

双螺杆挤出机筒体热流固耦合有限元分析

张晓, 赵宗华, 俞长庚, 雷刚刚, 梁晓刚

(天华化工机械及自动化研究设计院有限公司, 甘肃 兰州 730060)

摘要: 本文以 SHJ-135 型双螺杆挤出机筒体为研究对象, 采用有限元方法, 建立筒体的三维模型, 研究当筒体内部流道充入导热油介质时的流道所受的压力场分布和筒体的热变形, 发现在靠近出口的整个法兰面, 筒体的最大总变形量最大, 最大变形量为 1.74 mm, 在法兰面固定的一端, 筒体的最大总变形量最小, 其中沿着轴向 (X 方向) 是最易发生变形的方向, 而且轴向 (X 方向) 变形对筒体的总变形结果影响最大, 周向变形 (Y 方向) 对筒体的总变形结果影响最小。其分析结果对于研究双螺杆挤出机筒体的总体变形具有一定的参考意义, 为后续新产品的开发、结构的优化提供了设计思路和依据。

关键词: 双螺杆挤出机; 筒体; 热变形; 热流固耦合; 有限元

中图分类号: TQ320.66

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2025)02-0068-05

DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2025.02.015

0 前言

螺杆挤出技术主要应用于聚合物加工、制药、化工和食品等相关行业^[1]。最常见的挤出设备是单螺杆挤出机和双螺杆挤出机。对于原材料的制备和处理过程, 典型的应用是将粉末或颗粒的混合物通过挤出设备进行反应、转化为固体产品。通常使用同向啮合双螺杆挤出机进行混合反应、挤出成型、脱挥处理等作业。为了满足工艺需求的多样性, 采用具有可更换的螺杆元件, 根据不同的工艺要求以不同的排列方式布置, 并与筒体整体加工长度相对应。

筒体作为双螺杆挤出机的重要组成部分之一, 它将外部提供的热量传递给筒体内部物料或带走内部反应的物料的热量, 可以说筒体的温度控制是一个典型的过程控制, 其传热过程涉及到热传导、热对流及热辐射等, 筒体的结构、材料及壁厚等都对热量的传递过程产生了较大的影响。在实际反应生产过程中, 橡塑挤出机的筒体受热应力和作用力的耦合作用, 此时会产生热应力集中现象, 使筒体发生局部变形, 筒体的变形会破坏筒体与螺杆的同轴度, 而筒体与螺杆的配合间隙还要求保持在一定的范围内, 进而加剧两者之间的相互作用力。因此, 温控对挤出机筒体的变形具有十分重要的意义。而筒体的换热能力主要体现在内部结构的设计, 流道结构设计不同, 换热效果不同, 其所受的热应力和热变形也不相同。因此, 筒体的结构设计既要考虑内部流道结构以此来满足换热能

力的需求, 又要满足结构刚度需求, 故研究筒体的流道结构和筒体的结构刚度对实际生产加工过程具有重要的参考价值 and 意义^[2]。

目前, 对挤出机筒体模块的设计主要依托于研究者的经验和实验, 随着工业化水平提升, 各种复杂多变的工况对实际的生产加工提出了更高的要求, 因此需要借助计算机仿真技术, 实现筒体结构的设计、优化^[3]。本文主要采用有限元分析, 对 SHJ-135 双螺杆挤出机筒体进行热流固耦合分析, 研究当筒体流道内充入导热油介质时筒体的热变形情况。

1 筒体模型

1.1 物理模型

双螺杆挤出机筒体按结构可分为整体式筒体和分段式筒体。整体式筒体在装置运行过程中温度分布严重不均匀, 在两端螺栓固定约束的作用下, 螺杆在动力装置的作用下不断旋转、混合物料, 会产生较大的变形, 同轴度降低。目前, 分段式机筒以其结构标准化、装配精度低、拆装维护检修方便、灵活多变等优点被广泛应用于挤出机模块的反应全过程。

