

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2023.80877

撞击—射流空化器内糖汁氧化脱色效果

曹 艳^{1,2} 黄万兴¹ 黄永春^{1,2} 黄承都^{1,2}

(1. 广西科技大学生物与化学工程学院, 广西 柳州 545006;

2. 广西糖资源绿色加工重点实验室, 广西 柳州 545006)

摘要: [目的] 探究空化—氧化协同作用对原糖溶液脱色效果的影响。[方法] 以撞击—射流空化器为空化设备、 H_2O_2 - V_C 为氧化体系, 对比了空化与常规搅拌对糖汁氧化脱色效果的影响, 并利用正交试验优化了糖汁脱色工艺条件。[结果] 当 5% H_2O_2 溶液用量为 3 mL, 100 g/L V_C 溶液用量为 10 mL, 空化时间为 3 min, 入口压力为 0.2 MPa, 溶液温度为 70 °C, 空化元件喉径为 0.5 mm, 溶液体积为 150 mL 时, 糖汁的脱色效果最好, 脱色率可达 60.72%。[结论] 空化—氧化相互作用能够促进糖汁色素的有效降解。

关键词: 水力空化; 氧化; 脱色; 糖汁

Study on the effects of oxidative decolorization of sugar juice in impact-jet hydrodynamic cavitator

CAO Yan^{1,2} HUANG Wanxing¹ HUANG Yongchun^{1,2} HUANG Chengdu^{1,2}

(1. Department of Biological and Chemical Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi 545006, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Green Processing of Sugar Resources, Liuzhou, Guangxi 545006, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to explore the effect of cavitation-oxidation synergy on decolorization of raw sugar solution was studied. [Methods] An impact-jet hydrodynamic cavitator was used as the equipment for generating cavitation and the H_2O_2 - V_C solution was used as the oxidation system. A comparative study was conducted to assess the effects of hydrodynamic cavitation and conventional stirring on the oxidative decolorization of sugar juice, and the process conditions of sugar juice decolorization were optimized using orthogonal experiments. [Results] When the dosage of 5% H_2O_2 solution was 3 mL, the dosage of 100 g/L V_C solution was 10 mL, the cavitation time was 3 min, the inlet pressure was 0.2 MPa, the solution temperature was 70 °C, the throat diameter was 0.5 mm, and the solution volume was 150 mL, the decolorization effect of sugar juice was the most obvious, and the decolorization rate of the sugar juice was 60.72%. [Conclusion] The interaction between cavitation and oxidation can achieve the effective degradation of pigments in sugar juice.

Keywords: hydrodynamic cavitation; oxidation; decolorization; sugar juice

食糖是中国重要农产品之一,其产量居全球第三^[1]。在制糖工业中,甘蔗制糖占 85% 以上。粗榨甘蔗蔗汁中除了含有蔗糖外,还含有多种杂质,如还原糖、有机酸、树脂和色素等^[2]。蔗汁中的色素主要为酚类物质,此类物质容易被空气氧化生成深色物质,从而影响蔗糖品质^[3-4]。因制糖原料和工艺的不同,生产的糖制品色值存在较大差异,为了获得高品质糖品,需对糖汁进行脱色处理。

目前,常见的糖汁脱色方法主要有亚硫酸法^[5]、吸附

法^[6-7]、离子交换法^[8]等。近年来,水力空化技术及氧化技术逐渐被用于糖液澄清工艺研究中。黄永春等^[9]研究了涡流产生的水力空化对亚硫酸法糖液澄清的脱色效果,其脱色率为 69.14%,高于无水力空化条件下的脱色率。孙焕焯等^[10]研究了文丘里管产生的水力空化对亚硫酸法糖液澄清的脱色效果,发现水力空化能强化糖液澄清脱色。毛善巧等^[11]基于过氧化氢- V_C 氧化体系对预灰、过滤得到的甘蔗清汁进行脱色研究,蔗汁的色值从 1 842 IU 降

基金项目: 广西科技基地和人才专项(编号:桂科 AD20238033)

通信作者: 曹艳(1983—),女,广西科技大学讲师,博士。E-mail: caoyan913@163.com

收稿日期: 2023-09-05 **改回日期:** 2024-04-07

至 674 IU,且过氧化氢- V_C 体系对糖汁脱色有明显效果。廖耀文等^[12]将氧化技术与吸附技术相结合,研究了 H_2O_2 - V_C 体系协同壳聚糖/蒙脱土复合物对蔗汁的脱色效果,其最佳工艺条件下脱色率为 92.92%。

