

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.041

# 水酶法制取大豆油乳状液射流空化破乳工艺优化

李良<sup>1</sup> 田甜<sup>1</sup> 吴长玲<sup>1</sup> 李杨<sup>1,2</sup> 江连洲<sup>1</sup> 王中江<sup>1</sup>

(1. 东北农业大学食品学院, 哈尔滨 150030; 2. 哈尔滨市食品产业研究院, 哈尔滨 150028)

**摘要:** 为探究射流空化对水酶法制取大豆油所产生乳状液的破乳机制, 通过光散射粒径、破乳率、总提油率和乳状液显微结构为指标分别考察射流空化压力、射流空化温度和射流空化时间对乳状液破乳机制的影响。破乳率和总提油率随着射流空化压力(0.2~1.0 MPa)、射流空化温度(80~120℃)、射流空化时间(5~25 s)的增加而增加, 射流空化作用实现彻底破乳后, 破乳率和总提油率反而下降。乳状液粒径分布及激光共聚焦显微镜显示破乳后分散的小粒径油滴转变成直径较大的油滴。在单因素试验基础上, 采用响应面分析法对射流空化辅助水解破乳工艺条件进行优化, 确定最优破乳工艺条件为: 射流空化压力 0.8 MPa、射流空化温度 100.92℃、射流空化时间 21.38 s, 此条件下破乳率为 90.29%, 总提油率为 87.06%。

**关键词:** 大豆油; 水酶法; 射流空化; 破乳率; 总提油率

**中图分类号:** TS201.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2019)09-0357-07

## Optimization of Emulsion Demulsification Technique with Jet Cavitation for Water-enzymatic Soybean Oil

LI Liang<sup>1</sup> TIAN Tian<sup>1</sup> WU Changling<sup>1</sup> LI Yang<sup>1,2</sup> JIANG Lianzhou<sup>1</sup> WANG Zhongjiang<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Harbin Food Industry Research Institute, Harbin 150028, China)

**Abstract:** In order to explore the demulsification mechanism of soybean oil emulsion produced by aqueous enzymatic method, the effects of jet cavitation pressure, jet cavitation temperature and jet cavitation time on the demulsification mechanism of soybean oil emulsion were investigated by light scattering particle size analysis, demulsification rate, total oil extraction rate and emulsion microstructure. The results showed that the demulsification rate and total oil extraction rate were increased with the increase of jet cavitation pressure (0.2~1.0 MPa), jet cavitation temperature (80~120℃) and jet cavitation time (5~25 s). After the complete demulsification, the demulsification rate and total oil extraction rate were decreased. The particle size distribution of emulsion and laser confocal microscopy showed that the dispersed small size oil droplets were changed into larger diameter oil droplets after demulsification. On the basis of single factor experiment, response surface methodology was used to optimize the process conditions of jet cavitation assisted hydrolysis demulsification. The optimum demulsification conditions were determined as follows: jet cavitation pressure was 0.8 MPa, jet cavitation temperature was 100.92℃, jet cavitation time was 21.38 s. Under this condition, the demulsification rate was 90.29%, and the total oil extraction rate was 87.06%. The research result provided a theoretical basis for jet cavitation assisted enzymatic demulsification technology, and it was beneficial to the industrial application and promotion of aqueous enzymatic oil extraction technology.

**Key words:** soybean oil; water-enzymatic method; jet cavitation; demulsification rate; total oil extraction rate

收稿日期: 2019-03-01 修回日期: 2019-03-21

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2016YFD0401402)、黑龙江省应用技术与开发计划重大项目(GA17B002)、黑龙江省博士后面上资助经费项目(LBH-Z18030)和黑龙江省自然科学基金项目(C2018024)

**作者简介:** 李良(1981—),男,副教授,博士生导师,主要从事粮食、油脂及植物蛋白工程研究,E-mail: liliangneau@163.com

**通信作者:** 王中江(1987—),男,讲师,博士,主要从事粮食、油脂及植物蛋白工程研究,E-mail: wzjname@126.com

## 0 引言

大豆是全世界主要油料作物之一,大豆油营养价值丰富,含有人体必需脂肪酸——亚油酸,具有重要的生理功能<sup>[1]</sup>。目前大豆油的提取方式主要是机械压榨法和有机溶剂提取法,但因压榨法产率较低,有机溶剂萃取易引起环境污染和有机溶剂残留<sup>[2-3]</sup>,目前许多学者正致力于寻找更有效环保的提油方法。水酶法是一种利用酶制剂降解油料作物的细胞壁,并利用非油成分(蛋白质和碳水化合物)对油和水亲和力的差异将油和非油成分分离的技术,具有反应条件稳定且无溶剂残留等优点<sup>[4]</sup>。然而由于水酶法萃取体系中同时存在大量的油脂和蛋白质,造成乳化现象影响油脂释放,油料提取时间长,使得水酶法工艺仍处于理论研究阶段<sup>[5]</sup>。

