

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.03.010

基于正交试验的冰淇淋生产工艺优化

王彬, 石秀东, 封蔚建, 汪晨

(江南大学机械工程学院, 无锡 214122)

摘要:为了提高单缸立式软冰淇淋机生产的冰淇淋的膨化率,课题组对其浮动刮刀片的刮削机理进行了理论研究及力学分析,并对螺旋搅拌结构原理进行了探究,确定了搅拌器工作时的最小转速。通过试验得出在冷冻过程中影响冰淇淋质量的主要因素为缸筒内冰淇淋浆液的加入量、粉料与水的配比以及设定的电流极值,并进行了正交试验。实验结果表明:冰淇淋机搅拌器的最小转速为155.6 r/min;当加入的浆液量0.9 L,粉料与水的配比(质量比)为1:3.0,电流极值设定4.5 A时可得最高的膨化率82.0%;缸筒内浆液量的多少是影响膨化率的最关键因素,浆液宜采用齿轮泵间歇式引入冷冻缸内的方式来提高膨化率。

关键词:冰淇淋机;搅拌器;膨化率;浮动刮刀片;正交试验

中图分类号:TS205.7 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2019)03-0050-05

Optimization of Ice Cream Production Process Based on Orthogonal Experiment

WANG Bin, SHI Xiudong, FENG Weijian, WANG Chen

(School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: In order to improve the expansion rate of ice cream produced by a single-cylinder vertical soft ice cream machine, the theoretical research and mechanical analysis of the scraping mechanism of the floating scraper were carried out. The principle of the spiral agitating structure was investigated, and the minimum rotational speed of the agitator was determined. Through experiments, the main factors affecting the quality of ice cream in the freezing process were the amount of ice cream slurry in the cylinder, the ratio of powder to water and the set current limit, and the orthogonal test was carried out. The experiment result shows that the minimum speed of the ice cream mixer is 155.6 r/min. When the amount of slurry added is 0.9 L, the ratio of powder to water is 1:3.0 (mass ratio), and the current value is set at 4.5 A, the highest puffing was obtained. The rate is 82.0%. The amount of slurry in the cylinder is the most important factor affecting the expansion rate. The slurry should be introduced into the freezing cylinder intermittently by gear pump to increase the expansion rate.

Keywords: ice cream machine; blender; expansion rate; floating scraper; orthogonal test

全球冰淇淋销售额在2014年首次达到500亿美元,其中中国市场贡献了将近1/4的份额,达到114亿美元,今后,中国仍将是世界上最大的冰淇淋市场^[1]。由于中国的冷饮设备发展起步较晚,技术相对落后,目前国内冰淇淋机的中高端市场被欧美一些发达国家占

据^[2-3]。

搅拌器是冰淇淋机最重要的构件之一,目前学者对冰淇淋机结构及系统的研究已经取得了一定的成果^[4-6]。曹玉华等^[7]对冰淇淋搅拌器进行了设计,但是对搅拌器搅拌的稳定性并未做深入研究。杨堃

收稿日期:2018-11-29;修回日期:2019-02-16

基金项目:江苏省食品先进制造装备技术重点实验室项目(FMZ201801)。

第一作者简介:王彬(1989),男,山东枣庄人,硕士研究生,主要研究方向为食品加工装备、机械装备动态设计技术。通信作者:石秀东(1965),男,安徽全椒人,博士,副教授,主要研究方向为食品加工装备、机械装备动态设计技术。E-mail:shixd5718@163.com

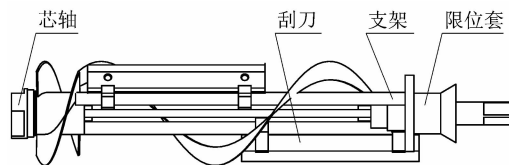
等^[8]列出了冰淇淋机运行过程中的一些常见故障以及排除方法,并未对具体生产工艺进行优化分析。国内生产的冰淇淋机在生产冰淇淋时存在机器运行不稳定,产品膨化率(30%~40%)低,口感不佳等问题。

