

香蕉粉喷雾干燥工艺优化

陈启聪, 黄惠华^{*}, 王娟, 胡凯, 曾霖霖

(华南理工大学轻工与食品学院, 广州 510640)

摘要: 为了改善香蕉粉的喷雾干燥效果, 优化喷雾干燥工艺, 该文研究了进风温度、助干剂添加量、热空气流量、压缩空气流量的变化对香蕉汁喷雾干燥效果的影响, 并采用 Box-Behnken 响应曲面法优化喷雾干燥条件, 分析进风温度、热空气流量、压缩空气流量的变化对出风温度和产品得率的影响规律。结果显示: 当进风温度为 170.0℃、热空气流量为 36.08 m³/h、压缩空气流量为 489.70 L/h 时, 出风温度为 76~80℃, 产品得率最高, 达 44.28%, 所制备的香蕉粉含水率低于 5%, 符合固体饮料标准。由此说明, 通过响应曲面优化得到的喷雾干燥工艺能有效应用于加工香蕉粉。

关键词: 水果, 干燥, 工艺, 玻璃化转变温度, 响应曲面

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.08.056

中图分类号: TS205.9, TS255.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-08-0331-07

陈启聪, 黄惠华, 王娟, 等. 香蕉粉喷雾干燥工艺优化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 331-337.

Chen Qicong, Huang Huihua, Wang Juan, et al. Optimization of spray drying technology in processing banana powder[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 331-337. (in Chinese with English abstract)

0 引言

香蕉粉味道香甜, 营养价值高, 有植物奶粉的美称, 可冲水直接服食, 还可以作为多种食品的配(辅)料, 市场前景十分广阔。此外, 香蕉粉便于贮藏运输, 非常有利于解决增产不增收、卖蕉难的问题, 是极具前景的深加工产品^[1]。喷雾干燥制得的香蕉粉, 能较好的保持香蕉原有的碳水化合物、蛋白质、脂肪、氨基酸、维生素及矿物质等营养成分^[2]。

在正常的喷雾干燥过程中, 随着干燥的进行, 物料会发生从液态向橡胶态, 再到玻璃态的转变, 即玻璃化转变, 玻璃化转变时的温度称之为玻璃化转变温度(T_g)^[3]。本试验的原料为酶解制得的澄清香蕉汁, 由于其富含低分子糖和有机酸, 因而其 T_g 很低。在喷雾干燥过程中, 当颗粒的温度高于其黏流温度(物料的黏流温度通常比 T_g 高 10~23℃) 时, 会从其玻璃态转变成黏流态, 显示出黏性流动性质, 产生热黏壁现象^[4], 使产品得率降低, 严重影响喷雾干燥效果。通过调节喷雾干燥的加工参数, 使喷雾干燥时的颗粒温度低于其 T_g , 防止物料进入黏流态, 能有效改善喷雾干燥效果, 获得高的产品得率。台湾的 King^[5] 早在 1985 年就进行了应用喷雾干燥技术生产香蕉果汁粉的研究, 到目前这方面已有较多研究成果^[2,6],

但把玻璃化转变过程这一概念引入喷雾干燥过程, 并通过把握玻璃化转变来控制喷雾干燥效果的研究则未见报道。因此本试验研究了进风温度、助干剂添加量、热空气流量、压缩空气流量的变化对香蕉汁喷雾干燥效果的影响, 并运用响应面法优化工艺参数, 以得到使香蕉粉在喷雾干燥过程中保持在玻璃态的工艺参数, 为香蕉粉的生产提供参考。

1 材料和方法

1.1 主要材料与试剂

香蕉汁: 实验室通过香蕉酶解制得^[7], 总固形物质量分数为(20.03±0.31)%。麦芽糊精, 阿拉伯树胶均为食品级。

1.2 主要试验设备

B-290 Spray Dryer 喷雾干燥机(瑞士 BÜCHI 公司); APV-1000 高压均质机(丹麦 APV 公司); v20 真空干燥箱(瑞士 Salvips 公司); CR-400 色彩色差计(日本 KONICA MINOLTA); Q100 DSC 差示扫描量热仪(美国 TA 公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 工艺流程

香蕉汁→调配(添加麦芽糊精和阿拉伯胶)→30 MPa 均质→喷雾干燥→冷却→包装。

1.3.2 指标的测定方法

1) 总固形物质量分数测定: 精确称取一定量的香蕉汁(W_1), 105℃烘干至恒质量(W_2), 则总固形物质量分数= $W_2/W_1 \times 100\%$ ^[8]。

2) 产品得率测定: 产品得率=[喷雾干燥后香蕉粉质量/(喷雾干燥前香蕉汁的总固形物质量+喷雾干燥前麦芽糊精和阿拉伯胶的加入量)]×100%。

收稿日期: 2010-01-31 修订日期: 2010-08-15

基金项目: 国家星火计划项目(2007EA780005); 广东省教育部产学研合作项目(2007B090100009); 粤港关键领域重点突破项目(2007498612、2008A024200003、2008A024200004)

作者简介: 陈启聪(1984-), 男, 研究方向为食品科学。广州 华南理工大学轻工与食品学院, 510640

*通信作者: 黄惠华(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为食品科学, 农产品加工新技术。广州 华南理工大学轻工与食品学院, 510640。Email: fehhuang@scut.edu.cn

