

固化工艺对食品罐内涂膜中双酚 A 二环氧甘油醚分配系数的影响

任小玲 梅小虎 胡英平 叶敏立 向红*
(华南农业大学食品学院, 广东广州 510642)

摘要: 本文根据 Box-Beknhen 的中心组合实验设计原理, 在单因素实验的基础上, 采用三因素三水平的响应曲面分析法, 考察烘烤温度、涂膜厚度和烘烤时间对食品罐内涂膜中双酚 A 二环氧甘油醚 (BADGE) 的分配系数的影响, 建立食品罐内涂膜固化工艺参数优化的二次多项式数学模型。结果表明: 三因素影响程度大小次序为: 涂膜厚度 > 烘烤温度 > 烘烤时间, 且三因素两两交互作用均为极显著 ($p < 0.01$)。最优固化工艺为: 烘烤温度 200 °C、涂膜厚度 12 g/m²、烘烤时间 12 min, 此时 BADGE 的分配系数值为 2313.04, 且与实验值较为接近。说明该响应面得到的工艺参数准确可靠, 对提高食品罐的安全性具有一定的指导意义。

关键词: BADGE, 分配系数, 固化工艺, 响应面法, 食品罐内涂膜

Effect of curing technology on the partition coefficients of BADGE in food cans coating

REN Xiao-ling, MEI Xiao-hu, HU Ying-ping, YE Min-li, XIANG Hong*

(College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: On the basis of one-factor tests and the Box-Behnken center-united experimental design principle, the method of response surface analysis with 3 factors and 3 levels was adopted. A second order quadratic equation for optimizing the curing technology parameters in the food cans process was built. Response surface and contour were graphed with the partition coefficients of BADGE as the response value. Based on the analysis of the response surface plots and their corresponding contour plots, the effects of curing temperature, coating thickness and curing time were explored. Results showed that the curing temperature, coating thickness and curing time had significant influence on the partition coefficient of BADGE. The optimal parameters were curing temperature 200 °C, coating thickness 12 g/m², curing time 12 min, and partition coefficient value of BADGE was maximum, its value was 2313.04. In addition, the validation test results and theory value were very close under this condition. Therefore, the optimal curing technology parameters were accurate and reliable by the response surface.

Key words: BADGE; partition coefficients; curing technology; response surface methodology; food cans coating

中图分类号: TS206.4

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2017)06-0239-06

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2017.06.037

金属罐作为重要的食品包装容器, 广泛应用于饮料、罐头等领域^[1-3]。通常, 金属罐内涂膜是采用刷、淋、浸、喷等一些简单的加工方法^[4]经固化处理, 形成一层均匀的薄膜(涂层), 该涂层将对食品罐内容物起保护作用。近些年的研究表明^[5], 金属印铁在印刷加工的过程中, 固化加工条件(比如: 烘烤温度、涂膜厚度、烘烤时间)的不同会导致内涂膜中一些有害物质不同程度地向食品中发生迁移扩散, 如双酚 A (BPA)、双酚 A 二环氧甘油 (BADGE)、双酚 F 二环氧甘油醚 (BFDGE) 及其环氧衍生物等的迁移, 导致食品品质受到严重的影响^[6-11], 甚至会对人类和动物

的生殖遗传功能造成干扰^[12-14]。在 2002/16/EC《关于某些环氧衍生物在食品内涂膜材料中的应用》指令中规定了 BADGE 和 BFDGE 及其衍生物在食品以及食品模拟物中总含量皆不得超过 1 mg/kg^[15]。

迁移物分配系数表明迁移物在聚合体和食品之间的分配平衡关系, 指迁移达到平衡时包装材料内小分子物质的浓度与其在食品(模拟物)中的浓度比值^[16]是迁移模型中的一个重要参数, 分配系数值越小表明越多的化学物从包装材料迁移进入食品(模拟物)。为了更细致、更全面的了解食品中有害迁移物质的迁移规律, 本文选择 95% 乙醇溶液作为萃取

收稿日期: 2016-09-02

作者简介: 任小玲 (1993-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品包装材料安全, E-mail: rxl_scau@163.com。

* 通讯作者: 向红 (1964-), 男, 教授, 研究方向: 食品包装与运输包装, E-mail: xianghong@scau.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31171689)。