针对以上问题,课题组首先对冰淇淋机的核心构件搅拌器进行了理论分析并对其最小转速进行计算,使其能够满足生产要求。通过试验找出在冷冻搅拌环节(从浆液进入到冷冻缸内到冰淇淋成型)影响冰淇淋质量的主要因素,进行正交试验。并对重要工艺参数进行优化,寻找出最佳工艺参数组合及影响膨化率的最主要因素。课题组的研究为后续研究提供了新的理论依据和途径。

1 搅拌器的结构和工作原理

1.1 搅拌器的结构

搅拌器是冰淇淋机的核心构件,主要由浮动刮刀片、支架、限位套和定位芯轴组成。搅拌器结构如图1所示,刮刀和螺旋搅拌结构附着在2根对称圆杆支架上,随支架转动,2根圆杆支架在沿着中心轴转动时可以起到充分搅拌作用,钢制双杆支撑芯轴,抗弯强度高,减小搅拌器在旋转时的动不平衡,以及对缸筒内壁的损坏。



1—芯轴;2—刮刀;3—支架;4—限位套。

图1 搅拌器的结构

Figure 1 Structure diagram of blender

1.2 工作原理

1.2.1 刮刀的工作原理

当冰淇淋机正常运行时,液体浆液进入到容积1.8 L冷冻缸内,浆液不断地与缸壁进行热交换,由原来的液态变成固液气共存的状态,同时电机带动搅拌器转动,离心浮动刮刀通过销轴安装在搅拌轴上,随螺旋搅拌结构一起旋转,在离心惯性力的作用下,刮刀绕销轴逆向旋转,使刮刀刀刃紧贴缸体内壁,刮下紧贴缸筒内壁的冰淇淋。浮动刮刀不断旋转,将黏附在缸壁上已经成型的冰淇淋不断地刮下来。螺旋搅拌结构不断旋转搅打,使刮下的冰淇淋不断地向前传输。固定的芯轴与出料装置通过凹槽固定,防止搅拌器有过大的径向跳动,减小搅拌器转动时的动不平衡,避免损坏缸体,塑料限位套防止搅拌器有过大的轴向窜动。

刮刀刮削时,直线刀刃紧贴缸体内壁。可将刀刃顶点的运动速度分解到垂直刮刀和平行刮刀方向,垂直刮刀方向的运动对冰淇淋产生刮削的作用,平行刮刀方向的运动使对淇淋产生切向作用。因此,刮刀工作时,将对内壁上的冰淇淋既产生刮削作用,又产生切削作用,冻结在缸筒内壁上的冰淇淋正是在这种刮、切混合作用下,被刮离内壁表面^[9]。刮刀与缸体如图2所示。

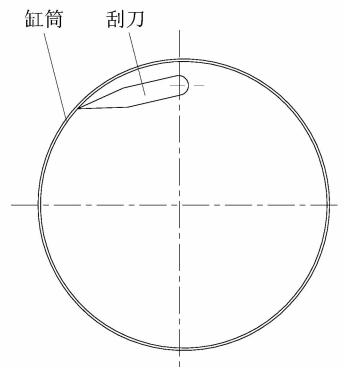


图2 刮刀及缸体

Figure 2 Scraper and cylinder

1.2.2 螺旋搅拌结构工作原理

冰淇淋机正常工作时,主电机通过联轴器带动搅拌器以及其上附着的螺旋搅拌结构转动。对螺旋叶片上冰淇淋进行受力分析,冰淇淋从缸体内壁被刮下时受到螺旋结构法向推力,并在二者接触面产生摩擦力。法向推力可分解为轴向力和圆周方向力,圆周方向力及螺旋面对物料的摩擦力使冰淇淋具有绕轴转动的趋势,但由于缸体内壁对冰淇淋产生摩擦,使冰淇淋在螺旋叶片轴向力作用下,沿着缸体轴向移动到出料口^[10-11]。

