

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.01.011

吕广瑞, 吴龙, 戴晓勇, 等. 低温等离子体对精酿啤酒杀菌效果的研究[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(1): 84-92.

LYU G R, WU L, DAI X Y, et al. Research on the effect of non-thermal plasma on the sterilization of craft beer[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(1): 84-92.

# 低温等离子体对精酿啤酒 杀菌效果的研究

吕广瑞, 吴龙✉, 戴晓勇, 徐庆, 李占勇

(天津科技大学 机械工程学院, 天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室, 天津市低碳绿色过程装备国际联合研究中心, 天津 300222)

**摘要:** 采用低温等离子体反应器对精酿啤酒进行连续杀菌, 探究其杀菌效果和对品质的影响。以菌落总数、酵母菌和大肠杆菌为微生物指标, 研究等离子体杀菌和巴氏杀菌对精酿啤酒杀菌的对比效果, 同时评估了其对啤酒色度、泡持度和 pH 值的影响, 并利用响应面得出最优杀菌工艺。结果表明: 与巴氏杀菌相比, 等离子体处理后杀菌率几乎相同, 但是色度、亮度和泡持度更优, 更接近原浆啤酒。当等离子体处理电压 40 kV、时间 10 s、气体流速 60 mL/min 时, 能够将活菌落和大肠杆菌几乎全部杀灭, 酵母菌数量减少了 97.5%。利用 Design Expert 软件对其进行分析在电压 40 kV, 时间 10 s, 气体流速 60 mL/min 时杀菌效果和亮度最好, 其预测值与实测值相符, 各因素影响大小为电压>时间>气体流速。

**关键词:** 等离子体; 菌落总数; 酵母菌; 大肠杆菌; 响应面

中图分类号: TS201.3 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2023)01-0084-09

## Research on the Effect of Non-Thermal Plasma on the Sterilization of Craft Beer

LYU Guang-ru, WU Long✉, DAI Xiao-yong, XU Qing, LI Zhan-yong

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and Online Monitoring of Light Industry and Food Engineering Machinery and Equipment, Tianjin International Joint Research Center for Low-carbon Green Process Equipment, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** The craft beer was continuously sterilized by the non-thermal plasma reactor, and its sterilization and quality were evaluated. The total count of aerobic plate, yeast and *Escherichia coli* were used as microbial indexes, the effects of plasma sterilization and pasteurization on the bactericidal effect of craft beer were studied. Meanwhile, the beer color, foam hold and pH were evaluated to obtain the optimum sterilization condition with the response surface. The results showed that, compared with pasteurization, the sterilization rate after plasma treatment was almost the same, but the chroma, brightness and bubble

收稿日期: 2022-09-19

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (2020B0202010004)

Supported by: Key Areas of Research and Development Program of Guangdong Province (No. 2020B0202010004)

作者简介: 吕广瑞, 男, 1997 年出生, 在读硕士生, 研究方向为食品干燥及加工技术。E-mail: 1228607686@qq.com.

通讯作者: 吴龙, 男, 1988 年出生, 博士, 讲师, 研究方向为食品干燥及加工技术。E-mail: wulong@tust.edu.cn.

retention were better, which was closer to the original beer. The total number of colonies and *Escherichia coli* were almost completely killed, and the number of yeast was reduced by 97.5% with the 40 kV plasma treatment voltage, 10 s and 60 mL/min gas flow rate. According to the analysis of Design Expert software, the sterilization effect and brightness were the best when the voltage, plasma treatment times and gas flow were 40 kV, 10 s and 60 mL/min, respectively. The predicted values were consistent with the measured values. The influence of each factors were voltage > time > gas flow rate.

**Key words:** plasma; aerobic plate count; yeast; *E. coli*; the response surface

精酿啤酒是世界上广泛流行的饮料, 2022 年上半年, 我国新增精酿啤酒相关企业 1 645 家, 同比增加 21.8%<sup>[1]</sup>。近年来, 精酿啤酒企业数量也出现了显著增长, 预计到 2025 年中国精酿啤酒消费量可达 26 亿 L<sup>[2-3]</sup>。与传统工业啤酒相比, 精酿啤酒具有原料选择精细、风味多样的特点, 具有较强的市场竞争力<sup>[4]</sup>。精酿啤酒在生产过程中, 其口感和新鲜程度会发生变化, 导致啤酒品质的劣变, 从而容易产生细菌<sup>[5]</sup>。精酿啤酒的品质与生产工艺、储备环境等相关, 直接影响企业的品牌信誉, 以及消费者的接受程度<sup>[6]</sup>。因此, 这就需要合适的杀菌方式对精酿啤酒进行杀菌并且保证品质。

目前, 精酿啤酒通过传统的热杀菌方式会使其品质受到很大的影响, 不能保证口感及品质。目前, 一些新型杀菌技术对精酿啤酒的杀菌逐渐流行起来, 例如超高压<sup>[7]</sup>和高温瞬时技术<sup>[5]</sup>对精酿啤酒的杀菌都有很好的效果。张帆<sup>[7]</sup>等利用超高压处理工坊啤酒可有效地杀灭有害微生物并且保证其品质。低温等离子体是一种比较新颖的灭菌技术, 其杀菌的机制主要包括紫外线、电场和活性氧氮等杀菌物质的作用<sup>[8-11]</sup>。马良军<sup>[12]</sup>等利用介质阻挡放电低温等离子体在 70 kV、150 s 能够完全杀灭肠炎沙门氏菌。刘雅夫等<sup>[13]</sup>使用低温等离子体处理金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌的杀菌率分别为 90.00% 和 98.99%。关于等离子体在果蔬汁方面的研究很多, 比如猕猴桃汁<sup>[14]</sup>, 苹果汁<sup>[15]</sup>, 梨汁<sup>[16]</sup>等, 但低温等离子体技术处理精酿啤酒的相关研究尚无报道。