水力空化技术^[13-14]是一种新型绿色环保技术,其在空化过程中会产生化学效应和机械效应,化学效应能够产生羟自由基,该自由基能够作用于色素分子的双键致其断裂而脱色,机械效应即高速微射流和强烈的冲击波,能够促进羟自由基和色素分子间的接触和反应。 H_2O_2 - V_C 复合试剂^[15]是一种环保的氧化还原反应体系, H_2O_2 在 V_C 的催化作用下能够快速产生羟自由基,从而促进糖汁脱色^[16]。研究拟以撞击一射流空化器为空化发生设备,探究水力空化作用下 H_2O_2 - V_C 复合试剂对糖汁色素的脱除效果,拓展水力空化及氧化技术在糖汁脱色工艺中的应用,寻求一种能够高效脱除蔗汁色素的新途径。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

原糖:广西东亚糖业有限公司;

过氧化氢、抗坏血酸:分析纯,西陇科学股份有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

撞击一射流空化器:自制;

微型齿轮泵:WT300-1JB型,兰格恒流泵有限公司;

紫外—可见分光光度计:UV-5100H型,上海元析仪器有限公司;

阿贝折射仪:WAY(2WJ)型,上海仪电物理光学仪器有限公司;

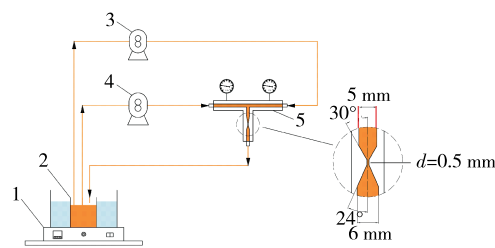
电热恒温水浴锅:HWS-12型,上海一恒科学有限公司;

电子分析天平:BS224S型,北京赛多利斯仪器系统有限公司。

1.1.3 试验装置及原理 试验装置示意图如图 1 所示。原糖溶液在水浴锅中预热至反应温度,添加一定量 H_2O_2 及 V_C 溶液后,经两个齿轮泵同时将溶液输送到撞击一射流空化器内,两股溶液在 T 型口处撞击初步混合,经文丘里空化元件后返回至原烧杯中。在空化元件产生的空化效应下, H_2O_2 与 V_C 获得高度混合而产生大量羟自由基,羟自由基作用于原糖中的色素分子使其发生降解而脱色。管路压力通过调节齿轮泵的转速进行控制。撞击一射流空化器两个入口管内径均为 5 mm,出口管内径为 6 mm,喉部直径为 0.5 mm,入口锥角和出口锥角分别为 30°和 24°。

1.2 试验方法

1.2.1 单因素试验 量取质量分数为 15%的原糖溶液于



1. 恒温水浴锅 2. 250 mL 烧杯 3、4. 微型齿轮泵 5. 撞击一射流空化器(带压力表)

图 1 试验装置示意图

Figure 1 Schematic diagram of experimental device

250 mL 烧杯中,预热到反应温度,依次加入一定量的 100 g/L 的 V_C 溶液和 5% H_2O_2 溶液,同时开启两个齿轮泵,调节齿轮泵转速控制入口压力,反应一定时间后,取样测定反应后溶液的吸光度及折光锤度。

(1) 常规搅拌与空化条件下糖汁氧化脱色效果对比:常规搅拌转速为 400 r/min,空化入口压力为 0.2 MPa(齿轮泵转速为 400 r/min),其他试验条件均相同,即 5% H_2O_2 溶液用量为 3 mL,100 g/L V_C 溶液用量为 10 mL,反应温度为 30 °C,溶液体积为 150 mL,考察反应时间对糖汁的脱色效果。

(2) 5% H_2O_2 溶液用量对糖汁脱色效果的影响:100 g/L V_C 溶液用量为 10 mL,反应温度为 30 °C,入口压力为 0.2 MPa,空化时间为 3 min,空化元件喉径为 0.5 mm,溶液体积为 150 mL,考察 5% H_2O_2 溶液用量(1, 2, 3, 4, 5 mL)对糖汁脱色效果的影响。

(3) 100 g/L V_C 溶液用量对糖汁脱色效果的影响:5% H_2O_2 溶液用量为 3 mL,反应温度为 30 °C,入口压力为 0.2 MPa,空化时间为 3 min,空化元件喉径为 0.5 mm,溶液体积为 150 mL,考察 100 g/L V_C 溶液用量(0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5 mL)对糖汁脱色效果的影响。

(4) 反应温度对糖汁脱色效果的影响:5% H_2O_2 溶液用量为 3 mL,100 g/L V_C 溶液用量为 10 mL,入口压力为 0.2 MPa,空化时间为 3 min,空化元件喉径为 0.5 mm,溶液体积为 150 mL,考察反应温度(30, 40, 50, 60, 70 °C)对糖汁脱色效果的影响。

(5) 入口压力对糖汁脱色效果的影响:5% H_2O_2 溶液用量为 3 mL,100 g/L V_C 溶液用量为 10 mL,反应温度为 30 °C,空化时间为 3 min,空化元件喉径为 0.5 mm,溶液体积为 150 mL,考察入口压力(0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 MPa)对糖汁脱色效果的影响。

