 electronic nose was implanted for online flavor detection, based on the traditional pot-type fixating device. By studying the relationship between the response value of the PEN3 electronic nose representative sensor and the quality of the fixating at different pot temperatures, a green tea pot-type fixating system based on the flavor online detection was proposed. The system could feedback control the temperature of the fixating pot according to the measured values of enzymatic oxides and the aroma volatiles of the green tea. The results showed that the low temperature of the fixating pot could lead to serious enzymatic oxidation in the early stage, while the high temperature caused excessive loss of aroma substances. Therefore, immediately after the completion of the elimination of oxidase, the temperature of the fixating pot should be lowered to improve the quality of the fixation; with comparison, it was

found that the quality of the control program was reduced from 180 °C to 140 °C, and the tea polyphenols and amino acids were 20.85% and 3.66% respectively. The phenol-ammonia ratio was 5.85, and the oxidase activity was 5.19 U/mL.

**Keywords:** green tea; pot-type finalization; pot temperature; online flavor detection; flavor

中国是全球最大的产茶国,绿茶远销 200 多个国家。绿茶中含有茶多酚和氨基酸等物质,常喝对身体有益<sup>[1-3]</sup>。杀青是通过高温钝化氧化酶活性,防止多酚类物质被氧化导致绿茶变红、散发青臭气,同时蒸发水分、使绿茶变软,为揉捻创造条件<sup>[4]</sup>。人工炒茶时绿茶香气的判别主要依靠嗅觉,这会受感官灵敏度的影响,一致性较差,不适合大量生产,因此需要引进一种定量的自动化气味检测仪器代替人工嗅觉<sup>[5]</sup>。

PEN3 电子鼻是一种由功能各异的化学传感器阵列识别气味的仪器,被广泛运用于食品工业。Wen 等<sup>[6]</sup>利用 PEN3 电子鼻对六宝茶干茶和湿茶进行测定并建立预测模型,结果发现判别准确率达 90%。Qin 等<sup>[7]</sup>利用 PEN3 电子鼻对不同品质的绿茶和红茶进行识别研究,结果发现 PEN3 电子鼻能快速区分不同茶叶的品质差异。Wu 等<sup>[8]</sup>利用 PEN3 电子鼻采集不同成熟度油桃的气味并成功进行区分。然而,上述研究均未能将 PEN3 电子鼻用于绿茶加工过程,尤其是杀青过程中的在线检测以及基于检测结果的反馈控制当中。

研究拟在不同杀青温度条件下,利用 PEN3 电子鼻在线检测绿茶杀青过程中的气味,并对各传感器响应值进行分析,选取代表氧化反应挥发物和香气挥发物的两个传感器传感器 6 和传感器 9 来探究温度对杀青过程中气味的影响,并将品质作为定量依据,再通过阶段变温来进行杀青过程的优化控制,旨在探究电子鼻在线检测的

**基金项目:**国家青年自然科学基金(编号:21606109)

**作者简介:**蒋建军,男,江南大学在读硕士研究生。

**通信作者:**李臻峰(1968—),男,江南大学教授,博士。

E-mail:1736691239@qq.com

**收稿日期:**2020-08-19

可行性,并通过电子鼻来反馈控制杀青过程以达到优化杀青方式的目的。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 材料

绿茶鲜叶:绿茶湿基含水率(75.0±0.4)% (烘干法, 105℃烘干至质量恒定),试验前绿茶冷藏于(4±1)℃冰箱中,浙江省温州市。

#### 1.1.2 试剂

磷酸盐缓冲液:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

磷酸二氢钾:分析纯,上海泰坦科技股份有限公司;

没食子酸溶液:分析纯,山东优索化工科技有限公司。

#### 1.1.3 仪器与设备

电子秤:ES5000型,精度范围±0.000 1 g,永康市艾瑞贸易有限公司;

热电偶:k型,精度范围±5℃,浙江源煌电气科技有限公司;

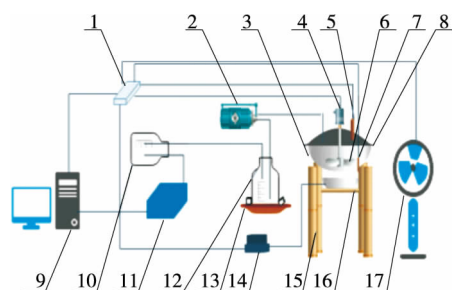
非接触式在线红外测温仪:ASCD-01A型,精度范围±1℃,杭州米科传感技术有限公司;

微型气泵:JH12-65型,蚂蚁电子商务有限公司;

电子鼻:PEN3型,德国 AIRSENSE 公司;

紫外分光光度计:UV-1800型,日本岛津公司;

绿茶锅式杀青系统(如图 1 所示):系统包含在线气味检测部分、温度实时检测与控制部分、翻炒速度控制部分、上位机控制 4 大部分。在线气味检测部分包括 PEN3 电子鼻、微型气泵、集气瓶和冷凝装置。PEN3 电子鼻主要是通过待挥发性气味与相应传感器接触,使传感器响应值发生变化,相应的 10 个传感器对应的敏感物质类型如表 1 所示。温度实时检测与控制部分包括热电偶、非