本文研究对象为某化工企业年产 20 万 t 聚丙烯造粒项目, 其中对于挤压造粒模块选用 SHJ-135

作者简介: 张晓 (1992-), 女, 工程师, 硕士研究生, 主要从事橡塑机械的研发设计。

项目编号: 甘肃省重大专项 21ZD4GA003

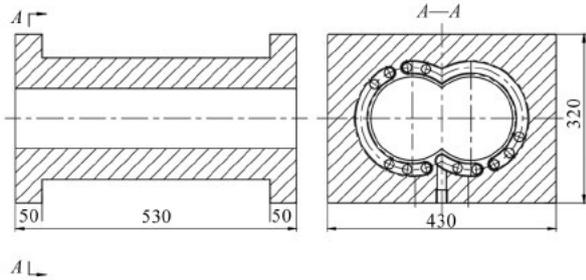


图1 筒体的结构示意图

型双螺杆挤出机分段式筒体。筒体其外形尺寸为430×530×320 mm，两侧法兰厚度均为50 mm，在实体模型的建模中，为了降低求解规模，我们选取其中一节闭合筒体，并对实体模型进行了相应地简化，除去销孔、螺栓孔、倒角。如图1所示为双螺杆挤出机筒体的结构示意图。

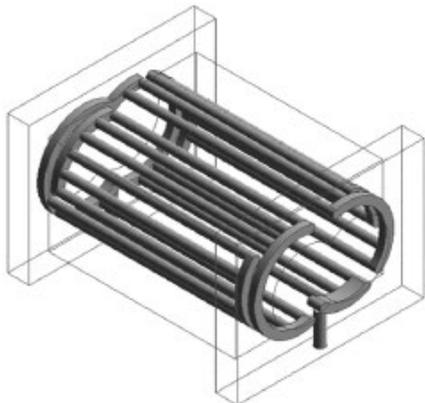


图2 筒体的模型图

随着化工新材料日新月异，对聚合物加工要求也层出不穷，聚合物反应是一个放热反应，因此对于挤出机筒体内部流道的设计显得至关重要，它决定着挤出机整个系统的热交换能力，换热能力好，筒体热变形量小，换热能力差，筒体可能会产生较大的热变形，进而影响挤出产量的品质和输出。对于挤出机筒体的流道结构，国内外已经有很多学者对其进行了相关研究，分别对单流道、双流道筒体的换热能力进行了讨论和分析^[4]。本文对筒体内部流道也进行了相关分析模拟，研究其换热能力及筒体的热变形。图2为双螺杆挤出机筒体流道的模型图。图3为筒体内部的流道展开图。方案选用经典的单向双通道异侧布局，介质从编号为1、2管口流入，从20、21、22管口流出。

1.2 数学模型

1.2.1 流体控制方程

对于可压缩流体来说，可以采用下列控制方程来描述这些守恒定律^[5]。

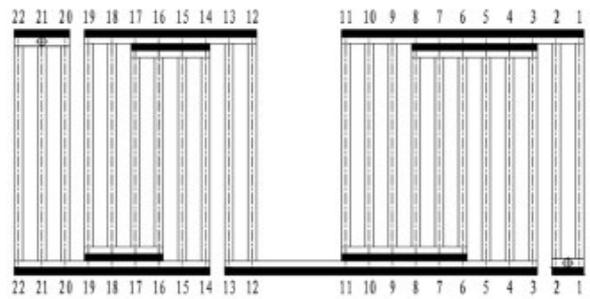


图3 筒体的流道展开图

质量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho v) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla(\rho v v) - F_f \quad (2)$$

$$(\rho \nabla v - F) + 2\mu \nabla \cdot \tau_f \quad (3)$$

$$e - \frac{1}{2}(\nabla v + \nabla v^T) \quad (4)$$

式中， t 为时间， F_f 为流体体积力矢量， ρ_f 为气体密度， v 为气体速度矢量， τ_f 为剪应力张量， F 为流体的压力， μ 为动力黏度， e 为速度应力张量。

