

摘 要

常见的设备故障是通过对振动、噪音、温度等参数的变化进行诊断分析，这些方法的优点是：直观性强，易于观察，并可在线监测，但也有较大缺点：凭参数判断不够精确、预测周期短、缺乏统一的标准、对事故后的原因分析帮助不大。本文主要研究以润滑油为主体的故障诊断技术，润滑油作为磨损颗粒的携带介质，在使用中其组分降解使性能下降，在设备内生成沉积物，被各种外来异物污染等会使摩擦磨损恶化而造成故障，从而能从润滑油的分析得知设备的运行状态信息。目前，它还是一项新的课题，国内外的研究还相对较少，因此，进行以润滑油为主体的设备故障诊断方法和措施的研究具有重要的意义。本论文着重阐述如何从润滑油使用中的变化预测设备故障及寻找故障原因，明确提出以润滑油作为设备故障诊断技术的主题，分析了以润滑油为主体的故障诊断方法，并就具体事例进行分析。研究表明将以润滑油为主体的设备故障诊断技术与设备的温升、振动和磨粒分析等常用方法结合起来，能有效的提高设备故障诊断的预知性、准确性和及时性。

关键词：设备；故障；诊断技术；润滑油

Abstract

The normal methods for diagnosing failures of the equipment include: vibration, acoustic emission, temperature monitoring, etc.. The advantages of these methods are direct, observe easily and can be used on line. The disadvantages are that its diagnosing precision is lower, forecasting cycle is short, lacking uniform standard and has little help for analyzing the reasons of the failures. In this thesis, lubricating oil has been regarded as the main body for diagnosing equipment failure. The lubricating oil is the medium of the wear grain of the equipment, its composition will degraded during the operating cycle. The deposits produced in equipments and polluted by varied external aberrant substances etc. can make rubbing wear corrupt and then cause faults. So we can know the equipments information under working through the analyses of lubricants. The author heavily elucidates that how to forecast the failure of the equipment and how to look for fault source according to the lubricant's variation. The specific failure cases have been analyzed by the diagnosing method based on the lubricating oil. At the same time, the diagnosing method based on the lubricating oil had be combined with the common analytical approaches, such as temperature rise, vibration and abrasive particles, in order to enhance the foresight, accuracy and immediacy of fault diagnosis.

Keywords: equipment, failure, diagnostic technology, lubricants

第一章 绪论

1.1 论文背景

从振动、温升及润滑油中磨粒分析等着手的设备故障诊断技术是从设备已发生故障的后果去监测，当振动、温升及磨粒有异常时，故障已发生，只不过其严重程度未引起操作者觉察或暂时未影响设备正常运行，若不采取措施就会出大故障，因而预报期短，不能指示故障原因。从润滑油着手作设备故障诊断：一是润滑油本身就可能是故障原因之一，它的质量、使用中的变化、油中异物等都会造成设备故障，在变质到某程度前或异物含量低于某值时未引发故障，但若发展下去肯定会发生故障，根据这些数值的大小在发生故障前作出警报，因而预测期长；二是润滑油中携带的异物如机械杂质、水分等反映了设备内部状况，指示故障原因较明确，易于确定采取的预防措施。

从润滑油着手的诊断技术内容包括：①润滑油的物理化学指标变化；②润滑油在机体内生成沉积物；③侵入到润滑油中的异物，包括泄漏介质、磨损颗粒和外来物等；④运行中润滑油的有关参数，如油压、油耗等。它们的变化既能监测故障发生的可能，又能较明确的找到故障原因。

几种诊断技术的结合，能提高故障诊断的预知性、准确性和及时性。

设备运行时一般将各种参数在仪表上显示，如温度、压力、转速、负荷、进料出料量等，操作人员的工作就是通过及时调整把这些参数控制在规定范围内，若运行时某参数超出范围，表示某部位可能有问题。但这些参数项目和检测位置的设置数量有限，它们全在范围内等于设备没有潜在故障或已发生了但还没显示重大影响的故障，还需要增加一些更能反映设备内部状况的监测方法对运行作监视，避免设备带“病”运行。因此对设备进行运行状况监测是故障诊断的一大任务。

要找出原因，以便进行有针对性的维修或更新改造或完善管理规章制度，从而尽可能减少类似事故重复发生。故障源一般有三方面，它们分别是：设备因素，指设备结构设计或其零配件质量缺陷或使用寿命终结；人为因素，指操作失误；润滑剂质量因素。从发生故障时的现象，如操作参数的变化，设备拆检后从故障有关部位的形貌变化等找出故障原因，某些故障原因单一，易于判断，而另一些故障原因交错，判断难度较大，甚至要做试验作验证。因而寻找故障原因是诊断的第三大任务。

1.2 国内外研究概况

在过去的几十年，国外许多学者针对基于润滑油的设备故障诊断技术进行了大量的研究，取得了可喜的进步^[1~15]。Maddox 和 Kelliher 使用 XRF 和 AES 方法对 NASA 的几个飞行器的用过的油进行了分析。通过吸附在镁氧化物上的油样品来判断所跟踪的油中的元素，接着 Liuetal 对 XRS 中的组织材料进行热退化处理^[1]。Sander et al^[2]运用源放射物的分散和基本参数法判定无重负油样品中的重金属。最近，国外军事部门对基于润滑油的故障检测技产生浓厚兴趣，军事实验室通过原子吸收光谱分析法对 UH-1H 型直升机发动机的润滑油进行了分析，研究表明，X 射线光谱分析法对分析磨损颗粒的多种元素分析是一种有效的方法。1996 年 A.Zararsiz 等人^[3]通过 X 射线荧光技术对直升机发动

机润滑部分的主要合金进行了分析,通过对磨损金属的铁和铜含量判断,可预测出机器的初始故障以及机器是否需要检查,因此磨损金属浓度将成为任何油润滑机器合适操作条件的一个指示器。1996年 H.S.Ahn 等人^[4]针对发电厂涡轮发电机中轴承和其他的摩擦组件中磨屑的尺寸、数量、成分和形状(形态学)进行分析,结合振动分析、AE、温度和压力诊断技术,提出了发电机组故障诊断的一种综合技术。