(6) 空化元件喉径对糖汁脱色效果的影响:5% H_2O_2 溶液用量为 3 mL,100 g/L V_C 溶液用量为 10 mL,反应温度为 30 °C,空化时间为 3 min,入口压力为 0.2 MPa,溶液体积为 150 mL,考察空化元件喉径(0.5, 0.6, 0.7, 0.8,

0.9 mm)对糖汁脱色效果的影响。

(7) 溶液体积对糖汁脱色效果的影响: 5% H_2O_2 溶液用量为 3 mL, 100 g/L V_c 溶液用量为 10 mL, 反应温度为 30 $^\circ\text{C}$, 空化时间为 3 min, 入口压力为 0.2 MPa, 空化元件喉径为 0.5 mm, 考察溶液体积 (120, 150, 180, 210, 240 mL) 对糖汁脱色效果的影响。

1.2.2 正交试验 在单因素试验基础上, 选取影响较大的 5% H_2O_2 溶液用量、100 g/L V_c 溶液用量、入口压力、空化时间 4 个因素, 以糖汁脱色率为响应值, 设计 $L_9(3^4)$ 正交试验。

1.2.3 吸光度及折光锤度测定 设定紫外可见分光光度计波长为 560 nm, 将待测糖汁移入 1 cm 比色皿中进行吸光度测定。此外, 取适量待测糖汁于阿贝折射仪的棱镜上进行测试, 读取折光锤度及温度, 根据 GB/T 10499—2014 中的“折光锤度测定法”查得糖液的观测锤度, 再根据观测锤度查表获得视密度 (20 $^\circ\text{C}$)。

1.2.4 色值计算 按式 (1) 计算糖汁色值^[17]。

$$IU = \frac{1000A}{bc}, \quad (1)$$

式中:

IU ——560 nm 处的国际糖色值;

A ——560 nm 处的吸光度值;

b ——比色皿厚度, cm;

c ——蔗汁中的固溶物质量浓度, g/mL。

1.2.5 脱色率计算 按式 (2) 计算脱色率。

$$\eta = \frac{[IU]_0 - [IU]_1}{[IU]_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

η ——脱色率, %;

$[IU]_0$ ——原糖汁的色值;

$[IU]_1$ ——脱色后糖汁的色值。

1.2.6 数据处理 使用 Origin 8.5 软件处理试验数据并绘图, 使用 SPSSAU 软件进行极差分析。

2 结果与分析

2.1 常规搅拌与空化条件下糖汁氧化脱色效果对比

由图 2 可知, 在常规搅拌和水力空化条件下, 随着反应时间的延长, 糖汁的脱色率均呈先增大后降低趋势。这是因为随着反应时间的延长, V_c 与 H_2O_2 之间的催化氧化作用更充分, 释放的羟自由基更多, 羟自由基作用于色素分子使其降解而脱色。反应到一定时间, 由于色素分子减少, 羟自由基作用于色素分子的概率降低, 这时羟自由基会作用于糖汁中绿原酸等多酚类物质, 此类物质被氧化生成颜色更深的物质^[18], 使糖汁色值升高, 脱色率下降。

当反应时间为 3 min 时, 空化条件下的脱色率达到最

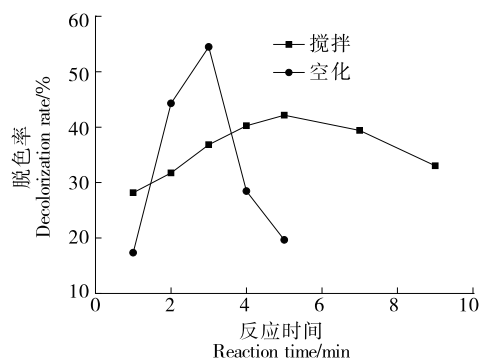


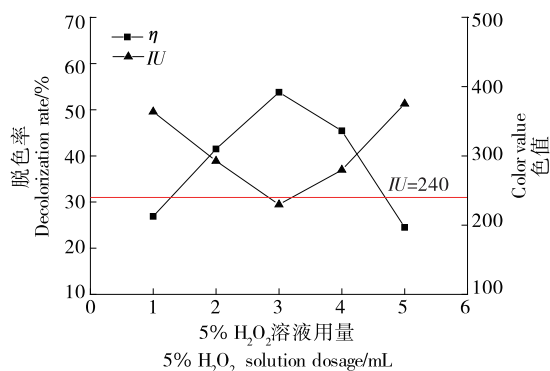
图 2 常规搅拌与空化条件下糖汁氧化脱色效果对比

Figure 2 Comparison of oxidative decolorization effect of sugar juice under conventional stirring and hydrodynamic cavitation

