

doi: 10.16576/j.cnki.1007-4414.2021.03.016

## 近阻塞状态时液压阻尼孔流动与压力-流量特性分析\*

葛忠栋<sup>1</sup>, 刘飞<sup>2</sup>, 刘新强<sup>2</sup>, 李坤义<sup>1</sup>

(1. 甘肃省机械科学研究院有限责任公司, 甘肃 兰州 730030; 2. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 针对草捆成型液压系统中的插装阀阻尼孔阻塞问题, 建立一种近阻塞状态时阻尼孔计算模型, 提出阻塞裕度的概念, 分析了近阻塞状态液压阻尼孔的流动及压力-流量特性。结果表明近阻塞状态时, 阻塞物在入口形成“二次节流”效应, 加剧了流速的变化, 造成高压梯度区的前移和低压区的扩大。阻尼孔通流能力随着压差的增大和堵塞裕度的降低而加剧。所推导的理论流量公式在阻塞裕度较小时与数值计算结果吻合良好。研究结果对阻尼孔性能退化的评估提供了参考。

**关键词:** 阻尼孔; 近阻塞; 流动; 压力-流量特性; 数值预测

中图分类号: TH131

文献标志码: A

文章编号: 1007-4414(2021)03-0063-04

### Analysis of Hydraulic Damping Hole Flow and Pressure-Flow Characteristics in Sub-Blocking State

GE Zhong-dong<sup>1</sup>, LIU Fei<sup>2</sup>, LIU Xin-qiang<sup>2</sup>, LI Kun-yi<sup>1</sup>

(1. Electromechanical Division, Gansu Academy of Mechanical Sciences Co., Ltd., Lanzhou Gansu 730030, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of blocking failure of the two-way cartridge valve with damping hole in the bale forming hydraulic system, a hydraulic damping hole calculation model and blocking margin is proposed in the sub-blocking state. The flow and pressure-flow characteristics of the hydraulic damping hole in the sub-blocked state are analyzed. The results show that the "secondary throttling" effect is formed at the inlet by the blocking object in the sub-blocking state, which intensifies the change of the blocking flow rate and causes the forward movement of the high pressure gradient zone and the expansion of the low pressure zone. The flow capacity of the damping hole decreases seriously with the increase of the pressure differential and the decrease of blocking margin. The theoretical flow formula is in good agreement with the numerical calculation results when the blocking margin is small. This study provides reference for evaluation of the performance degradation of hydraulic damping hole.

**Key words:** hydraulic damping hole; sub-blocking; flow; pressure-flow characteristics; numerical prediction

## 0 引言

随着畜牧业的蓬勃发展, 饲草精制高密度压制成型装备的研发和产业化迫在眉睫, 其中草捆成型液压系统是该装备的核心单元, 系统中作为控制元件二通插装阀的控制性能决定了设备工作的稳定性。在样机研制过程中发现动作油缸伸出后, 启动相应的控制插装阀, 油缸不能退回, 检查发现液压油未通过阀进入油缸有杆腔。打开两通插装阀盖板后, 对盖板阻尼孔采用压缩空气进行了清理, 后可正常动作, 因此, 判定阻尼孔被阻塞。如果阻尼孔发生阻塞, 插装阀控制腔油液无法通过阻尼孔回到油箱, 进而导致主阀无法正常开启, 油液不能进入负载油缸。

阻尼孔是液压系统重要的液阻结构, 主要通过减小过流面积形成进出口压差从而起到节流、调压、缓冲和减振等作用。据统计, 液压系统 70% 左右的故

障均与油液污染有关<sup>[1]</sup>。在实际生产生活中液压设备在工作时会被杂质污染, 阻塞液压系统中的细孔结构, 使其不能正常稳定的工作<sup>[2-3]</sup>。目前相关研究主要集中在孔径大小对阻尼孔堵塞程度、堵塞时机不同所表现出来的异常现象<sup>[4]</sup>及其对液压系统产生的影响<sup>[5-6]</sup>。文献[7]认为油液中的固体颗粒在阻尼孔入口区域处的淤积是阻尼孔阻塞的主要原因。本文把阻尼孔将要阻塞但还未完全堵塞的状态称作近阻塞状态, 而对于近阻塞状态下液压阻尼孔的内部流动状态及压差-流量特性退化的相关研究还较少见到。