国内技术人员对基于润滑油的设备故障诊断没有引起足够的重视,因而研究较少。1996年华北油田运输公司的赫贵一^[16]通过对汽车发动机故障的研究,将润滑油的理化指标分析与模拟实验和台架实验相结合,通过选用符合精度等级和粘度牌号的润滑油,使发动机的烧瓦和卡死等故障降到最低。1999年深圳月亮湾燃机电厂的王世敏^[17]针对电厂设备发生的故障,运用润滑油光谱分析和铁谱分析的方法,通过监测润滑油中金属元素浓度的变化范围和分析磨损颗粒的形貌、大小、数量和成分,成功诊断出燃机轴瓦磨损状况。2001年国内浙江海洋学院渔业学院的王家宏^[18]针对船舶柴油机的故障,从对润滑油的分析中提取理化指标变化,采用油液理化检测、光谱分析法和铁谱分析法相结合,取得了良好的结果,延长机组的检修和检验间隔,节省了额外很多费用,同时减少了工作量和 workload。

综合来说,以润滑油为主体的故障诊断的研究还是一项新的课题,大多学者针对某一具体的设备故障进行分析,提出有针对性的解决措施,没有一个全面综合性的故障分析和解决措施,因此,进行以润滑油为主体的设备故障诊断方法和措施具有重要的意义。

1.3 设备故障产生的原因和检测方法

设备故障的发生原因十分复杂,从性质上可分为系统性故障和随机性故障二类。系统性故障是设备或某部件在运行中不断老化降级,直到出现故障,这种故障一般为渐发式,有一定规律,从开始有征兆到出故障有一定时间,若预测及时,及早采取措施,造成损失较小。随机性故障则多为突发性,故障发生前无明显征兆,有征兆时很快就发生故障,难于报警,易于造成灾难性破坏。

设备故障的发生大致有如下几个原因^[27]:

1. 设备老化,设备在使用中由于磨损、疲劳等各种原因,性能不断下降,直至某个薄弱部位承受不了而断裂,造成局部破坏,也就是内因。
2. 环境或条件的恶化,如在高温、灰尘、有害气体条件下工作或辅助材料不适合,如用劣质润滑油等。
3. 操作失误,如超负荷、超温、调节错误、不遵守操作规程,也就是人为因素。

现在的情况是从事设备故障诊断研究的绝大多数为设备管理或研究人员,他们的专业是机械,对从机械的角度进行故障诊断较熟悉,有丰富的经验,也做了大量的研究,但对润滑油不够熟悉,只局限于对由润滑油携带出来的磨损颗粒的研究或把润滑油分析作为补充项目,这是十分不够的。

从机械角度对故障预测是检测设备在运行中操作参数、噪音,温度及振动的变化,在发生故障前它们之一或全都会有异常情况,提醒我们要提高警惕或及时采取措施。这些方法是:

1. 操作参数观察

这是一种直观方法,运转设备都有反映运行状态参数的显示仪表,如转速、各部位温度、输出输入电流电压等,如某参数超出正常范围,又无法通过调节达到正常,预示有发生故障的可能。

2. 振动和噪音

设备正常运转时，其振动和噪音均匀而柔和，表示其机械状态是平衡的。在某部位严重磨损或应力变化时，破坏了原有的平衡状态，会发生大的振动的异常响声，预示故障的临近，或已发生了局部故障，一般从某特定部位振动的方向、相位、频率和振幅等判定故障的程度、性质和部位，已有一些专用仪器用于测量振动和噪音。

3. 温度

设备有异常的摩擦，冷却系统工作不正常，物流的畅通程度和热平衡失调等，都会使设备某些部位温度变化。也有一些专用仪表，可以以接触的方式，测量设备内部要害部位的温度变化状况，从而更敏感的预测故障。

这类方法优点：一是直观性强，易于观察，凭视觉和听觉，触摸都可大致实现，已有一些专用仪器及数学模型等作此用途；二是可在线监测，从安装于设备主要部位的传感器上能全过程及时了解异常变化。但也有较大缺点：一是这些参数变化大多反映设备内部矛盾激化后的结果，对判断故障原因及部位不够准确，其讯号易受干扰，有时需有丰富的经验或停机检查才能找出故障原因和部位；二是预测周期短，很多故障发生前有较长的潜伏期，当上述参数或某处有异常时往往已过了潜伏期，当上述参数或住处有异常时往往已过了潜伏期，（与前面重复）发生了原发性故障，而只有发生了原发性故障，其噪音，振动和温度才有异常变化，那时可能来不及作充分的应对措施；三是上述测量方法缺乏标准化，各设备间甚至同一设备不同时期，某部位的振动、噪音和温度都没有一个通用值，在此值内设备运转正常超过此值预示可能有故障，而只能前后过程变化比较，对经验依赖性强；四是对故障事后的原因分析帮助不大。

润滑油在设备中所起作用有二种类型：一种作为润滑剂，以润滑运动部件为主，协助改善设备工作为辅，如密封，以润滑运动部件为主，协助改善设备工作为辅如密封，（与前面重复）冷却等，大多润滑油属此类；另一种作为工作液体，是设备工作部件的构成部分，而以润滑为辅如液压油和热传导油、变压器油等。从设备故障诊断的角度，二者无大的区别，设备运行时润滑油流经各运动部位进行润滑，它本身不断降解老化，随之性能下降并产生各种对设备有害的产物，同时也夹带各部位的磨损颗粒、泄漏物质等，设备外部环境也有杂物进到润滑油中，这些都是故障产生之源。通过对在用润滑油的分析，从其参数变化及异物含量的检测不但能了解润滑油本身的降解程度，还可了解设备各主要部位的工作状况和部件的磨损情况。因而从润滑油进行故障诊断的优点：一是能更准确预测故障的原因及部位，更全面监测设备运行情况，能回答从振动，温升及噪音等机械诊断方法无法回答的许多问题；二是能作早期预测，由于润滑油降解引起摩擦、机械强度变化或异物入侵等引起的故障一般有一段较长的潜伏期，在此期间从润滑油的变化及润滑油中异物种类及含量能及早发现故障隐患，及时排除或早作准备，减少损失；三是发生故障后从零件拆检时润滑油在它们表面生成的沉积物可协助寻找故障原因。从故障现场找故障原因，用的是残骸分析技术，故障后设备停止运转，自然不存在温度噪音等，上述机械测量方法也就用不上了，而润滑油在设备高温部位的沉积物是存在的。从润滑油对设备进行故障诊断的缺点：在线监测技术不成熟，需不断取油样，要有专用试验室，及时性就受影响。