条件相对比较苛刻的模拟液代表^[17-18]通过单因素和响应面实验优化得出食品罐内涂膜的最佳固化工艺条件,从而为制罐企业提供生产参考,确保食品的安全。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

金属罐印铁(单面涂膜) 三水新金盈印铁制罐有限公司;乙腈、甲醇 色谱纯(纯度 $\geq 99.9\%$),美国 Fisher 公司;丙酮 分析纯(纯度 $\geq 99.0\%$),广州化学试剂厂;双酚 A 色谱纯(纯度 $\geq 99.9\%$),USA Sigma-Aldrich;乙醇 分析纯(纯度 $\geq 99.7\%$),天津富于精细化工有限公司。

LC-20A 高效液相色谱仪 日本岛津公司;C₁₈反相色谱柱(4.6 mm \times 250 mm 5 μ m) 中国迪马公司;HH-6 型恒温水浴锅 中国常州澳华仪器有限公司;micropipette 微量移液枪 德国 VITLAB 公司;Millipore Academic 超纯水系统 美国 Millipore 公司;CP 系列分析天平 奥豪斯仪器有限公司;KH-4FAS 型电热鼓风干燥箱 上海讯能电热设备有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 标准溶液的配制 中间储备液:取 25 mg BADGE 标准品于 25 mL 容量瓶中,用乙腈为溶剂定容摇匀,得到 1 mg/mL 的标准储备液,放于 4 $^{\circ}$ C 冰箱保存备用。

单标储备液:取上述储备液用乙腈稀释 100 倍,得到 10 μ g/mL 的单标储备液。

标曲溶液制备:分别取上述单标储备液,然后用乙腈稀释,配制成 0.01、0.1、0.5、1.0、2.0 μ g/mL 的 BADGE 的标准溶液。

将上述配制的标准溶液按浓度由低到高进样,并按照 1.2.4 中的色谱检测条件进行检测,以浓度为横坐标,峰面积为纵坐标,得到迁移物的线性方程及检测限。

1.2.2 样品前处理 将金属罐铁皮样片剪裁成 5 cm \times 1 cm 的金属薄片,用洗涤剂刷洗内外涂层各 5 次,再用自来水冲洗 30 s,最后用蒸馏水清洗 3 次,置于烘箱中烘干备用。

将小铁片分别放入具塞试管内,根据迁移实验要求,加入 10 mL 95% 乙醇模拟液^[19]并密封,置于 80 $^{\circ}$ C 的水浴锅中进行浸泡萃取 2 h,取出,待浸泡液温度降至室温,取适量经 0.22 μ m 滤膜过滤,进液相检测。

1.2.3 金属罐内涂膜中迁移物初始浓度的测定 用小刀刮取适量金属薄片(5 cm \times 1 cm)内涂膜,并收集于具塞试管内,加入 200 mL 丙酮萃取液密封后于 80 $^{\circ}$ C 水浴萃取 24 h,取出,待浸泡液温度降至室温后,通过旋转蒸发将其浓缩至 10 mL,取适量萃取液经 0.22 μ m 滤膜过滤,采用液相色谱法检测迁移物浓度。

1.2.4 色谱检测条件 色谱柱:Waters X Terra C₁₈ 色谱柱(250 mm \times 4.6 mm 5 μ m);柱温:30 $^{\circ}$ C;检测波长(荧光检测器):激发波长 227 nm,发射波长

313 nm;流动相:乙腈-水(体积比 45:55);流速:1.0 mL/min;进样量:10 μ L。

1.2.5 单因素实验设计 通过预实验,确定对烘烤温度、涂膜厚度和烘烤时间三个因素进行单因素实验。

1.2.5.1 烘烤温度对 BADGE 分配系数的影响 在不破坏涂膜分子且涂膜固化彻底的情况下^[5,20],选取经过前处理,涂膜厚度为 11 g/m²、烘烤时间为 12 min、烘烤温度分别为 170、180、190、200、210 $^{\circ}$ C 的金属薄片(5 cm \times 1 cm)五组,用小刀刮取适量的金属薄片内涂膜,并收集于具塞试管内,加入 10 mL 95% 乙醇模拟液密封后于 80 $^{\circ}$ C 水浴萃取 24 h,取出,待浸泡液温度降至室温后,取适量萃取液经 0.22 μ m 滤膜过滤,再上液相检测。每组实验 3 个平行,结果取平均值。