为提高提油效率,现已出现多种加速酶水解的方法,文献[6]利用磷脂酶 A1 对水酶法提取大豆油过程中形成的乳状液进行酶解破乳,破乳效果显著。文献[7]发现超声波产生的波动改变了物质结构,有效提高了反应效率并缩短了破乳时间。但由于超声等方法产生的热效应较低,易引起加热不均匀,且其产生的能量不能完全转移到反应中,这导致能量消耗和无效加速<sup>[8]</sup>,而利用射流空化技术可强化酶促过程。射流空化技术是一种利用水流在短时间高速挤压膨胀产生巨大气泡,从而产生较大的热量和压力的新型加工方式,射流空化系统产生物理机械作用力和湍流形成微喷射,能更有效地破坏细胞壁,形成更稳定温和的酶促反应<sup>[9]</sup>。

本文在传统制油的基础上,先使用碱性蛋白酶将大豆中油脂和蛋白质分离,再对大豆油脂体破乳工艺进行优化得到大豆油脂,探索制备破乳率和总提油率高的最佳射流空化处理工艺,为水酶法制油工业化提供新的思路和理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

大豆,品种为东农 46;碱性蛋白酶 Alcalase 2.4L,丹麦 Novo 公司;试验所需基础试剂均为分析纯,北京化学试剂公司。

### 1.2 试验器材

Zetasizer Nano - ZS90 型光散射粒径分析仪,英国 Malvern 公司;AL204 型分析天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;PHS-3C 型雷磁 pH 计,上海精科有限公司;S22-2 型恒温磁力搅拌器,上海司乐仪器有限公司;HWS-26 型电热恒温水浴锅,

上海一恒仪器有限公司;TGL-16G 型高速台式离心机,上海卢湘仪离心机仪器有限公司;JY92-2D 型射流空化机,北京华瑞创世科技有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 大豆油脂制备工艺流程

工艺流程为:大豆→清理→粉碎→水分调节→挤压膨化→粉碎→加水混合→碱性蛋白酶 Alcalase 2.4L 酶解(加酶量 5 000 U/g、酶解温度 55℃、酶解 pH 值 9.0、酶解时间 2 h)→灭酶→离心→乳状液→调节 pH 值→破乳→离心→大豆油脂。

#### 1.3.2 水酶法大豆油射流空化破乳工艺

将适量大豆清洗并加热干燥后粉碎,过 100 目筛,将过筛后物料以液料比 5 mL/g 与蒸馏水混合得到混合溶液,向溶液中加入 2% 的 Alcalase 2.4L 进行酶解,通过高速离心机离心(5 000 r/min)20 min,得到游离油、乳状液、水解液和残渣,提取乳状液和水解液调节 pH 值为 7.0,80℃ 下预热 20 min 并放入射流空化机中进行破乳,利用射流空化压力、温度和时间控制参数,破乳后在 3 000 r/min 下离心 15 min 得到大豆油脂。

#### 1.3.3 单因素试验

在其他条件不变的情况下,选取射流空化压力为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 MPa,射流空化温度为 80、90、100、110、120℃,射流空化处理时间为 5、10、15、20、25 s,进行单因素试验,通过破乳率和总提油率比较分析确定大豆油的射流空化制备单因素最优条件。

#### 1.3.4 响应面优化试验

以破乳率和总提油率为考察指标,考察射流空化压力、空化温度和空化时间对这两个指标的影响规律。利用 Design-Expert 软件进行响应面分析设计优化试验结果,设置三因素二水平进行试验,进一步优化确定大豆油破乳的最佳条件。

