

生产实践

DOI: 10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.2021.07.024

# 基于 CFD 的单螺旋榨油机榨膛流场 特性分析与试验

张丽梅,黄志刚,宋宇,吴丹

(北京工商大学材料与机械工程学院,北京 100048)

**摘要:**榨油机通过榨膛内部的油料和螺杆、榨膛相互挤压榨油产生典型的单向流固耦合。为明确油料的运动情况以及温度、压力等因素对出油率的影响,通过建立变截面的单螺旋榨油机螺杆几何模型,根据实际容积在 Fluent 中建立榨膛流体域,采用 CFD 的欧拉多相流模型在碎花生颗粒和油的混合物充满榨膛情况下,进行榨膛内的油料和螺杆、榨膛的流固耦合计算。结果表明:螺杆转速一定时,榨膛内流体随螺杆转动并沿螺杆长度方向流动;以油的体积分数作为油的浓度,油浓度沿螺杆长度方向递增,压力一定时温度越高浓度越大,温度一定时压力越大浓度越大。试验证明在温度 80℃、压力 10 MPa 情况下所使用的单螺旋榨油机的出油率较高。研究结果为实际压榨过程中的螺杆设计、压力和温度设置等提供理论依据。

**关键词:**单螺旋榨油机;榨膛;流固耦合;Fluent

中图分类号:TS223;TS203

文献标识码:B

文章编号:1003-7969(2021)07-0133-05

## Characteristics and experiment of flow field in barrel of single stage screw press based on CFD

ZHANG Limei, HUANG Zhigang, SONG Yu, WU Dan

(School of Materials Science and Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** A typical unidirectional fluid - solid coupling was produced by squeezing each other of oilseeds, worm shaft and barrel in the press. In order to clarify the movement of the oilseeds and the effects of temperature, pressure on the oil yield, firstly a geometry model of the worm shaft of a single stage screw press with variable cross - section was established, then a fluid domain of the barrel was established in Fluent based on the actual volume, the fluid - solid coupling of the oilseeds, worm shaft and barrel was calculated by Euler multiphase flow model of CFD under the condition that the mixture of crushed peanut particles and oil was full of the barrel. The results showed that with the special screw speed, the fluid in the barrel rotated with the worm shaft and flowed along the length of the worm shaft; when the volume fraction was taken as the concentration of the oil, the oil concentration increased along the length of the worm shaft. When the pressure was constant, the higher the temperature was, the greater the oil concentration was, and when the temperature was constant, the higher the pressure was,

the greater the oil concentration was. The experiment also verified that the oil yield was higher at 80℃ and 10 MPa. The research results provided a theoretical basis for worm shaft design, pressure and temperature setting, etc. in the actual pressing process.

**Key words:** single stage screw press; barrel; fluid - solid coupling; Fluent

收稿日期:2020-09-08;修回日期:2021-04-15

基金项目:国家重点研发计划项目子课题(2016YFD0400305);北京市教育委员会科研计划项目(PXM2019\_014213\_000007, KM201910011002)