3) 含水率测定: 减压干燥法^[9]。

4) 颜色测定: 全自动色差计测定。

5) 溶解度测定: 1 g 香蕉粉加入 100 mL 水, 100 r/min 高速搅拌 5 min, 3 000 r/min 离心 5 min, 取上清液 25 mL 105℃烘干, 计算上清液中干物质含量所占的比例^[10]。

6) 溶解时间测定: 取 10 g 香蕉粉, 加入到盛有 100 mL 水的小烧杯中, 水温为 25℃, 用玻璃棒轻轻搅拌, 记录完全溶解所需要的时间^[11]。

7) 热分析: 采用 Q100 DSC 进行分析。

8) 流动性测定: 休止角注入法^[12]。

9) 堆积密度测定: 香蕉粉从漏斗中散落至 10 mL 量筒中, 测定 10 mL 香蕉粉的质量, 换算出其堆积密度^[12]。

1.3.3 单因素试验设计

固定喷雾干燥工艺中其他工艺参数水平, 选取进风温度、助干剂添加量、热空气流量、压缩空气流量 4 个因素做单因素试验, 研究各因素的变化对喷雾干燥效果的影响。

1.3.4 响应曲面试验设计

本试验根据 Box-Behnken 中心组合试验设计原理, 综合单因素试验结果, 选取影响香蕉粉喷雾干燥得率的主要因素进风温度(A)、热空气流量(B)和压缩空气流量(C)为试验因素, 研究出口温度、产品得率、含水率随 3 因素的变化规律, 并以香蕉粉得率为响应值, 进行 3 因素 3 水平响应面分析试验, 优化香蕉粉喷雾干燥工艺条件。

采用 Design-Expert 7.1 软件响应曲面设计程序对试验进行设计, 产生 17 个试验。试验因素和水平见表 1。

1.3.5 响应面分析及最佳工艺的确定

利用 Design-Expert 7.1 软件对试验数据进行处理分析, 建立回归方程, 并作响应曲面图, 利用该组图对任何 2 种因素的交互效应进行分析与评价, 从中确定最佳工艺。

表 1 响应面分析因子及水平表

Table 1 Factors and levels of response surface method (RSM) analysis

编码水平	进风温度 A/ ℃	热空气流量 B/ (m ³ ·h ⁻¹)	压缩空气流量 C/ (L·h ⁻¹)
-1	170	34	426
0	180	36	461
1	190	38	496

注: 其中各试验的样品处理量均为 300 mL, 添加香蕉汁总固形物质量分数 60%的麦芽糊精和 1%的阿拉伯胶, 进料量 4.6 mL/min。

1.3.6 显著性分析

采用 SPSS 17.0 软件的 One-Way ANOVA 进行数据分析, 显著性采用 q 法进行分析。

2 结果与分析

2.1 进风温度对喷雾干燥效果的影响

从表 2 可知, 进风温度对产品得率, 含水率及颜色的影响显著。随着进风温度上升, 含水率递减。根据固体饮料卫生标准 (GB7101—2003)^[13]规定, 固体饮料的含水率应不大于 5%, 才能保证其稳定性。当进风温度到达 180℃时, 含水率已低于 4%。喷雾干燥得到的香蕉粉亮度值均在 95 以上, 而红度值均为负, 黄度值均为正, 产品从肉眼上观察基本为白色。随进风温度上升, 亮度值出现一定下降, 红度值上升, 黄度值下降。然而进风温度和产品得率并不与正相关, 进风温度 170~180℃时产品得率均高于 40%, 并显著高于其他 3 个温度下的产品得率。进风温度太低, 不足以使全部液滴在干燥室内完全干燥, 部分半干颗粒因此发生黏壁现象, 导致产品得率较低。此外, 在喷雾干燥过程中, 当液滴干燥至转变为玻璃态后, 如进风温度过高, 可能会使喷雾干燥后段物料温度升高至其黏流温度, 因此发生热黏壁现象。进风温度为 200℃时, 可明显观察到干燥室出现大片的黏壁, 而且黏壁物料有轻微的焦化现象。

表 2 不同进风温度对喷雾干燥效果的影响

Table 2 Effects of different inlet air temperatures on spray drying

进风温度/℃	产品得率/%	含水率/%	亮度值 L*	红度值 a*	黄度值 b*
160	26.21 ^c ±0.52	6.22 ^a ±0.09	98.79 ^a ±0.26	-1.17 ^{bc} ±0.03	2.24 ^b ±0.04
170	43.17 ^b ±1.78	4.01 ^b ±0.09	98.85 ^a ±0.16	-1.21 ^c ±0.03	2.37 ^a ±0.03
180	40.44 ^b ±1.34	3.83 ^c ±0.07	97.81 ^b ±0.04	-1.19 ^c ±0.02	2.13 ^c ±0.04
190	28.38 ^c ±1.07	3.03 ^d ±0.04	96.78 ^c ±0.13	-1.13 ^b ±0.01	2.16 ^c ±0.02
200	14.92 ^d ±2.20	3.01 ^d ±0.07	95.35 ^d ±0.09	-1.01 ^a ±0.02	1.87 ^d ±0.03

注: 样品处理量为 300 mL, 添加香蕉汁总固形物质量分数 70%的麦芽糊精, 采用进料量为 4.6 mL/min, 热空气流量 36 m³/h, 压缩空气流量 461 L/h; 表中数值均以 (平均值±标准差) 表示, 上标字母表示显著性水平 0.05 时差异显著, n=4, 下同。

