

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2021.01.008

张星灿, 刘建, 杨健, 等. 二级挤压工艺对方便米粉品质的影响[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(1): 62-70.

ZHANG X C, LIU J, YANG J, et al. The influence of secondary extrusion process on the quality of instant rice noodle[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(1): 62-70.

二级挤压工艺对方便米粉品质的影响

张星灿^{1,2}, 刘建², 杨健², 华苗苗², 任元元^{1,2},
吴森², 邹育¹, 康建平^{1,2}✉

(1. 四川省食品发酵工业研究设计院, 四川 成都 611130;

2. 四川东方主食产业技术研究院, 四川 成都 611130)

摘要: 为研究二级挤压工艺对方便米粉品质的影响, 以二级挤压工艺的关键参数: 一级/二级挤压机筒温度、一级/二级挤压螺杆转速、喂料速度、模板孔径为单因素研究对象, 并利用单因素实验及响应面实验对其进行优化。结果表明, 挤压参数的优化能在一定范围内提高方便米粉的品质, 最终优化所得二级挤压工艺参数为一级挤压机筒温度为 173 °C、二级挤压机筒温度 39 °C、一级挤压螺杆转速 30 Hz、二级挤压螺杆转速 20 Hz、喂料速度 11.8 Hz, 模板孔径 0.7 mm, 在此条件下制作的方便米粉产品米香浓郁, 综合品质良好, 达到市售产品品质。可为方便米粉工业化连续生产提供参考。

关键词: 方便米粉; 二级挤压工艺; 单因素实验; 响应面分析; 质构特性分析

中图分类号: TS213.3 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2021)01-0062-09

The Influence of Secondary Extrusion Process on The Quality of Instant Rice Noodle

ZHANG Xing-can^{1,2}, LIU Jian², YANG Jian², HUA Miao-miao²,
REN Yuan-yuan^{1,2}, WU Miao², ZOU Yu¹, KANG Jian-ping^{1,2}✉(1. Sichuan Food and Fermentation Industry Research and Design Institute, Chengdu, Sichuan 611130, China;
2. Sichuan Oriental Staple Food Industry Technology Research Institute, Chengdu, Sichuan 611130, China)

Abstract: In order to study the influence of the two-stage extrusion process on the quality of instant rice noodle, the key parameters of the two-stage extrusion process including: the first and second stage extruder barrel temperature, the first and second stage extruder screw speed, feeding speed, and the template hole diameter were taken as the single factor research objects, and the single factor experiment and response surface experiment were used to optimize them. The results show that the optimization of extrusion parameters can improve the quality of instant rice noodle in a certain range. The final optimization of the two-stage extrusion process parameters are as follows: the first stage extruder barrel temperature was 173 °C, the second stage extruder barrel temperature was 39 °C, the first stage extruder screw speed was 30 Hz, the

收稿日期: 2020-05-26

基金项目: 国家科技部十三五国家重点研发计划课题(2016YFD0401305); 四川省科技计划项目重点研发项目(2017NZ0062)

Supported by: National key Research and Development Project of the 13th five-year plan (No. 2016YFD0401305); Key Research and Development projects of Sichuan Science and Technology Program (No. 2017NZ0062)

作者简介: 张星灿, 男, 1990 年出生, 高级工程师, 研究方向为粮油加工。E-mail: 772892913@qq.com.

通讯作者: 康建平, 男, 1965 年出生, 教授级高工, 研究方向为粮油加工。E-mail: 1204484142@qq.com.

second stage extruder screw speed was 20 Hz, the feeding speed was 11.8hz, and the template aperture was 0.7 mm. Under this condition, the instant rice noodle product is made with Strong fragrance and good comprehensive quality which can reach market product quality. This study can provide a reference for the continuous production of instant rice noodle.

Key words: instant rice noodle; two-stage extrusion process; single factor experiment; response surface analysis; texture profile analysis (TPA)

米粉以大米为主要原料, 经由浸泡、粉碎或磨浆、糊化、挤丝(或切条)等一系列工序制成的细条状或扁宽状米制品, 在我国米制品中占有重要的地位^[1]; 方便米粉作为米粉的重要衍生产品是指经过干燥能够长期保存的开袋复水 3~5 min 即可食用的米粉, 是米粉发展的一种趋势^[2]。

目前方便米粉的研究多集中于原料特性与加工适应性^[3-7]、原料制粉工艺^[8]、成型工艺^[9-10]、干燥工艺^[11-13]以及方便米粉品质^[14-15]等的研究。方便米粉的生产工艺多采用传统湿法自熟挤丝方式生产, 该工艺存在老化时间长、不稳定、自动化程度较低、环境差、干燥定型难等问题。本研究吸收了非油炸方便面生产在熟化与成型方面的优势, 将二级挤压工艺应用于方便米粉加工, 系统的研究方便米粉品质与二级挤压工艺关键参数之间的相关性。

本实验主要从一级/二级挤压机筒温度、一级/二级挤压螺杆转速、喂料速度、模板孔径等二级挤压工艺关键参数对方便米粉产品的蒸煮品质、感官评分的影响, 并结合响应面模型设计对方便米粉品质和二级挤压工艺关键参数进行拟合并优化, 以期对后续方便米粉加工工艺的研究以及方便米粉工业化连续生产提供参考。

1 材料与方 法

1.1 主要原辅料

陈米(3年): 绵阳仙特米业有限公司; 玉米淀粉: 市场采购。

1.2 实验仪器

方便米粉二级挤压生产线: 圣昌达机械(天津)有限公司; 质构仪: 上海腾拔仪器科技有限公司。

1.3 实验工艺与设计

1.3.1 方便米粉制作工艺

以陈米(3年, 蛋白质含量 8.67%, 直链淀粉

含量 22.56%) 为主要原料, 经粉碎(80 目筛)后, 与玉米淀粉按 9:1 混合、调湿, 在高温条件下进行一级熟化, 再经由低温条件下进行二级成型, 后经过波纹成型、冷却、定量切分、蒸煮、热风干燥(50 °C, 1 h, 干燥后样品水分含量 8.4%)、包装等工序完成样品制备。具体工艺如下:

大米→粉碎→和料→一级挤出熟化→二级挤出成型→波纹成型→冷风冷却→定量切分→蒸煮→热风干燥→包装→成品入库

1.3.2 实验设计

1.3.2.1 一级挤压机筒温度的单因素实验 在前期预实验的基础上, 设定二级挤压机筒温度 40 °C, 一级挤压螺杆转速 30 Hz(设备最大转速 970 r/min, 最大频率 50 Hz), 二级挤压螺杆转速 20 Hz(设备最大转速 970 r/min, 最大频率 50 Hz), 喂料速度 12 Hz(最大喂料速度 150 kg/h, 最大频率 50 Hz), 模板孔径 0.7 mm 的基础上, 改变一级挤压机筒温度为 160、165、170、175、180 °C 进行单因素实验。

1.3.2.2 二级挤压机筒温度的单因素实验 在 1.3.2.1 的基础上, 维持一级挤压螺杆转速 30 Hz, 二级挤压螺杆转速 20 Hz, 喂料速度 12 Hz, 模板孔径 0.7 mm 不变, 调整一级挤压机筒温度为 175 °C, 改变二级挤压机筒温度为 30、35、40、45、50 °C 进行单因素实验。

1.3.2.3 一级挤压螺杆转速的单因素实验 在 1.3.2.2 的基础上, 维持一级挤压机筒温度为 175 °C, 二级挤压螺杆转速 20 Hz, 喂料速度 12 Hz, 模板孔径 0.7 mm 不变, 调整二级挤压机筒温度为 40 °C, 改变一级挤压螺杆转速为 24、26、28、30、32 Hz 进行单因素实验。

1.3.2.4 二级挤压螺杆转速的单因素实验 在 1.3.2.3 的基础上, 维持一级挤压机筒温度为 175 °C, 二级挤压机筒温度 40 °C, 喂料速度 12 Hz, 模板孔径 0.7 mm 不变, 调整一级挤压螺杆转速为 30 Hz,

改变二级挤压螺杆转速为 16、18、20、22、24 Hz 进行单因素实验。

1.3.2.5 喂料速度的单因素实验 在 1.3.2.4 的基础上, 维持一级挤压机筒温度为 175 °C, 二级挤压机筒温度 40 °C, 一级挤压螺杆转速 30 Hz, 模板孔径 0.7 mm 不变, 调整二级挤压螺杆转速为 20 Hz, 改变喂料速度为 8、10、12、14、16 Hz 进行单因素实验。

1.3.2.6 模板孔径的单因素实验 在 1.3.2.5 的基础上, 维持一级挤压机筒温度为 175 °C, 二级挤压机筒温度 40 °C, 一级挤压螺杆转速 30 Hz, 二级挤压螺杆转速为 20 Hz 不变, 调整喂料速度为 12 Hz, 改变模板孔径为 0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 mm 进行单因素实验。

1.3.2.7 响应面实验设计 在单因素实验的基础上, 选取合适范围的一级挤压机筒温度、二级挤压机筒温度、一级挤压螺杆转速、二级挤压螺杆转速、喂料速度、模板孔径为自变量, 每个变量 3 个水平, 通过 Box-Behnken 实验设计, 建立方便米粉二级挤压工艺参数对方便米粉感官评价影响的数学模型, 确定方便米粉最佳二级挤压工艺参数, Box-Behnken 实验变量设计如表 1 所示。

表 1 Box-Behnken 实验变量设计表
Table 1 Box-Behnken experimental variable design table

因素	编码及水平		
	-1	0	1
A 一级挤压机筒温度/°C	170	175	180
B 二级挤压机筒温度/°C	35	40	45
C 一级挤压螺杆转速/Hz	28	30	32
D 二级挤压螺杆转速/Hz	18	20	22
E 喂料速度/Hz	10	12	14
F 模板孔径/mm	0.6	0.7	0.8

1.4 实验方法

1.4.1 方便米粉蒸煮品质测定

1.4.1.1 复水时间测定 取 10 cm 长的方便米粉约 20 g, 加入到 600 mL 的煮沸蒸馏水中, 保持微沸状态, 观察方便米粉复水状态, 在米粉快完全复水时每隔 10 s 取一段米粉夹在两块透明的玻璃

块中间进行轻轻按压, 当米粉硬芯或白芯消失米粉软化后认为方便米粉已完全复水, 记录时间 t ^[16-17]。

1.4.1.2 断条率的测定 选择 20 根约 20 cm 长的方便米粉, 在 500 mL 沸水中蒸煮方法 1.4.1.1 中所测方便米粉样品对应复水时间 t , 然后将米粉样品捞起淋水、沥水, 记录 10 cm 以上的米粉条数 (x_1), 按公式进行断条率的计算^[18]:

$$\text{断条率}(\%) = \frac{20 - x_1}{20} \times 100\%$$

式中: x_1 : 完全复水以后 10 cm 以上的米粉条数。

1.4.1.3 蒸煮损失率测定 将 20 cm 长的方便米粉 m_1 (约 10 g), 用 150 mL 沸水中蒸煮方法 1.4.1.1 中所测方便米粉样品对应复水时间 t , 捞出, 用 50 mL 蒸馏水淋洗 30 s, 将洗液一并转入烧杯, 放在电炉上将大部分水煮干后, 于 105 °C 烘箱中烘干至恒重, 称量得到水中固形物质量 m_2 , 按照下式计算方便米粉蒸煮损失率^[19]。

$$R = \frac{m_2}{m_1(1 - M)} \times 100\%$$

式中: R : 蒸煮损失率, %; M : 方便米粉含水量, %; m_1 : 20 cm 长方便米粉质量, g; m_2 : 方便米粉溶入水中固形物质量, g。