1.2.2 固体控制方程

由牛顿二定律推导出筒体部分的守恒方程为^[6]：

$$\rho_s \delta_s - \nabla \delta_s + F_s \quad (5)$$

式中， ρ_s 为筒体密度， δ_s 为柯西应力张量， F_s 为固体体积力矢量，为固体域的加速度矢量。

考虑到流固之间的能量传递，将流体部分总焓(h_{tot})形式的能量方程写成下列形式：

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} + \nabla(\rho h_{tot} v) - \nabla(\lambda \nabla T) + \nabla(\rho \tau) + \rho S_f + S_E \quad (6)$$

式中， T 为温度， λ 为应力， S_E 为能量源项。

就固体而言，增加了由温差导致的热变形项：

$$F_T = \alpha_T \Delta T \quad (7)$$

式中， α_T 为温度相关的热膨胀系数。

1.2.3 流固耦合方程

筒体的流固耦合方程也遵循基本的守恒定律，在筒体流固耦合的交界面处，流体与固体的应力 δ 、位移 u 、热流量 q 、温度 T 等变量应该满足相等或守恒，即满足以下四个方程^[5]：

$$\delta_f n_f = \delta_s n_s \quad (8)$$

$$\mu_f = \mu_s \quad (9)$$

$$q_f = q_s \quad (10)$$

$$T_f = T_s \quad (11)$$

式中,下标 f 、 s 分别为流体、固体; n 为法向矢量。

2 热流固耦合分析

图 4 为求解流程图,各个模块进行连接以实现数据单项传递,进而完成耦合分析。

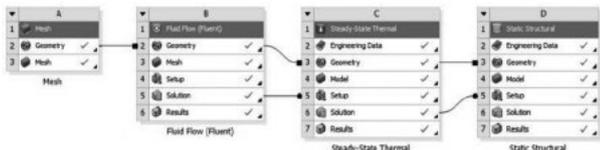


图 4 热流固耦合求解流程图

2.1 边界条件设置

与单螺杆挤出机不同的是,双螺杆挤出机筒体内流场的流动与传热更加复杂。因此双螺杆挤出机在模拟设置时,对边界条件要进行合理地定义和优化。本案例边界条件设置如下:

(1) 考虑双螺杆挤出机在稳定转速下的工作状态,故该过程为稳态。

(2) 假设流道入口通入的导热油温度为 260 °C,速度为 2 m/s,出口温度为 255 °C,压力为 0.01 MPa。

(3) 挤出机筒体沿挤出方向为一端固定,另一端为自由伸缩。

(4) 流体域设为壁面无滑移条件^[7]。

(5) 由于聚合物为高黏物料,忽略惯性力和体积力。

考虑到挤出机输送的可能是高黏、高温、高压、强腐蚀性的物料,螺杆在筒体内部实现高速运转的同时,可能会对筒体内壁产生较为强烈的磨损、刮壁现象,因此,工业化实际生产过程中,在物料不断反应、螺杆不断旋转混合的双重作用下,对双螺杆挤出机筒体的材质有较为苛刻的要求。本文筒体材料选用 38CrMoAl,这种材料的屈服强度和抗拉强度均很高,耐磨性也很好,其属性如下:弹性模量:206 GPa;泊松比:0.3;线膨胀系数: $1.3 \times 10^{-5} \text{ k}^{-1}$;密度: 7850 kg/m^3 ;热导率、比热容均与温度有关,具体见表 1。

表 1 结构钢 38CrMoAl 的物理性能

温度/°C	25	200	400	800
热导率/[kW·(m·k) ⁻¹]	0.431 24	0.397 75	0.330 75	0.326 57
比热容/[kJ·(kg·k) ⁻¹]	0.164 73	0.523 35	0.561 03	1.193 24

