

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.04.016

基于 Fluent 单螺杆榨油机主压榨段 流场仿真研究

Reserch on simulation of flow field in main press section of
single screw press based on Fluent

古 劲^{1,2} 黄志刚^{1,2} 米国强^{1,2} 胡淑珍³

GU Jin^{1,2} HUANG Zhi-gang^{1,2} MI Guo-qiang^{1,2} HU Shu-zhen³

(1. 北京工商大学材料与机械工程学院, 北京 100048; 2. 塑料卫生与安全质量评价技术北京市
重点实验室, 北京 100048; 3. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100048)

(1. School of Material and Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing
100048, China; 2. Plastic Beijing Municipal Key Laboratory of Health and Safety Quality Evaluation Technology,
Beijing 100048, China; 3. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100048, China)

摘要:为研究单螺杆榨油机在压榨过程中, 榨膛内部油料与榨螺相互作用产生的流场分布及变化规律, 建立了榨螺和流体域的物理模型。在 Fluent 软件中采用 $k-\epsilon$ 模型及 SIMPLEC 求解器进行有限元仿真求解, 获得油料在主压榨段的压力场和速度场分布, 并通过流固耦合分析, 得到榨螺受油料挤压发生的受力变形情况, 以及榨螺在压榨过程中易发生较大变形和应力集中的位置。

关键词:榨油机; 流场; 流固耦合分析; 应力

Abstract: In order to study the flow field distribution and variation law of the interaction between oil and screw in the chamber of a single screw press, a physical model of the screw press and the fluid field was established. In Fluent software, $k-\epsilon$ model and SIMPLEC solver are used to solve the finite element simulation. The distribution of pressure field and velocity field of oil in the main pressing section is obtained. Through fluid-structure coupling analysis, the stress and deformation of the screw under oil extrusion are obtained, and the location where the screw is prone to large deformation and stress concentration during the pressing process.

Keywords: screw; flow field; fluid-structure coupling analysis; stress

压榨法制油是利用纯物理机械力及被榨油料相互之

基金项目: 国家重点研发计划项目子课题 (编号: 2016YFD0400305); 北京市自然科学基金—市教委联合资助项目 (编号: KZ201810011017)

作者简介: 古劲, 男, 北京工商大学在读硕士研究生。

通信作者: 黄志刚 (1966—), 男, 北京工商大学教授, 博士。

E-mail: huangzg@btbu.edu.cn

收稿日期: 2019-02-06

间的作用力^[1], 将油料作物中的油脂挤压出来的工艺过程^[2], 螺旋式榨油机由于可连续化生产, 更适用于工业化, 目前使用较为广泛。榨油机在压榨过程中内部的流场变化情况十分复杂, 很难通过试验来为生产研究提供可靠依据, 故国内外一些研究者利用有限元相关软件来对榨油机进行仿真分析。张学阁等^[3]通过对膛内参数结构的仿真分析, 得到了双螺杆榨油机膛内参数对油料压榨过程中压力变化的影响; 解士聪等^[4-5]对榨油机的膛内温度进行了热力学分析, 通过流体仿真研究得到了榨膛表面的温度分布, 为榨油机的温度预估和求解提供了理论依据; Hsieh 等^[6]研究了螺杆转速对玉米油料挤出过程的影响, 转速升高会降低双螺杆挤出机机头压力和转矩比, 减小油料在机筒中的径向膨胀和容积密度, 使轴向膨胀和破坏强度增大; 余南辉等^[7-8]对榨螺建立三维模型后, 在有限元分析中得到了榨螺变形及应力分布, 指出了该方法对榨螺结构设计意义。

以往对螺旋压榨机的仿真模拟研究多集中在榨螺结构及受力分析上, 但榨膛内部流场在实际生产过程中是受膛内油料与榨螺相互挤压影响的, 而目前在这方面的研究仅停留在螺杆结构理想化的小型榨油机阶段, 对于压榨级数多、榨螺结构复杂的工业生产型榨油机尚未见报道。本课题拟以中机康元公司设计制造的单螺杆榨油机为研究对象, 以榨油机主压榨段为研究目标, 建立其有限元数值分析模型, 运用 Fluent 软件中的流体计算模型对流场进行动态仿真分析, 探究流体域内压力场及速度场的分布, 并在此基础上通过流固耦合分析得到榨螺在流场作用下的应力及变形情况, 旨在为螺旋榨油机的结构设计及工艺优化提供参考依据。

1 数值模型

1.1 数值计算模型

有限元法的基本思想是系统的离散化,系统总势能的离散形式为:

$$\Pi_p = \{\delta\}^T \sum_e [T]^e \left(\frac{1}{2} \int_{V_e} [B]^e \{D\}^e [B]^e dv \right) - \int_{V_e} [N]^e \{f\}^e dv - \int_{S_0} [N]^e \{H\}^e ds - \{\delta\}^T \{P_F\}, \quad (1)$$

