

国家自然科学基金资助项目

液压泵污染磨损 与控制

赵大庆 著

煤炭工业出版社

7.51

国家自然科学基金资助项目

液压泵污染磨损与控制

赵大庆 著

江苏工业学院图书馆
藏书章

煤炭工业出版社

(京)新登字 042 号

内 容 提 要

液压泵是液压系统的关键元件。液压泵的故障主要是因运动摩擦副或配油端面的磨损导致的。随着液压泵向高压高速高精度化方向发展,油污污染对液压泵磨损寿命的影响愈显突出。

本书作者在传统研究方法的基础上提出了多信息综合研究方法,将污染物的重要磨损尺寸特征参数,液压泵关键运动副间隙状况,污染磨损机理及污染磨损控制有机地结合起来,从而使得液压泵污染磨损与控制在研究方法上达到新的突破。

全书共分六章,内容包括:液压系统油污污染规律的研究;液压系统污染物的计算机图象处理与分析;轴向柱塞泵配流理论及油膜状态的研究;斜轴泵污染磨损试验;液压泵污染磨损控制理论及应用等。

书中内容翔实,展示了大量实验数据和图表,反映了当代液压泵污染磨损与控制的最新成果,既有理论,又有试验和应用;不仅强调学术价值,而且也着重工程实用性,自成一个比较完整的体系。该书可供高等院校机械、液压和磨损专业的研究生及本科高年级学生作教材,也可供流体传动与控制方面的学者、专业技术人员阅读。

液 压 泵 污 染 磨 损 与 控 制

(国家自然科学基金资助项目)

赵 大 庆 著

责任编辑:向 云 霞

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街 21 号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 $787 \times 1092 \text{mm}^{1/16}$ 印张 $8\frac{1}{2}$

字数 190 千字 印数 1—2, 470

1993 年 9 月第 1 版 1993 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 7-5020-0818-7/TD · 757

书号 3586 M0053 定价 $\frac{\text{(平)} \quad 7.90}{\text{(精)} \quad 12.90}$ 元

602/4/16/02

序

液压传动与控制技术的运用和发展虽然复苏于 50 年代,但这门技术以其独特的优点(如体积小、重量轻、惯性小、响应速度快、无级调速范围大、易布置及可实现自动化等)而得到了飞速的发展,现已成为一门较成熟的工业技术。如果说在液压传动这门技术的开发之初,我们将着眼点放在其原理的新颖和功能的优越的研究上,那末,在液压传动与控制这门技术已经相当普及并广泛应用的今天,探求其最佳经济效益和高可靠性就成为我们继续推广和发展这门技术的重要课题。

现代液压传动与控制技术的应用和发展,使油液污染控制的重要性更为突出。现有的研究资料及成果表明,由于液压系统油液污染而造成的设备故障占总故障的 80%以上^{[1][2]},液压系统油液污染已成为发展高质量液压元件和液压系统的主要障碍。因此,对液压系统的油液污染问题进行广泛而深入的研究,无论就其迫切性、必要性还是重要性来说,都具有积极而重要的意义。

由于各种因素的影响,液压系统工作油液不可避免地受到各种污染,如固体颗粒、空气、水、微生物、化学制品、辐射、静电、热能、磁性等。其中固体颗粒污染是最主要的污染源。这些污染物的存在严重影响着液压系统和元件的性能、使用寿命及工作可靠性,具体表现在堵塞元件的节流孔和润滑通道,使运动部件运动困难甚至卡死和烧伤,加剧配合表面的磨损,加速油液老化等。油液污染使液压系统产生故障或损坏的形式可概括为三种:性能不稳定、元件损坏和性能劣化。前两种故障瞬时呈现,是污染物直接作用的结果;后一种形式往往不引人注意,它是污染物作为媒介产生恶性磨损过程的结果。早在 1965 年,美国国家流体动力协会就作了“液压系统的故障至少有 75%是由于油液及其污染所造成”的结论。

有许多的研究和调查报告都反映出油液污染对液压系统和元件的危害。例如美国关于油泵的污染磨损试验得出:只有每 100ml 油液中含污染物重量小于 3~35mg,粒径 10~15 μm 的颗粒少于 3 万个,而且硬度高于莫氏 6 度的颗粒不超过 30%时,飞机用轴向柱塞泵的寿命才能达到 50 h。伺服阀的污染敏感度试验^[3]表明:每 100ml 油液中含 1~5 μm 的颗粒超过 25~500 万个时,伺服阀将完全丧失机能。英国流体动力协会就清洁度与液压泵可靠性的关系进行过调查^[4],结果发现,当油液清洁度等级高于 NAS9 级时,液压泵基本不出现故障;当油液清洁度为 NAS10~11 级时,泵偶然出现故障;当油液清洁度低于 NAS12 级时,泵则需要经常维修。日本对液压系统的故障进行了调查^[5],结论是:因油的污染而造成的故障占 82%,机械故障占 15%,电气故障占 3%。我们曾对我国矿山机械及工程机械液压系统的油液污染和使用情况进行调查^{[6][7]},结果表明:矿山机械液压系统油液清洁度为 NAS16~21 级,一般工业用液压系统油液清洁度为 NAS12~16 级。一般说来,一般液压系统对油液清洁度的要求是 NAS6~9 级,由此可见我国液压系统油液污染的状况更为严重,在上述污染状况下工作的液压系统和元件所产生的故障和损坏率是相当高的。如我国某矿务局的引进综采机组,由于油液污染严重,在短短的几个月中便损坏了几十台油泵和油马

