

双螺旋榨油机中油料出油率影响因素的仿真

The simulation study on factors influencing the oil yielding rate of oil seeds in twin-screw press

冯新东 宋少云 杨海沧

FENG Xin-dong SONG Shao-yun YANG Hai-lun

(武汉轻工大学机械工程学院, 湖北 武汉 430023)

(School of Mechanical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan, Hubei 430023, China)

摘要:对油饼的压榨过程进行了仿真分析,探索了油饼厚度和榨螺转速对出油率的影响,并对试验结果进行了方差分析。研究结果表明:油饼厚度与榨螺转速均对出油率有显著影响,且油饼厚度影响更为显著。出油率与油饼厚度有显著的线性关系,油饼厚度越大出油率越低;出油率与榨螺转速负相关,且榨螺转速存在一个最高的出油转速(30 r/min)。在油饼厚度为 21 mm,榨螺转速为 30 r/min 时,油料出油率最高,达 51%。

关键词:双螺旋榨油机;油饼厚度;榨螺转速;出油率;仿真

Abstract: Simulation analysis of the oilcake pressing process was carried out to explore the effect of oilcake thickness and the speed of the press screw on the oil yielding rate, and ANOVA was performed on the test results. The results showed that both oilcake thickness and the speed of the press screw had a significant effect on the oil yield, and that the effect of oilcake thickness was more significant. There was a significant linear relationship between the oil yield and the thickness of the oilcake, with the oil yielding rate decreasing with the thickness of the oilcake; the oil yielding rate was negatively correlated with the speed of the press screw, and there was a maximum the oil yielding rate speed (30 r/min) at the press screw speed. The highest oil yield of 51% was achieved with a cake thickness of 21 mm and a screwdriving speed of 30 r/min.

Keywords: twin-screw press; thickness of oil cake; speed of the press screw; oil yielding rate; simulation

作为一种主流物理压榨取油装置,双螺旋榨油机在

油脂加工业中得到了广泛使用。研究者对其也进行了广泛研究。Mizera 等^[1]研究了双螺旋榨油机中榨螺转速和喂料量对出油率的影响;Bogaert 等^[2]研究了榨油机榨螺转速对榨油机的生产能力、出油率和比能量消耗的影响;Amalia Kartika 等^[3]研究了榨油机螺杆转速,进料速率和溶剂与固体之比对出油率的影响。但上述研究一般针对特定的榨油机型进行,其结论很难具有普遍的指导意义。

为了在设计阶段就能获得对新机型的认识,需要采用仿真的手段。刘汝宽等^[4]通过仿真和试验得到了能满足油料螺旋压榨的预处理的主压榨段榨筒内表面的温度范围;古劲等^[5]使用 Fluent 软件研究了单螺杆榨油机主压榨段的流场;张强等^[6]使用 EDEM 软件对家用榨油机的压榨腔的工作状态进行了仿真。但是以油饼中油液渗流流速来描述油液流动,油液流量作为依据分析出油率的较少,目前出油率主要是通过一定的转换方法进行计算。试验拟以双螺旋榨油机在榨油过程中的油饼为研究对象,以达西定律为理论基础,通过仿真得到饼中渗出油液流量来研究出油率与油饼厚度和榨螺转速的关系,为双螺杆榨油的工作性能的改良提供理论依据。

1 仿真模型的建立

1.1 油饼参数设定

1.1.1 油饼力学模型分析 油料在压榨过程中是一个由不饱和多孔介质到饱和多孔介质中间伴随着油液渗出的过程,因此出油率的主要影响因素就是油液在油饼中的渗流情况。文中采用达西定律描述的多孔介质渗流模型来建立仿真模型。

为了描述油饼在压缩过程中内部的流体流动,将达西速度^[7]插入连续性方程中:

$$\nabla \cdot \left[-\frac{k}{\mu} \nabla p \right] = 0, \quad (1)$$

式中:

k ——渗透系数, cm/s;

基金项目:湖北省粮食局“优质粮食工程”科技创新项目(编号:201313012)