式中:

- {δ}——结构坐标系节点位移;
- {δ}^T——结构坐标系节点位移的转置;
- [T]^{eT}——单元转换矩阵的转置;
- [N]^{eT}——插值函数的转置矩阵;
- [B]^e——应变几何矩阵;
- [D]^e——弹性矩阵;
- {f}^e——单元的体积力, N/m³;
- {H}^e——单元的表面力, N/m²;
- {P_F}——单元的节点力, N。

采用最小势能原理建立有限元方程,通过解方程可得到节点位移及结构的应力、应变等值。根据最小势能原理 δΠ_p=0,建立结构的总体刚度方程:

$$[K]\{\delta\} = \{P\}, \quad (2)$$

$$[K] = \sum_e [T]^e \{k\}^e [T]^e, \quad (3)$$

$$\{P\} = \sum_e [T]^e \left(\int_{V_e} [N]^e \{f\}^e dv + \int_{S_0} [N]^e \{H\}^e ds \right) + \{P_F\}, \quad (4)$$

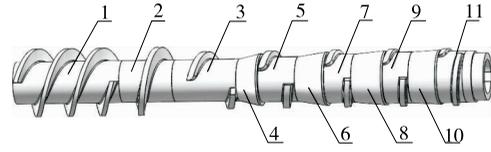
式中:

- [K]——总体刚度矩阵;
- {P}——总体右端载荷向量。
- {δ}——结构坐标系节点位移;
- [T]^{eT}——单元转换矩阵的转置;
- {k}^e——单元刚度矩阵;
- [T]^e——单元转换矩阵;
- [N]^{eT}——插值函数的转置矩阵;
- {f}^e——单元的体积力, N/m³;
- {H}^e——单元的表面力, N/m²;
- {P_F}——单元的节点力, N。

1.2 几何模型的建立与网格划分

榨螺的三维模型由 7 个螺纹段以及 5 个锥圈部分装配组成,其中螺纹段一和螺纹段二构成输送段,从螺纹段三到螺纹段七为榨油机的主压榨段,主压榨段包括五级压榨结构。根据各段螺纹尺寸在 Soliworks 软件中建立如图 1 所示的榨螺三维模型,并在榨螺模型的基础上使用 Fluent 软件中 Geometry 模块建立流体域的几何模型,如图 2 所示。

使用 Fluent 中的 Mesh 模块对流体域模型进行网格划分,对螺锥周围流场情况比较复杂的区域做网格加密细化处理,得到流体域的网格划分如图 3 所示,共有 51 115 个节点,网格数量为 239 230。



1. 螺纹段一 2. 螺纹段二 3. 螺纹段三 4. 锥圈一 5. 螺纹段四 6. 锥圈二 7. 螺纹段五 8. 锥圈三 9. 螺纹段六 10. 锥圈四 11. 螺纹段七

图 1 榨螺三维模型

Figure 1 Three dimensional model of screw

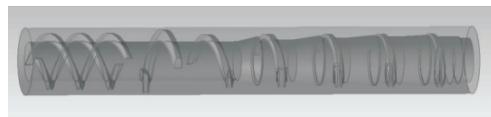


图 2 流体域三维模型

Figure 2 Three dimensional model of fluid field



0 125 250 375 500 (mm)

图 3 流体域网格划分

Figure 3 Grid partition of fluid field

1.3 基本假设

考虑榨膛内的结构、油料性质,以及压榨过程中流场的变化^[9-10],将榨膛内物料模型简化如下:

- (1) 将流动物料简化为幂律流体。
- (2) 膛内油料的流动视为层流。
- (3) 惯性力等体积力远小于黏滞力,忽略不计。
- (4) 流体为连续黏性不可压缩流体。
- (5) 与榨膛接触的物料壁面无滑移现象。
- (6) 压榨过程中,榨膛内充满物料。

2 仿真前处理

采用 Fluent 软件求解流体问题过程中的计算设置极为重要,主要包括网格划分、材料性质设定、设置求解器及物理模型等^[11]。本研究的重点在于对多级压榨结构中物理场变化的探索及描述,忽略时间因素的影响,采用稳态方式进行迭代求解,结合边界条件的基本假设输入连续体的物性参数,得到求解所需的材料性质。

Fluent 提供的物理模型包括 k-e 模型、雷诺应力模型等,其中 k-e 模型本身具有比较高的稳定性和计算精度,常常是前处理中应用最广泛的湍流模型^[12],在本研究中的物料流动为层流,需对模型进行修改,使其适应低雷诺