本文采用等离子体杀菌装置, 研究了对精酿啤酒杀菌率及理化性质的影响, 并与巴氏杀菌进行对比。探究等离子体在不同电压和处理时间条

件下对啤酒中菌落总数、大肠杆菌、酵母菌的影响; 在单因素实验的基础上, 利用响应面优化等离子体杀菌条件, 并在最佳条件下处理精酿啤酒, 为低温等离子体杀菌技术在精酿啤酒中的应用提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 实验材料

精酿啤酒: 某生啤酒; 塑料培养皿: 湖南比克曼生物科技有限公司; 无菌胶头滴管: 常德比克曼生物科技有限公司; 锥形瓶、玻璃棒、烧杯: 江苏华欧玻璃有限公司; 结晶紫中性红胆盐、孟加拉红培养基、平板计数琼脂, 均为分析纯: 北京奥博星生物科技有限公司。

### 1.2 仪器与设备

G-135 电子天平: 常州市幸运电子设备有限公司; HSP-150BE 恒温恒湿培养箱、LSH-18B 高压蒸汽灭菌锅、HH-4 数显恒温水浴锅、SW-CJ-1G 型单人双面净化工作台: 上海力辰邦西仪器科技有限公司; 分光测色仪: 深圳市三恩时科技有限公司; DIPump550-B163 蠕动泵: 卡川尔流体科技(上海)有限公司; 低温等离子体发生器: 南京苏曼等离子体科技有限公司; 啤酒泡持杯: 朗鑫化玻璃仪器有限公司; pH-6011 笔式 pH 计: 台湾泰仕电子工业股份有限公司。

### 1.3 内容与方法

#### 1.3.1 精酿啤酒的准备

(1) 精酿啤酒: 采用未经处理的青岛原产地精酿啤酒, 作为实验的空白对照。

(2) 巴氏杀菌: 70 °C 条件下水浴加热 30 min。

(3) 低温等离子体杀菌: 分别在处理时间 5、10、15 s, 电压为 30、35、40、45、50 kV, 考察

等离子体对精酿啤酒的杀菌效果,此时  $N_2$  流速为 60 mL/min。每个条件做 3 次取平均值。

### 1.3.2 等离子体装置

本文采用自行设计的低温等离子体杀菌装置由高压电源、低温等离子发生器、介质阻挡反应器、蠕动泵、 $N_2$  瓶等辅助设备组成,如图 1。精酿啤酒放置在玻璃瓶中,流动速度及等离子体处理时间通过蠕动泵调节。等离子体放电杀菌反应器装置是使用石英材料设计的反应釜(长 140 mm,宽 60 mm,高 10 mm),石英介质厚度为 1 mm。等离子体放电电极采用铝型材料(长 80 mm,宽 60 mm,高 18 mm),放电电极分别于电源的输出端相连,绝缘介质套于电极外部,两电极间的最大间距为 10 mm。出料口连接玻璃瓶进行收集,气体排出口与通风橱相连接。

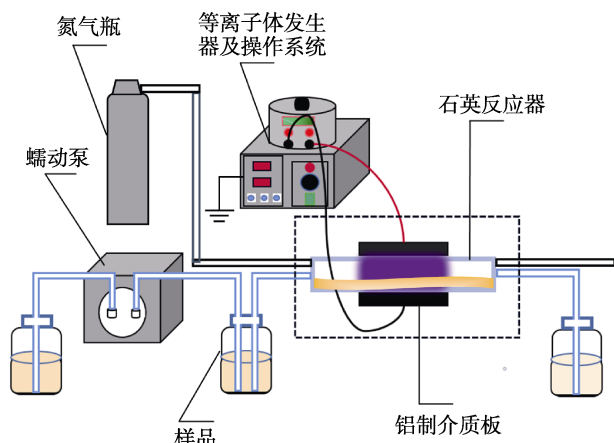


图 1 等离子体杀菌装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of plasma sterilization device

以精酿啤酒为原料,选择 500 mL 的透明玻璃瓶将其放入高压灭菌锅灭菌。实验开始前使用紫外线灯在超净工作台照射 30 min 后,使用热水流通整个装置进行灭菌。待冷却后开启等离子发生器及操作系统预热 1 min 并通入氮气,将精酿啤酒装入 500 mL 玻璃瓶,开启蠕动泵调节流速计算等离子体杀菌时间,其处理时间为 5、10、15 s。等离子体处理电压为 30、35、40、45、50 kV。杀菌完成后立即进行感官评价,同时进行微生物和品质指标的测定。

### 1.3.3 微生物检测

选取菌落总数、酵母菌、大肠杆菌作为微生物指标。菌落总数的细菌检测根据 GB\_4789.2—

2016《食品微生物学检验 菌落总数测定》。酵母菌的检测根据 GB\_4789.15—2016《食品微生物学检验 霉菌和酵母计数》。大肠杆菌的检测根据 GB\_4789.3—2016《食品微生物学检验 大肠杆菌计数》。

### 1.3.4 响应面设计

根据单因素实验结果,以电压、处理时间、气体流速为工艺参数,设计三因素三水平响应面实验,以菌落总数、酵母菌、大肠杆菌以及亮度为响应值,通过等高线图、响应面图以及 ANOVA 进行分析,以-1、0、+1 进行编码,如表 1 所示。

表 1 响应面因素水平  
Table 1 Response surface factor levels

| 因素              | 水平 |    |    |
|-----------------|----|----|----|
|                 | -1 | 0  | 1  |
| A 电压/kV         | 30 | 40 | 50 |
| B 处理时间/s        | 5  | 10 | 15 |
| C 气体流速/(mL/min) | 50 | 60 | 70 |