#### 1.3.5 破乳率

参考文献[10]的检测方法及破乳率计算公式为

$$R_1 = F/T \times 100\% \quad (1)$$

式中  $R_1$ ——破乳率

$F$ ——破乳后游离油质量

$T$ ——乳状液含油脂总质量

#### 1.3.6 总提油率

参考文献[11]的检测方法及总提油率计算公式为

$$A = (O - R) / O \times 100\% \quad (2)$$

式中  $O$ ——油料含油脂质量

$R$ ——酶解后残渣含油质量

### 1.3.7 乳状液粒径、粒径分布和 PDI 值

将未处理乳状液和射流空化乳状液样品用蒸馏水稀释 1 000 倍,室温(20℃)下采用激光粒径分析仪测定粒径分布曲线、平均粒径和 PDI 值,其中油滴折光指数为 1.47,驱散相折光指数为 1.333<sup>[12]</sup>。

### 1.3.8 乳状液的微观结构

用激光共聚焦显微镜观察射流空化前后蛋白乳化液的显微结构和分布。具体方法参照文献[13]加以改动,将尼罗红溶于异丙醇溶液中形成质量浓度为 1 mg/mL 的染液,吸取 1 mL 的蛋白乳化液用 40 μL 的尼罗红染色液染色,充分混合均匀。取染色的乳化液(15 μL)滴在载玻片上,盖上盖玻片,利用指甲油封片,避光条件下放置 12 h,在盖玻片上加一小滴香柏油,采用激光共聚焦显微镜扫描图像。

### 1.3.9 统计分析

每组试验重复 3 次,数据表示为平均值 ± 标准偏差。采用 SPSS 20.0 对试验数据进行相关性分析、方差分析和显著性分析;采用 Origin 9.0 软件制图;采用 Design-Expert 软件进行响应面数据分析及方差分析。

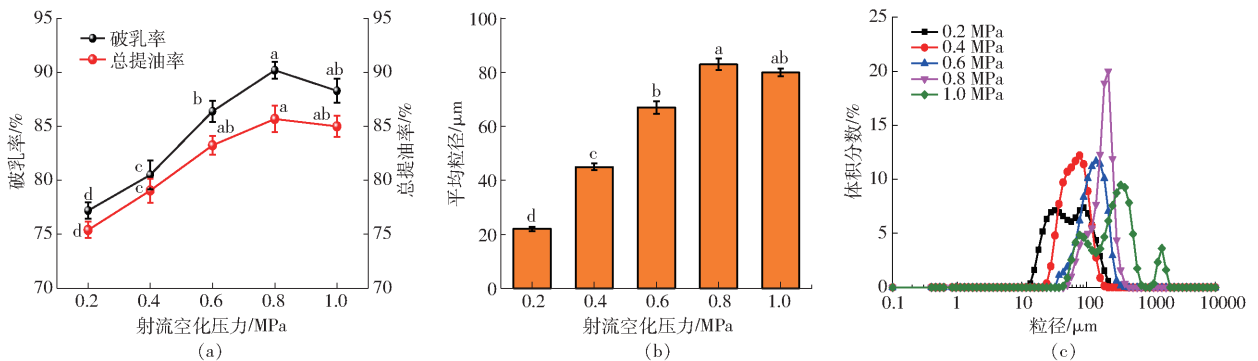


图1 射流空化压力对乳状液粒径分布、破乳率和总提油率的影响

Fig. 1 Effect of jet cavitation pressure on emulsion particle size distribution, demulsification rate and total oil extraction rate

变性失活,破乳率和总提油率降低。因此选择最佳射流空化压力为 0.8 MPa。

### 2.1.2 射流空化温度

图2为射流空化温度对乳状液的影响,随着温度的增加,破乳率和总提油率先增加后减小(图2a),平均粒径显著增加(图2b),射流空化温度为 80℃时,油滴粒径呈单峰分布,均处于较小直径范围,随着温度增加,油滴粒径分布向右平移,呈现双峰分布(图2c),当射流空化温度升高到 100℃以后,破乳率和总提油率降低。这是因为乳化液在高温条件下不稳定,随着温度升高,油相表面膜粘度减小,布朗运动增加,液滴之间高速运动形成破乳现象<sup>[17-18]</sup>。温度过高会使碱性蛋白酶失活,破乳率和总提油率降低,而对粒径影响不显著( $P > 0.05$ )。文