1.4.2 方便米粉感官评价

采用 15 人盲评法, 由 15 名经过训练对感官评价有经验的人员组成评价小组, 根据表 2 对本实验方便米粉进行评分。

1.4.3 方便米粉质构特性测定

方便米粉 TPA 测定方法^[21]: 取面条样品 20~30 根, 放入盛有 500 mL 蒸馏水沸水的烧杯中, 加盖静置方法 1.4.1.1 中所测方便米粉样品对应复水时间 t , 立即将面条捞出, 沥干水分后进行质构特性测定。测定方法按 TPA 实验法进行, 测定参数见表 3, 测定指标为: 硬度、弹性、回复性、咀嚼性; 测量在 10 min 内完成, 每个样品重复 6 次平行实验。

方便米粉拉伸实验^[22]: 采用的质构仪探头 P/SPR 面条拉伸装置, 参数设定如下: 测前速度 1 mm/s; 测试速度 3.0 mm/s; 测后速度 5 mm/s; 引发力 5 g; 拉伸距离 15 mm。

表 2 感官评分指标^[20]
Table 2 sensory score index^[20]

项目	指标	评分标准/分
气味 (25 分)	具有自然香味, 气味浓, 无其他异味	18~25
	自然香味较纯, 气味较浓, 无或少有异味	9~17
	自然香味不纯, 气味淡, 或有其他异味	0~8
色泽 (8 分)	白色或固有色泽, 无杂色, 透明性好	6~8
	白色或固有色泽, 少许杂色, 透明性较好	3~5
	色泽不均匀, 多杂色, 透明性很差	0~2
外观形态 (25 分)	米粉条结构紧密, 表皮无开裂, 筷子夹起不易断条, 无并条、碎粉	6~9
	米粉条表皮有少量开裂, 无断条、并条、碎粉	3~5
	米粉条表皮爆裂有碎粉, 易断条, 或有并条	0~2
均匀度 (8 分)	米粉表皮光滑, 且米粉条粗细均匀	6~8
	米粉表皮较为光滑, 或米粉条比较均匀	3~5
	米粉表皮粗糙, 且米粉条粗细不均	0~2
口感 (25 分)	口感柔软顺滑, 黏弹性适度, 无黏牙或夹生现象	18~25
	口感较柔软, 黏弹性较大或较小, 有少许黏牙或夹生现象	9~17
	口感差, 黏弹性过大或过小, 有黏牙或夹生现象	0~8
滋味 (25 分)	咀嚼时有浓郁的米香味, 无其他异味	18~25
	咀嚼时米香味较纯, 香味较浓, 无或少许其他异味	9~17
	咀嚼时米香味不纯, 或香味淡, 或有其他异味	0~8

表 3 质构仪操作参数
Table 3 Operating parameters of texture analyzer

探头	操作类型	测前速度 / (mm/s)	测试速度 / (mm/s)	测后速度 / (mm/s)	压缩率 / %	感应力 / g	时间 / s
HDP/PFS	TPA	2	1	1	70	5	1

1.5 数据分析

采用统计软件 Excel2016、SPSS20.0 软件、Design-expert8.0.6 进行数据处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 单因素实验

2.1.1 一级挤压机筒温度对方便米粉品质的影响

在本实验所采用的方便米粉挤压工艺中, 一级挤压机主要作用是物料熟化, 而一级挤压机筒的温度则是控制物料熟化的主要因素。由图 1 可知, 米粉蒸煮损失率随着一级挤压机筒温度升高而逐渐降低; 断条率则随一级挤压机筒温度升高先降低再上升, 峰值出现在 175 °C, 此时感官评分也较高。机筒温度的高低直接影响淀粉的糊化效果, 温度较低会导致淀粉糊化不完全, 米粉凝胶网络形成效果差, 易断条^[16]; 而温度升高, 虽然能提高米粉的糊化效果, 但过高的温度则会使物料在过度熟化的同时伴随水分的大量汽化, 导

致在米粉挤出时, 随着压力变化而膨化, 米粉丝含有大量气孔, 导致方便米粉极易断条。

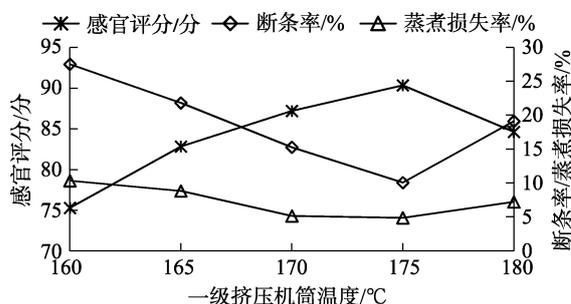


图 1 一级挤压机筒温度对方便米粉品质的影响

Fig. 1 Effect of temperature of the first stage extruder barrel temperature on the quality of instant rice noodles

2.1.2 二级挤压机筒温度对方便米粉品质的影响

二级挤压机的主要作用是在一级挤压机熟化的基础上让米粉成型, 其中机筒温度同样是影响米粉成型的主要因素之一。由图 2 可知, 随着二级机筒温度的升高, 米粉断条率、蒸煮损失率先降低后呈上升趋势, 二级挤压机筒温度太低, 米粉易老化导致断条, 使蒸煮损失率升高; 温度过高, 则影响一级挤出物料降温效果, 导致挤出成型米粉发生膨化, 使米粉蒸煮损失率、断条率的升高。感官评分峰值出现在二级机筒温度 40 °C, 此时米粉品质相对较好。