### 1.3.5 pH 值的测定

将待测的精酿啤酒摇匀除气后,取 30 mL 于烧杯中,使用 pH 计在室温下测定其 pH 值。每次处理取 3 瓶样品测定,重复测量 3 次,取平均值。

### 1.3.6 色度的测定

采用色差仪测定精酿啤酒的色泽,将除气后的精酿啤酒摇匀后置于 25 mL 的比色杯中,测定总色差  $\Delta E^{[17]}$ 。具体操作方法参考 GB/T\_4928—2008《啤酒分析方法》。

### 1.3.7 泡持性的测定

利用读秒法,其原理是用目视法测定泡沫消失的速度,以秒表示。在重复性条件下获得的两次独立测试结果的绝对值不得超过算术平均值的 10%<sup>[18]</sup>。具体操作方法参考 GB/T\_4928—2008《啤酒分析方法》。

## 1.4 数据分析

数据统计分析使用 Origin9.0 软件、Design Expert 软件。

## 2 结果与讨论

### 2.1 未经杀菌处理的精酿啤酒中微生物含量

啤酒中常见的菌种有酵母菌和大肠杆菌,酵母菌是啤酒发酵过程中比较常见的一个菌种,富

含酵母菌易导致酒液微生物系统不稳定；大肠菌群是较理想的水体受粪便污染的指示菌，微生物超标导致啤酒易变质<sup>[19]</sup>。表 2 结果显示，菌落总数及大肠杆菌含量均超过啤酒微生物限量（菌落总数 $\leq 30$  cfu/mL，大肠杆菌 $\leq 15$  cfu/mL）。

表 2 精酿啤酒中微生物检测结果

| 检测指标 | 微生物含量              |
|------|--------------------|
| 菌落总数 | $1.62 \times 10^3$ |
| 酵母菌  | $1.90 \times 10^4$ |
| 大肠杆菌 | 51                 |

## 2.2 等离子体电压对精酿啤酒杀菌的影响

分别在保压时间 5、10、15 s，氮气流速 60 mL/min 条件下，探究等离子体处理电压为 30、35、40、45、50 kV 对精酿啤酒中菌落总数、大肠杆菌和酵母菌的影响。

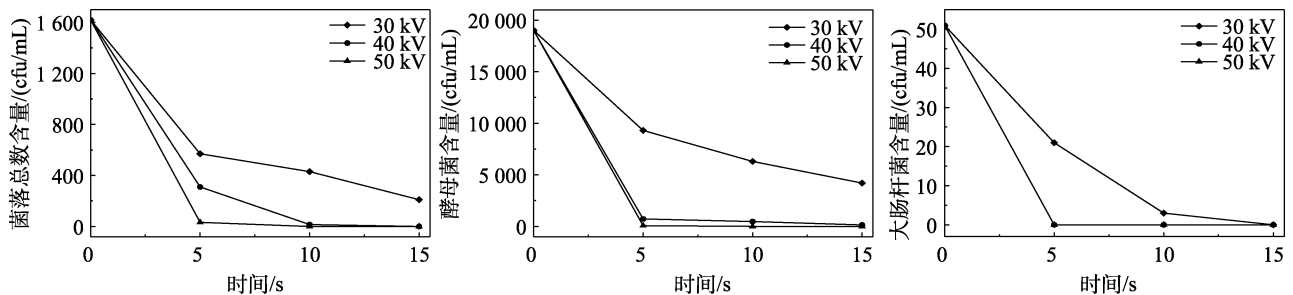


图 2 不同处理时间对菌落总数 (a)、酵母菌 (b)、大肠杆菌 (c) 的杀菌效果

Fig.2 Bactericidal effects of different treatment times on the total number of colonies (a), yeast (b) and *Escherichia coli* (c)

### 2.2.2 不同电压对精酿啤酒杀菌的影响

由图 3(a)可知,当时间为 10 s,电压为 30 kV,菌落总数的含量减少到 460 cfu/mL,电压为 40 kV 时,减少到 15 cfu/mL。可以看出随着电压的增大菌落总数减少速率逐渐增加。可能由于电压的增

### 2.2.1 不同处理时间对精酿啤酒杀菌的影响

如图 2 (a) 所示,当电压为 40 kV,时间为 5 s 时,菌落总数的杀菌率为 81.2%;时间为 10 s 时,菌落总数被完全杀灭。说明随着处理时间的增加,菌落总数减少速率增大。马良军等<sup>[12]</sup>也得到了类似的结论,处理时间的增加能增强等离子体的杀菌效果。由图 2 (b) 可知,在电压大于 40 kV,时间仅用 5 s 就可以有很好的杀菌效果,杀菌率可以达到 95%。国标中未对酵母菌含量有明确的要求,但是过多的酵母菌会使精酿啤酒变质和有异味,影响其品质和口感。由于图 2 (b) 和图 2 (c) 中大肠杆菌含量几乎相同,从而导致线条重叠。从图 2 (c) 中可以看出,当电压为 30 kV 时,处理时间从 5 s 和 10 s 大肠杆菌浓度含量的变化很大,因为在短时间等离子体释放的杀菌成分较少,到达一定时间后,活性成分释放量不断增加使得大肠杆菌被杀灭<sup>[20]</sup>。

加,使得等离子体产生高速离子对细菌的穿透作用导致了细胞的死亡。图 3 (b) 中,当时间为 5 s,电压从 30 kV 增加到 40 kV,酵母菌的杀菌率从 51% 增加到 96%。表明高压使微生物细胞膜被电击穿,产生不可修复的穿孔或破裂,使细胞