## 2 结果与讨论

### 2.1 射流空化破乳工艺单因素试验

#### 2.1.1 射流空化压力

图1(图中同曲线上不同字母表示差异显著,下同)为射流空化压力对乳状液的影响。由图1可以看出,随着射流空化压力增加,破乳率、总提油率逐渐上升(图1a),平均粒径显著增加(图1b),乳状液油滴粒径分布曲线相应右移(图1c),当射流空化压力达到 0.8 MPa 时,破乳率、总提油率和平均粒径最大,继续提高射流空化压力,破乳率和总提油率反而下降,平均粒径变化不显著( $P > 0.05$ )。这是因为,射流空化产生的高速剪切力和气蚀效应改变了乳状液中蛋白质的空间结构,使蛋白质变性,破坏了乳液体系的稳定性,从而达到破乳的目的。文献[14-15]研究发现超高压均质处理后会改变稀奶油乳状液的体系结构,稀奶油膨胀系数增加,粒径增大。且射流空化作用于碱性蛋白酶,使酶切位点更多地暴露出来,促进了酶促反应的进行,提高了破乳率和总提油率<sup>[16]</sup>。随着压力的持续增加,瞬时空化作用使酶分子结构遭到破坏,导致酶

献[19]利用水浴和油浴加热方法对水酶法制得的大豆乳状液进行了破乳研究,得出热处理能显著增加破乳率和总提油率。文献[20]对葵花籽油乳状液的加热破乳工艺也进行了优化。这说明加热温度使油滴稳定下降,油滴发生聚合,有效提高了乳状液破乳率和总提油率。

#### 2.1.3 射流空化时间

考察射流空化压力为 0.8 MPa、温度为 100℃时,射流空化时间对破乳率、总提油率和粒径分布的影响,试验结果见图3。随着射流空化时间延长,破乳率和总提油率逐渐上升(图3a),当射流空化时间达到 20 s 时,破乳率和总提油率较大,继续延长射流空化时间,破乳率变化不显著,总提油率稍有下降,这是因为破乳时间达到一定值时,蛋白

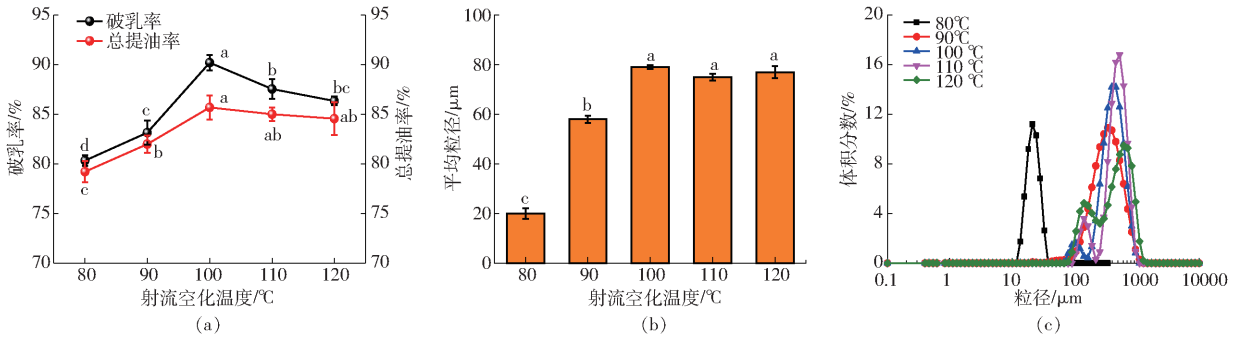


图2 射流空化温度对乳状液粒径分布、破乳率和总提油率的影响

Fig. 2 Effect of jet cavitation temperature on emulsion particle size distribution, demulsification rate and total oil extraction rate

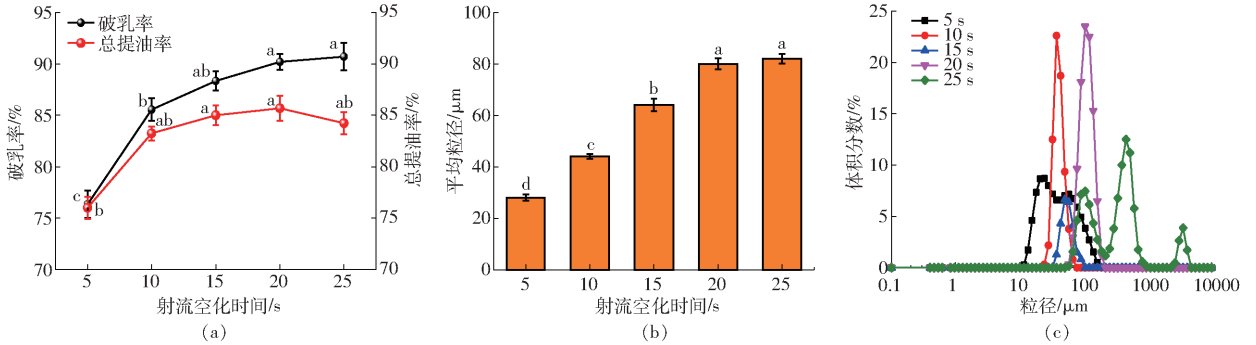


图3 射流空化时间对乳状液粒径分布、破乳率和总提油率的影响

Fig. 3 Effect of jet cavitation time on emulsion particle size distribution, demulsification rate and total oil extraction rate

