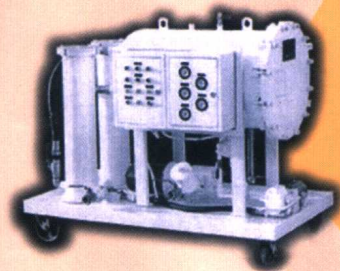


液压润滑系统的 清洁度控制

胡邦喜 编著



冶金工业出版社

液压润滑系统的 清洁度控制

胡邦喜 编著

北 京

冶金工业出版社

2003

图书在版编目 (CIP) 数据

液压润滑系统的清洁度控制/胡邦喜编著. —北京:
冶金工业出版社, 2003.8

ISBN 7-5024-3303-1

I. 液… II. 胡… III. 液压系统: 润滑系统—油
污染—污染控制 IV. TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 059103 号

出版人: 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑: 李培禄 葛志祺 美术编辑: 王耀忠 责任校对: 白 迅 责任印制: 牛晓波

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2003 年 8 月第 1 版, 2003 年 8 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 4.75 印张; 125 千字; 140 页; 1—4000 册

16.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100711) 电话: (010) 65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

20 世纪以来,我国的科学技术突飞猛进,装备水平日益提高,液压润滑技术得到广泛应用并受到高度重视,同时也对液压润滑系统的可靠性提出了更高的要求。大量的事实表明,系统的安全可靠性与油液的污染状况有密切的关系。国内外的资料统计说明,系统的故障 70%~85%是由于油液污染引起的。因此,污染控制已成为国内外液压行业和各工业部门普遍关注的问题。近 20 年来,人们致力于不断提高产品质量和完善污染控制技术以提高工作的可靠性。在这期间,国外液压设备油液的平均清洁度提高了约 5 级 (ISO 4406),相当于油液中的污染颗粒减小了 32 倍,液压系统的污染得到了有效的控制,工作可靠性显著提高。目前,我国液压设备的油液污染度一般比国外的高 3~4 级,因而设备故障率高,元件寿命短,严重影响设备效能的充分发挥。

世界各主要发达国家对液压污染控制一直给予高度重视,一些国家的液压行业组织和标准化机构设有污染控制技术委员会,负责污染控制技术的推广应用和有关标准和规范的制订和实施。国际标准化组织 ISO/TC 131 (流体动力技术委员会) 专门成立了污染控制分委员会 SC6, 下设三个工作组 (WG1——污染分析, WG2——过滤器性能评定, WG3——元件和系统清洁度), 负责有关液压污染控制国际标准的制订和实施。

我国于 1997 年在全国液压气动标准化技术委员会下设立了污染控制工作组,以加强液压污染控制标准化方面的工作,并与 ISO/TC 131/SC6 对口,参与有关液压污染控制的国际标准化工作,以期使我国的液压污染控制技术与管理工作的进一步规范化与科学化,并争取尽快与国际水平接轨。

油液污染的内涵非常广泛，包括外界侵入油液的物质统称为污染。如气体进入油中，可使油液的体积压缩，同时产生气蚀，这对液压系统极为不利；水分进入油中会引起乳化变质，降低润滑性能；油液受到热源的影响会引起氧化变质，生成胶泥或沥青；油液中有水分及金属颗粒会促使油液变质；灰尘、磨粒等脏物进入油液中会加速元件磨损并促使系统运行不正常。这些问题的出现迫使人们不得不广泛而又深入地去研究油液的污染问题，并对它进行人为的控制，使油液的污染不致成为制约生产力的主要因素。污染的含意极为广泛，所以本书只讨论颗粒杂质污染，讲述系统中颗粒杂质生成的原因、危害及如何控制。油液从炼钢厂生产出来，经过包装运输，再装入设备系统中，要想获得毫无污染、绝对清洁、一尘不染的油液，这是不可能的。但是人们通过努力，可以控制污染的程度，即把油液的清洁度控制在能够允许的范围内，这是能够做到的，而且也是必须做到的。为了提高油液的清洁度，保证液压润滑设备的正常运行，我们根据在武钢多年的实践经验编写了《液压润滑系统的清洁度控制》一书。