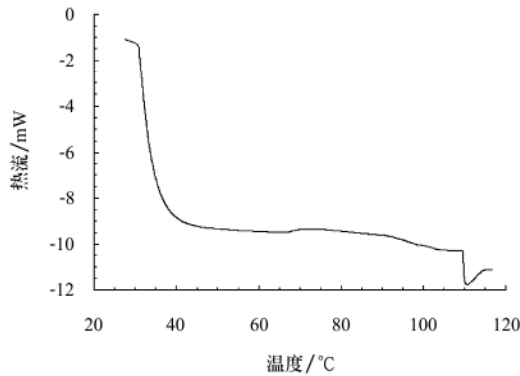
2.2 助干剂添加率对喷雾干燥效果的影响

添加具有高 T_g 的大分子助干剂, 可显著提高物料 T_g, 使喷雾干燥在合理的干燥温度条件下顺利进行^[14]。麦芽糊精因其溶解度高, 价格低, 是目前最常用的助干剂。阿拉伯胶具有很好的乳化性和成膜性, 能在香气成分的周围形成保护膜, 以防止其氧化和蒸发; 同时阿拉伯胶具有高度的水中溶解性及较低的溶液黏度, 这是

其他亲水胶体所不具备的特点之一^[15]。因此阿拉伯胶与麦芽糊精配用, 能有效改善喷雾干燥效果, 并形成保护膜降低香气成分的损失。

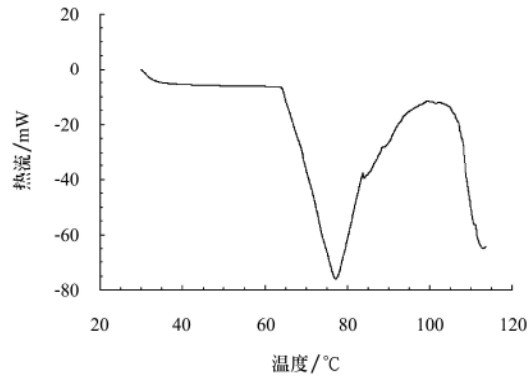
差示扫描量热法 (DSC) 是用于测定物料 T_g 的常用方法。体系在发生相转变时, 会有能量的改变, 即会吸热或放热。在 DSC 装置加热扫描过程中, 当体系发生相转变时, 吸热曲线会出现一个台阶, 此时的温度就是玻

璃化转变温度^[16]。助干剂添加前后香蕉汁的 DSC 分析结果如图 1 所示, 其中图 1a 是添加助干剂前香蕉汁的 DSC



a. 助干剂添加前香蕉汁的 DSC 曲线

曲线, 图 1b 是添加香蕉汁总固形物质量分数 70% 的麦芽糊精和 1% 的阿拉伯胶后的香蕉汁的 DSC 曲线。



b. 助干剂添加后香蕉汁的 DSC 曲线

图 1 香蕉汁的热分析

Fig.1 Thermal analysis curves of banana juice

由图 1 可知, 未添加助干剂的香蕉汁, 其 DSC 曲线在 35°C 时出现台阶, 因此其 T_g 在 35°C 左右; 添加助干剂并均质后, 香蕉汁的 T_g 增大到 70°C 左右, 使喷雾干燥顺利进行。

试验中选择麦芽糊精和阿拉伯胶为助干剂, 固定其他工艺条件, 研究助干剂添加率 (添加率以添加助干剂的质量占香蕉汁总固形物质量分数的百分数表示) 对喷雾干燥效果的影响。

从表 3 可知, 麦芽糊精添加率对喷雾干燥效果影响显著。随麦芽糊精添加率从 50% 增加到 60%, 产品得率从 28.32% 增加到 40% 以上, 含水率则随麦芽糊精添加率的提高而下降, 说明麦芽糊精能改善喷雾干燥效果。但麦芽糊精添加量过高, 糊精味重影响产品的风味, 因此麦芽糊精以添加 60% 为宜, 在此基础上, 研究阿拉伯胶添加率对喷雾干燥效果的影响, 结果如表 4 所示。阿拉伯胶添加率增大, 产品得率增加、含水率下降, 说明二者配用能更有利于喷雾干燥。阿拉伯胶添加率达到 1% 后, 产品得率变化不显著, 此外, 由于麦芽糊精和阿拉伯胶的溶解度均较高, 因此它们的添加率对产品溶解性影响不显著, 产品的水溶性指数都在 99% 以上; 然而添加麦芽糊精和阿拉伯胶均不利于产品的速溶性, 随添加率提高产品的溶解时间明显增加。阿拉伯胶添加率以 1% 为宜。

表 3 麦芽糊精添加率对喷雾干燥效果的影响

Table 3 Effects of maltodextrin content spray drying

麦芽糊精添加率/%	出粉率/%	含水率/%	水溶性指数/%	溶解时间/s
50	28.32 ^d ±0.57	5.03 ^a ±0.05	99.84 ^a ±0.04	21 ^d ±1.73
60	40.58 ^c ±0.42	4.13 ^b ±0.04	99.88 ^a ±0.02	37 ^e ±2.64
70	43.17 ^b ±0.49	4.01 ^c ±0.03	99.51 ^b ±0.03	52 ^b ±1.73
80	45.22 ^a ±0.99	3.92 ^d ±0.04	99.36 ^c ±0.04	66 ^a ±4.36