质变性程度稳定,破乳率和总提油率不再增加,射流空化处理过长时间会使乳液长时间持续高温高压状态,导致乳液水分蒸发,破乳产生的油滴与乳状液中油滴重新结合,不利于油脂释放,破乳率变化不显著,总提油率下降<sup>[21-22]</sup>。油滴平均粒径随着射流空化时间延长显著增长(图3b),粒径分布曲线逐渐向右偏移(图3c),处理时间过长,粒径由高瘦单峰分布转变为多峰分布,表明乳状液体系不稳定。

2.2 射流空化破乳工艺响应面试验

利用统计软件 Design-Expert 进行响应曲面法过程优化,以射流空化压力、射流空化温度、射流空化时间为自变量,以破乳率  $R_1$  (%) 和总提油率  $R_2$  (%) 为响应值,根据中心组合设计原理,具体试验方案与结果见表1、2,表中 A、B、C 表示射流空化压力、射流空化温度、射流空化时间的编码值。

表1 因素编码

Tab. 1 Encode of factors

编码	因素		
	射流空化压力/MPa	射流空化温度/°C	射流空化时间/s
-1	0.6	90	15
0	0.8	100	20
1	1.0	110	25

通过统计分析软件 Design-Expert 进行数据分析,建立破乳率二次响应面回归模型为

$$R_1 = 90.16 + 0.38A + 0.51B + 0.91C - 0.61AB - 0.43AC - 0.18BC - 2.70A^2 - 2.22B^2 - 1.86C^2 \quad (3)$$

表2 试验设计及结果

Tab. 2 Experiment scheme and results

试验序号	A	B	C	$R_1$ /%	$R_2$ /%
1	-1	-1	0	83.33	76.59
2	1	-1	0	85.36	79.33
3	-1	1	0	86.33	80.58
4	1	1	0	85.90	78.55
5	-1	0	-1	83.39	77.60
6	1	0	-1	84.98	80.27
7	-1	0	1	87.07	82.59
8	1	0	1	86.95	80.30
9	0	-1	-1	85.34	79.35
10	0	1	-1	85.98	81.79
11	0	-1	1	86.54	83.06
12	0	1	1	86.45	82.98
13	0	0	0	88.56	86.51
14	0	0	0	90.88	87.28
15	0	0	0	90.45	87.44
16	0	0	0	89.89	85.34
17	0	0	0	91.00	87.60

由表2和表3可知,拟合方程的因变量与自变量间的线性关系显著,拟合方程模型回归项显著 ( $P < 0.0001$ ), 而失拟项不显著 ( $P > 0.05$ ), 模型拟合度为 92.43%, 表明该模型可有效模拟试验数据,

表3 破乳率模型回归与方差分析结果

Tab.3 Analysis results of regression and variance of demulsification rate model

来源	自由度	平方和	均方	F	P
A	6.697 800	1	6.697 800	6.659 182	0.036 4
B	2.091 013	1	2.091 013	2.078 956	0.192 5
C	1.178 113	1	1.178 113	1.171 320	0.315 0
AB	1.512 900	1	1.512 900	1.504 177	0.259 7
AC	0.731 025	1	0.731 025	0.726 810	0.422 1
BC	0.133 225	1	0.133 225	0.132 457	0.726 6
A <sup>2</sup>	30.762 990	1	30.762 990	30.585 610	0.000 9
B <sup>2</sup>	20.807 280	1	20.807 280	20.687 310	0.002 6
C <sup>2</sup>	14.496 340	1	14.496 340	14.412 750	0.006 7
回归	85.928 230	9	9.547 581	9.492 531	<0.000 1
剩余	7.040 595	7	1.005 799		
失拟	3.099 675	3	1.033 225	1.048 715	0.462 6
误差	3.940 920	4	0.985 230		
总和	92.968 820	16			