数的计算。在设定求解方法时,通常可以选择 SIMPLE、SIMPLEC、PISO 3 种形式^[13],由于 SIMPLEC 稳定性较好,特别适用于层流的计算,可加快计算速度,故选用此求解方法。

3 模拟结果分析

3.1 压力

图 4 为一级压榨结构中 YZ 截面的压力分布,从图 4 可知,沿 Z 轴方向流场压力逐渐升高,螺棱推面和根部为螺旋的主要高压区域。随着锥圈底径逐渐增大,膛内空间越来越小,流场压力上升,故锥圈尾端的压力最大,为 1.7 MPa。由图 5 可以看出,榨螺逆时针旋转,螺棱背面由于对油料作用力较小,形成了背压区域,此处压力值在截面上为最小。

从图 6 可知,X 轴负向开口角的存在影响了榨螺的建压作用,使其流场压力梯度较小,其他部分被螺旋挤压的油料会流向低压区,而未被挤压的油料在周围油料的相互作用下向前流动,一直到锥圈部位后压力迅速上升。在

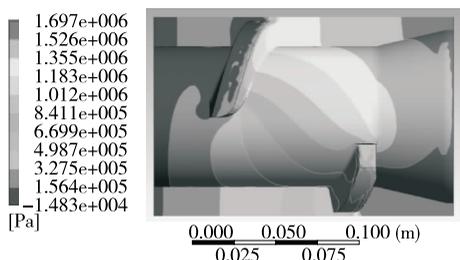


图 4 YZ 截面压力分布

Figure 4 Distribution of pressure field in YZ section

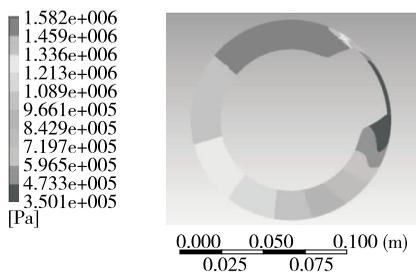


图 5 XY 截面压力分布

Figure 5 Distribution of pressure field in XY section

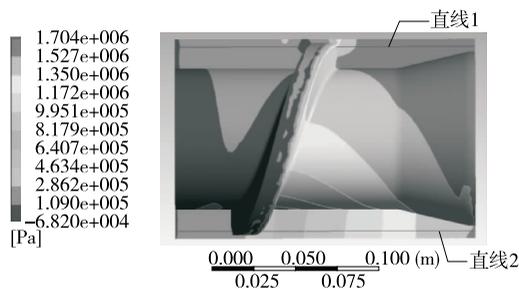


图 6 XZ 截面压力分布

Figure 6 Distribution of pressure field in XZ section

压力场中分别建立 2 条直线,用于研究螺旋结构和开口角对压力分布的影响,直线 1 表示螺旋结构作用下的压力场变化,直线 2 表示开口角对 Z 轴方向压力分布情况。

从图 7 可以看出,0.1 m 处为螺旋始端,在螺旋之前部分的流体域压力场较为平稳,数值变化较小,受螺旋转动影响,螺棱背面压力最小,而螺棱推面压力值急剧升高到 1.5 MPa 左右,之后趋于稳定。螺旋结构对流体域的建压过程为:通过螺棱的旋转推动油料相互摩擦挤压并向前移动,明显提升了流体域内的压力。分析直线 2 的压力分布情况可以得到,在没有螺旋结构的情况下,流体域内油料受四周其他油料的挤压运动形成压力差,在与螺棱推面相同位置的压强为 0.9 MPa 左右,明显低于 1.5 MPa,可见螺旋结构对榨油机膛内建压的重要性。

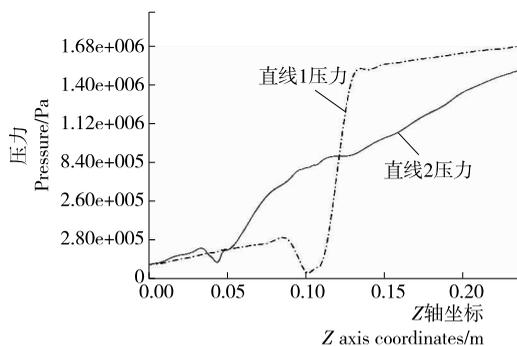


图 7 直线上的压力分布

Figure 7 Distribution of pressure field in lines

数据处理后得到一级压榨结构的 Z 轴压力曲线,从曲线可知,流场压力沿 Z 轴方向呈逐渐增长的趋势,在开始段由于无螺旋纹影响增长较慢,约 0.05 m 处为螺旋头端,此处开始压力增势变快,中间由于螺旋背压较低产生几段压降,到 0.20 m 处螺旋尾端压力已上升到 1.4 MPa 左右,为螺旋对流场的建压作用。一级压榨结构中锥圈的作用主要是将膛内压力进一步提高,将油料在更狭小的空间中被挤压混合均匀,便于下一级压榨。