1.3 搅拌器最小转速的确定

刮刀片质心 O 的位置如图3所示,刮刀在刮削的时候刀面会受到冰淇淋的阻力,这个力会使刮刀紧紧贴在缸壁上,因为要计算临界转速,所以在计算时忽略此力。

$$FL_2 \geq mgL_1 + F_N L_4 - F_s L_3; \quad (1)$$

$$m\omega^2 RL_2 \geq mgL_1 + F_N L_4 - F_s L_3。 \quad (2)$$

式中: F 为刮刀所受离心力, N ; m 为刮刀的质量, kg ; F_N 为刀刃所受缸筒内壁的法向支持力, N ; F_s 为刀刃所受缸筒内壁的摩擦力, N ; g 为重力加速度, m/s^2 ; ω 为搅拌器旋转角速度, rad/min ; L_1 为刮刀重心到刮刀旋转中心的距离, m ; L_2 为刮刀所受离心力到刮刀旋转中心的距离, m ; L_3 为刮刀所受摩擦力到刮刀旋转中心

的距离, m ; L_4 为刮刀所受法向支持力到刮刀旋转中心的距离, m ; R 为刮刀重心到搅拌器旋转中心的距离, m 。

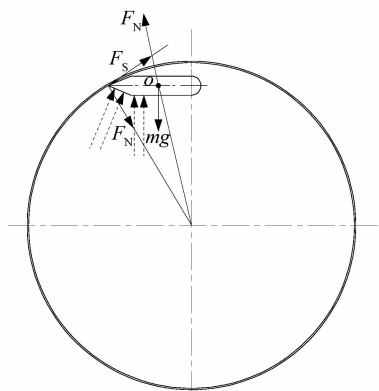


图3 刮刀受力分析

Figure 3 Force analysis of scraper

当取临界转速时,考虑到搅拌器搅拌之初冷冻缸内浆液处于液体状态且液体一般不足缸内体积一半且在搅拌过程中液体会受到重力作用,刮刀刀面的垂直作用力较小,取 F_N 与 F_s 均为 0,因此,

$$4\pi^2 n^2 RL_2 \geq gL_1, \quad (3)$$

$$n \geq \sqrt{\frac{gL_1}{4\pi^2 RL_2}}. \quad (4)$$

式中: n 为搅拌器转速, r/min 。

得 $n \geq 155.6 \text{ r/min}$ 。因此,搅拌器的临界转速为 155.6 r/min 。加入 0.75 L 浆液,取其转速为 180 r/min ,所得工作电流如图 4 所示,电流波动相对较小,满足生产要求。

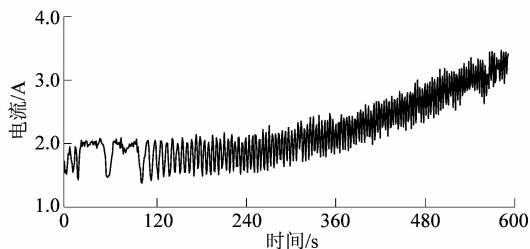


图4 搅拌器工作时的搅拌电流

Figure 4 Stirring current in operation of agitator

1.4 生产冰淇淋过程中的重要控制参数

膨化率是评价冰淇淋质量的最重要指标之一,在冰淇淋生产过程中,对最终冰淇淋膨化率产生影响的因素有粉料与水的配比、冷冻缸内的浆液加入量、设定的电流极值以及搅拌器的转速,其中搅拌器的转速与其余各因素及工艺之间关联性较大,课题组对搅拌器

转速不作进一步研究,取固定转速。试验主要针对粉料与水的配比、冷冻缸内的浆液加入量和设定的电流极值进行研究,以寻找最佳组合^[12-14]。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料与仪器

冰淇淋粉(牛奶味):每包 $1\,000 \text{ g}$,漳州市公爵食品有限公司,存放于阴凉、干燥处;

冰淇淋机:结构优化后的立式单缸 BZX-R1120 型冰淇淋机;

量筒: 500 mL ,江苏华鸥玻璃有限公司;

纸杯: 230 mL ,北京天平伟业科贸有限公司;

温度计:测量范围 $-30 \sim 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$,分度值 $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$,深圳利物浦工业生产公司;

小型电子秤:SF-400 型,永康市富克斯工贸有限公司。

2.2 计算方法

试验中冰淇淋的膨化率和硬度是评价冰淇淋好坏的重要指标。膨化率在一定的范围内越高越好,试验中电流极值(冰淇淋硬度值)尽可能设置高一些,但是电流值设置过高容易产生冻缸,不利于稳定生产。在用纸杯接到冰淇淋后,用玻璃棒轻轻搅动尽可能让冰淇淋充满纸杯,然后用直尺沿着纸杯口刮去多余冰淇淋,使冰淇淋和杯口齐平。

