

文章编号:1009-3087(2014)02-0153-07

气体钻井液压系统污染物方程及过滤装置

刘清友¹,唐洋^{2*},谢冲²,魏晓东³

(1. 西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川 成都 610500;

2. 西南石油大学 机电工程学院,四川 成都 610500;3. 川庆钻探公司 钻采工程技术研究院,四川 广汉 618000)

摘要:气体钻井现场环境恶劣,工况复杂,现用液压系统油液过滤装置过滤效果差,致使油液污染严重,液压系统中泵、阀、执行元件、管路等出现磨损、测漏、堵塞以及活动件卡死等情况,增加了对气体钻井作业的风险。对气体钻井现场所用液压系统污染源进行分析,对其建立了污染物平衡方程及污染物控制方程。根据污染物控制方程提出了液压系统过滤装置改进措施,通过多方案设计与分析,优选出过滤装置设计方案,并计算出新型过滤装置的主要设计参数。建立新型回油过滤装置的下游污染物颗粒浓度方程,并对安装回油过滤装置和无回油过滤装置的下游污染物颗粒浓度进行计算分析。结果表明:液压系统安装新型回油过滤装置时,过滤速度明显提高,下游污染物颗粒浓度明显下降,更好地满足了气体钻井液压系统对油液清洁度的要求。

关键词:液压系统;污染物;控制方程;油液;气体钻井;过滤装置

中图分类号:TE926

文献标志码:A

Gas Drilling Fluid Pressure System Contaminants and Filter Equations

LIU Qingyou¹, TANG Yang^{2*}, XIE Chong², WEI Xiaodong³

(1. State Key Lab. of Oil and Gas Geology and Exploration, Southwest Petroleum Univ., Chengdu 610500, China;

2. School of Mechatronic Eng., Southwest Petroleum Univ., Chengdu 610500, China;

3. Drilling & Production Technol. Research Inst. CCDE, Guanghan 618000, China)

Abstract: Oil contaminants of the hydraulic system in the gas drilling process were analyzed and a dynamic equilibrium equation of pollutants and pollutant control equations were established. According to pollution control equation, hydraulic system filter device optimization measures were proposed to further improve the design and preferred filter programs, and the main design parameters of the new back oil filter were determined. By building a downstream particle concentration equation of the back oil filter pollutants, and calculating downstream particle concentration of pollutants to the back oil filter and non-return oil filter of the hydraulic system, it was showed that when installing a new oil return filter, the filter of speed obviously improved, and after a certain time, the downstream particle concentration of pollutants decreased significantly.

Key words: hydraulic system; pollutants; control equations; hydraulic oil; gas drilling; filtering device

气体钻井技术作为一种高效钻井技术已被塔里木油田、西南油气田等国内大型油田广泛应用,其工艺、设备和工况等都有别于传统钻井,常应用在高温、高压深井中,风险高,事故频发,因此,气体钻井控制装置的可靠运行成为保证现场钻井安全施工的关键^[1-3]。而现场施工中,常出现防喷器远程控制台、节控箱等液压系统中一些重要阀件(比如减压

阀、溢流阀、换向阀等)磨损、漏油,以及一些活动部件出现堵塞甚至卡死等现象。上述现象中,除与装置结构、加工工艺以及材料等因素有关外,液压系统中油液被污染是导致上述情况的主要原因之一。通过对油田现场近些年液压设备运行故障和损坏数据统计发现,由油液污染直接和间接造成的设备故障和损坏率约为78%,给油田生产造成极大经济损失和安全隐患。

液压系统油液污染问题一直液压技术界的重要技术课题之一,已开展了大量研究工作,如:国外 Wu^[4]研究了不同流态下的污染浓度水平,并建立液压污染控制相关的数学模型;Tu等^[5]分析了污染颗

收稿日期:2013-08-18

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(51134004)

作者简介:刘清友(1965—),男,长江学者特聘教授,博士生导师。研究方向:油气装备设计与仿真。

* 通信联系人 E-mail: tangyanggreat@126.com

粒的侵入特性,提出一种基于动态平衡方程的污染物迁移模型;Poeth^[6]从选择过滤器、置换滤芯等方面研究了影响污染控制的因素,并提出检查清洁度水平的方法。在国内,刘金国、员创治等^[7-8]建立了煤矿机械液压系统污染物控制模型,并提出加快污染滤除效率的方法;聂松林、石学园等^[9]建立了单回路液压系统污染度传递方程和过滤器配置的优化决策模型。