1.2.5.2 涂膜厚度对 BADGE 分配系数的影响 选取经过前处理,烘烤温度为 200 $^{\circ}$ C、烘烤时间为 12 min、涂膜厚度分别为 6、8、10、12、14 g/m² 的金属薄片(5 cm \times 1 cm)五组,每组 3 个平行,样品处理及检测方法同 1.2.5.1。每组实验 3 个平行,结果取平均值。

1.2.5.3 烘烤时间对 BADGE 分配系数的影响 选取经过前处理,烘烤温度为 200 $^{\circ}$ C、涂膜厚度为 10 g/m²、烘烤时间分别为 8、10、12、14、16 min 的金属薄片(5 cm \times 1 cm)五组,每组 3 个平行,样品处理及检测方法同 1.2.5.1。每组实验 3 个平行,结果取平均值。

1.2.6 响应面因素水平设计 在单因素实验的基础上,根据 Box-Beknhen 中心组合实验设计原理^[21],采用响应面法^[22]设计三因素三水平实验对固化工艺进行优化,因素水平设计见表 1。

表 1 响应面实验因素水平

Table 1 The response surface level of factors

水平	因素		
	A 烘烤温度 ($^{\circ}$ C)	B 涂膜厚度 (g/m ²)	C 烘烤时间 (min)
1	210	12	14
0	200	10	12
-1	190	8	10

1.3 分配系数的测定

分配系数(K)为迁移达到平衡时包装材料内小分子物质(BADGE)的浓度与其在食品(模拟物)中的浓度比值,计算公式如下:

$$K = \frac{C_{初} - C_{迁}}{C_{迁}}$$

式中, $C_{初}$, 初始质量浓度(μ g/g) = 迁移物浓度(μ g/mL) \times 萃取液体积(mL) / 涂膜总质量(g), 涂膜总质量(g) = 涂膜厚度(g/m²) \times 铁片面积(m²); $C_{迁}$, 迁移物质量浓度(μ g/g) = 迁移物浓度(μ g/mL) / 模拟液密度(g/mL)。本实验中 95% 乙醇的密度为 0.8 g/mL。

1.4 数据处理

采用 SPSS 分析迁移物浓度及分配系数之间的偏差。

2 结果与分析

2.1 标曲制作、线性方程与检测限

将 1.2.1 中配制的混合标准溶液按浓度由低到高进样,并按照 1.2.4 中的色谱检测条件进行检测得到迁移物的线性方程及检测限,色谱图如图 1 所示。

线性方程: $Y = 8886174.97X - 46164.73$ 相关系数 $R^2 = 99.99\%$; 检测限为 0.001 mg/L 。

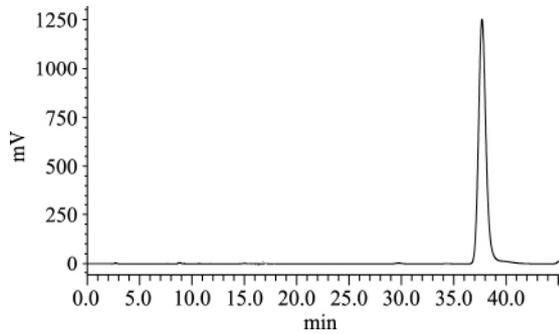


图 1 BADGE 标液液相色谱图
Fig.1 Chromatogram of BADGE

2.2 单因素实验结果与分析

2.2.1 烘烤温度对 BADGE 分配系数的影响 内涂膜中 BADGE 的分配系数随烘烤温度的变化情况如图 2 所示。

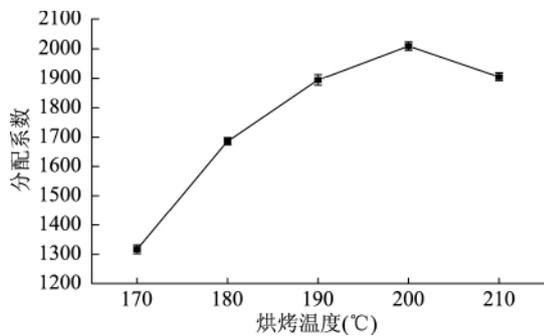


图 2 烘烤温度对 BADGE 分配系数的影响
Fig.2 The effect of curing temperature on the partition coefficient value of BADGE