达,造成了几十万美元的经济损失。

由上述分析可以看出,液压系统油液污染对液压系统、元件和液压油所产生的影响和危害是非常严重的。因此,如何消除和降低油液污染、提高液压元件的抗污染能力,延长液压元件的使用寿命、提高液压系统的工作可靠性,无论从学术意义和技术意义的角度,还是从社会效益和经济效益的角度,都是十分重要的。

液压泵是液压系统中的关键元件,起着“心脏”的作用,它向液压系统中的执行元件,如液压马达或液压缸,提供一定压力的液体,以保证执行机构的正常工作。液压泵性能的优劣直接影响液压系统的工作可靠性。

液压泵的寿命是指泵因内部零件损坏或磨损而使泵丧失使用功能以前工作的时间。液压泵的寿命评价指标主要包括:

- 1) 轴承出现疲劳点蚀(轴承寿命);
- 2) 泵内部零件出现疲劳损坏(疲劳寿命);
- 3) 泵的容积效率下降某值(磨损寿命)。

显然,泵的寿命取决于上述3个指标中的最小者。

在传统的设计中,国内外一般都把泵的轴承寿命作为泵的寿命。然而,液压泵在实际使用过程中却常出现这样一种现象,即泵的实际使用寿命小于甚至远小于泵的设计寿命。因此,将泵的轴承寿命作为泵的寿命是不合适的。

作者对诸如采煤机械、挖掘机械及建筑机械等设备中各类液压泵的使用、维修等情况进行了跟踪调查,收集了97个液压泵发生的各种故障,经统计分析得如图1所示的液压泵故障率与故障原因之间的关系。由图1可以看出,液压泵的故障主要是因运动摩擦副或配油端面的磨损导致的。

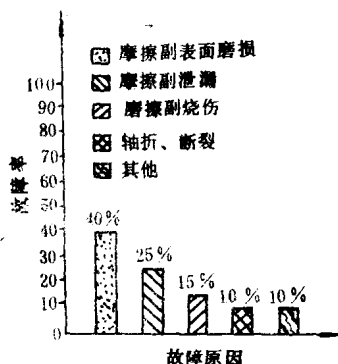


图1 液压泵故障率及故障原因

我们对上述机械设备进行了油样抽查,结果表明,使用仅1~2个月的油,平均污染度达NAS12级,最高污染度达NAS16级。液压泵在这样的条件下工作,其故障率是相当高的,寿命也很短,有的泵仅工作十几小时或十几天便严重损坏。

作者认为,随着液压泵向高压、高速、高精度化方向发展,油液污染对液压泵磨损寿命的影响愈显突出。在一些场合下,即便是微量的污染也能对液压泵产生严重的磨损,进而使液压泵因容积效率急剧下降而丧失了工作性能。因此,在现代液压传动中,液压泵的寿命在很大程度上取决于泵的磨损寿命。

由上述分析可知,研究液压泵的污染磨损机理,提高液压泵的抗污染磨损性能,延长液压泵的使用寿命和提高液压泵的工作可靠性,是一项具有重要技术价值和实际意义的亟待解决的课题。

自本世纪 60 年代末以来,世界上一些主要经济及技术发达国家,如美国、日本、英国、德国、苏联、法国等都先后开展了对液压传动工业污染及其控制这一领域内有关问题的研究与探讨,经历了漫长而复杂的过程,在颗粒分析、过滤、元件污染敏感度及液压系统控制与管理 4 个主要方面取得了很大的进展,主要表现在:研制了各种形式的现代化污染分析仪器,对污染物进行了数量上的分析,对污染物的来源、特性及污染物造成的磨损、堵塞、腐蚀等现象有了较深入的了解;在过滤技术的多机理化、高精度化方面有了较大的发展,液压系统和元件的清洁度有所提高;制订了一系列检测方法、试验方法及清洁度等级有关标准等。这些研究对提高液压元件的可靠性、耐久性、安全性和适用性起了重要作用。

多年来,国内外液压技术工作者对如下一些有关液压泵污染磨损的问题产生兴趣:

- 1) 液压泵故障与失效的统计、原因调查;
- 2) 液压泵污染磨损的机理及其影响因素;
- 3) 不同类型的泵,哪一种泵的抗污染磨损性能最优?不同厂家生产的同类泵,哪个厂的泵抗污染磨损性能最优?原因何在?
- 4) 如何评定液压泵的抗污染磨损性能?
- 5) 提高液压泵的抗污染磨损性能的方法和途径;
- 6) 液压泵过滤精度的科学确定。

围绕着上述几个主要问题,国内外学者开展了一系列的研究工作。

最早从事液压泵污染磨损研究工作的当属美国俄克拉荷马州州立大学 E. C. Fitch 教授及其领导的流体动力研究中心。自 60 年代末和 70 年代初,他们就开展了液压泵污染敏感度的理论和试验研究,主要研究工作及贡献如下:

1) 建立了液压泵污染敏感度试验方法。该方法已成为美国国家标准试验方法^[8],并被国际标准化组织推荐为试用标准方法。液压泵污染敏感度试验方法是一种在实验室条件下评定液压泵对污染颗粒敏感程度的强化模拟方法,通过输入不同大小的污染颗粒进行多次循环试验,测定液压泵输出流量的变化,进而评价液压泵对不同大小的颗粒的敏感程度、抗污染磨损性能及污染磨损寿命。

2) 对各类液压泵做了大量的污染敏感度试验^{[9]~[18]}。自 70 年代初期至今,他们已对近 300 台的各类液压泵进行了污染敏感度试验,为评价液压泵的污染耐受度,比较各类泵的抗污染磨损性能,促进工业化生产作出了卓越的贡献。

3) 在大量试验研究工作的基础上,以 E. C. Fitch 教授为首的流体动力研究中心提出了描述液压泵污染磨损的理论模型和评价液压泵污染敏感度的理论方法,并通过这些模型和方法来预测液压泵在一定污染状况下的使用寿命^{[19]~[24]}。

80 年代初期,日本、英国、德国等国家的液压学者也相继开展了液压泵污染敏感度的研究工作。

1983 年日本学者楼井腾也就污染物的硬度、大小分布及浓度、温度、液压泵的压力及转速对叶片泵及齿轮泵的污染敏感度的影响进行了试验研究工作,并对液压泵磨损后的运动摩擦副表面的形貌进行了测定和分析^[25]。

1984 年日本制钢研究所小林靖夫对斜盘式轴向柱塞泵的污染敏感度进行了试验研究和评价^[26]。

1984 年西德亚琛工业大学巴克教授就斜轴式轴向柱塞泵的污染敏感度做了试验研究,在试验过程中,除了测定液压泵的输出流量这一特性参数外,还测定了扭矩、噪声等参数,从而可以得到更多的信息;另外,与标准试验方法不同,他们在进行污染敏感度试验时,每一尺寸段的颗粒每次按 100mg/l (而不是 300mg/l) 投入,这样在每次试验结束后就不用过滤了(标准方法是需要进行过滤的),从而缩短了试验的时间^[27]。

英国机械工程师学会流体动力传动小组与液压设备制造协会于 1982~1985 年共同开展了液压泵污染敏感度试验,他们对标准试验方法提出了批评,并提出两种替代标准试验方法的新方法^[28]。

作者与周士瑜教授合作,从 1984 年起开展了液压泵污染磨损的研究工作,在国内首次自行设计加工、安装并调试了液压泵污染磨损试验装置,经原煤炭部技术鉴定,试验装置在测试性能等方面均达到了国际标准的要求。作者对轴向柱塞泵的污染磨损与控制进行了研究,探讨了轴向柱塞泵的污染磨损的失效机理^{[30]~[34]}。

1988 年,王奕豫等对国产斜盘泵、叶片泵及齿轮泵进行了污染磨损试验^[35]。

1988 年,作者从结构可靠性的角度出发,通过改进原有配流卸荷槽不合理的结构,提高了轴向柱塞泵的污染磨损性能,延长了液压泵的使用寿命。

1989 年,作者在综合分析液压泵的容积效率、功率损失及抗污染磨损性能的基础上,对轴向柱塞泵的配流副的结构进行了改进,发明了具有抗污染高可靠性的端面配流副并获得了中国专利^[36]。

另外,在配流副材质选择及强化方面,国内外学者做了一些有意义的探讨,为寻找耐磨材料和强化工艺及手段做了大量的研究工作^{[37][38]}。

由上述分析可知,多年来,为了提高液压泵的工作可靠性及延长液压泵的使用寿命,国内外学者对液压泵的污染磨损问题给予很大关注并从多方面进行了大量的研究工作,在液压泵污染敏感度试验及试验方法的标准化、液压泵污染磨损试验装置的研制、液压泵污染磨损理论等方面都取得了一定的卓有成效的研究成果。与此同时,在纵览国内外现有研究工作及研究成果的基础上,作者认为关于液压泵污染磨损的研究还存在着下列一些主要不足和局限:

- 1) 对液压泵污染磨损机理的研究涉及较少,现有污染磨损理论模型仅是从半定量统计的角度出发而未能从机理上着手研究和分析,因此存在着一些明显的不足,不能较深入地揭示液压泵的污染磨损规律。

- 2) 很多学者都将着眼点置于液压泵污染敏感度标准试验方法的修正上。实际上,不同的试验目的具有不同的试验方法,而不应该片面地强调一种方法能适应不同的试验目的。不论哪一种试验方法,都应能从实际液压系统中找到其原型。

- 3) 多年来尽管很多学者对各类泵做了大量的污染敏感度试验,但应当强调的是,他们无论是在试验方法上还是在分析手段上大都类同,未能对液压泵污染磨损的理论和试验研究做出新的贡献。

- 4) 采用的研究手段单一,孤独地进行液压泵的污染敏感度的研究,缺乏系统观念,未能结合液压系统进行系统综合研究。

5) 理论研究与生产需要未能紧密地结合在一起。已有的研究仅能评价液压泵污染敏感度的相对强弱,对如何改进和提高液压泵的抗污染磨损能力缺乏进一步的研究,而后者却是厂家最为关注的。

