

引用格式:岳进峰,张冰水,董力群,等. 同向双螺杆间隙对含能材料加工过程的影响研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2020, 47(4): 89–93.

YUE JinFeng, ZHANG BingShui, DONG LiQun, et al. Influence of co-rotating twin screw clearance on the processing of energetic materials[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2020, 47(4): 89–93.

同向双螺杆间隙对含能材料加工过程的影响研究

岳进峰¹ 张冰水² 董力群^{1*} 朱艳明³ 辛 锋³

(1. 北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029; 2. 中冶华天工程技术有限公司, 南京 210019;

3. 西安航天化学动力厂, 西安 710062)

摘 要: 为研究螺杆间隙对流道中药浆的安全性能和混合效果的影响, 在螺杆构型相同的情况下, 设置 1.2、1.6 mm 和 2.0 mm 3 种不同的螺杆间隙, 建立非等温流场模拟模型, 用模拟计算得到的压力、温度和剪切应力来评价流道中药浆的安全性能, 用加权平均剪切应力和累积停留时间分布来评价螺杆的分散混合和分布混合能力。结果表明: 随着螺杆间隙的增大, 流道中药浆的安全性提高, 混合效果变差。

关键词: 含能材料; 同向双螺杆; 螺杆间隙; 安全性; 混合能力; 非等温流场数值模拟

中图分类号: TQ320.5 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2020.04.013

引 言

含能材料是一类能够不依靠其他介质即可独自进行化学反应, 并在反应过程中输出大量能量的材料^[1]。使用双螺杆挤出机可以对其进行连续混合^[2–3], 但混合过程中过高的温升和压力都有可能产生危险。

目前, 对含能材料用双螺杆挤出机开展的研究主要在以下几个方面: 一是进行含能材料用双螺杆挤出机的优化设计和工艺改进; 二是探究螺杆构型对含能材料混合过程安全性和混合性能的影响; 三是探究螺杆芯轴受力产生的弯曲变形对螺杆间隙大小的影响^[4]。而螺杆间隙是影响混合过程安全性和药浆混合效果不可或缺的因素之一, 但尚未有学者就螺杆间隙对含能材料安全混合的影响进行研究。因此, 为保证含能材料在混合过程中具有良好的安全性和混合性能, 本文在已完成的螺杆构型模拟分析的基础上^[4], 选择最优螺杆构型作为研究对象, 对其使用 SolidWorks 进行三维建模, 采用 Gambit

及 Meshing 进行划分网格, 通过 POLYFLOW 专用软件建立非等温流场模拟模型对螺杆流场进行数值模拟。本文模型考虑了温度对流场数值模拟的影响, 分析了不同螺杆间隙下压力、温度分布和混合效果的优劣, 为含能材料用同向双螺杆挤出机的设计提供理论依据。

1 数值模拟

1.1 数学模型

基于含能材料药浆的流动特性对模型流场进行简化, 作出以下假设:

- ①药浆在流道内全充满且不可压缩;
- ②药浆被认为作层流流动;
- ③忽略药浆惯性力、体积力和层间界面张力;
- ④药浆在螺杆元件流道内与壁面无滑移。

基于以上假设, 广义牛顿流体非等温流动的控制方程如式(1)~(4)所示^[5]。

连续性方程

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$-\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = 0 \quad (2)$$

能量方程

$$\rho c_p \mathbf{v} \cdot \nabla T = k \nabla^2 T + \boldsymbol{\tau} \cdot \nabla \mathbf{v} \quad (3)$$

本构方程

$$\boldsymbol{\tau} = 2\eta \mathbf{D} \quad (4)$$

收稿日期: 2020-02-08

基金项目: 国家基础科研项目 (JCKY2016203A008)

第一作者: 男, 1995 年生, 硕士生

* 通信联系人

E-mail: donglq@mail.buct.edu.cn

式中, $\boldsymbol{\nu}$ 为速度矢量, m/s ; p 为压力, Pa ; τ 为黏性应力张量; ρ 为密度, kg/m^3 ; c_p 为比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; T 为温度, K ; k 为导热率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; η 为剪切黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; D 为形变速率张量。