由于建立污染物动平衡方程和控制方程与液压系统组成、环境和工况等因素有很大关系^[10-19]。目前,少见对油田现场复杂液压系统污染控制的相关研究,尤其针对工艺更为特殊的气体钻井作业,因此,以气体钻井井场常用液压系统为研究对象,对其污染源及分布进行研究,建立污染物动平衡方程和污染物控制方程,并提出污染物控制措施,设计新型过滤装置,更好地保证了油液的清洁度,提高井场液压装置的使用寿命,保障了钻井施工的安全性。

表 1 液压系统中固体颗粒污染物分布

Tab. 1 Spot in the hydraulic system of solid particle contamination distribution

装置	剥落物	胶质	金属粉末	空气中粉尘	沙子	研磨粉	沉积物	纤维
油液	可见	—	—	可见	中等	—	—	可见
油箱	可见	可见	可见	中等	中等	—	可见	可见
泵	—	可见	严重	可见	可见	—	可见	可见
溢流阀	—	可见	中等	可见	可见	可见	可见	可见
控制阀	—	可见	可见	可见	可见	可见	可见	可见
液压缸	可见	可见	可见	可见	可见	—	—	可见
软硬管路	中等	可见	可见	中等	可见	—	可见	可见
滤油器	可见	可见	可见	—	—	—	—	可见
蓄能器	可见	可见	可见	可见	—	—	可见	可见

由表 1 可知,粉尘、胶质、金属粉末和纤维在液压系统主要装置中都存在,但其他污染物在一些装置中污染程度不用,如在泵中金属粉末较严重,在软硬管路中剥落物为中等,在油箱和软管内空气粉末为中等,在油箱和油液中沙子为中等。

1.2 气体钻井液压系统污染物动平衡方程

由于气体钻井现场实际的液压系统组成装置多,体积庞大,工况复杂,工作环境恶劣,要对其建立精确的污染物动平衡方程非常困难。因此作者在建立污染物平衡方程时,以表 1 为依据,对气体钻井井场现用液压系统进行简化,如图 1 所示,并作如下假设:

1) 系统开始工作时,油液具有一定的初始污染浓度,且油液无漏失;

1 建立气体钻井液压系统污染物控制数学模型

1.1 气体钻井液压系统污染物来源与分布

通过现场调研以及相关文献分析^[1-10],了解到气体钻井过程中液压系统的油液污染物主要来源有:

1) 现场恶劣的环境和气体钻井特殊的作业工况,导致泵吸入了不干净的油液,或者较快产生了不干净的油液。

2) 执行元件液压缸和活塞间存在间隙,当防喷器、节流阀等承受高压油气作业的装置在动作时,固体污染物颗粒会随着其间的间隙进入液压系统油路中。

3) 油田用液压装置在检修、拆装和搬运等过程中,往往无法保证密封性,致使大量固体污染物颗粒进入液压流道中。

在某油田气体钻井作业结束时,对液压系统的主要装置中固体颗粒污染物种类和侵入量进行检测,统计结果如表 1 所示。

2) 系统工作中的每一瞬间污染物都以一定的侵入率进入油液中;

3) 所用过滤器在系统工作过程中过滤比不变;

4) 上游的油液以一定的流量流经过滤器,其中一部分污染物被滤除,而未被滤除的污染物、液压系统执行过程中产生和侵入的污染物又回到油箱中。

建立气体钻井现用液压系统油路在任一瞬间上游油液中污染物颗级数量的平衡关系如下:

$$\text{上游颗粒数} = \text{初始颗粒数} + \text{总侵入颗粒数} - \text{总滤除颗粒数}。$$

$$N_U V = N_0 V + \int \sum_{i=1}^n R_i dt - \int (N_0 - N_{u1}) Q dt - \int (N_{u2} - N_d) Q dt + \int R_1 dt \quad (1)$$

