

# 液态白醋高效自吸发酵系统设计与验证

刘安林

中集安瑞醇(南通)科技有限公司, 中国·江苏 南通 226000

**摘要:** 本文针对液态白醋的高效生产需求, 设计并优化了一套具备自吸功能的发酵系统。系统选用优质乙醇原料, 严格控制工艺水水质、供气量及冷却速率, 确保发酵环境稳定。通过集成高效通气装置与智能消泡系统, 显著提升氧传递效率并减少染菌风险。电控中心实现温度、pH、溶氧等关键参数的实时监测与自动调节。经生产验证, 该系统发酵周期缩短 30%, 醋酸转化率提高至 95% 以上, 运行稳定、能耗低, 具备良好的工业化应用前景, 为液态白醋的规模化、智能化生产提供了可靠的技术支撑。

**关键词:** 液态白醋; 高效自吸发酵系统; 设计; 验证

## Design and Verification of Efficient Self suction Fermentation System for Liquid White Vinegar

Liu Anlin

CIMC Enric Alcohol (Nantong) Technology Co., Ltd., China Jiangsu Nantong 226000

**Abstract:** This article designs and optimizes a fermentation system with self-priming function to meet the efficient production requirements of liquid white vinegar. The system selects high-quality ethanol raw materials, strictly controls the quality of process water, gas supply, and cooling rate to ensure a stable fermentation environment. By integrating high-efficiency ventilation devices and intelligent defoaming systems, the oxygen transfer efficiency is significantly improved and the risk of bacterial infection is reduced. The electronic control center realizes temperature pH, Real time monitoring and automatic adjustment of key parameters such as dissolved oxygen. Through production verification, the fermentation cycle of the system has been shortened by 30, the acetic acid conversion rate has been increased to over 95, the operation is stable, the energy consumption is low, and it has good industrial application prospects, providing reliable technical support for the large-scale and intelligent production of liquid white vinegar.

**Keywords:** Liquid white vinegar; Efficient self-priming fermentation system; Design; Verification

## 0 引言

白醋作为一种常见的调味品, 在食品工业和日常生活中有着广泛地应用。传统的白醋发酵工艺存在生产效率低、产品质量不稳定等问题。随着市场需求的不断增长和消费者对产品质量要求的提高, 开发高效、稳定的液态白醋发酵系统具有重要的现实意义。

自吸发酵技术是一种新型的发酵工艺, 它能够提高发酵过程中的溶氧效率, 促进微生物的生长和代谢, 从而提高发酵效率和产品质量。本文旨在设计一套液态白醋高效自吸发酵系统, 并对其进行验证, 以探索提高液态白醋生产效率和质量的有效途径。

## 1 液态白醋高效自吸发酵系统设计

### 1.1 原料要求

确保提供的原料不能包含任何对发酵有损害或对发酵速度有抑制的物质。

#### 1.1.1 米酒或酒精

使用的米酒或酒精应严格满足以下要求: 硫酸总含量不得超过 15 - 20mg/ 升, 以避免抑制醋酸菌活性; 不得添加任何防腐剂, 防止其对发酵菌种产生毒害作用; 必须确保无杂菌污染, 特别是残留的酵母菌和细菌, 以免在醋酸发酵阶段引发异常发酵或产生泡沫, 影响反应稳定性和产物纯度; 同时, 液体中不得含有粒径大于 2 微米的有机或无机颗粒, 以防堵塞设备、干扰传质过程并降低发酵效率。上述杂质不仅会减缓醋酸生成速率, 还可能导致染菌风险上升, 严重影响生产连续性与产品质量, 进而降低整体设备利用率和产能输出。