作者简介:张丽梅(1979),女,教授,博士,主要从事食品机械研究(E-mail)zhanglimei@btbu.edu.cn。

通信作者:黄志刚,教授,博士(E-mail)huangzg@btbu.edu.cn。

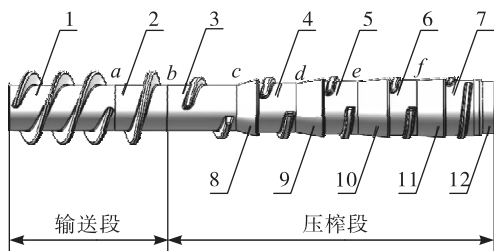
螺旋榨油机是目前植物油生产的主要设备<sup>[1]</sup>, 各国学者对螺旋榨油机的研究一直在进行,但目前还存在螺杆模型简单,压榨中榨膛、油料、螺旋之间的相互挤压导致的榨膛内压力不确定,榨膛内压力场、温度场、流动等与出油率的关系不明确等问题。邱云峰<sup>[2]</sup>使用 Fluent 软件建立截面、螺纹一致的单螺杆简化模型,模拟小型单螺杆榨油机中的流固耦合;张学阁<sup>[3]</sup>采用双螺杆圆柱简化模型在 Fluent 中对压力场进行分析,指出了温度、孔隙度、压缩比等因素对压力的影响;阮竞兰等<sup>[4]</sup>以单一螺旋段的模型为研究对象,分析了双螺旋榨油机榨螺参数与榨膛内压力的关系。一般压榨级数增多,压榨强度增加,出油率提高,但同时榨膛内空腔容积变得更加复杂,简化的螺杆模型无法体现压榨级数与压榨空间的关系。因此,为了解决实际问题,要先建立多级压榨螺杆模型再采用有限元分析计算。

本文依据计算流体力学原理<sup>[5]</sup>,以单螺旋榨油机为研究对象,建立实际螺杆和榨膛模型,从数值模拟入手分析榨膛内部的油料、螺杆相互挤压的单向流固耦合<sup>[6]</sup>。通过建立单螺旋榨油机螺杆的变截面几何模型,根据理论压缩比和实际压缩比计算榨膛压力,充分考虑压榨空间和油料的流动,借助有限元软件 Fluent 建立压榨流场,实现榨膛内部的流固耦合分析。

## 1 单螺旋压榨模型

### 1.1 几何模型(见图 1)

如图 1 所示,单螺旋榨油机螺杆包括输送段和压榨段,输送段有 2 节螺旋,压榨段有 5 节螺旋,螺杆总长 1 286 mm,最大螺旋外径 178 mm,螺旋尺寸见表 1,锥圈、轴套尺寸见表 2。



注:1~7 为第 1~7 节螺旋,8~11 为第 1~4 节锥圈,12 为轴套,a~f 为横截面。

图 1 单螺旋榨油机螺杆模型

### 1.2 有限元模型和参数设置

考虑实际榨膛情况建立流体域,如图 2 所示,流场的圆柱体直径取 186 mm,长度为螺杆总长 1 286 mm。流体域有限元模型和剖面如图 3 所示,螺杆有限元模型如图 4 所示。

表 1 螺旋尺寸

螺旋编号	螺旋外径/mm	螺旋底径/mm	长度/mm	螺距/mm	开口角/(°)
1	178	110	290	88	0
2	178	110	144	104	14.1
3	150	110	175	128	27.1
4	150	118	100	80	35.0
5	150	127	74	62	32.5
6	150	134	70	55	31.6
7	150	135	70	50	0

表 2 锥圈和轴套尺寸

项目	mm				轴套
	锥圈 1	锥圈 2	锥圈 3	锥圈 4	
左端直径	110	118	127	134	134
右端直径	136	140	142	142	125
长度	61	81	87	78	56

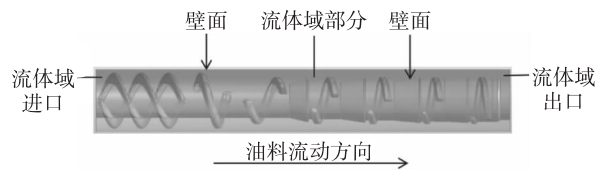


图 2 榨膛流体域模型

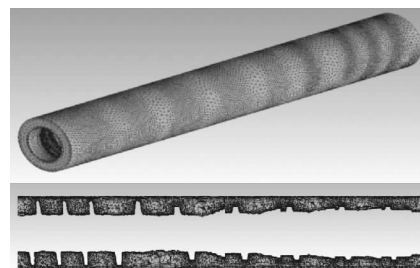


图 3 流体域整体和剖面网格

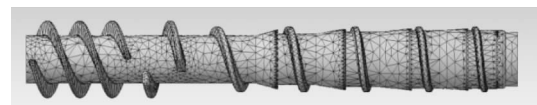


图 4 螺杆网格

榨膛内将碎花生粒设置为第一相,油设置为第二相,花生油的导热系数为  $0.024 2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,密度为  $900 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,比热容为  $1 006.43 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,黏度为  $0.01 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。假设压榨过程中碎花生粒径为  $1 \text{ mm}$ ,螺杆转速为  $40 \text{ r}/\text{min}$ ,把流体与螺杆接触的面设为流固耦合的交界面。如图 2 所示,将左侧入口压力设为大气压;榨膛入榨温度为  $60 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ ,外界温度为常温 ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ );外壁面设为第三类边界条件,换热系数为  $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。采用 SIMPLEC 算法,设置最大迭代步数 2 000 进行求解。