作者认为,液压泵的污染磨损问题是一个黑箱问题:由于液压系统是封闭的,人们不可能直接观察到液压泵的污染磨损过程和机制,只有通过间接的外部信息获取和分析才能对液压泵的污染磨损机理有深入的了解。因此,如何获得可靠的多方面的外部信息并对其加以分析是液压泵污染磨损机理及其控制研究的关键。

传统的研究方法是通过液压泵流量的变化、液压系统循环油样的分析(如铁谱分析、重量分析、颗粒计数分析、能谱分析、光谱分析、扫描电子显微镜分析等)以及液压泵运动磨擦副表面磨损形貌分析来对液压泵的污染磨损机理加以研究的。

作者指出,污染物及其特性(如大小及分布、形状、浓度、硬度、最大直径、最小直径)、液压泵的流量、噪声、油样和关键运动副的表面形貌及液压泵的关键运动摩擦副的间隙状况是进行液压泵污染磨损研究所必须获取的最重要的信息。液压泵污染磨损机理的研究思想如图2所示。

作者在传统研究方法的基础上,提出了多信息综合研究方法,将污染物的重要磨损尺寸特征参数、液压泵关键运动摩擦副间隙状况、液压泵的污染磨损机理及液压泵的污染磨损控制有机地结合起来,从而使得液压泵污染磨损与控制在研究方法上达到了新的突破。

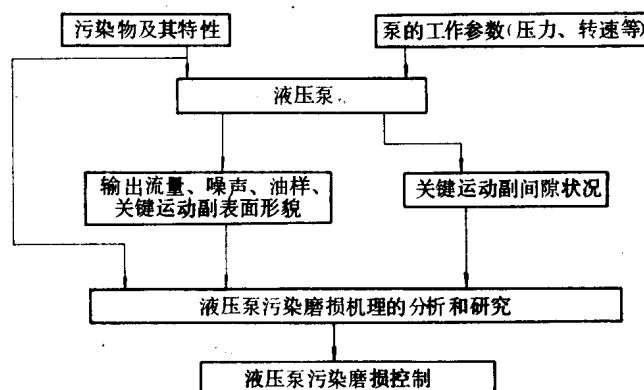


图2 液压泵污染磨损机理及控制研究思想

目 录

序

第一章 液压系统油液污染规律的研究	1
第一节 液压系统油液污染度的等级标准	1
第二节 液压系统固体污染物的大小及其分布	3
第三节 液压系统油液污染控制数学物理模型	7
第四节 国际标准试验粉尘——AC 细试验粉尘的自动颗粒计数测试结果与统计分析	11
第五节 液压系统油液性能劣化的综合评价	13
第二章 液压系统污染物的计算机图象处理与分析	18
第一节 液压系统油液污染度的检测技术和方法	18
第二节 液压系统固体污染物特征参数的提出	20
第三节 液压系统污染物计算机图象处理的研究方法及测量内容	21
第四节 液压系统污染物计算机图象处理的结果与分析	23
第三章 液压泵污染磨损控制理论	53
第一节 液压泵污染敏感度理论	53
第二节 液压泵污染敏感度理论的修正	55
第三节 液压泵容积效率与磨损关系的理论探讨	56
第四节 液压泵污染磨损控制理论	58
第四章 液压泵污染磨损的试验研究	64
第一节 液压泵污染磨损的试验方法及试验装置	64
第二节 斜轴式轴向柱塞泵污染磨损的试验研究	69
第三节 斜盘式轴向柱塞泵污染磨损的试验研究	78
第四节 齿轮泵污染磨损的试验研究	80
第五节 叶片泵污染磨损的试验研究	81
第六节 液压泵污染磨损试验及综合检测方法的探讨	82
第五章 液压泵污染磨损机理的研究	85
第一节 液压泵污染磨损机理	85
第二节 液压泵污染磨损的影响因素	88
第六章 斜轴式轴向柱塞泵的配流理论与污染磨损控制	93
第一节 轴向柱塞泵配流状况的研究现状	93
第二节 斜轴式轴向柱塞泵配流状况的动力学研究	95
第三节 斜轴式轴向柱塞泵空载启动动力学机制	105
第四节 斜轴式轴向柱塞泵配流状况的测试原理、方法及实验系统	110
第五节 斜轴式轴向柱塞泵配流副间隙状况的实验研究	114
第六节 斜轴式轴向柱塞泵污染磨损控制	118
主要参考文献	122

第一章 液压系统油液污染规律的研究

第一节 液压系统油液污染度的等级标准

液压油液愈清洁对液压系统的运行愈好。但实际上,要做到使液压油液绝对清洁是不可能的,也是不必要的。在使用要求不同的液压系统中,分别采用不同清洁度的油液,是比较经济合理的。

为了描述和评定油液的清洁度,必须制定液压系统油液污染度的等级标准。归纳起来,国际上对液压油液的污染度有两种表示方法:计数法和重量法。计数是按照 100ml 油液中允许含有不同大小颗粒的数量分级,如 ISO(国际标准化组织)、NAS(美国国家航空与航天标准)和 SAE-ASTM(美国汽车工程师学会、美国材料试验学会)等污染度标准。近年来,国际上已普遍采用 ISO 污染度标准。另一种表示法是采用重量法标定,即按 100ml 油液中允许含有的颗粒重量(以 mg 计)分级,例如, NAS(美国国家航空与航天标准)和 MIL-STD(美国军用标准)等。

