

# 赤砂糖回溶糖浆硫酸镁—聚硅酸锌法脱色工艺及其机理研究

Technology and mechanism of decolorization for brown granulated sugar by magnesium sulfate-zinc polysilicate method

李慰霞<sup>1,2,3,4</sup> 李利军<sup>1,2,3,4</sup> 杨岚凤<sup>1,2,3,4</sup>  
 LI Wei-xia<sup>1,2,3,4</sup> LI Li-jun<sup>1,2,3,4</sup> YANG Lan-feng<sup>1,2,3,4</sup>  
 毛 祥<sup>1,2,3,4</sup> 程 昊<sup>1,2,3,4</sup>  
 MAO Xiang<sup>1,2,3,4</sup> CHENG Hao<sup>1,2,3,4</sup>

(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 [广西科技大学], 广西 柳州 545006; 3. 广西蔗糖产业协同创新中心, 广西 南宁 530004; 4. 广西高校糖资源加工重点实验室 [广西科技大学], 广西 柳州 545006)

(1. College 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, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi 545006, China; 3. Collaborative Innovation Center of Guangxi Sugar Industry, Nanning, Guangxi 530004, China; 4. Key Laboratory for Processing of Sugar Resources of Guangxi Higher Education Institutes, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi 545006, China)

**摘要:**以赤砂糖回溶糖浆为研究对象,研究了高 pH 条件下硫酸镁和两性含 2% 二氧化硅聚硅酸锌对回溶糖浆的脱色效果及机理。在单因素试验基础上,采用响应面分析法对脱色条件进行优化,获得最佳条件为:镁离子用量 500 mg/L、含 2% 二氧化硅的聚硅酸锌用量 1.57%、pH 值 11、温度 30 ℃。该条件下脱色率高达 92.36%。采用扫描电子显微镜(SEM)和电位分析仪对凝胶物和糖汁体系进行了表征,结果表明脱色机理为电中和吸附。

**关键词:**硫酸镁;聚硅酸锌;脱色;絮凝;作用机理

**Abstract:** The effect and mechanism of decolorization were studied with magnesium sulfate and amphoteric 2% polysilicate zinc on the brown granulated syrup under high pH conditions. The factors and levels of response surface analysis were determined on the basis of single factor tests. The decolorization process was optimized by response surface analysis to obtain the optimum process conditions: magnesium sulfate of 500 mg/L,

dosage of 2% silica polysilicic acid zinc of 1.57%, and pH 11. Under this condition, the decolorization rate reached 92.21%. The composites and sugar juice system were characterized by scanning electron microscopy (SEM) and potential analyzer. The results showed that the decolonization mechanism was electric neutralization and adsorption.

**Keywords:** magnesium sulfate; zinc poly-silicate; decolonization; flocculation; mechanism

赤砂糖是甘蔗制糖生产工艺中的末段结晶产物,其色值和杂质含量高,成棕红色或黄褐色。市场价值较低,因此赤砂糖需要进行回溶脱色,制造优质的白砂糖<sup>[1]</sup>。传统的脱色工艺有亚硫酸法、碳酸法和磷浮法等,其中亚硫酸法在中国糖厂中普遍使用,通过燃烧硫磺产生二氧化硫气体进行硫熏中和,利用率不高,且对环境造成污染。此外,糖汁的色值、浊度和不溶物含量偏高,且成品糖储存时容易吸潮、色泽变黄,影响糖品的质量。其次碳酸法也有少数糖厂采用,利用一碳饱充过程中二氧化碳与石灰乳溶液反应生成的大量碳酸钙进行脱色,脱色率优于亚硫酸法,但石灰的消耗量大(约为亚硫酸法的 8~10 倍),产生大量的碱性滤泥,也造成环境污染。因此,寻找新型无硫高效

**基金项目:**国家自然科学基金(编号:31560466)

**作者简介:**李慰霞,男,广西科技大学在读硕士研究生。

**通信作者:**李利军(1966—),男,广西科技大学教授,博士。

E-mail: lilijun0562@sina.com

**收稿日期:**2018-09-19

清净剂已经成为了制糖领域亟待解决的难题<sup>[2]</sup>。

目前,镁离子混凝已经广泛用于污水的脱色和吸附重金属离子等<sup>[3-5]</sup>。而镁离子混凝用于制糖领域少有报道。李利军等<sup>[6]</sup>采用两步法进行糖汁脱色,先用壳聚糖初步处理糖汁,再使用氢氧化镁固体吸附脱色,但壳聚糖价格较为昂贵,且氢氧化镁固体吸附效果差;马月飞等<sup>[7]</sup>用氢氧化镁浆体代替亚硫酸法中部分氢氧化钙进行糖汁脱色,发现氢氧化镁代替部分氢氧化钙能提高脱色效果;均未使用镁离子混凝生成氢氧化镁电中和和吸附色素分子的优点。制糖工业中采用聚丙烯酰胺絮凝,虽然性能优良,但丙烯酰胺属于神经性致毒剂<sup>[8]</sup>,存在食品安全隐患。聚硅酸锌是一种无机高分子絮凝剂<sup>[9-10]</sup>具有絮凝沉降快、澄清效果好、絮凝物结实、少量残留的锌离子不会对人体产生危害。