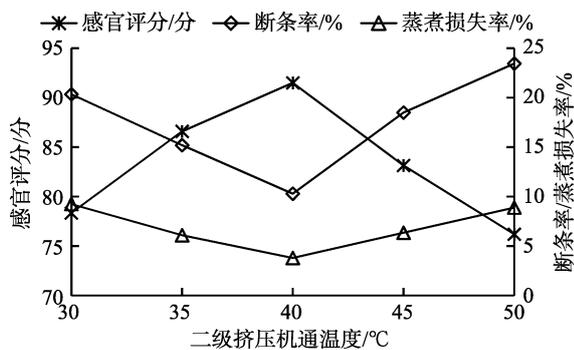


图 2 二级挤压机筒温度对方便米粉品质的影响

Fig. 2 Effect of temperature of the second stage extruder barrel temperature on instant rice noodle quality

2.1.3 一级挤压螺杆转速对方便米粉品质的影响

挤压机螺杆的转动可传输物料，为物料提供搅拌、混合和剪切等动力，使物料在各种外力作用下摩擦生热，进而糊化。由图 3 可知，随着一级挤压螺杆转速的加快，米粉的蒸煮损失率、断条率均呈现先降低后升高的趋势，感官评分峰值出现在一级螺杆转速为 30 Hz 时。挤压机螺杆转速的快慢直接影响物料在挤压机筒内的停留时间，进而影响物料的熟化程度。在合适的温度条件下，过快的转速，使物料停留时间短而不能充分糊化，导致产品夹生不能成型，易断条；螺杆转速过慢，物料停留时间增加，充分糊化后的物料在出料时，因温度和压力骤变，而发生过度膨化，使物料中出现大量气孔，也会导致米粉极易断条。

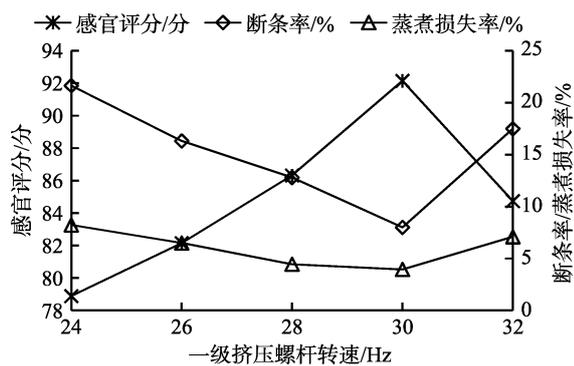


图 3 一级挤压螺杆转速对方便米粉品质的影响

Fig. 3 Effect of the first stage extruder screw speed on the quality of instant rice noodles

2.1.4 二级挤压螺杆转速对方便米粉品质的影响

二级挤压机主要用于方便米粉的成型，不同于一级挤压螺杆，二级挤压螺杆前段拥有约 2/3 的螺纹加密区，能提供更强的搅拌、混合和剪切等动力，进一步均化物料以及排出物料在一级挤

压机熟化过程中产生的气体，最后定量、定压地由机头模板通道均匀挤出，使米粉成型。由图 4 可知，同一级挤压螺杆转速相同，伴随着二级挤压螺杆转速的提高，方便米粉的断条率和蒸煮损失率先减小后增大，感官评分的变化趋势则相反，峰值出现在二级挤压螺杆转速 20 Hz 处。

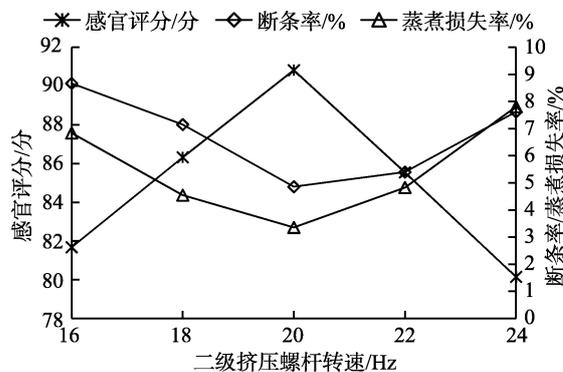


图 4 二级挤压螺杆转速对方便米粉品质的影响

Fig. 4 Effect of the second stage extruder screw speed on the quality of instant rice noodles

2.1.5 喂料速度对方便米粉品质的影响

喂料速度决定粉料在挤压腔内的充实程度，进而影响物料在挤压腔中受到挤压摩擦力、升温速率、挤压压力、剪切力等，最终影响米粉的凝胶效果及生产速率^[23]，同时喂料速度也决定一级、二级两级挤压腔之间的给料连续程度。由图 5 可知，随着喂料速度的增加，米粉断条率先减小后增大，米粉蒸煮损失率亦然，而感官评分的变化则相反，峰值均出现在喂料速度 12 Hz 处。喂料速度的增加，初始能逐渐让挤压腔内的物料随着螺杆转动产生更佳的挤压摩擦力、升温速率、挤压压力、剪切力等，有利于物料凝胶以及提高