根据图 8 一级压榨结构沿 Y 轴压力分布曲线,可看出流体域内压力在 Y 轴负方向最高,达到 1.2 MPa,随着 Y 坐标的上升压力呈下降趋势,由于仿真模型将重力设置在 Y 轴负向,故受重力的影响油料会更多流向 Y 轴负方向,使其压力高于其他部位。经处理后的压力数据在 Y 轴上依然有较大的波动性,说明流体域内轴向的压力场比横向更为复杂,受榨螺结构影响更明显。

本研究所用设备为单螺旋五级压榨榨油机,根据图 9 仿真结果可知前 4 级压榨结构对油料流场的影响类似,主要作用均为提升膛内压力,使油脂被充分挤压出来。第五压榨结构由最后一节螺旋构成,主要作用为建立膛内高压区与出饼段之间的联系,形成压力降差使压力逐渐降低至成饼压力,油料在压力下被挤压成为油饼。

为研究榨膛内压力场的降压过程,提取螺旋 7 流体域内的压力数据并进行分析,从螺旋 7 的压力云图和沿

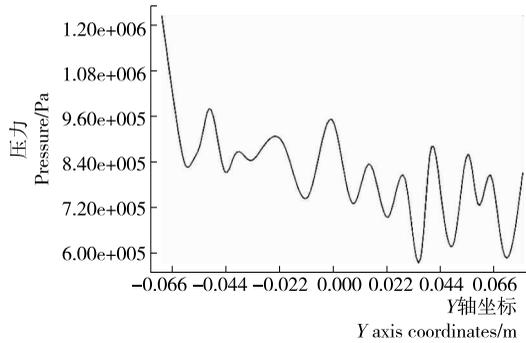


图 8 Y 轴压力曲线

Figure 8 Pressure curve along Y axis

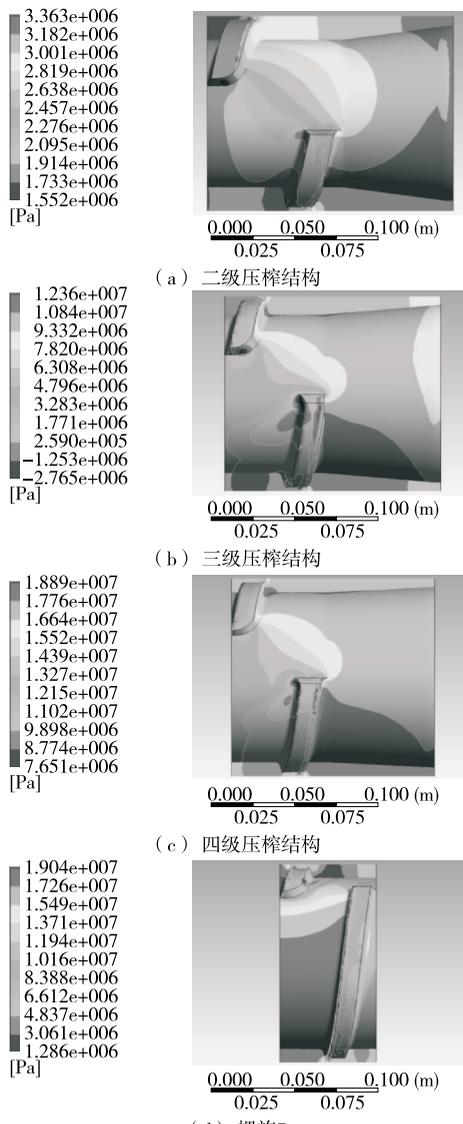


图 9 其他压榨结构压力云图

Figure 9 Pressure cloud field of other pressing structures

Z 轴位移的压力曲线可以得出,末节螺旋 7 在挤压输送物料的同时,螺棱作为压力阻隔使前后 2 部分油料形成了较大的压力差,轴向压力可从 18 MPa 逐渐下降到 6 MPa 左右。由于螺旋 7 无开口角,其螺旋线在一个导程内完全闭合,更有利于对前端高压区域形成阻隔。所以螺旋结构在流体域中不仅有建压的作用,当膛内压力降低时其对压力场的影响效果同样明显。

将各段压榨结构的压力数据全部提取出来,绘制出单螺旋榨油机主压榨段的压力一位移曲线。从主压榨段的压力一位移曲线可知,在一级、二级压榨区的流体域压力上升不明显,油料经过这 2 个区域可将内部的大多油脂榨出,剩余油脂被挤压出则需更大的外界压力使油料细胞破碎更彻底,压力急剧升高的三级、四级压榨区正满足此条件。若在过高的压力下使油料被压缩到一定极限后,受流阻力的影响会使挤出的油脂重新回吸到油料中,所以流体域中压力上升到一定极限后,五级压榨区的压力开始下降。

