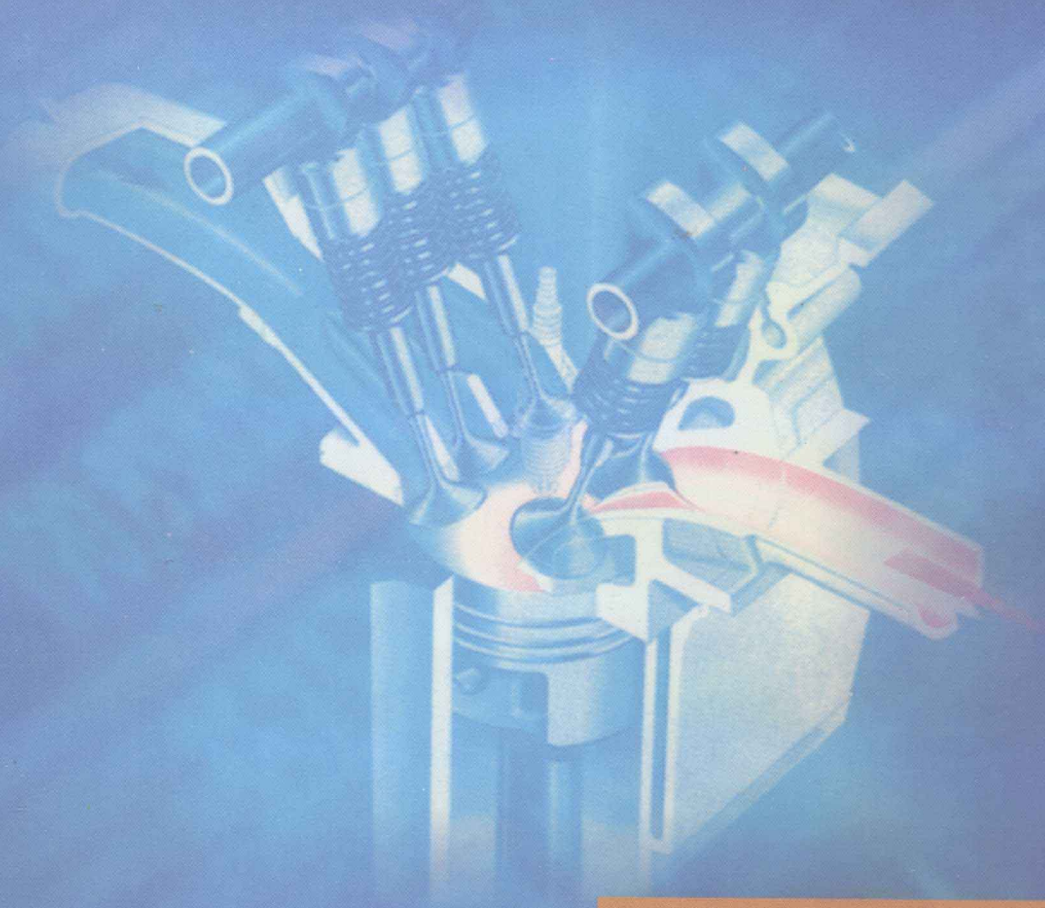


# 液压过滤技术及 抗磨理论

贾瑞清 著



中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书从理论研究、实验分析等方面系统地论述了液压元件的污染磨损、液压系统的污染控制。内容包括:液压油的污染度等级及测定方法,液压元件抗磨设计理论及实验方法,液压元件寿命计算,液压元件抗磨设计理论及实验方法,液压系统的主动预防性维护,液压系统污染控制的措施,纤维过滤材料的研究。

本书可供从事液压和润滑技术工作的工程技术人员和管理干部参考,亦可作为大专院校液压专业和有关机械专业的教学参考书及成人教育和技术培训教材。

责任编辑 刘永清 陈贵仁

### 图书在版编目(CIP)数据

液压过滤技术及抗磨理论/贾瑞清著. —徐州:中国矿业大学出版社,2000.7

ISBN 7-81040-686-8

I. 液… II. 贾… III. ①液压系统-过滤 ②液压元件-抗磨性-设计 IV. TH137.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 33134 号

中国矿业大学出版社出版发行

(江苏徐州 邮政编码 221008)

出版人 解京选

北京科技印刷厂印刷 新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 10 字数 238 千字

2000 年 7 月第 1 版 2000 年 7 月第 1 次印刷

印数 1~2000 册 定价 18.00 元

(如有印装质量问题,本社负责调换)

## 前 言

现代工业的迅速发展以及工业对液压设备的高性能、高精度、高可靠性及长寿命的要求,使得液压设备中油液的过滤及元件抗磨技术的应用成为现代企业关注的重点之一,从而促进了液压元件抗磨设计及油液高精过滤技术的应用及研究。

液压设备的工作性能、可靠性及其寿命主要取决于两个因素:一是元件结构设计的工艺质量;二是系统内油液的清洁度,尤其后者日益受到人们的重视。对液压设备中工作油液清洁度加以有效的控制,是现代工业获得最佳经济效果所必须采取的技术措施。另一方面,在液压机械中,其工作介质不可避免地会受到各种各样的污染,如固体颗粒、水、气体、化学生成物等。其中,固体颗粒是引起元件磨损的主要污染物。所以,从设计角度提高元件的抗磨性能也是有效实施污染控制的重要方向。

目前,各工业企业对液压设备、系统的维护工作都提到了重要的位置,其主要内容就是如何做好液压设备、系统的主动预防性维护工作,以提高设备的使用寿命。我国近年来在各个工业部门都展开了有关污染控制技术的研究、推广和应用,并举办了各种形式的液压污染控制讲习班、研讨会,取得了一定的成效。但许多人对主动预防性维护的概念、意义和作用理解得不是很深,而相关的书籍也较缺乏。