在实际生产加工过程中,传统的热载体是水及水蒸汽,考虑用水做热载体时往往由于反应温度过高,当水超过其沸点时,装置在运行的过程中会对系统的

承压能力要求较高。而当反应条件处于高温的极端恶劣条件下,导热油以其效率高、沸点高、散热快、热稳定性好等优点,被工业生产装置广泛地使用。因此,使用工业导热油可以减少设备的投资,提高生产效率。本文根据具体实际工况选用 350 号导热油,其属性见表 2。

表 2 350 号导热油的物理性能

比热容 /J·(g·k) ⁻¹	密度/(kg·cm ⁻³)	热导率 /W·(m·k) ⁻¹	黏度/kg(m·s) ⁻¹
2 880	900	0.521	0.036

2.2 网格划分

网格划分是有限元模拟的关键步骤,网格划分是否准确,直接影响仿真模拟的下一步进行以及最终模拟结果的精确度。如图 5 所示为流道内部结构的流场区域的网格划分图,图 6 为筒体内部管路流场区域的局部放大图。图 7 为筒体结构的网格划分示意图。流体网格和固体网格平均质量均为 0.85 以上。



图 5 流场区域网格划分



图 6 流场区域局部网格划分

2.3 有限元结果分析

首先在 Fluent 模块对筒体内部流场进行分析,对筒体内部流道进行流体填充,填充介质为导热油,使

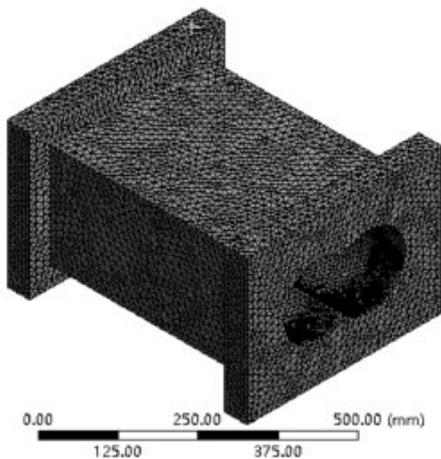


图7 筒体网格划分

用标准的 $k-\epsilon$ 湍流模型和 SIMPLEC 算法进行求解, 开启能量方程、质量方程和运动方程在内的守恒方程, 得到流体的压力场分布。如图 8 所示, 为流道通入导热油时的压力云图, 右侧红色管口为流道入口, 左侧蓝色管口为流道出口, 从图中可以看出: 入口及分流的三根流道处压力值最大, 约为 1.16×10^5 Pa, 出口处压力值最小, 约为 6.3×10^3 Pa, 整个流道的压力差约为 0.1 MPa, 筒体内部的整个流道压力分布具有规律性, 从高压到低压阶梯层次分明, 呈现逐渐递减的趋势。同时, 整个流场分布既没有形成断流, 也没有形成回流, 说明该筒体流道的设计符合要求, 所得流场结果可靠、可行, 满足实际生产条件。



图8 流道压力分布云图

将内部流道内导热油的热量以及压力值传递给筒体壁面, 如图 9 所示, 采用热流固耦合的数值模拟方法计算双螺杆挤出机筒体的总变形。从图 9 中可以得到: 筒体的最大总变形量为 1.74 mm, 而实际生产装置在正常运行过程中, 在同样的工况条件下, 测量筒体发生的最大变形量为 2.1 mm, 其误差在 2% 以内, 说明仿真模拟数值可靠, 发现在靠近出口的整个法兰面, 筒体的最大总变形量最大, 最小总变形量为 0.0 mm,