故可利用该模型对响应值最优值的理论推测。通过  $F$  检验比较得知各因子贡献率由大到小依次为:射流空化压力、射流空化温度、射流空化时间。基于响应面优化分析确定的最优工艺参数为:射流空化压力 0.8 MPa、射流空化温度 100.92℃、射流空化时间 21.38 s,响应值破乳率最优值为 90.29%。

通过统计分析软件 Design-Expert 进行数据分析,建立总提油率  $R_2$  二次响应面回归模型为

$$R_2 = 86.83 + 0.14A + 0.70B + 1.24C - 1.19AB - 1.24AC - 0.63BC - 4.84A^2 - 3.23B^2 - 1.81C^2 \quad (4)$$

由表4可知,拟合方程的因变量与自变量间的线性关系显著,拟合方程模型回归项显著( $P < 0.000 1$ ),而失拟项不显著( $P > 0.05$ ),模型拟合度

表4 总提油率模型回归与方差分析结果

Tab.4 Results of regression and variance analysis

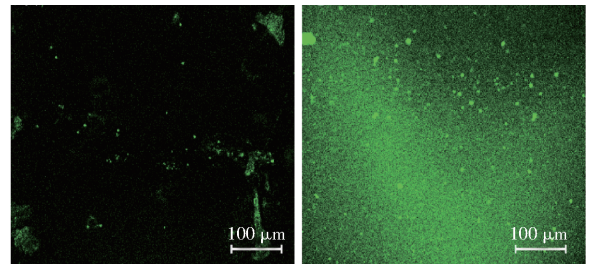
来源	自由度	平方和	均方	F	P
A	0.148 513	1	0.148 513	0.289 124	0.607 4
B	3.878 113	1	3.878 113	7.549 908	0.028 6
C	12.300 8	1	12.300 8	23.947 19	0.001 8
AB	5.688 225	1	5.688 225	11.073 83	0.012 6
AC	6.150 4	1	6.150 4	11.973 6	0.010 5
BC	1.587 6	1	1.587 6	3.090 739	0.122 1
A <sup>2</sup>	98.562 79	1	98.562 79	191.882	<0.000 1
B <sup>2</sup>	44.016 44	1	44.016 44	85.691 19	<0.000 1
C <sup>2</sup>	13.729 4	1	13.729 4	26.728 39	0.001 3
回归	201.202 2	9	22.355 8	43.522 25	<0.000 1
剩余	3.595 645	7	0.513 664		
失拟	0.105 725	3	0.035 242	0.040 393	0.987 6
误差	3.489 92	4	0.872 48		
总和	204.797 8	16			

为 98.24%,表明该模型可有效模拟试验数据,故可利用该模型对响应值最优值的理论推测。通过  $F$  检验可比较得知各因子贡献率从大到小为:射流空化时间、射流空化温度、射流空化压力。基于响应面优化分析确定的最优工艺参数为:射流空化压力 0.8 MPa、射流空化温度 100.92℃、射流空化时间 21.38 s,响应值总提油率最优值为 87.06%。

采用联合求解法确定破乳率和总提油率均优条件为:射流空化压力 0.8 MPa、射流空化温度 100.92℃、射流空化时间 21.38 s,此条件下破乳率 90.29%,总提油率 87.06%。

### 2.3 激光共聚焦显微镜分析

图4为乳状液射流空化前后油脂聚集状态。由图4a可以看出,未破乳乳状液少量油体从蛋白中分离出来,表现出粒径较小呈分散状态的脂肪球,大量油体与蛋白结合不能以游离油的形式分离出来,总提油率较低。如图4b所示,射流空化处理使破乳程度增加,水解液中脂肪球破坏,表面膜大程度暴露,脂肪球相互聚集以较大粒径游离脂肪球形式存在,可以通过离心分离出来,此时破乳率和总提油率显著提高,这与文献[23]研究结论一致。



(a) 空化前 (b) 空化后  
图4 射流空化前后乳状液的微观结构

Fig.4 Microstructures of emulsion before and after jet cavitation

### 2.4 物理破乳效果比较分析

分别采用传统水酶法破乳和射流空化法对乳状液进行破乳处理,比较两种加热破乳法的破乳效果,结果见表5。

表5 破乳效果分析结果

Tab.5 Demulsification effect analysis results

参数	水酶法	射流空化水酶法
破乳压力/MPa	常压	0.8
破乳温度/℃	55	100.92
破乳时间/s	7 200	21.38
破乳率/%	80.32	90.29
总提油率/%	76.59	87.06

