

# 螺杆挤出机高黏熔体 POE 进料管结构设计及有限元仿真

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:** 本文采用热流固耦合的有限元分析方法, 研究三种不同结构的挤出机熔体进料管中通入高黏熔体 POE 时, 进料管所受到的压力场、速度场及热变形情况, 通过数值对比, 进而确定螺杆挤出机高黏熔体 POE 进料管的最优结构, 同时将模拟值与实验值进行对比验证, 发现误差在 5% 以内, 该结构为后续挤出机连接结构方案的设计和优化提供了思路, 同时降低设备能耗, 提高设备产能。

**关键词:** 热流固耦合; 进料管; 热变形; 压力场; 速度场

**中图分类号:** TQ330.663

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1009-797X(2025)01-0066-05

**DOI:** 10.13520/j.cnki.rpte.2025.01.014

## 0 前言

本文研究对象为某石化厂高黏聚合反应项目, 该项目所使用的螺杆挤出机具有挤压、输送、混合功能, 它包括进料装置、螺杆、筒体、驱动螺杆转动的驱动机构以及其他相连接的附属结构。挤出机加料方式有限制加料和定量加料两种, 通常在挤出机加料口的上方设置加料装置, 而在该项目中由于场地空间局限、实验装置较大等因素, 考虑将进料口设置于挤出机筒体的侧面, 通过进料管将上游闪蒸器内的物料输送到筒体内部, 进而与筒体内其他物料进行挤出混合反应。随着工业化装置规模的扩大和生产能力的不断提升, 挤出机进料管输送的物料物性参数千差万别, 特别是当进料管内输送高黏度、高温熔体以及带有复杂的弯管结构时, 极易出现堆积堵塞现象。同时, 当物料中的挥发分含量较高时, 物料中的挥发分难以及时排出, 过多的挥发分在进料管内流动, 使得进料管中的温度难以控制, 在增加能耗的同时影响整个生产装置的产品质量和生产转化效率。

近年来, 有限元仿真技术在各个学科领域运用的越来越成熟, 利用有限元工具, 不仅可以减少整个项目工程的工作量, 还能精准地定位排查到问题所出现的方向, 使分析更加准确, 同时可以提供相应的研究思路, 实现了从概念到生产整个产品链的突破。王现中采用实验与仿真分析方法, 分析研究了高填方下穿管路的应力、应变、挠度响应等参数特征, 并根据管道临界失稳

状态反推出监测预警值, 为现场实际工况应用提供了较好的思路和方法<sup>[1]</sup>。段成红采用 ANSYS 对异径三通管进行有限元模拟, 利用响应面优化的方法对结构进行优化<sup>[2]</sup>。李青研究了输油弯管在流固耦合作用下的模态分析, 分析了管道的振动频率和应变特征, 为输油管道设计提供新思路<sup>[3]</sup>。胡跃华分析了输送液体管道的振动原因及机理, 并对管道进行了流固耦合分析及模态分析, 进而计算出管道的受力及变形情况<sup>[4]</sup>。窦益华研究了输流弯管在有限元模拟下的弯管变形及受力情况, 并得出管道的危险截面位置, 今后在设计管道时应特别关注管道入口、出口位置的强度安全<sup>[5]</sup>。

本文依据现有实际生产工况中的高黏熔体物料, 分别设计了三种不同进料管结构, 采用有限元分析的方法, 分析通入高黏熔体物料时对进料管的压力场、速度场及热变形情况, 通过对比得出最优设计方案, 同时将仿真值与实验值进行对比, 进而满足现场生产实际工况需求。

## 1 数学模型

### 1.1 流体控制方程

对于进料管管内流动的液体需遵循质量、动量和

**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方面的工作。

**基金项目:** 甘肃省重大专项项目号 21ZD4GA003。

能量守恒定律。对于一般可压缩流体来说,可以采用下列控制方程来描述这些守恒定律<sup>[6]</sup>。

质量守恒方程为:

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

动量守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho_f \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v} \mathbf{v} - \boldsymbol{\tau}_f) = \mathbf{F}_f \quad (2)$$

$$(\rho_f \mathbf{v} \mathbf{v} - \boldsymbol{\tau}_f) \mathbf{I} + 2\mu \mathbf{e} = \boldsymbol{\tau}_f \quad (3)$$

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

式中:  $t$  为时间,  $\mathbf{F}_f$  为流体体积力矢量,  $\rho_f$  为气体密度,  $\mathbf{v}$  为气体速度矢量,  $\boldsymbol{\tau}_f$  为剪应力张量,  $F$  为流体的压力,  $\mu$  为动力黏度,  $e$  为速度应力张量。

