

文章编号: 1673-5196(2020)03-0045-05

# 固体颗粒物致液压阻尼孔阻塞的形成机理

刘新强, 冀宏, 孙飞, 李娜娜, 张建军

(兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 针对固体颗粒物致液压阻尼孔阻塞的问题, 运用软件 Fluent 中的欧拉-欧拉多相流模型对细长孔型的液压阻尼孔流域进行三维固液两相流数值计算与分析. 研究表明: 在阻尼孔入口附近, 固体颗粒物处于堆状淤积状态, 固相体积分数沿中心轴线流动方向存在“阶跃”现象, 且固相体积分数随油液黏度的增大而减小, 并随颗粒物密度的增大而增大. 阻尼孔进口中心区域颗粒的淤积是形成阻尼孔阻塞的主要原因.

**关键词:** 液压阻尼孔; 阻塞; 固体颗粒物; 淤积; 数值模拟

**中图分类号:** TH137 **文献标志码:** A

## Formation mechanism of hydraulic damping hole blockage caused by solid particles

LIU Xin-qiang, JI Hong, SUN Fei, Li Na-na, ZHANG Jiar-jun

(College of Energy and Power Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of hydraulic damping hole blockage caused by solid particles, this study uses the Euler-Euler multiphase flow model of software Fluent to calculate and analyze the three-dimensional solid-liquid two-phase flow in the flow region of a slender-type hydraulic damping hole. Simulated results show that near the entrance of the damping hole, the solid particles are in a heap-like silting state, the solid-phase volume fraction appears “step” phenomenon along the flow direction of the central axis. It is also found that the solid-phase volume fraction decreases with the increase of the viscosity of the oil, and increases with the density of the particles. The siltation of particles in the central area of the damper inlet hole is the main cause of the blocking to the damping hole.

**Key words:** hydraulic damping hole; blockage; solid particles; deposition; numerical simulation

液压阻尼孔是大多数液压元件中不可或缺的组成结构,其实质是一种液阻,一般用于有流量通过时,阻尼孔两侧因局部损失而产生压差,以达到节流、调压、缓冲和减振等作用.比如先导式溢流阀主阀上下腔之间开设压差阻尼孔来驱动主阀芯的运动;柱塞泵配流盘上有阻尼孔用以减小柱塞在高低压区之间运动的冲击;液压缸行程端部设置缓冲阻尼孔.据统计,液压系统 70%左右的故障均与油液污染有关<sup>[1]</sup>,油液污染尤其是固体颗粒物可导致液压系统中的阻尼孔阻塞,致使系统性能变迁、退化,严重威胁着液压元件及系统的可靠性.挖掘机液压系统机械无法行驶和回转或反应慢、力量不足;阀杆

处于中位,在自重的作用下,液压缸有明显的下沉.这几种故障原因都是“控制阀前端先导油孔堵塞”,其对应的排除方法均为“清洁先导油路”<sup>[2]</sup>.可见液压阻尼孔因油液中的污染物而阻塞在工程实践中非常普遍.

目前对于阻尼孔阻塞的研究主要集中于阻尼孔阻塞的宏观机理及阻塞对元件的外特性影响,张德生等<sup>[3]</sup>理论分析了阀控充液式液力耦合器电液阀因水介质中的煤粒和水垢造成阻尼孔阻塞的故障宏观机理及应对措施.陈国安等<sup>[4]</sup>分析各阻尼孔发生不同程度堵塞,以及在不同程度堵塞时所表现出来的异常现象及其对液压系统产生的影响.从阻尼孔内颗粒-油液固液两相流流动角度出发,进行阻尼孔阻塞内部形成机理分析的相关研究尚未见到.

对于固体颗粒物导致液压阻尼孔阻塞的问题,

收稿日期: 2019-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(51575254)

作者简介: 刘新强(1987-),男,陕西陈仓人,硕士,讲师.

仅靠工程实际中进行简单清洗不足以从根源上解决问题,应从阻尼孔内部流动机理层面进行分析.本文针对固体颗粒物导致液压阻尼孔阻塞的问题,运用 Fluent 中的欧拉-欧拉多相流模型对细长孔型液压阻尼孔流场进行三维数值计算,重点分析了固体颗粒物导致阻尼孔阻塞的形成机理,探索了阻尼孔阻塞的影响因素,为液压阻尼孔抗阻塞设计提供了理论依据.