发生最小总变形的位在法兰固定的一端, 同时从筒体的变形程度可以得出筒体的变形量很小, 满足小变形假设理论, 适合热流固耦合方法^[8]。

此外, 从图 9 中可以看出: 筒体整体变形量从法兰固定端到法兰自由端呈现逐渐增长的趋势, 整体变形量沿轴向方向逐渐增大^[9]。

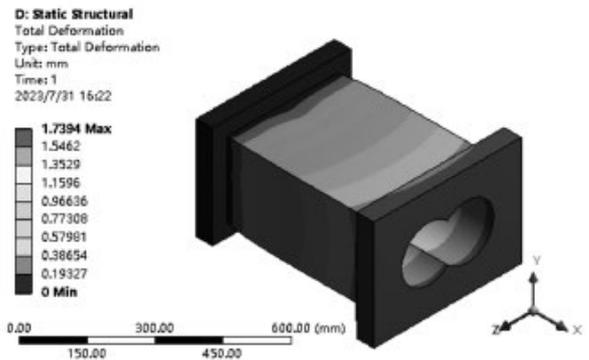


图9 筒体总体变形

如图 10~图 12 所示为筒体在各个方向的变形, 可以得出: 沿轴向变形量最大, 约为 1.57 mm, 径向变形量次之, 约为 0.62 mm, 周向变形量最小, 约为 0.45 mm。因此, 今后对双螺杆挤出机的筒体结构进行优化设计时, 考虑挤出机在工作运行状态时的刚度特性, 应重点关注筒体在轴向方向的变形情况。

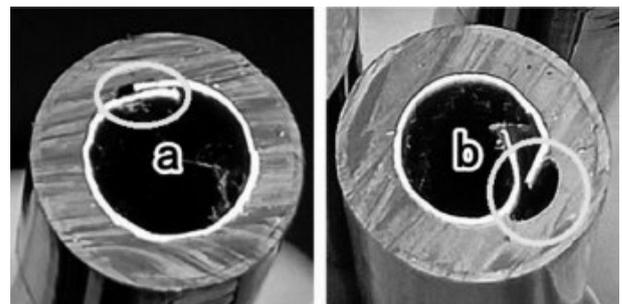


图10 沿 X 方向变形

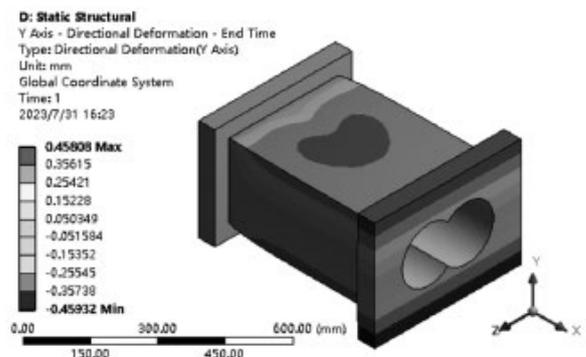


图11 沿 Y 方向变形

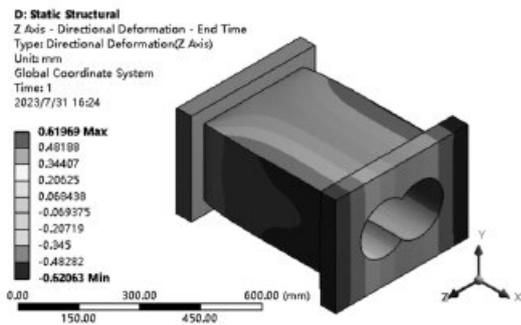


图 12 沿 Z 方向变形

3 结论

(1) 通过对 SHJ-135 型双螺杆挤出机闭合筒体的流体域通入导热油介质时, 研究发现, 筒体内部整个流道的压力差约为 0.1 MPa, 压力分布具有阶梯性, 呈现逐渐递减的趋势, 既没有形成断流, 也没有形成回流, 说明该筒体双流道的设计符合要求, 所得流场结果可靠、可行, 满足实际生产条件。

(2) 通过筒体热流固耦合数值模拟分析, 在通入导热油介质时筒体的最大变形量是 1.74 mm, 位于靠近出口的整个法兰面, 因此法兰面为筒体的危险区域, 该结论符合实际工况的工程应用。