大值 54.48%; 当反应时间为 5 min 时, 常规搅拌的脱色率达到最大值 42.15%, 说明空化较常规搅拌条件下具有更大的最大脱色率值。当反应时间为 3 min 时, 常规搅拌的脱色率为 36.84%, 较同等时间空化条件下的脱色效果差, 说明在水力空化条件下能够产生更多的羟自由基, 且该自由基的产生速率较常规搅拌条件下的快。这是因为常规搅拌的机械混合强度较低, 而水力空化过程中产生的高速微射流和强烈冲击波能够极大促进物质间的混合和反应^[19], 故能够产生更多的羟自由基, 且水力空化过程中也会产生一定量的羟自由基。因此, 水力空化较常规搅拌具有更优良的糖汁氧化脱色效果。

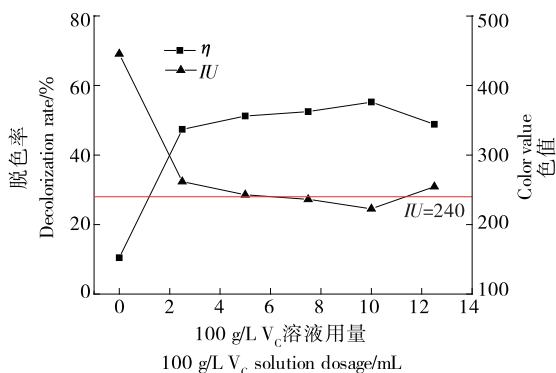
2.2 单因素试验

2.2.1 5% H_2O_2 溶液用量对糖汁脱色效果的影响 由图 3 可知, 随着 5% H_2O_2 溶液用量的增大, 糖汁脱色率逐渐增大, 当 5% H_2O_2 溶液用量 > 3 mL 时, 糖汁脱色率逐渐降低, 说明 H_2O_2 溶液用量对糖汁脱色过程影响较大。这是因为羟自由基是促使色素分子降解的主要因素^[11], 而该自由基主要来源于 H_2O_2 的分解, 因此, H_2O_2 溶液用量对糖汁脱色效果有直接影响。 H_2O_2 溶液用量越大, 在 V_c 的催化作用下就会产生更多的羟自由基, 更有利于色素分子的降解, 但 H_2O_2 溶液用量达到一定值时, 继续增加 H_2O_2 溶液用量就会产生过多的羟自由基, 由于色素分子浓度的降低, 羟自由基作用于色素分子的概率降低, 过多的羟自由基便会与多酚类物质反应, 使其氧化而生成颜色更深的物质。黄承都等^[20]指出过量的 H_2O_2 会消耗部分羟自由基, 不利于糖汁脱色过程的进行。因此, 氧化剂的加入量并非越多越好。当 5% H_2O_2 溶液用量为 3 mL 时, 糖汁色值最低, IU 值为 229.74。GB/T 317—2018 规定: 一级白砂糖的色值 $IU \leq 150$, 二级白砂糖的色值 $IU \leq 240$ 。当 5% H_2O_2 溶液用量为 3 mL 时, 其糖汁色值达到国家二级白砂糖的色值要求。因此, 最佳的 5% H_2O_2 溶液用量为 3 mL。

图3 5% H₂O₂溶液用量对糖汁脱色效果的影响Figure 3 Effects of 5% H₂O₂ solution dosage on the decolorization of sugar juice

2.2.2 100 g/L V_c溶液用量对糖汁脱色效果的影响 由图4可知,当V_c溶液用量从0 mL增加到2.5 mL时,糖汁脱色率从10.44%迅速升高至47.35%,继续增大V_c溶液用量,糖汁脱色率逐渐增加,但增加趋势较缓慢,且当V_c溶液用量>10 mL时,糖汁脱色率略有下降。这是因为在无催化剂作用的条件下,H₂O₂氧化分解产生羟自由基的速率较慢,故V_c体积为0 mL时糖汁脱色率较低,与姜继平等^[21]的研究结果类似,但在有催化剂的条件下,能够极大加快H₂O₂的氧化分解速率,显著增加羟自由基的数量。谭诗敏等^[22]指出低浓度V_c的加入可显著增加羟自由基的数量,与试验结果保持一致。V_c具有较强的还原性^[23],与H₂O₂作用能够发生强烈的氧化还原反应,从而加快羟自由基的产生速率,且V_c添加量越多,能够促使产生羟自由基的速率更快,同等时间内释放的羟自由基数量更多。但V_c添加量过多,过量的V_c易于自氧化产生脱氢抗坏血酸阴离子,该阴离子会消耗系统中产生的羟自由基^[24],从而减少作用于色素分子的羟自由基数量,脱色率反而下降。当V_c溶液用量为7.5,10.0 mL时,糖汁色值均<240,满足国家二级白砂糖的色值要求,但后者具有更低的色值,说明后者得到的糖汁品质更高。因此,选择100 g/L V_c溶液用量为10 mL较合适。