# 1 液压阻尼孔 CFD 模型

## 1.1 计算模型

在进行液压电机泵的溢流阀加载试验<sup>[5]</sup>中,18 MPa 以内可以稳定调压,从 18 MPa 开始,两次出现系统压力无法向更高压力调节并且伴随强烈的压力波动.为此,通过清洗先导式溢流阀主阀芯和阀体,均有效地解决了压力失调的问题,压力可平稳地在 0 至额定压力 22 MPa 内调节.分析认为,油液中含有的固体颗粒导致阻尼孔阻塞或者阀芯卡滞<sup>[6]</sup>,从而引起调压失效.由文献<sup>[7]</sup>可知,先导式溢流阀阻尼孔部分阻塞后,阻尼孔节流阻尼作用增强,溢流阀的压力超调增大,也使得最终稳定后的调定压力值减小,压力达不到调定值,即稳定值比调定值小,这与实际中发现的阻尼孔阻塞结果是一致的.

现以先导式溢流阀中主阀芯上的细长孔型阻尼孔(见图 1)为研究对象,其作用是在先导阀芯开启、

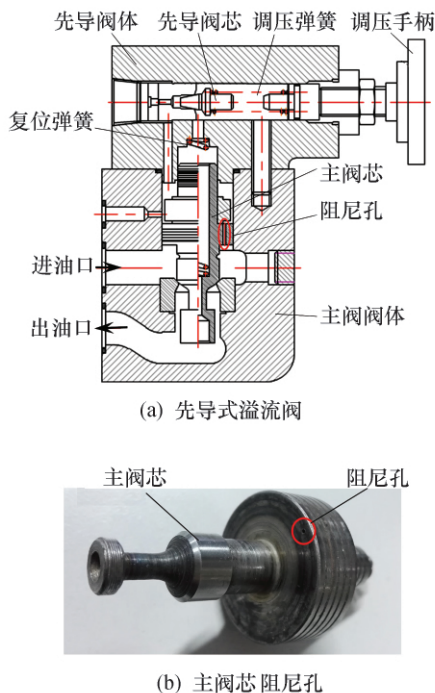


图 1 先导式溢流阀及主阀芯阻尼孔

Fig.1 Pilot operated relief valve and damping hole of main spool

油液通过阻尼孔流动时,因过流面积急剧减小造成局部损失而产生压差,驱动主阀芯开启实现溢流.

由于主阀芯阻尼孔上下两腔过流面积都远大于阻尼孔流道过流面积,计算时将阻尼孔流域简化成收缩段、阻尼孔和扩张段三段的串联组合,建立如图 2a 所示的阻尼孔几何模型.依据文献<sup>[8]</sup>,为确保流动的的稳定和充分性,其中收缩段直径  $D_1$  取 10 mm,长度  $L_1$  取 15 mm,阻尼孔孔径  $D_2$ ,长度  $L_2$ ,扩张段直径  $D_3$  取 10 mm,长度  $L_3$  取 15 mm.

图 2b 为阻尼孔流域模型网格划分,其中在收缩和扩张段利用尺寸函数进行网格尺寸光滑过渡.

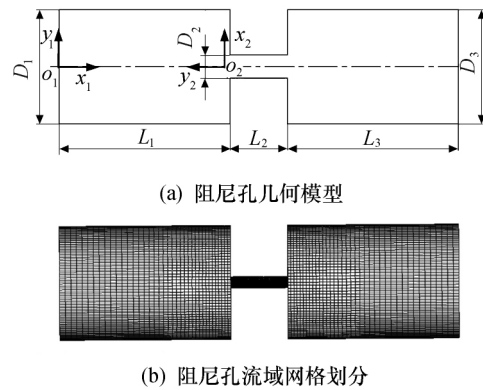


图 2 阻尼孔计算模型

Fig.2 Damping hole CFD model

## 1.2 计算条件

Fluent 提供的多相流模型中,欧拉-拉格朗日模型将液体作为连续相,将颗粒作为离散相,直接计算颗粒物的运动.其优点是计算可以得到颗粒物的运动轨迹,颗粒物在流场中的分布与演化情况清晰可见,但其缺点是离散相的体积分数一般不能超过 10%,且计算量大.