由图 2 可知,烘烤温度的变化对内涂膜中 BADGE 的分配系数影响显著。BADGE 的分配系数随着烘烤温度的升高呈现先升后降的趋势,且在 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,BADGE 的分配系数值为 2009,达到最大值。当烘烤温度再增加时,BADGE 分配系数值略有下降,这是由于烘烤温度过高极易造成化学分子键断裂,导致涂膜脆化干裂,附着力下降,从而导致分配系数偏低。同时烘烤温度也不能过低,当烘烤温度较低时,涂料固化不彻底,涂料中残留的单体量较多,体系交联度不高,涂膜附着力下降,从而导致分配系数偏低。

2.2.2 涂膜厚度对 BADGE 分配系数的影响 内涂膜中 BADGE 的分配系数随涂膜厚度的变化情况如图 3 所示。

由图 3 得知,涂膜厚度的变化对内涂膜中 BADGE 分配系数的影响显著,随着涂膜厚度的增加分配系数呈现逐渐减小的趋势。食品罐内涂膜在固

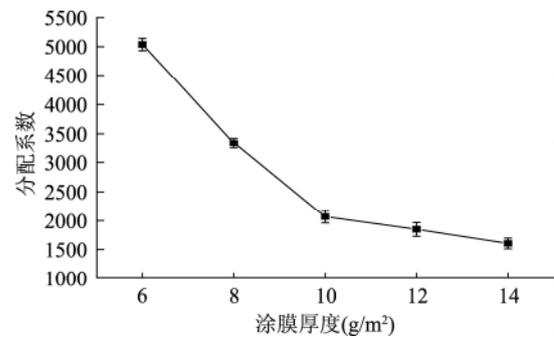


图 3 涂膜厚度对 BADGE 分配系数的影响
Fig.3 The effect of coating thickness on the partition coefficient value of BADGE

化过程中,通常单一涂膜量不超过 8 g/m^2 ,实际生产中,为了更好地提高涂膜固化性能,商家开始采用多次涂膜技术,使涂膜结构更加紧密,迁移物更难向外迁移。对于单层涂膜,虽然涂膜厚度越小越有利于固化完全,有害单体残留量也就越少,但涂膜厚度也不能太小,否则会导致金属罐表面涂膜覆盖不全或涂膜太薄使金属罐受到食品内容物的腐蚀,因此选择 10 g/m^2 的涂膜厚度以确保涂膜性能。

2.2.3 烘烤时间对 BADGE 分配系数的影响 内涂膜中 BADGE 的分配系数随涂膜厚度的变化情况如图 4 所示。

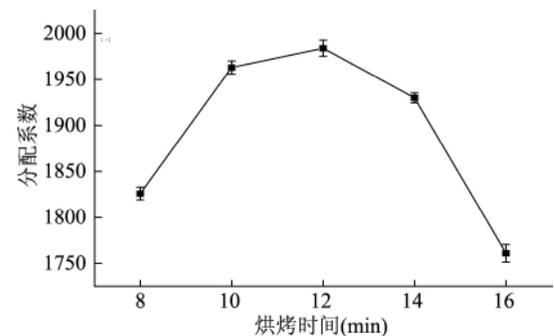


图 4 烘烤时间对 BADGE 分配系数的影响
Fig.4 The effect of curing time on the partition coefficient value of BADGE

由图 4 可知,烘烤时间的长短对内涂膜中 BADGE 的分配系数影响显著。BADGE 的分配系数随着烘烤时间的延长而增大,在 12 min 时,BADGE 的分配系数达到最大值,继续延长烘烤时间,BADGE 分配系数呈下降趋势。这可能由于烘烤时间不够,涂膜虽然能固化,但涂膜分子运动依然较活跃,体系交联度不高,导致分子迁移量较多。但高温下涂膜烘烤时间过长又极易造成分子键的断裂,涂膜易脆化干裂,使之附着力下降,从而导致分配系数偏低。

2.3 响应面优化实验

2.3.1 实验结果与方差分析 以 $A = (T - 200) / 10$ (烘烤温度)、 $B = (d - 11) / 3$ (涂膜厚度)、 $C = (t - 12) / 4$ (烘烤时间) 为自变量,以 BADGE 的分配系数 (Y) 为响应值,按表 1 进行响应面实验,共 15 个实验点,其中 1~12 为析因实验,13~15 为中心实验,用来估算实验误差,实验设计及结果见表 2。然后进行二