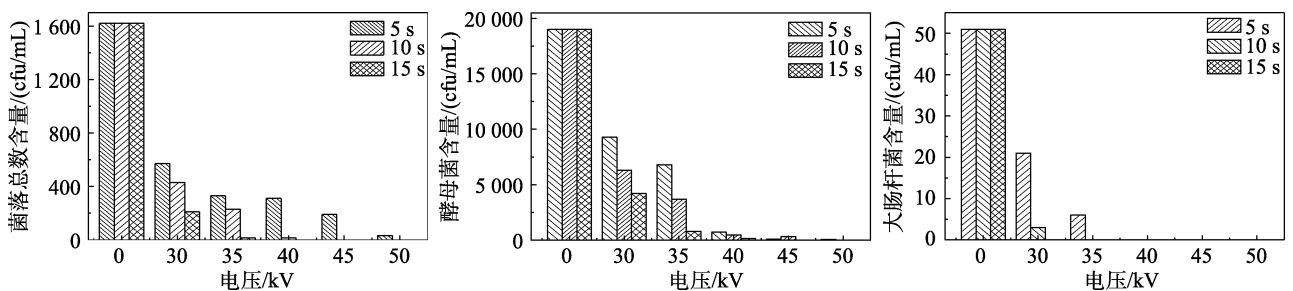


图 3 不同电压对菌落总数 (a)、酵母菌 (b)、大肠杆菌 (c) 的杀菌效果

Fig.3 Bactericidal effects of different voltages on the total number of colonies (a), yeast (b) and *Escherichia coli* (c)

组织受损,导致微生物失活,而达到杀菌效果<sup>[21]</sup>。从图 3 (c) 可以看出,由于精酿啤酒中大肠杆菌的含量较少,当时间 $\geq 10$  s,电压 $\geq 35$  kV 时,大肠杆菌已经被完全杀灭。其原因可能是由于等离子体含有大量活性物,通过氧化作用引起大肠杆菌的死亡。孙艳<sup>[22]</sup>等发现等离子体电压对杀菌效率有显著影响,电压增高,杀菌率增大。

### 2.2.3 精酿啤酒微生物检测结果

由表 3 可知,精酿啤酒中菌落总数和大肠杆菌都超过国家标准的检测限值。国标中未对酵母菌含量进行限制,但是过多的酵母菌会使啤酒持续发酵,从而导致啤酒腐败。等离子体杀菌(电压 45 kV、处理时间 10 s 和氮气流速 60 mL/min)和巴氏杀菌(70 °C 和处理时间 30 min)都有很好

的杀菌作用,菌落总数和大肠杆菌均未检测出,等离子体杀菌中酵母菌的杀菌率达到 97.96%,而巴氏杀菌对酵母菌的杀菌率为 99.99%。

### 2.3 实验模型建立及显著性检验

为进一步优化处理条件,根据实验设计原理,选取处理电压、处理时间和处理极距气体流速对精酿啤酒中菌落总数、酵母菌和大肠杆菌杀菌率及亮度影响显著的因素进行实验设计。表 4 列出了响应面实验设计以及结果,表 5 列出了亮度的响应面方差分析结果。

由表 4 的实验结果得到二次多项回归方程见公式:

$$\text{亮度} = 4.5 + 1.325 * A + 5.085 * B - 0.2 * C - 0.125 * AB + 2.5 * AC - 5 * BC - 0.1375 * A^2 - 0.275 * B^2 + 1.25 * C^2 + 0.36C^2 \quad (1)$$

式中 A 为电压, kV; B 为时间, s; C 为气体流速, mL/min

由表 4 可知,回归模型显著,说明该方程拟合得较好。表 5 显示一次项 A、B、C、交互项 AB、AC、二次项 A<sup>2</sup> 是极显著的。各因素对亮度的影响由强到弱依次电压>时间>气体流速。

表 3 不同处理微生物检测结果  
Table 3 Microbial detection results of different treatments

| 类型       | 菌落总数                 | 酵母菌                 | 大肠杆菌 |
|----------|----------------------|---------------------|------|
| 精酿啤酒     | 1.62×10 <sup>3</sup> | 1.9×10 <sup>4</sup> | 51   |
| 等离子体杀菌处理 | 0                    | 470                 | 0    |
| 巴氏杀菌处理   | 0                    | 6                   | 0    |

表 4 响应面实验设计以及结果

Table 4 Experimental design and results of response surface

| 实验号 | A 电压/kV | B 时间/s | C 气体流速/(mL/min) | 菌落总数/(cfu/mL) | 酵母菌/(cfu/mL) | 大肠杆菌/(cfu/mL) | 亮度/(cd/m <sup>2</sup> ) |
|-----|---------|--------|-----------------|---------------|--------------|---------------|-------------------------|
| 1   | 40      | 15     | 50              | 0             | 130          | 0             | 34                      |
| 2   | 30      | 10     | 50              | 420           | 6 200        | 3             | 38                      |
| 3   | 40      | 10     | 60              | 13            | 460          | 0             | 36                      |
| 4   | 40      | 10     | 60              | 13            | 460          | 0             | 36                      |
| 5   | 40      | 10     | 60              | 13            | 460          | 0             | 36                      |
| 6   | 50      | 10     | 50              | 0             | 0            | 0             | 32                      |
| 7   | 30      | 5      | 60              | 560           | 9 200        | 20            | 35                      |
| 8   | 40      | 10     | 60              | 13            | 460          | 0             | 36                      |
| 9   | 50      | 10     | 70              | 0             | 0            | 0             | 32                      |
| 10  | 40      | 10     | 60              | 13            | 460          | 0             | 36                      |
| 11  | 50      | 5      | 60              | 31            | 63           | 0             | 33                      |
| 12  | 40      | 15     | 70              | 0             | 130          | 0             | 34                      |
| 13  | 40      | 10     | 60              | 13            | 460          | 0             | 36                      |
| 14  | 40      | 10     | 60              | 13            | 460          | 0             | 36                      |
| 15  | 30      | 10     | 70              | 410           | 6 200        | 3             | 37                      |
| 16  | 40      | 5      | 50              | 300           | 710          | 0             | 36                      |
| 17  | 50      | 15     | 60              | 0             | 0            | 0             | 32                      |
| 18  | 30      | 15     | 60              | 200           | 4 100        | 0             | 35                      |
| 19  | 40      | 5      | 70              | 290           | 700          | 0             | 37                      |