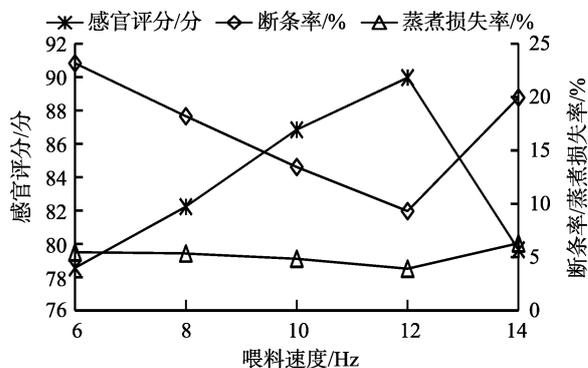


图 5 喂料速度对方便米粉品质的影响

Fig. 5 Effect of feeding speed on the quality of instant rice noodles

生产速率；但随着喂料速度的持续上涨，在同等的螺杆转速下物料增多，会加速物料的挤出而在挤压腔中停留时间减少，导致米粉糊化度不够，物料团松散，最终会导致物料在挤压腔内无法充分糊化而流动性下降，进而造成物料的大量堆积而堵塞挤压腔。

2.1.6 模板孔径对方便米粉品质的影响

模板孔径直接影响米粉的成型效果与复水性。由图 6 可知，模板孔径对蒸煮损失率几乎没有影响；模板孔径太小（0.6 mm），米粉太细挤出成型后失水过快，会增加米粉的断条率，而模板孔径太大（1.0 mm）挤出米粉过粗，中心复水不足而断条，也会影响方便米粉的最终复水时间。感官评分的峰值出现在模板孔径 0.7 mm 处，此时米粉的断条率和蒸煮损失率均处于一个较低的水平，对米粉的食用品质影响最低。

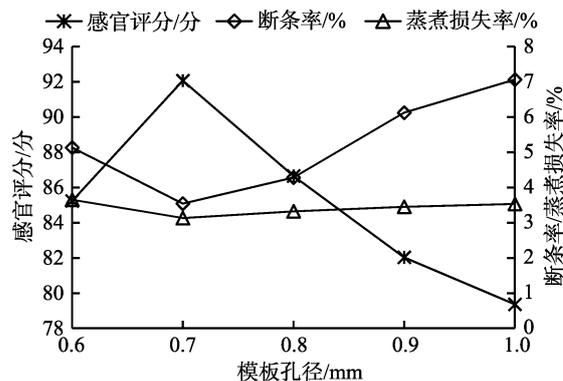


图 6 模板孔径对方便米粉品质的影响

Fig. 6 Effect of template aperture on the quality of instant rice noodles

2.2 二级挤压工艺响应面优化实验

2.2.1 实验回归模型

根据单因素实验结果，采用 6 因素 3 水平进行 Box-Behnken 实验设计（因素水平见表 1），得到 54 个实验组合点，实验方案与结果见表 4。

表 4 响应面设计的实验方案与结果

Table 4 Experimental scheme and results of response surface design

一级挤压机筒温度 (A)/°C	二级挤压机通温度 (B)/°C	一级挤压螺杆转速 (C)/Hz	二级挤压螺杆转速 (D)/Hz	喂料速度 (E)/Hz	模板孔径 (F)/mm	感官评分	序号	一级挤压机筒温度 (A)/°C	二级挤压机通温度 (B)/°C	一级挤压螺杆转速 (C)/Hz	二级挤压螺杆转速 (D)/Hz	喂料速度 (E)/Hz	模板孔径 (F)/mm	感官评分
180	40	30	22	10	0.7	87.43	28	175	35	30	20	14	0.6	84.13
175	45	28	20	10	0.7	89.57	29	180	40	30	22	14	0.7	82.35
175	40	30	20	12	0.7	91.82	30	175	40	30	20	12	0.7	92.78
180	45	30	18	12	0.7	88.13	31	175	40	28	22	12	0.6	83.81
170	40	28	20	12	0.6	79.87	32	175	40	30	20	12	0.7	93.04
180	40	30	18	10	0.7	87.64	33	175	45	30	20	14	0.8	82.56
170	40	30	22	10	0.7	80.25	34	170	40	32	20	12	0.6	78.85
180	40	30	18	14	0.7	80.33	35	175	40	30	20	12	0.7	93.58
170	45	30	22	12	0.7	80.20	36	175	40	32	18	12	0.6	88.73
175	40	28	22	12	0.8	84.33	37	170	40	32	20	12	0.8	79.36
175	45	28	20	14	0.7	82.77	38	180	35	30	22	12	0.7	87.69
175	40	32	22	12	0.8	87.42	39	175	40	32	18	12	0.8	85.71
175	35	30	20	10	0.6	86.45	40	170	35	30	22	12	0.7	80.67
180	35	30	18	12	0.7	88.10	41	180	40	28	20	12	0.8	84.69
175	45	32	20	10	0.7	85.32	42	170	45	30	18	12	0.7	80.48
170	35	30	18	12	0.7	80.03	43	175	45	32	20	14	0.7	86.79
175	40	30	20	12	0.7	93.46	44	180	45	30	22	12	0.7	88.18
180	40	28	20	12	0.6	85.15	45	175	45	30	20	10	0.6	84.31
180	40	32	20	12	0.8	83.76	46	175	40	28	18	12	0.6	83.29
175	35	28	20	14	0.7	82.02	47	175	40	28	18	12	0.8	84.28
175	35	32	20	10	0.7	88.32	48	175	40	32	22	12	0.6	85.24
175	35	30	20	10	0.8	86.65	49	170	40	30	22	14	0.7	77.98
175	35	30	20	14	0.8	84.68	50	175	35	28	20	10	0.7	85.21
175	45	30	20	10	0.8	83.87	51	170	40	30	18	10	0.7	80.12
175	35	32	20	14	0.7	86.65	52	175	45	30	20	14	0.6	81.08
170	40	28	20	12	0.8	79.78	53	180	40	32	20	12	0.6	84.55
170	40	30	18	14	0.7	78.45	54	175	40	30	20	12	0.7	94.39