注: 样品处理量为 300 mL, 不添加阿拉伯胶, 设定进风温度 170°C, 进料量 4.6 mL/min, 热空气流量 36 m³/h, 压缩空气流量 461 L/h; 麦芽糊精添加率表示添加麦芽糊精的质量占香蕉汁总固形物质量的百分比。

表 4 阿拉伯胶添加率对喷雾干燥效果的影响

Table 4 Effects of gum arabic content spray drying

阿拉伯胶添加率/%	出粉率/%	含水率/%	水溶性指数/%	溶解时间/s
0.5	41.32 ^b ±0.80	4.12 ^a ±0.04	99.91 ^a ±0.02	24 ^d ±1.00
1.0	44.64 ^a ±0.74	4.00 ^b ±0.08	99.35 ^c ±0.09	36 ^c ±2.64
1.5	44.17 ^a ±1.32	3.92 ^b ±0.04	99.67 ^b ±0.04	49 ^b ±2.64
2.0	44.41 ^a ±0.76	3.83 ^{bc} ±0.04	99.14 ^d ±0.02	60 ^a ±4.36

注: 样品处理量为 300 mL, 添加香蕉汁总固形物质量分数 60% 的麦芽糊精, 设定进风温度 170°C, 进料量为 4.6 mL/min, 热空气流量 36 m³/h, 压缩空气流量 461 L/h; 阿拉伯胶添加率表示添加阿拉伯胶的质量占香蕉汁总固形物质量的百分比。

2.3 热空气流量对喷雾干燥效果的影响

从表 5 可知, 热空气流量对产品得率、含水率、休止角、堆积密度的影响显著。随着热空气流量增大, 产品得率和含水率都增大, 而休止角和堆积密度下降。热空气流量太低, 会导致气流从干燥室的下部向上部逆流, 这种空气流动模式会影响液滴在干燥室的移动轨迹, 使半干液滴撞向并黏附于干燥室壁, 导致产品得率低^[14]。因此提高热空气流量, 能提高产品得率。但流量增大, 液滴和热空气流在干燥室内停留时间降低, 因此水分蒸发不完全, 含水率增大, 并且会导致颗粒互相黏附结块的趋势更大, 黏附结块的颗粒间的空隙较分散颗粒更大, 从而产生较大的堆积体积, 导致堆积密度较低^[17]。此外, 热空气流量增大, 流动性也因含水率较高而下降, 因此热空气流量以不高于 36 m³/h 为宜。

表 5 不同热空气流量对喷雾干燥效果的影响

Table 5 Effects of different drying air flow rates on spray drying

热空气流量/(m ³ ·h ⁻¹)	出粉率/%	含水率/%	休止角/(°)	堆积密度/(g·mL ⁻¹)
32	32.42 ^d ±0.54	3.65 ^d ±0.03	22 ^d ±1	0.267 ^e ±0.00
34	39.66 ^c ±0.96	3.87 ^c ±0.03	26 ^c ±1	0.192 ^b ±0.00
36	44.39 ^b ±0.26	4.07 ^b ±0.04	38 ^b ±0	0.159 ^c ±0.01
38	42.31 ^b ±0.19	4.66 ^c ±0.04	48 ^a ±1	0.095 ^d ±0.01

注: 样品处理量为 300 mL, 麦芽糊精添加率为 60%, 阿拉伯胶添加率为 1%, 进风温度 170°C, 进料量 4.6 mL/min, 压缩空气流量 461 L/h。

2.4 压缩空气流量对喷雾干燥效果的影响

从表 6 可知, 压缩空气流量对喷雾干燥效果影响显著。当流量达到 461 L/h 时, 产品得率均高于 44%, 但差异已经不显著了。随着压缩空气流量增大, 产品得率和堆积密度都增大, 而休止角和含水率下降。压缩空气流量增大, 雾化程度增大, 液滴尺寸变小, 表面积增大, 产品受热充分, 水分蒸发得更完全, 产品得率也增加。此外, 颗粒平均粒径变小, 颗粒之间的空隙变小, 因此单位体积的香蕉粉质量增大, 堆积密度增大。然而颗粒的粒径变小不利于产品的流动性^[18], 因此压缩空气流量在 461~496 L/h 之间选择为适宜。

表 6 不同压缩空气流量对喷雾干燥效果的影响

Table 6 Effects of different compressed air flow rates on spray drying

压缩空气流量/ (L·h ⁻¹)	出粉率/%	含水率/%	休止角/°	堆积密度/ g·mL ⁻¹
390	39.42 ^e ±0.19	4.49 ^e ±0.04	61 ^a ±1.00	0.105 ^d ±0.00
426	41.56 ^d ±0.40	4.27 ^b ±0.05	50 ^b ±1.00	0.121 ^c ±0.00
461	44.02 ^a ±0.34	3.90 ^c ±0.07	43 ^c ±1.00	0.168 ^b ±0.00
496	44.33 ^a ±0.03	3.76 ^d ±0.09	25 ^d ±2.00	0.215 ^a ±0.00

注: 样品处理量为 300 mL, 麦芽糊精添加率为 60%, 阿拉伯胶添加率为 1%, 进风温度 170℃, 进料量 4.6 mL/min, 热空气流量 36 m³/h。