作者简介:冯新东,男,武汉轻工大学在读硕士研究生。

通信作者:宋少云(1972—),男,武汉轻工大学教授,博士。

E-mail: 584554223@qq.com

收稿日期:2020-10-05

μ ——动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

p ——流体的孔隙压力, Pa 。

柯西应力 σ 和孔隙压力 p_f 有如式(2)所示的关系, 榨膛内产生的压强载荷影响形变。

$$\sigma = C \in -\alpha_B p_f \mathbf{I}, C = C(E, \nu), \quad (2)$$

式中:

C ——弹性矩阵;

E ——杨氏模量, Pa ;

ν ——泊松比;

$\in$ ——应变张量;

$\mathbf{I}$ ——单位矩阵;

α_B ——Biot-Willis 系数。

流体和准静态形变之间有如式(3)所示的关系。

$$-\nabla \cdot \sigma = F, \quad (3)$$

式中:

F ——外部体力, N 。

为建立油饼在压榨过程中的应力应变模型, 使用柱塞式压榨机进行压榨试验, 并引入川北方程进行拟合, 得到应变与应力关系如式(4)所示^[8]。

$$\epsilon = \frac{V_0 - V}{V_0} = \frac{abP}{(1 + bP)}, \quad (4)$$

式中:

V ——榨后体积, mm^3 ;

V_0 ——原始体积, mm^3 ;

a, b ——常数(见表 1);

P ——应力, Pa 。

1.1.2 油饼参数设置验证 通过 1.1.1 数据建立柱塞式油饼的固体力学模型, 结合郑晓等^[9-10]所提出的孔隙度与压力 P 的经验公式, 完善油饼的多孔介质的属性参数如表 2 所示。

出油率定义如式(5)所示。

$$\rho = \frac{m_1}{m} \times 100\%, \quad (5)$$

式中:

ρ ——出油率, %;

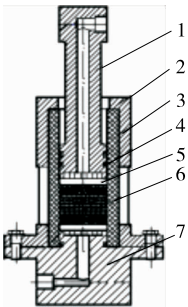
m ——油饼质量, g ;

m_1 ——出油质量, g 。

为验证上述油饼模型的准确性, 对柱塞式压榨过程进行仿真并与柱塞式物理试验进行对比。柱塞式试验使用自制的中空柱塞式压榨装置(如图 1 所示)装入油料碎粒, 搭载在材料压缩机上进行侧限压缩试验。

使用 Comsol Multiphysics 建立柱塞式油饼的压榨模型后进行仿真, 得到最后时刻的速度云图如图 2 所示。通过积分油饼下表面的流量计算得到出油量, 按式(5)计算出油率, 仿真与实际出油率对照如表 3 所示。相对误差均在 5% 以内, 说明模型准确。

1.1.3 油饼几何模型建立 试验所设计的小型双螺旋榨油机如图 3 所示。由于榨油过程主要关注的是榨螺和榨笼间的工作部分, 所以先创建榨螺和榨笼的三维模型, 再对榨螺和榨笼间的空隙部分进行布尔运算, 最终建立油饼的三维几何模型如图 4 所示, 对建立的各部件装配, 完



1. 活塞 2. 外筒 3. 内筒 4. 密封圈 5. 透水石 6. 油茶籽 7. 底座

图 1 柱塞式压榨试验装置

Figure 1 Plunger type pressing experiment device

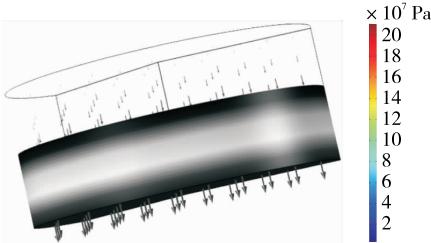


图 2 柱塞式压榨仿真试验结果

Figure 2 The simulation results of plunger type pressing

表 3 仿真与实际出油率对照

Table 3 Comparison of actual and simulation

加载速率/ ($\text{kN} \cdot \text{s}^{-1}$)	实际出油率/ %	仿真出油率/ %	相对误差/ %
0.01	44.00	45.13	2.57
0.02	39.30	40.70	3.56
0.03	38.55	39.75	3.11
0.04	37.83	38.16	0.87

表 1 关系函数常数值

Table 1 Constant value

加载速率/($\text{kN} \cdot \text{s}^{-1}$)	a	b
0.01	0.88	0.47
0.02	0.93	0.38
0.03	0.88	0.31
0.04	0.93	0.30