由表5可以看出,射流空化水酶法的破乳率(90.29%)和总油提取率(87.06%)明显高于传统水酶法破乳率(80.32%)和总油提取率

(76.59%),文献[6]采用水酶法提取大豆油,产生的乳状液破乳率为83%,破乳效果不好,有可能是因为 Chabrand 水酶法提油使用的水解酶对乳状液中蛋白质效果不显著,另外,本试验采用的是射流空化联合碱性蛋白酶酶解处理工艺,射流空化后的乳状液更有利于与碱性蛋白酶结合,且产生的空化作用力更能使蛋白质结构改变,稳定性降低,形成较弱的界面膜,利于小分子油滴聚集,破乳率和总提油率升高。

### 3 结束语

针对碱性蛋白酶酶解膨化大豆制备大豆油过程产生乳状液进行破乳研究,在射流空化辅助作用下,

探讨射流空化压力、射流空化温度和射流空化时间对乳状液破乳率和总提油率的影响。研究结果显示,随着射流空化作用增大,乳状液破乳率和总提油率显著增加,微观结构显示大豆破乳前后乳状液显示明显差异,油滴由分散的小直径油滴汇聚成大直径油滴,其机理是射流空化产生的高强度剪切作用力和气蚀效应改变乳状液中蛋白质的空间结构,使蛋白质变性,破坏乳液体系的稳定性,从而达到增强破乳的目的。在单因素试验基础上,利用响应面分析对射流空化条件进行最佳优化,确定最佳破乳工艺是:射流空化压力 0.8 MPa、射流空化温度 100.92℃、射流空化时间 21.38 s,此条件下破乳率为 90.29%,总提油率为 87.06%。

### 参 考 文 献

- [1] 刘宝珍,徐振山,王旭红,等. 大豆油亚麻酸、亚油酸损失及反式脂肪酸形成的研究[J]. 粮食与食品工业, 2017, 24(5):5-8.  
LIU Baozhen, XU Zhenshan, WANG Xuhong, et al. Study on the loss of linolenic acid and the formation of trans fatty acids in refining soybean oil[J]. Food and Food Industry, 2017, 24(5): 5-8. (in Chinese)
- [2] 魏贞伟. 低温压榨法生产黑大豆油及其理化特性的研究[J]. 食品科技, 2008, 33(9):135-137.  
WEI Zhenwei. Low temperature pressing prepare black soybean oil and its' physical and chemical characteristics[J]. Food Science and Technology, 2008, 33(9): 135-137. (in Chinese)
- [3] 张岩春,于国萍. 酶法有机溶剂萃取大豆油的综述[J]. 粮油食品科技, 2004, 12(3):31-32.  
ZHANG Yanchun, YU Guoping. Summarization on the soybean oil extraction technology after aqueous enzymatic hydrolysis[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2004, 12(3): 31-32. (in Chinese)
- [4] 朱敏敏,赵巧玲,魏长庆. 水酶法制油工艺研究进展[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(11):12-13.  
ZHU Minmin, ZHAO Qiaoling, WEI Changqing. Research advance on aqueous enzymatic extraction technology of oil [J]. Grain and Oil, 2017, 30(11):12-13. (in Chinese)
- [5] 徐冰冰,王瑛瑶,栾霞,等. 水酶法提取紫苏籽油脂和蛋白质的工艺条件[J]. 食品科学, 2012, 33(22):127-132.  
XU Bingbing, WANG Yingyao, LUAN Xia, et al. Optimization of aqueous enzymatic extraction of oil and protein from perilla seeds [J]. Food Science, 2012, 33(22): 127-132. (in Chinese)
- [6] RAMÓN M C, GLATZ C E. Destabilization of the emulsion formed during the enzyme-assisted aqueous extraction of oil from soybean flour [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2009, 45(1):28-35.
- [7] BANSODE S R, RATHOD V K. Ultrasound assisted lipase catalysed synthesis of isoamyl butyrate [J]. Process Biochemistry, 2014, 49(8):1297-1303.
- [8] LIU X, HU Y, WEI D. Optimization of enzyme-based ultrasonic/microwave-assisted extraction and evaluation of antioxidant activity of orcinol glucoside from the rhizomes of *Curculigo orchioides* Gaertn[J]. Medicinal Chemistry Research, 2014, 23(5): 2360-2367.
- [9] O'SULLIVAN J, MURRAY B, FLYNN C, et al. The effect of ultrasound treatment on the structural, physical and emulsifying properties of animal and vegetable proteins [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 53:141-154.
- [10] 赵翔,陆启玉,章绍兵,等. 水剂法提取花生油中乳状液的酶法破乳研究[J]. 中国油脂, 2012, 37(9):11-14.  
ZHAO Xiang, LU Qiyu, ZHANG Shaobing, et al. Enzymatic demulsification of the emulsion formed during aqueous extraction of peanut oil [J]. Chinese Oils and Fats, 2012, 37(9): 11-14. (in Chinese)
- [11] 李杨,江连洲,许静,等. 水酶法制取大豆油的水解度对提油率影响机理研究[J]. 食品与发酵工业, 2009, 35(6): 40-45.  
LI Yang, JIANG Lianzhou, XU Jing, et al. Study on the mechanism of hydrolysis degree of soybean oil by water enzymatic method on oil extraction rate[J]. Food and Fermentation Industry, 2009, 35(6):40-45. (in Chinese)
- [12] NIKIFORIDIS C V, KIOSSEOGLOU V. Aqueous extraction of oil bodies from maize germ (*Zea mays*) and characterization of the resulting natural oil-in-water emulsion [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(12): 5591-5596.
- [13] ABDEL-HAFEZ S M, HATHOUT R M, SAMMOUR O A. Tracking the transdermal penetration pathways of optimized curcumin-loaded chitosan nanoparticles via confocal laser scanning microscopy [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 108:753-764.
- [14] 孙颜君,李志刚,莫蓓红,等. 超高压处理对搅打稀奶油性质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(2):75-78.