在编写本书过程中，夏顺明、葛志祺、张虎、李华、钱峰、陈海飞、杨伟、代昌陵等同志协助收集资料并帮助整理，在此表示感谢。同时还要感谢承天倍达过滤技术中心提供了有关技术资料。

书中如有不当之处欢迎指正。

编 者

2003年3月

目 录

1 液压润滑系统污染的形成及原因分析	1
1.1 绪论	1
1.2 颗粒杂质的形态	2
1.3 流体液质中颗粒杂质引起的失效模式	3
1.4 颗粒杂质污染的磨损机理	5
1.4.1 相对运动表面间的磨损	5
1.4.2 冲蚀磨损	8
2 颗粒杂质污染的危害	10
2.1 颗粒杂质污染对元件的危害	10
2.1.1 颗粒杂质对磨损的影响	10
2.1.2 颗粒杂质的尺寸与元件间隙的关系	10
2.1.3 磨损的链式反应	11
2.2 泵磨损试验	12
2.2.1 试验条件	12
2.2.2 试验目的	13
2.2.3 试验方法	13
2.2.4 试验结果	13
2.2.5 试验小结	16
2.3 轴承磨损试验	16
2.4 颗粒杂质对液压元件的危害	17
2.4.1 颗粒杂质对溢流阀的危害	20
2.4.2 颗粒杂质对滑阀的危害	22
2.4.3 电液伺服阀和比例控制阀受污染敏感度的影响	22
2.5 系统应有的清洁度	25

3	液压系统污染控制的理论分析	27
3.1	系统污染控制方程	27
3.2	系统污染度控制的实验	30
3.2.1	在给定污染侵入率工况下油液污染度的变化规律	31
3.2.2	在外界污染侵入率为零工况下油液污染度的变化规律	35
3.3	系统污染平衡分析	40
4	液压润滑系统污染的综合控制	41
4.1	主动维护	41
4.2	全面清洁度	43
4.3	高精细过滤	48
5	各种清洁度标准及检测	54
5.1	各种清洁度标准	54
5.1.1	GB 511 机械杂质	54
5.1.2	NAS 1638	54
5.1.3	SAE 749D	56
5.1.4	MIL	57
5.1.5	ISO 4406	57
5.1.6	ISO/DIS 11218	62
5.2	清洁度的检测	63
5.2.1	清洁室	63
5.2.2	颗粒计数分析	64
5.2.3	半定量对比法	68
5.2.4	颗粒质量分析	69
5.2.5	自动颗粒计数器	70
6	提高系统油液清洁度的净化处理	75
6.1	简述	75
6.2	过滤	75
6.3	过滤器	76
6.4	过滤器的性能	78

6.4.1	过滤精度	78
6.4.2	过滤比 (β 值)	80
6.4.3	过滤器的尺寸	81
6.4.4	过滤器的发展近况	83
6.5	液压润滑系统的过滤	84
7	液压系统污染控制的实践	
	——武钢冷轧厂五机架连轧机液压压下系统的改造	86
7.1	系统的运行现状	86
7.1.1	油箱部分	86
7.1.2	补油部分	88
7.1.3	高压油源部分	89
7.2	改造前系统的污染监测	89
7.2.1	武钢冷轧五机架 (3~5 机架) 25MPa 液压压下系统 油液污染状况的实验分析	89
7.2.2	滤油器过滤性能多次通过法试验报告	91
7.3	系统污染控制的重要性	93
7.4	五机架冷连轧机 3~5 机架液压系统污染控制 改造方案及优化设计	93
7.4.1	系统清洁度目标值的确定	93
7.4.2	改造方案的确定	95
7.4.3	改造方案及优化设计	100
7.5	污染控制及其效果	103
7.5.1	概述	103
7.5.2	系统监测数据及分析	105
7.5.3	污染控制效果及分析	106
7.5.4	结论	108
8	液压润滑系统提高清洁度后取得的效益	109
8.1	武钢 4 号高炉炉顶液压系统的改造	109
8.2	马钢第四炼铁厂为降低故障率采取的维护措施	109