笔者提出一种近阻塞状态时液压阻尼孔的数值计算模型, 对近阻塞状态时液压阻尼孔进行了三维稳态流场数值计算, 分析近阻塞状态下阻尼孔的压力、速度及流动状态与未阻塞时的不同, 获得了近阻塞状态

\* 收稿日期: 2021-04-04

基金项目: 国家重点研发计划项目: 青贮缠网裹膜与秸秆压缩成型技术及装备研发(编号: 2016YFD0701305);

兰州市十大科技创新项目: 饲草精制高密度压缩成型装备的研发与产业化(编号: 2018-4-16)。

作者简介: 葛忠栋(1988-), 男, 甘肃会宁人, 工程师, 主要从事农业机械液压系统设计、调试方面的科研工作。

下的液压阻尼孔的压力-流量特性,为阻尼孔性能退化的预测和评估提供了重要参考。

### 1 近阻塞状态阻尼孔计算模型

#### 1.1 计算模型

现以草捆成型液压系统中的二通插装阀的盖板上的细长孔型阻尼孔(如图1所示)为研究对象,建立流场数值计算模型。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2(a)所示的阻尼孔几何模型。为确保流动的的稳定和充分性,其中收缩段直径 $D_1$ 为10 mm,长度 $L_1$ 为15 mm,阻尼孔孔径 $D_2$ 为1 mm,长度 $L_2$ 为10 mm,扩张段直径 $D_3$ 为10 mm,长度 $L_3$ 为15 mm。根据文献[7],分析认为油液中的固体颗粒物在阻尼孔进口中心区域形成了锥状淤积,因此本文进一步提出在阻尼孔收缩段进口处设置锥状阻塞物来模拟近阻塞状态的液压阻尼孔。如图2(b)所示,将阻尼孔内圆与阻塞物投影圆构成的圆环宽度 $L_5$ 称为阻塞裕度 $Z$ ,用阻塞裕度来衡量阻尼孔的阻塞程度,即阻塞裕度越小,阻尼孔阻塞越严重。

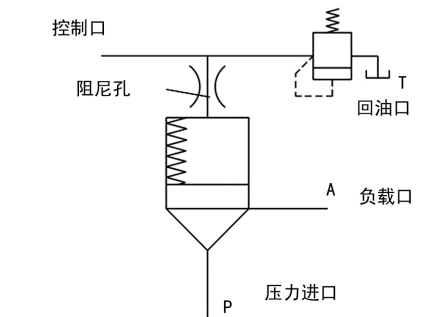


图1 草捆成型液压系统带阻尼孔插装阀

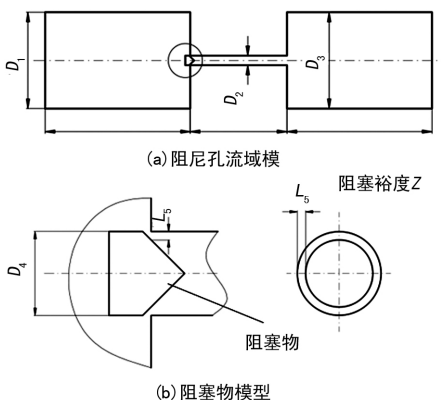


图2 阻尼孔几何模型

图3为阻尼孔流域模型的网格划分,采用四面体非结构性网格,如图3(b)在收缩段和扩张段利用尺寸函数进行网格大小的光滑过度,以便捕捉流场内局部细微特征。

#### 1.2 计算条件

选用标准k-epsilon湍流模型,油液密度为 $889 \text{ kg/m}^3$ ,运动粘度为 $0.03556 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ 。进口边界条件为压力进口,出口为压力出口,各项收敛残差取 $10^{-6}$ 。

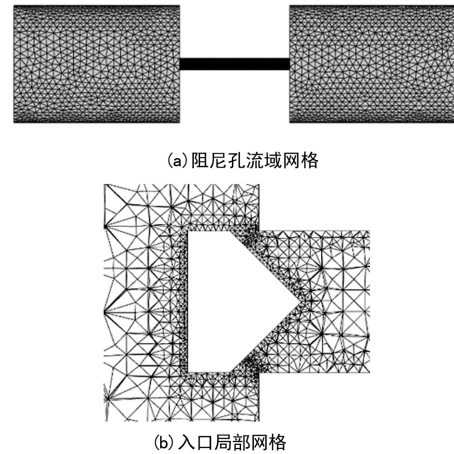


图3 阻尼孔网格划分

### 2 近阻塞状态阻尼孔内部流动

现以阻塞裕度 $Z=0.2 \text{ mm}$ ,进口压力12 MPa,出口压力9 MPa的近阻塞液压阻尼孔模型为例,分别进行近阻塞和未阻塞状态下的流场计算,分析其速度、压力和流动的变化。