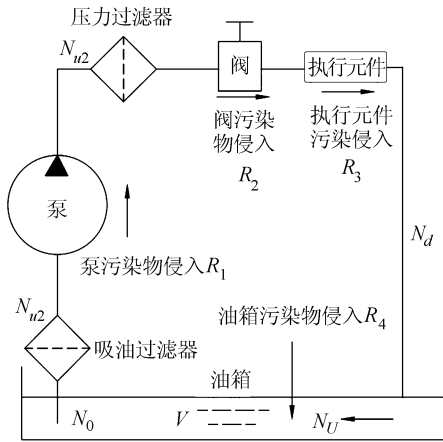


图1 气体钻井井场现用液压系统简化图

Fig. 1 Gas drilling well site active hydraulic system diagram 式中: N_u 为系统某一瞬间后过滤器上游油液中大于某给定尺寸的颗粒浓度,颗粒数/L; N_0 为当时间 $t = 0$,即系统静止状态时,吸油过滤器上游大于某给定规格的初始颗粒浓度,颗粒数/L; V 为系统内的油液容积,L; R_i 为污染物侵入率,即单位时间由各部位侵入油液内大于某给定尺寸的颗粒数,颗粒数/s; t 为系统运行时间,s; N_{u1} 为当系统开始运行后某一瞬间 t 吸油过滤器上游油液中大于某给定尺寸的颗粒浓度,颗粒数/L; N_{u2} 为某一瞬间压力过滤器上游油液中大于某给定尺寸的颗粒浓度,颗粒数/L; N_d 为当系统开始运行后的某一瞬间 t 后过滤器下游油液中大于某给定尺寸的颗粒浓度,颗粒数/L。

1.3 液压系统污染物控制数学模型及分析

根据过滤比 β 和侵入率 R_i 的定义可得式(2)和(3)^[10]:

$$\beta = N_u/N_d \quad (2)$$

$$\int N_{u2} Q dt - \int N_{u1} Q dt = \int R_i dt \quad (3)$$

将式(2)和(3)代入式(1),得到气体钻井液压系统污染物控制方程:

$$N_d = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{(\beta - 1)Q} + \left[\frac{N_0}{\beta} - \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{(\beta - 1)Q} \right] e^{-\frac{(\beta-1) \cdot Q}{V} t} \quad (4)$$

当式(4)中的时间 $t = \infty$ 时,可以求得下游大于某给定尺寸的颗粒浓度 N_d 稳定值 \bar{N}_d :

$$\bar{N}_d = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{(\beta - 1)Q} \quad (5)$$

根据颗粒浓度稳定值 \bar{N}_d 式(5)可分别绘制出当初始颗粒浓度 $N_{01} > \bar{N}_d$ 和 $N_{02} < \bar{N}_d$ 2种情况下的

气体钻井液压系统下游颗粒浓度随时间变化的关系图,如图2所示。

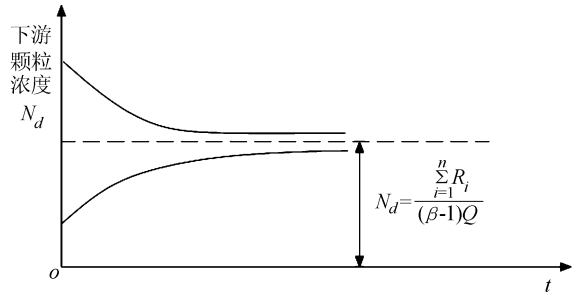


图2 2种情况的油液污染度变化规律

Fig. 2 Gas drilling field of oil pollution curve

由图2可知,当 $N_{01} > \bar{N}_d$ 时,下游油液的污染度随时间而减小,当 $N_{02} < \bar{N}_d$ 时,下游油液的污染度随时间而增大。同时,2种情况的下游颗粒浓度 N_d 随时间而变化减缓,且数值上无限趋近于 \bar{N}_d 。

结合气体钻井液压系统污染物控制方程和上述分析可知,欲降低气体钻井现用液压系统中的污染度,并有效控制在系统装置要求的范围内,可从如下方面进行考虑:

- 1) 减小系统各部位污染物侵入率 R_i ,可通过有效增强执行元件、阀等密封能力。
- 2) 提高过滤器的过滤比 β ,可通过适当提高过滤器的过滤精度。
- 3) 增大过滤器的流量 Q ,可通过增大过滤器的滤除能力。
- 4) 可增加液压系统过滤装置,多级过滤延长下游颗粒浓度达到稳定值的时间;或者高效过滤,使下游颗粒浓度降低到稳定值之下。
- 5) 降低液压系统初始污染度或油箱污染度 N_0 ,可通过增设外过滤装置。
- 6) 降低液压系统颗粒浓度稳定值 \bar{N}_d ,严格控制其在装置要求之下。
- 7) 确定油液污染度基本达到稳定的时间 t ,在该时刻对液压油进行更换或者净化处理。