8.3	首钢炼铁厂提高新油清洁度的效果	110
8.4	武钢大型厂高速线材车间油膜轴承润滑系统 的改造	110
8.5	武钢大型厂高速线材轧机集卷液压系统的 经验教训	111
8.6	英国液压研究协会关于油液清洁度与元件 寿命关系的研究	112
8.7	国外的有关报道	113
8.8	决定元件寿命的其他因素	114
附录 1	几种难燃液压液的技术性能	116
附录 2	各种液压油的技术性能 (一)	120
附录 3	各种液压油的技术性能 (二)	127
附录 4	过滤器	134
参考文献		140

1 液压润滑系统污染的形成及原因分析

1.1 绪 论

进入 20 世纪以来,科学技术发展日新月异,液压传动技术也和其他领域一样得到飞速发展。20 年代,液压技术首先在机床上应用,30 年代又应用于航空工业。二次大战期间,科技工作者发现液压传动技术优点很多,又将其广泛应用于军事和国防工业。50 年代后,液压技术开始应用于机械、造船、矿山、冶金等民用工业。

液压传动技术在冶金工业设备上首先应用于轧钢设备,然后迅速推广到炼铁及炼钢设备。20 世纪 70 年代初,我国开始在高炉炉顶采用液压设备。武钢从 70 年代末引进 1700mm 轧机系统后,也随之从德国、日本等国引进了大量的液压传动设备和技术;紧接着于 80 年代末从德、日、卢森堡等 8 国引进技术建成的 5 号高炉,也大量采用了液压技术。因此,武钢目前从冶炼到轧钢均已广泛采用了液压技术。

目前,液压技术因其具有液压传动装置体积小、质量轻、结构紧凑、动作灵敏,便于实现自动化,且能在很大范围内实现无级调速等优点,广泛应用于航空、航天、航海、国防、军事及钢铁冶金、矿山等工业领域,而且仍在继续发展其应用范围。然而,在液压技术发展进程中,始终存在两个难题在困扰着液压科技工作者:一是泄漏,二是污染。尤其是液压系统的污染控制问题,几乎每套液压系统都存在。特别是对于精度要求非常高的液压伺服控制系统来讲,污染控制显得更为重要。

据美国研究资料表明：机械设备的功能失效 50% 归因于磨损，而磨损主要是由于系统油液内的颗粒污染物造成的；另据统计资料表明：液压元件失效 70% ~ 85% 归因于油液污染。美国 Massachusetts 技术学院的一项统计资料指出，修理机械磨损导致的损坏所需的费用约占全国总产值的 6% ~ 7% (2700 亿美元)，而磨损主要是由液压润滑油液中的颗粒污染造成的。美国海军的一项长期研究表明：航海及航空设备的颗粒污染磨损费用是其燃料费用的 2/3。由此可见，液压润滑系统的污染控制的确是一个不容忽视的问题。我们认为，油液好比人体的血液，一旦血液出了问题，人就会生病甚至死亡。液压润滑油一旦被污染，受影响的不仅仅是油液本身，它将危及机器设备元件和整台设备的安全运行，甚至造成整条生产线停产。因此，采取切实可行的措施控制油液污染，是提高设备运行可靠度、降低运行成本的最有效途径。

武钢冷轧厂五机架连轧机的液压 AGC 是武钢于 20 世纪 70 年代末从德国引进的先进技术，20 多年来，对武钢的发展起到了重要的作用，但由于污染问题始终得不到很好地解决，致使系统元件失效率高，制约了轧机生产能力的发挥。因此，武钢于 1998 ~ 1999 年度将液压润滑系统的污染控制列为重点科技攻关项目，旨在依靠现代科学技术和污染平衡理论解决现场实际问题，为武钢冷轧厂生产能力的更好发挥创造条件。

为此，编写本书的主要目的就是讨论液压润滑系统中颗粒杂质的污染问题，按系统中颗粒杂质含量的不同区分出不同的污染等级，即污染度；与之相反的概念是清洁度。清洁度越高污染度越低，颗粒杂质含量越少。