## 1.2 固体控制方程

根据牛顿第二定律,可以推导出进料管结构的守恒方程为<sup>[7]</sup>:

$$\rho_s \ddot{\mathbf{d}}_s = \nabla \cdot \boldsymbol{\delta}_s + \mathbf{F}_s \quad (5)$$

式中:  $\rho_s$  为固体密度,  $\boldsymbol{\delta}_s$  为柯西应力张量,  $\mathbf{F}_s$  为固体体积力矢量,  $\mathbf{d}_s$  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( $h_{tot}$ )形式的能量方程可以写成下列形式:

$$\frac{\partial (\rho_f h_{tot})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f h_{tot} \mathbf{v}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\mathbf{v} \boldsymbol{\tau}_f) + \rho_f \mathbf{F}_f \cdot \mathbf{v} + S_E \quad (6)$$

式中,  $T$  为温度,  $\lambda$  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:

$$\mathbf{F}_T = \alpha_T \nabla T \quad (7)$$

式中:  $\alpha_T$  为温度相关的热膨胀系数。

## 1.3 流固耦合方程

进料管的流固耦合方程同样也遵循基本的守恒定律,因此在进料管流固耦合的交界面处,流体与固体的应力  $\boldsymbol{\delta}$ 、位移  $\mathbf{u}$ 、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<sup>[7]</sup>:

$$\boldsymbol{\delta}_f \cdot \mathbf{n}_f = \boldsymbol{\delta}_s \cdot \mathbf{n}_s \quad (8)$$

$$\mathbf{u}_f = \mathbf{u}_s \quad (9)$$

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

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

式中:下标  $f$ 、 $s$  分别指流体、固体,  $\mathbf{n}$  表示法向矢量。

## 2 进料管模型

根据现有挤出机生产状况及现场的安装空间位置,本文共设计了三种不同类型的进料管结构,其模型示意图如下图1所示。

三种进料管结构基本尺寸均为  $\Phi 70 \times 10$  mm,弯头半径尺寸均为 100 mm,其中模型1竖直段尺寸为 2 500 mm,水平段为 500 mm;模型2竖直段尺寸为 1 000 mm,水平段为 600 mm;模型3竖直段尺寸为 3 000 mm,水平段为 100 mm。



图1 模型示意图

## 3 有限元分析

进料管内通入的高黏物料选用 POE 熔体,如下表1所示为 POE 熔体物性参数。

表1 POE 熔体的物理性能

密度 / (kg·m <sup>-3</sup> )	热导率 / (W·(m·k) <sup>-1</sup> )	黏度 / (kg·(m·s) <sup>-1</sup> )	比热容 / (J·(kg·k) <sup>-1</sup> )
800	0.35	5 000	2 218

进料管材质均为结构钢 38CrMoAl,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:7 850 kg/m<sup>3</sup>;热导率、比热容均与温度有关,具体见表2。

表2 结构钢 38CrMoAl 的物理性能

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

### 3.1 边界条件设置

在对挤出机进料管进行有限元分析时,必须合理设置进料管在稳定工作状态下的边界条件。对于内部是特殊的高黏物料的熔体,其内部流场的流动与传热作用相比较低黏物料流场作用更为复杂。为此,在有限元计算时通常会对模型进行相应的简化,根据实际生产情况,本文对进料管的边界条件设置如下:

(1) 入口速度  $v=0.026$  m/s,温度 180 °C,出口压力  $p=1.6$  MPa,温度 200 °C。

(2) 考虑挤出机正常稳定工作时,通入的 POE 对

进料管产生的热变形, 故把整个过程视为稳态。

- (3) 进料管两端均为固定端。
- (4) 将流体域设置为壁面无滑移条件。
- (5) 考虑聚合物的高黏特性, 忽略惯性力和体积力。
- (6) 忽略了法兰盘与进料管因焊接存在的热阻。

### 3.2 网格划分

采用 Workbench 平台中的 mesh 功能模块, 分别对三种进料管结构模型的流体区域和固体区域进行网格划分, 并对模型的边界条件进行相应的设置。采用 Fluent 流体有限元分析软件计算了相同工况条件不同模型下的压力场, 将结果插值映射到进料管结构上。需要注意的是, 流体区域和固体区域之间的数据应匹配, 以确保压力和温度载荷能够准确地传递到指定固体区域。对进料管实体模块进行计算时, 其内部填充的高黏流体区域要进行压缩处理, 同时, 对进料管实体部分要重新进行网格划分。