3.2 速度

图 10 为一级压榨结构中 XZ 截面的流场速度分布,图 11 为一级压榨流动曲线。从图 10 可看出流场域下部的流速明显高于上部,结合图 11 分析可得,由于 X 轴负向螺旋开口角的存在,使其在前后压力差下可以自由流动,故流速高于其他部分流动受阻的油料。

图 10 中下方的高流速区域是由于开口角端面的存在,螺旋转动时首先接触到此部分油料,推动其流动,故流速高于其他部位。当油料流动到榨螺旋结构与锥圈相接的位置,由于内径增大使榨膛内体积逐渐减小,锥圈的物料流速下降,直至锥圈末端油料流速急剧上升,由于锥

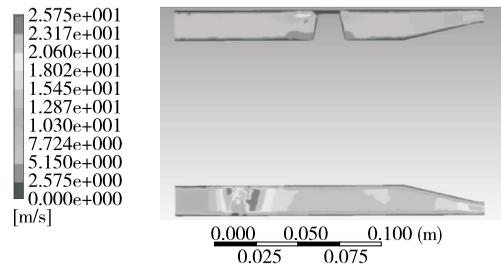


图 10 XZ 截面速度分布

Figure 10 Distribution of velocity field in XZ section

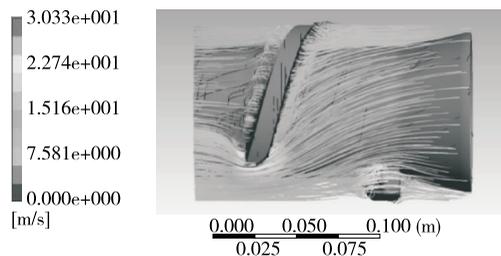


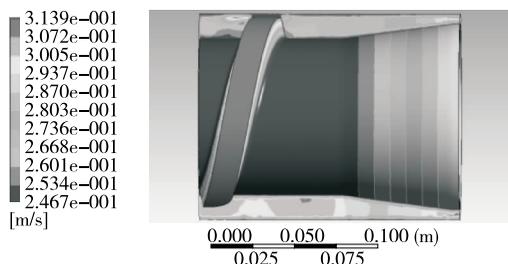
图 11 一级压榨流动曲线

Figure 11 Flow curve of first-order pressing structure

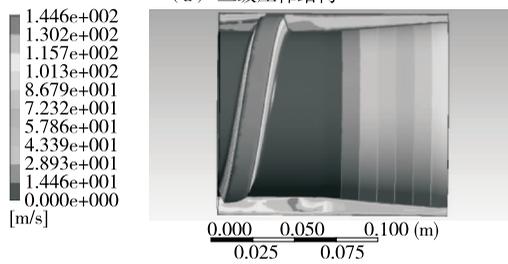
圈末端与榨膛内壁形成狭小的环形空间,使得相同体流量的油料流速增大。

从图 12 中观察得到二级、三级和四级压榨的截面速度分布与一级压榨基本类似,故不做分析。

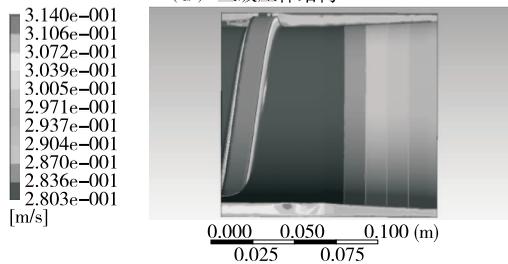
螺旋 7 为五级压榨结构,其承担着膛内降压及将油料输送压缩成饼的作用。由于螺旋结构完全封闭且在前后形成了压力降,由图 13 可知,压力差作用下螺棱背面的油料不会出现过多回流现象,而是从螺棱顶部被挤压输送,其余部分沿螺旋侧棱流动到低压区域,螺棱推面的油料流速明显高于其他部分,在这一级压榨中无锥圈结构,所以油料只受螺旋推动被挤压到末端流出。