2.5 响应曲面试验分析

2.5.1 响应曲面试验结果

响应曲面分析方案及试验结果见表 7。

表 7 响应曲面试验方案及结果

Table 7 Program and experimental results of response surface methodology

试验号	编码水平			出风温度/ ℃	产品得率/ %	含水率/ %
	A	B	C			
1	-1	-1	0	73	38.27	3.89
2	1	-1	0	90	23.41	3.02
3	-1	1	0	81	40.13	4.17
4	1	1	0	93	27.67	3.14
5	-1	0	-1	74	41.61	4.12
6	1	0	-1	91	28.34	3.22
7	-1	0	1	78	43.46	3.96
8	1	0	1	92	29.45	3.05
9	0	-1	-1	75	33.71	3.09
10	0	1	-1	80	36.66	3.21
11	0	-1	1	78	35.21	2.97
12	0	1	1	84	37.65	3.12
13	0	0	0	80	40.44	3.74
14	0	0	0	79	40.63	3.81
15	0	0	0	82	40.01	3.94
16	0	0	0	80	40.94	3.92
17	0	0	0	81	41.02	3.85

注: A——进风温度; B——热空气流量; C——压缩空气流量。

2.5.2 出风温度的响应曲面分析

利用 Design-Expert 7.1 软件对表 7 的出风温度的试验数据进行回归分析, 得到出风温度的二次多项回归方程为

$$\text{出风温度} = 80.40 + 7.50A + 2.75B + 1.50C - 1.25AB + 0.25BC - 0.75AC + 4.17A^2 - 0.33B^2 - 0.82C^2 \quad (1)$$

在试验设计范围内, 一次项的偏回归系数的绝对值 $A > B > C$, 说明进风温度对出风温度的影响最大, 其次是热空气流量, 而压缩空气流量的影响最小。

对该模型进行方差分析, 结果见表 8 所示。

表 8 回归模型方差分析 (出风温度)

Table 8 Variance analyses of regression equation (outlet air temperature)

变异来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值
A	1	450.00	450.00	508.06	<0.0001
B	1	60.50	60.50	68.31	<0.0001
C	1	18.00	18.00	20.32	0.0028
AB	1	6.25	6.25	7.06	0.0326
AC	1	2.25	2.25	2.54	0.1550
BC	1	0.25	0.25	0.28	0.6117
A ²	1	73.39	73.39	82.86	<0.0001
B ²	1	0.44	0.44	0.50	0.5015
C ²	1	2.87	2.87	3.24	0.1151
模型	9	612.27	68.03	76.81	<0.0001
残差	7	6.20	0.89		
失拟项	3	1.00	0.33	0.26	0.8537
纯误差	4	5.20	1.30		
总变异	16	618.47			
		R ² =0.9900	校正 R ² =0.9771		

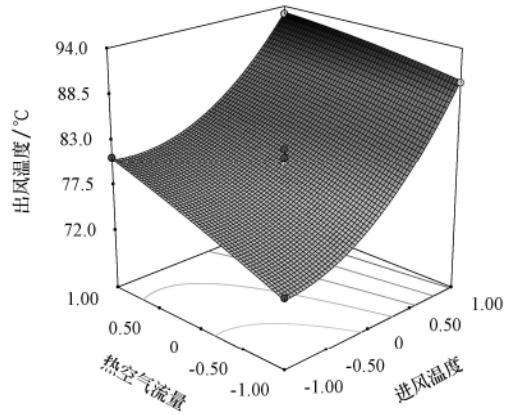
从表 8 方差分析结果来看, 出风温度回归模型的 P 值 < 0.0001, 说明模型高度显著; 模型的 R^2 和校正 R^2 分别为 0.9900 和 0.9771, 说明该模型能解释 97.71% 响应曲面的变化, 仅有总变异的 2.29% 不能用此模型解释。失拟项 $P > 0.05$, 说明模型拟合程度良好, 试验误差小, 该模型是合适的, 可用于预测喷雾干燥中的出风温度。由分析还可知, 一次项 A、B 以及二次项 A² 的 P 值均小于 0.0001, 对出风温度的影响高度显著, 而一次项 C 和交互项 AB 的 $P < 0.05$, 对出风温度影响显著, 而其余项对出风温度的影响均不显著。剔除不显著项后, 得到出风温度随进风温度、热空气流量、压缩空气流量变化的标准回归模型为

$$\text{出风温度} = 80.40 + 7.50A + 2.75B + 1.50C - 1.25AB + 4.17A^2 \quad (2)$$

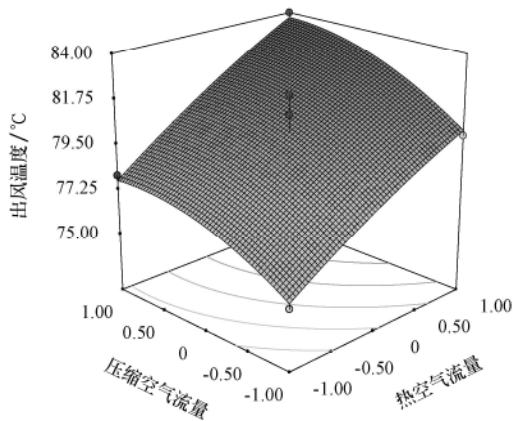
进风温度、热空气流量和压缩空气流量的交互作用对出风温度的影响效果见图 2 所示。