- SUN Yanjun, LI Zhigang, MO Beihong, et al. The effects of high hydrostatic pressure on the functionality of whipping cream [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2015, 41(2): 75 – 78. (in Chinese)
- [15] 李杨, 胡森, 谢凤英, 等. 超高压均质对紫苏油纳米乳液稳定性的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(8):381 – 387.  
LI Yang, HU Miao, XIE Fengying, et al. Effect of ultrahigh pressure homogenization on stability of perilla oil nanoemulsion [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(8):381 – 387. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180846&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180846&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.046. (in Chinese)
- [16] 马汉军. 高压和热结合处理对僵直后牛肉品质的影响[D]. 南京:南京农业大学, 2004.  
MA Hanjun. Effect of high pressure and heat treatment on the quality of beef after stiffness [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2004. (in Chinese)
- [17] BAIR S, BAKER M, PALLISTER D M. The high-pressure viscosity of refrigerant/oil systems [J]. *Lubrication Science*, 2017, 29(6):377 – 394.
- [18] 李杨, 李明达, 张毅方, 等. 低压均质处理对大豆分离蛋白溶解性及结构的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(3): 345 – 351.  
LI Yang, LI Mingda, ZHANG Yifang, et al. Effect of low pressure homogenization on solubility and structure of soybean protein isolate[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(3):345 – 351. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20190339&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190339&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.039. (in Chinese)
- [19] 王文睿, 江连洲, 郑环宇, 等. 大豆乳状液的微波破乳工艺优化[J]. *食品科学*, 2011, 32(18):11 – 14.  
WANG Wenrui, JIANG Lianzhou, ZHENG Huanyu, et al. Demulsification of soybean emulsion by microwave treatment[J]. *Food Science*, 2011, 32(18): 11 – 14. (in Chinese)
- [20] 冷玉娴, 许时婴, 王璋, 等. 水酶法提取葵花籽油的工艺[J]. *食品与发酵工业*, 2006, 32(10):127 – 131.  
LENG Yuxian, XU Shiyong, WANG Zhang, et al. Extraction of sunflower oil by aqueous enzymatic method[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2006, 32(10): 127 – 131. (in Chinese)
- [21] TAKEUNGWONGTRAKUL S, BENJAKUL S, H-KITTIKUN A. Micro-encapsulation of Pacific white shrimp oil as affected by emulsification condition [J]. *Food Science and Human Wellness*, 2014, 3(3 – 4):175 – 182.
- [22] VYSOKOMORNAYA O V, KUZNETSOV G V, STRIZHAK P A. Conditions of intensive evaporation of heterogeneous water droplet in high temperature gas environment [J]. *Journal of Mechanics*, 2016, 32(3):349 – 355.
- [23] WU L, WANG L, QI B, et al. 3D confocal Raman imaging of oil-rich emulsion from enzyme-assisted aqueous extraction of extruded soybean powder[J]. *Food Chemistry*, 2018, 249:16 – 21.