2 井场液压系统油液过滤系统设计

2.1 井场液压系统油液过滤系统方案优选

结合气体钻井现场实际情况和1.3节上小节所提出的设想,现拟定3种改进液压系统过滤装置的方案:

方案1:保持原有过滤系统结构不变,提高吸油及压力油管路过滤器的过滤精度。

方案2:保持原有的吸油及压力油管路的过滤器不变,增设外过滤装置。

方案3:保持原有的吸油及压力油管路的过滤

器不变,设计新型回油过滤系统(由于油田现场安全要求很高,井控所用液压系统采用过滤精度较低或者未使用回油过滤器)。

由于油田用液压控制系统(如远控台、节控箱等)结构固定,数目庞大,使用寿命长。在设备运行过程对稳定性、安全性要求很高,同时考虑到生产安全、安装、费用和可靠性等诸多因素,对上述拟定 3 种方案比较,选择方案 3,新型回油管路过滤系统结构简图,如图 3 所示。考虑气体钻井液压系统结构和后续安装与使用性等,并保证气体钻井作业安全、稳定运行的前提下,该新型回油过滤装置设计为独立模块,主要由外过滤器、内过滤器、单向阀和溢流阀组成。

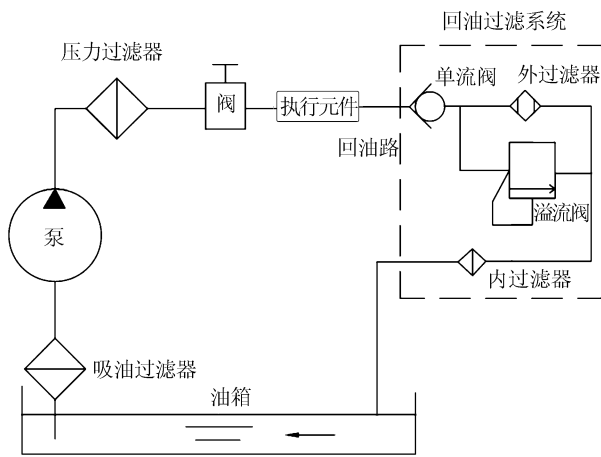


图 3 新型回油路过滤装置液压系统简图

Fig. 3 New return line filter hydraulic system diagram

2.2 确定新型回油过滤装置主要设计参数

1) 确定系统过滤精度

过滤精度的确定直接关系到系统油液所能达到的清洁度水平,而系统目标清洁度是根据系统中对污染最敏感的元件及工作条件(工作压力、温度及油液类型等)进行确定。气体钻井液压系统中各液压元件对油液清洁度的要求见表 2。

根据气体钻井井场液压系统各个设备的工作压力等级,确定系统装置目标清洁度为 18/15,结合过滤器选择原则,回油过滤装置过滤精度确定为 10 μm 。

2) 过滤器滤芯材料选择

过滤是利用多孔隙可透形介质滤除悬浮在油液中的固体颗粒污染物,其主要机制可归纳为直接阻截和吸附过滤。按照结构和过滤原理,过滤介质可分为表面型和深度型 2 大类,2 种类型过滤介质的孔径分布如图 4 所示。根据过滤精度的要求,回油过滤装置选用深度型且具有磁性吸附作用的滤芯。

表 2 液压系统元件对油液清洁度要求

Tab. 2 Hydraulic system components on the oil cleanliness requirements

元件类型	液压泵工作压力/MPa		
	<14	14~21	>21
定量叶片泵	18/15	17/14	16/13
变量叶片泵	16/14	15/13	15/13
元件类型	液压阀工作压力/MPa		
	—	<21	>21
换向阀	—	18/15	17/14
压力控制阀	—	17/14	17/14
流量控制阀	—	17/14	17/14
单向阀	—	18/15	18/15
液压遥控阀	—	16/13	12/15
节流阀	—	12/15	11/13
比例压力控制阀	—	16/13	12/15
元件类型	液压执行器工作压力/MPa		
	<14	14~21	>21
液压缸	18/15	18/15	18/15