在液压阀的油液中颗粒相对比较稀疏,但局部有聚集现象,目前欧拉-拉格朗日模型处理稠密颗粒相的算法尚不成熟,因此选用欧拉-欧拉模型对流体与颗粒物进行模拟.在欧拉-欧拉模型中,颗粒物也作为连续相处理并占有一定的体积分数.本文固液两相之间的曳力函数选择 Syamlal-O'brien 模型,计算采用标准  $k-\epsilon$  湍流模型.

材料的物性参数为:油液密度  $889 \text{ kg/m}^3$ ,动力黏度  $0.035 \text{ 56 kg/m} \cdot \text{s}$ ,假设固体颗粒为理想球体<sup>[9-10]</sup>,金属颗粒粒径  $5 \mu\text{m}$ ,颗粒密度  $7 \text{ 200 kg/m}^3$ .

计算条件与边界条件的设定:进口边界条件为压力进口,进口设置固体颗粒的体积分数为 5%,出口边界条件为压力出口,出口设置回流固相体积分数为 0,各项收敛残差取  $10^{-6}$ .

### 2 固体颗粒物的分布及阻塞的形成

现以阻尼孔孔径 1 mm, 孔长 10 mm, 进口压力 12 MPa、出口压力 9 MPa, 颗粒密度 7 200 kg/m<sup>3</sup>, 油液黏度 0.035 96 kg/m · s 为算例, 分析计算结果。

图 3 为固体颗粒物在阻尼孔流域的体积分数分布云图。由图 3 可知, 固体颗粒物在阻尼孔进口处于堆状淤积状态, 且沿着流动方向固体颗粒物的体积分数逐渐增大; 在阻尼孔内固相体积分数与其进口内核相当且均大于进口的 5%; 在阻尼孔进口端面侧壁也附着高体积分数的固相颗粒。图 4 为阻尼孔流域压力云图, 阻尼孔因局部损失而产生较大的压差, 大约为 2 MPa。图 5 为阻尼孔进口流域固体颗粒速度矢量图, 在阻尼孔中心轴线附近流速较大而沿着半径向外逐渐减小。

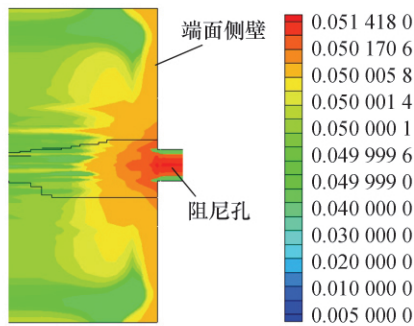


图 3 固体颗粒体积分数云图

Fig.3 Cloud chart for volume fraction of solid particles

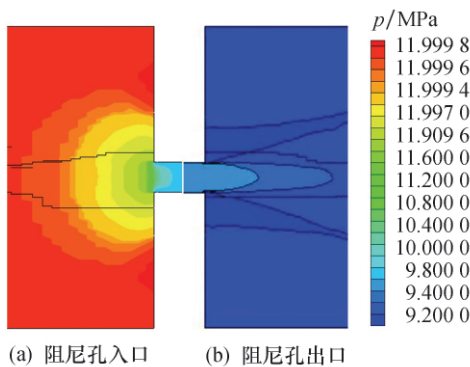


图 4 阻尼孔流域压力云图

Fig.4 Cloud chart for pressure distribution in damping hole

图 6 为固体颗粒物在阻尼孔流域的流线图。从流线图可以看出, 在阻尼孔收缩段流域, 由于液流过流面积的突然减小, 液流急剧改变流向而涌向阻尼孔进口, 这将导致油液中携带的固体颗粒物也向阻尼孔进口聚集, 随着流动的持续不断, 因过流面积的狭小, 颗粒物短时间无法通过阻尼孔而淤积在进口, 且因时间的持续和压差 (见图 4) 的驱动, 靠近阻尼

