

设备润滑系统污染控制

黄宝华

中天钢铁集团（南通）有限公司，江苏 南通 226300

DOI: 10.61369/SSSD.2025020025

摘 要： 对设备润滑系统而言，污染无处不在，无时不在，因此，彻底消除污染是不可能的，人们能够做到的只能是尽可能避免污染，并采取控制措施以降低或减少污染。降低和减少污染不仅可以延长设备的使用寿命，也可以延长油液的更换周期，减少新油的用量；既给企业带来客观的经济效益，还可以减少因油液再生和废油排放对环境和生态带来的负面影响^[1]。润滑系统污染是以润滑油液的污染形式反应出来的，因此，通过对润滑油液的污染分析，可以诊断和判定设备润滑系统的污染原因和程度，进而采取措施，控制和预防润滑系统的污染。

关 键 词： 设备；润滑；污染物；控制；清除技术；污染监测

Pollution Control of Equipment Lubrication System

Huang Baohua

Zhongtian Iron and Steel Group (Nantong) Co., Ltd, Nantong, Jiangsu 226300

Abstract： In the management of equipment lubrication, it is inevitable to encounter problems related to contaminants. This article briefly introduces five aspects: the forms and sources of contaminants in the equipment lubrication system, their impacts on equipment and lubricating oil, contamination control of the lubrication system, contamination removal technology of the lubrication system, and contamination monitoring of the lubrication system. The main purpose is to draw the attention of equipment managers to the contaminants in equipment lubrication management through this introduction and open up ideas for future equipment lubrication management.

Keywords： equipment; lubrication; contaminants; control; clearing technology; pollution monitoring

一、设备润滑系统污染物的形态和来源

润滑系统的污染按形态可分为三种：

- （1）气体污染，比如空气污染、天然气污染、氧气污染、氨气污染等；
- （2）液体污染，比如水污染、冷却液污染、燃油稀释污染、清洗剂污染、混油污染等；
- （3）固体污染，比如粉尘颗粒污染、磨损颗粒污染、基础油降解和添加剂耗解产物油泥和漆膜等沉积物的污染、微生物污染等。

润滑系统的污染按来源也可分为三个：

- （3）制造安装和维修过程中产生的污染：设备在制造过程中的污染主要来源于加工过程遗留下的金属颗粒物，铸造模具中带入的砂粒，防护漆引入的油漆沉积物，清洗过程中残留的碎布纤维和清洗溶剂；也包括维修过程中污染物带入^[2]。
- （4）运行过程中产生的污染：设备润滑系统在运行过程中产生的污染相对比较复杂，主要有润滑设备自身产生的磨损颗粒污染见表1；密封材料产生的污染、润滑油液产生的污染等。
- （5）外界进入润滑系统的污染：外界进入润滑系统的污染物有气体、液体和固体三大类，气体污染主要是空气污染，液体污染主要是水污染和混油污染，固体污染主要是粉尘污染和微生物污染。

表1 磨损颗粒分布

磨损颗粒类型	磨粒磨损	黏附磨损	腐蚀磨损	疲劳磨损	微动磨损	其他
磨损颗粒分布（%）	66	12	8	8	2	4

作为设备润滑系统的主要介质——润滑油液和润滑脂，从从生产调和开始，一直到被排出润滑系统，都有可能受到污染，导致润滑油液和润滑脂被污染的途径主要有三个：

- （1）油液生产、运输、储存过程：新油在生产调和过程中，基础油和添加剂质量把关不严，生产调和系统不清洁、运输过程中防护措施不到位，储存容器不清洁或密封不良，储存环境恶劣，如露天存放等。
- （2）油液使用过程：没有油液过滤或油液过滤不当；没有呼吸孔或呼吸孔功能失效；设备磨损；微生物感染。
- （3）油液加注和更换过程：油液转移容器不清洁；加错油液导致混油污染。

二、污染对设备和润滑油液的影响

（一）空气污染

在大气环境中，空气无处不在，但空气如果大量进入润滑系统，则可能给设备和润滑油液造成潜在的危害。空气在润滑系统中存在的形式有三种，分别是溶解态、夹带态和自由态。溶解于油液中的空气成为溶解态，润滑油液对空气的溶解度大约为