总的说来，在设备故障诊断中，监测参数变化、振动、温升、噪音及润滑油分析等都能从不同角宽反映设备运行中的异常情况，从而起到诊断作用，这几种方法对分析故障原因有互补作用。但监测参数变化、振动、温升等有较大的局限性：一是它仅反映设备由于内部变化而导致的外部变化，是间接性的，因而真正的原因不清晰；二是它反映的是内部有问题的效果，如何消除故障的途径则较模糊；三是早期预报稍逊，只有内部已发生故障上述参数才有异常。机械设备所有故障中有40%以上与润滑有关，若再加上

间接有关及虽无关但从润滑油的变化可觉察到的则几可覆盖全部，故通过在用润滑油的分析可得到更多、更及时和更深层次的信息，尤其对事前和事后设备原因分析有不可替代的作用，应引起机械作业的更大重视。

1. 4 论文主要工作

本论文的主要工作有以下几点：

1. 研究认识润滑油在设备运行使用中的变化、磨损机理以及润滑油的重要作用；
2. 润滑在使用中的理化指标变化和外来物污染对设备产生故障的影响；
3. 润滑油指标变化的分析方法和对设备的不良影响的诊断；
4. 以润滑油为主体的几种监测方法相结合对设备故障诊断的实施形式以及具体的技术应用。

第二章 从在用润滑油进行设备故障诊断的基础

2.1 润滑油在设备运行中的重要作用

就像人不能没有血液一样，运动的设备离不开润滑剂，润滑油的品质和使用方法与设备故障关系密切，虽然在车辆或设备的操作费用中，润滑油费用仅占 0.5%~1.5%（表 1，表 2），但润滑油的质量不合适或使用不当，是发生故障的重要根源，据日本机械振兴协会对企业的 14 种原因引发的 700 次机械故障调查，因润滑不良发生的故障 166 次，占 25.7%，润滑方法不当的 92 次，占 14.3%，与润滑有关的共占 40%（图 1），因此搞好润滑是减少故障的极重要一环。

表 1 美国 115 个车队车辆操作费用比例

项目	燃料	轮胎	维修	贬值	管理费	润滑油
费用比例/%	37	6	27	16	13	1

Table 1 The proportion of the operating expense of 115 American motorcade vehicles

表 2 茂名石化公司车队营运费用比例

项目	管理	养路费	维修	燃料	润滑油	保险费	轮胎	基金
费用比例/%	30	16	22	17	0.5	1.5	4	9

Table 2 The proportion of the operating expense of MaoMing petrochemical company

有人认为使用好的润滑油可以延长换油期，节省了用油量，从而提高效益，这种认识是片面的。日本钢铁协会对润滑管理效益作了调查表明，主要效益所在应是由于减少故障而节省了故障的直接损失（维修）和间接损失（停工），延长设备使用寿命，而节省机油、节能等在其次。表 3、表 4 是某港务局汽运公司五台车用了质量合适的润滑油后，节约修理费和增加运行工日情况。据美国有关部门估计，美国每年需投入加强润滑管理的费用 2300 万美元，能节省资金达 160 亿美元，为投入的 696 倍。从上述可知，润滑油与设备维修的密切关系，从润滑油监测中诊断设备的状况也是极其重要的。

Table 3 The benefit investigation of the management of lubrication

表 3 润滑管理效益调查

项目	节能	节劳力	节机油	节维修费	节停工损失	延长设备寿命
所占比例/%	5.5	2.0	2.0	44.7	22.3	19.5

Table 4 The maintaining instances of vehicles after using CC grade diesel engine's lubrication

表 4 车队用 CC 级柴油机油后节约维修情况

车号	运行里程/km	应进行保养			实际保养		
		二保	三保	大修	二保	三保	大修
02264	101091	6	2	1	6	0	0
02265	101034	5	2	1	4	0	0
02266	114203	6	2	1	6	0	0
02267	101790	4	2	1	2	0	0
02276	160871	5	3	1	1	1	0

2.2 润滑油在使用中的变化

润滑油在使用中的温度、空气、金属催化、机械剪切、有害介质等的作用下，其组成中的基础油（占润滑油的大部分，由碳氢化合物组成）会发生氧化、裂化、聚合等反应，性能逐渐消耗和失效，导致性能下降，产生对设备有害的组分，称为老化或降解（图3），老化和降解到一定程度后就要换新油。一般说来，润滑油的降解以烃类氧化为主，顺次生成醛、酮、醇到有机含氧酸，各反应中伴有不同程度的分解和聚合，其中的中间产物为烃类的过氧化物，它是活性很高的不稳定化合物，易攻击金属而造成特殊的磨损和故障，档次高的润滑油含有高效的抗氧化添加剂，能延缓润滑油的降解速度或降低降解产物对设备的危害。

1、各种理化指标变化

润滑油在使用中理化指标及性能指标都在变坏，情况如表5。一些性能指标如抗氧化性、抗泡性、抗乳化性、抗磨损性、抗腐蚀性等都在润滑油的降解中下降，一方面原因是油质变差，另一方面原因是润滑油中的添加剂在消耗。