1. 采集卡 2. 微型气泵 3. 杀青锅 4. 电机 5. 非接触式在线红外测温仪 6. 机械炒手 7. 热电偶 8. 锅盖 9. 计算机 10. 集气瓶 11. 电子鼻(PEN3) 12. 集气瓶 13. 冷凝装置 14. 晶闸管 15. 支架 16. 电热丝盘 17. 风扇

图 1 基于气味在线检测的绿茶锅式杀青系统

Figure 1 Green tea pot based on flavor detection online fixing system

表 1 PEN3 电子鼻所用传感器及其性能描述

Table 1 Sensors used in PEN3 electronic nose and their performance description

传感器	型号	敏感气体类型
1	W1C	对芳香物族化合物灵敏
2	W5S	对氮氧化物灵敏
3	W3C	对氨等芳香物族化合物灵敏
4	W6S	主要对氢气灵敏
5	W5C	对烷烃、芳香族化合物灵敏
6	W1S	对甲基类物质灵敏
7	W1W	对有机硫化物灵敏
8	W2S	对含有芳香族化合物的醇类灵敏
9	W2W	对芳香成分灵敏
10	W3S	对高浓度烷烃—脂肪族物质灵敏

接触式在线红外测温仪、电热丝盘和风扇,杀青时热电偶会将锅温,非接触式在线红外测温仪会将叶温实时输入到计算机内,设定温度后,在 Labview 软件中通过 PID 反馈调节电热丝盘功率,并利用风扇降温,实现杀青锅锅温恒定(±3℃)。翻炒速度控制部分包括直流电机和桨叶,通过 Labview 软件控制直流电机转速来调节翻炒速度。上位机控制部分通过计算机向加热装置、翻炒装置发送控制信号,来调节加热装置输出功率和直流电机转速。

### 1.2 试验方法

基于气味在线检测的绿茶锅式杀青试验系统选用的微型气泵气流量是 3 L/min,杀青方案如表 2 所示,每次试验取(80±1)g 绿茶鲜叶。先将绿茶鲜叶进行摊青(即将绿茶鲜叶放在清洁的竹匾上,置于干净通风无异味的环境下,摊放 6 h),然后进行杀青,直到湿基含水率约 55%时结束,再将杀青后的绿茶在同等条件下进行揉捻、干燥,制成成品茶,对其进行品质分析,每组试验重复 3 次。

表 2 基于气味在线检测的绿茶锅式杀青试验方案<sup>†</sup>

Table 2 Green tea pot type greening experiment scheme based on online smell detection

试验组	锅温	叶温
1	160	65
2	180	81
3	200	92
4	180/160	81/65
5	180/140	81/52
6	200/180	92/81
7	200/160	92/65

<sup>†</sup> 180℃/160℃表示锅温先升到 180℃再降低到 160℃;180℃/160℃,180℃/140℃,200℃/180℃,200℃/160℃等均表示此类似含义。

### 1.3 指标测定方法

1.3.1 气味检测 通过 PEN3 电子鼻分析杀青过程中的气味,选取传感器趋于稳定时期即 25 s 后的数据进行分析<sup>[9]</sup>。

1.3.2 GC-MS 分析 参照文献[10]。

1.3.3 化学品质测定

- (1) 茶多酚含量:参照文献[11]。
- (2) 氨基酸含量:参照文献[12]。
- (3) 酚氨比:参照文献[13]。
- (4) 氧化酶活性:参照文献[14]。

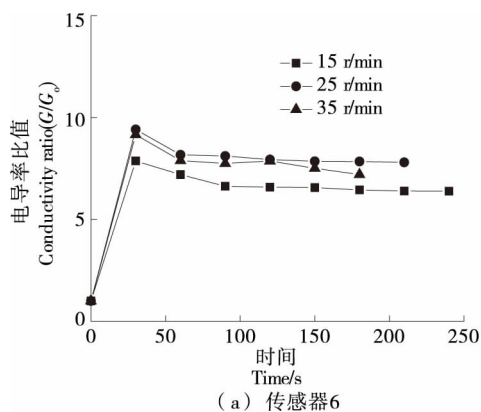
### 1.4 数据处理

利用 SPSS 21.0 软件进行统计分析和显著性差异分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同翻炒速度条件下的杀青过程

利用 PEN3 电子鼻在线检测绿茶杀青过程中的气味,由于 PEN3 型电子鼻的主要原理是待挥发性物质与相应类型的传感器接触时,传感器的电导率以及挥发性气味物质的含量和种类发生不同程度的改变,其响应值会偏离于 1,如果没有感应气体或者感应气体的浓度值低于检测值,则检测结果会接近甚至等于 1。杀青过程中, PEN3 电子鼻传感器 6 和传感器 9 偏离 1 且数值较大,因此重点对传感器 6 和传感器 9 进行分析。图 2 为锅温恒定为 180 °C,翻炒速度分别为 15, 25, 35 r/min 时, PEN3 电子鼻传感器 6 和传感器 9 响应值变化曲线图。锅温相同,翻炒速度越慢,杀青锅内空气流速越慢,不利于气味散发;翻炒速度越快,杀青锅内空气流速越快,越有利于气味散发,但翻炒速度越快,绿茶被抛射后着陆点越集中,不利于绿茶迅速升温,且翻炒速度越快对气味的影力度越小。因此,选取 25 r/min 作为最佳翻炒速度,与何磊等<sup>[15]</sup>所研究一致。