(a) 二级压榨结构



(b) 三级压榨结构



(c) 四级压榨结构

图 12 其他压榨结构速度云图

Figure 12 Velocity cloud field of other pressing structures

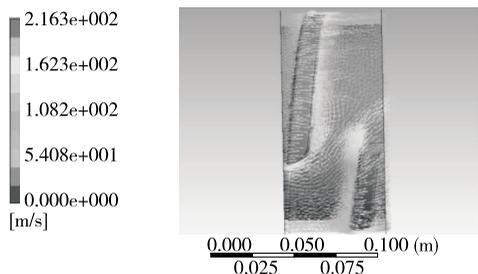


图 13 螺旋 7 速度矢量图

Figure 13 Velocity vector diagram of screw 7

为更好地说明流体域内速度的分布变化,引入速度一位移函数,纵坐标定为速度大小,横坐标为 Z 轴位移坐标。如图 14 所示,在流体域中分别取 2 条平行 Z 轴的直线,直线 1 位于 X 轴正向的流场边缘,直线 2 位于 X 轴负向的流场边缘。采集直线 1、2 上各点的坐标和速度值进行分析。

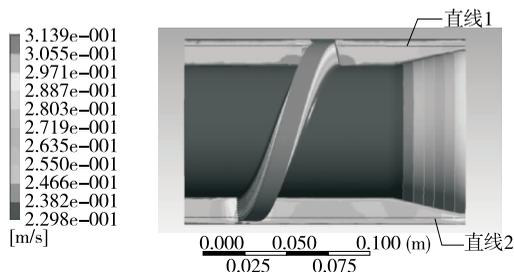


图 14 2 条直线的位置

Figure 14 Position of two straight lines

根据直线 1 上速度在 Z 轴的分布曲线可知,油料以均匀速度进入螺旋结构,在 Z 轴 0.1 m 处受到螺棱阻碍发生波动,速度略增后迅速下降,之后靠近螺棱推面的油料由于受螺旋推动速度值升高。油料流动到锥圈表面后速度逐渐升高,在锥圈末端流场速度达到最高值。为了直观地对比流场不同位置速度分布情况,将直线 1、2 的速度曲线绘制成图,如图 15 所示。

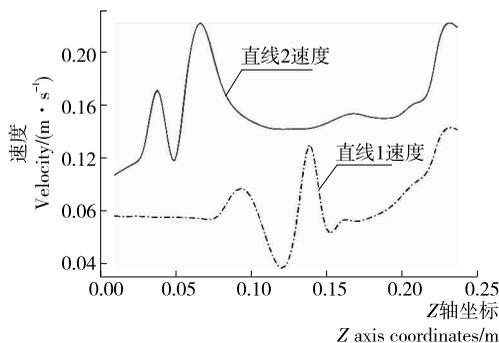


图 15 2 条直线上的速度曲线

Figure 15 Velocity curves on two straight lines

对比图 15 中 2 条函数曲线可以看出直线 1、2 上的速度分布趋势基本相似,直线 2 上的流场速度整体高于直线 1,且同样受螺杆结构影响出现了速度波动,波峰和波谷的位置都较直线 1 有所提前,油料经过一段匀速输送后在锥圈位置的流场速度同样急剧上升,最高为 0.22 m/s。由此分析得出榨油机压榨过程中,螺旋结构和锥圈结构分别对流体域速度流场的影响如下:

(1) 流体域内的油料遇到螺杆结构速度会产生波动,表现为 2 个波峰 1 个波谷,且在螺旋推面的速度波峰高于螺棱背面。在螺杆结构顶部由于与榨膛内表面形成空间狭小,阻碍了油料在此处的流动,形成速度波谷。

(2) 流动的油料在刚进入锥圈结构时,由于榨膛内体积的缓慢缩小对油料的流动形成阻碍,使其流速下降,之后趋于平稳。

(3) 锥圈结构对流体域内流场速度有明显的影响,主要原因是锥圈前宽后窄的结构,使同样体积分量的油料在锥圈末端速度急剧升高,进入下一级的压榨结构。

3.3 流固耦合

将流固耦合中的理论运用到榨油机中,可以直接将流体分析得到的压力结果加载在固体的结构力计算中^[14]。图 16 表示结构计算中 2 种不同力加载方法,与图 16(a) 中以往通过施加局部力载荷得到的螺杆受力结果^[15]相比,图 16(b) 的流固耦合方法将流场分析结果直接作为螺杆结构力分析的前提,使得计算结果更精确,螺杆受力情况更加符合实际压榨过程。