1.2 本构方程及物性参数

本文所研究的含能材料属于假塑性流体。选用幂律模型作为描述假塑性非牛顿流体本构方程的模型^[6], 如式(5)所示。

$$\eta = m|\dot{\gamma}|^{c-1} \quad (5)$$

式中, m 为剪切速率为 0 时的剪切黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} ; c 为幂律指数。

含能材料混合过程中温度稳定在 $(50 \pm 2)^\circ\text{C}$, 由测试拟合结果可知, 幂律模型的剪切速率为 0 时的剪切黏度 m 为 $672 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 幂律指数 c 为 0.82。

对于非等温数值模拟, 根据一般经验, 非牛顿流体黏度对温度的依赖性可近似用 Arrhenius 方程表示, 如式(6)所示。

$$H(T) = e^{-b/(T-T_r)} \quad (6)$$

式中, $H(T)$ 为含能材料黏度对温度的依赖性; b 为温度敏感系数, K^{-1} ; T_r 为参考温度, K 。

因此, 包含温度效应的幂律模型本构方程可写为

$$\eta = m|\dot{\gamma}|^{c-1}H(T) \quad (7)$$

含能材料药浆物性参数如表 1 所示。

表 1 含能材料药浆物性参数

Table 1 Physical parameters of the energetic material slurry

参数	数值
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 668
$c_p/(\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1})$	1 880
$k/(\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1})$	0.3
T_r/K	323.15
b/K^{-1}	0.042

1.3 几何模型

同向双螺杆挤出机螺杆的几何模型如图 1 所示。螺杆构型总长度为 0.48 m, 其中 SE30/60 表示螺纹元件导程/长度, KB45/5/50 表示捏合块元件错列角 45° /捏合盘数/长度。目前, 螺杆间隙常用的

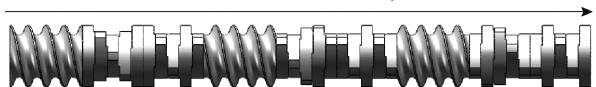
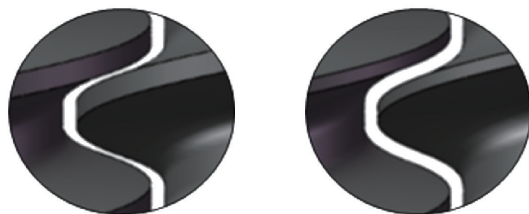


图 1 双螺杆几何模型

Fig. 1 Geometric model of the twin screw

修正方法为中心距修正法, 该修正方法简单易行, 但经过分析研究, 这种修正法只能保证径向间隙一致^[4], 而螺杆的侧间隙会随导程的变化发生改变, 导程越小, 侧间隙越小, 如图 2(a) 所示。侧间隙过小会导致螺杆与铝粉、氧化剂等固体组分之间发生摩擦, 造成颗粒严重磨损引发安全事故, 所以该修正法不适合用于加工含能材料。

本文提出了法向等间隙法对螺杆的螺槽及螺棱进行修正, 使每根螺杆沿法线方向分别移动 $\delta/2$ 间隙, 修正后得到的径向间隙、侧间隙及螺棱与机筒的间隙均保持一致, 都为 δ , 如图 2(b) 所示。均匀一致的螺杆间隙更有利于药浆的安全混合。



(a) 中心距修正法局部放大图 (b) 法向等间隙法局部放大图

图 2 两种螺杆间隙修正法示意图

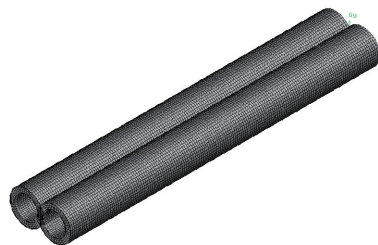
Fig. 2 Schematic diagram of the two screw clearance correction methods

1.4 有限元模型

使用 Meshing 对 1.3 节的螺杆构型进行网格划分, 利用 Gambit 对流体进行网格划分; 使用网格重叠技术 (MST) 对网格划分进行组合装配, 螺杆间隙设置为 1.2、1.6 mm 和 2.0 mm, 左、右螺杆构型和流道的有限元模型如图 3 所示。