次回归拟合,得到 BADGE 模型对应的回归方程为:

$$Y = -2246.67 + 132.62A + 360.50B + 16.38C + 41.75AB - 237.00AC + 122.75BC - 229.83A^2 - 688.08B^2 - 329.83C^2$$

表2 响应面实验设计及结果

Table 2 Response surface design arrangement and experiment results

实验号	A	B	C	Y: BADGE 的分配系数
1	-1	-1	0	887
2	1	-1	0	1062
3	-1	1	0	1512
4	1	1	0	1854
5	-1	0	-1	1291
6	1	0	-1	2037
7	-1	0	1	1811
8	1	0	1	1609
9	0	-1	-1	975
10	0	1	-1	1463
11	0	-1	1	749
12	0	1	1	1728
13	0	0	0	2262
14	0	0	0	2231
15	0	0	0	2247

利用软件 Design-Expert 8.0.6.1 对实验结果进行分析处理得到表3 BADGE 回归模型方差分析。

由表3可知,回归模型达到极显著水平($p < 0.0001$),且失拟误差为 $0.5225 > 0.05$,表明该回归方程对模型是有利的,无失拟因素存在,模型是合适的,因此可用该模型分析最优固化工艺条件。又 BADGE 分配系数的回归模型 $R^2 = 0.9997$, $R^2_{Adj} = 0.9990$,进一步说明该模型与实验具有良好的拟合度。由表3中 F 值的大小可以判断各因素对 BADGE 分配系数影响的强弱, F 值越大,影响作用越强。各

表3 响应面实验方差分析

Table 3 The variance analysis of response surface

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	$Pr > F$
模型	3.600E+006	9	4.000E+005	1618.70	<0.0001
A	1.407E+005	1	1.407E+005	569.50	<0.0001
B	1.040E+006	1	1.040E+006	4207.82	<0.0001
C	2145.13	1	2145.13	8.68	0.0320
AB	6972.25	1	6972.25	28.22	0.0032
AC	2.247E+005	1	2.247E+005	909.31	<0.0001
BC	60270.25	1	60270.25	243.93	<0.0001
A ²	1.950E+005	1	1.950E+005	789.37	<0.0001
B ²	1.748E+006	1	1.748E+006	7075.16	<0.0001
C ²	4.017E+005	1	4.017E+005	1625.71	<0.0001
残差	1235.42	5	247.08		
失拟误差	754.75	3	251.58	1.05	0.5225
纯误差	480.67	2	240.33		
总和	3.601E+006	14			

因素对 BADGE 分配系数影响程度大小的次序为:涂膜厚度 > 烘烤温度 > 烘烤时间,其中涂膜厚度和烘烤温度对金属罐内涂膜中 BADGE 分配系数的影响达到极显著水平($p < 0.0001$)。

2.3.2 各因素间的交互效应分析 将建立的回归模型中的任一因素固定在零水平,得到另外两个因素的交互影响结果,各因素间交互作用的响应曲面图和等高线图见图5~图7。从等高线图可直观反映出2个因素间交互作用的显著程度,其中圆形表示两因素间交互作用不显著,而椭圆形表示两因素间交互作用显著^[23]。

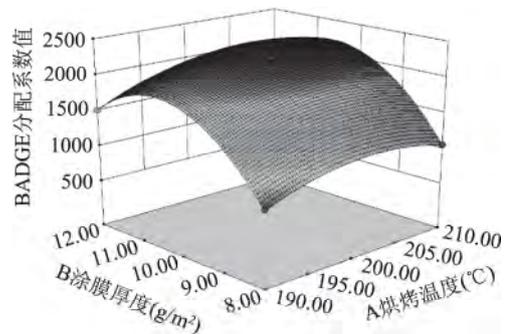


图5 烘烤温度和涂膜厚度对 BADGE 分配系数的等高线和响应面图

Fig.5 Contour line and curved surface of response of curing temperature and coating thickness to partition coefficient of BADGE