试验中膨化率

$$s = \frac{v_1 - v_2}{v_2} \times 100\%. \quad (5)$$

式中: s 为冰淇淋的膨化率,%; v_1 为纸杯的容积, mL ; v_2 为与一纸杯冰淇淋相同质量的浆液的体积, mL 。

试验均重复 3 次取平均值。

2.3 单因素及正交试验

根据前期预试验,结合机器本身特点,在保证机器能够稳定运行的前提下,选用浆液的加入量、粉料与水的配比和设定的电流(硬度)极值为影响冰淇淋膨化率的主要因素,其中浆液的加入量 $0.8 \sim 1.1 \text{ L}$,粉料与水的配比 $1:2.5 \sim 1:3.0$ (质量比),设定的电流(硬度)极值 $3.5 \sim 5.0 \text{ A}$,分别进行单因素试验,并在单因素试验的基础上,采用正交试验获取冰淇淋生产工艺参数的最佳组合。

3 结果与分析

3.1 单因素试验

3.1.1 浆液加入量对膨化率的影响

由图 5 可知,当粉料与水的配比为 $1.0:3.0$ (质量比),电流设定为 4.0 A 时,随着浆液加入量的增多,冰

淇淋的膨化率总体呈降低趋势,因为冷冻缸的容积固定,随着浆液加入量的增加,其接触的空气量相对减少,浆液不能完全与空气混合,膨化率会下降。但是如果加入的浆液量太少,很容易由于搅拌不均匀产生冻缸,综合考虑每次加入浆液量为 0.9~1.0 L 较为理想。

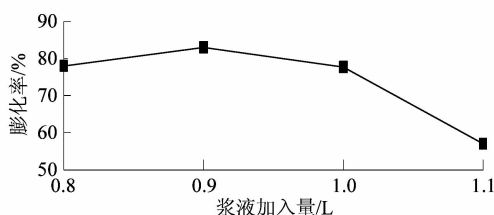


图5 不同浆液加入量对冰淇淋膨化率的影响

Figure 5 Effect on puffing rate of ice cream with different amounts of slurry

3.1.2 粉料与水的配比对膨化率的影响

由表1可知,当浆液加入量为 0.9 L,电流设定为 4.0 A 时,随着配比中水的比例的增加,冰淇淋的膨化率先缓慢降低,然后缓慢升高,之后再缓慢下降,并在粉料与水的质量比为 1:2.5 时得到最大膨化率。但所得的冰淇淋硬度过低,口感不佳。综合考虑取粉料与水质量比 1:2.8,粉料与水质量比为 1:3.0~1:2.6 时比较合理。

表1 粉料与水不同配比对冰淇淋膨化率的影响

Table 1 Puffing rate of ice cream under different ratios of powder and water

粉料与水质量比	膨化率/%	粉料与水质量比	膨化率/%
1:2.5	85.3	1:2.8	82.3
1:2.6	80.7	1:2.9	79.3
1:2.7	81.4	1:3.0	71.5

3.1.3 电流极值对冰淇淋膨化率的影响

由图6可知,当浆液加入量为 0.9 L,粉料与水的配比为 1:3.0(质量比)时,随着设定的电流极值的增加,冰淇淋的膨化率先缓慢升高后降低。因为随着电流极值的升高,冷冻的时间会越长,浆液与空气的混合时间越长越充分,但电流值过高,冷冻时间过长,就会导致过多的冷量进入缸体,影响空气混入冰淇淋中,小气泡含量相对少,冰晶含量相对多,硬度高,反而膨化率会降低。综合考虑电流极值设定为 3.5~4.5 A 比较合理。