### 2.2 温度均匀连续可控性验证实验

基于气味在线检测的绿茶锅式杀青系统是通过连续调节电热丝盘的加热功率以及风扇降温的方式来实现温度的实时控制的。试验开始前先标定 k 型热电偶和非接触式在线红外测温仪,并在 Labview 中调试得到 PID 自整定控制参数(0.073, 14.028, 2.806)。k 型热电偶贴于锅壁,实时测量锅温;非接触式在线红外测温仪置于锅盖上,实时测量叶温。通过晶闸管,实现温度信号与电压信号转换,不断调整输出电压信号(0~5 V),加热杀青锅,当温度高于设定值 5 °C 时,利用 Labview 控制风扇降温,从而实现对锅温和叶温的实时控制。图 3 为杀青温度控制效果图,温度波动范围±8 °C,控制效果良好。

### 2.3 不同杀青温度条件下电子鼻传感器响应值变化

应用 PEN3 电子鼻对绿茶杀青过程中的气味检测过程中,传感器 6 和传感器 9 响应值较大。图 4 为不同杀青温度条件下传感器 6 响应值变化曲线图。锅温为 160, 180, 200 °C 时,传感器 6 响应值的最大值分别为 160 °C > 200 °C > 180 °C,杀青时长分别为 270, 245, 210 s。

电子鼻传感器响应值变化基本遵循两段式:上升阶段和下降阶段<sup>[16]</sup>。由于每组试验电子鼻传感器响应值都是先上升后下降的,说明在杀青过程中绿茶挥发性气味也是先增加后减少的,因此取传感器响应值最大值前后的两个时间点以及最大值点分别进行 GC-MS 分析,如表 3 所示,绿茶杀青后的效果图如图 5 所示。

锅温为 160 °C 时,绿茶中氧化酶活性较高,会将茶多酚氧化生成 2,6-二叔丁基苯醌,叶片变红,此外,绿茶中的糖类、氨基酸和不饱和脂肪酸会在氧化酶的作用下生成呋喃类等有害物质,如 2-[(2R,5R)-5-甲基-5-乙烯基四氢呋喃-2-基]丙-2-醇和 3-甲基呋喃;绿茶中的亚麻酸和亚油酸还会在氧化酶的作用下生成含 C<sub>6</sub> 或者 C<sub>9</sub> 的醛、醇类物质如(Z)-14-甲基-8-十六碳烯-1-缩醛、3-甲基-1,2-环戊

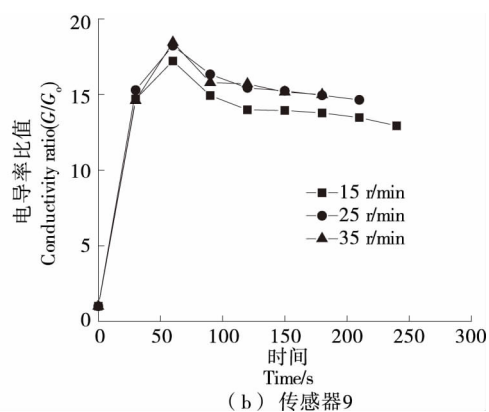


图 2 不同翻炒速度条件下电子鼻传感器响应值变化曲线

Figure 2 Response curve of electronic nose sensor under different stir-fry speeds