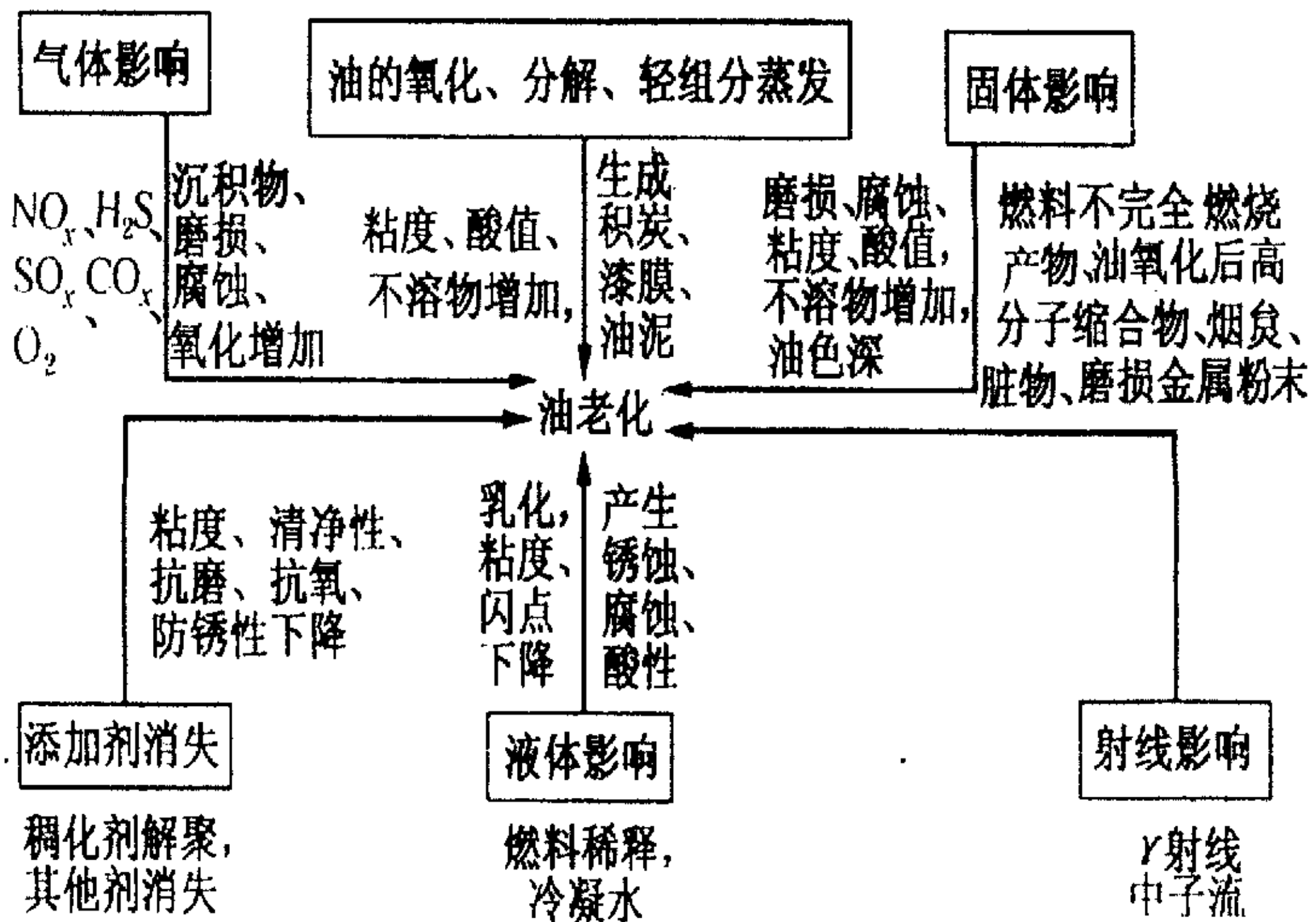


图1 润滑油老化的影响因素

Figure 1 Influencing factors of the aging of lubricating oil

Table 5 The change of the physical and chemical index of the lubricating oil
表 5 润滑油在使用中理化指标变化

项目	上升因素	下降因素	备注
粘度	高温氧化, 烟炱污染	燃料稀, 粘度添加剂解聚	
酸值	烃灯氧化, 含硫烯料烯烧产物污染	高酸值添加剂消耗	一般为上升
闪点	轻组分蒸发	燃料稀释	
残炭和灰份	污染及氧化		一般为上升
碱值		中和酸性物	一般为下降
不溶物	降解、污染		一般为上升
金属元素	磨损粉末, 外来物污染	添加剂消耗	一般为上升

2、生成沉积物

润滑油除了氧化变质外, 还在设备的不同温度部位生成不同类型的沉积物, 它们也会使设备发生各种故障, 这些沉积物如表 6, 其组成的元素如表 7~表 9。

Table 6 The deposits of lubricating oil in different temperaturing areas of the equipment
表 6 润滑油在设备不同温度部位生成沉积物

名称	生成的部位	温度/°C
积炭	发动机燃烧室、排气阀、活塞环区	>200
漆膜	发动机及空压机活塞区	150-250
油泥	油箱、滤网、摇臂盖、与水接触外	<150

Table 7 The analysis of the accumulated elements in gasoline engine
表 7 汽油机中积炭元素分析

部位	Pb	Ba	P	S	Zn	Cl	Br	无机物	有机物
排气阀积炭/%	64.7	5.1	2.2	1.0	2.2	12.2	1.6	90.2	9.8
活塞顶积炭/%	42.3	2.2	1.2	1.0	0.1	1.5	4.4	68.1	31.9
缸盖积炭/%	56.4	2.9	1.3	1.0	0.1	1.3	4.0	62.6	37.4

Table 8 The analysis of the accumulated elements in grooves of piston loop of diesel engine
表 8 AVI 柴油机中活塞环槽沉积物元素分析

元素	C	H	O	S	N
石蜡基基础油, 燃料含 S0.4%, 运行 100h/%	69.5	3.8	20.9	4.4	1.4
Cb 级油, 燃料含 S 1.0%, 运行 45h/%	69.2	4.2	26.6	---	---

Table 9 The analysis of oil mud in gasoline engine and diesel engine
表 9 汽油机和柴油机中油泥分析