## 2 基于 Fluent 的流固耦合结果与分析

采用 CFD - Fluent 进行单向流固耦合分

析<sup>[7-8]</sup>,考虑油料由碎花生粒和液体混合而成的特点,选取欧拉多相流模型<sup>[9]</sup>、RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型与SIMPLEC 算法,考虑不同相有不同的体积分数和颗粒、液体之间相互滑移。

### 2.1 流体域压力分布

初始时刻,预热时压榨段入口压力为 0.1 MPa 时计算获得出口压力为 6 MPa,纵截面压力分布如图 5 所示,一级压榨段横截面压力分布如图 6 所示。由图 5、图 6 可以看出:随着油料从左往右运动,流场压力逐渐递增;在同一截面上,油料所受压力的大小也不同,存在分层现象。

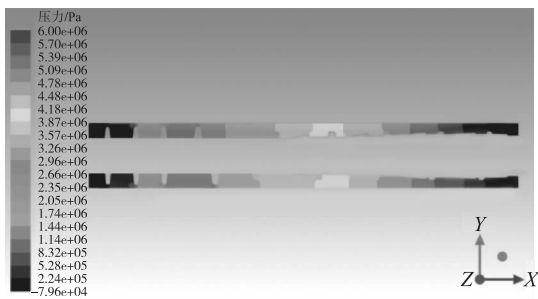


图 5 流体域纵截面压力分布

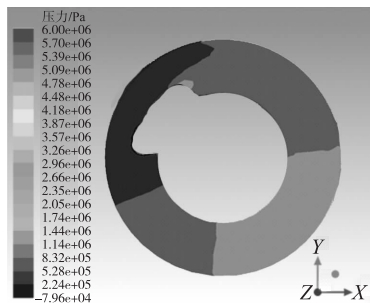


图 6 一级压榨段横截面压力分布

### 2.2 流体域速度场

在螺杆转速 40 r/min 情况下,得到的流体空间油料流线如图 7 所示,螺杆流速分布如图 8 所示。由图 7、图 8 可知,油料在输送段呈螺旋状,压榨开始后流动减缓并逐渐平稳,螺杆上的流速以输送段和压榨段连接处最快。

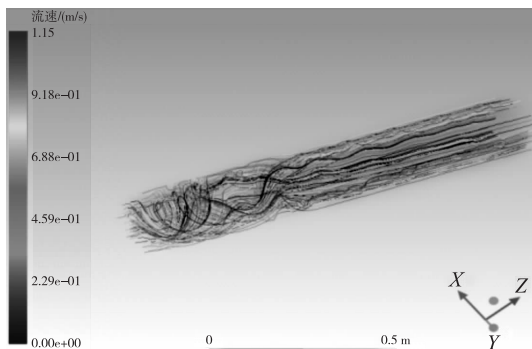


图 7 油料流线图

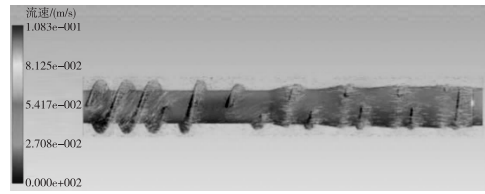


图 8 螺杆流速分布

为了说明流动情况,按照图 9 所示沿长度在流体域内取 3 条直线,XY 向坐标分别为:直线 1(0, -90),直线 2(0,90),直线 3(-90,0)。

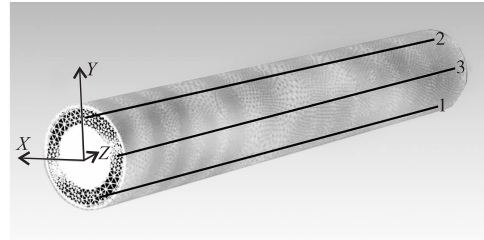


图 9 3 条直线位置

3 条直线上油的流速如图 10 所示。由图 10 可知,输送段油的运动呈螺旋状,压榨段逐渐平稳,榨膛上部油的流速较大,中下部流速变缓,与油料流线和螺杆流速分布情况吻合。