网格划分结果如图 2 所示, 三种进料管结构的网格质量均在 0.85 以上。图 3 为弯管处的网格划分局部放大图。

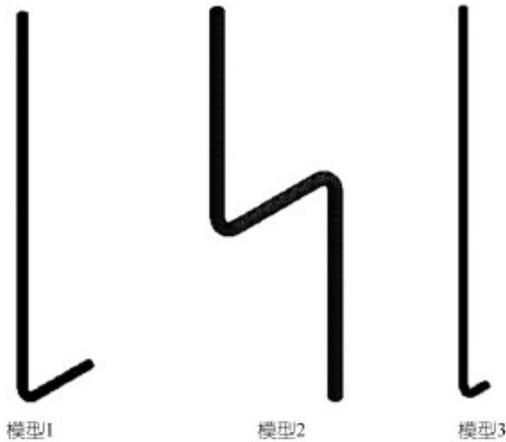


图 2 网格划分示意图

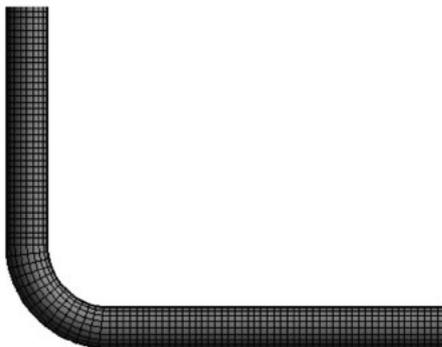


图 3 弯管处网格划分局部放大图

### 3.2 压力场分析

首先在 Fluent 模块对挤出机进料管的内部流场进行模拟分析, 考虑到进料管内熔体物料的流动特性, 本文使用标准的  $k-\epsilon$  湍流模型和 SIMPLEC 算法对其进行求解, 同时考虑能量方程、质量方程和运动方程在内的守恒方程。将入口设置为速度入口, 压力出口, 残差值设置为 0.000 01 进行计算, 计算步长设置为 1 000 步, 通过模拟三种不同结构的进料管通入相同的 POE 高黏熔体物料, 首先对进料管的压力分布进行对比, 其压力场云图如图 4 所示。

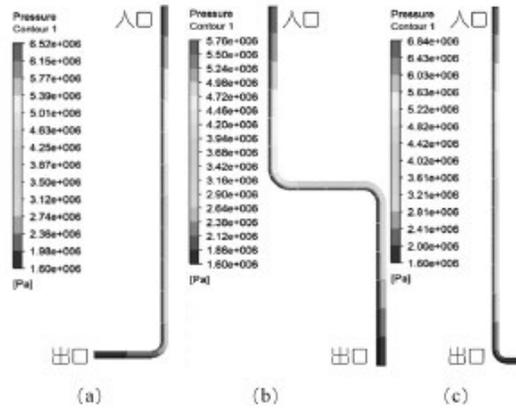


图 4 不同进料管结构的压力云图

对比图 4(a)、3(b)、3(c) 的压力云图, 可以发现: 压力的最大值均出现在熔体入口处, 最小值在出口处, 压力梯度从入口端到出口端是逐渐递减的趋势。弯头内压力小于弯头进口直管段, 大于弯头出口直管段。弯头内靠近内壁的压力较小, 靠近外壁的压力较大。因此, 空化也最有可能发生在这个区域。其中, 图 4(a) 中压力最大值为 6.5 MPa, 最小值为 1.6 MPa, 压力差为 4.9 MPa; 图 4(b) 中压力最大值为 5.8 MPa, 最小值为 1.6 MPa, 压力差为 4.2 MPa; 图 4(c) 中压力最大值为 6.8 MPa, 最小值为 1.6 MPa, 压力差为 5.2 MPa。

对比不同进料管结构的压力云图, 发现三种进料管结构的压力差大小顺序为: 图 4(c) > (a) > (b), 其中, 图 4(b) 进料管结构的压差最小, 优先选用图 4(b) 结构。

### 3.3 速度场分析

如图 5 所示, 为了直观的分析三种不同进料管结构通入 POE 高黏熔体物料时的速度云图, 选取截面  $z=0$  作为参考面, 从图 5 中可以看出, 高黏熔体在三种进料管结构内部的速度分布规律基本一致: 进料管中心截面处的熔体速度均为最大值, 沿着中心截面向

两端壁面处，熔体速度呈现逐渐递减的趋势，两侧靠近壁面处为速度值最低，且速度大小呈现两侧对称分布，这是因为壁面考虑为无滑移作用下，壁面与熔体的黏滞力较大，摩擦力也较大。此外，由于熔体黏度值较高，因此速度突变较小，变化较为平稳。