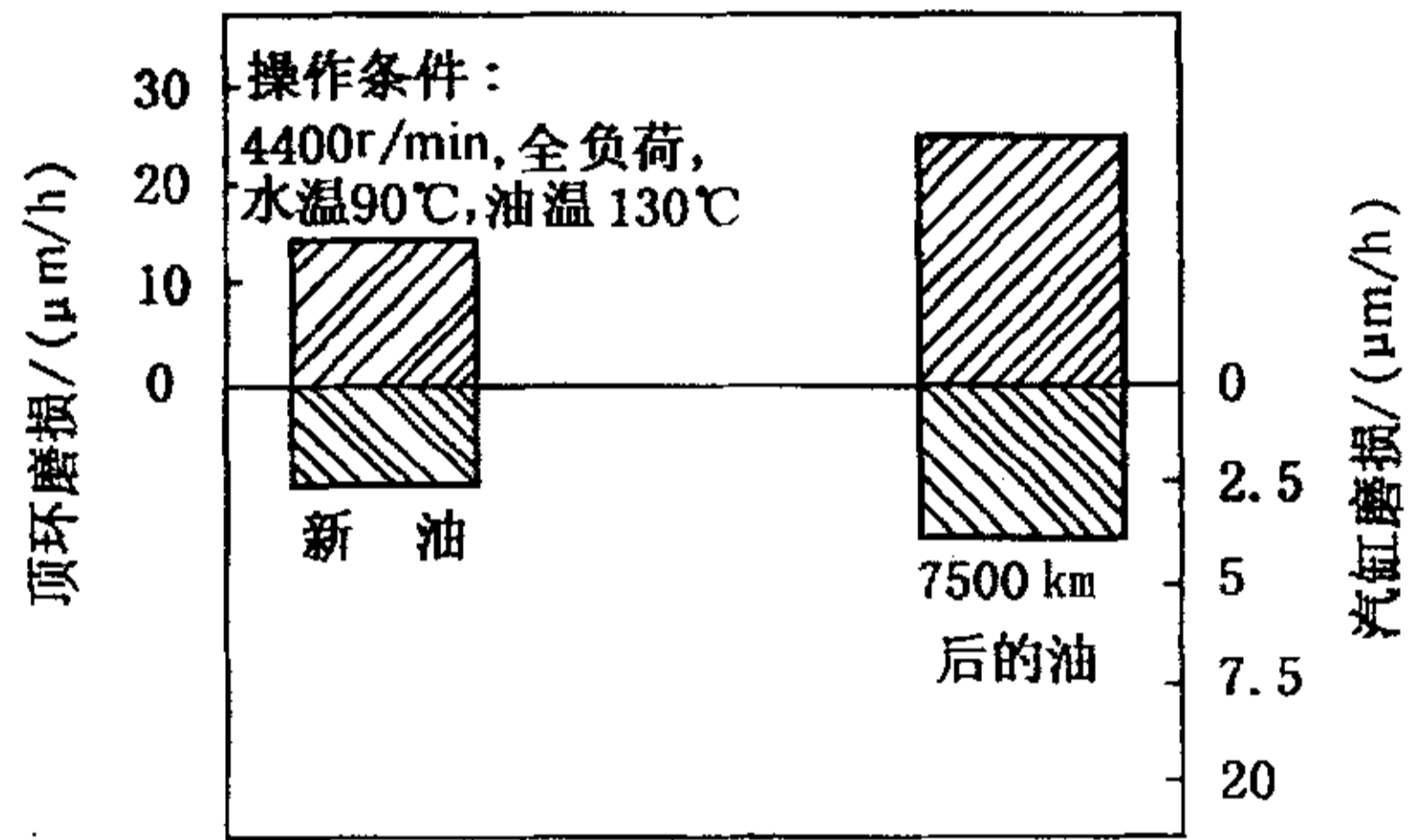
项目	炭	磨损金属	铅化物	水	燃烧产物	燃料
汽油机油泥/%	0.1-0.2	0.05-0.2	0.05-0.2	0.2-0.5	--0.5	1---10 以上

柴油机油泥/%	1-5	0.05-0.2	—	0.2-0.5	--0.5	1--5
---------	-----	----------	---	---------	-------	------

设备的工作状态与沉积物生成的数量和类型关系很大，在一般情况下，发动机在持续高温功率下运转，积炭和漆膜生成的趋势大。若经常在开开停停下工作，发动机经常处于较低的温度下，易于生成大量油泥。升级换代的各种高档次润滑油，含有较大量的清净分散添加剂，能有效的抑制各种沉积物的生成和使沉积物分散悬浮在润滑油中，不致粘附在金属表面而对设备造成危害。

3、换油期

润滑油在设备中不断发生降解和生成沉积物，又有外来物的污染，性能不断下降，使用到一定时间就要换新油，若继续使用，就会危害设备而发生故障（图2~图4）。美国康时斯柴油机公司做过试验，将换油期从15000km延长至50000km，发动机寿命减少50%~80%。从图6可看出，换油期从10000km延长20000km时，凸轮尖磨损增加约一