由图4可知近阻塞状态时阻尼孔入口液流最高速度达 $74.4 \text{ m/s}$ ,未阻塞时为 $68.2 \text{ m/s}$ 。

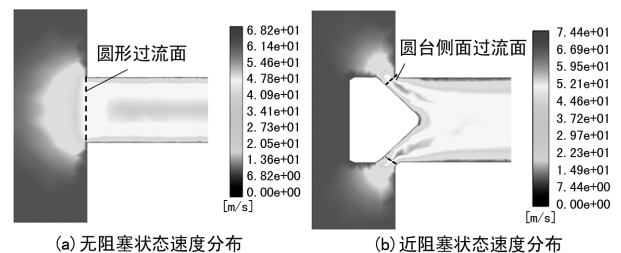


图4 阻尼孔入口速度分布

很明显近阻塞的情况下的流速比无阻塞的流速大,原因在于在阻尼孔收缩段的基础上,近阻塞状态时阻尼孔进口的锥状阻塞物类似锥阀芯使得阻尼孔入口过流面积,由未阻塞时的圆形过流面变成了“锥阀口”的圆台侧面形过流面,造成过流面积进一步的先减小再增大,进而导致液流流过阻塞物前后流速剧烈变化。可见锥状阻塞物加剧了阻尼孔入口处过流面积的收缩变化,形成了“二次节流”效应,造成阻尼孔入口局部流速发生剧增和剧降,容易诱发流动的不稳定。

图5为阻尼孔入口压力分布,受锥状堵塞物的影响在阻尼孔入口处的区压力梯度集中区向阻尼孔进

口上游迁移,同时造成节流后的低压区前移扩大,造成提前节流现象,如图5(b)所示。近阻塞状态时阻尼孔入口阻塞物的“二次节流”效应导致有效过流面的退化,使得入口速度增大,局部压力降增大。

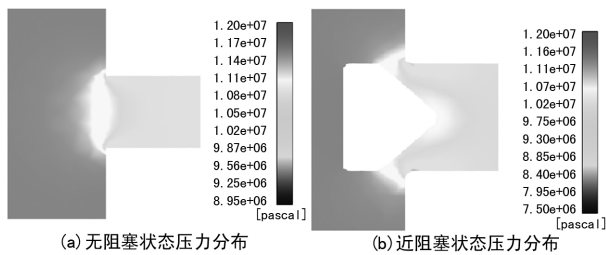


图5 阻尼孔入口速度分布

图6为阻尼孔进口区域的流线,两种状态下流线总体分布基本一致,不同的是在近阻塞状态时,大部分油液只能绕过阻塞物从阻塞物与阻尼孔入口形成的环形缝隙流过,阻塞物正面则形成驻点,这也将加剧阻塞物进一步靠近阻尼孔入口或进入阻尼孔。

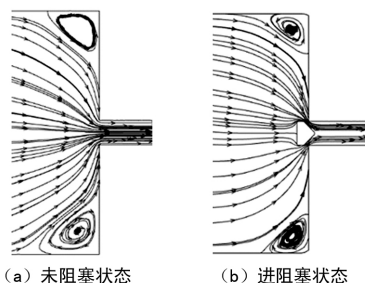


图6 阻尼孔入口流线分布

### 3 近阻塞状态阻尼孔压差-流量特性

#### 3.1 近阻塞阻尼孔压差-流量特性

图7为阻尼孔阻塞裕度 $Z$ 分别为0.05 mm、0.1 mm、0.15 mm和0.2 mm,在进出口压差0.5 MPa、1 MPa、1.5 MPa、2.0 MPa、2.5 MPa、3 MPa时与未阻塞状态下的压力-流量图。由图7可知,在阻塞裕度一定时(即过流面积一定)随着压差增大,阻尼孔的通流流量也增大;而且压差越大,不同堵塞裕度之间的流量差也越大。由孔口流量公式:

$$Q = C_q A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (1)$$

式中: $Q$ 为流量(L/min); $C_q$ 为流量系数; $A$ 为过流面积( $m^2$ ); $\Delta p$ 为压差(MPa); $\rho$ 为介质密度( $kg/m^3$ )。