表 2 固体力学

Table 2 Solid attribute

密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	杨氏模量/ MPa
860	0.3	2×10^5

成双螺旋榨油简化总装如图 5 所示。

1.2 仿真主要参数设置

在 Comsol Multiphysics 软件中建立双螺旋榨油机中油饼榨油过程的力学模型,其中固体力学见表 2,多孔介质参数见表 4,油液的流体模型参数见表 5,双螺旋榨油机的主要几何参数见表 6。

2 仿真试验设计与结果讨论

2.1 试验方案设计

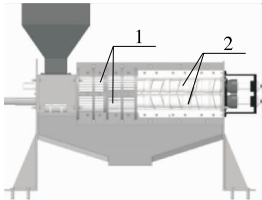
榨油机榨螺转速和油饼厚度影响榨油机榨膛内油料

所受的应力和油料被榨时间^[11],而且出油率与油饼所受应力和被榨时间密切相关^[12-13]。因此主要选择榨螺转速和油饼厚度两个因素。目前小型工业榨油机榨螺转速一般为 30~80 r/min,因此榨螺转速选择 18,30,60,90,120 r/min 5 个水平值,压榨油料的油饼厚度选择 20.0,21.0,22.5,25.0 mm 4 个水平值,进行两因素多水平试验。

2.2 仿真结果与讨论

试验所得的出油体积及出油率如表 7 所示。对数据进行方差分析,结果表明榨螺转速和油饼厚度的显著性均小于 0.05 且油饼厚度的值更小,说明榨螺转速和油饼厚度对出油率都有显著影响,其中油饼厚度对出油率的影响更大。由表 7 可知,在榨螺转速为 30 r/min,油饼厚度为 21 mm 时,油料出油率最高,为 51%。修正后的数据以油饼厚度为曲线标签,构建不同转速水平下的出油率图形,如图 6 所示。通过仿真软件后处理得到系列结果如图 7~图 10 所示。

由图 7 和图 8 可知,在压榨过程中应力主要集中在两个榨螺之间,油饼中油液渗出也主要集中在该部位。榨油过程是含油的散粒体固体颗粒受到挤压逐渐致密并伴随油液渗出的一个过程,由达西定律可知油液渗流的速率压降呈正比,压降在榨油过程中是由榨油机提供的,因此油液的渗流速度与油饼所有应力有较强的相关性。



1. 榨笼 2. 榨螺

图 3 小型双螺旋榨油机

Figure 3 Double screw oil press

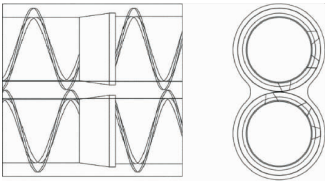
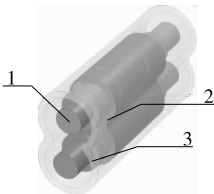


图 4 油饼模型

Figure 4 Oil cake model



1. 榨螺 2. 榨笼 3 油饼

图 5 双螺旋榨油简化总装

Figure 5 Simplified version

表 4 多孔介质参数

Table 4 Porous media attribute

渗透率/ m^2	孔隙率
1×10^{-10}	$0.521\ 6\text{e}^{0.31P}$

表 5 流体模型参数

Table 5 Fluid attribute

流体可压缩性/ Pa^{-1}	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	动力黏度/ $(\text{Pa} \cdot \text{s})$
4×10^{-10}	945	0.003

表 6 双螺旋榨油机参数

Table 6 Geometric parameters of twin-screw press

几何尺寸/ mm^3	螺杆间距/mm	可榨油饼厚度/mm
$600 \times 95 \times 330$	136	21

表 7 试验结果

Table 7 Result of experiment

序号	转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	油饼料 厚/mm	油饼体 积/ cm^3	出油体 积/ cm^3	出油率/ %
1	30	20.0	468.24	167.25	38.93
2	50	20.0	468.24	193.28	44.99
3	100	20.0	468.24	173.77	40.45
4	150	20.0	468.24	187.29	43.60
5	200	20.0	468.24	181.35	42.22
6	30	21.0	491.37	192.76	42.76
7	50	21.0	491.37	230.14	51.05
8	100	21.0	491.37	205.21	45.52
9	150	21.0	491.37	196.56	43.60
10	200	21.0	491.37	194.10	43.06
11	30	22.5	526.43	185.93	38.50
12	50	22.5	526.43	202.82	41.99
13	100	22.5	526.43	198.47	41.09
14	150	22.5	526.43	205.98	42.65
15	200	22.5	526.43	196.50	40.69
16	30	25.0	585.81	171.87	31.98
17	50	25.0	585.81	230.14	42.82
18	100	25.0	585.81	186.15	34.64
19	150	25.0	585.81	195.13	36.31
20	200	25.0	585.81	203.49	37.86