孔的内核固体颗粒物体积分数越来越高; 在阻尼孔内部由于过流面积小, 液流速度大 (见图 5), 固体颗粒物以进口内核的体积分数不断输出; 在阻尼孔侧壁端面附近, 液流因流向的急剧改变而附壁流动, 在径向外端拐角区域, 形成漩涡, 如图 6 中的 A、B 区。因此在旋涡离心携带的作用下, 一部分颗粒始终停留于拐角处, 一部分将随着主流束向阻尼孔入口流动聚集。综合分析, 在阻尼孔流域急剧收缩-扩张的流域下, 由于过流面积的突然减小, 固体颗粒大量淤积可导致阻尼孔的阻塞。

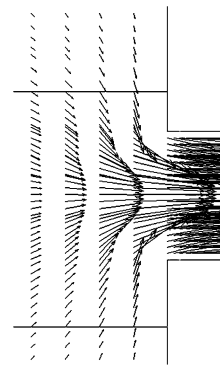


图 5 固体颗粒速度矢量图

Fig.5 Velocity vector diagram of solid particles

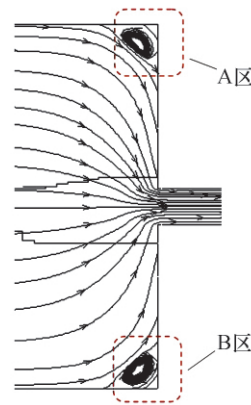


图 6 固体颗粒流线图

Fig.6 Streamline diagram of solid particles

### 3 阻尼孔流域固体颗粒物分布的影响因素

为了定量地显示阻尼孔流域固体颗粒物的分布情况以及分析阻尼孔流域固体颗粒物分布的影响因素, 在阻尼孔流域建立了如图 2a 所示的两个坐标系, 其中坐标系  $x_1o_1y_1$  是建立在阻尼孔流域进口, 以阻尼孔中心轴线方向为  $x_1$  轴, 以固相体积分数为纵坐标  $y_1$ , 用于评价沿阻尼孔中心轴线方向颗粒的分布; 坐标系  $x_2o_2y_2$  是建立在阻尼孔进口 ( $x$  坐标轴向进口方向偏移 2 mm), 以阻尼孔径向为  $x_2$

轴,以固相体积分数为纵坐标  $y_2$ ,用于评价沿阻尼孔进口附近沿半径方向的颗粒分布.

### 3.1 颗粒密度

图 7a 为阻尼孔孔径 1 mm,孔长 10 mm,进口压力 12 MPa,出口压力 9 MPa 时,颗粒物体积分轴轴向(即在坐标系  $x_1o_1y_1$  下)分布随密度变化的曲线,分别取固体颗粒密度为 2 000、4 000、5 000、7 200 kg/m<sup>3</sup>.由图 7a 可以看出,在阻尼孔收缩段前,颗粒物体积分数基本没有变化,保持在 5%;在阻尼孔入口处,固相体积分数出现“阶跃”现象(即急剧增大);在阻尼孔内沿中心轴方向的固相体积分数保持在较高数值且随颗粒密度的增大而增大.在阻尼孔进口附近,由于过流面积的急剧减小,导致颗粒急剧聚集,使得固相体积分数急剧增大;在阻尼孔内由于颗粒密度的增大,颗粒运动惯性增大,固体颗粒在压差液流携带下急速向前运动而保持较大体积分数.