应用 Design-Expert8.0.7 软件对表 4 实验结果进行多元回归拟合分析, 可得到感官评价 (Y) 与各因素 A、B、C、D、E、F 之间的二次多项模型:

$$Y = -7.995.913 + 61.78.087 + 81A + 7.246 + 22B + 33.670 + 42C + 19.109 + 13D + 29.697 + 08E + 528.730 + 56F + 2.7E - 3AB - 1.125E - 3AC + 8.937 + 5E - 3AD - 0.105 + 62AE - 0.417 + 5AF - 0.099 + 625BC - 575E - 3BD - 4.5E - 3BE + 0.072 + 5BF - 0.073 + 437CD + 0.305 + 94CE - 0.65CF + 0.050 + 938DE + 2.956 + 25DF + 1.418 + 75EF - 0.217 + 66A^2 - 0.058 + 411B^2 - 0.515 + 07C^2 - 0.522 + 88D^2 - 0.956 + 63E^2 - 367.527 + 78F^2$$

回归方程方差分析结果见表 5。

由表 5 可知, 根据 F 值和 P 值, 因素对产品感官评分 (Y) 的影响依次为

$A^2 > A > E^2 > F^2 > E > D^2 > C^2 > B^2 > CE > C > AE > BC > DF > B > CD > EF > AF > DE > CF > AD > F > AB > BE > BD > BF > D > AC$, 其中因素 A、E、 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 、 E^2 和 F^2 影响极显著 ($P < 0.01$), C、AE、CE 影响显著 ($P < 0.05$), 其余因素影响不显著 ($P > 0.05$)。该回归模型 $P < 0.01$, 表明该方程模型极显著; 模型失拟项不显著 ($P = 0.0982 > 0.05$), 即该方程拟合较好; 信噪比 $RSN = 14.6492$ 大于 4, 说明模型设计合理, 可用于预测。

表 5 回归模型方差分析及显著性检验

Table 5 Analysis of variance and significance test of regression model

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性	变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
Model 模型	885.625 1	27	32.800 9	15.679 6	<0.000 1	**	DE	0.332 1	1	0.332 1	0.158 8	0.693 6	-
A	215.760 1	1	215.760 1	103.138 2	<0.000 1	**	DF	2.796 6	1	2.796 6	1.336 8	0.258 1	-
B	2.244 8	1	2.244 8	1.073 1	0.309 8	-	EF	0.644 1	1	0.644 1	0.307 9	0.583 7	-
C	10.573 5	1	10.573 5	5.054 4	0.033 3	*	A^2	304.562 3	1	304.562 3	145.587 6	<0.000 1	**
D	0.002 8	1	0.002 8	0.001 3	0.971 0	-	B^2	21.933 4	1	21.933 4	10.484 6	0.003 3	**
E	52.067 6	1	52.067 6	24.889 5	<0.000 1	**	C^2	43.660 2	1	43.660 2	20.870 6	0.000 1	**
F	0.110 7	1	0.110 7	0.052 9	0.819 9	-	D^2	44.994 7	1	44.994 7	21.508 5	<0.000 1	**
AB	0.036 5	1	0.036 5	0.017 4	0.896 0	-	E^2	150.606 7	1	150.606 7	71.993 4	<0.000 1	**
AC	0.001 0	1	0.001 0	0.000 5	0.982 6	-	F^2	138.936 0	1	138.936 0	66.414 5	<0.000 1	**
AD	0.127 8	1	0.127 8	0.061 1	0.806 7	-	残差	54.390 7	26	2.092 0			
AE	8.925 3	1	8.925 3	4.266 5	0.049 0	*	失拟项	50.659 1	21	2.412 3	3.232 2	0.098 2	
AF	0.348 6	1	0.348 6	0.166 6	0.686 5	-	纯误差	3.731 7	5	0.746 3			
BC	7.940 1	1	7.940 1	3.795 6	0.062 3	-	总和	940.015 9	53				
BD	0.026 4	1	0.026 4	0.012 6	0.911 3	-	R^2	0.942 1					
BE	0.032 4	1	0.032 4	0.015 5	0.901 9	-	R_{SN}	14.649 2					
BF	0.010 5	1	0.010 5	0.005 0	0.944 0	-	R^2_{Adj}	0.882 1					
CD	0.690 3	1	0.690 3	0.330 0	0.570 6	-	R^2_{Pred}	0.712 7					
CE	11.980 5	1	11.980 5	5.727 0	0.024 2	*	CV	1.703 0					
CF	0.270 4	1	0.270 4	0.129 3	0.722 1	-							

注: **表示差异极显著($P < 0.01$); *表示差异显著($P < 0.05$); -表示不显著。

2.2.2 交互作用对感官评价的影响

根据回归分析的结果和已建立的数学模型, 绘制影响显著因素的响应面和等高线图。

图 7~8 响应面 (RSN) 分析是方便米粉感官评价对应选取合适范围的一级挤压机筒温度 A (°C)、一级挤压螺杆转速 B (Hz)、喂料速度 E (Hz) 为自变量构成的响应面曲面图, 可以直观