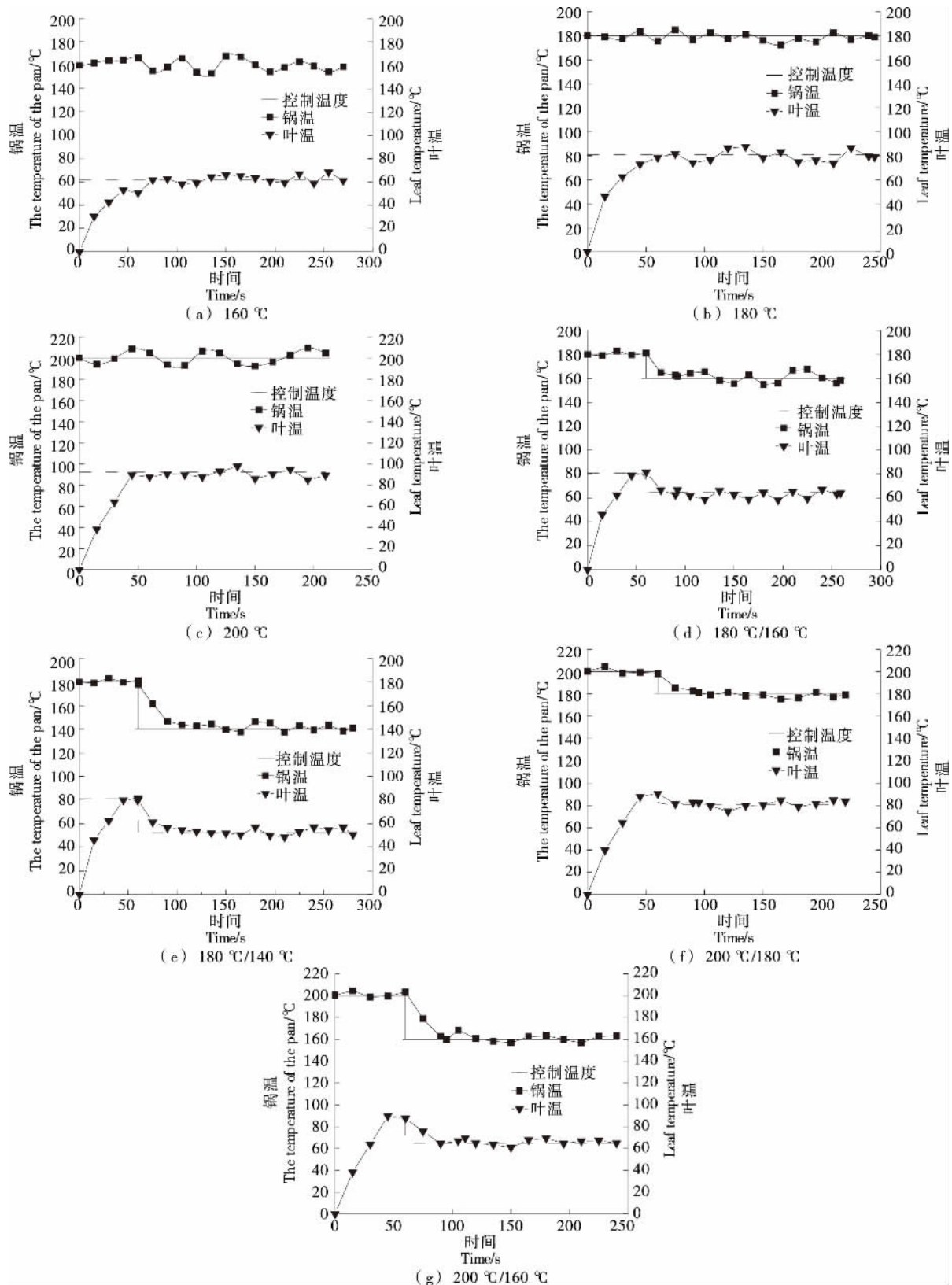


图 3 杀青温度控制效果图

Figure 3 Fixating temperature control effect diagram

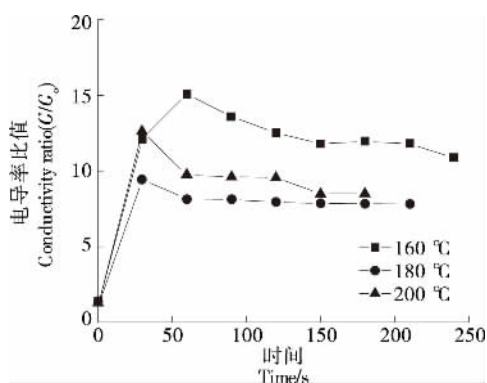


图4 不同杀青温度条件下的传感器6响应值变化曲线  
Figure 4 The 6-sensor response value change curve under different fixating temperature conditions

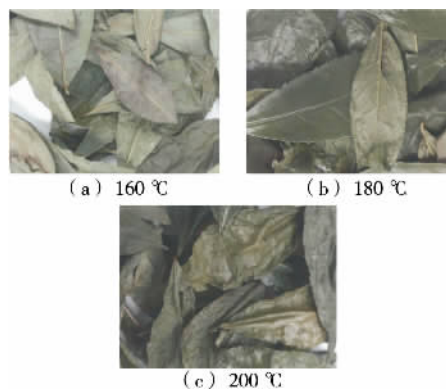


图5 不同杀青温度条件下的杀青效果图  
Figure 5 Picture of the effect of fixating under different fixating temperature

表3 不同杀青温度条件下的甲基类代表成分

Table 3 Representative methyl compounds under different fixating temperatures

名称	保留时间/min	最大值前各物质含量/( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )			最大值时各物质含量/( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )			最大值后各物质含量/( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )		
		160 °C	180 °C	200 °C	160 °C	180 °C	200 °C	160 °C	180 °C	200 °C
2,6-二叔丁基苯醌	26.23	0.46±0.07	0.23±0.06	0.05±0.01	0.61±0.11	0.54±0.06	0.16±0.01	0.40±0.08	0.18±0.02	0.03±0.01
2-[(2R, 5R)-5-甲基-5-烯基四氢吡喃-2-基]丙-2-醇	14.42	2.94±0.43	0.05±0.01	1.24±0.21	3.18±0.54	1.07±0.01	1.53±0.03	2.81±0.47	0.04±0.01	1.21±0.11
3-甲基呋喃	2.49	1.52±0.29	0.07±0.01	ND	1.87±0.14	0.12±0.01	ND	1.25±0.16	0.04±0.01	ND
(Z)-14-甲基-8-十六碳烯-1-缩醛	33.97	0.18±0.06	0.10±0.02	0.04±0.01	0.44±0.02	0.33±0.01	0.16±0.02	0.15±0.02	0.11±0.01	0.04±0.01
3-甲基-1,2-环戊烷二醇	4.99	0.06±0.02	0.02±0.01	ND	0.21±0.01	0.16±0.01	ND	0.07±0.02	0.02±0.01	0.03±0.01
壬醛	14.89	0.30±0.02	0.15±0.04	0.11±0.07	0.40±0.01	0.25±0.03	0.18±0.02	0.28±0.03	0.14±0.01	0.09±0.02
反式-3-己烯-1-醇	7.43	0.23±0.01	0.13±0.05	0.06±0.08	0.38±0.01	0.19±0.02	0.10±0.01	0.29±0.03	0.09±0.02	0.05±0.01
顺-Alpha, Alpha-5-三甲基-5-烯基四氢吡喃-2-甲醇	13.93	0.31±0.02	1.16±0.03	1.37±0.05	0.51±0.02	1.91±0.14	2.53±0.53	0.22±0.01	1.18±0.11	1.32±0.22