3.2 正交试验

在单因素试验的基础上,采用四因素三水平的正交试验(见表2),获得冰淇淋生产过程中最佳工艺参数组合。试验因素和水平如表2所示。

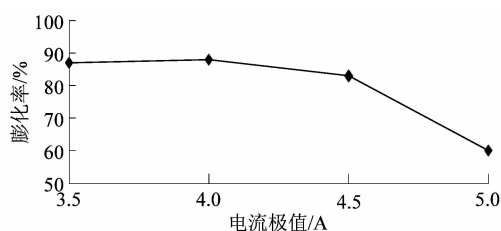


图6 不同电流极值下冰淇淋的膨化率

Figure 6 Puffing rate of ice cream at different current extremes

表2 试验因素及水平表

Table 2 Test factors and level table

水平	因素		
	A 浆液加入量/L	B 粉料与水配比(质量比)	C 电流极值/A
1	0.9	1:2.6	3.5
2	1.0	1:2.8	4.0
3	1.1	1:3.0	4.5

由表3~4可知,因素影响大小顺序为 $A > B > C$,最优工艺组合为 $A_1B_3C_3$,其次是 $A_2B_1C_2$,即浆液加入量 0.9 L,粉料与水配比为 1:3.0(质量比),电流极值设定为 4.5 A;浆液加入量为 1.0 L,粉料与水配比为 1:2.6(质量比),电流极值设定为 4.0 A,这2种情况都能得到较好质量的冰淇淋。

表3 正交试验数据表

Table 3 Orthogonal test data table

试验序号	水平			膨化率/%
	A	B	C	
1	1	1	1	76.8
2	1	2	2	75.2
3	1	3	3	82.0
4	2	1	2	80.0
5	2	2	3	77.7
6	2	3	1	77.7
7	3	1	3	56.7
8	3	2	1	54.4
9	3	3	2	59.4

表4 极差数据表

Table 4 Extreme difference data sheet %

因素	T_1	T_2	T_3	极差 R
A	78.0	78.5	56.8	21.7
B	71.2	69.1	73.0	3.9
C	69.6	71.5	72.1	2.5

T_1 为 3 因素对应的水平 1 的 3 次试验所得膨化率求和后取的平均值,如 A 因素对应的 $T_1 = (76.8\% + 75.2\% + 82.0\%) / 3 = 78.0\%$,同理可得极差 T_2, T_3 。极差 R 为 3 因素对应的 $T_1 \sim T_3$ 中的极大值与极小值之差。

3.3 验证实验

3组平行验证实验结果表明,当加入浆液量0.9 L,粉料与浆液配比1:3.0(质量比),电流极值4.5 A时,冰淇淋的膨化率最高为82.4%,与正交试验数据表中列出的最优组(试验3)所得的膨化率82.0%相吻合,相对于改进之前30%~40%的膨化率有较大提高,得到了比较理想的结果。

4 结语

课题组对冰淇淋机搅拌器工作原理进行了探究,并确定其最小转速。通过试验分析得出在冷冻搅拌环节中影响冰淇淋膨化率的3个主要影响因素,并通过单因素试验以及正交试验得出在冷冻过程中影响膨化率的首要因素是浆液的加入量,即要保证有足够的空气与浆液混合,因而改换用齿轮泵加入浆液的方式且可通过控制系统精确控制加入量。试验得出软冰淇淋生产过程中的最佳工艺参数组合,实现了冰淇淋机在生产过程中运行的稳定性,所产产品的优质性,提高了产量和经济效益。

下一步计划对制冷量和保温时间进行精确控制,以期减少能量的损耗并提高产品的质量。

参考文献:

[1] 紫悦. 冰淇淋800亿元市场 中外品牌开抢[N]. 中国食品报,

(上接第49页)

气的湿度升高,则冷面附近湿空气的蒸气压 P 也会提高,增加了相变驱动力 F ,从而使得在当前实验条件下出现空气湿度越高,冷表面水珠冻结时间越短的情况。

3 结语

课题组通过搭建恒温恒湿实验台,结合显微观察的方式观察结霜过程,并使用半导体制冷台来控制稳定的冷表面温度,研究了环境空气温湿度对预先冷却的水平铝表面结霜过程中的水珠冻结数量及时间的影响。实验结果表明,在当前实验条件下,对于图像面积内冻结时刻的水珠数量,当温度为10.0,12.5,15.0℃时其呈减少的趋势,相对湿度为50%时的冻结水珠数量大于相对湿度为70%时的数量。水珠数量越少就说明其平均半径越大。对于冷表面水珠的冻结时间,当温度为10.0,12.5,15.0℃时,表面张力的减小带来的势垒减小占主导作用,冷表面水珠冻结时间呈缩短趋势。当相对湿度为50%,60%,70%时,相变驱动力变大,冷表面水珠冻结时间呈缩短趋势。

参考文献:

[1] CHENG C H, SHIU C C. Frost formation and frost crystal growth on a

2015-10-19(002).