1.2 颗粒杂质的形态

在液压润滑系统中，我们所讨论的颗粒尺寸，其大小范围为 0.5 ~ 200 μm ，最关键的是 5 ~ 15 μm 。人们正常视力可以观察到 40 μm 的颗粒，不借助放大镜，凭肉眼无法看到尺寸小于 40 μm

的颗粒。在人们眼里看来是“干净”的油液，其中可能悬浮着大量的微小颗粒，正是这些微粒对系统的性能存在着极大的影响。

一般颗粒分为软质和硬质两种。软质颗粒有添加剂与水的凝聚物、油料基本组分分解与聚合物、棉绒纤维等，这些物质可包围在热交换器表面，降低散热能力，导致产生高温。由于软颗粒在元件的动态间隙中堵塞与沉积，导致阀芯卡塞，动作失灵。纤维可以粘附于滤网与孔口、喷嘴上并捕集碎屑。硬质颗粒有制造过程中带入的切屑、维护与工作环境中侵入的微粒，以及系统中的磨损产物及氧化物等，如表 1-1 所示。

表 1-1 硬质颗粒种类、硬度及生成原因

污 染 颗 粒	莫氏硬度	生成原因
金刚石（砂轮、抛光剂）	9~10	加工磨削
大块切屑	4~7	加工切削
灰尘（ SiO_2 ）	5~7	环境
磨损的硬金属	4~7	系统内磨损
金属氧化物（ Al_2O_3 ）	9	系统内磨损

这些硬质颗粒危害最大，较大的颗粒可引起突发性失效，较小的可引起冲蚀磨损或淤塞使阀芯卡死，总之它能加速元件的磨损而使元件失效。

1.3 流体液质中颗粒杂质引起的失效模式

所谓机械设备的失效，是指其材料、结构或系统不能在正常和安全的状况下实现其应有的功能。通俗地讲，就是一台设备或一个系统不能再工作了。任何导致机械设备材料磨损和性能下降的不正常工况都称为“失效的根源”。

机械设备失效的发展过程如图 1-1 所示。当系统的任一根源参数出现异常时，如不及时采取纠正措施，都将引起材料磨损、工作性能下降，最终导致设备的完全失效。为防止失效的发生和

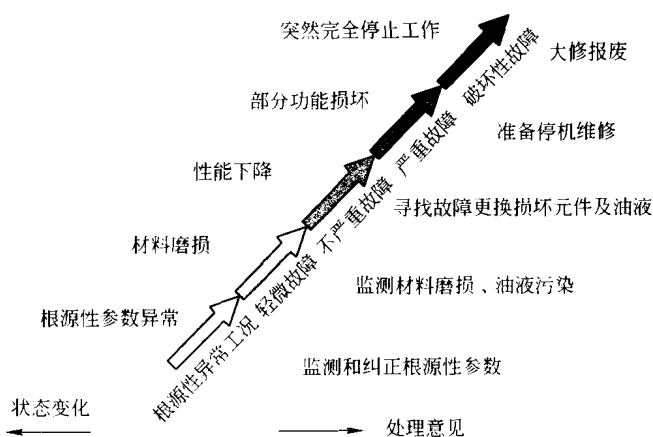


图 1-1 机械设备失效的发展过程

发展，必须对这些根源性参数进行监测与控制，使其保持在允许范围以内。

对于液压系统和润滑系统，如果设计合理，制造质量良好，其失效的根源主要在于以下几方面：

- (1) 油液的污染；
- (2) 油液化学性质的变化；
- (3) 油液物理性质的变化；
- (4) 油液的泄漏；
- (5) 气蚀；
- (6) 系统过热；
- (7) 系统过载。

研究统计资料表明，液压与润滑系统的故障约 70% ~ 85% 是由颗粒污染物引起的。因此，油液的颗粒污染是液压、润滑系统失效的最主要的根源。

颗粒污染引起的失效模式主要有两种：突发失效及渐发失效。

突发失效是指设备或元件在非预测的情况下，突然损坏或动

作失灵，不能早期预测。产生突发失效的原因主要是尺寸较大的颗粒进入了运动间隙或流体通道，妨碍了表面间的相对运动。例如，当尺寸较大的颗粒进入叶片泵时，可能导致叶片折断或卡死；当大颗粒进入滑阀时，可能影响阀的正常闭合或造成阀芯卡死，阀就会突然失效。此外，微小颗粒在滑阀间隙内淤积经常引起阀芯污染卡紧。