烷二醇、壬醛和反式-3-己烯-1-醇<sup>[17]</sup>。锅温为 200 °C 时, 温度越高, 非酶促反应增强, 绿茶中的氨基酸、糖类和维生素被氧化分解生成呋喃、醛类物质, 如顺-Alpha, Alpha-5-三甲基-5-烯基四氢吡喃-2-甲醇。对比电子鼻传感器响应值最大值出现前后的两个时间点以及最大值点发现, 电子鼻传感器响应值达到最大值之前, 酶促和非酶促等氧化反应能力均较强, 氧化反应生成物较多; 电子鼻传感器响应值达到最大值时, 酶促和非酶促等氧化反应能力均达到最强, 氧化反应生成物最多; 电子鼻传感器响应值达到最大值之后, 酶促和非酶促等氧化反应能力均减弱, 氧化反应生成物减少。所以传感器6可以命名为氧化反应指示传感器<sup>[18]</sup>。

图6为不同杀青温度条件下传感器9响应值变化曲线图, 传感器9响应值最大值分别为 200 °C > 180 °C > 160 °C, 杀青温度越高, 传感器9响应值越大, 响应值曲线

越陡峭。

如表4所示, 杀青过程中, 随着温度的升高, 绿茶中

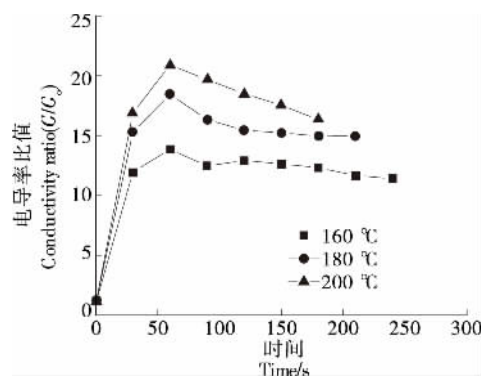


图6 不同杀青温度条件下的传感器9响应值变化曲线  
Figure 6 9-sensor response value change curve under different fixating temperature conditions

的青草味物质和天然的油脂如叶醇、水杨酸甲酯和甲酸庚酯消失,良好的芳香型物质如反式橙花叔醇、芳樟醇、 $\beta$ -紫罗兰酮和 BETA-环柠檬醛增多<sup>[19]</sup>。但杀青温度过高,氨基酸和糖类在高温下脱水,羧基缩合和降解生成吡嗪类物质如 2-甲氧基-3-异丁基吡嗪和(1E)-3,3-二甲基-1-(3-硝基苯基)-1-三嗪以及糖醛类衍生物如苯己醛,并产生焦边、焦叶,不符合杀青要求<sup>[20]</sup>。对比电子鼻传感器响应值最大值出现的前后两个时间点以及最大值点发现,电子鼻传感器响应值到达最大值之前,绿茶中的青草味和天然的油脂较多;电子鼻传感器响应值达到最大值时,青草味减少,香气逸散严重;电子鼻传感器响应值到达最大值之后,青草味基本消失,但温度过高,不利于香气的

保留,所以传感器 9 可以命名为香气指示传感器。

### 2.4 阶段变温分析

绿茶杀青时讲究“高温杀青,先高后低”的原则。恒温杀青,效果较差,因此需要通过阶段变温来进行优化。杀青初期需要通过高温钝化氧化酶活性,但是长时间高温容易产生焦边、焦叶,也不利于香气的保留,因此需要降低温度<sup>[21]</sup>。

图 7 为阶段变温条件下的氧化反应指示传感器响应值变化曲线。由图 7 可知,电子鼻传感器响应值曲线均是先上升后下降的,说明杀青过程中酶活性随时间的延长先增加后减少。阶段变温试验中,由于不能确定挥发性气味最大值出现的时间,所以当氧化反应指示传感器