本书是作者在近年来进行的有关科学研究成果及技术应用实践的基础上总结而成的,其中许多内容在理论及实际应用方面都有一定突破。书中提出了液压元件抗磨设计理论及实验研究方法。该理论可在液压元件摩擦副的设计和计算、润滑剂润滑性及抗磨性、材料抗磨性的评定和研究以及磨粒磨损的研究等方面获得实际应用。以该理论及研究方法为基础研制的MMU-5型摩擦磨损试验机,拟定了相关的试验标准。该试验机的研制成功,对提高液压系统、元件可靠性、延长设备寿命有着不可估量的价值。本书还对纤维过滤材料的结构及过滤性能作了详细的分析,提出了一种较好的纤维滤材湿造方法。

在本书的编写过程中,得到了夏志新教授的热情指导及吴雪平高级工程师、王炉平、郭建曾、仪馨等同志的大力协助。在此,一并表示诚挚的感谢。

由于作者水平有限,难免有错误和不足之处,恳请读者批评指正。

编 者  
1999年10月

# 目 录

<b>1 液压系统污染分析基础</b> .....	( 1 )
1.1 液压系统油液污染物的种类与特性 .....	( 1 )
1.2 油液污染度等级 .....	( 8 )
1.3 油液污染度的测定 .....	( 15 )
1.4 样液的抽取和准备 .....	( 17 )
<b>2 液压元件抗磨设计理论</b> .....	( 20 )
2.1 典型液压元件运动副磨损失效分析 .....	( 20 )
2.2 液压元件在润滑条件下运动副磨粒磨损物理模型 .....	( 22 )
2.3 磨粒磨损分析 .....	( 23 )
2.4 磨粒磨损系数和磨粒磨损强度 .....	( 28 )
2.5 磨粒磨损实验研究理论 .....	( 29 )
2.6 磨粒磨损实验研究系统结构及工程计算式 .....	( 32 )
2.7 液压元件抗磨设计理论的应用前景 .....	( 33 )
<b>3 MMU-5 型摩擦磨损试验机</b> .....	( 34 )
3.1 MMU-5 型试验机的技术指标 .....	( 34 )
3.2 MMU-5 型试验机的原理与结构 .....	( 35 )
3.3 摩擦副控制状态理论分析 .....	( 38 )
3.4 摩擦副间隙控制特性曲线的标定 .....	( 40 )
3.5 MMU-5 型试验机的试验重复性检测 .....	( 43 )
3.6 间隙调试方法 .....	( 44 )
3.7 试验机技术参数精度分析 .....	( 45 )
<b>4 液压元件抗磨设计理论的实验研究</b> .....	( 46 )
4.1 磨粒磨损的系统性质 .....	( 46 )
4.2 试样表面粗糙度在磨粒磨损过程中的变化特性 .....	( 46 )
4.3 磨粒分布在磨损过程中的变化特性 .....	( 48 )
4.4 试验条件对磨粒磨损的影响特性 .....	( 49 )
4.5 磨粒磨损表面形貌特性分析 .....	( 50 )
4.6 磨粒磨损系数 $f_m$ 的实验研究 .....	( 53 )
4.7 磨粒柔性系数 $\lambda_s$ 的实验研究 .....	( 59 )
4.8 润滑剂润滑性系数 $\lambda_l$ 的实验研究 .....	( 60 )
4.9 材料系数 $\lambda_m$ 和相关系数 $\lambda$ 的实验研究 .....	( 61 )
4.10 安全系数 $n$ 的分析研究 .....	( 62 )
4.11 磨粒磨损参数实验结果的分析 .....	( 63 )
<b>5 液压元件抗磨设计理论的应用研究</b> .....	( 64 )
5.1 齿轮泵磨粒磨损设计计算 .....	( 65 )

5.2	柱塞泵磨粒磨损设计计算 .....	(71)
5.3	静压支撑面间的磨损 .....	(77)
5.4	叶片泵磨粒磨损设计计算 .....	(79)
5.5	往复式塞式油膜运动副间的磨粒磨损 .....	(84)
5.6	旋转圆盘型油膜运动副间的磨粒磨损 .....	(87)
5.7	润滑剂抗磨性能的评定及研究 .....	(90)
5.8	磨粒磨损特性的评定及研究 .....	(90)
5.9	材料磨损特性的评定及研究 .....	(91)
<b>6</b>	<b>液压油过滤技术分析基础 .....</b>	<b>(93)</b>
6.1	液压系统污染控制的意义 .....	(93)
6.2	系统目标清洁度的确定 .....	(94)
6.3	过滤原理与过滤介质 .....	(97)
6.4	过滤器的主要性能参数 .....	(99)
6.5	过滤器性能试验 .....	(103)
<b>7</b>	<b>液压系统过滤状态与维护分析 .....</b>	<b>(115)</b>
7.1	过滤系统污染控制平衡方程 .....	(115)
7.2	过滤系统的分析及应用 .....	(117)
7.3	液压系统的主动预防性维护 .....	(121)
<b>8</b>	<b>纤维过滤机理和纤维滤材阻截概率的研究 .....</b>	<b>(124)</b>
8.1	过滤的过程及其分类 .....	(124)
8.2	过滤机理 .....	(125)
8.3	非稳态过滤 .....	(129)
8.4	颗粒沉积对纤维介质过滤性能的影响 .....	(129)
8.5	过滤效率模型的建立 .....	(130)
8.6	阻截概率的计算 .....	(131)
8.7	过滤效率的计算 .....	(136)
8.8	纤维材料的结构与过滤性能的关系 .....	(137)
<b>9</b>	<b>纤维过滤材料特性的实验研究 .....</b>	<b>(139)</b>
9.1	纤维过滤材料的分类 .....	(139)
9.2	纤维滤材的性能参数及一般测试方法 .....	(140)
9.3	实验室纤维滤材的湿造法研制 .....	(141)
	参考文献 .....	(150)