表 5 亮度响应面方差结果

Table 5 Brightness response surface variance results

| 方差来源           | 平方和     | 自由度 | 均方    | F 值    | P 值      | 显著性 |
|----------------|---------|-----|-------|--------|----------|-----|
| 模型             | 56.05   | 10  | 5.60  | 20.17  | <0.000 1 | *** |
| 电压             | 30.25   | 1   | 30.25 | 108.90 | <0.000 1 | *** |
| 时间             | 4.50    | 1   | 4.50  | 15.75  | 0.000 3  | *** |
| 气体流速           | 7.10    | 1   | 7.10  | 25.15  | 0.000 5  | *** |
| AB             | 5.24    | 1   | 5.24  | 18.40  | 0.007 8  | *** |
| AC             | 2.25    | 1   | 2.25  | 7.95   | 0.003 6  | *** |
| BC             | 0.25    | 1   | 0.25  | 0.87   | 0.367 5  | *   |
| A <sup>2</sup> | 8.64    | 1   | 8.64  | 29.95  | 0.001 5  | *** |
| B <sup>2</sup> | 3.50    | 1   | 3.50  | 12.25  | 0.012 5  | **  |
| C <sup>2</sup> | 0.07    | 1   | 0.07  | 0.25   | 0.006 2  | *   |
| 残差             | 2.50    | 9   | 0.27  |        |          |     |
| 失拟项            | 2.50    | 2   | 1.25  |        |          |     |
| 纯误差            | 0       | 7   | 0.12  |        |          |     |
| 总差             | 58.55   | 19  |       |        |          |     |
| R <sup>2</sup> | 0.954 6 |     |       |        |          |     |

注: \*为差异不显著 ( $P>0.05$ ); \*\*为差异显著 ( $P<0.05$ ); \*\*\*为差异极显著 ( $P<0.01$ )。

Note: \* indicates no significant difference ( $P>0.05$ ); \*\* was significant difference ( $P<0.05$ ); The difference of \*\*\* was very significant ( $P<0.01$ ).

## 2.4 等离子体杀菌效果响应面分析

应用 Design Expert 软件, 分析电压、时间和气体流速三因素对菌落总数、酵母菌、大肠杆菌以及亮度影响。

图 4 为电压与时间作用对菌落总数的影响,

由图可以看出, 菌落总数的含量随着电压和杀菌时间的增加而减少, 且电压对菌落总数杀菌率影响比时间更加显著。当电压从 30 kV 增加到 40 kV, 时间为 10 s、气体流速为 60 mL/min, 其他参数不变, 菌落总数减少了 415 cfu/mL。

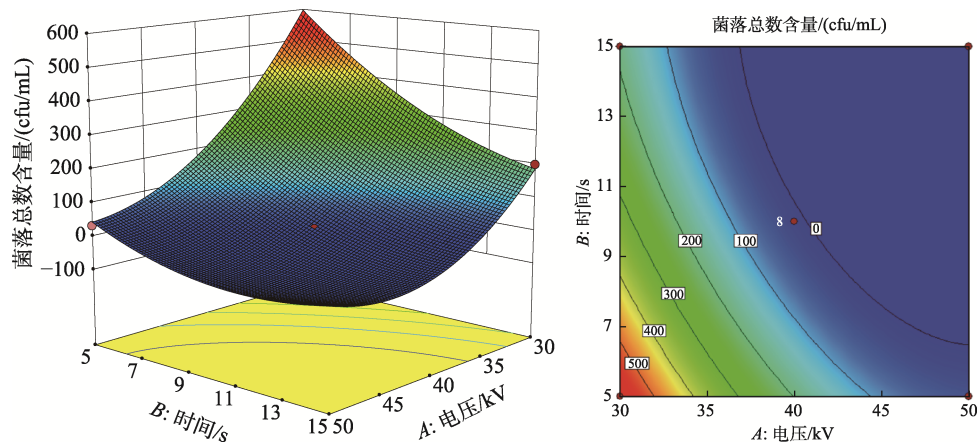


图 4 杀菌时间与电压响应面和等高线对菌落总数含量的影响

Fig.4 Influence of sterilization time, voltage response surface and contour on total colony content

图 5 可以看出, 温度和电压对杀菌效果的影响接近, 电压 40 kV, 时间为 10 s 时, 菌落总数的含量下降约 80%, 当电压上升到 50 kV, 时间为 10 s, 菌落总数则下降至 0, 这表明, 随着电压的增大, 杀菌效果增强趋势显著。当电压固定在 40 kV, 时间为 15 s 时, 菌落总数的含量下降

约 95%, 显然, 处理时间对杀菌效果有一定影响。

由图 6 可知, 响应面显示斜面较倾斜, 表明电压和时间的交互作用显著。由于精酿啤酒中大肠杆菌含量较少, 并且等离子体对大肠杆菌的杀菌作用比较强, 因此在氮气流速一定时, 杀菌效果随着电压和时间的增加逐渐增强。