本试验拟以硫酸镁作为无机脱色剂,在高 pH 值的条件下混凝生成氢氧化镁,吸附糖汁中的色素等非糖物质,再采用自制的聚硅酸锌进行絮凝澄清,并初步探究其脱色效果及机理,旨在为无硫脱色制糖工业提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与仪器

七水合硫酸镁、七水合硫酸锌、九水合硅酸钠、聚乙烯醇硫酸酯钾、十六烷基三甲基溴化铵、盐酸、氢氧化钠:AR 级,西陇化工股份有限公司;

一级赤砂糖:柳州市柳冰食品厂;

聚硅酸锌:实验室自制;

扫描电子显微镜(SEM):HV04-55 型,德国卡尔蔡司有限公司;

紫外—可见分光光度计:UV-2102 型,上海精密仪器仪表有限公司;

ZETA 电位分析仪:Nano-ZS90 型,英国马尔文公司;

FA 系列分析电子天平:FA2104 型,常州市幸运电子设备有限公司;

阿贝折射仪:WJ-2S 型,上海平轩科学仪器有限公司;

实验室 pH 计:PHS-3C 型,上海霄盛仪器制造有限公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 主要试剂的配制

(1) 回溶糖浆:准确称量一定量赤砂糖溶于超纯水中,配制成 10 °Bx 的回溶糖浆。

(2) 含 2% 镁离子的硫酸镁溶液:准确称取一定质量的七水合硫酸镁溶于超纯水中,配制成含 2% 镁离子的硫酸镁溶液。

(3) 含 2% 二氧化硅聚硅酸锌溶液:借鉴刘淑云<sup>[11]</sup>的制备方法,修改如下:准确称取一定质量的九水合硅酸钠溶于超纯水中,加入到一定浓度的硫酸中,pH 调至 5.0,活化一段时间,当溶液由无色变为淡蓝色时,把溶液的

pH 调至 1.8,迅速加入一定量的饱和硫酸锌,搅拌 1 h,静置陈化 24 h 后,即可。

(4) 蔗糖体系、回溶糖浆体系混凝物的制备:向 10 °Bx 的 100 mL 的蔗糖溶液和 10 °Bx 的 100 mL 回溶糖浆中分别加入含 2% 镁离子的硫酸镁,再用石灰乳把 pH 值调至 11.0,反应 10 min 后,过滤、洗涤、烘干即得混凝物。

1.2.2 试验步骤 取 10 °Bx 的 100 mL 赤砂糖回溶糖浆于 250 mL 烧杯中,加入一定量的镁离子后调节 pH 值,在一定温度下混凝 5 min 后,再加入一定量含 2% 二氧化硅的聚硅酸锌,快速(300 r/min)搅拌 30 s,转为中速(200 r/min)搅拌 10 min,再转为慢速(30 r/min)搅拌 5 min,取出烧杯置于室温,待絮凝沉降稳定,即得脱色液。

#### 1.2.3 单因素试验

(1) 镁离子用量:固定温度 40 °C,pH 11,2% 聚硅酸锌用量 1.5%,考察镁离子用量(200,300,400,500,600 mg/L)对脱色率的影响。

(2) 聚硅酸锌用量:固定温度 40 °C,镁离子用量 400 mg/L,pH 11,考察 2% 聚硅酸锌用量(0.0%,0.5%,1.0%,1.5%,2.0%,2.5%)对脱色率的影响。

(3) pH 值:固定温度 40 °C,镁离子用量 400 mg/L,2% 聚硅酸锌用量 1.5%,考察 pH 值(8,9,10,11,12)对脱色率的影响。

(4) 温度:固定镁离子用量 400 mg/L,pH 11,2% 聚硅酸锌用量 1.5%,考察温度(30,40,50,60,70 °C)对脱色率的影响。

1.2.4 响应面分析 在单因素试验基础上,考虑到温度对脱色率影响的极差最小,且低温有利于节约能耗,故响应面分析法优化试验均在室温(30 °C)进行。因此,选取镁离子用量、pH、聚硅酸锌用量 3 个对脱色率(Y)影响显著的因素。

### 1.3 分析方法

1.3.1 色值、脱色率计算方法 按文献[12]进行测定和计算。按式(1)计算糖液色值。

$$IU_{560} = \frac{A_{560}}{b \times c} \times 1000, \quad (1)$$

式中:

$IU_{560}$ ——色值;

$b$ ——比色皿厚度,cm;

$A_{560}$ ——波长为 560 nm 下所测得的吸光度;

$c$ ——赤砂糖回溶糖浆的浓度,g/mL。

脱色率按式(2)计算:

$$D = \frac{IU_{前} - IU_{后}}{IU_{前}} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