渐发失效主要是磨损引起的。当小尺寸的颗粒进入运动副间隙或流道时，首先引起材料表面的磨损，使运动间隙增大或密封面破坏，引起元件的内部泄漏，使其效率或精度降低；情况严重时会引起磨损的链式反应，从而加速元件性能下降。倘若对这种渐发性失效的过程不进行监测及控制，其最终结果是元件丧失正常功能而完全失效。

人们一般比较重视突发失效，而对于渐发失效往往重视不够。实际上，磨损是机械设备运行中一个普遍存在的严重问题，渐发失效是液压和润滑元件失效的主要模式。

1.4 颗粒杂质污染的磨损机理

为了达到控制磨损的目的，避免或延缓渐发失效的发生和发展，必须了解磨损的机理以及油液颗粒污染对元件磨损的影响。

磨损的发生及发展是一个十分复杂的过程，因为它涉及到许多因素及其相互作用。元件表面磨损中颗粒污染是造成磨损的一个极为重要的因素，因为它参与了各种磨损机理及相互作用。

颗粒污染物参与磨损过程的主要方式有两种。第一种方式是颗粒污染物随油液进入两个相对运动的表面之间而参与磨损；第二种方式是颗粒污染物随液流对元件表面的冲刷而参与磨损。

1.4.1 相对运动表面间的磨损

相对运动表面间的磨损机理主要有黏着磨损、疲劳磨损和磨粒磨损。

1.4.1.1 黏着磨损

黏着是指两个运动表面间的润滑油膜被破坏而产生的紧密接触。当两个相对运动表面的凸凹不平处或细微粗糙区之间的油液薄膜层被挤出时,就会发生黏着磨损,其机理如图 1-2a 所示。

两个表面间的紧密接触就会导致凸出部分发生点熔合。当凸出的部分因移动而相互分离时,微小熔合点常发生不对称的碎裂,屈服强度低的材料就会被剥离,材料由一个表面转移到另一个表

面或表面材料释放到油液中,在极端条件下还会出现咬合,如图 1-2b 所示。

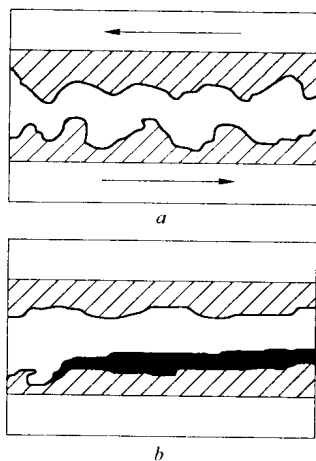


图 1-2 黏着磨损机理

1.4.1.2 疲劳磨损

进入运动副间隙中的固体颗粒在碾压合搓动下在元件表面产生很大的应力,当这种作用连续重复时,材料表面将产生错位、滑移,以至形成缺陷。最后这些缺陷发展并与表面裂纹连成一体,导致材料表面的剥落,如图 1-3 所示。

这种剥落材料产生的硬化颗粒物进入系统油液中,又进一步加剧磨损的链式反应。

此外,由于材料错位和剥落,形成表面凸起和凹陷,从而又引起表面的黏着磨损。

1.4.1.3 磨粒磨损

磨粒磨损是颗粒污染磨损最主要的磨损机理。它是指进入元件运动副间隙内的坚硬颗粒物嵌入其中较软的材料表面,在相对运动中对另一表面产生切削作用,如图 1-4 所示。从图中可以看出,尺寸等于或略大于运动间隙的颗粒危害最大。