由图5~图7响应面立体图和等高线图可知,烘烤温度和涂膜厚度、烘烤温度和烘烤时间、涂膜厚度和烘烤时间的交互作用对 BADGE 分配系数值的影响均显著。同时由等高线的疏密程度可以判断,三个因素对食品罐内涂膜迁移物 BADGE 分配系数的影响程度大小次序为涂膜厚度 > 烘烤温度 > 烘烤时间。

图5响应面图可以看出:以烘烤时间为中心零点时,随着涂膜厚度的增加,BADGE 的分配系数值

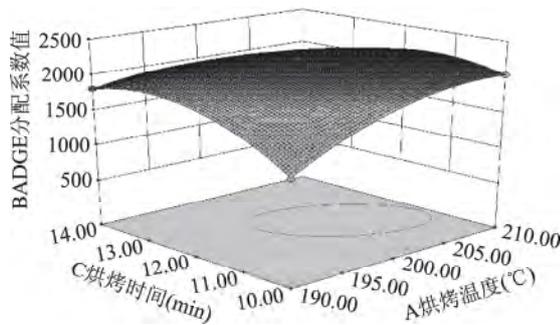


图6 烘烤温度和烘烤时间对BADGE分配系数的等高线和响应面图

Fig.6 Contour line and curved surface of response of curing temperature and curing time to partition coefficient of BADGE

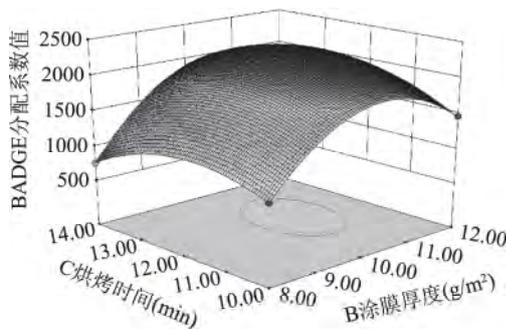


图7 涂膜厚度和烘烤时间对BADGE分配系数的等高线和响应面图

Fig.7 Contour line and curved surface of response of curing time and coating thickness to partition coefficient of BADGE

先增后减,变化幅度较大,且在12 g/m²时达到最大;随着烘烤温度的增加,BADGE的分配系数值先增后减,变化幅度中等,且在200 °C时达到最大。

图6响应面图可以看出:以涂膜厚度为中心零点时,BADGE的分配系数值随烘烤时间的增加呈现先增后减的趋势,变化幅度较小,且在12 min时达到最大。随着烘烤温度的增加,BADGE的分配系数值先增后减,变化幅度中等,且在200 °C时达到最大。

图7响应面图可以看出:以烘烤温度为中心零点时,BADGE的分配系数值随烘烤时间的增加呈现先增后减的趋势,变化幅度较小,且在12 min时达到最大。随着涂膜厚度的增加,BADGE的分配系数值先增后减,变化幅度较大,且在12 g/m²时达到最大。

最后,根据所得模型经响应面回归分析,得出金属罐内涂膜中迁移物BADGE的最大分配系数对应的最优固化工艺参数:烘烤温度A = 203.38 °C,涂膜厚度B = 11.80 g/m²,烘烤时间C = 11.82 min,此时BADGE的分配系数值为2316.93。

2.3.3 验证实验 考虑金属罐生产加工过程的实际操作情况,最终确定修正后最优工艺条件为:烘烤温度为200 °C、涂膜厚度为12 g/m²、烘烤时间为12 min,在此条件下进行3组实验,得到金属罐内涂膜中BADGE的分配系数值分别为:2311.21、2314.33、2313.58,平均为2313.04,与理论预测值基本一致,证实了该模型的有效性。

3 结论

涂膜厚度、烘烤温度、烘烤时间对迁移物BADGE分配系数的影响显著($p < 0.05$),三个因子的影响程度大小为涂膜厚度 > 烘烤温度 > 烘烤时间,迁移物BADGE的分配系数最大时对应的最优固化工艺参数为:烘烤温度为200 °C、涂膜厚度为12 g/m²、烘烤时间为12 min,此时BADGE的分配系数值为2313.04。