2.2.3 反应温度对糖汁脱色效果的影响 由图5可知,随着反应温度的升高,糖汁脱色率逐渐增大,当反应温度为70℃时,糖汁脱色率最大为60.72%。一方面,反应温度的升高有利于H₂O₂与V_c间的催化氧化反应的进行^[25],从而能够产生更多的羟自由基;另一方面,反应温度越高,溶液的饱和蒸气压增大,空化数($C_v = \frac{P_r - P_v}{0.5\rho v^2}$)减小,空化数越小表明空化更容易发生,产生的空化效应更强,且溶液黏度随反应温度的升高而降低,空化泡更容易生长和溃灭,从而产生更多的羟自由基^[26]。此外,溶液黏度越低,流体间的湍动更剧烈,更有利于羟自由基与色素分子

图4 100 g/L V_c溶液用量对糖汁脱色效果的影响Figure 4 Effects of 100 g/L V_c solution dosage on the decolorization of sugar juice

间的接触,从而强化色素分子的降解过程。因此,升高反应温度有利于糖汁色素的降解,与毛善巧等^[11]的研究结果类似。当反应温度由30℃升高至70℃时,糖汁色值从235.32逐渐降至193.58,均达到国家二级白砂糖的色值要求,且反应温度为70℃时获得的糖汁品质最好。但从节能方面考虑,选择反应温度为30℃。

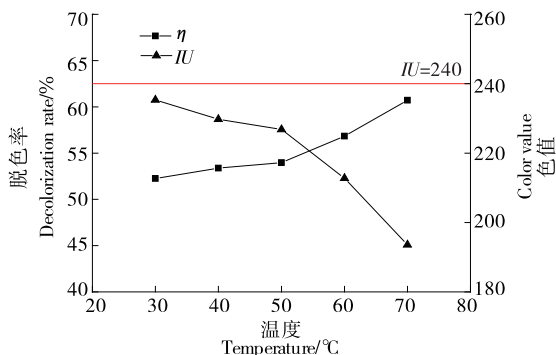


图5 反应温度对糖汁脱色效果的影响

Figure 5 Effects of temperature on the decolorization of sugar juice

2.2.4 入口压力对糖汁脱色效果的影响 由图6可知,随着入口压力的增大,糖汁脱色率先增大后减小趋势,当入口压力为0.2 MPa时,糖汁脱色率最大(为54.82%),此时的糖汁色值最低(为225.66),满足国家二级白砂糖的色值要求。随着入口压力的增大,流体的流动速度增大,空化数(C_v)减小,空化的化学及物理效应均增强,化学效应增强表明空化过程能够产生更多的羟自由基^[27],物理效应增强表明空化过程产生了更强烈的微射流和冲击波,使得H₂O₂与V_c之间的反应更充分,从而能够产生更多的羟自由基,且羟自由基在剧烈的湍动下更容易作用于色素分子使其发生降解。但继续增大入口压力,空化的化学及物理效应均得到进一步增强,会产生更多的羟自由

基,过多的羟自由基会作用于多酚类物质,使其氧化而生成颜色更深的物质。综上,入口压力控制在0.2 MPa左右较为合适。

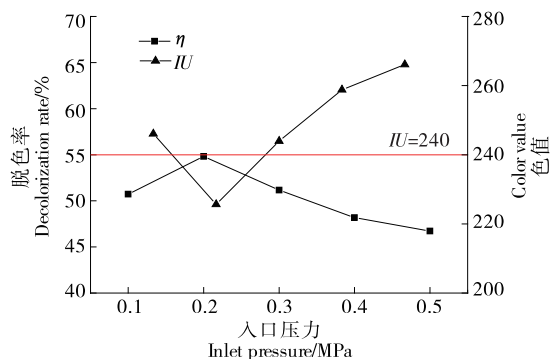


图6 入口压力对糖汁脱色效果的影响

Figure 6 Effects of inlet pressure on the decolorization of sugar juice

2.2.5 空化元件喉径对糖汁脱色效果的影响 由图7可知,糖汁脱色率随空化元件喉径的增大而降低,当空化元件喉径为0.5 mm时,糖汁脱色率最大,此时的糖汁色值最小。这是因为喉径是空化元件的关键尺寸,其不仅会影响羟自由基的产生,还与流体湍动程度密切相关,从而影响糖汁的脱色效果。随着空化元件喉径尺寸的增大,流体流速减小,空化数(C_v)增大,空化强度降低,不仅羟自由基产量减少,而且因空化效应产生的微射流和冲击波的强度也减弱^[28-29],导致羟自由基与色素分子发生作用的概率降低,不利于色素分子的降解。因此,为了获得更好的糖汁脱色效果,空化元件喉径选择0.5 mm较合适。