- [2] 张焱. 冰淇淋消费市场发展前景可期[N]. 中国经济时报, 2016-05-12(006).
- [3] 刘昕. 冰淇淋市场的“中国式”突围[N]. 国际商报, 2011-04-27(015).
- [4] JEJCIC V. Blender with safety grille for producing ice-cream and similar; US 7354192B2[P]. 2008-04-08.
- [5] 蔡云升, 何唯平, 刘梅森. 软冰淇淋机及软冰淇淋的研究与开发[J]. 食品工业, 2006(1): 3-4.
- [6] 江国祥. 冰淇淋机常见故障及解决方法[J]. 中国乳业, 2004(6): 43.
- [7] 曹玉华, 徐宁, 黎俊杰. 三色冰淇淋机搅拌器的优化设计[J]. 食品工业科技, 2007, 28(8): 194-196.
- [8] 谢堃, 陈天及, 萧冠中. 软冰淇淋机的结构特点与运行故障排除分析[J]. 食品与机械, 2008, 24(5): 82-84.
- [9] 郑晓. 冰淇淋机浮动刮刀的刮削机理及力学分析[J]. 包装与食品机械, 1996, 14(5): 4-7.
- [10] 尹忠俊, 孙洁, 陈兵, 等. 开式螺旋输送机输送机理分析与参数设计[J]. 矿山机械, 2010, 38(11): 66-71.
- [11] 贾朝斌, 程珩. 螺旋输送机参数化设计方法研究[J]. 机械设计与制造, 2015(4): 206-208.
- [12] 杨嘉鹏, 王庆惠, 闫圣坤, 等. 揉搓式马铃薯脱皮装置设计及试验研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(11): 100-103.
- [13] 李华廷. 山药全自动削皮机装置与控制系统研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015: 34.
- [14] HUANG Jincheng. Analysis on the factors influencing the quality of ice cream[J]. Modern Food, 2017(8): 47-49.

cold plate in atmospheric air flow [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(21): 4289-4303.

- [2] 刘耀民. 冷表面结霜过程的分形模型及实验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2012: 11-42.
- [3] 侯普秀. 霜层生长过程的实验研究以及理论分析[D]. 南京: 东南大学, 2006: 32-61.
- [4] HAYASHI Y, AOKI A, ADACHI S, et al. Study of frost properties correlating with frost formation types [J]. Journal of Heat Transfer, 1977, 99(2): 239-245.
- [5] 许旺发, 吴晓敏, 王维城. 水平冷面上霜晶生长规律的实验研究[J]. 低温工程, 2003(6): 41-46.
- [6] 吴晓敏, 单小丰, 王维城, 等. 冷表面结霜的微细观可视化研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(10): 1437-1440.
- [7] 李瑞霞, 吴晓敏, 王维城. 铝表面结霜现象的实验研究[J]. 热科学与技术, 2005, 4(4): 315-318.
- [8] 马强, 吴晓敏, 陈永根. 水平表面结霜过程的实验研究[J]. 化工学报, 2015, 66(增刊1): 95-99.
- [9] 吴晓敏, 许旺发, 王维城, 等. 冷面上过冷水珠冻结的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(1): 104-106.
- [10] 马晓辉, 刘和云, 张英才. 微过冷却水滴在固体表面的冻结行为[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2010, 7(1): 64-67.
- [11] 黄玲艳, 刘中良, 刘耀民, 等. 低温环境下水平铜表面液滴冻结的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(4): 647-650.
- [12] 闵乃本. 晶体生长的物理基础[M]. 上海: 科学技术出版社, 1982: 342.