参考文献

- [1] Tsai Y V, Bowman A. Effect of pH and salinity on the migration of Bisphenol A from coatings of epoxy food cans [J]. Abstracts of Papers of the American Chemical Society 2014 247.
- [2] Miao J, Xue M, Zhang H. Analysis of Residual Bisphenol A, Bisphenol F and Their Epoxy Derivatives in Food Cans Coating by High Performance Liquid Chromatography [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry 2009 37(6): 911-914.
- [3] Leepipatpiboon N, Sae-Khow O, Jayanta S. Simultaneous determination of bisphenol-A-diglycidyl ether, bisphenol-F-diglycidyl ether and their derivatives in oil-in-water and aqueous-based canned foods by high-performance liquid chromatography with fluorescence detection [J]. Journal of Chromatography A, 2005, 1073(1-2): 331-339.
- [4] 古育华. 食品罐内全喷涂的涂膜质量和处理措施 [J]. 包装与食品机械 2012(6): 67-70.
- [5] 辛文青, 向红, 刘海波, 等. 烘烤工艺对食品罐内涂中BADGE和BFDGE残留的影响 [C]. 武汉: 第十三届全国包装工程学术会议 2010.
- [6] 刘海波, 赵宇晖, 张作全, 等. 三片食品罐外壁涂膜中有害物质向内涂的迁移 [J]. 食品科学 2012(6): 194-198.
- [7] 李婷, 柏建国, 刘志刚, 等. 食品金属包装材料中化学物的迁移研究进展 [J]. 食品工业科技 2013(15): 380-383.
- [8] 鲍洋. 食品金属罐内涂层中6种双酚类物质的检测及迁移规律的研究 [D]. 无锡: 江南大学 2012.
- [9] Lorber M, Schecter A, Paepke O, et al. Exposure assessment of adult intake of bisphenol A (BPA) with emphasis on canned food dietary exposures [J]. Environment International, 2015 (77): 55-62.
- [10] Xie Y, Bao Y, Wang H, et al. Release of bisphenols from can coatings into canned beer in China market [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture 2015 95(4): 764-770.
- [11] Jingchuan Xue, Kurunthachalam Kannan. Novel Finding of Widespread Occurrence and Accumulation of Bisphenol A Diglycidyl Ethers (BADGEs) and Novolac Glycidyl Ethers (NOGEs) in Marine Mammals from the United States Coastal Waters [J]. Environmental Science and Technology 2016 50(4): 1703-1710.
- [12] 刘泽兵, 王丽, 叶宣光, 等. 环境内分泌干扰物双酚A对小鼠甲状腺滤泡上皮细胞增殖和凋亡的影响 [J]. 中国病理生理杂志 2013(6): 1076-1080.
- [13] Bolt H, Stewart J. Highlight report: the bisphenol A controversy [J]. Archives of Toxicology, 2011, 85(12): 1491-1492.
- [14] Graciela R, Lago V, Jorge L, et al. Cytotoxic effects of

BADGE(bisphenol A diglycidyl ether) and BFDGE(bisphenol F diglycidyl ether) on Caco-2 cells *in vitro* [J]. Arch Toxicol 2006, 80(11) : 748-755.

[15] Official Journal of the European Communities. 2002/16/EC on the use of certain epoxy derivatives in materials and articles intended to come into contact with foodstuffs [S]. 2002 L51/27.

[16] Ana Sanches-Silva, Catarina Andre, Isabel Castanheira, et al. Study of the Migration of Photoinitiators Used in Printed Food-Packaging Materials into Food Simulants [J]. Agricultural and Food Chemistry 2009 57(20) : 9516-9523.

[17] Lin Q, Li H, Zhong H, et al. Migration of Ti from nano-TiO₂-polyethylene composite packaging into food simulants [J]. Food Additives and Contaminants Part A: Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment 2014 31(7) : 1284-1290.

[18] Oliveira E C, Echegoyen Y, Cruz S A, et al. Comparison between solid phase microextraction (SPME) and hollow fiber liquid phase microextraction (HFLPME) for determination of

extractable from post-consumer recycled PET into food simulants [J]. TALANTA 2014(127) : 59-67.

[19] 徐毅, 薛山, 贺稚非, 等. 食品包装中增塑剂 DEHP 毒性特点及迁移研究进展 [J]. 食品工业科技 2013(21) : 385-389.

[20] 倪俊义, 江轲, 张作全. 烘烤工艺对彩印覆膜铁 DRD 罐性能的影响 [J]. 包装工程 2014(17) : 69-71, 90.