(a) 左、右螺杆构型



(b) 流道模型

图 3 螺杆和流道的有限元模型

Fig. 3 Finite element models of the screw and fluid

1.5 边界条件

根据螺杆的工作情况,分别设置了 4 种流动边界条件和热边界条件,如表 2 所示。

表 2 边界条件
Table 2 Boundary conditions

位置	流动边界条件	热边界条件
流道入口	25 kg/h	323.15 K(50 ℃)
机筒内壁面	壁面无滑移	给定热流密度 250 W/(m ² ·K)
螺杆	转速 20 r/min	绝热
流道出口	压力 0.3 MPa	Outflow(挤出方向上绝热)

2 模拟结果及分析

螺杆间隙对混合段流场的影响主要从药浆混合过程的安全性和混合效果来考量,在保证安全性的前提下,要尽可能地增加螺杆的混合效果。

2.1 药浆安全性分析

2.1.1 压力

对不同螺杆间隙下流场沿轴向的药浆压力进行分析,结果如图 4 所示。可以看出,3 种螺杆间隙的压力曲线分布规律都为沿轴向上升。3 种螺杆间隙下螺杆的出口压力大致相同,入口压力呈现出随螺杆间隙增加而变大的趋势。这是因为增大的螺杆间隙会使螺杆的输送能力降低,导致药浆发生堆积现象,造成整个螺杆压力偏高,降低了螺杆流道中的出入口压差。整体来看,3 种螺杆间隙下药浆在流道中的压力分布都处于一个较小的值,安全性较高。

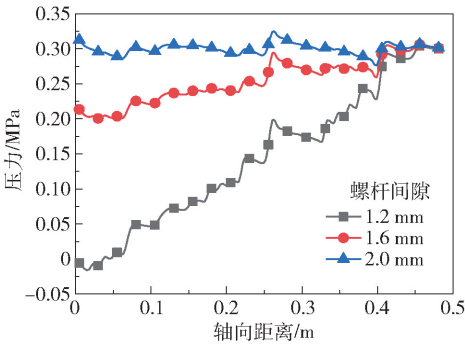


图 4 螺杆间隙对轴向压力的影响

Fig.4 Effect of screw clearance on axial pressure

2.1.2 温度

对不同螺杆间隙下流场沿轴向的药浆温度进行分析,结果如图 5 所示。可以看出,3 种螺杆间隙下药浆的温度曲线变化规律都为沿轴向上升。入口边界条件设定温度值为 323.15 K,在药浆沿轴向方向

输送的过程中,受到拉伸及剪切作用,导致药浆组分的分子热内能增加,呈现出流道内温度值沿轴向方向逐渐增大的现象。温度值上下波动的原因是药浆在经过螺棱区域时受到比螺槽区域更高的剪切速率,导致药浆在此区域温度值有所增加。

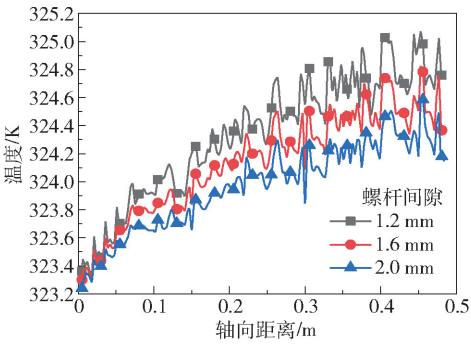


图 5 螺杆间隙对轴向温度的影响

Fig.5 Effect of screw clearance on axial temperature

随着螺杆间隙的增大,在相同的位置处药浆温度值更低,曲线变得更加平缓,这是因为螺杆间隙的增大导致药浆在相同位置受到的剪切速率更小,温度值有所降低,药浆的混合安全性有所提升。