10%，过量溶解的空气可导致基础油氧化降解和添加剂的耗解，使油液性能下降，还会产生油泥和漆膜等沉积物；夹带在油液中的空气成为夹带态，夹带态的空气以微观气泡的形态存在于油液之中，它会导致油液浑浊不清，使油液的可压缩性降低，散热性变差，油膜强度下降，加速油液的氧化，在高压区还会产生微柴油化，导致设备气蚀，过量的空气夹带还会使油液产生气泡，同样会影响润滑效果，大量的气泡会从润滑系统外溢，导致事故发生。自由态的空气存在于润滑系统的高位、死区和静置的管道中，产生气阻，使供油不畅，还会影响液压泵的压缩性能，甚至导致控制系统失效^[3]。以上三种形态的空气污染中，夹带态的空气对设备润滑系统的潜在危害最大。

（二）其它气体污染

对压缩机的润滑系统而言，压缩气体对系统污染所造成的危害是很大的，如天然气可以溶解于压缩机润滑油中，导致压缩机润滑油黏度下降；氧气、氢气、氯气、二氧化硫等化学活性气体与压缩机润滑油发生化学反应生成的酸性产物，导致设备腐蚀；二氧化碳和氨气等化学惰性气体也可以与压缩机润滑油发生化学反应，导致压缩机润滑油皂化，产生沉积物。

（三）水污染

当润滑油存有水时，都会润滑油造成极大的伤害。水不但影响润滑油的使用寿命，还会影响设备的使用寿命（见图1）。

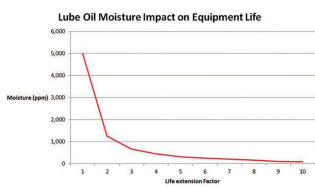


图1 水对设备使用寿命的影响

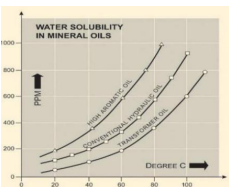


图2 水在油液中的溶解度

水在设备润滑系统中存在的形式有三种，分别是自由态、溶解态（见图2）和乳化态。自由态的水可导致设备发生锈蚀；溶解态的水可导致油液中重要的添加剂如抗氧化剂、极压抗磨剂、清净分散剂等水解，使油液失效；乳化态水对润滑系统造成的危害比自由态和溶解态更大，因为乳化态的水是以微观颗粒的形式存在于油液之中，不但可以导致油液乳化，在高压条件下，水分子可分解成氢原子和氧原子，氧原子导致油液氧化，氢原子吸附在设备表面，导致设备发生氢脆^[4]。

（四）颗粒污染

粒污染是设备润滑系统最主要的污染源，包括进入润滑系统的外部颗粒和润滑系统内部产生的颗粒两大类，外部颗粒主要是指环境中粉尘和沙尘颗粒，内部颗粒主要是指磨损颗粒。包括磨粒磨损颗粒、黏附磨损颗粒、疲劳磨损颗粒、腐蚀磨损颗粒和微动磨损颗粒等。颗粒污染对油液而言，主要是影响油液的清洁度，对设备而言，主要是导致设备磨损加剧，尤其是磨粒磨损^[5]。

（五）燃油稀释

对汽油和柴油发动机润滑系统而言，燃油稀释成为必须考虑的污染源之一，因为燃油稀释不但可以降低润滑油的黏度，还可加速润滑油基础油的降解和添加剂的消耗，从而导致润滑失效。

（六）混油污染

不同的润滑油的基础油和添加剂组成及其性能要求大相径庭，如果不同的润滑油混合在一起，就会改变其组成和性能，使其作用大打折扣或彻底失效，甚至产生反作用，从而造成设备运行可靠性下降乃至发生故障。

三、设备润滑系统污染控制

设备润滑系统的污染无处不在，无时不在，彻底消除污染是不可能的，人们能够做到的只能是尽可能避免污染，并采取控制措施以降低或减少污染^[6]。而要想控制设备润滑系统的污染，首先要做好以下三个方面的工作：（a）根据每个润滑系统的特点，以ISO 4406或NAS1638清洁度标准为依据建立可接受的污染水平及限值；（b）开展油液监测工作，以确定润滑系统的污染程度；（c）实施油液净化，以减少或降低润滑系统的污染。下面将从五个方面对设备润滑系统的污染控制进行论述。

（一）油液验收过程污染控制

由设备润滑系统污染源分析可以看出，新油未必就是干净的。水污染和颗粒污染是新油主要的两类污染物，就颗粒污染而言，OEM对各类设备的清洁度要求见表3，对不同油液清洁度的划分见表4，而各类基础油和添加剂清洁度典型数据见表5和表6。