# 1 液压系统污染分析基础

## 1.1 液压系统油液污染物的种类与特性

液压系统是以油液为工作介质,通过液压泵、阀等液压元件的控制,把液压能转换为机械能,最终完成执行机构的动作。而油液在传递过程中,不可避免地会受到各种各样的污染,如固体颗粒、水分、气体等,其中固体颗粒对设备的危害最大。这些污染物的存在严重影响液压系统的工作可靠性,因此,有关液压污染控制技术的研究及应用已成为当今工业界最重要的课题之一。

### 1.1.1 油液污染物的种类

液压系统油液污染物的存在主要有固态、液态和气态三种类型。固体污染物通常以颗粒状存在于系统油液中;液态污染物主要是外界侵入系统中的水;气态污染物主要是油中游离的空气。

油液污染物的来源主要有系统及元件在加工、包装、运输等过程中残留的金属切屑、尘埃及清洗溶剂,系统在运转中液压元件磨损产生的磨屑,油液氧化和分解产生的颗粒与胶状物质等。另外,系统中在工作中从外界侵入的污染物,如通过液压缸活塞杆密封和油箱呼吸孔侵入系统的污染物以及注油和维修过程中带入的污染物等。

总之,液压和润滑系统中的污染物质主要有固体颗粒、水、空气、化学物质和微生物等。其中,化学污染物有溶剂、表面活性剂、油液提炼过程中残留的化学杂质以及油液分解或添加剂作用产生的有害化学物质等;微生物一般常见于水基工作液中,因为水是微生物生存和繁殖的必要条件。

在以上各种类型污染物中,固体颗粒物是液压和润滑系统中最普遍、危害作用最大的污染物。据资料统计,由于固体颗粒污染物而引起的液压系统故障占总污染故障的60%~70%。固体颗粒物不仅加速液压元件的磨损,而且堵塞元件的间隙和孔口,使控制元件动作失灵而引起系统故障。因此,采取有效措施去除油液中的固体污染物,是液压和润滑系统污染控制的一个重要方面。

### 1.1.2 固体颗粒污染物的特性

固体颗粒污染物特性主要有密度、硬度、形状、尺寸及尺寸分布等。这些特性与元件的污染颗粒磨损的工作可靠性有密切的关系。特别是颗粒的形状、尺寸及尺寸分布是与油液

污染控制有关的重要因素。

### 1.1.2.1 颗粒的形状和尺寸

颗粒的形状是多种多样的,如多面体状、球状、片状、针状和纤维状等,一般都是不规则的。为了定量地描述固体颗粒的大小,需要用具有一定代表特征的尺寸来表示。对于形状规则的颗粒,表示颗粒大小的尺寸是确定的,如球形体的直径、正方体的边长等。但对于形状不规则的颗粒,可以用不同的方面代表其特性的尺寸来表示,而这些尺寸与采用的测量方法有着密切的联系。当用显微镜测量颗粒的大小时,一般以颗粒的最大长度作为颗粒的尺寸。当用光电装置测量颗粒尺寸时,常以与投影面积相等的圆的直径表示颗粒的尺寸,这一尺寸称为导出直径。

导出直径是通过测定某些与颗粒大小有关的特性推导而来的。例如,让一个形状不规则的颗粒在某液体中沉降,如果它的最终速度和一个密度相等的球体在相同条件下的最终速度相同,则该颗粒的大小就相当于球体的直径。表 1.1 列出了一些常用的导出直径及其定义。

表 1.1 颗粒尺寸及定义

符 号	名 称	定 义
$d_v$	体积直径	与颗粒体积相等的球体的直径
$d_s$	表面直径	与颗粒具有相等表面积的球体的直径
$d_a$	投影直径	与颗粒某一投影面积相等的圆的直径
$d_c$	周长直径	与颗粒某一投影外形周长相等的圆的直径
$d_f$	自由降落直径	在相同流体中,具有与颗粒相同的密度和相等的自由降落速度的球体的直径
$d_{st}$	斯托克斯直径	层流区颗粒的自由降落直径
$d_d$	阻力直径	在黏度相同的流体中,在相同的速度与颗粒具有相同的运动阻力的球体直径
$d_A$	筛分直径	颗粒可以通过的最小正方形筛孔的边长
$d_M$	马丁直径	将处于任意方位的颗粒分成投影面积相等的两部分的水平分割线的长度
$d_F$	弗雷特直径	与颗粒投影外形相切的一对平行线之间的距离的平均值

当需要用单一尺寸来表示颗粒的大小时,可根据测量的方法和所需表示的特性选用表 1.1 中各种直径中的一个,颗粒形状与圆球体相差愈大,这些直径之间的差别也愈大。

为了便于对不规则形状的颗粒进行比较,可采用形状因素的概念。形状因素可以有不同的表示方法,一种常用方法是用一个圆球体代表不规则形状的颗粒。形状因素定义为:和颗粒名义直径相同的球体的体积与颗粒实际体积的比值。形状因素可用下式表示:

$$\alpha_v = \frac{\pi d_N^3}{6 V_P} \quad (1.1)$$

式中  $d_N$ ——颗粒的名义直径;

$V_P$ ——颗粒的实际体积。

例如,作为标准试验粉尘的 AC 细粉尘,形状为长多面体。如果用椭圆球体表示, $a$  和  $b$  分别为其长轴和短轴,则其形状因素为

$$\alpha_v = \frac{\frac{\pi}{6} a^3}{\frac{\pi}{6} ab^2} = \left(\frac{a}{b}\right)^2 \quad (1.2)$$

经测定,AC 细试验粉尘的形状因素为 2.1~2.4。

另一种形状因素的表示方法,采用颗粒长度  $L$  和宽度  $W$  的比值  $L/W$ 。常见颗粒的形状因素  $L/W$  及导出直径见表 1.2。

表 1.2 常见颗粒的形状因素

颗粒种类	平均宽度 $W$	平均长度 $L$	面积与 $L \times W$ 相当的圆直径
石灰石	1	1.95	1.57
AC 粉尘	1	1.49	1.38
氧化铝	1	1.48	1.37
铁粉	1	1.64	1.44
晶体	1	1.65	1.45
金钢砂	1	1.65	1.45