表 4 不同杀青温度条件下的芳香类代表成分

Table 4 Representative aromatic components under different fixating temperatures

名称	保留时间/min	最大值前各物质含量/( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )			最大值时各物质含量/( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )			最大值后各物质含量/( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )		
		160 °C	180 °C	200 °C	160 °C	180 °C	200 °C	160 °C	180 °C	200 °C
叶醇	7.24	0.21±0.05	0.07±0.01	0.02±0.01	0.18±0.02	0.04±0.01	0.04±0.01	0.07±0.01	ND	ND
水杨酸甲酯	17.63	0.50±0.11	0.16±0.01	0.08±0.01	0.46±0.03	0.12±0.01	0.06±0.01	0.40±0.04	0.08±0.01	0.04±0.01
甲酸庚酯	10.72	0.03±0.01	ND	ND	0.02±0.01	ND	ND	0.02±0.01	ND	ND
反式-橙花叔醇	27.31	ND	0.01±0.01	0.02±0.01	ND	0.06±0.01	0.05±0.01	ND	0.03±0.01	0.03±0.01
芳樟醇	14.78	0.19±0.08	1.43±0.14	1.26±0.12	0.88±0.13	2.87±0.21	2.84±0.24	0.22±0.02	1.41±0.33	1.36±0.31
$\beta$ -紫罗兰酮	25.48	0.24±0.06	0.31±0.08	0.37±0.11	0.88±0.12	0.12±0.02	0.14±0.03	0.25±0.08	0.37±0.01	0.31±0.03
BETA-环柠檬醛	18.41	ND	ND	0.05±0.01	ND	0.10±0.01	0.12±0.02	ND	0.05±0.01	0.06±0.01
2-甲氧基-3-异丁基吡嗪	17.20	ND	ND	0.12±0.01	0.04±0.01	0.09±0.01	0.32±0.02	0.02±0.01	0.05±0.01	0.14±0.05
(1E)-3,3-二甲基-1-(3-硝基苯基)-1-三嗪	32.70	ND	0.05±0.01	0.08±0.01	0.10±0.01	0.18±0.01	0.23±0.02	ND	0.03±0.02	0.07±0.03
(1E)-3,3-二甲基-1-(3-硝基苯基)-1-三嗪	32.70	ND	0.05±0.01	0.08±0.01	0.10±0.01	0.18±0.01	0.23±0.02	ND	0.03±0.02	0.07±0.03
苯己醛	13.01	ND	0.05±0.01	0.21±0.04	0.10±0.01	0.29±0.04	0.34±0.02	ND	0.08±0.02	0.28±0.03

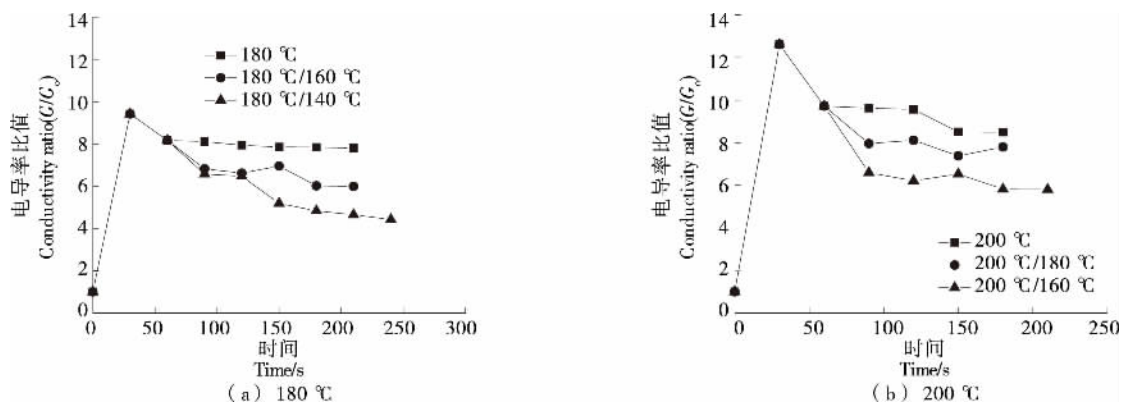


图 7 阶段变温条件下氧化反应指示传感器响应值变化曲线

Figure 7 The oxidation reaction under the condition of stage variable temperature represents the change curve of the sensor response value

响应值先增再减时立刻变温,分别对温度进行降 20 ℃ 和 40 ℃ 处理,发现氧化反应指示传感器响应值降低,且温度下降越多,氧化反应指示传感器响应值越低,品质越好。

图 8 为阶段变温条件下的香气指示传感器响应值变化曲线。杀青过程中,香气指示传感器响应值先增大后减小。香气挥发值也是先上升后下降的,阶段变温可以有效降低香气指示传感器响应值,减少香气挥发。

### 2.5 不同杀青方案杀青后绿茶化学品质评价

茶多酚与氨基酸是决定绿茶品质的重要物质,酚氨比低的绿茶滋味更鲜爽。如表 5 所示,温度越高,茶多酚含量越低,这是由于儿茶素在高温条件下发生裂解反应<sup>[22]</sup>。而氨基酸含量是先增后减的,这是由于温度低时,蛋白质降解生成氨基酸,随着杀青温度的升高,氨基酸的氧化还原反应增强,含量下降<sup>[23]</sup>。因此,锅温从 160 ℃ 变化到 200 ℃ 的过程中,绿茶中的茶多酚含量从 16.49% 降低到 15.74%,氨基酸含量从 1.46% 先增加到 2.25% 再降低到 1.81%。

氧化酶活性越高,茶多酚等物质越易被氧化,因此需要高温钝化氧化酶活性,如表 5 所示,温度越高,氧化酶活性越低,茶多酚和氨基酸等物质越容易被保留<sup>[24]</sup>。试验结果发现,锅温先升到 180 ℃,再降到 140 ℃ 时,品质