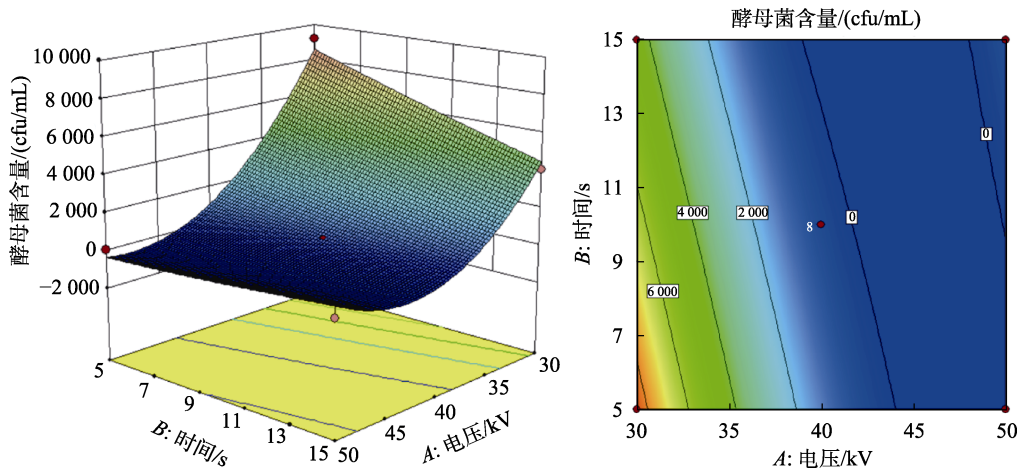


图 5 杀菌时间与电压响应面和等高线对酵母菌含量的影响

Fig.5 Effect of sterilization time and voltage response surface and contour on yeast content

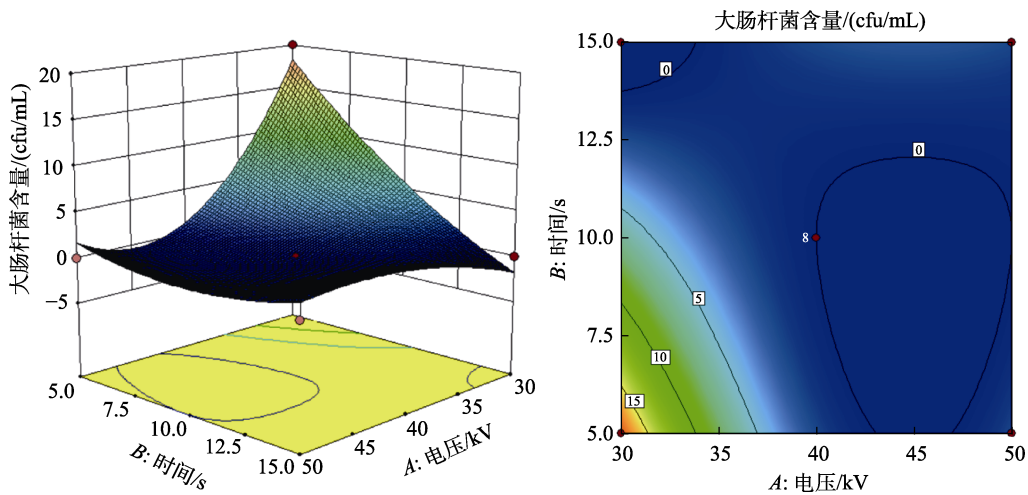


图 6 杀菌时间与电压响应面和等高线对大肠杆菌含量的影响

Fig.6 Effects of sterilization time, voltage response surface and contour on *E. coli* content

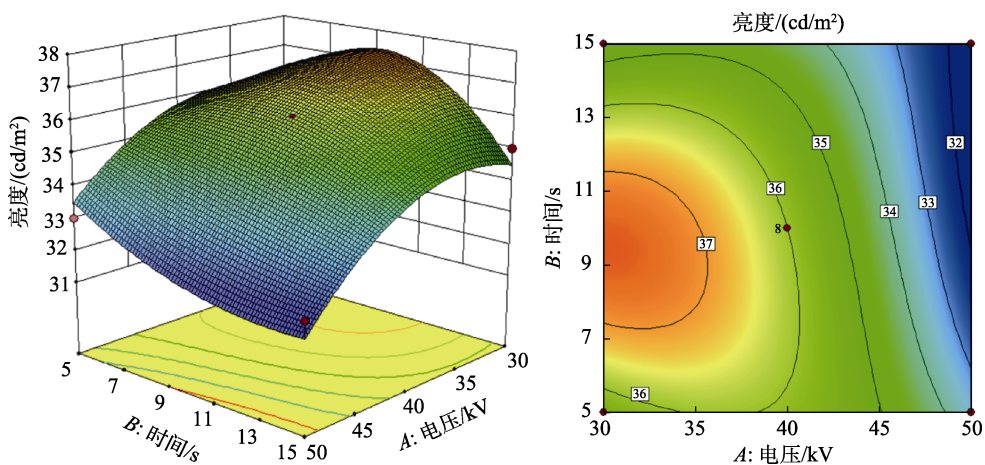


图 7 杀菌时间与电压响应面和等高线对亮度的影响

Fig.7 Effect of sterilization time and voltage response surface and contour on brightness

图 7 为等离子杀菌对亮度的影响，亮度可以观察出精酿啤酒的外观评价。可以看出亮度随着时间和电压的升高而降低。当电压为 30 kV、时

间为 5 s 时，亮度为 37  $\text{cd}/\text{m}^2$ 。当电压为 50 kV、时间为 10 s 时，亮度为 33  $\text{cd}/\text{m}^2$ 。可以看出电压和时间对精酿啤酒的亮度有一定影响。