可知在压降一定时,堵塞裕度越小即阻塞越严重,过流面积越小,阻尼孔通流流量也越小。综上所述,近阻塞状态时阻尼孔入口有效过流面积减小,其通流能力下降,且压差越大,通流能力越差。液压阻尼孔阻塞后主要由过流面积的变化而导致阻尼孔通流能力的退化。

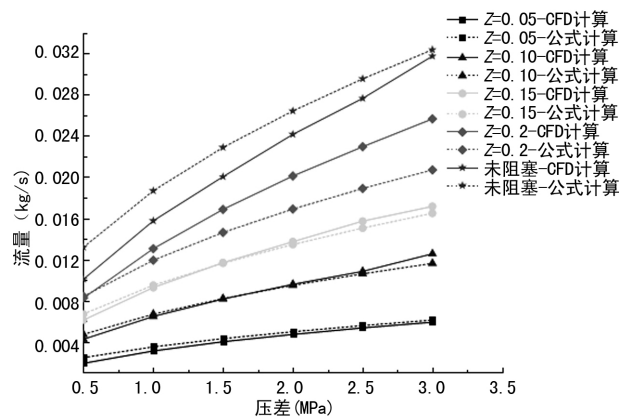


图7 近阻塞状态阻尼孔压差-流量特性

由此可知,饲草精制高密度压制成型装备草捆液压成型系统中二通插装阀的盖板上阻尼孔堵塞后,其有效过流面积减小,阻尼孔通流能力也随之下降,导致阀芯控制腔压力难以释放,造成主阀开启速度变慢,甚至不能正常开启,进而油液无法进入负载油缸而导致系统不能正常运行。因此,多尘环境工作中的液压系统要做好油液质量控制以便保证装备的正常运行。

#### 3.2 近阻塞状态阻尼孔流量公式

如图8所示,进一步建立近阻塞状态阻尼孔流量公式计算模型,阻塞裕度 $Z = AC$ ,  $AD = D_2/2$ ,  $\angle BCA = \angle CED = \theta$ ,根据第2部分流场计算可知,近阻塞状态时阻尼孔入口过流面积已退变成由线段 $AB$ 绕阻尼孔中心线 $EF$ 所形成的圆台侧面 $A_1$ ,另记由线段 $AC$ 绕阻尼孔中心线所形成的面积为 $A_2$ ,则有:

$$A_1 = A_2 \cdot \cos \theta = \pi Z (D_2 - Z) \cos \theta \quad (2)$$

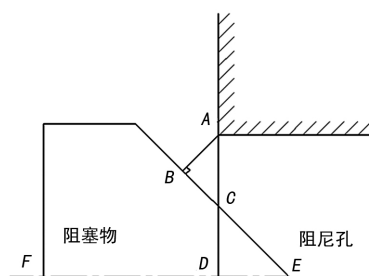


图8 近阻塞状态阻尼孔流量公式计算模型

将公式(2)代入式(1)可得:

近阻塞状态阻尼孔流量计算公式:

$$Q = C_q A_1 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = C_q \pi Z (D_2 - Z) \cos \theta \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (3)$$

式中: $C_q$ 为流量系数(一般取值0.78~0.82); $Z$ 为阻尼孔阻塞裕度(mm); $D_2$ 为阻尼孔孔径(mm); $\theta$ 为阻塞物半锥角( $^\circ$ ); $\Delta p$ 为阻尼孔进出口压差(MPa); $\rho$

为介质密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

现取  $C_q = 0.8$ ,  $D_2 = 1 \text{ mm}$ ,  $\theta = 45^\circ$ ,  $\rho = 889 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 由公式(3)所计算的流量为图7中相应的虚线,可知所推导的近阻塞状态时阻尼孔的理论流量公式在阻塞裕度较小时与数值计算结果吻合良好,公式(3)可以用来计算重阻塞状态时阻尼孔的流量。在较大阻塞裕度时,存在一定误差,这与流量系数有关,公式计算中流量系数为恒定常数,而实际中流量系数与阻塞裕度、流动状态及雷诺数等均有关,需要进一步研究。

#### 4 结论

针对草捆成型液压系统中的两通插装阀阻尼孔阻塞故障问题,建立一种近阻塞状态时液压阻尼孔数值计算模型,提出液压阻尼孔阻塞裕度的概念,分析了近阻塞状态时液压阻尼孔的内部流动和压力-流量特性,获得以下结论:

(1) 近阻塞状态时,阻塞物在液压阻尼孔入口形成“二次节流”效应,导致过流面的退化,加剧了流速的变化,造成高压梯度区的前移和低压区的扩大。

(2) 近阻塞状态时,液压阻尼孔通流能力随着压差的增大和堵塞裕度的减小而加剧,所推导的理论流

量公式在阻塞裕度较小时与数值计算结果吻合良好。建立的近阻塞状态时液压阻尼孔数值计算模型能够有效的预测阻尼孔性能的退化。

此次研究为草捆成型液压系统中的两通插装阀阻尼孔阻塞故障问题提供了理论依据,对液压阻尼孔性能退化的预测和评估具有重要参考价值。

#### 参考文献:

(上接第58页)

- [4] M. Jagannatham, P. Chandran, S. Sankaran, et al. Tensile Properties of Carbon Nanotubes Reinforced Aluminum Composites: A Review[J]. Carbon 2020(160): 14-44.
- [5] Y.C. Kang, S.L. Chan. Tensile properties of nanometric  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particulate reinforced aluminum matrix composites[J]. Materials Chemistry and Physics, 2004, 85(2-3): 438-443.
- [6] X. Yao, Z. Zhang, Y.F. Zheng, et al. Effects of SiC Nanoparticle Content on the Microstructure and Tensile Mechanical Properties of Ultrafine Grained  $\text{Al6063-SiC}_{np}$  Nanocomposites Fabricated by Powder Metallurgy[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2017(33): 1030.

(上接第62页)

- [2] Oland C B. Review of Orifice Plate Steam Traps[R]. Oak Ridge National Laboratory, 1996, ORNL/TM-2000/353/R1.
- [3] 孔 珑. 流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [4] 刘馥瑜, 胡效东, 梁之西, 等. 基于 FLUENT 的文丘里管稳流性能数值模拟[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(7): 1460-1468.
- [5] 王常斌, 王 敏, 于远洋, 等. 文丘里管水力空化现象的 CFD 模拟[J]. 管道技术与设备, 2013(1): 10-12.
- [6] 刘馥瑜. 文丘里管空化流动数值模拟[D]. 青岛: 山东科技大学, 2019.
- [7] 王智勇. 基于 FLUENT 软件的水力空化数值模拟[D]. 大连: 大连

- [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] 刘军伟. 工程机械液压传动系统故障原因及预防措施研究[J]. 南方农机, 2020, 51(23): 155-156.
- [3] 王卫华. 农业机械液压系统的维护与保养[J]. 农业技术与装备, 2012(13): 64-65.
- [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, 44(7): 44-47+8.
- [5] 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+24.
- [6] 薛文超. 先导式溢流阀阀口压力特性的研究[J]. 工程机械文摘, 2021(1): 25-28.
- [7] 刘新强, 冀 宏, 孙 飞, 等. 固体颗粒物致液压阻尼孔阻塞的形成机理[J]. 兰州理工大学学报, 2020, 46(3): 45-49.
- [7] L. N. Wang, H. Wu, X. Wu et al. Preparation and Mechanical Properties of SiC Nanoparticle Reinforced Aluminum Matrix Composite by a Multi-step Powder Metallurgy Process[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 28(6): 1059-1063.
- [8] J.L. Liu, X.Y. Huang, K. Zhao, et al. Effect of reinforcement particle size on quasistatic and dynamic mechanical properties of Al- $\text{Al}_2\text{O}_3$  composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019(797): 1367-1371.
- [9] A.B. Li, G.S. Wang, X.X. Zhang, et al. Enhanced combination of strength and ductility in ultrafine grained aluminum composites reinforced with high content intragranular nanoparticles[J]. Materials Science and Engineering, 2019, 745(FEB.4): 10-19.
- 理工大学, 2006.
- [8] 吕福炜, 宗丹丹, 孙 静, 等. 空化文丘里管稳流特性研究[J]. 流体机械, 2020, 48(3): 17-22.
- [9] 管金发, 邓松圣, 张攀峰, 等. 文丘里管空化装置设计与数值模拟[J]. 后勤工程学院学报, 2012, 28(3): 30-34.
- [10] 邹 星, 李海涛, 宗 智. 文丘里管流动特性的数值模拟[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2012, 33(4): 451-455.
- [11] 李彬民, 刘海丽, 张宁宁, 等. 文丘里管水力空化发生器数值模拟[J]. 油气田地面工程, 2008, 27(6): 14-16.
- [12] 石 宇. 文丘里管水利空化器的数值模拟[D]. 天津: 天津科技大学, 2018.