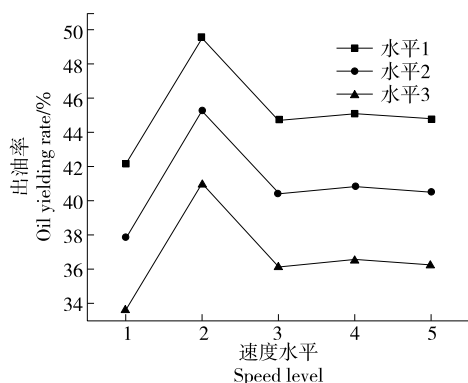


图 6 修正结果

Figure 6 Corrected result

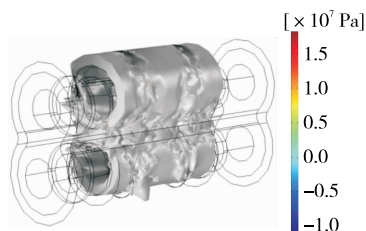


图 7 油饼应力云图

Figure 7 Oil cake stress

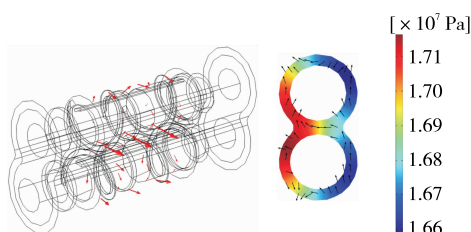


图 8 油饼速度图

Figure 8 Flow rate of oil

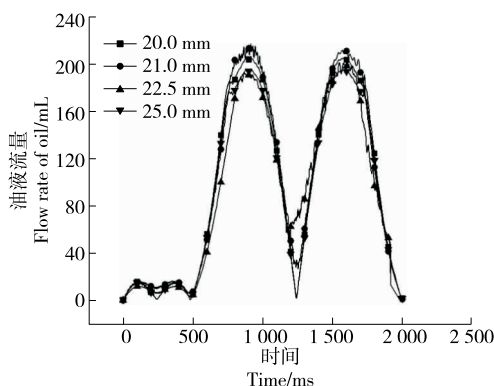


图 9 不同料厚的流量与时间关系

Figure 9 Flow and time relationship of different thickness

由图 9 和图 10 可知,榨油过程中油液通过油料外表面的流量呈周期性波动,榨螺旋转前 1/4 周期为预备阶段,榨螺旋转 90°将油饼一部分卷入榨螺之间,之后被卷入榨螺间的油饼被挤压,此时榨螺的应力在 40 MPa 左右,开始

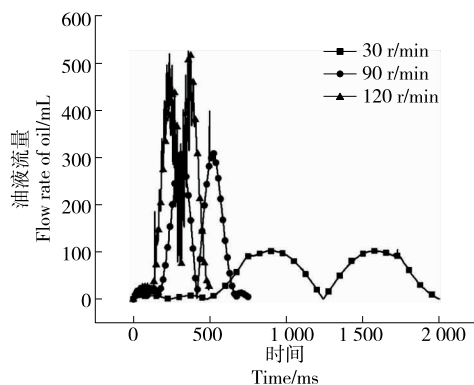


图 10 不同转速的流量与时间关系

Figure 10 Flow and time relationship of different speed

大量出油,随着油饼被压缩之后内部油液流出,流速开始逐渐变小,新一轮的喂料在榨油的同时进行,之后新一轮的出油开始。前 1/4 周期出现两个小波动且流量小约占整个周期流量的 5%,后 3/4 周期流量大,约占整个周期流量的 95%。因此后 3/4 周期的流量决定了出油的总量。