新油与旧油对磨损的影响

图2 汽油机汽车的气缸和环磨损

Figure 2 The wear of the cylinder and ring of the gasoline engine

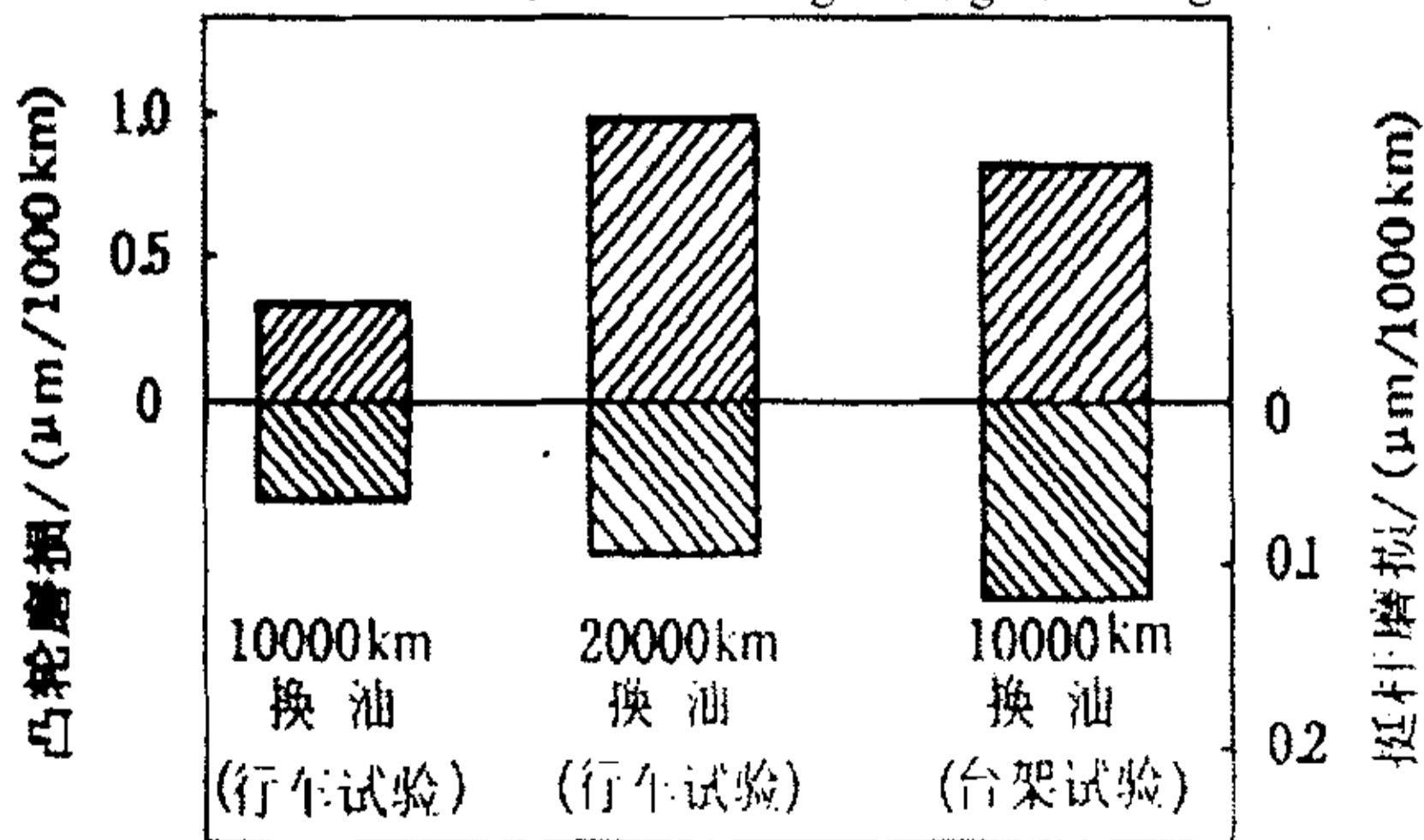


图3 柴油机汽车的凸轮和挺杆磨损

Figure 3 The wear of the cam and jib of the diesel engine

倍，而由 20000km 再延至 30000km，磨损增加 5 倍以上。很多设备管理较好的企业的经验表明，选用高质量润滑油和掌握合理的换油期，就能大大降低设备的故障率和保障良好的运行状态。

换油期的长短受二个相反的因素影响：一方面由于环保和节能要求的推动，设备的性能不断升级，其热负荷和机械负荷持续上升，再加上工作状态的多元化，使润滑油的工作条件越来越苛刻，加剧了润滑油的降解，使换油期缩短；另一方面润滑油的性能越来越改善，质量的升级换代很快，使换油期增长。总的趋势是换油期延长（图 5）。由于过度老化的油对设备危害大，因而掌握合适的换油期显得十分重要，一般设备制造商在其用户手册上大都有润滑油换油期推荐值，说明用什么品种的润滑油时应在多少工作小时或多少里程要换油。但这些推荐只是指导性的，因为各用户买回设备后其使用条件及环境千差万别，润滑油的降解程度相差甚远（图 6），换油期不可能有一个共同数值。过早换油造成浪费和环境污染，过迟换油损害了设备，从管理上应按质换油，也就是对运行中润滑油进行质量监测，定期检测有关的质量指标变化，某一指标超标表明已到界限，就应换油，这些指标也相当于故障诊断的界限值，作为故障的警告，当然同时它又能作为监测设备运行状态的指标。这些指标将在下面详述。

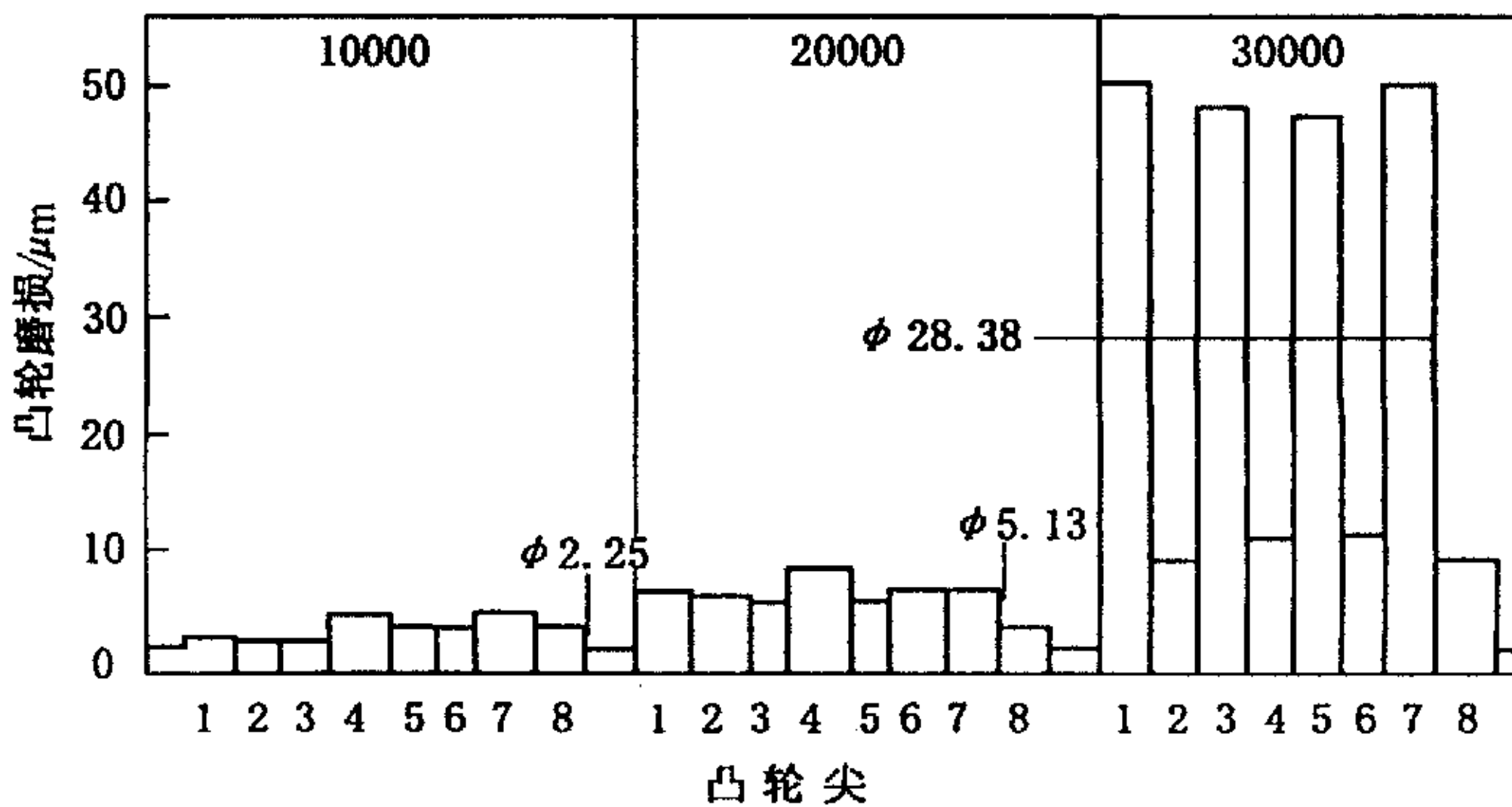


图 4 汽车换油期对凸轮尖磨损影响

Figure 4 The influence of the vehicle's oil changing period for the wear of the cam