### 1.1.2.2 颗粒尺寸分布

常见的固体颗粒物其尺寸不可能都是单一的,一般是由不同尺寸的颗粒组成的颗粒群。颗粒尺寸分布是指颗粒群中各种尺寸颗粒的数量,在分析研究颗粒尺寸分布时,通常采用频率分布函数。分布函数可用作矩形图的方法求得。选择合适的尺寸区间,测定某一定量颗粒物各尺寸段的颗粒数(例如,测定一定容积油液中各尺寸段的颗粒数),由此可以得出图 1.1 所示的颗粒尺寸分布矩形图。图中横坐标为颗粒尺寸,纵坐标为各尺寸段颗粒数的出现频率。当尺寸区间取得足够小时,矩形图就逼近函数曲线。曲线以下的总面积为 100%,即全部尺寸范围内颗粒出现的频率。曲线以下对应某一尺寸区间内的面积即该尺寸区间平均尺寸的颗粒的出现频率。常见的颗粒尺寸分布规律有正态分布、对数正态分布和罗辛拉姆勒(Rosin-Rammler)分布。

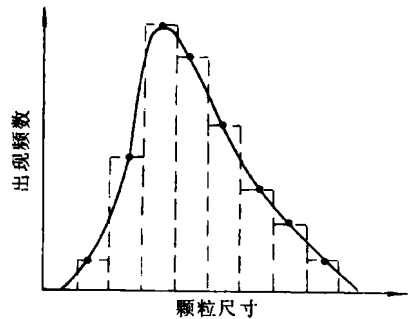


图 1.1 颗粒尺寸分布矩形图与分布函数曲线

正态分布又称高斯分布,其分布对称于算术平均值。符合正态分布的颗粒物其尺寸可用两个参数来表示,即平均颗粒大小和标准偏差,属于这种分布规律的颗粒物,尺寸在平均颗粒大小正、负一个标准偏差范围内的颗粒数占总颗粒数的 68%,尺寸在平均颗粒大小正、负两个标准偏差范围内的颗粒数占总颗粒数的 95%。

自然界中的粉尘或实际液压和润滑系统中的颗粒污染物,其颗粒尺寸很少呈正态分布。特别是在液压、润滑系统中,由于小颗粒生成率高、数量多,因而分布曲线向小颗粒尺寸方向偏移。图 1.2 是用普通坐标表示的正态分布与实际系统中的颗粒尺寸分布。

为了分析方便,可采用对数坐标,将颗粒尺寸分布画在对数坐标纸上。如果颗粒尺寸分



布是对称的,则颗粒物属于对数正态分布规律。图 1.3 所示为两种呈对数正态分布规律的颗粒物,它们具有相同的中心尺寸,但尺寸分布范围不同。

将图 1.3 所示的分布函数积分绘在对数概率坐标纸上,可得到累计对数正态分布,如图 1.4 所示。由图 1.4 可以看出,该尺寸分布呈一直线。这种线性关系对颗粒尺寸分析十分方便,可直接读出对应出现概率 50% 的中值尺寸以及几何标准偏差。

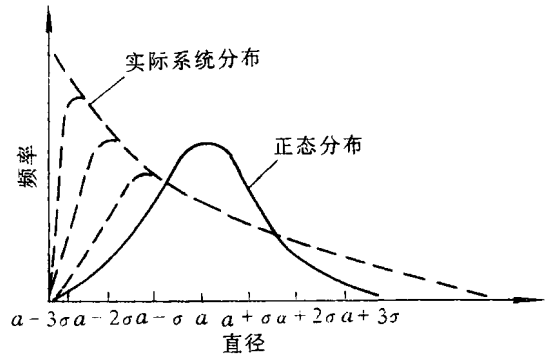


图 1.2 正态分布与实际系统中的颗粒尺寸分布图

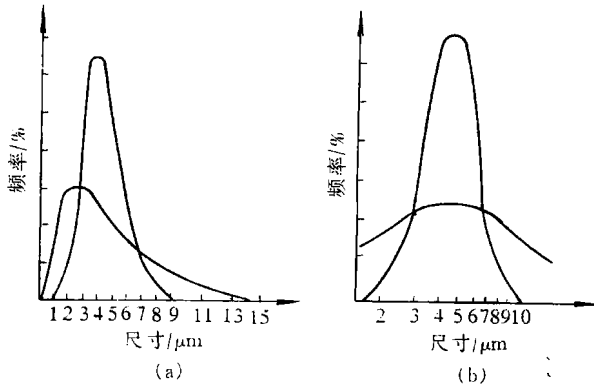


图 1.3 对数正态分布图  
(a) 普通坐标; (b) 对数坐标

坐标绘制的颗粒尺寸分布,它广泛应用在液压污染控制中描述颗粒污染物的尺寸分布。图 1.5 中 1 和 2 为两个油样中颗粒污染物的尺寸分布,它们具有相同的污染物重量浓度,但颗粒尺寸分布不同,油样 1 中小颗粒数量多,而油样 2 中颗粒尺寸分布宽,大颗粒较多。

修正的对数正态颗粒分布可用如下数学模型表示:

$$N_D = N_t e^{-B \ln^2 D} \quad (1.3)$$

上式可转换为常用对数的形式:

$$\lg N_D = \lg N_t - 2.303 B \lg^2 D \quad (1.4)$$

式中  $D$  ——颗粒直径;

$N_D$  ——大于尺寸  $D$  的颗粒总数;

$N_t$  ——大于  $1 \mu\text{m}$  颗粒总数;