最佳且滋味最鲜爽,此时茶多酚和氨基酸分别为 20.85% 和 3.66%,酚氨比为 5.85,氧化酶活性为 5.19 U/mL。

由于杀青是绿茶加工的一个步骤,杀青后的绿茶属于非成品茶,因此,试验并未对由 180 ℃ 降低到 140 ℃ 时杀青后的绿茶香气进行感官评价。但是将最能代表绿茶品质因素茶多酚、氨基酸以及酚氨比作为定量依据,通过阶段变温的确有效地抑制了氧化酶活性,使得茶多酚和氨基酸等物质更好地保留下来,氨酚比较低,而氨酚比低绿茶泡水后感官较优<sup>[25]</sup>。

## 3 结果

锅温为 160,180,200 ℃ 时利用 PEN3 电子鼻在线检测杀青过程中的气味。通过 PEN3 电子鼻传感器响应值曲线变化发现,杀青温度越低,酶促氧化反应越强,叶片变红,不利于茶多酚等物质保留;杀青温度越高,不利于香气的保留,且绿茶容易产生焦边、焦叶。

杀青过程始终保持同一温度,无法兼顾前期灭酶及中后期减少香气消散的需求,因此,前期在电子鼻传感器响应值上升阶段,先迅速升高温度,尽可能多地钝化氧化酶活性,使茶多酚和氨基酸等物质更多地保留下来;中后期在电子鼻传感器响应值下降阶段,适当降低温度,保留香气,防止焦糊。综合来看,杀青前期先将锅温升到

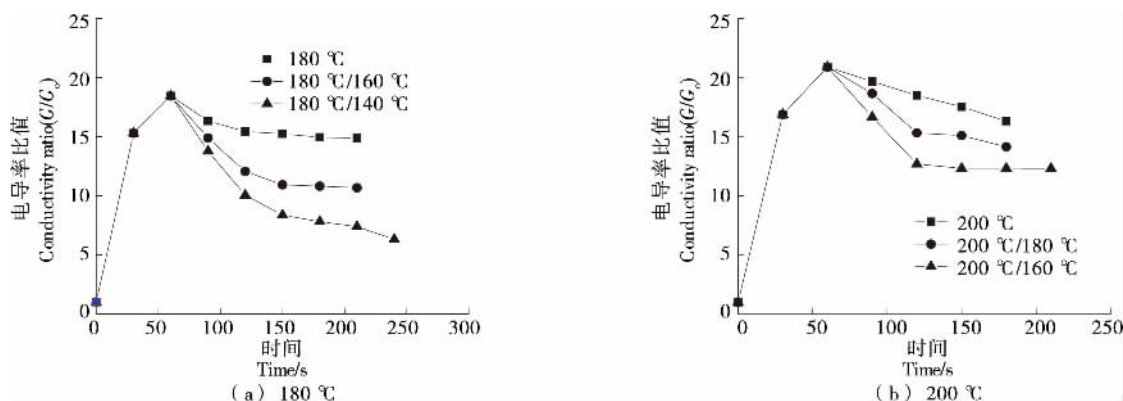


图 8 阶段变温条件下香气指示传感器响应值变化曲线

Figure 8 The aroma under the stage of temperature change represents the sensor response curve

表 5 不同杀青温度条件下的绿茶化学品质分析结果<sup>†</sup>

Table 5 The chemical quality analysis results of green tea under different fixating temperatures

锅温/℃	叶温/℃	茶多酚/%	氨基酸/%	酚氨比	氧化酶活性/(U·mL <sup>-1</sup> )
160	65	16.49±0.17 <sup>b</sup>	1.46±0.11 <sup>a</sup>	11.35±0.67 <sup>d</sup>	10.44±0.57 <sup>e</sup>
180	81	15.83±0.03 <sup>a</sup>	2.25±0.07 <sup>c</sup>	7.04±0.19 <sup>b</sup>	4.86±0.27 <sup>d</sup>
200	92	15.74±0.12 <sup>a</sup>	1.81±0.14 <sup>b</sup>	8.61±0.64 <sup>c</sup>	3.04±0.09 <sup>a</sup>
180/160	81/65	20.57±0.11 <sup>d</sup>	2.85±0.08 <sup>d</sup>	7.21±0.15 <sup>b</sup>	5.13±0.05 <sup>b</sup>
180/140	81/52	20.85±0.14 <sup>e</sup>	3.66±0.25 <sup>e</sup>	5.85±0.33 <sup>a</sup>	5.19±0.09 <sup>b</sup>
200/180	92/81	16.73±0.17 <sup>b</sup>	2.36±0.15 <sup>c</sup>	7.11±0.32 <sup>b</sup>	3.28±0.17 <sup>c</sup>
200/160	92/65	17.85±0.10 <sup>c</sup>	2.50±0.06 <sup>c</sup>	7.19±0.07 <sup>b</sup>	4.05±0.23 <sup>b</sup>