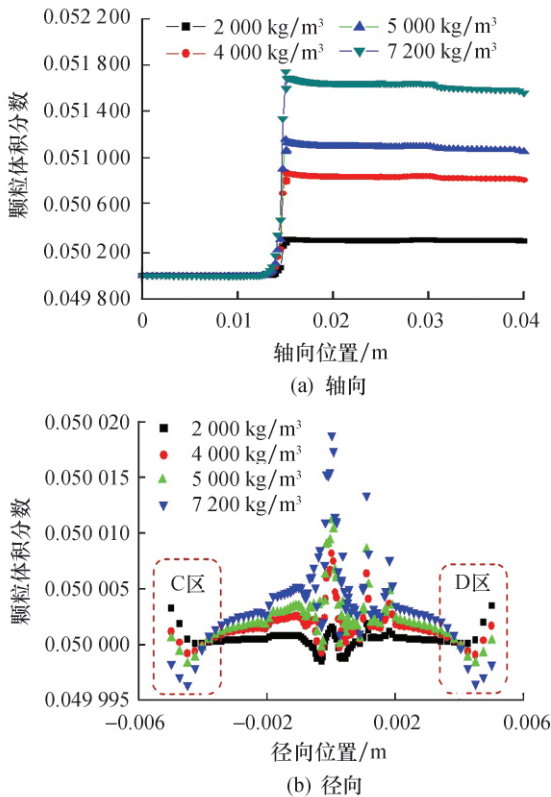


图 7 颗粒体积分数随密度的变化  
Fig.7 Radial distribution of particle volume fraction with density

图 7b 为阻尼孔孔径 1 mm,孔长 10 mm,进口压力 12 MPa,出口压力 9 MPa 时,颗粒物体积分轴径向(即在坐标系  $x_2o_2y_2$  下)分布随密度变化的曲线.由图 7b 可以看出,颗粒物体积分数沿半径呈“W”型分布,即在阻尼孔中心及径向末端区域固相

体积分数较大;在阻尼孔中心及附近区域,固相体积分数随密度的增大而增大,在径向末端,固相体积分数随密度的增大而减小,如图 7 中的 C、D 区;结合图 5 和图 6,阻尼孔中心区域颗粒速度较径向周边高,密度大的颗粒惯性大,颗粒之间的内聚力增强,油液与颗粒之间的附着力也增强.在压差驱动下,密度大的颗粒更易在阻尼孔入口聚集,密度小的颗粒始终处于阻尼孔径向末端附近的旋涡中,密度大的颗粒也易被甩出旋涡而向阻尼孔中心聚集,固体颗粒在阻尼孔入口的高浓度淤积将导致阻尼孔阻塞.

### 3.2 介质黏度

图 8a 为阻尼孔孔径 1 mm,孔长 10 mm,进口压力 12 MPa,出口压力 9 MPa 时,颗粒物体积分轴轴向(即在坐标系  $x_1o_1y_1$  下)分布随介质黏度变化的曲线,分别取油液黏度为 0.039 56、0.054 90、0.091 20 kg/m·s.由图 8a 可以看出,在阻尼孔入口固相体积分数剧增,且达到一个较高的稳定水平,也呈现“阶跃”现象;阻尼孔内中轴线上固相体积分数保持较高数值且随黏度的增大而减小,其原因在于油液黏度大,颗粒运动阻力大,不易进入阻尼孔,而颗粒在阻尼孔入口集聚较多.

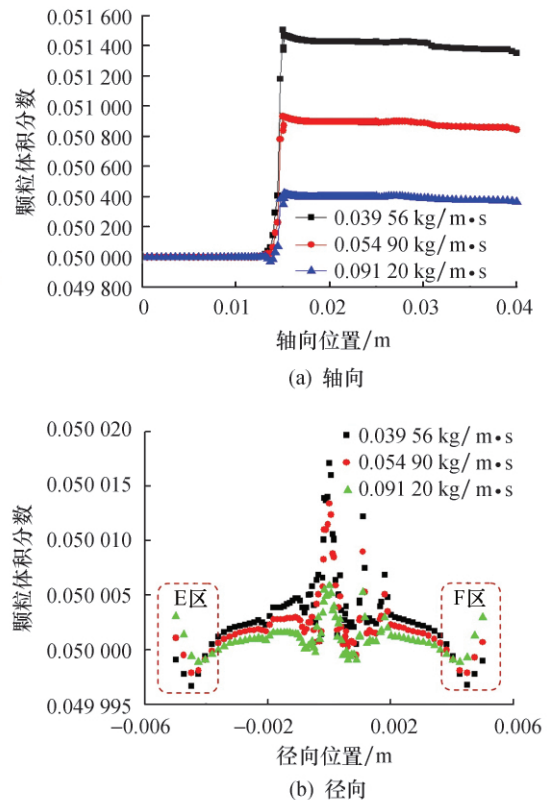


图 8 颗粒体积分数随黏度的变化  
Fig.8 Radial distribution of particle volume fraction with viscosity