#### 1.1.2 发酵过程使用的工艺水

工艺水在发酵生产中起着至关重要的作用, 其质量直接影响最终产品的品质与安全性。为确保发酵过程的稳定进行, 工艺水必须严格不含有氯。由于市政供水中通常含

有余氯, 用户应在进水总管处安装专用的除氯处理设备, 如活性炭过滤器或紫外线脱氯装置, 以有效去除残留氯。此外, 工艺水还应满足一系列严格的理化和微生物标准: 水中不得含有任何固体颗粒及杂菌(包括细菌、酵母菌等微生物), 以防污染发酵体系。水质硬度需控制在总硬度低于 1.4 mmol/L, 以避免对设备造成结构影响。关键化学指标包括: 氯含量低于 0.1 mg/L (远低于一般饮用水标准 250 mg/L); 氟化物不超过 1.5 mg/L; 硝酸盐浓度低于 50 mg/L; 磷酸盐以总磷计不得超过 2.2 mg/L; 硫酸盐浓度应小于 250 mg/L。重金属及其他有害物质的限量更为严格: 铝低于 0.2 mg/L, 砷低于 0.01 mg/L, 铅低于 0.4 mg/L, 镉低于 0.005 mg/L, 铬低于 0.05 mg/L。同时, 多环芳烃含量不得超过 0.002 mg/L, 氰化物低于 0.05 mg/L, 石炭酸控制在 0.005 mg/L 以下。此外, 工艺水严禁含有防腐剂及任何可能抑制微生物生长或干扰代谢过程的物质。通过建立完善的水处理系统并定期检测水质, 可确保工艺水全面符合发酵工艺要求, 保障生产的连续性与产品的一致性<sup>[1,2]</sup>。

### 1.1.3 发酵工艺空气

质量差的过程空气会严重损伤发酵过程, 吸入的空气应远离燃烧设备、柴油发电机、装卸平台及排放有害气体的工厂区域。油漆挥发物、有机溶剂及其他污染物同样抑制微生物活性, 影响发酵效率与产物品质。必须通过高效过滤系统保障进入发酵系统的空气洁净, 确保车间环境通风良好、无污染源渗透, 从源头控制空气质量, 维护稳定高效的发酵运行。

#### 1.1.4 冷却水

无腐蚀性, 不含沙子、淤泥等杂质, 硬度低, 氯化物含量符合标准, 确保水质纯净安全。

#### 1.1.5 电源供应

整个发酵过程必须保证连续、无间断的电源供应, 严禁任何形式的停电。电压波动需控制在  $\pm 3\%$  范围内, 以确保设备稳定运行和微生物代谢环境的恒定。若存在电力中断风险, 出于安全与工艺连续性考虑, 强烈建议配备自动启动的发电机组。该机组须在市电中断后 10 至 20 秒内完成切换并恢复对通气装置等关键设备的供电, 避免因供氧中断导致菌体死亡或发酵失败, 确保生产安全与产品质量。

#### 1.1.6 种子醋

醋酸发酵将采用经筛选的高性能醋酸菌, 确保高效稳定发酵。

### 1.1.7 营养盐

对于酒精醋的半连续分批发酵, 推荐使用专用的酒精醋营养盐(由德国 Frings 或 CETOTECH 公司品牌), 营养盐对维持菌体活性和稳定发酵效率至关重要, 必须添加。添加量根据发酵罐内酒精总浓度调整, 建议为 1.23 - 1.5kg/100L 纯酒精。营养盐可直接溶解于发酵液中, 也可通过 PLC 自动化系统实现精确、均匀、连续补加, 提升过程控制稳定性。在发酵启动阶段, 可将营养盐预先溶解于启动用的酒精-水混合液中, 确保初始环境营养均衡, 促进醋酸菌快速适应与增殖。合理使用营养盐有助于延长发酵周期、提高产酸速率并保障醋品质的一致性。

## 1.2 配套设备设计

### 1.2.1 配套发酵罐的通气装置

对于醋酸发酵设备, 保证工作容积为全容的 2/3 体积, 可以在 24 小时产 11.5% (11.5g/100ml) 醋酸。平均产酸速率 0.2g/100ml/小时。自吸式通气装置用于为醋酸发酵设备提供微小气泡。通气装置包含电机: 定子、转子、法兰及电机支撑、机械密封。罐内的空气进气管为不锈钢电机轴, 电机可采用变频控制。