$D$ ——脱色率,%;

$IU_{前}$ ——处理前赤砂糖回溶糖浆的色值;

$IU_{后}$ ——处理后赤砂糖回溶糖浆的色值。

1.3.2 形貌和结构表征 采用扫描电子显微镜(SEM)分析蔗糖体系、回溶糖浆体系的凝胶物和聚硅酸锌的形貌和结构;采用 Zeta 电位分析仪测定不同体系的 Zeta 电位。

1.3.3 聚硅酸锌离子类型的判断方法 参照文献[13]。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验

2.1.1 镁离子用量对脱色率的影响 由图 1 可知,当镁离子用量 200~400 mg/L 时,脱色率变化显著,当镁离子用量超过 400 mg/L,脱色率增加缓慢。这是由于氢氧化镁带正电荷<sup>[14]</sup>能中和回溶糖浆中带负电的色素分子及非糖组分,镁离子用量增大,混凝生成的氢氧化镁增多,吸附的色素分子更多,因此,脱色率显著提高;当镁离子用量超过 400 mg/L 时,色素分子几乎吸附殆尽,继续增加用量,脱色率增加缓慢。故镁离子用量选 400 mg/L。

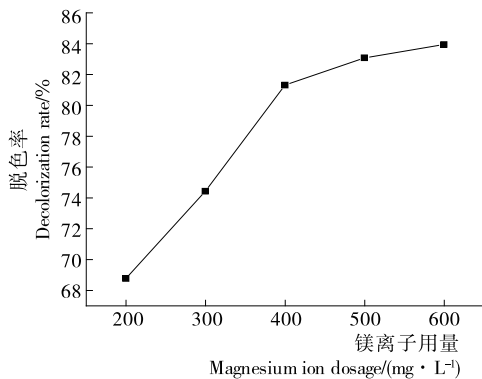


图 1 镁离子用量对赤砂糖回溶糖浆脱色率的影响

Figure 1 Effect of magnesium ion dosage on brown granulated syrup decolorization rate

2.1.2 聚硅酸锌用量对脱色率的影响 从图 2 可知,聚硅酸锌不仅有絮凝作用,还具有显著的脱色作用。聚硅酸锌用量为 0.5% 时,脱色率变化显著,继续增加用量,脱色率增加缓慢。这是由于聚硅酸锌无机高分子聚合物,可以通过络合、电中和、架桥、卷扫以及网捕等机制<sup>[15]</sup>絮凝沉降回溶糖浆中悬浮的无机质胶体(包括氢氧化镁胶粒)及高分子胶体,同时,未被氢氧化镁吸附的带电荷的色素也将被聚硅酸锌吸附<sup>[16]</sup>,因此,聚硅酸锌表现出絮凝和脱色的双重作用。这是由于聚硅酸锌是两性聚合物,既能吸附呈负电性的色素分子,又能絮凝沉降呈电性的胶粒,因此,聚硅酸锌既具有明显的脱色效果,又有显著的絮凝效果。经 SPSS 20 软件分析,聚硅酸锌用量 1.0% 与 1.5% 间存在显著性( $P < 0.05$ )差异,聚硅酸锌用量 1.5% 与 2.0% 间没有显著性差异( $P < 0.05$ )。因此,聚硅酸锌用量选为 1.5%。

2.1.3 pH 值对脱色率的影响 从图 3 可知,pH 值为 11

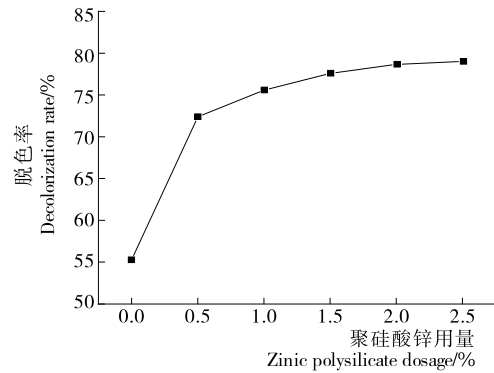


图 2 聚硅酸锌用量对赤砂糖回溶糖浆脱色率的影响

Figure 2 Effect of the amount of polysilicate zinc on brown granulated syrup the decolorization rate

时,脱色效果最佳。这是由于镁离子在 pH 值  $< 9.5$  时不会生成氢氧化镁<sup>[17]</sup>,只有石灰乳起到脱色效果<sup>[18]</sup>;当 pH 值达到 11 时,镁离子完全沉淀<sup>[18]</sup>。pH 值超过 11,脱色率下降,这是由于聚硅酸锌絮凝的最佳 pH 值为 8~11<sup>[19]</sup>,pH 值超过 11 时,碱性太强导致部分锌离子游离出来,使聚硅酸锌絮凝、脱色效果下降<sup>[20]</sup>。故混凝 pH 值选为 11。