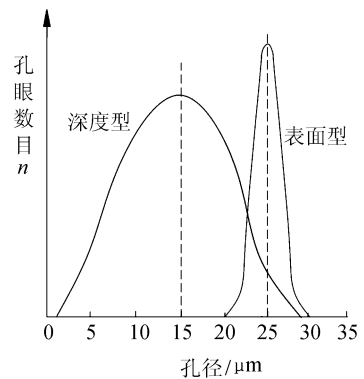


图 4 表面型和深度型过滤介质的孔径分布规律

Fig. 4 Surface type and depth-type filter media pore size distribution

3) 系统压差特性

油液流经过滤器时,由于过滤介质对油液的阻力而产生一定的压力损失。根据流体力学原理,流体流经过滤介质时产生的压力损失与通过的流量,流体的黏度,以及过滤介质的物理结构等因素有关,一般表示如下^[5]:

$$\Delta P = \frac{\delta \eta Q}{\alpha A} \quad (6)$$

式中, ΔP 为压力损失或压差, δ 为过滤介质的厚度, η 为流体动力黏度, Q 为流经过滤介质的流量, α 为过滤介质的透气性, A 为过滤介质的有效面积。

4) 系统流量确定

在规定的压降下,液体流经过滤器的流量,称之

为流通能力,可表示为^[10]:

$$Q = \frac{\alpha A \Delta P}{\mu} \quad (7)$$

式中: Q 为流通能力,即允许最大过滤流量; A 为通液面积; μ 为动力黏度; α 为滤芯材料单位通液能力。

通过分析计算,确定出气体钻井井场液压系统回油过滤装置性能参数,如表3所示。

表3 新型回油过滤装置性能参数

Tab.3 New back to the oil filter device performance parameters

过滤精度/ μm	滤芯形式	压差/MPa	流通能力($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)
10	深度型	0.03	465.5

3 带回油过滤装置污染控制分析

3.1 带回油过滤装置污染控制方程

根据新型回油过滤装置图3可知,该系统中有4个过滤器,但系统运行时起过滤作用的主要是压力过滤器和外过滤器,设经过压力过滤器过滤比为 β_2 ,经过外过滤器的过滤比为 β_3 ,吸油过滤器和内滤油器都属于粗过滤,过滤比分别为 β_1 和 β_4 ,则带新型回油过滤装置的液压系统污染物控制方程为:

$$N_d = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\left(\prod_{j=1}^4 \beta_j - 1\right) Q} + \left[\frac{N_0}{\prod_{j=1}^4 \beta_j} - \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\left(\prod_{j=1}^4 \beta_j - 1\right) Q} \right] e^{-\frac{\left(\prod_{j=1}^4 \beta_j - 1\right)}{\prod_{j=1}^4 \beta_j} \cdot \frac{Q}{V} t} \quad (8)$$

3.2 算例计算

现以气体钻井用防喷器液压系统为例,无回油过滤装置和带新型回油过滤装置的液压系统可分别简化为如图2和3所示的结构简图,因此,上述2种系统可直接分别引用式(4)和(8)进行下游污染物计算。计算中,假定2种系统流量均为 $1.8 \times 10^4 \text{ mL/min}$,最大压力为16 MPa,油箱中油液的容积为 $2.5 \times 10^4 \text{ mL}$ 。2种系统中所用过滤器对颗粒尺寸大于 $5 \mu\text{m}$ 和大于 $15 \mu\text{m}$ 的过滤比和平均过滤效率参照表4,两液压系统中各部位污染物侵入率 R 见表5。

在一定时间范围内,拟定在相同时刻,分别对2种系统下游污染物颗粒尺寸大于 $5 \mu\text{m}$ 和大于 $15 \mu\text{m}$ 的浓度进行计算,并绘制出了下游颗粒浓度随时间的变化图,如图5和6所示。

表4 过滤器对不同尺寸颗粒过滤比

Tab.4 Filter for filtering particles of different sizes than

过滤器	颗粒尺寸/ μm	平均过滤比	平均过滤效率/%
吸油过滤器	>5	4	23.98
	>15	10	65.40
压力过滤器	>5	11	68.54
	>15	32	78.12
外过滤器	>5	18	94.31
	>15	43	95.20
内过滤器	>5	6	35.50
	>15	12	70.89

表5 系统中各部位污染物侵入率

Tab.5 System parts contaminants rate

侵入部位	侵入率/($\text{颗} \cdot \text{min}^{-1}$)	侵入率值
泵	R_1	8.023×10^5
阀	R_2	7.891×10^5
执行元件	R_3	2.125×10^6
油箱	R_4	2.235×10^5