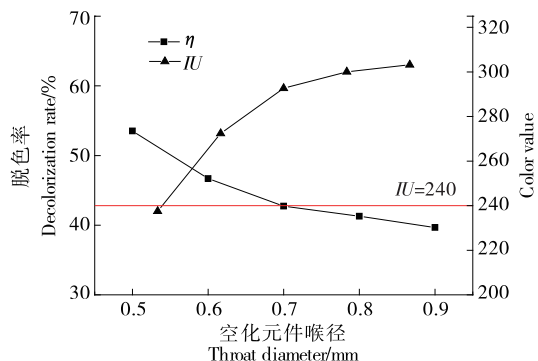


图7 空化元件喉径对糖汁脱色效果的影响

Figure 7 Effects of throat diameter on the decolorization of sugar juice

2.2.6 溶液体积对糖汁脱色效果的影响 由图8可知,随着溶液体积的增大,糖汁脱色率逐渐降低。这是因为仅改变溶液体积,空化数(C_v)保持不变,空化强度不会发生变化,但空化次数^[30](即流体的循环次数 $N = Qt/V$)会随

溶液体积的增大而减小。流体经受空化的次数越少,在水力空化过程中形成和坍塌的空化气泡数量越少,从而产生更少的羟自由基^[31],导致糖汁中能够被降解的色素分子减少。此外,在加入的氧化剂和催化剂用量一定的条件下,增大溶液体积,溶液中的色素分子总量增加,而系统产生的羟自由基总量并未增加,所以会出现随着溶液体积增加糖汁脱色率降低的现象。当溶液体积为120 mL时,糖汁色值最低,该条件下糖汁品质最好,但溶液体积过少在操作时不易控制,容易出现空吸现象。综合考虑,溶液体积选择150 mL较合适。

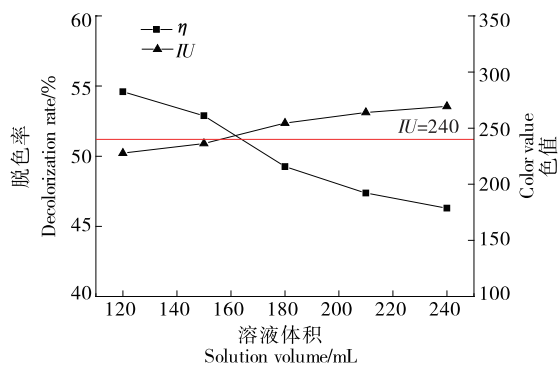


图8 溶液体积对糖汁脱色效果的影响

Figure 8 Effects of solution volume on the decolorization of sugar juice

2.3 正交试验

根据四因素三水平的正交试验设计方案开展正交试验,试验因素水平见表1,试验设计及结果见表2。

表1 正交试验因素水平表

Table 1 Factors and levels table of orthogonal experiments

水平	A 5% H ₂ O ₂ 溶液用量/mL	B 100 g/L V _C 溶液用量/mL	C 入口压力/MPa	D 空化时间/min
1	2	7.5	0.1	2
2	3	10.0	0.2	3
3	4	12.5	0.3	4

由表2可知,各因素对糖汁脱色率影响的主次关系为5% H₂O₂溶液用量>空化时间>100 g/L V_C溶液用量>入口压力,且H₂O₂溶液用量对糖汁脱色率影响最为明显。最优脱色方案为5% H₂O₂溶液用量为4 mL,100 g/L V_C溶液用量为10 mL,入口压力为0.1 MPa,空化时间为3 min,此时糖汁脱色率为55.78%。在此条件下进行3次验证实验,获得糖汁平均脱色率为55.05%,与预测值偏差为1.31%,糖汁色值为223.42,说明正交试验优化设计获得的最优糖汁脱色工艺条件是合理的。

表 2 正交试验设计及结果

试验号	A	B	C	D	脱色率/%
1	1	1	1	1	36.72
2	1	2	2	2	40.40
3	1	3	3	3	38.46
4	2	1	2	3	50.77
5	2	2	3	1	49.91
6	2	3	1	2	53.36
7	3	1	3	2	51.46
8	3	2	1	3	54.06
9	3	3	2	1	50.59
k_1	38.53	46.32	48.05	45.74	
k_2	51.35	48.12	47.25	48.41	
k_3	52.04	47.47	46.61	47.76	
R	13.51	1.81	1.44	2.67	

3 结论

探究了 H_2O_2 - V_C 氧化技术与空化技术相结合对原糖糖汁的脱色效果和规律。结果表明,相对常规搅拌,空化技术对 H_2O_2 - V_C 氧化体系作用于糖汁色素的降解具有更强的促进作用。当 5% H_2O_2 溶液用量为 3 mL, 100 g/L V_C 溶液用量为 10 mL, 空化时间为 3 min, 入口压力为 0.2 MPa, 溶液温度为 70 ℃, 空化元件喉径为 0.5 mm, 溶液体积为 150 mL 时, 糖汁的脱色效果最好, 脱色率可达 60.72%。当反应温度为 30~70 ℃ 时, 糖汁色值均满足国家二级白砂糖的色值要求, 且温度为 70 ℃ 时的糖汁色值最低(为 193.58)。后续可对水力空化及氧化技术在制糖工业的脱色工艺中的协同作用机制进行研究。

参考文献

[1] 雷承宝. 构建中国糖业和谐共赢新生态: “十四五”中国糖业发展研究[J]. 广西糖业, 2021(5): 38-44.
LEI C B. Building a harmonious and win-win new ecology in China's sugar industry: research on the development of China's sugar industry during the 14th five-year plan[J]. Guangxi Sugar Industry, 2021(5): 38-44.