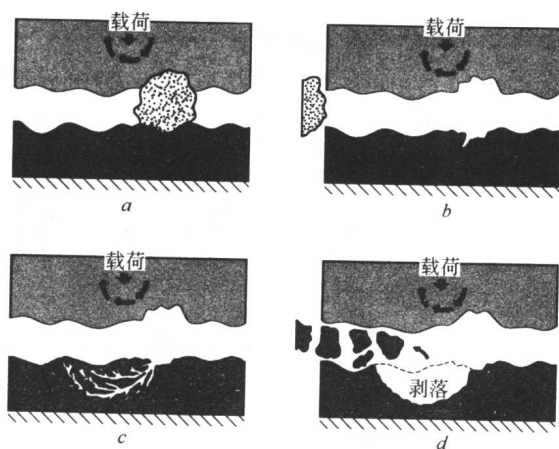


图 1-3 疲劳磨损机理

a—颗粒卡紧；b—表面凹陷形成初始裂纹；
c—经过多次循环裂纹发展；d—表面碎裂成颗粒脱落

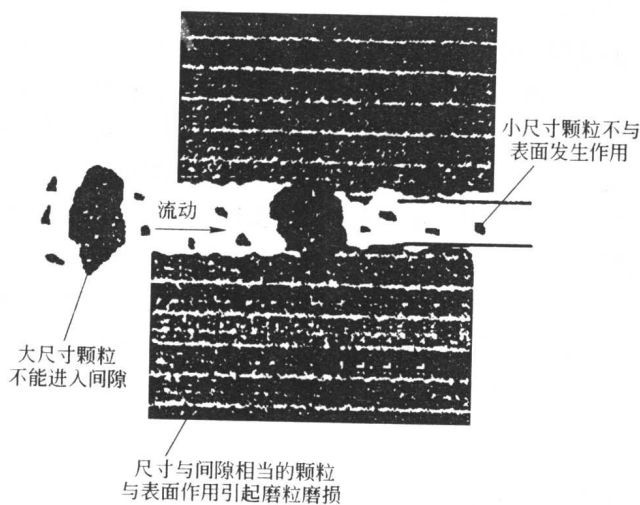


图 1-4 磨粒磨损机理

对于运动副零件表面的磨损来说，油膜厚度具有重要的意义，它是对磨损起关键性作用的因素。

如图 1-5 所示，油膜厚度是指两个运动表面间的最小距离，油膜在其内支撑相对运动表面间的载荷，并使它们保持分离。

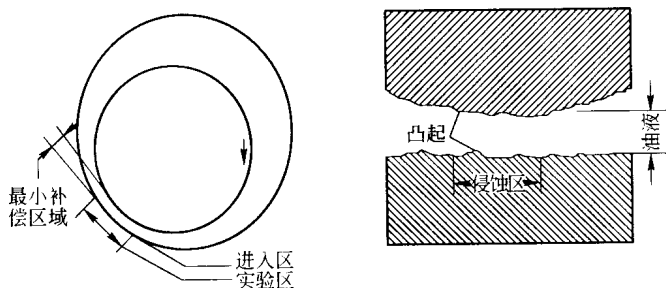


图 1-5 运动表面间的润滑

油膜厚度取决于压紧载荷、局部温度及相对运动速度，而且在一个工作循环中，往往会因上述参数的变化而改变。因此油膜厚度也可称为动态间隙。

有关油膜厚度、颗粒尺寸与表面磨损速率之间的精确关系目前还研究得不够。对于磨粒磨损而言，尺寸等于或略大于油膜厚度的颗粒危害最大。但是这并不意味着尺寸大于或小于油膜厚度的颗粒没有危害。例如，当载荷较小时，油膜增厚，这时大尺寸的颗粒就会进入间隙，而当载荷增大时，间隙变小，颗粒就会作用于材料表面而引起磨粒磨损。而当系统启动或停车时，运动表面间的低速和高压将迫使油液离开接触区，从而形成极薄的油膜 ($0.001 \sim 0.005 \mu\text{m}$)，这时油液中的微小颗粒也会对表面产生各种不同形式的磨损作用。当然油膜厚度大，将有利于减小磨粒磨损。

1.4.2 冲蚀磨损

冲蚀磨损是指高速液流所挟带的颗粒污染物对元件表面或边