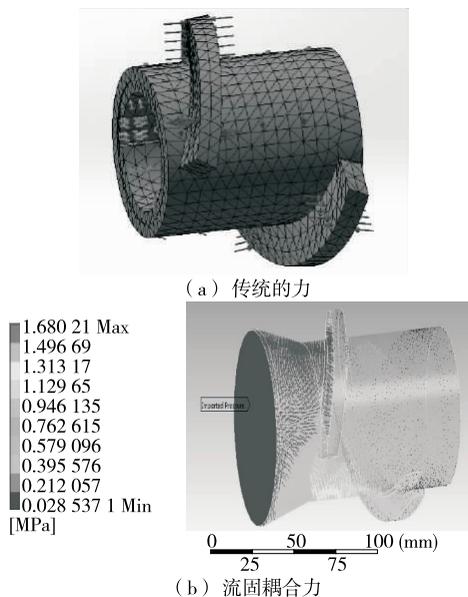


图 16 2 种不同的力载荷加载方法

Figure 16 Different loading methods of force load

图 17 为榨螺各级压榨结构的应力分布云图,可以看出应力主要分布在螺棱侧面及根部,随着螺旋线而渐变,在第四级压榨结构靠近端面的根部及锥圈尾端位置达到最大值(为 91.5 MPa),由于轴向力及圆周力等综合作用导致的应力集中状态。因此在榨螺的生产加工过程中,应尽量选择合适的材料和加工工艺,避免尖角处产生应力集中问题^[16]。

图 18 为榨螺各段受力变形云图,从变形情况可知螺棱的形变最大。由于其根部与轴相连,其变形主要与轴的径向变形有关,故螺棱受力发生的轴向变形被传递到了螺棱顶端,符合实际受力情况。最大变形量产生在四级压榨结构,达到 0.004 mm,结合应力分析可知,由于压

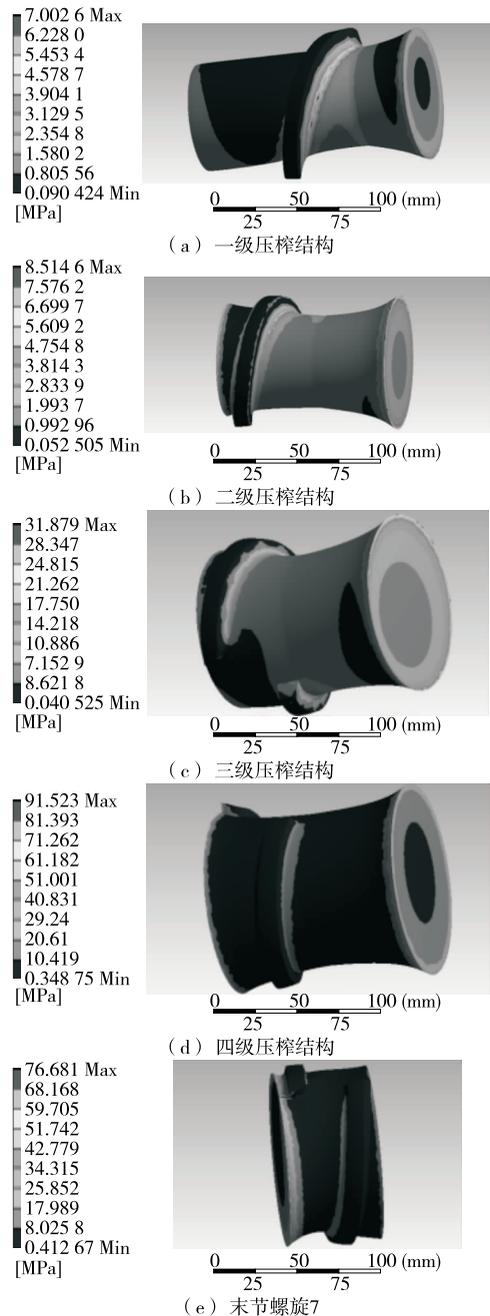


图 17 榨螺应力云图

Figure 17 Stress nephogram of screw

榨过程中四级压榨结构受力最大所致。在分段榨螺的生产加工中,应对四级压榨结构进行相应的表面处理,以提高其刚度和强度。

通过流固耦合分析,得到榨螺在实际生产中较为真实的受力及变形情况,观察发现存在的应力集中和较大变形部位,可以通过优化设计结构、选择不同材料、改进加工方法或采用不同热处理方法等方式来有效解决此问题^[17],从而使榨油机系统更加安全可靠。