研究表明,实际液压和润滑系统中颗粒污染物的尺寸分布比较接近对数正态分布。目前在液压污染控制中普遍采用修正的对数正态分布。这种分布具体表示为:将颗粒计数得到的大于某一尺寸的累计颗粒数绘在  $\lg - \lg^2$  坐标纸上,横坐标为颗粒尺寸的对数平方 ( $\lg^2 D$ ),纵坐标为累计颗粒数的对数 ( $\lg N$ )。采用这种表示方法的主要优点是:可以直接读出不同尺寸范围的颗粒数,而尺寸分布基本上符合线性规律。图 1.5 是根据  $\lg - \lg^2$

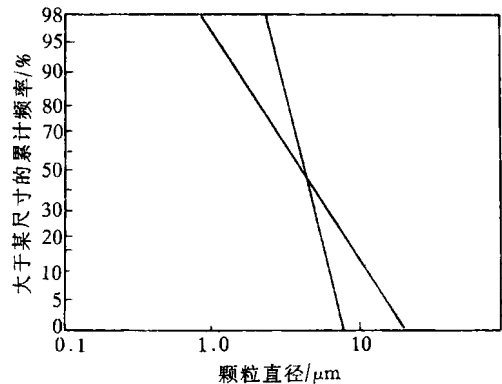


图 1.4 累计对数正态分布图

B ——lg - lg<sup>2</sup> 坐标上颗粒尺寸分布直线的斜率函数。

利用颗粒分布数学模型式(1.4)可以求得颗粒浓度与重量浓度之间的转换关系。此外,式(1.4)也可用于液压元件污染敏感度的定量分析。

### 1.1.3 污染试验粉尘

在进行有关液压污染控制的各种试验时,需要有一种能够代表实际污染物的标准试验粉尘。例如,在测定滤油器的过滤性能以及评定液压元件的污染敏感度时,都需要在试验系统中加入标准试验粉尘。标准试验粉尘具有稳定的化学成分和物理性能,以及固定的颗粒尺寸分布。

目前在液压污染控制中使用最普遍的是空气滤清器试验粉尘(AC试验粉尘)。除此以外,羰基铁粉、氧化铝粉、玻璃球、乳胶球、三氧化二铁粉以及由各种材料配制的颗粒物,也可用作试验粉尘。

空气滤清器试验粉尘是从美国阿里桑那州的自然粉尘中分筛配制而成的,由美国通用汽车公司的AC火花塞分部生产和销售。这种粉尘根据颗粒尺寸分布不同有两种规格,即空气滤清器细试验粉尘(ACFTD)和空气滤清器粗试验粉尘(ACCTD)。两种粉尘各种尺寸范围颗粒的重量百分比见表1.3。

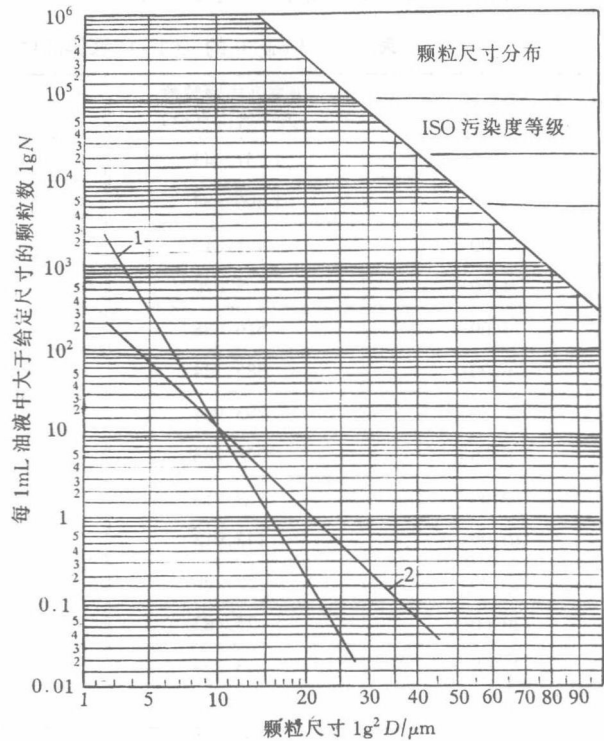


图 1.5 lg - lg<sup>2</sup> 颗粒尺寸分布图

表 1.3 AC 试验粉尘不同尺寸范围的重量百分比

颗粒尺寸/μm	ACFTD	ACCTD
0~5	39 ± 2	12 ± 2
5~10	18 ± 3	12 ± 3
10~20	16 ± 3	14 ± 3
20~40	18 ± 3	23 ± 3
40~80	9 ± 3	30 ± 3
80~200	—	9 ± 3

AC 试验粉尘的主要成分为 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。AC 细试验粉尘(ACFTD)的化学成分如下:

SiO <sub>2</sub>	69.2%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.35%

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.6%
MgO	1.64%
CaO	0.05%
燃烧挥发物	2.72%

作为标准试验粉尘,AC 粉尘的颗粒尺寸分布是比较固定的。经过精确测定,在 ACFID 含量为 1 mg/L 的污染油液中,每毫升中的颗粒数见表 1.4。

表 1.4 1 mg/L 的 ACFTD 悬浮液中的颗粒数(按 ISO 4402)

直径/ $\mu\text{m}$	每毫升中颗粒数 (大于给定直径)	直径/ $\mu\text{m}$	每毫升中颗粒数 (大于给定直径)
1.00	1 751.943	35.00	4.526
2.00	1 396.884	40.00	2.869
3.00	991.813	45.00	1.892
4.00	708.078	50.00	1.290
5.00	516.688	55.00	0.903 5
6.00	385.724	60.00	0.648 1
7.00	293.984	65.00	0.474 4
8.00	228.183	70.00	0.353 5
9.00	179.953	75.00	0.267 5
10.00	143.913	80.00	0.205 3
15.00	55.230	85.00	0.159 5
20.00	25.483	90.00	0.125 4
25.00	13.254	95.00	0.099 5
30.00	7.504	100.00	0.079 8