[21] 任永胜, 段潇潇. 大化工类研究生实验设计与数据处理课程教学实践与探索 [J]. 广州化工 2012(1) : 133-134, 136.

[22] Ayyanar Athijayamani, Raju Ganesamoorthy, Konda Thulasiraman Loganathan, et al. Modelling and Analysis of the Mechanical Properties of Agave Sisalana Variegata Fibre/Vinyl Ester Composites Using Box- Behnken Design of Response Surface Methodology [J]. Mechanical Engineering 2016 62(62) 5: 273-280.

[23] 郭菲, 刘继, 黄彭, 等. 响应面分析法优化紫茄皮花色苷的提取工艺 [J]. 食品工业科技 2014(6) : 268-272, 276.

(上接第 238 页)

相关 ($p < 0.0001$)。在保证产品膨胀度和吸水性指数的前提下, 辣条最佳挤压参数为: 物料含水率 24%, 前模孔径 3 mm, 螺槽宽度为 20 mm 左右的双头螺杆; 此时辣条的膨胀度为 4.62, 吸水性指数为 686.53%。

参考文献

[1] 叶琼娟, 杨公明, 张全凯, 等. 挤压膨化技术及其最新应用进展 [J]. 食品安全质量检测学报 2013 4(5) : 1229-1334.

[2] 王思明, 赵丽芹, 张曦. 荞麦面膨化食品配方优化的研究 [J]. 食品与机械 2010 26(3) : 138-140.

[3] 赵海波, 马涛. 螺杆挤压技术在食品工业中的应用 [J]. 农产品加工·学刊 2006(6) : 39-41.

[4] 杨涛, 辛建美, 徐青, 等. 双螺杆挤压技术在食品工业中的应用研究现状 [J]. 食品与生物技术学报 2009, 28(6) : 734-739.

[5] 颜梦婷, 刘施琳, 朱丰, 等. 休闲食品加工技术研究进展 [J]. 食品安全质量检测学报 2015 6(10) : 4013-4018.

[6] 申丽丽, 周惠明, 朱科学, 等. 麦胚糙米混合粉的挤压制备工艺研究 [J]. 食品工业科技 2014 35(13) : 213-218.

[7] Martinez M M, Sanz T, Gomez M. Influence of wheat flour subjected to different extrusion conditions on the rheological behavior and thermal properties of batter systems for coating [J].

LWT-Food Science and Technology 2015 64: 1309-1314.

[8] 孙一源, 张岩, 石曙东. 食品挤压机的研究现状 [J]. 农业工程学报 1993 9(1) : 50-56.

[9] 庄海宁, 冯涛, 金征宇, 等. 挤压加工参数对重组米生产过程及产品膨胀度的影响 [J]. 农业工程学报 2011, 27(9) : 349-355.

[10] 杜冰, 梁淑茹, 程燕锋, 等. 挤压膨化加工过程参数及其影响 [J]. 食品与机械 2008 24(5) : 133-135.

[11] 郑志, 王丽娟, 杨雪飞, 等. 膨化营养杂粮粉的挤压制备工艺研究 [J]. 食品科学 2012 33(18) : 118-122.

[12] 汪沐. 单螺杆和双螺杆挤压膨化机的一般比较 [J]. 饲料工业 2006 27(23) : 5-8.

[13] 王威, 李喜宏, 刘霞, 等. 响应面优化全麦面条挤压工艺研究 [J]. 食品工业 2016 37(1) : 36-39.

[14] 孙志坚, 张敏, 刘明, 等. 青稞挤压糊化粉的研制 [J]. 食品科学技术学报 2014 32(1) : 27-32.

[15] 刘超, 张波, 魏益民, 等. 挤压参数对小麦淀粉挤出物截面膨化率的影响 [J]. 食品工业科技 2012 33(14) : 269-275.

[16] 张璇, 胡玲萍, 禹海文, 等. 苜蓿玉米面双螺杆挤压工艺研究 [J]. 核农学报 2016 30(2) : 304-312.

[17] 陈建宝, 丁玉庭, 刘磷, 等. 响应面法分析工艺参数对麦麸挤压膨化产品吸水特性的影响 [J]. 浙江工业大学学报 2009 37(2) : 161-165.

欢迎订阅《食品工业科技》