由于香蕉汁的 T_g 很低, 甚至在接近喷雾干燥装置出口时, 产品温度也可能会高于其 T_g , 这会导致产品进入黏流状态, 使颗粒间互相黏合或发生热黏壁现象^[19]。产品温度往往与出风温度相当接近, 因此出风温度轻微的改变对产品的状态和得率都有重要影响^[11]。使用合适的出风温度或在喷雾干燥装置底部引入冷空气, 使产品温度低于 T_g 能有效防止黏壁。而本试验装置的出风温度是不可控的, 只能通过其它可调的加工参数影响其变化, 因此分析各参数的交互作用对出风温度的影响具有必要性。从图 1 可以看出出风温度不仅随进风温度的增大而上升, 还和热空气流量和压缩空气流量有关。在进风温度和压缩空气流量都固定时, 热空气流量增大, 热空气流动到装置底部的时间缩短, 出风温度增大; 而在进风

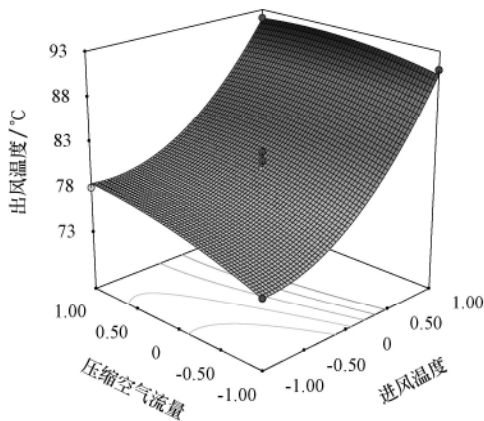
温度和热空气流量都固定时，出风温度也随压缩空气流量的增大而上升。因为压缩空气流量较低，液滴尺寸较大，需要热空气提供更多的能量，使热空气的温度下降较大，因此出风温度较低。只有把出风温度控制在一个狭窄的范围内，才能使喷雾干燥顺利进行，出风温度低于这个范围是不经济的，而高于这个范围则会使气流温度高于 $(T_g+20)^\circ\text{C}$ ，使微粒显示黏流性^[11]。因此把出风温度控制在合理范围内是十分重要的，而本模型可以用于预测出风温度的范围从而有利于控制喷雾干燥的效果。



a. 进风温度和热空气流量的交互作用 (压缩空气流量为 461 L/h)



b. 压缩空气流量和热空气流量的交互作用 (进风温度为 180 °C)



c. 压缩空气流量和进风温度的交互作用 (热空气流量为 36 m³/h)

图 2 出风温度的响应面分析

Fig.2 Analysis of outlet air temperature by response surface methodology

2.5.3 产品得率的响应曲面分析

利用 Design-Expert 7.1 软件对表 6 的产品得率的试验数据进行回归分析，得到产品得率的二次多项回归方程为

$$\text{产品得率} = 40.61 - 6.28A + 1.44B + 0.68C + 0.60AB - 0.13BC - 0.19AC - 4.17A^2 - 4.07B^2 - 0.73C^2 \quad (3)$$

在试验设计范围内，一次项的偏回归系数的绝对值 $A > B > C$ ，说明进风温度对产品得率的影响最大，其次是热空气流量，而压缩空气流量的影响最小。

对该模型进行方差分析，结果见表 9 所示。

表 9 回归模型方差分析 (产品得率)

Table 9 Variance analyses of regression equation (productivity)					
变异来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值
A	1	372.64	372.64	3 429.08	<0.0001
B	1	16.56	16.56	152.39	<0.0001
C	1	3.71	3.71	34.17	0.0006
AB	1	1.44	1.44	13.25	0.0083
AC	1	0.14	0.14	1.26	0.2987
BC	1	0.065	0.065	0.60	0.4645
A ²	1	73.05	73.05	672.20	<0.0001
B ²	1	69.84	69.84	642.68	<0.0001
C ²	1	2.23	2.23	20.52	0.0027
模型	9	551.34	61.26	563.71	<0.0001
残差	7	0.76	0.11		
失拟项	3	0.094	0.031	0.19	0.8988
纯误差	4	0.67	0.17		
总变异	16	552.10			
		$R^2=0.9986$	校正 $R^2=0.9969$		

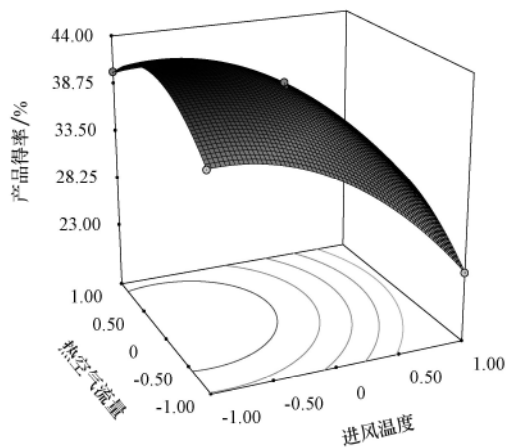
从表 9 方差分析结果来看，产品得率回归模型的 $P < 0.0001$ ，说明模型高度显著；模型的 R^2 和校正 R^2 分别为 0.9986 和 0.9969，说明该模型能解释 99.69% 响应曲面的变化，仅有总变异的 0.31% 不能用此模型解释。失拟项 $P > 0.05$ ，说明模型拟合程度良好，试验误差小，该模型是合适的，可用于预测喷雾干燥中的产品得率。由分析还可知，一次项 A、B 以及二次项 A²、B² 的 P 值均小于 0.0001，对产品得率的影响高度显著，而一次项 C、交互项 AB 以及二次项 C² 的 $P < 0.05$ ，对产品得率影响显著，而其余项对产品得率的影响均不显著。剔除不显著项，得到产品得率随进风温度、热空气流量、压缩空气流量变化的标准回归模型为

$$\text{产品得率} = 40.61 - 6.28A + 1.44B + 0.68C + 0.60AB - 4.17A^2 - 4.07B^2 - 0.73C^2 \quad (4)$$