将每升油液中含有 1 mg 和 10 mg AC 细试验粉尘的悬浮液的颗粒尺寸分布绘在  $\lg - \lg^2$  坐标纸上,可得到两条互相平行的斜线,它们的斜率反映了 AC 细试验粉尘某一确定的颗粒尺寸分布规律。颗粒浓度愈高,斜线的位置愈高,但斜率保持不变,如图 1.6 所示。

#### 1.1.4 空气

液压和润滑系统油液中含有一定量的空气,它们来源于周围的大气环境。油液中的空气有两种存在形式:溶解于油液中或以微小气泡状态悬浮在油液中。

各种油液具有不同程度的吸气能力。在一定的压力和温度条件下,各种油液可以溶解一定量的空气,即溶解空气的饱和量。图 1.7 是空气在各种油液中的溶解度。由图可以看出,在大气压下,空气在矿物油中的溶解度为 10%(体积),即 10 L 油液在大气环境下经过数天可溶解 1 L 空气。

空气在油液中的溶解度与压力成正比,与温度成反比。当压力减小或油温升高时,溶解在油液中的部分空气就会分离出来形成悬浮的气泡。

混入油液中的空气对液压系统产生的危害主要有以下几方面:

(1) 降低油液的容积弹性模量和刚性,使系统响应特性变差。若油液中混有 1% 的空

气,则油液的容积弹性模量降低到纯净液压油的 35.6%。

(2) 由于油液可压缩性增大,在压缩油液的过程中消耗能量,并且使油液温度升高。

(3) 产生气蚀,加剧元件材料表面的剥蚀和损坏,并且能引起系统振动与噪声。

(4) 空气中的氧促使油液氧化变质,油液润滑性能下降,酸值和沉淀物增加。

(5) 油液中气泡破坏运动副之间的油膜,加剧元件的磨损。

### 1.1.5 水

液压和润滑系统油液中的水主要来自大气中的潮湿空气和淋水等工作环境。例如,从油箱呼吸孔吸入的潮气冷凝成水珠滴入油液中,或通过液压缸活塞杆密封等部位侵入系统。

由于油和水的亲和作用,几乎所有的矿物油都具有不同程度的吸水性。油液的吸水能力决定于基础油的性质、所加的添加剂以及温度等因素。油液吸水量的最大限度称为饱和度。当油液暴露在潮湿大气中或与水接触时,其吸水量经过数周时间可达饱和。液压油的吸水饱和度一般为 2/万~3/万,润滑油的吸水饱和度为 5/万~6/万。在一定的湿度条件下,油液的温度愈高,其吸水量愈大。

油液中的含水量在饱和度以下时,水以溶解状态存在于油液中。当含水量超过饱和度时,过量的水则以水珠状态悬浮在油液中或以自由状态沉积在油液底部或浮在油液表面。自由状态的水在系统中经过激烈的搅动(如通过液压泵和阀)往往形成乳化状,这样将大大降低油液的润滑性能。油液的黏度愈高,表面张力愈小,则形成的乳化液愈稳定。此外,油液中的氧化物和固体颗粒以及某些添加剂有促使乳化液稳定的作用。为了保证油液的润滑性能,可在油液中加入适量的破乳化剂,使油液中的水分离出来以便于去除。

水对液压和润滑系统的危害作用主要有以下几方面:

(1) 水与油液中的金属硫化物和氯化物(来自某些添加剂和清净剂)作用产生酸类物质,对元件产生腐蚀作用。经验表明,当油液中同时存在固体颗粒污染物和水时,水对元件

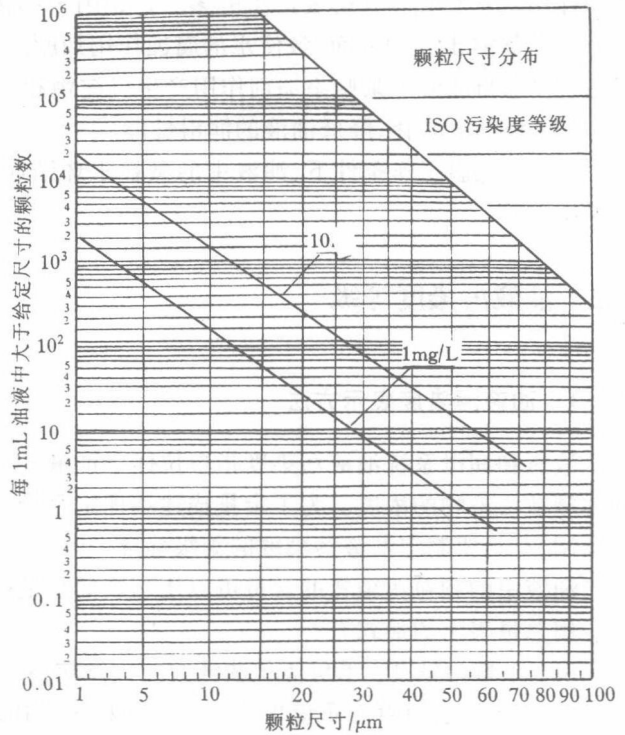


图 1.6 ACFTD 的颗粒尺寸分布图

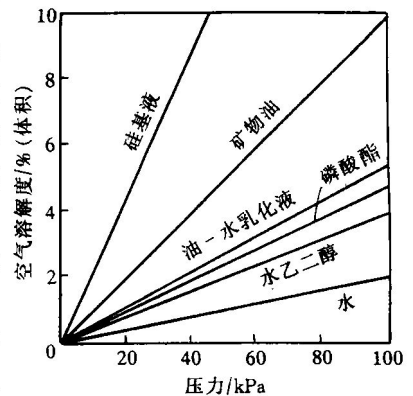


图 1.7 空气在各种液体中的溶解度

腐蚀作用比水单独存在时要严重的多。这是因为固体颗粒磨去了元件的氧化物保护膜,使元件不断暴露出新的表面,致使水的腐蚀作用加剧。

(2) 水与油液中某些添加剂作用产生沉淀物和胶质等有害污染物,加速油液的变质。

(3) 使油液乳化,降低油液的润滑性能。

(4) 在低温工作条件下,油液中的微粒水珠结成冰粒,堵塞控制元件的间隙或小孔,引起系统故障。

## 1.2 油液污染度等级

### 1.2.1 油液污染度表示方法

液压和润滑系统油液污染度指单位体积油液中固体颗粒污染物的含量,即油液中所含固体颗粒污染物的浓度。为了定量描述和评定系统油液的污染程度,实施对系统油液的污染控制,有必要制定油液污染度的等级标准。