由图 9 还可知,相同加载速率下,不同油饼厚度对应的流量峰值不同,即在榨油过程中所受的应力不同。油饼厚度较小时,榨螺间隙无法给油饼施加到有效榨油应力,油料未被充分压榨;油饼厚度过大,一部分还未被卷入压榨间隙就被推走的油料中含有大量未渗出的油;因此其他厚度的出油率都会相对于 21 mm 的更低且油饼厚度增加,出油率降低。

由图 10 还可知,榨螺转速越大,油液的渗流速度波动越大,这是由于榨螺转速越大榨螺间的油料越早变得密实,有效渗透率降低,大量出油的时间变得更短,而且榨螺应力增大,其相应流速峰值会提高,所以出现了出油率波动的情况。因此,对应不同的榨螺间距应有一个合适的加载速率。

综上,油饼厚度和榨螺转速综合影响出油率,主要包括两个方面:① 榨油机工作状态下榨螺间的榨油应力和被榨油饼的密实程度;② 一个榨螺旋转周期内的出油充分程度。

3 结论

试验以达西定律为理论基础,将油液挤出这一过程描述为多孔介质渗流,仿真得到了油饼在被榨过程中的应力与应变情况和油饼中油液的渗流情况,得到了对出油率影响的主要因素为油饼的料厚和榨螺转速。针对试验的设备而言,最佳的转速为 30 r/min,最佳料厚为 22 mm。因双螺旋榨油机榨油原理相同,故通过调整榨油机榨螺转速和榨笼与榨螺的间距可有效提高榨油机的出油率。

试验仿真所使用的榨油机模型两榨螺间距是保持不变的,下一步将研究榨螺间距改变对出油率的影响,同时

(下转第 88 页)

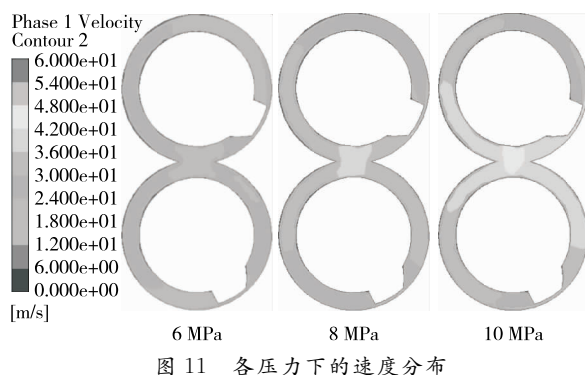


图 11 各压力下的速度分布

Figure 11 Velocity distribution under various pressures

3 结论

通过对双螺杆榨油机的基本结构和工作原理进行分析,建立了榨油机榨螺和流体域三维模型,运用 Fluent 软件对榨油机压榨段流体域的物理场进行仿真研究。结果表明,流场压力沿着螺杆逐渐递增,输送段压力增长快,压榨段增长较慢,出口处压力达到最大;同一截面处,油料速度存在分层现象,设定温度一定时,随着压力的增大,油料速度增大;流体浓度沿着螺杆长度方向递增但存在波动。设定压力不变,温度越高,油料浓度越高。设定温度不变,压力越大,油料浓度越高。后续应根据压榨理论对现有的模型进行改进,使其更接近于实际状态。

参考文献

- [1] 丁福祺. 食用液压榨法和浸出法压榨工艺的区别[J]. 中国油脂, 2005, 30(1): 5-6.
- [2] 张学阁. 双螺杆榨油机榨螺参数与榨膛内物料压力关系分析[D]. 郑州: 河南工业大学, 2013: 35-40.

(上接第 84 页)

加入热场对其进行多场耦合仿真,以更接近实际的榨油状态,得到更为准确的仿真数据。

参考文献

- [1] MIZERA C, HERAK D, HRABĚ P, et al. Extraction of oil from rapeseed using duo screw press [J]. Agronomy Research, 2018, 16(Special Issue D): 1 118-1 123.
- [2] BOGAERT L, MATHIEU H, MHEMDI H, et al. Characterization of oilseeds mechanical expression in an instrumented pilot screw press [J]. Industrial Crops and Products, 2018, 121: 106-113.
- [3] AMALIA KARTIKA I, PONTALIER P Y, RIGAL L. Twin-screw extruder for oil processing of sunflower seeds: Thermo-mechanical pressing and solvent extraction in a single step[J]. Industrial Crops and Products, 2010, 32(3): 297-304.
- [4] 刘汝宽, 解士聪, 肖志红, 等. 双螺旋榨油机榨膛预热过程中温度分布及有限元仿真[J]. 中国油脂, 2017, 42(5):