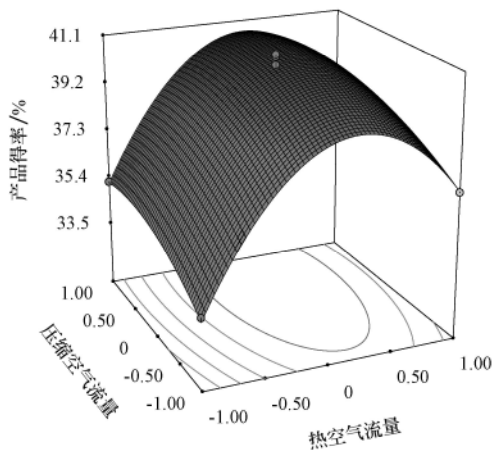
进风温度、热空气流量和压缩空气流量的交互作用对产品得率的影响效果见图 3 所示。

由图 3 可看出，在 170~190 °C 的范围，产品得率随进风温度的升高而急剧下降，说明进风温度过高导致黏壁严重，产品得率低。而在固定进风温度或压缩空气流量的情况下，产品得率随热空气流量的增大，均呈先增大后减小的趋势，而且热空气流量与压缩空气流量的交互作用对产品得率的影响更为显著，因为其曲面更陡。压缩空气流量对产品得率影响较小，随压缩空气流量增

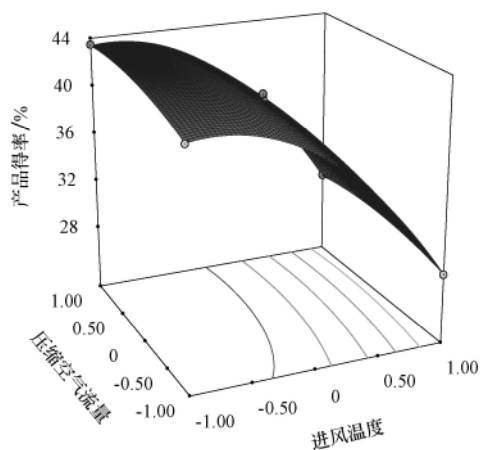
大, 产品得率稍作上升。



a. 进风温度和热空气流量的交互作用 (压缩空气流量为 461 L/h)



b. 压缩空气流量和热空气流量的交互作用 (进风温度为 180 °C)



c. 压缩空气流量和进风温度的交互作用 (热空气流量为 36 m³/h)

图3 产品得率的响应面分析

Fig.3 Analysis of productivity by response surface methodology

2.5.4 喷雾干燥工艺优化

以产品得率为响应值, 利用软件对试验数据进最优化分析, 得到当 $A=-1.00$, $B=0.04$, $C=0.82$, 即: 进风温度为 170.0 °C, 热空气流量为 36.08 m³/h, 压缩空气流量为 489.70 L/h 时, 产品得率最高, 为 43.52%; 此时出风温度的预测值为 78.5 °C。在此参数下进行验证试验,

产品得率为 44.28%, 而出风温度在喷雾干燥过程中保持在 76~80 °C, 试验值与预测值接近, 验证了该模型的可靠性。从表 7 可知, 各个参数制备的香蕉粉, 含水率均在 5% 之下, 符合固体饮料卫生标准, 具有较好的稳定性。

3 结论

1) 添加麦芽糊精和阿拉伯胶等 T_g 较高的助干剂可有效提高香蕉汁的 T_g , 使喷雾干燥顺利进行。本试验得到助干剂的最佳添加率为: 麦芽糊精添加率 60%, 阿拉伯胶添加率 1%。

2) 喷雾干燥 3 个工艺参数对出风温度和产品得率的影响效应均为: 进风温度 > 热空气流量 > 压缩空气流量。利用软件进行优化分析得到各因素的最佳组合为: 进风温度为 170.0 °C, 热空气流量为 36.08 m³/h, 压缩空气流量为 489.70 L/h, 在此条件下产品得率的预测值为 43.52%, 试验值为 44.28%; 出风温度的预测值为 78.5 °C, 试验值为 76~80 °C 的温度范围, 试验值与预测值接近, 模型是可靠的。

3) 在优化得到的工艺条件下, 利用喷雾干燥技术, 能生产出品质良好的香蕉粉, 含水率 < 5%, 具有较高稳定性, 适合于较长时间储藏。利用喷雾干燥制备香蕉粉是可行的, 是香蕉深加工的重要途径之一。

[参考文献]