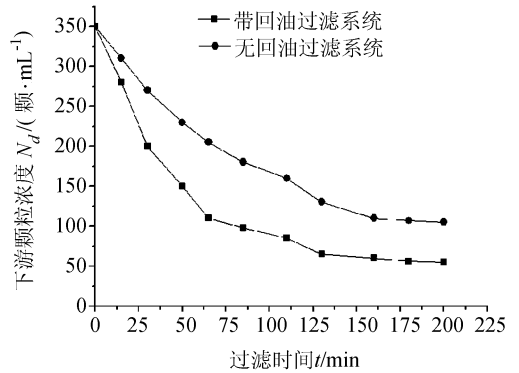


图5 下游颗粒尺寸大于 $5 \mu\text{m}$ 的颗粒浓度

Fig.5 Preparation particle size concentration of particles greater than $5 \mu\text{m}$

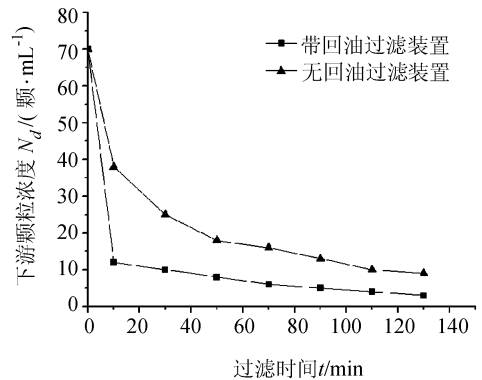


图6 下游颗粒尺寸大于 $15 \mu\text{m}$ 的颗粒浓度

Fig.6 Preparation particle concentration of particles larger than $15 \mu\text{m}$

从图 5 和 6 可知,防喷器液压系统带回过滤装置相比无回油过滤装置,对于下游污染物颗粒浓度的变化有较大影响。带回油过滤装置的下游颗粒尺寸大于 $5\ \mu\text{m}$ 的颗粒浓度 N_d 较无回油过滤装置下降快,带回油过滤装置的下游颗粒浓度在 125 min 后趋于平缓,稳定值为 60 颗/mL,而无回油过滤装置下游颗粒浓度在 160 min 之后趋于平缓,稳定值为 110 颗/mL。带回油过滤装置下游颗粒尺寸大于 $15\ \mu\text{m}$ 的颗粒浓度 N_d 较无回油过滤装置的下游颗粒浓度下降速度明显加快,带回油过滤装置的下游颗粒浓度在 120 min 后趋于平缓,稳定值为 3 颗/mL,而无回油过滤装置下游颗粒浓度在 110 min 之后趋于平缓,稳定值为 8 颗/mL。综上所述,带新型回油过滤装置的液压系统污染物过滤效果较无新型回油过滤装置有明显提高,污染物过滤速度加快,下游污染颗粒浓度明显降低。

同时,综上所述可知,气体钻井液压系统目标清洁度为 $18/15$,即允许 $\geq 5\ \mu\text{m}$ 的颗粒浓度为 $1\ 280 \sim 2\ 500$ 颗粒数/mL,允许 $\geq 15\ \mu\text{m}$ 的颗粒浓度为 $240 \sim 320$ 颗粒数/mL。在稳定状态下,对带新型回油过滤装置的下游污染物颗粒浓度进行换算,可发现油液的清洁度明显满足气体钻井液压系统目标清洁度的要求。

4 结 论

1)分析出气体钻井过程中液压系统的油液污染物主要来源以及主要装置中的污染种类和污染程度,为后续研究液压系统污染物动态平衡和污染物控制提供参考。

2)根据气体钻井井场现用液压系统简化模型建立了液压系统污染物动平衡方程和污染物控制方程,并提出降低液压系统污染措施。该控制方程可为油田现用液压系统油液过滤装置的改进提供理论依据,也可用于过滤装置的效果评价。

3)根据液压系统污染控制方程提出了对过滤系统参数进行优化的措施,根据参数化优化措施提出了液压系统污染物清洁装置的 3 种方案,确定了新型回油过滤装置的主要设计参数:过滤精度、滤芯形式、系统压差以及系统流量。

4)推导出液压系统带新型回油过滤装置时的污染物控制方程,并运用污染控制方程对 2 种系统过滤效果进行计算分析,带新型回油路过滤装置的过滤速度明显提高,且下游污染物颗粒浓度稳定值较无回油过滤装置大幅度降低,更好地满足气体钻

井现场液压系统对油液清洁度的要求,有效地提高了装置的使用寿命。

参考文献:

- [1] Xu Qicong, Liu Qilin, Hou Wei, et al. Sichuan gas field gas drilling technology[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(3): 60-62. [许期聪, 刘奇林, 侯伟, 等. 四川油气田气体钻井技术[J]. 天然气工业, 2007, 27(3): 60-62.]
- [2] Xu Ai. Technology and applications of air drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 34(4): 16-19. [许爱. 气体钻井技术及现场应用[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(4): 16-19.]
- [3] 周英操, 翟洪军. 欠平衡钻井技术与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- [4] Wu Y. Equation for controlling contamination of hydraulic fluid in the hydraulic system[J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20(6): 647-652.
- [5] Tu Q Z, Gong L H, Wang Q. Modeling for the hydraulic contamination control system[J]. China Mechanical Engineering, 2001, 12(6): 629-631.
- [6] Poeth B. Proactive maintenance[J]. Fluid Power Journal, 2005, 12(1): 28-30.
- [7] Liu Jinguo. Study on the control model of oil contamination in hydraulic system of mining machine[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(1): 89-93. [刘金国. 煤矿机械液压系统油液污染控制模型的研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(1): 89-93.]
- [8] Yun Chuangzhi, Chen Caiping, Zhao Tongyong. Filtration characteristics analysis of clean hydraulic systems with little volume tank[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(2): 216-219. [员创治, 陈彩萍, 赵彤涌. 小油箱和零油箱洁净液压系统及其净化性能分析[J]. 煤炭学报, 2002, 27(2): 216-219.]
- [9] Nie Songlin, Shi Xueyuan, Li Yongping, et al. Simulation on status of hydraulic contamination and optimum allocation of hydraulic filters in hydraulic system[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2008, 36(1): 71-74. [聂松林, 石学园, 李永平, 等. 液压系统污染状态模拟与过滤器优化配置[J]. 华中

- 科技大学学报:自然科学版,2008,36(1):71-74.]
- [10]夏志新. 液压系统污染控制[M]. 北京:机械工业出版社,1992.
- [11]Jia Ruiqing, Guo Zeng, Wu Xueping. Particle contamination of hydraulic systems and filtering state relations [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2000, 28(1): 72-74. [贾瑞清, 郭建曾, 吴雪平. 液压系统颗粒污染和过滤状态的关系[J]. 机床与液压, 2000, 28(1): 72-74.]
- [12]Han Heyong, Huang Qingxue, Ma Lifeng, et al. Research on the Hydraulic System of Hydraulic Rolling Shear[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, 43(3): 239-243. [韩贺永, 黄庆学, 马立峰, 等. 液压滚切剪液压系统的研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2011, 43(3): 239-243.]
- [13]Stecki J S, Schoenau G. Application of simulation and knowledge processing in contamination control [J]. SAE Transactions, 2000, 109(2): 331-347.
- [14]Fich E C. Fluid Contamination Control[M]. Virginia: FES INC, 1988.
- [15]Liu C, Stecki J S, Drans field P. Dynamic contamination control model for fluid contamination [C]//Proceedings of the International Conference on Fluid Power Control and Robotics. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1990: 342-347.
- [16]Wang Luping, Gong Yue, Jia Ruiqing. Research on filter model of hydraulic or lubrication system based on effective filtration ratio[J]. Lubrication Engineering, 2010, 35(7): 71-74. [王炉平, 弓乐, 贾瑞清. 基于有效过滤比的液压润滑过滤器模型的研究[J]. 润滑与密封, 2010, 35(7): 71-74.]
- [17]Tong Wei, Liu Shudao. Oil contamination control of hydraulic system of engineering machine[J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2001, 29(12): 1507-1509. [童伟, 刘树道. 工程机械液压系统油液的污染控制[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2001, 29(12): 1507-1509.]
- [18]Zheng Changsong, Ma Biao. Study on dynamic balance of contamination control for the hydraulic system[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2005, 33(8): 126-129. [郑长松, 马彪. 液压系统污染控制动平衡研究[J]. 机床与液压, 2005, 33(8): 126-129.]
- [19]Yang Zhitao, Wei Baohua, Qu Jinping. Application of accumulator to entire hydraulic injection molding machine and its energy-saving effect analysis[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42(1): 243-248. [杨智韬, 魏保华, 瞿金平. 蓄能器在全液压注塑机的应用以及节能效果研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(1): 243-248.]

(编辑 黄小川)