[2] HAMACHI M, GUPTA B B, BEN AIM R. Ultrafiltration: a means for decolorization of cane sugar solution[J]. Separation and Purification Technology, 2003, 30(3): 229-239.

[3] 许文婷, 王周, 陈国强, 等. 澄清脱色技术在甘蔗制糖中的应用[J]. 食品与机械, 2022, 38(9): 234-238.
XU W T, WANG Z, CHEN G Q, et al. Research progress of the application of clarification and decolorization techniques in sugarcane sugar production[J]. Food & Machinery, 2022, 38(9): 234-238.

[4] 邓伟丽, 吴佳敏, 黄惠梅, 等. 低温等离子体对甘蔗汁杀菌效果及品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(8): 77-86.
DENG W L, WU J M, HUANG H M, et al. Effects of cold plasma on microbial decontamination and quality of sugarcane juice[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(8): 77-86.

[5] 姚延志, 胡乃仁, 刘汉木, 等. 甘蔗的磷酸亚硫酸法澄清工艺条件的优化[J]. 甘蔗糖业, 2015(1): 25-29.
YAO Y Z, HU N R, LIU H M, et al. The optimization of clarification technology for sugarcane phosphosulfitation process[J]. Sugarcane and Canesugar, 2015(1): 25-29.

[6] 杜楠, 胡东彬, 陆海勤, 等. 制糖过程中吸附剂脱色的研究及应用[J]. 中国调味品, 2021, 46(7): 196-200.
DU N, HU D B, LU H Q, et al. Research process and application of adsorbent decolorization in sugar production process[J]. China Condiment, 2021, 46(7): 196-200.

[7] 王宁, 黄承都, 庞溪, 等. 撞击流—水力空化制备壳聚糖/蒙脱土复合材料及其应用[J]. 食品与机械, 2023, 39(11): 110-115.
WANG N, HUANG C D, PANG X, et al. Preparation of chitosan/bentonite composites by impingement flow-hydraulic cavitation and its application[J]. Food & Machinery, 2023, 39(11): 110-115.

[8] 黄祥斌, 于淑娟, 高大维. 几种离子交换树脂用于糖浆脱色的比较研究[J]. 食品科学, 2001, 22(4): 11-13.
HUANG X B, YU S J, GAO D W. A comparative study of several ion exchange resins for decolorization of syrup[J]. Food Science, 2001, 22(4): 11-13.

[9] 黄永春, 高海芳, 吴修超, 等. 水力空化强化糖液亚硫酸法脱色的研究[J]. 食品与机械, 2014, 30(3): 5-7.
HUANG Y C, GAO H F, WU X C, et al. Study on enhancing decolorization of sugarcane juice with sulfitation acid method by hydrodynamic cavitation[J]. Food & Machinery, 2014, 30(3): 5-7.

[10] 孙焕焕, 杨锋, 罗佐帆, 等. 射流空化强化糖液亚硫酸法脱色的研究[J]. 广西糖业, 2016(1): 24-30.
SUN H H, YANG F, LUO Z F, et al. Study on the decolorization of the raw sugar syrup with sulfitation acid method enhanced by jet cavitation[J]. Guangxi Sugar Industry, 2016(1): 24-30.

[11] 毛善巧, 黄永春, 杨锋, 等. 过氧化氢- V_C 体系对甘蔗汁色值的影响[J]. 食品科技, 2018, 43(6): 73-76.
MAO S Q, HUANG Y C, YANG F, et al. Effect of hydrogen peroxide and V_C system on color value of sugarcane juice[J]. Food Science and Technology, 2018, 43(6): 73-76.

[12] 廖耀文, 黄承都, 黄永春. 过氧化氢—维生素 C 体系协同壳聚糖/蒙脱土复合物对甘蔗汁的脱色研究[J]. 甘蔗糖业, 2020, 49(4): 59-67.
LIAO Y W, HUANG C D, HUANG Y C. Decolorization of sugarcane juice by hydrogen peroxide-vitamin C system with chitosan/montmorillonite composite[J]. Sugarcane and