2.1.4 温度对脱色率的影响 从图 4 可知,温度较低时

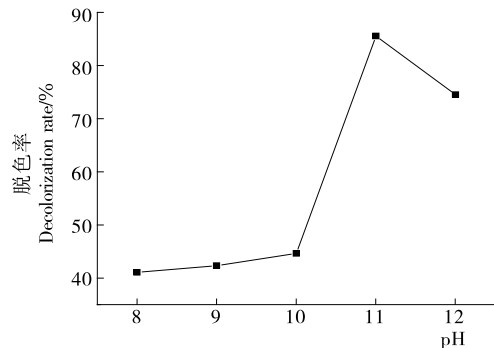


图 3 pH 值对赤砂糖回溶糖浆脱色率的影响

Figure 3 Effect of pH on brown granulated syrup decolorization rate

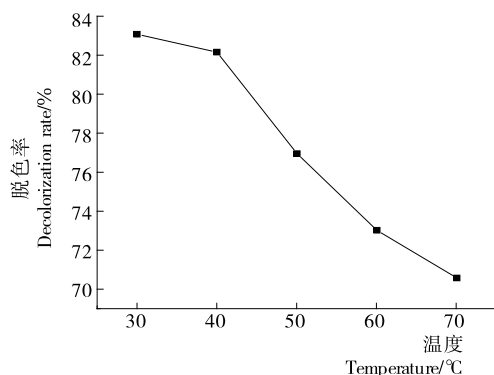


图 4 温度对赤砂糖回溶糖浆脱色率的影响

Figure 4 Effect of temperature on brown granulated syrup decolorization rate

的脱色效果比温度较高时好,这是由于氢氧化镁混凝吸附色素分子属于放热吸附<sup>[21]</sup>,升高温度不利于色素分子的吸附,因此,脱色率随温度的升高而下降。从能耗角度考虑,本试验选在 30 ℃下混凝。

2.2 响应面分析法优化赤砂糖回溶糖浆的脱色工艺

根据响应面试验设计原理<sup>[22]</sup>,采用三因素三水平进行试验,分析因素与编码见表 1。

表 1 Box-Behnken 试验设计因素与水平表  
Table 1 Factors and levels of Box-Behnken test

水平	A 硫酸镁用量/ (mg · L <sup>-1</sup> )	B pH	C 硅聚硅酸锌 用量/%
-1	350	10.75	1.25
0	400	11.00	1.50
1	450	11.25	1.75

2.2.1 方差分析 用 Design Expert 8.06 软件对表 2 中数据进行多元回归拟合,得到脱色率与三因子间多项回归方程:

$$Y = 91.34 + 1.25A + 2.08B - 0.075C - 1.16AB + 0.31AC + 0.77BC - 0.070A^2 - 5.63B^2 - 0.19C^2。 (3)$$

由表 3 可知,脱色率回归模型 P<sub>值</sub><0.000 1,表明模型高度显著。模型的失拟项 P 值>>0.05,说明模型失拟项差异不显著,试验无失拟因素存在,模型可以较好地预测实际情况。同时模型校正系数分别为 R<sup>2</sup> Adj=0.999 9,说明试验结果有 99.99% 受到所选因素的影响;CV%=

表 2 Box-Behnken 试验设计及结果

Table 2 Box-Behnken test design and results

试验号	A	B	C	脱色率/%
1	1	-1	0	85.98
2	1	0	1	92.45
3	0	0	0	91.32
4	0	0	0	91.30
5	-1	0	1	89.45
6	0	1	1	88.30
7	-1	-1	0	81.07
8	0	0	0	91.35
9	0	0	0	91.36
10	1	1	0	87.90
11	0	1	-1	86.89
12	-1	0	-1	90.34
13	0	-1	1	82.63
14	-1	1	0	87.62
15	0	-1	-1	84.29
16	0	0	0	91.36
17	1	0	-1	92.09

0.037% << 10%,表明试验的可信度和精确度高。此外,通过回归模型的各项 F 检验可以看出,A、B、C 3 因素对脱色率有显著影响。通过比较 F 值可知,各因素对脱色率影响主次顺序为:B>A>C,说明 pH 值对脱色效果起关键作用。

表 3 脱色率的二次回归方程方差分析表<sup>†</sup>

Table 3 Quadratic regression equation variance analysis table of decolorization rate