2.1.3 最大剪切应力

过大的剪切应力不利于螺杆的混合安全性,对不同螺杆间隙下流场沿轴向方向的最大剪切应力进行分析,结果如图 6 所示。

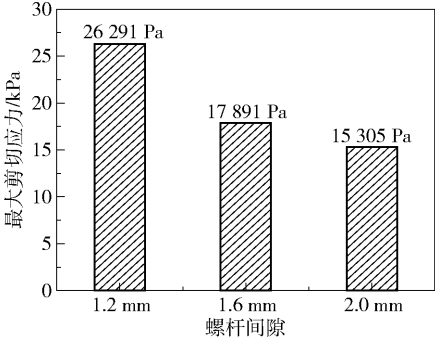


图 6 螺杆间隙对最大剪切应力的影响

Fig.6 Effect of screw clearance on maximum shear stress

可以看出,随螺杆间隙增加,最大剪切应力减小,药浆发生的材料分层、混合物变形以及含能粒子破碎的可能性减小,安全性有所提升。螺杆间隙由 1.2 mm 增加到 1.6 mm 时,最大剪切应力下降幅度较大,安全性得到显著提高;螺杆间隙由 1.6 mm 增加到 2.0 mm 时,最大剪切应力下降幅度较小,药浆安全性提高幅度较小。

2.2 药浆混合效果分析

对于同向双螺杆的混合效果,本文分别使用

加权平均剪切应力和累积停留时间分布来评价螺杆分散混合和分布混合的能力^[7-8]。在 POLY-FLOW 中设定函数(剪切应力为剪切速率和黏度的乘积)求得流道中的剪切应力,再将剪切应力取体平均计算即可得到整个螺杆流道的加权平均剪切应力。采用粒子示踪法在流道入口处放置 2 000 个粒子,在不同时刻的速度场得到每个粒子的运动轨迹并记录其在流道中的运动信息,经过统计学后处理即可得到螺杆流道中粒子的累积停留时间分布。

2.2.1 分散混合

加权平均剪切应力可以使药浆中的固体颗粒破碎分散,以便固体颗粒更好地被其他组分包裹。对不同螺杆间隙下流场沿轴向的剪切应力分布进行分析得出加权平均剪切应力,如图 7 所示。可以看出,随着螺杆间隙的增大,加权平均剪切应力降低,螺杆间隙增大 0.8 mm,加权平均剪切应力降低了 39 Pa,说明随着螺杆间隙增加,流道中加权平均剪切应力变化较小,分散混合能力只是微弱的下降。

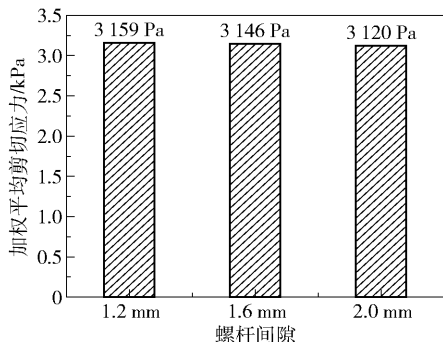


图 7 螺杆间隙对加权平均剪切应力的影响

Fig. 7 Effect of screw clearance on weighted average shear stress

2.2.2 分布混合

累积停留时间表示药浆在流道中穿过螺杆轴向长度所需要的时间,累积停留时间越长,药浆在流道中受到拉伸、剪切作用越久,越有利于药浆的分布混合。3 种螺杆间隙下药浆累积停留时间分布如图 8 所示。可以看出,随着螺杆间隙的增大,累积停留时间分布曲线轮廓保持不变,且曲线逐渐向左移动,流出 80% 粒子累积停留时间由长到短依次为 278.6 s (1.2 mm)、267.2 s (1.6 mm)、264.6 s (2.0 mm)。这是因为螺杆间隙增大,作用于流道内的反向压力流变小,使得粒子沿挤出方向的净流率变大,即粒子通过螺杆间隙时产生的间隙漏流变大,粒子停留的时