一、按颗粒数分级

1. ISO4406 国际污染度等级标准

该标准用两个数码代表油液污染度等级。前面的数码代表每 ml 油液中尺寸大于 $5\mu\text{m}$ 的颗粒数等级,后面的代码代表每 ml 油液中尺寸大于 $15\mu\text{m}$ 的颗粒数等级,两个数码之间用一斜线分隔。例如,某液压油的污染度测定情况是: $5\mu\text{m}$ 以上的颗粒数为 200×10^3 个/100ml, ISO 等级为 18 级; $15\mu\text{m}$ 以上的颗粒数为 50×10^3 个/100ml, ISO 等级为 13 级。该液压油的污染度即为 18/13 级。ISO 标准之所以用颗粒大于 $5\mu\text{m}$ 、 $15\mu\text{m}$ 的两个含量作为指标,是因为大于 $5\mu\text{m}$ 的颗粒代表因杂质污染而将会产生的堵塞故障,能给出流体的淤积状况的准确估价;而尺寸大于 $15\mu\text{m}$ 的颗粒则代表磨损状况。ISO 污染度标准如表 1-1 所示,由 0.7~24 共有 27 个等级。

2. 我国的污染度等级标准

我国有关液压系统油液污染度等级的国家标准尚未发布,在行业检测中常等效采用 ISO4406 国际标准,并结合我国情况将等级数码由 24 扩展到 30,取消了 0.9 以上的等级,亦如表 1-1 所示,由 1 到 30 共 30 个等级。

3. NAS1638 污染度等级标准

NAS1638 污染度等级标准由美国国家宇航学会于 1964 年提出,目前在美国和世界各国仍得到广泛应用。该标准与 ISO 标准不同的是颗粒尺寸有更宽的分布范围,如表 1-2 所示。从表 1-2 中可以看出,相邻两等级颗粒浓度的递增比为 2,因此,当油液污染度超过表中 12 级时,可用外推法确定更高的污染等级。

二、按重量法分级

所谓重量法分级,是按 100ml 油液中允许含有的颗粒重量分级,常用的有 NAS1638 分级标准,该标准如表 1-3 所示,其测定方法是將 100ml 孔径的薄膜过滤、烘干,用天平称

表 1-1 ISO4406 污染度等级标准

等 级	颗粒浓度 (颗粒/ml)	等 级	颗粒浓度 (颗粒/ml)
0.7	0.0025	15	320
0.8	0.005	16	640
0.9	0.01	17	1300
1	0.02	18	2500
2	0.04	19	5000
3	0.08	20	10000
4	0.16	21	20000
5	0.32	22	40000
6	0.64	23	80000
7	1.3	24	160000
8	2.5	25	320000
9	5	26	640000
10	10	27	1300000
11	20	28	2500000
12	40	29	5000000
13	80	30	10000000
14	160		

表 1-2 NAS1638 污染度等级标准

颗粒尺寸 (μm)	等 级													
	00	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5~15	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	32000	64000	128000	256000	512000	1024000
16~25	22	44	89	178	356	712	1425	2850	5700	11400	22800	45600	91200	18200
26~50	4	8	16	32	63	126	253	506	1012	2025	4050	8100	16200	32400
51~100	1	2	3	6	11	22	45	90	180	360	720	1440	2880	5760
100 以上	0	0	1	1	2	4	18	16	32	64	128	256	512	1024

表 1-3 MLSTD1246 污染度等级标准

等 级	100	101	102	103	104	105	106	107	108
重量 (mg)	0.02	0.05	0.10	0.30	0.50	0.70	1.0	2.0	4.0

出薄膜的增重。

重量法分级的特点比较简单,可用称重法测出,在现场易于推广。但该法无法知道颗粒的尺寸分布与数量。

上述几种污染度等级标准的对照关系见表 1-4。

表 1-4 污 染 度 等 级 对 照 表

ISO 标准	每 ml 大于 10 μ m 颗粒数	ACFT-D 重量等级 (mg/l)	MILS- TD1246A (1967)	NAS 1638 (1964)	SAE (1963)
26/23	140000	1000			
25/23	85000		1000		
23/20	14000	100	700		
21/28	4500			12	
20/18	2400		500		
20/17	2300			11	
20/16	1400	10			
19/16	1200			10	
18/15	580		300	9	6
17/14	280			8	5
16/13	140			7	4
15/12	70			6	3
14/12	40		200		
13/11	35			5	2
13/10	14	0.1		4	1
12/9	9			3	0
11/8	5			2	
10/8	3		100		
10/7	2.3			1	
10/6	1.4	0.01			
8/6	1.2			0	
8/5	0.6			00	
7/5	0.3		50		
6/3	0.14	0.001			
5/2	0.04		25		
2/0.8	0.01		10		

第二节 液压系统固体污染物的大小及其分布

在液压传动与控制系统中，液压油不仅起动力传递作用，也起润滑及冷却作用，还对腐蚀和锈蚀起抑制作用。然而，所有的液压系统都存在污染问题，污染的程度因系统的功能、组成及使用环境不同而异。因此，进行液压系统油液污染的状况、污染物的来源及其主要成份和污染物的大小及其分布的分析研究，具有如下几方面的意义：