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	P 值	显著性
模型	190.05	9	21.12	20 029.05	<0.000 1	* *
A	12.50	1	12.50	11 856.37	<0.000 1	* *
B	34.53	1	34.53	32 750.18	<0.000 1	* *
C	0.045	1	0.045	42.68	0.000 3	*
AB	5.36	1	5.36	5 083.28	<0.000 1	* *
AC	0.39	1	0.39	370.51	<0.000 1	* *
BC	2.36	1	2.36	2 234.90	<0.000 1	* *
A <sup>2</sup>	0.021	1	0.021	19.71	0.003 0	*
B <sup>2</sup>	133.24	1	133.24	1.26 × 10 <sup>-3</sup>	<0.000 1	* *
C <sup>2</sup>	0.14	1	0.14	137.05	<0.000 1	* *
残差	7.38 × 10 <sup>-3</sup>	7	1.05 × 10 <sup>-3</sup>			
失拟项	4.50 × 10 <sup>-3</sup>	3	1.50 × 10 <sup>-3</sup>	2.08	0.245 1	不显著
纯误差	2.88 × 10 <sup>-3</sup>	4	7.20 × 10 <sup>-3</sup>			
总误差	190.05	16				

† \* \* P<0.01,差异极显著; \* P<0.05,差异显著。

2.2.2 响应曲面分析 采用 Design-Expert 8.06 软件对表 2、3 中的数据作响应面和等高线图,能够直观地观察到各因素两两交互作用对脱色率的影响。响应面坡度越陡,则表明交互作用越显著,反之则表示交互作用不显著<sup>[23]</sup>。影响脱色率各因子间的交互作用,结果见图 5。

由图 5 可知,当固定聚硅酸锌用量,脱色率随 pH 值的增加,脱色率先增加后减少,随镁离子用量增加,脱色率增加;当固定镁离子用量,脱色率随 pH 值的增加,脱色率先增加后减少,随聚硅酸锌用量增加,脱色率增加;当固定 pH 值,聚硅酸锌用量与镁离子用量几乎不存在交互

作用;因此 pH 值与镁离子用量、pH 与聚硅酸锌存在交互作用,聚硅酸锌用量与镁离子用量几乎不存在交互作用,且未出现响应值最高点。考虑到脱色成本,所选取的响应面中心点中的镁离子用量、聚硅酸锌用量不是脱色效果最佳的点,因此响应面图中并未出现响应值最高点,只能看出各因子间的交互作用。

2.2.3 赤砂糖回溶糖浆脱色工艺条件的优化组合及其验证 利用 Design-Exper 8.0.6 软件计算出赤砂糖回溶糖浆的最佳脱色工艺条件为:A=449.16 mg/L,B=11.01,C=1.57%,在此条件下理论脱色率可达到 92.57%。考虑到实际操作,最佳工艺条件修正为:A=500 mg/L,B=