图 8b 为阻尼孔孔径 1 mm, 孔长 10 mm, 进口压力 12 MPa, 出口压力 9 MPa 时, 颗粒物体积分数径向(即在坐标系  $x_2o_2y_2$  下)分布随介质黏度变化的曲线. 由图 8b 可以看出, 在阻尼孔入口径向方向, 固体颗粒体积分数呈“W”型分布规律; 在阻尼孔入口, 随着油液黏度的增大, 颗粒体积分数下降, 而在径向周边颗粒随油液黏度的增大而增大. 在紧靠阻尼孔入口的壁面, 沿壁面法线方向存在着很大的速度梯度和旋度的流动区域. 黏性应力对边界层的流体来说是阻力, 随着流体沿物面向后流动, 边界层内的流体会逐渐减速、增压. 边界层内存在着正压梯度, 流动在正压梯度作用下会进一步减速, 最后整个边界层内流体的动能都不足以长久地维持流动一直向下游进行, 以致在物体表面某处其速度会与势流的速度方向相反, 即产生逆流形成旋涡, 如图 6 固体颗粒流线图 A 区(对应图 8b 中 F 区)和 B 区(对应图 8b 中 E 区). 在旋涡的离心力固体颗粒在阻尼孔入口附近径向周边区域周旋淤积, 且随黏性力的增强颗粒体积分数增大. 油液黏度大, 颗粒在阻尼孔内和阻尼孔入口浓度低, 在径向周边浓度高.

#### 4 结论

1) 固体颗粒物在阻尼孔进口处于堆状淤积状态, 固相体积分数呈现“阶跃”现象, 且沿流动方向体积分数逐渐增大; 在阻尼孔内固相体积分数与其进口内核相当且都大于进口; 在阻尼孔进口端面侧壁也附着高体积分数的固相颗粒.

2) 在阻尼孔内沿中心轴方向的固相体积分数随颗粒密度的增大而增大, 在径向末端, 固相体积分数随颗粒密度的增大而减小; 阻尼孔内中轴线上固相体积分数随黏度的增大而减小.

3) 阻尼孔进口附近的中心区域颗粒物的淤积是导致阻尼孔阻塞的主要原因.

参考文献:

- [1] SINGH M, LATHKAR G S, BASU S K. Failure prevention of hydraulic system based on oil contamination [J]. Journal of the Institution of Engineers, 2012, 93(3): 269-274.
- [2] 杨承先, 白宝贵. KMX15R 型多路换向阀 [J]. 工程机械, 2000(9): 28-31.
- [3] 张德生, 赵继云, 刘立宝, 等. 阀控充液式液力偶合器电液阀阻塞问题分析 [J]. 煤炭工程, 2010(8): 81-82.
- [4] 陈国安, 傅香如, 范天锦. 液压平衡阀阻尼孔堵塞故障机理研究 [J]. 工程机械, 2013(7): 44-47.
- [5] 冀宏, 张继铭, 王金林, 等. 变转速液电泵中孔板离心泵的增压作用 [J]. 兰州理工大学学报, 2014, 40(1): 37-40.
- [6] 冀宏, 刘新强, 郑直, 等. 固体颗粒物诱发溢流阀调压失效的作用机制 [J]. 兰州理工大学学报, 2013, 39(4): 46-50.
- [7] 陈国安, 范天锦. 先导型溢流阀阻尼孔堵塞故障机理研究 [J]. 液压气动与密封, 2013, 33(5): 17-20.
- [8] 刘银水, 杨友胜, 朱玉泉, 等. 以水为介质阻尼孔气穴流动理论和试验研究 [J]. 机械工程学报, 2007, 43(2): 147-150.
- [9] 郭烈锦. 两相与多相流动力学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [10] 冀宏, 张硕文, 刘新强, 等. 固体颗粒对射流偏转板伺服阀前置级冲蚀磨损的影响 [J]. 兰州理工大学学报, 2018, 44(6): 44-48.