- 1) 了解污染物侵入的途径，以便采取适当的措施控制污染物的入侵；
- 2) 了解液压系统中元件的磨损部位、程度、以便采取相应的措施，提高液压元件的耐污染磨损性能；
- 3) 了解液压系统油液污染的状况和程度，以便确定油液的净化参数及换油依据；
- 4) 为在实验室进行液压元件的污染磨损、污染敏感度及各种过滤器的过滤性能的试验研究提供可比性和推测的依据。

为了达到上述目的，作者对我国有关单位所使用的采煤机液压系统、掘进机液压系统、液压元件型式试验液压系统、民用机床润滑系统、飞机液压系统进行了油样抽查和测定分

析, 并对广泛应用于液压元件污染磨损试验和过滤器性能评价试验的 AC 细试验粉尘在不同筛分条件下的尺寸分布特性进行了定量分析。

一、油样的取样方法

取样的目的是为了使得所取得的样品能真正代表系统中油液的状态。现有的经验和研究表明, 污染度和取样点有关, 在系统中选取合适的取样位置和方法是十分重要的。

作者采用动态取样法。取样前, 对没有开动的机器, 首先应开动机器使其至少运转 15min。同时在可能的条件下, 动态油样应从液压系统循环管路中处于紊流的管路中取得。取样时先打开取样阀, 使油液流出 300~500ml, 然后用取样瓶取样。取样瓶是经过清洗的并符合取样规范的规定, 即取样瓶的污染度要比被测油液的污染度低二级。

二、液压系统油液污染度的测定

作者根据现行标准采用重量法和颗粒计数法两种方法, 对所取的各种油液样品的污染状况进行了测定, 部分结果如表 1-5 所示。

表 1-5 液压系统液压油污染度测定结果

序 号	油品类型标号	油液使用 时 间	污染等级	取 样 地 点
1	60" 抗磨液压油	新油	NAS10 级	徐州矿务局地面储存
2	60" 抗磨液压油	一周	NAS13 级	辽源煤矿机械厂泵试验液压系统
3	60" 抗磨液压油	一周	NAS18 级	大同矿务局井下采煤机液压系统
4	60" 抗磨液压油	一个月	NAS20 级	开滦矿务局井下掘进机液压系统
5	60" 抗磨液压油	二个月	NAS19 级	淮南矿务局井下采煤机液压系统
6	10" 抗磨液压油	一周	NAS8 级	北京空军飞机场飞机液压系统
7	30" 抗磨液压油	一个月	NAS14 级	北京内燃机总厂机床润滑系统
8	30" 抗磨液压油	二个月	NAS13 级	北京广播器材厂铣床润滑系统

三、液压系统固体污染物的大小及其分布的测定与分析

为了了解不同时间, 不同设备液压系统中固体污染物的大小和分布, 作者对几种典型状况采用自动颗粒计数法进行了测定, 得到了如表 1-6~表 1-12 所示的结果。

表 1-6 采煤机液压系统中新油工作 5h 后的测定结果

(阳泉矿)

颗粒大小 (μm)	颗粒数目 (100ml) 油液	颗粒数目与 总数目的百分比 (%)	累积百分比 (%)
5~10	12×10^6	67.48	67.48
10~20	5×10^6	28.12	95.60
20~30	632×10^3	3.55	99.15
30~40	113×10^3	0.64	99.79
40~50	24×10^3	0.13	99.92
50~60	10×10^3	0.06	99.98
60~70	3.4×10^3	0.02	100
70~80	0	0	100
80~90	0	0	100
90~100	0	0	100
100~150	0	0	100
>150	0	0	100

表 1-7 采煤机液压系统中新油工作 1 周后的测定结果

(大同矿)

颗粒大小 (μm)	颗粒数目 (100ml) 油液	颗粒数目与 总数目的百分比 (%)	累积百分比 (%)
5~10	5×10^6	54.17	54.17
10~20	2.9×10^6	31.42	85.59
20~30	867×10^3	9.39	94.98
30~40	332×10^3	3.60	98.58
40~50	65×10^3	0.70	99.28
50~60	30×10^3	0.33	99.61
60~70	24×10^3	0.26	99.87
70~80	12×10^3	0.13	100
80~90	0	0	100
90~100	0	0	100
100~150	0	0	100
>150	0	0	100

表 1-8 采煤机液压系统中新油工作 1 个月后的测定结果

(开滦矿)

颗粒大小 (μm)	颗粒数目 (100ml) 油液	颗粒数目与 总数目的百分比 (%)	累积百分比 (%)
5~10	0.9×10^6	39.13	39.13
10~20	988×10^3	42.95	82.08
20~30	230×10^3	10.00	92.08
30~40	94×10^3	4.09	96.17
40~50	28×10^3	1.22	97.39
50~60	30×10^3	1.30	98.69
60~70	12×10^3	0.52	99.21
70~80	12×10^3	0.52	99.73
80~90	3×10^3	0.14	99.87
90~100	2.9×10^3	0.13	100
100~150	0	0	100
>150	0	0	100

表 1-9 采煤机液压系统中新油工作 2 个月后的测定结果

(开滦矿)