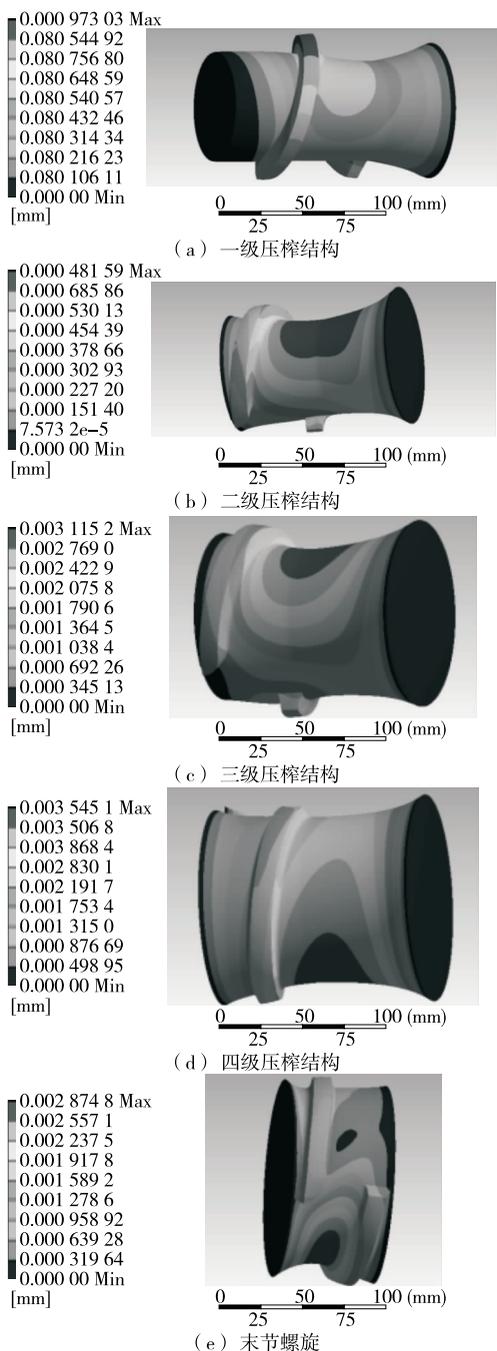


图 18 榨螺变形云图

Figure 18 Deformation nephogram of screw

4 结论

(1) 本研究通过对单螺杆榨油机基本结构和工作原理的分析,完成了对榨油机榨螺及流体域三维模型的建立,运用 Fluent 软件对榨油机主压榨段流体域的物理场进行仿真研究,分析了流体域压力场和速度场沿各方向的变化趋势,探究了榨螺结构对流场压力和油料流速的影响作用,绘制出主压榨段在压榨过程中压力一位移和速度一位移的变化曲线,为榨油机内物料的流动特性做出解释。

(2) 相比于之前的研究方法,本试验采用流固耦合方法,分析得到了与榨螺在实际生产中较为接近的受力及变形情况,并发现榨螺存在的容易产生应力集中和较大变形的危险部位。通过针对这些特殊部位进行优化设计结构、使用更优材料、改进加工方法或者采用不同热处理方法等方式,可以有效提升榨油机的使用寿命,从而使榨油机系统更加安全可靠。

(3) 本研究在仿真时对压榨油料的模型进行了一定简化,下一步研究该对将油料模型完善,使其更接近于实际压榨过程中的状态,仿真结果会更准确。

参考文献

- [1] 丁福祺. 食用油压榨法和浸出法工艺的区别[J]. 中国油脂, 2005, 30(1): 5-6.
- [2] EVON P, AMALIA K I, CERNY M, et al. Extraction of oil from jatropha seeds using a twin-screw extruder: Feasibility study[J]. Industrial Crops & Products, 2013, 47(3): 33-42.
- [3] 张学阁, 伍毅, 阮竞兰. 双螺杆榨油机榨螺与榨笼结构的研究进展[J]. 包装与食品机械, 2012, 30(3): 47-49.
- [4] 解士聪, 黄志辉, 李昌珠, 等. 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, 35(6): 104-107.
- [5] 刘汝宽, 解士聪, 肖志红, 等. 蓖麻籽螺旋压榨制油过程中榨笼温度分布及其数值拟合[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(6): 74-78.
- [6] HSIEH F, PENG I C, HUFF H E. Effects of salt, sugar and screw speed on processing and product variables of corn meal extruded with a twin-screw extruder[J]. Journal of Food Science, 2010, 55(1): 224-227.
- [7] 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.
- [8] 余南辉, 李诗龙, 宋良浩. 基于 ANSYS 的螺旋榨油机榨螺的应力分析[J]. 科技创新与应用, 2014(6): 34-35.
- [9] 郑晓. 油料压榨理论与试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005: 97-100.
- [10] 张亚新. 植物油料压榨的塑性本构模型及有限元模拟分析[D]. 武汉: 武汉工业学院, 2009: 24-31.
- [11] 邱云峰. 螺旋榨油机中流固耦合物理场的研究[D]. 武汉市: 武汉轻工大学, 2015: 34-36.
- [12] 李赫, 张志, 任源, 等. 基于 FLUENT 的菊花热风干燥流场特性仿真分析[J]. 食品与机械, 2018, 34(10): 133-138.
- [13] 钱方琦. 小型双螺杆压缩机关键技术研究及 CFD 仿真分析[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010: 41-43.
- [14] 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.
- [15] 邓全得. 螺旋压榨机螺旋的有限元分析[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2013: 30-32.
- [16] 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.
- [17] 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.