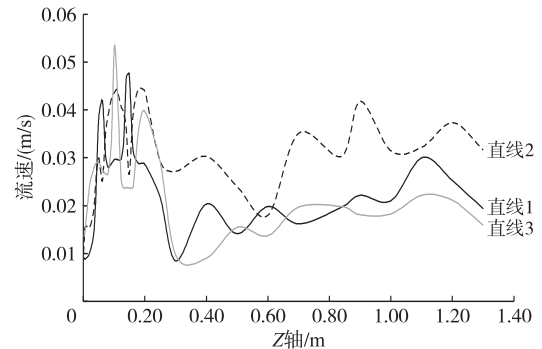


图 10 3 条直线上油的流速

### 2.3 流体域中油的浓度

#### 2.3.1 油的浓度分布

通常以油的浓度表示压榨程度,油的浓度采用体积分数表示。在压力 6 MPa、温度 60℃ 情况下,3 条直线上油的体积分数如图 11 所示,a~f 截面上油的体积分数如图 12 所示。

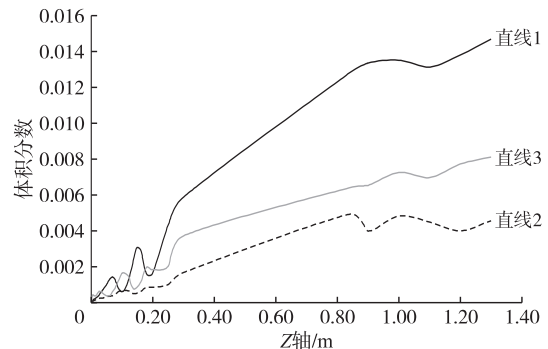


图 11 3 条直线上油的体积分数

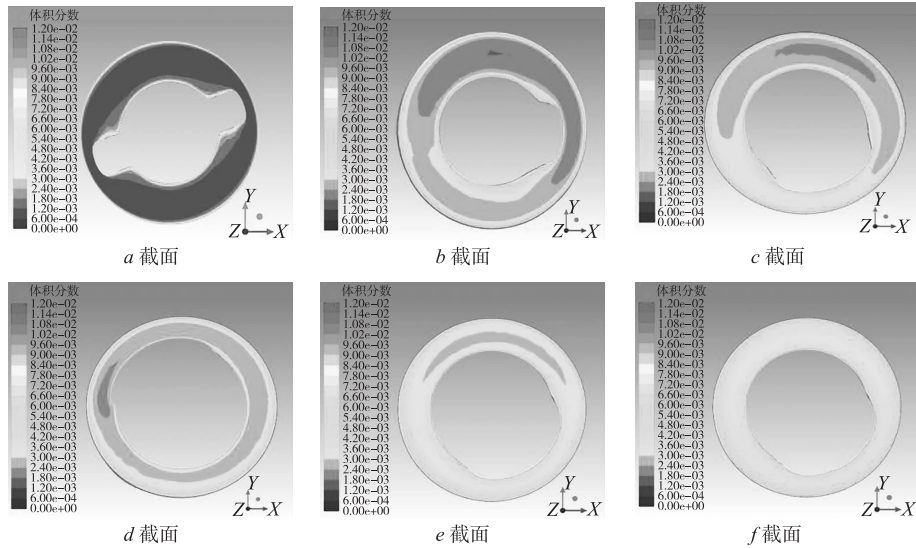


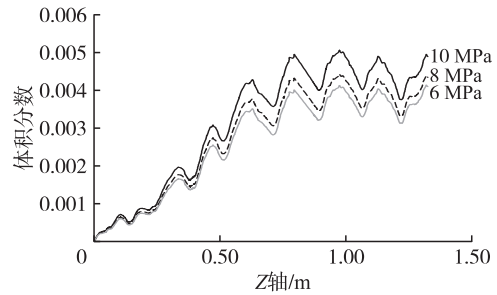
图 12 不同压榨段横截面上油的体积分数

由图 11、12 可以看出:进口端油的体积分数小于出口端,这是因为油料进入输送段后受螺杆转动的影响向前运动,没有起到压榨效果,油的体积分数相对较小,随后进入到一级压榨段,油料受到螺杆与榨膛挤压作用,油脂被挤出,此时油的体积分数开始逐渐增大,然后依次进入二到五级压榨段,压榨效果越来越明显,油的体积分数逐渐趋向稳定。

2.3.2 压力、温度对油浓度的影响

榨油机预热后,压榨开始,压榨段入口压力升高,在压榨段入口压力分别为 6、8、10 MPa 3 种情况下,沿直线 1 油的体积分数如图 13 所示。压榨段入