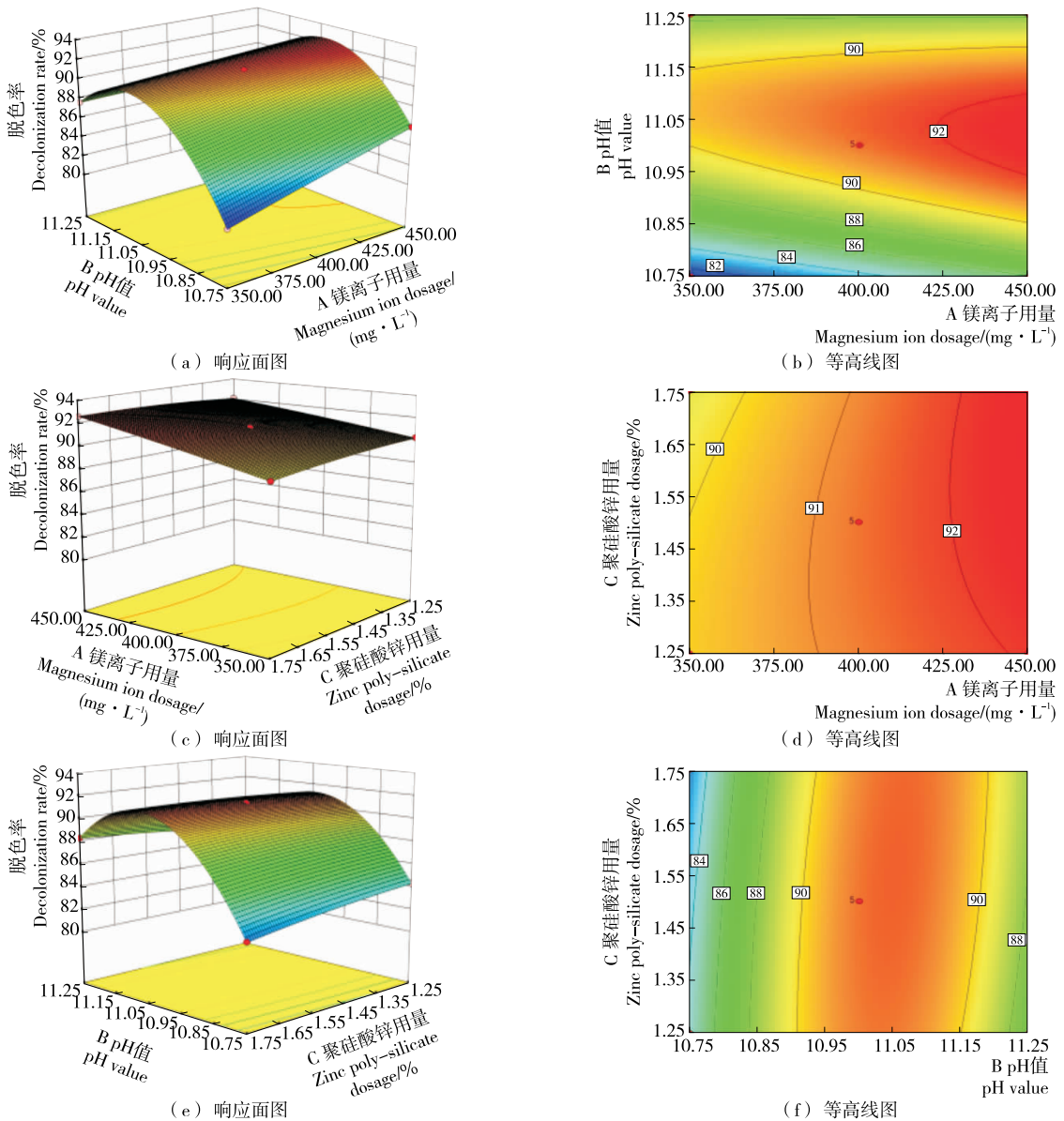


图 5 各因素交互作用对赤砂糖回溶糖浆脱色率影响的响应面图

Figure 5 Response surface diagram of the interaction of various factors on the brown granulated syrup decolorization rate

11, C=1.57%, 在该条件下进行 3 次验证实验, 实际平均脱色率高达 92.36%, 误差在允许范围内。因此, RSM 法优化脱色工艺条件准确可靠, 具有实用价值。而传统的磷酸亚硫酸法在磷酸用量 400 mg/kg, 预灰 pH 6.8, 硫熏强度 18 mL, 中和 pH 7.2 的条件下, 脱色率为 57.2%<sup>[24]</sup>; 碳酸法在温度 60 °C, pH 9, 通入二氧化碳 5 min 且维持 pH 9, 再次通入二氧化碳并将 pH 值降至 8 维持 5 min, 此条件下脱色率为 44%<sup>[25]</sup>。因此, 传统脱色工艺一次处理的脱色率较低。

2.3 机理探讨

2.3.1 Zeta 电位分析 由表 4 可知, 镁离子在蔗糖体系混凝后的 Zeta 电位为 29.86 mV, 高于镁离子在回溶糖浆体系混凝后的 (-4.08 mV), 这是由于带正电荷的混凝物<sup>[26]</sup>吸附了回溶糖浆中带负电的色素及其他带负电荷的非糖组分。镁离子混凝处理后, 再加入聚硅酸锌, Zeta 电位接近于 0, 表明聚硅酸锌既有絮凝回溶糖浆中固体颗粒的作用<sup>[27]</sup>, 又能够吸附带负电荷的色素分子及非糖组分, 故聚硅酸锌具有双重作用。综上所述, 硫酸镁—聚硅酸锌法对回溶糖浆的脱色机理为电中和吸附。

2.3.2 SEM 图像分析 图 6(a)是在蔗糖体系混凝物的 SEM 图, 呈六角型片状叠加, 表面疏松。图 6(b)是回溶糖浆体系混凝物的 SEM 图, 仍呈现片状叠加, 但表面密实。这是由于回溶糖浆体系的混凝物中和了回溶糖浆中

带负电荷的色素分子及非糖成分, 从而导致氢氧化镁颗粒表面的正电荷减少静电力减少, 使胶粒间发生聚集, 最终导致大而密实的絮凝体产生。图 6(c)是合成的聚硅酸锌 SEM 图, 可以看到球型的絮体中心, 容易粘附胶粒形成网状的絮凝物结构。因此从 SEM 图中也可以得出氢氧化镁混凝对回溶糖浆的脱色机理主要为电中和吸附。

2.3.3 聚硅酸锌离子类型 向两支装有聚硅酸锌的试管中分别加入聚乙烯醇硫酸酯钾、十六烷基三甲基溴化铵, 立即出现沉淀, 即所制备的含 2% 二氧化硅的聚硅酸锌为两性, 因此既可以絮凝带正荷的氢氧化镁, 又可以絮凝带负电荷的色素及非糖组分。

3 结论

本研究提出了硫酸镁—聚硅酸锌法用于回溶糖浆脱色的新工艺, 带正电荷的氢氧化镁能高效地吸附回溶糖浆中的带负电色素等非糖组分, 聚硅酸锌具有良好的絮凝沉降作用。与传统的亚硫酸法、碳酸法脱色工艺相比具有较高的脱色率, 且未使用有害物质。但该工艺与工厂常用的亚硫酸法相比沉降体积偏大, 且本试验只考虑了制糖工业中的脱色工艺, 未考虑该工艺对结晶等其他参数对白砂糖品质的影响。下一步应着重考察该工艺的沉降体积、除油率、蔗糖得率, 以及镁离子对造蜜系数的影响。

参考文献

[1] 李利军, 李青松, 孔红星, 等. 赤砂糖回溶糖浆两步法澄清脱色工艺的研究[J]. 食品科技, 2013, 38(2): 65-69.