间也会随之缩短,反而降低了药浆的分布混合效果。整体来看,3 种螺杆间隙下累积停留时间相差不大,对分布混合效果的影响较小。

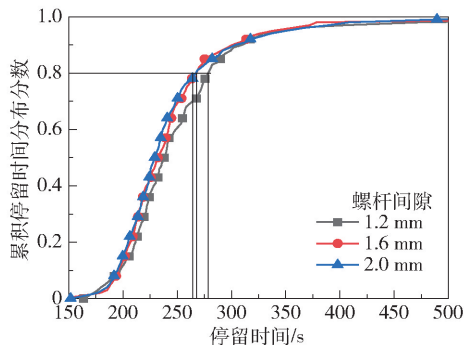


图 8 螺杆间隙对累积停留时间分布的影响

Fig. 8 Effect of screw clearance on cumulative maximum shear stress

3 结论

随着螺杆间隙的增加,压力曲线沿轴向方向变化减小,流道出入口压差变小,温度曲线的变化更加平缓,最大剪切应力降低,药浆混合安全性提高。随着螺杆间隙的增加,加权平均剪切应力和累积停留时间减小,分散混合和分布混合性能下降,药浆混合效果变差;综合考虑,在保证混合过程安全性的前提下,建议使用 1.6 mm 的螺杆间隙,以提高药浆的混合效果。

由于实验设备的限制以及混合加工过程中存在较大的安全隐患,目前还无法通过实验来探究螺杆间隙对含能材料加工过程的影响程度。未来可通过代料实验定量分析螺杆间隙对含能材料加工过程的影响程度,以验证本文的结论。

参考文献:

- [1] 王泽山. 含能材料概论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.
WANG Z S. Introduction to energetic materials [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006. (in Chinese)
- [2] FAIR M J. Twin screw extrusion of aluminized thermobaric explosives [C] // Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium. New York: US Army, 2006: 25.
- [3] 马秀清, 金律, 张亚军, 等. 含能材料连续挤出技术的应用现状及发展[J]. 塑料, 2018, 47(5): 8-11.
MA X Q, JIN L, ZHANG Y J, et al. Application status

- and development of continuous extrusion technology for energetic materials [J]. *Plastics*, 2018, 47(5): 8–11. (in Chinese)
- [4] 张冰水. 固体推进剂同向双螺杆挤出装置的设计研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2019.
- ZHANG B S. Design and study on co-rotating twin-screw extrusion device for solid propellant [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2019. (in Chinese)
- [5] SOBHANI H, ANDERSON P D, HAN H E M, et al. Non-isothermal modeling of a non-Newtonian fluid flow in a twin screw extruder using the fictitious domain method [J]. *Macromolecular Theory and Simulations*, 2013, 22(9): 462–474.
- [6] 陈雄, 徐进升, 郑健. 固体推进剂粘弹性力学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2016.
- CHEN X, XU J S, ZHENG J. Viscoelastic mechanics of solid propellants [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2016. (in Chinese)
- [7] ISHIKAWA T, AMANO T, KIHARA S I, et al. Flow patterns and mixing mechanisms in the screw mixing element of a co-rotating twin-screw extruder [J]. *Polymer Engineering and Science*, 2002, 42(5): 925–939.
- [8] 金律. 含能材料同向双螺杆连续混合机理的研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
- JIN L. Study on continuous mixing mechanism of co-rotating twin screw for energetic materials [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018. (in Chinese)

Influence of co-rotating twin screw clearance on the processing of energetic materials

YUE JinFeng¹ ZHANG BingShui² DONG LiQun^{1*} ZHU YanMing³ XIN Feng³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2. MCC Huatian Engineering Technology Co., Ltd., Nanjing 210019;

3. Xi'an Aerospace Chemical Power Plant, Xi'an 710062, China)

Abstract: In order to study the effect of screw clearance on the safety performance and mixing of an energetic material slurry in a fluid, screw clearances were set as 1.2 mm, 1.6 mm and 2.0 mm, with all other conditions remaining fixed. A non-isothermal flow field simulation model was established. The pressure, temperature and shear stress were calculated by simulation and used to evaluate the safety performance of the energetic material slurry in the fluid. The weighted average shear stress and cumulative residence time distribution are used to evaluate the dispersive mixing and distributed mixing capabilities of the screw. The results show that with increasing screw clearance, the safety performance of the energetic material slurry in the fluid is improved, but the mixing becomes poorer.

Key words: energetic materials; co-rotating twin screw; screw clearance; safety performance; mixing ability; numerical simulation of non-isothermal flow field