油液中的颗粒污染物的含量可以用宏观的总量或微观的颗粒数量表示。

用总量表示的形式有:

(1) 重量污染度:单位体积油液中所含颗粒污染物的重量,单位一般用 mg/L。

(2) 重量比:每百万重量单位油液中颗粒污染物占的份数。

(3) 体积比:每百万体积单位油液中颗粒污染物占的份数。

用颗粒数量表示的形式有:

(1) 区间颗粒污染度:单位体积油液中在某一尺寸区间范围内的颗粒数。例如,每毫升油液内尺寸在  $5\ \mu\text{m}\sim 15\ \mu\text{m}$  之间的颗粒数。

(2) 累计颗粒污染度:单位体积油液中大于某一尺寸的颗粒数。例如,每毫升油液中尺寸大于  $5\ \mu\text{m}$  的颗粒数。

用污染物总量的表示方法比较简单,但不能反映颗粒尺寸分布,而了解这些参数对污染控制是十分必要的。随着颗粒计数技术的发展,目前已广泛采用颗粒污染度的表示方法。

为了实施油液污染控制的需要,世界各主要工业国以至各个工业部门曾经制定了各自的油液污染度等级标准,近年来各国趋向于采用国际标准化组织制定的油液污染度等级标准。下面介绍几种国外和我国采用的油液污染度等级标准。

### 1.2.2 SAE 749D 污染度等级

SAE 749D 污染度等级是美国汽车工程学会在 1963 年提出的,它以颗粒浓度为基础,按照 100 mL 油液中在  $5\ \mu\text{m}\sim 10\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}\sim 25\ \mu\text{m}$ 、 $25\ \mu\text{m}\sim 50\ \mu\text{m}$ 、 $50\ \mu\text{m}\sim 100\ \mu\text{m}$  和  $100\ \mu\text{m}$  以上 5 个尺寸范围内的最大允许颗粒数划分为 7 个污染度等级,见表 1.5。

### 1.2.3 NAS 1638 污染度等级

NAS 1638 污染度等级是由美国航天学会在 1964 年提出的,它也是根据 5 个尺寸范围的颗粒浓度极限划分等级,比 SAE 749D 覆盖的面更广,将污染度等级扩展到 14 个等级,因而适应的范围更宽一些。NAS 1638 污染度等级见表 1.6。从表中可以看出,相邻两个等级

颗粒浓度的比为2,因此,当油液污染度超过表中12级,可用外推法确定其污染度等级。

表 1.5 SAE 749D 污染度等级级

颗粒尺寸 / $\mu\text{m}$	5~10	10~25	25~50	50~100	>100
0	2 700	670	93	16	1
1	4 600	1 340	210	26	3
2	9 700	2 680	350	56	5
3	24 000	5 360	780	110	11
4	32 000	10 700	1 510	225	21
5	87 000	21 400	3 130	430	41
6	128 000	42 000	6 500	1 000	92

注:表中所示为 100 mL 中的颗粒数。

表 1.6 NAS 1638 污染度等级

颗粒尺寸 / $\mu\text{m}$	5~15	15~25	25~50	50~100	>100
00	125	22	4	1	0
0	250	44	8	2	0
1	500	89	16	3	1
2	1 000	178	32	6	1
3	2 000	356	63	11	2
4	4 000	712	126	22	4
5	8 000	1 425	253	45	8
6	16 000	2 850	506	90	16
7	32 000	5 700	1 012	180	32
8	64 000	11 400	2 025	360	64
9	128 000	22 800	4 050	720	128
10	256 000	45 600	8 100	1 440	256
11	512 000	91 200	16 200	2 880	512
12	1 024 000	182 400	32 400	5 760	1 024

注:表中所示为 100 mL 中的颗粒数。

例如,100 mL 样液的颗粒计数结果如下:

颗粒尺寸 / $\mu\text{m}$	颗粒数	NAS 等级
5~15	60 000	8
15~25	10 000	8
25~50	2 000	8
50~100	180	7

以上样液的污染度等级定为 NAS 8 级。

### 1.2.4 ISO 4406 污染度等级

ISO 4406 污染度等级标准采用两个数码代表油液的污染度等级。前面的数码代表 1 mL油液中尺寸大于 5 μm 的颗粒数等级,后面的数码代表 1 mL油液中尺寸大于 15 μm 的颗粒数等级,两个数码之间用一斜线分隔。例如,污染度等级 18/13 表示油液中大于 5 μm 的颗粒数等级的数码为 18,每毫升颗粒数在 1 300~2 500 之间;大于 15 μm 的颗粒数等级的数码为 13,每毫升颗粒数在 40~80 之间。

表 1.7 为 ISO 4406 规定的污染度等级数码和相应的颗粒浓度。根据颗粒浓度的大小共分为 26 个等级数码,颗粒浓度愈大,代表等级的数码愈大。根据油液污染度的测定结果,对照表 1.7,查出相应的大于 5 μm 和大于 15 μm 颗粒数的等级数码,即可确定油液的污染度等级。例如,测得每毫升油液中大于 5 μm 的颗粒数为 10 000,大于 15 μm 的颗粒数为 800,则油液的污染度等级为 20/17。