- [3] HARPER J M. Extrusion of foods[J]. Food Technol, 1986, 40: 70-76.
- [4] 余南辉, 李诗龙, 柳德文. 基于有限元法的螺旋榨油机榨螺的应力分析[J]. 轻工科技, 2014, 30(2): 57-58.
- [5] 余南辉, 李诗龙, 宋良浩. 基于 ANSYS 的螺旋榨油机榨笼的应力分析[J]. 科技创新与应用, 2014(6): 34-35.
- [6] 古劲, 黄志刚, 米国强, 等. 基于 Fluent 单螺杆榨油机主压榨段流场仿真研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(4): 80-86.
- [7] 杨丽彦. 螺旋榨油机压榨比的理论研究与分析[D]. 郑州: 河南工业大学, 2013: 25-30.
- [8] SAVOIRE R, LANOISELLÉ J L, VOROBIEV E. Mechanical continuous oil expression from oilseeds: A review[J]. Food Bioprocess Technol, 2013(6): 1-16.
- [9] GLENCROSS B, HAWKINS W, CURNOW J. Nutritional assessment of Australian canola meals: Evaluation of canola oil extraction method and meal processing conditions on the digestible value of canola meals fed to the red seabream (*Pagrus auratus*, Paulin) [J]. Aquaculture Research, 2015, 35(1): 15-24.
- [10] 张凯. 基于 Fluent 同向啮合双螺杆挤出机挤出聚乳酸热力学分析[D]. 北京: 北京工商大学, 2018: 30-37.
- [11] 李诗龙. 双阶多级压榨双螺杆榨油机研制[J]. 农业工程学报, 2010(26): 102-107.
- [12] 张国, 王春杰. 500 t/d 榨油机优化改进的研究与探讨[J]. 粮食与食品工业, 2017, 24(2): 46-47, 51.
- [13] 解士聪, 黄志辉, 李昌. 1 种螺旋榨油机榨膛内表面温度预估方法[J]. 华南农业大学学报, 2014(6): 104-107.
- [14] 刘汝宽, 解士聪, 肖志红, 等. 蓖麻籽螺旋压榨制油过程中榨膛温度分布及其数值拟合[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(6): 74-78.
- [15] 解士聪. 蓖麻籽螺旋榨油机榨膛温度与加热方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014: 20-25.

156-158.

- [5] 古劲, 黄志刚, 米国强, 等. 基于 Fluent 单螺杆榨油机主压榨段流场仿真研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(4): 80-86.
- [6] 张强, 张旭, 孙绍安. 基于 EDEM 的家用榨油机压榨腔工作性能仿真研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 283-291.
- [7] 张东, 刘晓丽, 王恩志. 非均匀多孔介质等效渗透率的普适表达式[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 35-42.
- [8] 冯新东, 宋少云, 尹芳, 等. 脱壳油桐籽压榨的应力—应变关系研究[J]. 武汉轻工大学学报, 2020, 39(1): 18-21.
- [9] 郑晓, 宛农, 林国祥, 等. 基于孔隙度的冷榨菜籽仁饼微观结构研究[J]. 中国油脂, 2004(12): 14-17.
- [10] 王经洲, 郑晓, 宛农, 等. 基于扫描电镜图像分析的菜籽仁饼孔隙结构分形研究[J]. 农业工程学报, 2008(3): 16-20.
- [11] 任小聪, 陈戈, 郑晓, 等. 双螺旋榨油机膛内压力分布测试及研究[J]. 中国油脂, 2016, 41(4): 100-104.
- [12] 阮竞兰, 张学阁, 杨丽彦. 双螺旋榨油机榨螺参数与榨膛内压力的关系研究[J]. 中国油脂, 2013, 38(9): 89-92.
- [13] 胡志刚, 邱云峰, 涂德先. 榨膛内压力对榨螺应力应变及油料出油率的影响[J]. 食品与机械, 2014, 30(6): 85-88.