Equipment Type	
Element Bearings	
Heavy Duty Gear Drives	
Diesel Engines	
Journal Bearings	
Hydrostatic Transmissions	
Screw Compressors	
Hydraulic Component Types	

Variable vane pump *	18/16/14
Variable piston pump *	17/15/13
Fixed gear pump *	19/17/15
Servo valves *	16/14/11
Proportional valves *	18/16/13
Ball bearings	15/13/11
Roller bearings	16/14/12
Journal bearings (x400 rpm)	18/16/14
Gearbox	17/15/13

*2,000-3,000 psi for pumps and valves

表3 设备清洁度要求

		ISO Oil Grade Classification		Cleanliness Code (R _{0.4} /R _{0.5})	
		12/9	14/11	16/13	18/15
Hydraulic Fluids		Very clean	Clean	Clean	Dirty
Gear Oils		Very clean			
Engine Lubes		Very clean	Clean	Clean	Dirty
Turbine Oils		Very clean	Clean	Dirty	Dirty

20	16/14/11
40	15/13/10
60	14/12/10
100	13/12/10
150	12/11/10
220	11/10/10
300	10/9/10
400	9/8/10
600	8/7/10

表4 OEM对油液清洁度的划分

表5 不同黏度基础油清洁度典型数据

Example Particle Data on Hydraulic Fluids (base oils, additives and finished formulations)		
		Particle Count Data (ISO Code)
Fluid Tested	Optical*	Pore Blockage
Group I Mineral Oil (base oil)	17/14/11	14/13/10
Group II Mineral Oil (base oil)	17/17/13	16/15/13
Polyol Ester Synthetic (base oil)	16/15/13	13/12/10
Polyalphaolefin (PAO) Synthetic (base oil)	18/16/13	19/18/15
Diester Synthetic (base oil)	14/14/13	19/16/14
Zinc AW Hydraulic Additive Package	16/14/12	18/17/14
Calcium Sulfonate Detergent/Corrosion Inhibitor	18/16/13	16/15/12
Phenolic Antioxidant	15/14/11	16/15/12
Aminic Antioxidant	16/14/12	15/14/12
Group I Plus Zinc AW Additive Package (finished hydraulic fluid)	17/15/12	16/16/13
Group II Plus Zinc AW Additive Package (finished hydraulic fluid)	19/17/13	16/15/12
Polyol Ester Base Oil Plus THF Additive System (finished fluid)	21/18/14	21/20/19
PAO Base Oil Plus Zinc AW Additive Package (finished fluid)	18/15/12	15/14/12

表6 不同类型基础油和添加剂清洁度典型数据

（二）油液储存过程污染控制

油液在储存过程中，因储存条件和储存时间的影响，容易遭到各种外界污染物的侵袭或者自身产生也会产生污染物，比如

环境中的粉尘、水份、气体、微生物等，以及油液中添加剂的析出和沉降产物等。

如果条件允许，油液最好储存在通风良好且密闭干燥的室内环境之中，如果必须室外储存，则应加盖遮阳棚，避免阳光直晒和雨淋，对于大桶包装的油液，则应水平放置或倾斜一定的角度，并使呼吸孔和桶口处于三点到九点的位置^[7]。

（三）油液转移和加注过程污染控制

油液在转移和加注过程中最容易受到二次污染，比如转移和加注工具对油液的污染，直接暴露在外的油液遭受周围环境的污染等，为了避免油液的这种二次污染，首先，要保证转移和加注工具是干净的，标识是清楚的（避免混用，造成混油污染），其次，每转移一次就要对油液过滤一次，油液必须通过过滤系统，并且经过检测合格后方可加注到润滑系统中，最后，要保持油液转移和加注现场干净整洁^[8]。

（四）油液使用过程污染控制

油液在使用过程中受到污染的机会是最多的，主要有以下几种：（a）人为失误导致混油污染，预防和控制这种污染的措施为加强设备润滑人员的专业培训，同时强化目视化管理，建立醒目的标识系统。（b）水份和粉尘污染，预防和控制这类污染的措施为加强设备密封，在呼吸孔处增加过滤系统。（c）微生物污染，预防和控制微生物污染的措施就是消除微生物的生存环境，比如水（水含量大于500ppm则易于微生物寄生和繁衍）、温度（微生物适宜生存温度为25℃-50℃）、氧气等。（d）油液更换时，废油残留物对新油的污染，预防和控制这种污染的措施就是在油液更换时对润滑系统进行彻底的冲洗以消除废油残留。