表 1.7 ISO 4406 污染度等级数码

每毫升颗粒数		等级数码	每毫升颗粒数		等级数码
大于	上限值		大于	上限值	
80 000	160 000	24	10	20	11
40 000	80 000	23	5	10	10
20 000	40 000	22	2.5	5	9
10 000	20 000	21	1.3	2.5	8
5 000	10 000	20	0.64	1.3	7
2 500	5 000	19	0.32	0.64	6
1 300	2 500	18	0.16	0.32	5
640	1 300	17	0.08	0.16	4
320	640	16	0.04	0.08	3
160	320	15	0.02	0.04	2
80	160	14	0.01	0.02	1
40	80	13	0.005	0.01	0
20	40	12	0.002 5	0.005	0.9

ISO 4406 污染度等级也可以用图表来确定,见图 1.8。由大于 5 μm 和大于 15 μm 颗粒浓度的坐标点可以确定相应的等级数码。连接这两点的直线即代表油液的污染度等级及其近似的颗粒尺寸分布。

表 1.8 列举了等级数码从 8 到 20 之间最常用的污染度等级系列。在此范围以外的污染度等级系列可以用表 1.7 或图 1.8 确定。从表中的污染度等级系列可以看出,根据不同的颗粒尺寸分布,大于 5 μm 和大于 15 μm 的等级数码之间的级差一般为 3~6,如系列 20/17,20/16,20/15 和20/14,这反应了不同的颗粒分布。由上可知,ISO 4406 污染度等级标准

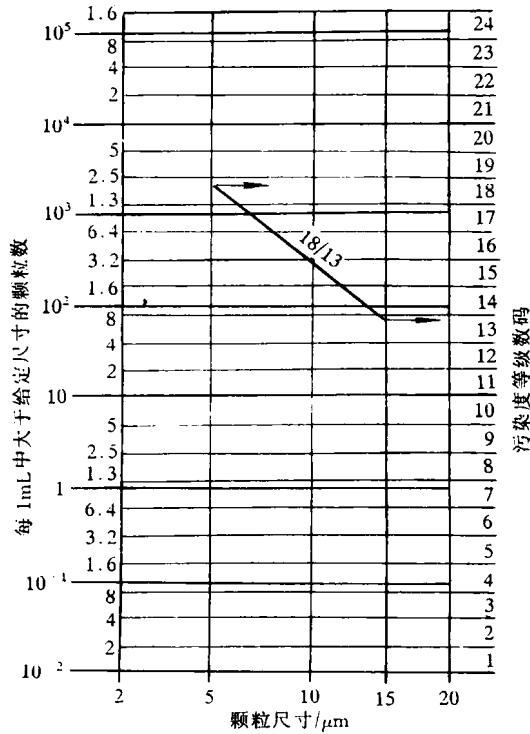


图 1.8 ISO 4406 污染度等级图表

采用颗粒浓度为 2 的等比级差,这样可以明显地区分不同系统的污染程度,同时还允许适当的测量差别。ISO 4406 标准选择具有特征性的两个尺寸  $5 \mu\text{m}$  和  $15 \mu\text{m}$ 。一般认为,  $5 \mu\text{m}$  左右的微小颗粒的浓度是引起液压系统淤积和堵塞故障的主要因素,而大于  $15 \mu\text{m}$  的颗粒浓度对元件的污染颗粒磨损起着主导作用。因而以这两个尺寸的颗粒浓度作为制定等级的依据,可以比较全面地反映不同大小的颗粒对系统的影响。目前 ISO 4406 污染度等级标准已被世界各国普遍采用,我国制定的液压系统油液污染度等级标准等效采用这一国际标准。

表 1.8 常用污染浓度等级系列

污染度数码	每毫升大于 $5 \mu\text{m}$ 的颗粒数		每毫升大于 $15 \mu\text{m}$ 的颗粒数	
	大于	上限值	大于	上限值
20/17	5 000	10 000	640	1 300
20/16	5 000	10 000	320	640
20/15	5 000	10 000	160	320
20/14	5 000	10 000	80	160
19/16	2 500	5 000	320	640
19/15	2 500	5 000	160	320
19/14	2 500	5 000	80	160
19/13	2 500	5 000	40	80
18/15	1 300	2 500	160	320
18/14	1 300	2 500	80	160



续表

污染度数码	每毫升大于 5 $\mu\text{m}$ 的颗粒数		每毫升大于 15 $\mu\text{m}$ 的颗粒数	
	大于	上限值	大于	上限值
18/13	1 300	2 500	40	80
18/12	1 300	2 500	20	40
17/14	640	1 300	80	160
17/13	640	1 300	40	80
17/12	640	1 300	20	40
17/11	640	1 300	10	20
16/13	320	640	40	80
16/12	320	640	20	40
16/11	320	640	10	20
16/10	320	640	5	10
15/12	160	320	20	40
15/11	160	320	10	20
15/10	160	320	5	10
15/9	160	320	2.5	5
14/11	80	160	10	20
14/10	80	160	5	10
14/9	80	160	2.5	5
14/8	80	160	1.3	2.5
13/10	40	80	5	10
13/9	40	80	2.5	5
13/8	40	80	1.3	2.5
12/9	20	40	2.5	5
12/8	20	40	1.3	2.5
11/8	10	20	1.3	2.5

ISO 4406 和其他几种污染度等级之间的对应关系见表 1.9 和图 1.9。

表 1.9 ISO 4406 与其他污染度标准对照表

ISO 4406	NAS 1638	SAE 749D	每毫升油液中 大于 10 $\mu\text{m}$ 颗粒数	ACFTD 重量 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
26/23	—	—	140 000	1 000
25/23	—	—	85 000	—
23/20	—	—	14 000	100
21/18	12	—	4 500	—
20/18	—	—	2 400	—
20/17	11	—	2 300	—
20/16	—	—	1 400	10
19/16	10	—	1 200	—
18/15	9	6	580	—