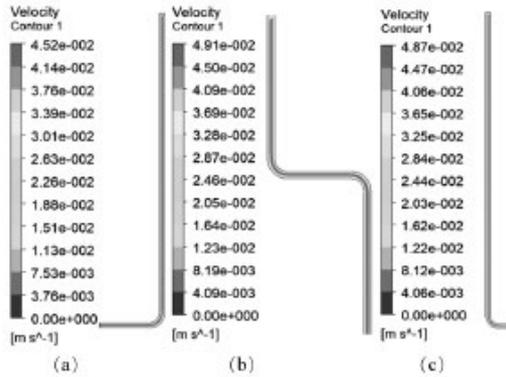


图5 不同进料管结构的速度云图

对比不同进料管结构的速度云图，发现图5(a)中速度场最大值约为  $4.5 \times 10^{-2}$  m/s，图5(b)中速度场最大值约为  $4.9 \times 10^{-2}$  m/s，图5(c)中速度场最大值为  $4.8 \times 10^{-2}$  m/s，三种进料管结构的速度场大小顺序为：图5(b)>(c)>(a)，图5(b)进料管结构的直线运动作用更为明显和流畅，说明图5(b)进料管结构的设计有利于提高熔体流动的稳定性。

### 3.4 热变形分析

采用热流固耦合的数值模拟方法，模拟计算与分析挤出机进料管的总变形，在Fluent（流场计算软件）计算了三种不同进料管结构通入高黏熔体物料时流场中的压力场。当流场分析模块和热应力分析模块之间建立数据传输时，实现高黏熔体物料的流场与热场耦合，在热分析模块中实现挤出机进料管的热场与进料管的耦合，流体和固体区域之间的数据界面应高度匹配，以确保压力和温度载荷能够准确地传递。最后在结构分析模块中进行了进料管固体力学计算，实现进料管结构的热流固耦合计算。

如图6所示，为三种不同形式的进料管结构在热流固耦合作用下的变形云图。从图6中可以得知：

图6(a)中进料管的最大变形量为6.1 mm，发生最大总变形的位在靠近弯管处，图6(b)中进料管的最大变形量为2.94 mm，发生最大总变形的位在第二节弯管处，图6(c)中进料管的最大变形量为9.48 mm，发生最大总变形的位在熔体入口处，发生最大变形的位在入口处是因为该结构进料管竖直段长度

为3 000 mm，进料段较长，管子两端又处于固定的状态，因此，进入入口处的熔体在压力和温度的耦合作用下，对管子的作用力主要集中在入口端。三种结构的最小总变形量均为0.0 mm，进料管的变形量很小，满足小变形假设理论，适合采用单向热流固耦合的方法。

通过对比不同进料管结构的热变形图，发现热变形量大小顺序为：图6(c)>(a)>(b)，其中，6(b)的进料管结构的变形量最小，优先选用图6(b)结构。

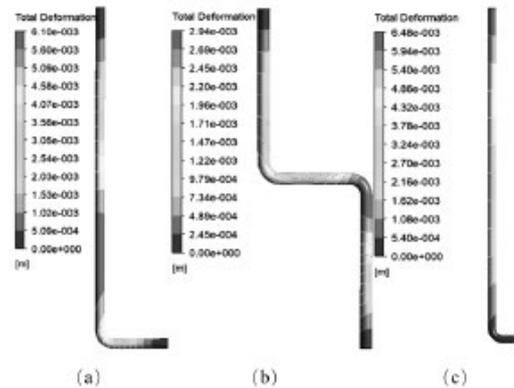


图6 不同进料管结构的热变形图

如图7所示，为三种不同进料管结构沿三个方向的热变形情况。从图7中可以得知：图7(a)中进料管的最大变形量为5 mm，发生最大变形的方向为Z轴，图7(b)中进料管的最大变形量为1.83 mm，发生最大变形的方向为Y轴，图7(c)中进料管的最大变形量为5.94 mm，发生最大变形的方向为Y轴。

对比不同进料管结构沿三个方向的热变形，发现图7(b)的进料管结构中Y方向的最大变形量最小，优先选用图7(b)结构。

综上所述，通过对比三种进料管结构在相同的工况下，通入高黏熔体POE对进料管的压力分布及热变形分布的情况，可以发现模型2在模拟计算过程中所受的压力差最小，最大变形量也最小。因此，本文选用模型2作为螺杆挤出机实际生产过程中的进料管结构。