- [1] 杨公明, 王娟, 程燕锋, 等. 香蕉粉的功能、加工现状及新技术[J]. 食品与生物技术学报, 2007, 26(5): 121-126. Yang Gongming, Wan Juan, Cheng Yanfeng, et al. Banana powder: functions current status and new technology on processing[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2007, 26(5): 121-126. (in Chinese with English abstract)
- [2] 刘长海, 夏雨, 杜冰, 等. 香蕉粉的制备工艺优化研究[J]. 食品科学, 2008, 29(12): 270-273. Liu Changhai, Xia Yu, Du Bing, et al. Optimization of preparation process of banana powder[J]. Food Science, 2008, 29(12): 270-273. (in Chinese with English abstract)
- [3] 黄立新, 周瑞君, Mujumdar A S. 喷雾干燥过程中产品玻璃化温度转变和质量控制[J]. 林产化学与工业, 2007, 27(1): 43-46. Huang Lixin, Zhou Ruijun, Mujumdar A S. Variation of glass transition temperature and control of product quality during spray drying[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2007, 27(1): 25-34. (in Chinese with English abstract)
- [4] Vinh T, Bhes R B, et al. Optimization of cocurrent spray drying process for sugar-rich foods. Part II: Optimization of spray drying process based on glass transition concept[J]. Journal of Food Engineering, 2005, (71): 66-71.
- [5] King V A E. Studies on the production of banana juice powder using spray drying[J]. Chung-kuo-Nung-Yeh-Hua-Hsueh-Hui-Chih-J-Chin-Agric-Chem-Soc, 1985, 23(1/2): 62-72.
- [6] 王建立, 管正学, 张学予. 我国香蕉资源的加工利用研究[J]. 资源科学, 1995, (1): 57-62. Wang Jianli, Guan Zhengxue, Zhan Xueyu. Study on banana resource and its processing and utilization in China[J].

- Resources Science, 1995, (1): 57—62. (in Chinese with English abstract)
- [7] 陈启聪, 黄惠华. 复合酶对香蕉果浆的酶解效果优化研究[J]. 食品与发酵工业, 2009, 35(10): 186—190.
Chen Qicong, Huang Huihua. Optimization of enzymolysis of banana puree by complex enzyme[J]. Food and Fermentation Industries, 2009, 35(10): 186—190. (in Chinese with English abstract)
- [8] Rosalia A Gonzalez-Soto, Edith Agama-Acevedo, Javier Solorza-Feria, et al. Resistant starch made from banana starch by autoclaving and debranching[J]. Starch/Starke, 2004, 56: 495—499.
- [9] 张水华. 食品分析[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2004.
- [10] Milton C C, Stringheta P C, Ramos A M, et al. Effect of the carriers on the microstructure of mango powder obtained by spray drying and its functional characterization[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2005, 6: 420—428.
- [11] 辛修锋, 余小林, 胡卓炎. 杨梅颗粒固体饮料的工艺研究[J]. 食品与发酵工业, 2009, 35(2): 162—165.
Xin Xiufeng, Yu Xiaolin, Hu Zhuoyan. The preparation of myrica rubra granulated solid beverage[J]. Food and Fermentation Industries, 2009, 35(2): 162—165. (in Chinese with English abstract)
- [12] 刘建学. 全藕粉喷雾干燥工艺试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 229—231.
Liu Jianxue. Experimental study on spray drying of whole lotus root powder[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(9): 229—231. (in Chinese with English abstract)
- [13] Athanasia M G, Konstantinos G A. Spray drying of tomato pulp in dehumidified air: I. The effect on product recovery[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 66: 25—34.
- [14] 胡国华. 阿拉伯胶在食品工业中的应用[J]. 粮油食品科技, 2003, 11(2): 7—8.
Hu Guohua. The application of arabic gum in food industry[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2003, 11(2): 7—8. (in Chinese with English abstract)
- [15] GB 7101—2003, 固体饮料卫生标准[S].
- [16] 赵黎明. DSC和脉冲NMR研究食品的玻璃化和玻璃化转变温度[J]. 食品科技, 2001, (1): 14—16.
Zhao Liming. DSC and pulse NMR in studying food glass and its glass transition temperature[J]. Food Science and Technology, 2001, (1): 14—16. (in Chinese with English abstract)
- [17] Athanasia M G, Konstantinos G A. Spray drying of tomato pulp in dehumidified air: II. The effect on powder properties [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 66: 35—42.
- [18] Gong Zhiqing, Zhang Min, Sun Jincai. Physico-chemical properties of cabbage powder as affected by drying methods [J]. Drying Technology, 2007, 5(25): 913—916.
- [19] Vinh T, Bhes R B, Tony H. Optimization of co-current spray drying process of sugar-rich foods. Part I—Moisture and glass transition temperature profile during drying[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 71: 55—65.

Optimization of spray drying technology in processing banana powder

Chen Qicong, Huang Huihua^{*}, Wang Juan, Hu Kai, Zeng Linlin

(College of Light Industry and Food Sciences, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to establish the processing technology of banana powder, effects of three spray drying technological parameters, namely inlet air temperature, drying air flow rate and compressed air flow rate, as well as drying aid content, on spray drying of banana powder were analyzed by Box-Behnken response surface methodology. Results showed that the productivity was highest and reached 44.28% under the optimal processing parameters of the inlet air temperature 170.0°C, drying air flow rate 36.08 m³/h and compressed air flow rate 489.70 L/h, with 60% maltodextrin and 1% gum arabic were used as drying aid, and the qualities of the product were good. Thus it can be concluded that it is possible to produce banana powder efficiently with the technology of spray drying.

Key words: fruits, drying, technology, glass transition temperature, response surface