口压力为 6 MPa,温度分别为 60、70、80 °C 时,一级压榨的 c 截面油的体积分数如图 14 所示。



注:温度 60 °C。

图 13 不同压力下油的体积分数

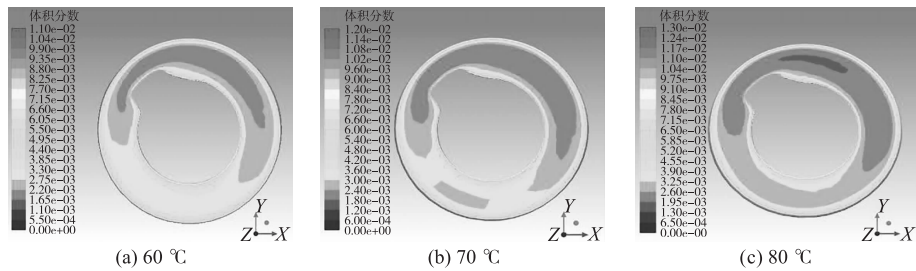


图 14 不同温度下 c 截面油的体积分数

由图 13 可以看出,压力为 10 MPa 时,油的体积分数最大值约为 0.005,压力为 6 MPa 时,油的体积分数最大值约为 0.004。因此,压力会对油的体积分数产生一定影响,在一定范围内压力越大油的体积分数越大。由图 14 可以看出,随着温度的升高,油的体积分数逐渐增大,60 °C 时油的体积分数最大值约为 0.010,80 °C 时油的体积分数最大值约为 0.013。因此,温度会对油的体积分数产生影响,在一定范围内温度越高油的体积分数越大。

3 实际试验与分析

采用中机康元设计研发的单螺旋榨油机<sup>[10-11]</sup>,考虑影响因素为压榨开始后压榨段入口压力和温度,设

计表 3 所示的 9 个试验工况,测定 5 min 的出油率,试验结果如图 15 所示。

表 3 试验设计

工况	压力/MPa	温度/°C
1	6	60
2	6	70
3	6	80
4	8	60
5	8	70
6	8	80
7	10	60
8	10	70
9	10	80