颗粒大小 (μm)	颗粒数目 (100ml) 油液	颗粒数目与 总数目的百分比 (%)	累积百分比 (%)
5~10	1.7×10^6	36.90	36.90
10~20	2×10^6	43.41	80.31
20~30	565×10^3	12.26	92.57
30~40	83×10^3	1.80	94.37
40~50	90×10^3	1.95	96.32
50~60	54×10^3	1.17	97.49
60~70	54×10^3	1.17	98.06
70~80	10×10^3	0.22	98.88
80~90	32×10^3	0.39	99.57
90~100	16×10^3	0.35	99.92
100~150	0	0	99.92
>150	3×10^3	0.08	100

表 1-10 掘进机液压系统中新油工作 2 个月的测定结果
(徐州矿)

颗粒大小 (μm)	颗粒数目 (100ml) 油液	颗粒数目与 总数目的百分比 (%)	累积百分比 (%)
5~10	20×10^6	21.74	21.74
10~20	29×10^6	31.52	53.26
20~30	25×10^6	27.17	80.43
30~40	11.5×10^6	12.50	92.93
40~50	3.8×10^6	4.13	97.06
50~60	1.6×10^6	1.74	98.80
60~70	610×10^3	0.66	99.46
70~80	260×10^3	0.28	99.74
80~90	100×10^3	0.11	99.85
90~100	58×10^3	0.06	99.91
100~150	14×10^3	0.06	99.97
>150	58×10^3	0.03	100

表 1-11 机床润滑系统新油工作 1 个月的测定结果
(北京广播器材厂)

颗粒大小 (μm)	颗粒数目 (100ml) 油液	颗粒数目与 总数目的百分比 (%)	累积百分比 (%)
5~15	396200	87.79	87.79
15~25	47800	10.59	98.38
25~30	6700	1.48	99.86
50~100	536	0.14	100

表 1-12 机床润滑系统新油工作 1 个月的测定结果
(北京内燃机总厂)

颗粒大小 (μm)	颗粒数目 (100ml) 油液	颗粒数目与 总数目的百分比 (%)	累积百分比 (%)
5~15	1004800	99.52	99.52
15~25	3840	0.38	99.90
25~30	800	0.08	99.98
50~100	160	0.02	100

四、结论

在上述测定结果的基础上,经统计分析我们得到如下结论:

- 1) 实际液压系统油液中固体污染物大小服从威布尔分布;
- 2) 机床润滑系统中的小颗粒数目 (小于 $15\mu\text{m}$) 占整体数目的 90% 甚至更多;
- 3) 油液的使用时间从 1 个月增到 2 个月时, 尽管 2 个月时颗粒的总数比 1 个月时颗粒的总数增加 1 倍, 但两种情况下颗粒的分布却是基本相同的;
- 4) 新油中所含的小颗粒 (小于 $10\mu\text{m}$) 的数量较多; 随着使用时间的增长, 中小颗粒 ($10 \sim 40\mu\text{m}$) 的数量有明显的增加, 大颗粒 (大于 $40\mu\text{m}$) 的数量也稍有增加;

5) 实际液压系统中, $40\mu\text{m}$ 以下的颗粒数占总体颗粒数的 94~98%, 这和本章第四节测得的 AC 细粉尘尺寸的分布 (AC 细试验粉尘中, $40\mu\text{m}$ 以下的颗粒数占总体颗粒数的 97~98%) 基本相同;

6) 上述分析的结果为实验室的实验研究与实际工况的模拟和对比提供依据, 也为液压泵摩擦副的设计和液压系统过滤精度的选择提供依据。

第三节 液压系统油液污染控制数学物理模型

由前面分析可知, 我国液压设备油液污染的状况是较严重的, 超过了一般制造厂家关于液压元件允许污染度的条件。这一方面说明我国液压设备由于工作环境恶劣、负荷繁重, 对液压系统造成严重污染; 另一方面说明现有液压设备的过滤系统还不够完美, 不能及时地把系统内存在的污染物清除掉。因此, 欲提高液压设备的工作可靠性、减少故障率、延长元件的使用寿命、降低维修费用、节约能量、提高劳动生产率, 须采用系统工程的方法, 从液压系统的内部和外部有效地防止和控制油液的污染。

为了有效地防止液压系统被污染, 特别是为了净化被污染的油液, 对过滤器的过滤精度及过滤器在系统中的安装位置提出了要求。一般说来, 有 4 种基本过滤系统: 吸油管路过滤系统、压油管路过滤系统、回油管路过滤系统及旁通管路过滤系统, 如图 1-1 所示。现就 4 种基本过滤系统的油液污染与控制加以分析, 从而了解液压系统工作过程中油液污染的动态变化规律, 为合理选择过滤器的过滤精度、确定过滤器在系统中的安装位置、有效地控制油液的污染度提供理论依据。