## 4 实验与仿真对比

为了验证本文选用的模型的准确性，本单位在某石化厂合作完成了相应的实验，验证了数值模型的准确性。结合挤出机实际生产条件，从熔体进料管的入口端和出口端分别设定相应的参数，测量了整个进料管的关键工况参数，并计算得到平均值。实验监测结

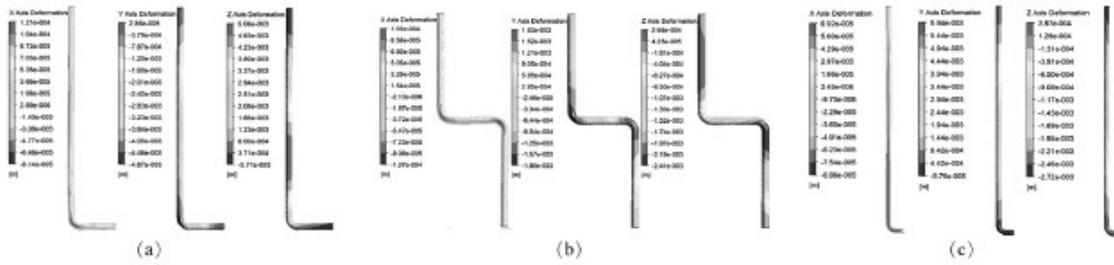


图7 不同进料管结构三个方向的热变形

果和仿真结果比较如表3所示。实验和仿真结果误差在5%以内，在合理的工程误差范围内，说明选用的进料管结构符合挤出机实际工况需求，同时，也验证了数值模型的准确性和可靠性。

表3 实验值与仿真值对比

监测参数	实验值	仿真值	误差
入口速度 / (m·s <sup>-1</sup> )	0.025	0.026	4%
入口压力 / MPa	6.1	5.8	4.9%
出口压力 / MPa	1.69	1.6	5%
最大变形量 / mm	3.1	2.94	5%
入口温度 / °C	185	180	2.7%
出口温度 / °C	210	200	4.7%

## 5 结论

(1) 通过对比三种进料管结构在相同的工况下通入高黏熔体 POE 时，进料管所受的压力分布、速度分布及热变形，得出模型 2 在模拟计算过程中压力差最小，速度分布较为均匀，最大变形量最小，Y 方向的最大变形量也最小。因此，选用模型 2 作为实际生产加工过程中螺杆挤出机高黏熔体 POE 进料管的最优结

构。

(2) 通过实验与仿真模拟值对比，发现误差在 5% 以内，在合理的工程误差范围内，验证了数值模型的准确性和可靠性。

## 参考文献：

- [1] 王现中, 谢成, 邵其其, 等. 基于原位监测的高填方下穿管道有限元分析 [J]. 油气储运, 2022, 41(10):9.
- [2] 段成红, 吴港本, 罗翔鹏, 等. 异径三通管热-流-固耦合分析及其结构优化 [J]. 化工机械, 2022(003):049.
- [3] 李青, 陈为化, 张伟杰, 等. 基于 ANSYS-Workbench 的流固耦合作用下输油管道模态分析 [J]. 华北科技学院学报, 2021(006):018.
- [4] 胡跃华, 蒋诚航, 闫怀磊, 等. 流固耦合作用下固支输液管道有限元分析 [J]. 化工机械, 2012, 39(2):4.
- [5] 窦益华, 于凯强, 杨向同, 等. 输流弯管流固耦合振动有限元分析 [J]. 机械设计与制造工程, 2017, 46(2):18-21.
- [6] 李锦伟, 唐跃, 孙召成. 双螺杆挤出机机筒结构参数优化设计与分析 [J]. 塑料, 2015, 44(03):56-60.
- [7] 张宇昕. 双螺杆挤出机机筒结构分析及机筒内聚合物流动与传热研究 [D]. 北京化工大学, 2010.

# Structural design and finite element simulation of POE feed pipe for high viscosity melt of screw extruder

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 uses the finite element analysis method of thermal fluid solid coupling to study the pressure field, velocity field, and thermal deformation of the feeding tube of three different structures of extruder melt when high viscosity melt POE is introduced into the feeding tube. By numerical comparison, the optimal structure of the POE feed tube for high viscosity melt of the screw extruder can be determined. At the same time, the simulated values were compared and verified with the experimental values, and it was found that the error was within 5%. This structure provides ideas for the design and optimization of subsequent extruder connection structure schemes, while reducing equipment energy consumption and improving equipment production capacity.

**Key words:** thermal fluid solid coupling; feed pipe; thermal deformation; pressure field; velocity field

(R-03)