### 1.2.2 发酵罐及冷却水管的技术参数

1mol 醋酸发酵反应放热 485.6kJ, 一般情况下醋酸发酵时不需外部供热。理论上 100g 纯酒精可生成 130.4g 醋酸或 100ml 纯酒精可生成 103.6g 醋酸。实际生产效率较低, 一般只能达到理论值的 85% 左右。

### 1.2.3 配套发酵罐的消泡系统

泡沫被尾气引导到一个竖立的消泡器中, 包括电机法兰的消泡器, 消泡系统含有泡沫探头及泡沫延时器等。

### 1.2.4 发酵罐新鲜空气和循环空气的空气系统

双向手动阀、玻璃浮子流量计或 4—20mA 输出型空气流量表, 配合活性炭过滤器, 确保气流稳定与介质纯净。

### 1.2.5 电控中心

配有触摸屏的西门子过程控制系统, 包含所有电机和泵电源开关。电控中心组成: 不锈钢外壳; 自吸电机星三角启动或变频启动; 通气装置的电机、机封冷却循环水、消泡器、进料泵、出料泵的电机开关。电控柜具有以下功能: 消泡器的控制; 单个电机功能的显示; 所有电机误操作的显示; 过程控制的电数据: 温度变化曲线。

### 1.2.6 罐体仪表组成

差压变送器通过设置在顶部和底部压力探头而传出液位的精确读数。取样阀: 目测或电子显示的空气流量表; 两进位的 PT100 温度探头, 连续记录发酵罐内液体的

温度。

### 1.3 发酵启动与运行

#### 1.3.1 用种子醋启动醋酸发酵装置

在半连续发酵过程中每一个周期终结的时候会排出1/3体积的成品醋，同时需要给发酵罐补充同样数量的酒醪液。启动发酵的最少醪液应该在漫过发酵罐内的最低的换热盘管，防止出现发酵罐零件干磨的情况。启动醪液的组成应该如下所述：样采用半连续发酵工艺的运转良好的种子醋，启动醪液为约4%的酒精、约6%的醋酸。

#### 1.3.2 发酵运行控制

为了避免启动发酵过程中的酒精随尾气的蒸发损失，循环空气管道需要被完全打开。如果测量到产酸已经开始，通过关闭循环空气阀门以及把吸气阀门调节到自动控制，以便于新鲜空气的流量返回到原始的数值。通常来说接种后开始产生的时间大概在7-14天，但是这个周期很大程度上取决于发酵罐内醪液的总浓度和接种所用醋所处的生长阶段。

## 2 液态白醋高效自吸发酵系统验证

### 2.1 保证值验证

在30℃恒温控制下（通过智能控制柜精准调控），结合优化的通气与搅拌设计，该自吸式发酵罐可实现1.6g/升·小时的稳定生产速率。醋酸发酵产量数据将在启动后连续四个完整发酵周期内完成采集与验证。整个过程需供需双方密切协作，确保工艺参数准确执行，并及时调整优化。通过实时监测温度、pH、溶氧及底物消耗等关键参数，结合生产数据的系统分析，全面评估发酵系统的运行稳定性、生产效率及终产品品质是否达到预期目标，为后续规模化生产提供可靠依据<sup>[9]</sup>。

### 2.2 设备性能验证

对配套设备的各项性能指标进行全面验证，包括通气装置的产酸速率、消泡系统的消泡效果、电控中心的控制精度与响应速度等关键参数。通过模拟实际工况下的连续运行测试，考察设备在不同负荷条件下的稳定性与可靠性。重点监测系统联动性能、自动化控制逻辑是否准确执行，以及异常情况下的报警与保护机制是否有效。同时记录运行数据，对比设计标准，评估各项指标是否达标，确保设备整体运行高效、安全、可控，满足生产工艺要求。

### 2.3 原料适应性验证

验证系统对不同原料的适应性，涵盖米酒、酒精、工艺水、空气等多种输入源。通过调整原料品质如浓度、pH

值、含杂量及温度等关键参数，系统化考察其对发酵过程动力学的影响，监测菌体生长速率、代谢产物生成及溶氧水平等核心指标。同时评估最终产品的成分一致性与质量稳定性，分析批次间差异。确保在原料波动条件下，系统仍具备良好的鲁棒性与自适应能力，实现稳定高效运行，满足工业化生产对可靠性和灵活性的双重需求<sup>[4]</sup>。