通过响应面方差分析,该模型为极显著模型,说明该模型与实验拟合较好。利用已建立的数学模型在实验范围内优化出最优条件为:电压 40 kV,时间 10 s,气体流速 60 mL/min,各因素影响大小为电压>时间>气体流速。在此条件下,菌落总数为 13 cfu/mL(符合国家标准菌落总数浓度<30 cfu/mL)、酵母菌含量为 460 cfu/mL、大肠杆菌含量为 0,以及亮度为 36 cd/m<sup>2</sup>。精酿啤酒中保留少量的酵母菌可以保持口感和品质,菌落总数和大肠杆菌达到国家标准。

### 2.5 色度和泡持度分析结果

由表 6 可知,色度物质的含量主要与色素和制取的条件有关。其等离子体处理条件为电压 40 kV、时间 10 s 和气体流速 60 mL/min,巴氏杀菌处理条件为处理温度 70 °C,时间 30 min。啤酒色度由  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  值计算出色差值  $\Delta E$ ,可以看出这种精酿啤酒属于浓色啤酒<sup>[17]</sup>。三者经过对比,等离子体杀菌处理后和未经处理的精酿的色度比较相近。泡持性是啤酒泡沫能维持的时间,啤酒中的表面活性物质能降低表面张力,可以使泡沫更加持久,泡持性越长越好。可以看出巴氏杀菌泡持性比未处理的精酿啤酒泡持性减少了一半,说明巴氏杀菌影响了啤酒的外观评价以及感官分析。

表 6 色度和泡持度变化

Table 6 Variation of color and bubble holdup

| 类型       | 色度/EBC | 泡持性/s |
|----------|--------|-------|
| 精酿啤酒     | 28.06  | 431   |
| 等离子体杀菌处理 | 29.14  | 318   |
| 巴氏杀菌处理   | 33.68  | 223   |

### 2.6 pH 值分析结果

pH 对啤酒中浑浊的产生都有显著的影响<sup>[23]</sup>。酿造所用水的特性影响着啤酒风味,pH 值过低可能是杂菌污染所导致的,pH 值过高影响糖化过程的作用和蛋白质的凝固。其等离子体处理条件为电压 40 kV、时间 10 s、气体流速 60 mL/min,巴氏杀菌处理条件为处理温度 70 °C,时间 30 min。如表 7 所示,三者的 pH 值的变化不对,说明等离子体和巴氏杀菌对精酿啤酒的酸碱度影响不大。

表 7 pH 值变化

Table 7 pH change

| 类型       | pH 值 |
|----------|------|
| 精酿啤酒     | 4.7  |
| 等离子体杀菌处理 | 4.7  |
| 巴氏杀菌处理   | 4.8  |

## 3 结论

利用低温等离子体连续处理精酿啤酒中菌落总数、酵母菌和大肠杆菌以及色泽、亮度、泡持度和 pH 值的变化。与巴氏杀菌进行对比,杀菌率几乎相同,但是等离子体杀菌的品质比巴氏杀菌更好。当电压为 40 kV,处理时间为 10 s 时,菌落总数、酵母菌和大肠杆菌的杀菌率为 99.1%、97.6% 和 99.9%,菌落总数和大肠杆菌均到达国标。同时亮度、色泽、泡持度以及 pH 值分别为 36 cd/m<sup>2</sup>、29.41 EBC、318 s、4.7,都与精酿啤酒相接近。利用实验设计,通过响应面建立了低温等离子体杀灭菌落总数、酵母菌和大肠杆菌及亮度的影响的二次多项数学模型,此模型的预测值与实际值相似。本研究为饮料的低温杀菌工艺提供参考,也为等离子体对菌落总数、酵母菌和大肠杆菌的杀菌效果提供理论依据。可见,低温等离子体对精酿啤酒杀菌的应用有着很好的前景。

### 参考文献:

- [1] 王紫兆. 波澜迭起,精酿啤酒能掀起多大浪花? [N]. 华夏酒报, 2022-08-30(A07).  
WANG Z Z. How big a splash can craft beer make? [N]. Huaxia Wine News, 2022-08-30(A07).
- [2] SALVADOR V, CARLOS A B, ISABEL C. Developments and characteristics of craft beer production processes[J]. Food Bioscience, 2022, 45: 101495.
- [3] 李萍. 精酿啤酒发展现状及前景分析[J]. 中国食品工业, 2022(10): 58-61.  
LI P. Development status and prospect analysis of craft beer[J]. China Food Industry, 2022(10): 58-61.
- [4] RICCARDO DE F, VERONICA S, DELVANA M, et al. Volatiles profile of 'Blanche' wheat craft beer as affected by wheat origin: A chemometric study[J]. Food Chemistry, 2022, 385: 132696.
- [5] 刘启峰, 亢卫凯. 瞬时杀菌技术在精酿啤酒中的应用分析[J]. 现代食品, 2020(2): 105-106.  
LIU Q F, KANG W K. Application analysis of instantaneous sterilization technology in craft beer[J]. Modern Food, 2020(2):