的反映各自变量对方便米粉感官评价的影响。由图可知 AE 交互作用中一级挤压机筒温度的作用大于喂料速度; CE 交互作用中喂料速度的作用大于一级挤压螺杆转速。

2.2.3 最适挤压工艺参数及验证实验

对 Design-Expert 分析得到的优化回归方程求解极大值, 结果表明, 当挤压工艺参数为一级挤

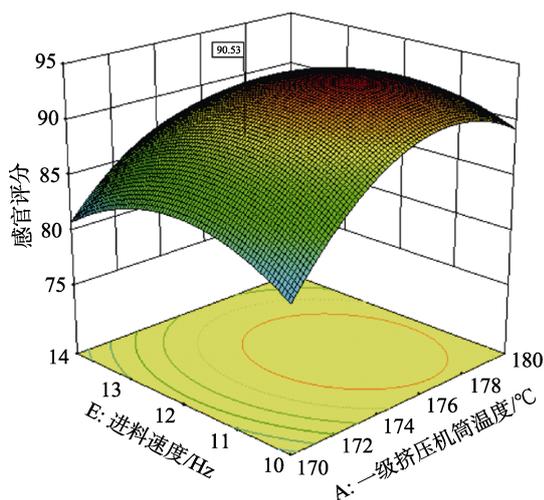


图 7 AE 交互作用响应面和等高线

Fig. 7 AE interaction response surface and contour

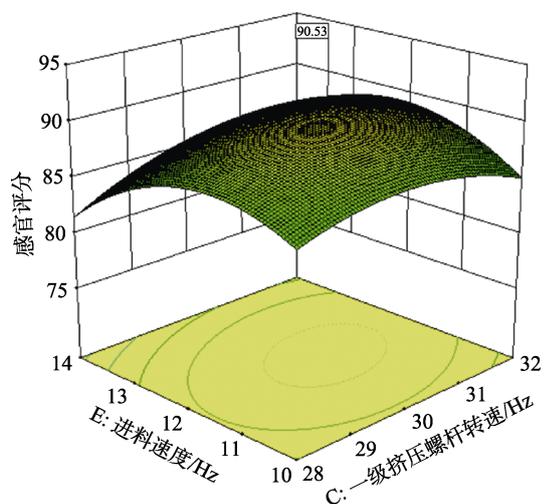


图 8 CE 交互作用响应面和等高线

Fig. 8 CE interaction response surface and contour

压机筒温度 172.55 °C、二级挤压机筒温度 39.13 °C、一级挤压螺杆转速 30.35 Hz、二级挤压螺杆

转速 19.96 Hz、喂料速度 11.80 Hz，模板孔径 0.7 mm，得到感官评价为 90.53 分。

为验证方案的有效性，结合实际情况，在挤压工艺参数为一级挤压机筒温度为 173 °C、二级挤压机筒温度 39 °C、一级挤压螺杆转速 30 Hz、二级挤压螺杆转速 20 Hz、喂料速度 11.8 Hz，模板孔径 0.7 mm 的条件下进行 3 次重复验证实验，感官评价为 91.04 分，标准偏差为 0.46，在模型标准误差 1.45 允许范围内，采用响应面 Box-Behnken 优化获得的方便米粉挤压工艺参数准确可靠，对工业化生产具有实际的指导意义。

2.3 二级挤压方便米粉的品质分析

采用响应面优化实验得到的最佳工艺条件制备方便米粉样品，与选取的市售畅销品牌方便米粉样品进行食用品质与质构特性的对比。实验方便米粉样品与市售方便米粉样品按测试要求冲泡后，分别测试其断条率、蒸煮损失率、感官评价等食用品质与硬度、咀嚼性、弹性、回复性等质构特性，并进行对比分析，结果如下表。

由表 6 可知，在方便米粉实验样品与市售样品品质对比分析中，在同等实验条件下，实验样品的断条率、蒸煮损失率低于 2 种市售样品；咀嚼性、回复性高于 2 种市售样品，弹性、硬度、复水时间以及感官评分均介于 2 种市售样品之间，与市售样相差不大。所以，本工艺加工的方便米粉综合品质良好，满足上市的要求。

表 6 实验样品与市售方便米粉样品品质对比

Table 6 Comparison of quality between experimental samples and commercial rice flour samples

样品名称	弹性	硬度/gf	咀嚼性/gf	回复性	断条率/%	蒸煮损失率/%	复水时间/s	感官评分
实验样	0.88±0.04	818.20±8.82	698.07±8.82	1.03±0.09	3.09±0.09	3.11±0.12	350±8.16	93.31±1.09
市售 A	0.92±0.05	822.20±9.08	697.22±13.95	0.85±0.06	3.38±0.24	3.26±0.16	301±6.87	94.47±1.31
市售 B	0.75±0.03	757.61±10.76	634.60±13.76	0.70±0.05	4.21±0.18	4.11±0.12	428±6.87	91.69±1.18

3 结论

通过单因素及响应面优化实验设计，系统研究方便米粉二级挤压工艺关键参数一级/二级挤压机筒温度、一级/二级挤压螺杆转速、喂料速度、模板孔径对方便米粉品质的影响，结果表明：

工艺参数的优化能在一定范围内提升方便米

粉的品质，其中一级挤压机筒温度、一级挤压转速、喂料速度对方便米粉断条率、蒸煮损失率、感官评分等食用品质影响显著。

方便米粉二级挤压最优工艺为一级挤压机筒温度 173 °C、二级挤压机筒温度 39 °C、一级挤压螺杆转速 30 Hz、二级挤压螺杆转速 20 Hz、喂料速度 11.8 Hz，模板孔径 0.7 mm。加工的方便

米粉感官评分 93.31, 断条率 3.09%, 蒸煮损失率 3.11%, 复水时间 350 s, 综合品质良好, 达到市售产品品质, 可为方便米粉工业化连续生产提供参考。

参考文献:

- [1] 周显青. 稻谷精深加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006, 175-196.
ZHOU X Q. Rice deep processing technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006, 175-196.
- [2] 孙庆杰. 米粉加工原理与技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2006, 1-9+79.
SUN Q J. Principle and technology of rice noodle processing [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2006, 1-9+79.
- [3] 赵思明, 刘友明, 熊善柏, 等. 方便米粉的原料适应性与品质特性研究[J]. 粮食与饲料工业, 2002(6): 37-39.
ZHAO S M, LIU Y M, XIONG S B, et al. Study on the processing suitability and quality properties of instant rice noodles[J]. Food and feed industry, 2002 (6): 37-39.
- [4] 张喻, 杨泌泉, 吴卫国, 等. 方便米线品质影响因素的研究[J]. 粮食与饲料工业, 2004(7): 16-17.
ZHANG Y, YANG M Q, WU W G, et al. Study on the factors influencing the quality of instant rice noodles [J]. Food and feed industry, 2004 (7): 16-17.
- [5] 李红斌, 李万芬, 詹小卉, 等. 米浆中直链淀粉含量与方便米粉品质关系的研究[J]. 食品科技, 2005(4): 29-31.
LI H B, LI W F, ZHAN X H, et al. The relation of amylose content in rice slurry and quality of instant rice noodle[J]. Food science and technology, 2005(4): 29-31.
- [6] 刘友明, 谭汝成, 荣建华, 等. 方便米粉加工原料的选择研究[J]. 食品科技, 2008(3): 133-136.
LIU Y M, TAN R C, RONG J H, et al. Study on raw materials selection for instant rice noodle[J]. Food science and technology, 2008 (3): 133-136.
- [7] 张星灿, 白菊红, 康建平, 等. 四川地方大米品种特性对方便米粉品质的影响[J]. 粮油食品科技, 2019, 27(3): 9-14.
ZHANG X C, BAI J H, KANG J P, et al. Effects of variety characteristics of Sichuan local rice on the quality of instant rice noodle[J]. Cereals, Oils and food science and technology, 2019, 27 (3): 9-14.
- [8] 刘亚伟. 加工方法对大米粉功能性质的影响[J]. 食品科技, 1994 (5): 9-10.
LIU Y W. Effect of processing methods on functional properties of rice noodle[J]. Food science and technology, 1994(5): 9-10.
- [9] 赵伟. 适用于新工艺生产米粉专用单螺杆挤出机的研究[D]. 北京化工大学, 2008.
ZHAO W. Study on single screw extruder for rice noodle production with new technology[D]. Beijing University of chemical technology, 2008.
- [10] 邓丹雯, 郑功源, 陈红兵, 等. 不同米粉加工技术比较研究[J]. 西部粮油科技, 2000, 25(3): 28-30.
DENG D W, ZHENG G Y, CHEN H B, et al. A comparative study on different rice noodle processing technologies[J]. Western cereals and oils science and technology, 2000, 25 (3): 28-30.
- [11] 赵思明, 刘友明, 熊善柏, 等. 方便米粉高温高湿干燥过程水分的扩散特性[J]. 华中农业大学学报, 2003, 22(3): 285-288.
ZHAO S M, LIU Y S, XIONG S B, et al. Diffusion characteristics of moisture in instant rice noodles during high temperature and high humidity drying [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2003, 22 (3): 285-288.
- [12] 艾亦旻. 乳酸浸泡及微波干燥对方便米粉品质的影响[D]. 南昌大学, 2014.
AI Y W. Effects of lactic acid soaking and microwave drying on the quality of instant rice noodles [D]. Nanchang University, 2014.
- [13] 左艳娜. 干燥对方便米粉老化特性影响的研究[D]. 南昌大学, 2014.
ZUO Y N. Study on the effect of drying on aging characteristics of rice noodle[d]. Nanchang University, 2014.
- [14] 唐文强. 方便米线产品断裂的原因分析与对策研究[D]. 西华大学, 2012.
TANG W Q. Cause analysis and countermeasures of instant rice noodle product fracture[D]. Xihua University, 2012.
- [15] 章焰. 方便米粉的抗老化及品质控制研究[D]. 华中农业大学, 2004.
ZHANG Y. Study on the anti aging and quality control of instant rice noodles[D]. Huazhong Agricultural University, 2004.
- [16] 孟亚萍. 挤压米粉丝加工及品质改良技术研究[D]. 江南大学, 2015.
MENG Y P. Processing and quality improvement of extruded rice noodles[D]. Wuxi, Jiangnan University, 2015.
- [17] 卿明义. 半干型调制方便米粉生产工艺的研究[D]. 广西大学, 2018.
QING M Y. Study on the production technology of semi dry instant rice noodle[D]. Guangxi University, 2018.
- [18] 雷婉莹, 吴卫国, 廖卢艳, 等. 鲜湿米粉品质评价及原料选择研究[J]. 食品科学, 2020(1): 74-79.
LEI W Y, WU W G, LIAO L Y, et al. Study on quality evaluation and raw material selection of fresh and wet rice noodle[J]. Food science, 2020 (1): 74-79.
- [19] 易翠平, 刘旸, 樊振南, 等. 籼米陈化对鲜湿米粉品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2018(6): 2.
YI C P, LIU Y, PAN Z N, et al. Effect of aging of Indica Rice on the quality of fresh and wet rice noodle[J]. Acta cerealis Sinica, 2018(6): 2.
- [20] 刘建, 康建平, 张星灿, 等. 鲜湿米粉品质改良研究[J]. 粮油食品科技, 2019, 27(6): 59.
LIU J, KANG J P, ZHANG X C, et al. Study on quality improvement of fresh and wet rice noodle[J]. Cereals, Oils and food technology, 2019, 27 (6): 59.
- [21] CHARUTIGON C, JITPUAKDREE J, NAMSREE P, et al. Effects of processing conditions and the use of modified starch and monoglyceride on some properties of extruded rice vermicelli[J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41(4): 642-651.
- [22] YALCIN S, BASMAN A. Effects of gelatinization level, gum and transglutaminase on the quality characteristics of rice noodle[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2008, 43(9): 1637-1644.
- [23] 石彦国. 食品挤压与膨化技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017, 21-37.
SHI Y G. Food extrusion and expansion technology [M]. Beijing: Science Press, 2017, 21-37. 

备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn/ch/index.aspx>), 中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。