（五）油液过滤过程污染控制

油液过滤过程中产生的污染是最容易被忽视的污染，预防和控制这种污染的措施首先就是要防止过滤器混用，不能使用一个过滤器过滤不同的油液，其次就是要及时检查过滤器的过滤效率和过滤效果，另外还要注意针对不同的油液和不同的污染采用不同类型的过滤器。

四、设备润滑系统污染清除技术

要想实现设备润滑系统污染控制的目标，除了采取有效的预防措施，防止润滑系统被污染外，还要有针对性的实施污染清除技术，除去已经生成或进入设备润滑系统并对其构成潜在危险的污染物。设备润滑系统污染清除技术主要由以下几种：（1）滤膜过滤技术；（2）离心分离技术；（3）减压蒸馏技术；（4）磁吸

附技术；（5）静电吸附技术；（6）离子交换技术。

五、设备润滑系统污染监测

设备润滑系统污染监测是污染控制的基础，是检验污染控制水平和实施污染控制技术的依据，下面将从三个方面分别进行论述：

（一）气体污染的监测

对于一般的润滑油而言，气体污染主要是指空气污染，但对于燃气发动机油和压缩机油而言，燃气的污染和压缩气体的污染则是不可忽视的重要污染源。空气污染的监测一般采用空气释放值和泡沫性两种方法，尤其是空气释放值的监测对在用油液的意义更大，其它气体的污染则需采用专业的分析仪器如色谱等进行监测^[9]。

（二）液体污染的监测

液体污染的监测主要针对的是水污染监测，水污染的监测方法有两个，一个是卡尔费休法，一个是水爆法，卡尔费休法适合于实验室监测，水爆法适合于现场监测。其它液体的污染包括冷却剂污染、燃油稀释污染和混油污染，监测方法主要采用红外光谱法和气相色谱法^[10]。

（三）固体污染的监测

固体颗粒污染的监测分为两部分，一部分是颗粒的组成和含量，一部分是颗粒的尺寸大小和形貌，颗粒组成和含量的监测主要采用原子光谱分析法，如ICP、RDE、XRF等，其中XRF在在用油液元素含量分析方面应用最为广泛，因为它不受样品来源和颗粒尺寸大小的影响，而ICP只能监测油溶性的元素组成和含量，RDE也只能检测10微米以下颗粒的元素组成和含量。

六、结束语

为了提高设备可靠性运行的水平，润滑系统的污染预防和控制是必不可少的工作之一，而要想做好人设备润滑系统的污染预防和控制，就必须了解导致润滑系统污染的来源和成因，利用现代化的污染监测技术，采取有效的污染预防和控制措施，才能保证将设备润滑系统的污染降低到最低程度，从而使润滑油脂能够有效的发挥作用，并减少因污染而造成的润滑油脂采购成本，降低设备故障率，保证企业生产的持续性，还可以减少因废润滑油脂的排放而造成的环境污染。总之，设备润滑系统的污染预防和控制是一项既利于企业又利于社会的有益工作，应当引起企业管理者和设备润滑工作者的高度重视。

参考文献

- [1] Jeanna Van Rensselaar, Avoiding lubricant contamination, TLT, September 2021.
- [2] Jeanna Van Rensselaar, Controlling particle contaminants, TLT, November 2021.
- [3] Robert M. Gresham, Contamination control, TLT, April 2015.
- [4] Debbie Sniderman, Lubricant contamination control, TLT, April 2017.
- [5] Dan Holdmeyer, The basics of lubricant water contamination, TLT, January 2022.
- [6] Mike Johnson, Industrial fluid contaminants and their effect, TLT, September 2009.
- [7] Greg Livingstone, Trendsetting Technologies in Contamination Control, Practicing Oil Analysis(7/2004).
- [8] David Dise, Contamination Control Objectives, Machinery Lubrication(2/2021).
- [9] Puliyur Madhavan, Contamination Control for Extending Fluid Service Life, Practicing Oil Analysis(3/2005).
- [10] Richard Winslow, Microbial Contamination of Turbine Lube Oil Systems, Machinery Lubrication(11/2004).