- 105-106.
- [6] 宣文芳. 水蜜桃精酿啤酒酿造工艺优化及其品质分析[D]. 扬州大学, 2022.  
XUAN W F. Optimization of brewing technology and quality analysis of peach craft beer[D]. Yangzhou University, 2022.
- [7] 张帆, 蒋卓, 张国文, 等. 超高压杀菌对比利时艾尔琥珀工坊啤酒贮藏品质变化的影响及货架期预测[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(16): 203-210.  
ZHANG F, JIANG Z, ZHANG G W, et al. Effect of ultra-high pressure sterilization on beer storage quality and shelf-life prediction of Belgian El Amber Workshop[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(16): 203-210.
- [8] GAN Z L, ZHANG Y Y, GAO W M, et al. Effects of nonthermal plasma-activated water on the microbial sterilization and storage quality of blueberry[J]. Food Bioscience, 2022, 49: 101857.
- [9] CHEN Y, CHEN G Y, WEI R, et al. Quality characteristics of fresh wet noodles treated with nonthermal plasma sterilization[J]. Food Chemistry, 2019, 297: 124900.
- [10] MENDES-OLIVEIRA G, JENSEN L J, KEENER M K, et al. Modeling the inactivation of *Bacillus subtilis* spores during cold plasma sterilization[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 52: 334-342.
- [11] 史展, 王周利, 岳田利, 等. 低温等离子体杀灭食源性致病细菌的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(6): 363-370+382.  
SHI Z, WANG Z L, YUET L, et al. Research progress on killing foodborne pathogens by low temperature plasma[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(6): 363-370+382.
- [12] 马良军, 王佳媚, 黄明明, 等. 不同处理条件对介质阻挡放电低温等离子体杀菌效果及影响机理研究[J]. 微生物学报, 2019, 59(8): 1512-1521.  
MA L J, WANG J M, HUANG M M, et al. Study on the germicidal effect of dielectric-barrier discharge low-temperature plasma under different treatment conditions and its influence mechanism[J]. Chinese Journal of Microbiology, 2019, 59(8): 1512-1521.
- [13] 刘雅夫, 符腾飞, 刘宸成, 等. 低温等离子体对金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌的杀菌效果及动力学特性[J]. 现代食品科技, 2021, 37(12): 127-135.  
LIU Y F, FU T F, LIU C C, et al. Effect of low temperature plasma on bactericidal activity of *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa*[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(12): 127-135.
- [14] 刘振蓉, 赵武奇, 高贵田, 等. 低温等离子体处理对猕猴桃浊汁品质的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(6): 195-202.  
LIU Z R, ZHAO W Q, GAO G T, et al. Effect of low temperature plasma treatment on quality of kiwifruit turbidite juice[J]. Journal of China Food Science and Technology, 2021, 21(6): 195-202.
- [15] 王小媛, 牛涵, 靳学远, 等. 杜仲籽油苹果汁饮料低温等离子体和热杀菌的比较分析[J]. 现代食品科技: 1-9[2022-09-12].  
WANGX Y, NIU H, JINX Y, et al. Comparative analysis of low temperature plasma and thermal sterilization of *Eucommia ulmoides* seed oil and apple juice beverage[J]. Modern Food Science and Technology: 1-9[2022-09-12].
- [16] 于弘慧, 马挺军, 孙运金, 等. 低温等离子体杀菌工艺的优化及其对梨汁品质和抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(9): 212-216+221.  
YUH H, MAT J, SUNY J, et al. Optimization of low temperature plasma sterilization process and its effect on quality and Antioxidant activity of Pear Juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(9): 212-216+221.
- [17] 赵晓丹, 刘夏衍, 陈芳, 等. 超高压和高温短时杀菌对绿色复合果蔬汁的杀菌效果与品质影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(5): 114-123.  
ZHAOX D, LIUX Y, CHEN F, et al. Effects of ultra-high pressure and high temperature short-time sterilization on germicidal effect and quality of green compound fruit and vegetable juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(5): 114-123.
- [18] GIUFRÈ M, MAZZOLINI E, CERQUETTI M, et al. Extended-spectrum  $\beta$ -lactamase-producing *Escherichia coli* from extraintestinal infections in humans and from food-producing animals in Italy: a 'One Health' study[J]. International Journal of Antimicrobial Agents, 2021, 58: 106433.
- [19] 王英. 低温等离子体灭活苹果汁中耐高渗酵母的研究[D]. 西北农林科技大学, 2019.  
WANG Y. Study on the inactivation of hyperosmotic yeast in apple juice by low temperature plasma[D]. Northwest A&F University, 2019.
- [20] 张柳芳, 马钰委. 基于介质阻挡放电的低温等离子体杀菌实验[J]. 平顶山学院学报, 2019, 34(2): 23-25.  
ZHANG L F, MA C W. Low temperature plasma sterilization experiment based on dielectric barrier discharge[J]. Journal of Pingdingshan University, 2019, 34(2): 23-25.
- [21] 阿克拜尔·买买提, 热夏提·达吾来提, 阿布力米提·克力木, 等. 交流电场杀菌对酵母菌杀死率的影响[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(14): 95-98.  
AKBAR M, RESHATI D, ABLIMITI K, et al. Effect of AC electric field sterilization on killing rate of yeast[J]. Food Research and Development, 2016, 37(14): 95-98.
- [22] 孙艳, 张志伟, 王世清. 常压低温等离子体对黄瓜表面大肠杆菌杀菌效果及品质的影响[J]. 粮油食品科技, 2018, 26(1): 61-67.  
SUN Y, ZHANG Z W, WANGS Q. Effects of atmospheric low temperature plasma on Bactericidal efficacy and quality of *E. coli* on Cucumber surface[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Food, 2018, 26(1): 61-67.
- [23] 张凤杰, KARL J. SIEBERT. 综述和研究进展: pH 值对胶体稳定性和啤酒稳定的影响[J]. 中外酒业·啤酒科技, 2018(21): 59-70.  
ZHANG F J, KARL J S. Review and research progress: Effect of pH value on colloid stability and beer stability[J]. Chinese and Foreign Wine Industry · Beer Science and Technology, 2018(21): 59-70. ☞
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。