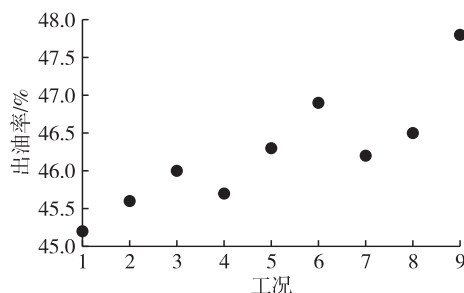


图 15 不同工况出油率

由图 15 可以看出,温度越高、压力越大,出油率越高,当温度为 80 ℃、压力为 10 MPa 时,出油率达到 48% 左右。

#### 4 结论

本文将变截面单螺旋榨油机的压榨过程看成油料和螺杆、榨膛的单向流固耦合,首先根据实际几何尺寸在 Fluent 中建立榨膛流体域,采用 CFD 的欧拉多相流模型进行榨膛内的油料和螺杆、榨膛的流固耦合计算。结果表明:在螺杆转速 40 r/min 时,榨膛内流体随螺杆转动并沿螺杆长度方向流动;油浓度沿螺杆长度方向递增,压力、温度在一定范围内其数值越大油浓度越高。考虑压榨段入口压力、温度,设计 9 个工况进行试验,测定 5 min 的出油率。结果表明:温度越高、压力越大,出油率越高,当温度为 80 ℃、压力为 10 MPa 时,出油率达到 48% 左右。

本研究能为榨油机内物料的流动特性做出合理的解释,对单螺旋榨油机在实际压榨过程中的螺杆设计、压力和温度设置等提供参考。

#### 参考文献:

- [1] UITTERHAEGEN E, EVON P. Twin-screw extrusion technology for vegetable oil extraction: a review [J]. J Food Eng, 2017, 212: 190-200.
- [2] 邱云峰. 螺旋榨油机中流固耦合物理场的研究[D]. 武汉:武汉轻工大学, 2015.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [6] 陈锋, 王春江, 周岱. 流固耦合理论与算法评述[J]. 空间结构, 2012, 18(4): 55-63.
- [7] ANDREAS A, BLETZINGER K U, ROLAND W. Weak imposition of constraints for structural membranes in transient geometrically nonlinear isogeometric analysis on multipatch surfaces[J]. Comput Method Appl M, 2019, 350(15): 938-994.
- [8] 彭飞, 方芳, 王红英, 等. 基于 CFD-DEM 的饲料调质器物料运动模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 355-363.
- [9] 崔文慧, 张丽梅, 张慧霞. 基于多相流理论的风雨共同作用下鞍形膜结构响应分析[J]. 工业建筑, 2018, 48(8): 60-64.
- [10] 古劲. 油脂螺旋压榨机物料流动特性模拟研究[D]. 北京:北京工商大学, 2019.
- [11] 宋宇. 油脂螺旋压榨机压榨过程仿真研究[D]. 北京:北京工商大学, 2019.
- [65] LI Q, CHEN J, YU X, et al. A mini review of nervonic acid: source, production, and biological functions [J]. Food Chem, 2019, 301: 256-261.
- [66] HU P, XU X, YU L. Interesterified *trans*-free fats rich in sn-2 nervonic acid prepared using *Acer truncatum* oil, palm stearin and palm kernel oil, and their physicochemical properties [J]. LWT - Food Sci Technol, 2017, 76: 156-163.
- [67] 高向阳, 陈昊, 富校轶, 等. 低热量功能性油脂: 结构脂质的研究与开发前景 [J]. 大豆科技, 2012 (3): 39-43.
- [68] SMITH K W, BHAGGAN K, TALBOT G, et al. Crystallization of fats: influence of minor components and additives [J]. J Am Oil Chem Soc, 2011, 88 (8): 1085-1101.

(上接第 120 页)

- [61] 陈寒刚, 陆健, 黄昭先, 等. 非棕榈起酥油及其制备方法: CN105454463A [P]. 2016-04-06.
- [62] MAKIKO K, NOBUHIKO T, TAKASHI Y. Structured triacylglycerol containing behenic and oleic acids suppresses triacylglycerol absorption and prevents obesity in rats [J/OL]. Lipids Health Dis, 2010, 9 (1): 77 [2020-10-13]. <https://doi.org/10.1186/1476-511X-9-77>.
- [63] 苏国忠, 牟英, 杨天奎. 新型中长链甘三酯的制备及其在人造奶油中的应用 [J]. 中国油脂, 2012, 37 (11): 49-53.
- [64] TYNEK M, ELEONORA L. Structured triacylglycerols containing behenic acid: preparation and properties [J]. J Food Lipids, 2010, 12 (1): 77-89.