- Canesugar, 2020, 49(4): 59-67.
- [13] PANDA D, SAHARAN V K, MANICKAM S. Controlled hydrodynamic cavitation: a review of recent advances and perspectives for greener processing[J]. Processes, 2020, 8(2): 220.
- [14] YAN J C, AI S, YANG F, et al. Study on mechanism of chitosan degradation with hydrodynamic cavitation[J]. Ultrasonics - Sonochemistry, 2020, 64: 105046.
- [15] LI X, ZHANG G Z, LI J, et al. Degradation by V_C - H_2O_2 , characterization and antioxidant activity of polysaccharides from *Passiflora edulis* peel[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(12): e16074.
- [16] SARTORI J A D S, RIBEIRO K, TEIXEIRA A C S C, et al. Sugarcane juice clarification by hydrogen peroxide: predictions with artificial neural networks[J]. International Journal of Food Engineering, 2017, 13(2): 20160199.
- [17] 李塘, 郑长庚. 甘蔗制糖化学管理分析方法[M]. 广州: 中国轻工业总会甘蔗糖业质量监督检测中心, 1995: 51-53.
- LI Y, ZHENG C G. Chemical management analysis method for sugarcane sugar production[M]. Guangzhou: China Light Industry Association Sugarcane Sugar Industry Quality Supervision and Testing Center, 1995: 51-53.
- [18] 毛善巧. 水力空化对蔗汁典型成分含量变化及其清净性能的影响[D]. 柳州: 广西科技大学, 2017: 31-33.
- MAO S Q. The effect of hydrodynamic cavitation on the change of typical components in sugarcane juice and the clean performance[D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2017: 31-33.
- [19] ZHENG H X, ZHENG Y, ZHU J. Recent developments in hydrodynamic cavitation reactors: cavitation mechanism, reactor design, and applications[J]. Engineering, 2022, 19: 180-198.
- [20] 黄承都, 姜继平, 龙慧, 等. 超声强化过氧化氢—维生素C体系糖汁脱色的研究[J]. 中国调味品, 2020, 45(3): 15-18.
- HUANG C D, JIANG J P, LONG H, et al. Study on decoloration of sugar juice enhanced by ultrasonic cavitation in H_2O_2 - V_C system[J]. China Condiment, 2020, 45(3): 15-18.
- [21] 姜继平, 黄永春, 黄承都, 等. 响应面优化 H_2O_2 - V_C 体系对糖汁脱色工艺的研究[J]. 中国调味品, 2019, 44(10): 8-13.
- JIANG J P, HUANG Y C, HUANG C D, et al. Study on decolorization of sugar juice by optimization of H_2O_2 - V_C system with response surface method[J]. China Condiment, 2019, 44(10): 8-13.
- [22] 谭诗敏, 罗志刚, 程建华. H_2O_2 - V_C 降解对香水莲花多糖结构与活性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(24): 48-53.
- TAN S M, LUO Z G, CHENG J H. Effect of H_2O_2 - V_C degradation system on the structure and activity of polysaccharides from *Nymphaea hybrid*[J]. Food Science, 2021, 42(24): 48-53.
- [23] 杨光, 陈远娇, 杨波, 等. L -抗坏血酸处理新糯米的工艺研究及应用[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(3): 103-111.
- YANG G, CHEN Y J, YANG B, et al. Study on technological process and application of L -ascorbic acid in fresh glutinous rice treatment[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(3): 103-111.
- [24] ZOU M Y, NIE S P, YIN J Y, et al. Ascorbic acid induced degradation of polysaccharide from natural products: a review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 151: 483-491.
- [25] 李国清, 陈楷翰, 张伟军. H_2O_2 -抗坏血酸均相催化氧化法处理甲基橙[J]. 莆田学院学报, 2007, 14(2): 79-82.
- LI G Q, CHEN K H, ZHANG W J. Treatment of methyl orange by homogeneous catalysis oxidation using hydrogen peroxide and ascorbic acid[J]. Journal of Putian University, 2007, 14(2): 79-82.
- [26] 曹艳, 黄崇煌, 黄承都, 等. 微型空化器内引入气流强化壳聚糖降解的效果研究[J]. 中国调味品, 2021, 46(12): 20-26.
- CAO Y, HUANG C H, HUANG C D, et al. Study on enhancing chitosan degradation by introducing airflow into micro-cavitator[J]. China Condiment, 2021, 46(12): 20-26.
- [27] CAO Y, XIE D D, HUANG Y C, et al. Investigation of hydroxyl radical yield in an impact-jet hydraulic cavitator[J]. Processes, 2022, 10(11): 2194.
- [28] GOGATE P R, PANDIT A B. Engineering design methods for cavitation reactors II: hydrodynamic cavitation[J]. AIChE Journal, 2000, 46: 1641-1649.
- [29] AMIN L P, GOGATE P R, BURGESS A E, et al. Optimization of a hydrodynamic cavitation reactor using salicylic acid dosimetry[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 156: 165-169.
- [30] NIKOLI I, JOVANOVI J, KOTUREVI B, et al. Transesterification of sunflower oil in the presence of the cosolvent assisted by hydrodynamic cavitation[J]. Bio Energy Research, 2022, 15: 1568-1578.
- [31] 高海燕. 撞击流水力空化器及其强化效应的实验研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2014: 40-42.
- GAO H Y. Experimental study on impinging stream hydrodynamic cavitation reactor and its strengthening effect [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2014: 40-42.