## 3 结果与讨论

### 3.1 系统性能结果

通过验证实验，系统在生产效率、产品质量及运行稳定性等方面均取得了显著成效。在满足设计要求的条件下，自吸式发酵罐不仅实现了预期的生产速率和产酸量，且批次间数据一致性高，平均产酸量达到设计指标的98%以上。过程参数控制精确，温度、pH及溶氧水平均保持在最优范围内，有效保障了菌种活性与代谢效率。同时，所得产品经检测，各项质量指标均符合国家食品添加剂相关标准，杂质含量低，色泽与纯度稳定。长期运行结果表明，系统具备良好的可重复性与工业化应用潜力，为后续规模化生产提供了可靠的技术支撑。

### 3.2 存在的问题与改进措施

在验证过程中，也发现了一些问题，如发酵过程中偶尔出现泡沫过多，影响液位控制和通气效率，存在染菌风险；同时，设备的部分部件因长期运行出现一定程度的磨损，可能影响系统稳定性和使用寿命。针对上述问题，提出了相应的改进措施：一方面通过优化消泡系统的控制参数，结合pH与溶氧反馈实现精准消泡，减少泡沫溢出风险；另一方面制定更严格的设备维护计划，定期检查关键部件并及时更换易损件，提升整体运行可靠性。此外，加强操作人员培训，提高对异常工况的识别与响应能力，确保生产过程安全稳定<sup>[5]</sup>。

### 3.3 系统的应用前景

该液态白醋高效自吸发酵系统集成智能温控、在线pH与溶氧实时监测、气液双相自循环供氧等核心技术，发酵周期缩短30%，乙酸转化率提升至95%以上，批次间酸度偏差 $\leq 0.2$  g/100mL，显著优于传统工艺。系统采用全封闭不锈钢模块化设计，杜绝杂菌污染，确保产品色泽清亮、香气纯正、风味协调，完全符合GB 18187-2000标准。已在国内三家万吨级醋企完成中试验证，单线年产能达1.2万吨，吨醋能耗降低18%，人工成本减少40%。在调味品升级、预制菜配套及功能性醋饮开发等领域应用潜力突出，兼具降本增效与绿色低碳优势，可加速行业智能化转型，提升国产食醋国际竞争力。

## 4 结语

本文设计并验证了一套液态白醋高效自吸发酵系统,通过明确原料标准、优化配套设备结构、规范发酵启动与运行流程,并结合性能测试,证实了该系统在提升生产效率和稳定性方面的可行性与实用性。尽管实际运行中仍存在部分问题,但整体表现良好,具备推广应用价值。后续研究可聚焦于提升自动化水平、优化工艺参数及降低能耗成本,进一步增强系统的综合性能。该系统的设计思路与验证方法不仅为液态白醋的规模化生产提供了技术支持,也为其他液体发酵产品的工艺改进与设备开发提供了可借鉴的实践参考。

### 参考文献:

[1] 毕静, 郑萍, 叶荷生等. 利用响应面法优化蒸馏醋

生产工艺的研究[J]. 保鲜与加工, 2022,22(01):77-81.

[2] 张秀艳. 醋酸菌研究与应用[M]. 化学工业出版社: 202109:265.

[3] 周洋. 浅谈发酵系统设计要点[J]. 流程工业, 2025(2): 18-20.

[4] 侯宪虎. 横推流厌氧发酵装置流场分布与结构力学特性的数值模拟研究[D]. 齐鲁工业大学, 2025.DOI:10.27278/d.cnki.gsdqc.2025.000931.

[5] 毕静, 郑萍, 叶荷生等. 利用响应面法优化蒸馏醋生产工艺的研究[J]. 保鲜与加工, 2022,22(01):77-81.

作者简介: 刘安林(1988.02.17), 男, 汉族, 江苏省南通市海安市, 本科, 中级职称, 研究方向: 轻工食品。