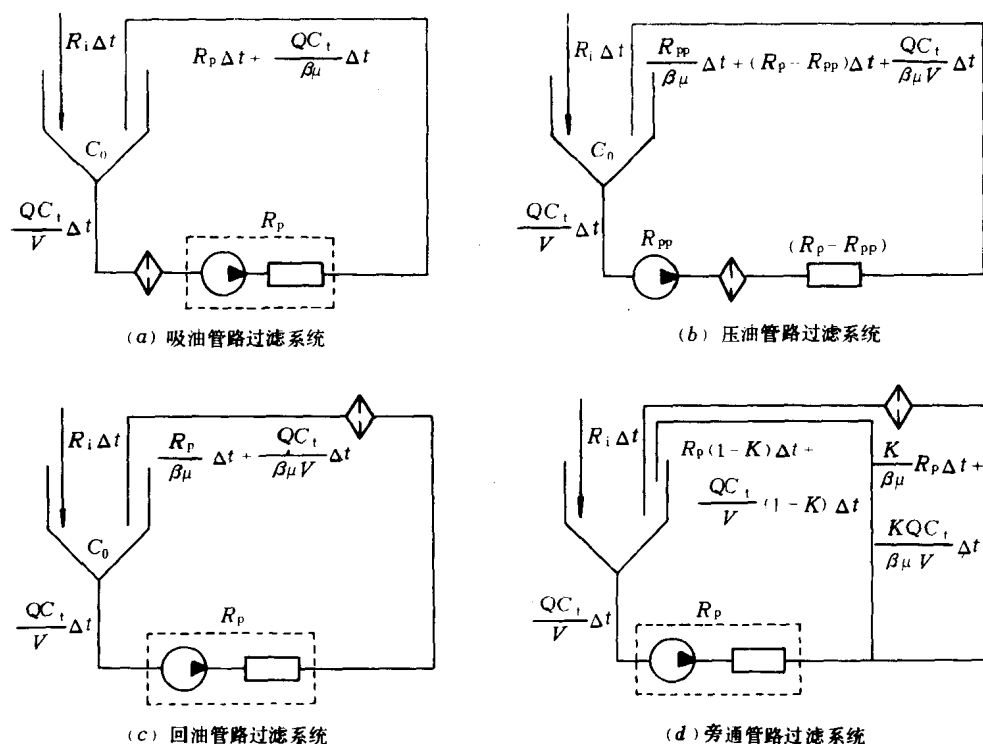


图 1-1 4 种基本过滤系统污染控制模型

设: C_0 ——油箱油液中大于某一尺寸 μ 的初始污染颗粒浓度 (颗粒数/ml);
 C_t ——油箱油液中大于某一尺寸 μ 的瞬时污染颗粒浓度 (颗粒数/ml);
 β_μ ——过滤器对大于某一尺寸 μ 的颗粒的过滤比;
 R_i ——外界大于某一尺寸 μ 的污染物的侵入率 (颗粒数/ml/min);
 R_p ——元件在工作过程中磨屑的产生率 (颗粒数/ml/min);
 Q ——液压泵的流量 (ml/min);
 V ——油箱油液的体积 (ml);
 K ——通过过滤器的流量与泵的流量之比;
 Δt ——时间增量 (min);
 t ——时间 (min);
 α —— $1-1/\beta_\mu$ 。

一、吸油管路过滤系统污染控制数学物理模型

在任何 Δt 时间内, 液压系统油液的污染度是变化的:

$$C_t = C_0 + R_i \Delta t + R_p \Delta t + C_i \frac{Q}{V} \Delta t - C_t \frac{Q}{V} \Delta t \quad (1-1)$$

即:

$$\frac{C_t - C_0}{\Delta t} = R_i + R_p - \left(1 - \frac{1}{\beta_\mu}\right) \frac{C_t Q}{V}$$

$$\frac{\Delta C_t}{\Delta t} = R_i + R_p - \left(1 - \frac{1}{\beta_\mu}\right) \frac{Q}{V} C_t$$

当 ΔC_t 及 Δt 趋向无穷小时, 上式可变成微分方程:

$$\frac{dC_t}{dt} + \left(1 - \frac{1}{\beta_\mu}\right) \frac{Q}{V} C_t = R_i + R_p \quad (1-2)$$

方程 (1-2) 表达了整个污染与控制过程的关系。从这个方程式可以看出, 影响液压系统瞬时和稳定状态下污染水平 C_t 的因素有 β_μ 、 R_i 、 R_p 、 Q 和 V 。

方程 (1-2) 的数值解可以通过数字计算机求得。为了描述液压系统油液污染与控制的特性, 希望得到解析解, 从而有方程 (1-2) 的通解:

$$C_t = e^{-\int \alpha \frac{Q}{V} dt} \left[\int (R_i + R_p) \cdot e^{\int \alpha \frac{Q}{V} dt} dt + S \right] \quad (1-3)$$

其中 S 为积分常数。

在实际工作中, 可以认为 R_i 为常数, R_p 随时间的变化而变化, 在不同的工作时期呈现出不同的变化规律。现有的试验结果表明, 机械元件的正常磨损过程分为饱和阶段、稳定磨损阶段和急剧磨损阶段, 如图 1-2 所示。

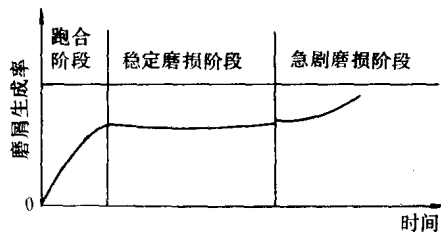


图 1-2 机械典型磨损过程