[2] SARIR E M, PABON B R. High performance decolorants and color precipitants for VHP sugar production[J]. International Sugar Journal, 2017, 119(1 421): 368-372.

[3] 王元刚, 刘诗雨, 赵建海, 等. 氢氧化镁混凝过程应用于活性黄 X-R 废水脱色研究[J]. 环境工程, 2015, 33(7): 61-65.

[4] ZHANG Meng, SONG Wei-qiang, CHEN Qiu-ling, et al. One-pot synthesis of magnetic Ni@Mg(OH)<sub>2</sub> core-shell nanocomposites as a recyclable removal agent for heavy metals[J]. Acs Appl Mater Interfaces, 2015, 7(3): 1 533-1 540.

[5] LI Chao-ran, ZHUANG Zan-yong, HUANG Feng, et al. Recycling rare earth elements from industrial wastewater with flowerlike nano-Mg(OH)<sub>2</sub>[J]. Acs Appl Mater Interfaces, 2013, 5(19): 9 719-9 725.

[6] 李利军, 李青松, 孔红星, 等. 赤砂糖回溶糖浆两步法澄清脱色工艺的研究[J]. 食品科技, 2013, 38(2): 65-69.

[7] 马月飞, 黄悦刚. 氢氧化镁应用于亚法糖汁澄清过程的初步研究[J]. 广西轻工业, 2005(1): 17-19.

[8] LUO Yu-qing, LI Chao, ABBASI A M, et al. Screening of bioflocculant-producing bacteria and its application in clarification process of sugarcane juice [J]. International Sugar Journal, 2016, 118(1 405): 34-40.

[9] 袁天佑, 刘和清, 谭承德, 等. 聚硅酸盐絮凝剂对甘蔗混合

表 4 不同体系中的 Zeta 电位

Table 4 Zeta potential in different systems

体系	试剂种类及用量	pH 值	Zeta 电位/mV
蔗糖体系	镁离子用量 500 mg/L	11	29.86
	无	11	-10.42
回溶糖浆体系	镁离子用量 500 mg/L	11	-4.08
	镁离子用量 500 mg/L, 聚硅酸锌用量 1.57%	11	-0.18