(3) 分别对三个方向的挤出机筒体变形进行分析, 可以得出双螺杆挤出机筒体的变形规律: 最容易变形的方向的是轴向变形, 而且轴向变形对筒体的总变形结果影响最大, 径向变形次之, 周向变形对筒体的总

变形结果影响最小, 因此, 筒体的抗变形能力是决定双螺杆挤出机是否达到产品质量的重要因素之一。

(4) 本文针对挤出机筒体材质为氮化结构钢 38CrMoAl 进行了相关仿真模拟, 随着新材料行业的发展, 今后可以对其他材料筒体的热流固耦合分析, 获得最大经济效益的同时减少筒体的变形程度。

(5) 今后可以关注挤出机筒体的流道结构, 通过设计不同的流道结构并进行相关的仿真计算, 确定最佳的流道结构, 最合适的流道孔径以及筒体最优壁厚值。

参考文献:

- [1] 贾朝阳, 张小莹, 梁晓刚. 同向双螺杆挤出机在聚合物脱挥中的应用研究 [J]. 中国塑料, 2012,26(08):107-110.
- [2] 俞长庚, 梁晓刚. 同向双螺杆挤出机在连续生产热熔压敏胶中的应用 [J]. 橡塑技术与装备, 2017,43(16):35-37.
- [3] 彭涛, 贾朝阳, 李景峰. 有限元分析在双螺杆挤出机筒体设计中的应用 [J]. 中国塑料, 2013,27(02):103-109.
- [4] 潘宝霞, 贾朝阳. 挤出机双流道筒体的设计及换热能力的计算与分析 [J]. 工程塑料应用, 2010,38(09).
- [5] 李锦伟, 唐跃, 孙召成. 双螺杆挤出机筒体结构参数优化设计与分析 [J]. 塑料, 2015,44(03):56-60.
- [6] 张宇昕. 双螺杆挤出机筒体结构分析及筒体内聚合物流动与传热研究 [D]. 北京化工大学, 2010.
- [7] 张超, 樊瑜瑾, 田野. 啮合同向双螺杆挤出机滑移条件下的仿真分析 [J]. 塑料科技, 2019,47(08):71-75.
- [8] 栗阳, 王振文, 吴敏. 双螺杆挤出机流道流场和操作参数的数值模拟研究进展 [J]. 食品工业科技, 2021,42(02):338-344.
- [9] 方万瀑, 郑京连, 周建武, 等. 计算机辅助设计 (CAD) 在双螺杆挤出机工艺设定的发展及应用 [J]. 塑料工业, 2015,43(10):48-50.

Finite element analysis of thermal fluid solid coupling of twin-screw extruder barrel

Zhang Xiao, Zhao Zonghua, Yu Changgeng, Lei Ganggang, Liang Xiaogang

(Tianhua Institute of Chemical Machinery & Automation Co. LTD., Lanzhou 730060, Gansu, China)

Abstract: This article selects the SHJ-135 twin-screw extruder barrel as the research object, and uses finite element analysis method to construct a three-dimensional model of the barrel. The pressure field distribution and thermal deformation of the cylinder were studied when the internal flow channel of the cylinder was filled with thermal oil. The study found that the entire flange surface near the outlet experienced the maximum total deformation of the cylinder, reaching 1.74 millimeters. At the end fixed on the flange surface, the total deformation of the cylinder is the smallest. Analysis indicates that the axial direction (X direction) is the most prone to deformation and has the most significant impact on the total deformation of the cylinder, while the circumferential direction (Y direction) has a relatively small impact on the total deformation. These analysis results have important reference value for understanding the overall deformation characteristics of twin-screw extruder barrels, and provide valuable design ideas and theoretical basis for the development and structural optimization of future new products.

Key words: twin-screw extruder; cylinder body; thermal deformation; thermal fluid solid coupling; finite element method

(R-03)