<sup>†</sup> 同列字母不同表示差异显著(P<0.05)。

180 ℃,中后期再降低到 140 ℃,既能够尽可能多地钝化氧化酶活性,又能有效保留茶多酚和氨基酸,降低氨酚比,品质最佳。此时茶多酚和氨基酸分别为 20.85% 和 3.66%,酚氨比为 5.85,氧化酶活性为 5.19 U/mL。证实了基于气味在线检测的绿茶锅式杀青系统的可行性,该系统结构简单,操作方便,可用于实时检测杀青过程中的挥发性气味,并准确地根据挥发性气味的变化规律作出反馈控制,可实现自动化,高品质的杀青处理。

### 参考文献

- [1] 朱德文, 岳鹏翔, 袁弟顺. 不同杀青方法对绿茶品质的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 275-279.
- [2] 许伟, 彭影琦, 张拓. 绿茶加工中主要滋味物质动态变化及其对绿茶品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(11): 36-41.
- [3] DONG Chun-wang, ZHU Hong-kai, ZHAO Jie-wen, et al. Sensory quality evaluation for appearance of needle-shaped green tea based on computer vision and nonlinear tools[J]. J Zhejiang Univ-Sci B (Biomed & Biotechnol), 2017, 18(6): 544-548.
- [4] 滑金杰, 袁海波, 尹军峰. 绿茶电磁滚筒—热风耦合杀青工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 260-267.
- [5] 马会杰, 蒋宾, 潘玉兰. 电子鼻对不同产地名优绿茶和红茶香气特征的判别研究[J]. 食品科技, 2019, 44(1): 336-344.
- [6] WEN Li-xiang, LI Xin-rong, LI Jian-qiang, et al. Application of electronic nose in identification for aging years of Liupao tea[J]. Journal of Southern Agriculture, 2017, 48(7): 1 291-1 296.
- [7] QIN Zi-han, PANG Xue-li, CHEN Dong, et al. Evaluation of Chinese tea by the electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry: Correlation with sensory properties and classification according to grade level[J]. Food Research International, 2013, 53(2): 864-874.
- [8] WU Lei, FANG Jian-dong. The algorithm and application of olfactory information processing based on PEN3 experiment[J]. Machine Tool & Hydraulic, 2016, 44(18): 74-76.
- [9] LIN Hui, YAN Yong-hong, ZHAO Ting, et al. Rapid discrimination of Apiaceae plants by electronic nose coupled with multivariate statistical analyses[J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2013, 84: 1-4.
- [10] WANG Hua-jie, HUA Jin-jie, JIANG Yong-wen, et al. Influence of fixation methods on the chestnut-like aroma of green tea and dynamics of key aroma substances[J]. Food Research International, 2020, 136: 109479.
- [11] 梁丽云, 吴慧杰, 焦远方. 两种方法测定绿茶中茶多酚含量的比较[J]. 贵州茶叶, 2018, 46(4): 11-13.
- [12] 刘晓霞, 周国兰, 何萍. 茶叶游离氨基酸及其总量的国标法测定探讨[J]. 贵州茶叶, 2008(1): 13-17.
- [13] 叶飞, 龚自明, 桂安辉. 自动化加工生产线改善机采绿茶理化品质研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 281-286.
- [14] HAIDA Z, HAKIMAN M. A comprehensive review on the determination of enzymatic assay and nonenzymatic antioxidant activities[J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(5): 1 555-1 563.
- [15] 何磊, 张宪, 赵章凤. 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.
- [16] 李丽丽, 李臻峰, 李静, 等. 基于气味在线检测的苦瓜微波干燥过程[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(1): 179-185.
- [17] 敖存. 龙井茶香气质量评价电子鼻辅助方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011: 11-20.
- [18] TENG Jie, GONG Zhi-hua, DENG Yan-li, et al. Purification, characterization and enzymatic synthesis of theaflavins of polyphenol oxidase isozymes from tea leaf (*Camellia sinensis*) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 84: 263-270.
- [19] WANG Meng-qi, MA Wan-jun, SHI Jiang, et al. Characterization of the key aroma compounds in Longjing tea using stir bar sorptive extraction (SBSE combined with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), gas chromatography-olfactometry (GC-O), odor activity value (OAV), and aroma recombination[J]. Food Research International (Ottawa, Ont.), 2020, 130: 108908.
- [20] 张铭铭, 江用文, 袁海波. 绿茶栗香的形成及工艺研究进展[J]. 中国农学通报, 2020, 36(2): 129-137.
- [21] 沈斌. 茶叶杀青系统自动控制技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013: 11-13.
- [22] ROSHANAK S, RAHIMMALEK M, GOLIS A H. Evaluation of seven different drying treatments in respect to total flavonoid, phenolic, vitamin C content, chlorophyll, antioxidant activity and color of green tea (*Camellia sinensis* or *C. assamica*) leaves [J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(1): 721-729.
- [23] 张俊, 唐德松, 龚淑英. 烘焙处理对夏秋绿茶香气品质的影响[J]. 中国食品学报, 2010, 10(6): 94-100.
- [24] FULYA O, AHMET C, ARZUO, et al. Purification and characterization of a mushroom polyphenol oxidase and its activity in organic solvents [J]. Journal of Food Biochemistry, 2013, 37(1): 36-44.
- [25] 叶飞, 高士伟, 龚自明, 等. 不同杀青方式对绿茶品质的影响[J]. 四川农业大学学报, 2014, 32(2): 160-164, 171.