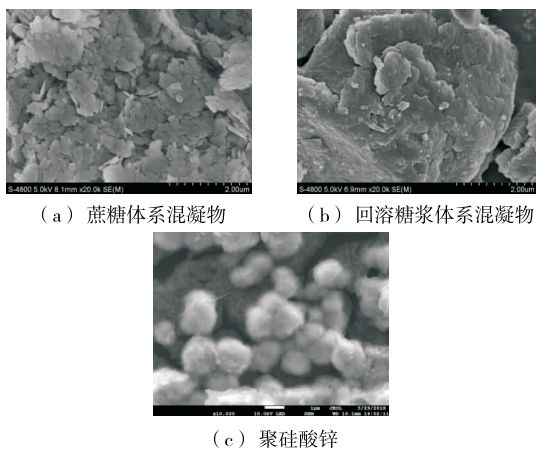


图 6 不同体系混凝物 SEM 图

Figure 6 SEM image of different system concrete

- 汁脱色效率的研究[J]. 甘蔗糖业, 2000(1): 33-37.
- [10] 刘和清. PSAZ-亚硫酸法澄清新工艺试验[J]. 广西蔗糖, 1996(3): 51-54.
- [11] 刘淑云. 聚硅酸硫酸铜锌絮凝剂的制备及其在造纸废水中的应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006: 31-32.
- [12] 李璜, 郑长庚. 甘蔗制糖化学管理分析方法[M]. 北京: 轻工业出版社, 1995: 59-76.
- [13] 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 等. 聚合铝基复合絮凝剂的电荷特性及絮凝作用[J]. 环境科学, 2003(1): 103-106.
- [14] YE Lan-lan, LI Feng, WU Tao, et al. Rapid and effective removal of sodium lignosulfonate from aqueous solutions by in-situ formed magnesium hydroxide[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2016, 33(12): 1-9.
- [15] LEE K E, MORAD N, TENG T T, et al. Development, characterization and the application of hybrid materials in coagulation/flocculation of wastewater: A review [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 203(5): 370-386.
- [16] 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 等. 聚合铝基复合絮凝剂的电荷特性及絮凝作用[J]. 环境科学, 2003(1): 103-106.
- [17] SASKA M, ZOSSI B S, 刘慧霞, 等. 石灰法、亚硫酸法和碳酸法清净对蔗汁脱色(下)[J]. 甘蔗糖业, 2013(4): 31-35.
- [18] LEE K E, MORAD N, TENG T T, et al. Development, characterization and the application of hybrid materials in coagulation/flocculation of wastewater: A review [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 203(5): 370-386.
- [19] 王雪枫, 黄雪莉, 李培. 聚硅酸锌絮凝剂的制备工艺及絮凝性能研究[J]. 水处理技术, 2013, 39(1): 33-36.
- [20] WU Can, LIU Wei-zhen, ZHANG Jing, et al. Mechanisms of synergistic removal of low concentration As(V) by nZVI@Mg(OH)<sub>2</sub> nanocomposite[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2017, DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b06356.
- [21] WANG Zhi-ping, LI Chun-hui, MU Yan, et al. Nanoadduct relieves: Alleviation of developmental toxicity of Cr(VI) due to its spontaneous adsorption to Mg(OH)<sub>2</sub> nanoflakes[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 287: 296-305.
- [22] GRADY Hanrahan, KENNETH Lu. Application of factorial and response surface methodology in modern experimental design and optimization[J]. Critical Reviews in Analytical Chemistry, 2006, 36(3/4): 141-151.
- [23] SALEEM M M, SOMÁ A. Design of experiments based factorial design and response surface methodology for MEMS optimization[J]. Microsystem Technologies, 2015, 21(1): 263-276.
- [24] 何惠欢, 梁贤慧, 陆登俊. 亚硫酸法甘蔗糖厂澄清工艺条件对蔗汁除酚和脱色效果的影响[J]. 食品工业, 2015, 36(5): 112-115.
- [25] SASKA M, ZOSSI B S, 刘慧霞, 等. 石灰法、亚硫酸法和碳酸法清净对蔗汁脱色(上)[J]. 甘蔗糖业, 2013(2): 33-36.
- [26] LI Hai-yan, LIU Shi-yu, ZHAO Jian-hai, et al. Removal of reactive dyes from wastewater assisted with kaolin clay by magnesium hydroxide coagulation process[J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2016, 494: 222-227.
- [27] 许小洁, 吴纯德, 叶健, 等. 基于 Zeta 电位的硅藻土复配剂强化混凝研究[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(10): 151-153.
- (上接第 20 页)
- [16] 李汴生, 曾庆孝, 芮汉明, 等. 高压对食品胶溶液流变特性的影响[J]. 高压物理学报, 2001(1): 64-69.
- [17] WINTER H H, CHAMBON F. Analysis of linear viscoelasticity of a crosslinking polymer at the gel point[J]. Journal of Rheology, 1986, 30(2): 367-382.
- [18] OH H E, PINDER D N, HEMAR Y, et al. Effect of high-pressure treatment on various starch-in-water suspensions[J]. Food Hydrocolloids, 2008, 22(1): 150-155.
- [19] SUPAVITITPATANA P, WIRJANTORO T I, APICHTARTSRANGKON A, et al. Addition of gelatin enhanced gelation of corn-milk yogurt[J]. Food Chemistry, 2008, 106(1): 211-216.
- [20] 熊丹丹, 易敏之, 熊恩智, 等. 明胶的凝胶化及凝胶强度的影响因素研究[J]. 江西中医药大学学报, 2015(2): 94-96.
- [21] FISZMAN S M, LLUCH M A, SALVADOR A. Effect of addition of gelatin on microstructure of acidic milk gels and yoghurt and on their rheological properties[J]. International Dairy Journal, 1999, 9(12): 895-901.
- [22] KUMAR P, MISHRA H N. Mango soy fortified set yoghurt: Effect of stabilizer addition on physicochemical, sensory and textural properties[J]. Food Chemistry, 2004, 87(4): 501-507.
- [23] CHEN Xing, CHEN Cong-gui, ZHOU Yan-zi, et al. Effects of high pressure processing on the thermal gelling properties of chicken breast myosin containing  $\kappa$ -carrageenan[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 40: 262-272.
- [24] 王锐. 膳食纤维和超高压对重组鸭肉凝胶品质特性的影响[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- [25] 曾令鹤, 钱方, 姜淑娟, 等. 酸乳体系中乳酸菌胞外多糖与蛋白相互作用研究进展[J]. 食品与机械, 2013, 29(2): 246-249.
- [26] 陈梓铠. 超高压对多糖凝胶的性能影响及应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014: 45-48.
- [27] 陆海霞, 张蕾, 李学鹏, 等. 超高压对秘鲁鲑鱼肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 中国水产科学, 2010, 17(5): 1107-1114.
- [28] WANG L L, XIONG You-ling. Inhibition of lipid oxidation in cooked beef patties by hydrolyzed potato protein is related to its reducing and radical scavenging ability [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(23): 9186-9192.
- [29] YANG Jian, DUNKER A K, POWERS J R, et al.  $\beta$ -Lactoglobulin molten globule induced by high pressure [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(7): 2363-2368.
- [30] LUCEY J A. Formation and Physical Properties of Milk Protein Gels[J]. Journal of Dairy Science, 2002, 85(2): 281-294.