润滑油技术发展的其中一个趋势是“长寿命”，从提高润滑油质量入手延长换油期，例如按行业标准要求，液压油的抗氧指标（ASTM D943）为大于 1000~5000h，而现在很多好的抗磨液压油能超过 4000h，也就是换油期可延长数倍。柴油机油采用合成油作基础油，虽然成本高，但换油期也可延长数倍，对设备保护更好，又减少了处理废油的麻烦。

应说明的是，换油期的长短要结合润滑油耗量一起考虑，如果由于设备陈旧引起漏油多而造成耗油量很大，在运行中补加新油数量较大，这种换油期的延长并无多大意义。

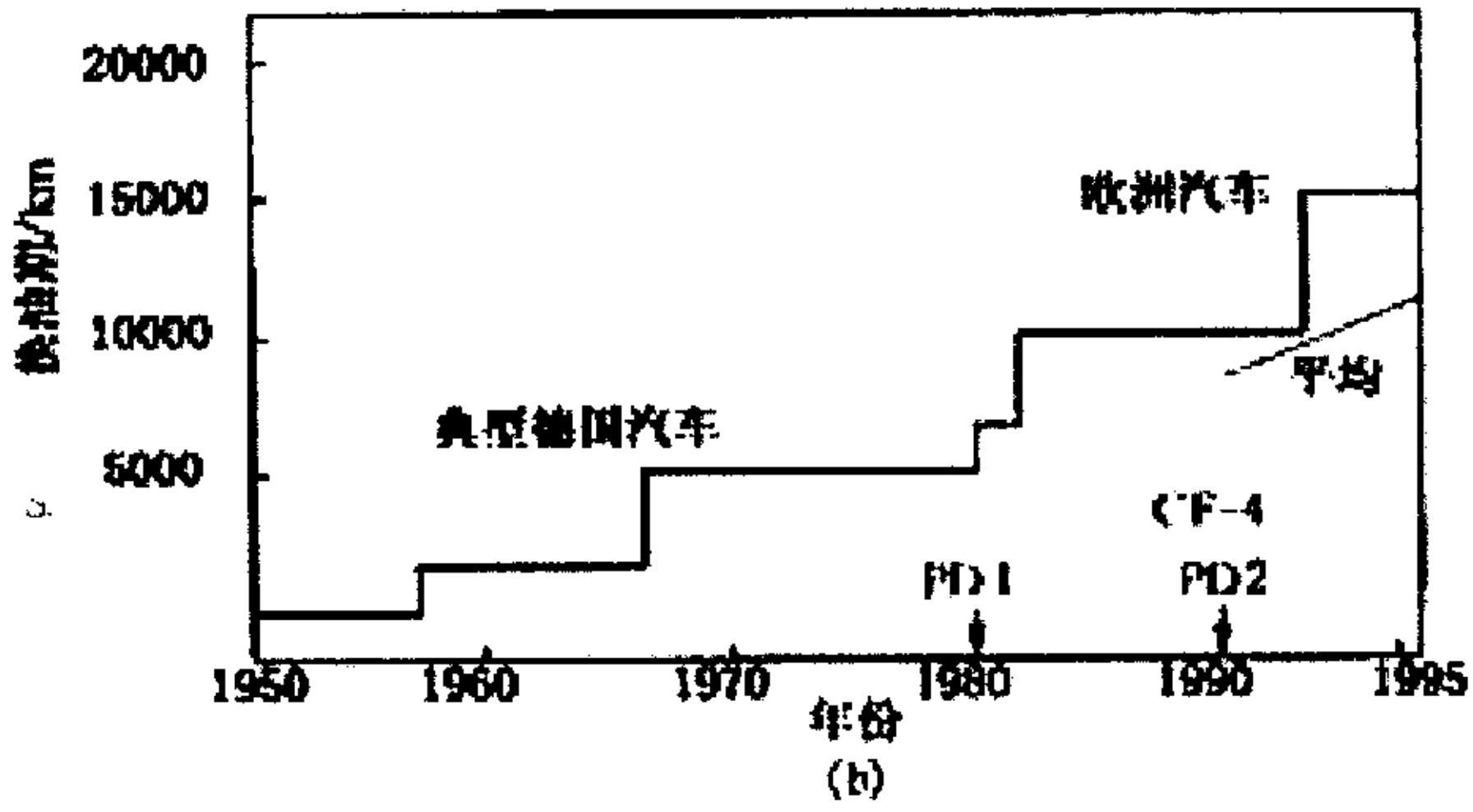
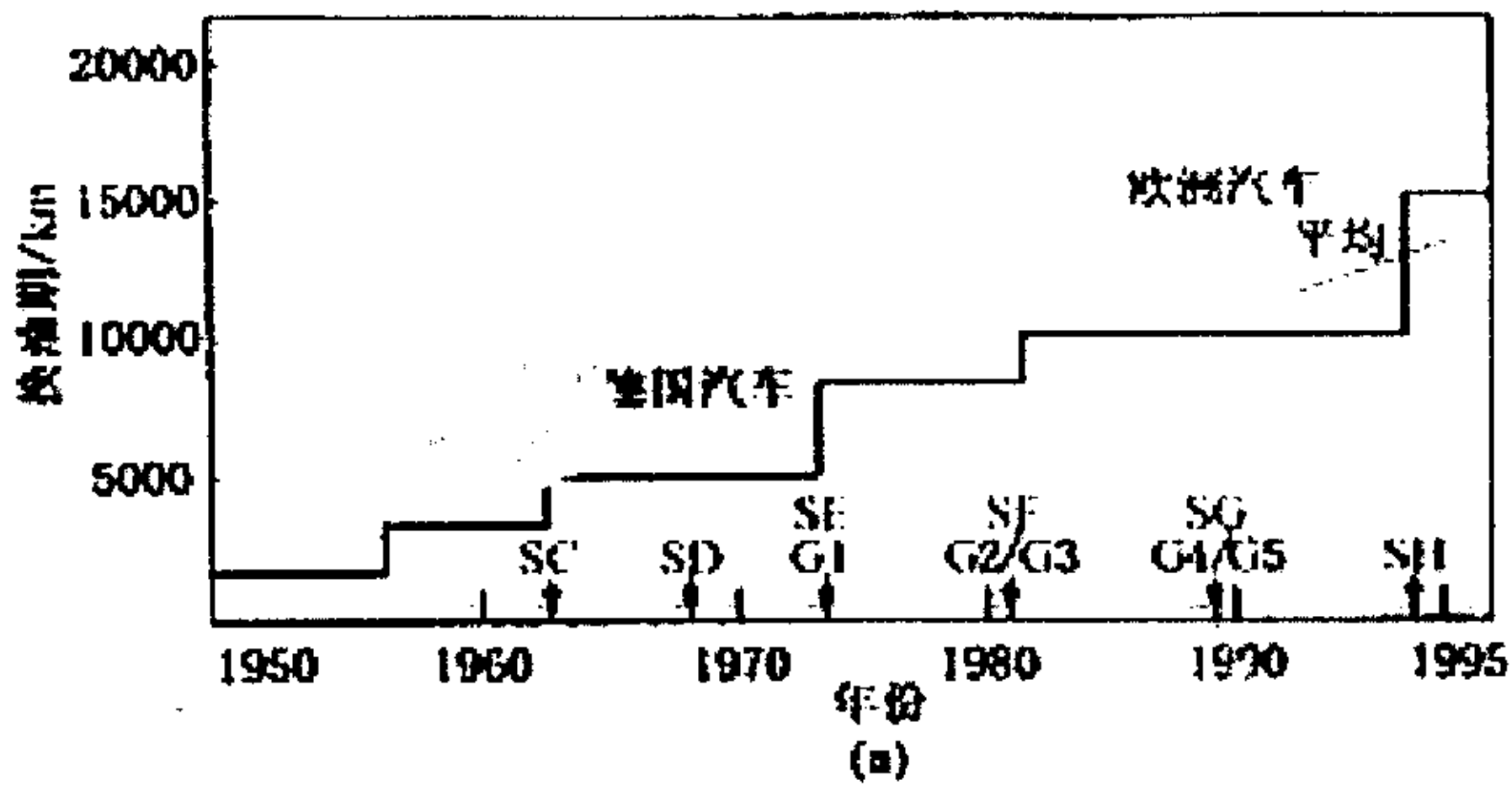
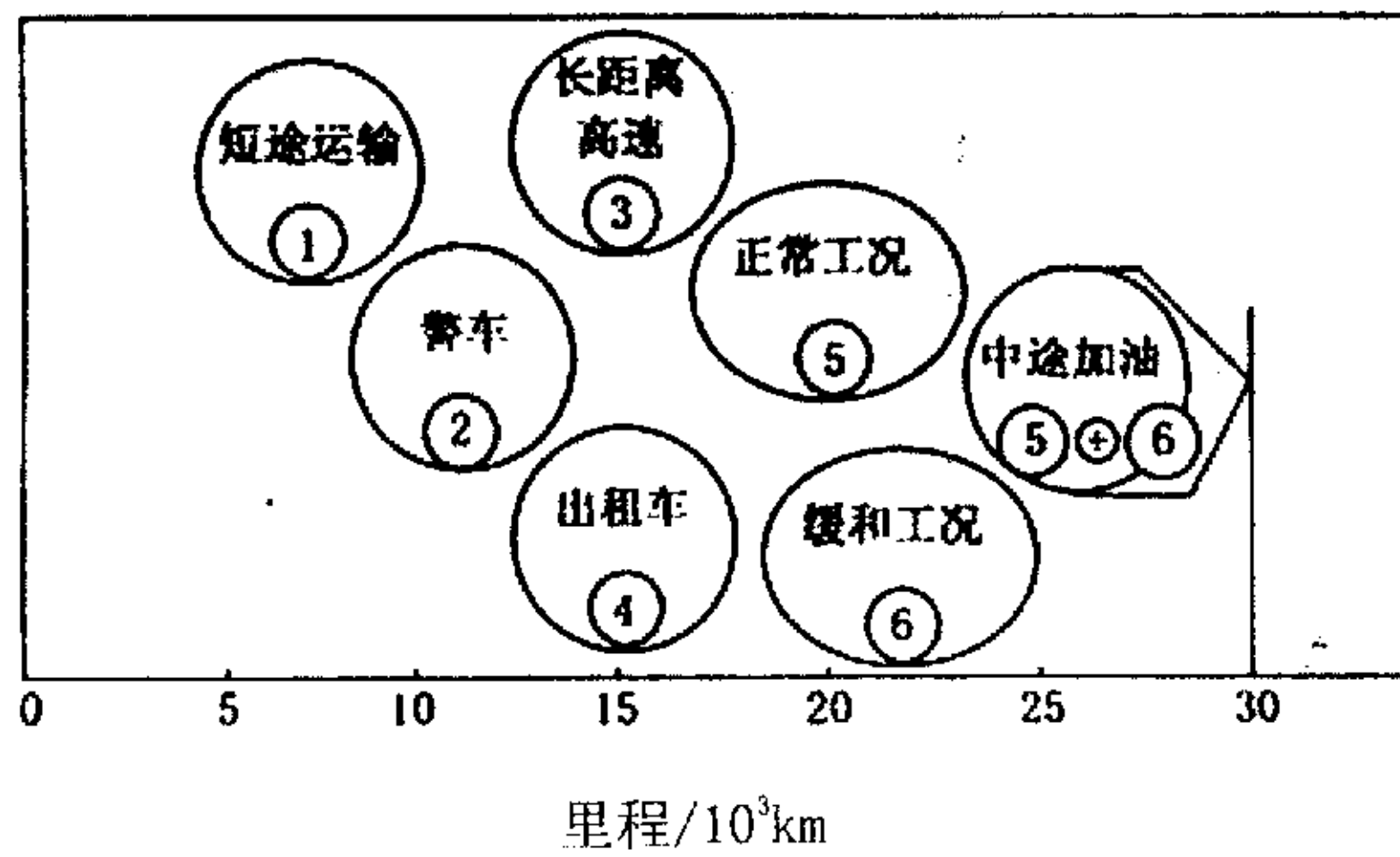


图 5 汽车换油期趋势
(a)汽油机汽车换油期；(b)柴油机汽车换油期
Figure 5 The trend of the vehicle's oil changing period



(按时间换油：① ≥ 1 年，②约 1.5 年，⑤和⑥ ≥ 2 年)

图 76 不同用途汽车的换油期
Figure 6 The oil changing period of different vehicles

4、进入异物

润滑油在使用中除了自身变化外，还会有外来物质进入加速它的变质，易于造成设备故障，其来源主要有以下二种。

① 来自设备内部，它们有发动机的燃料，燃烧产物烟炱、酸、水、冷却液，致冷剂及金属磨损颗粒等，加错品种的油，换油时未排干净残存的洗涤剂及已老化的油，还有机内的涂层、垫片跌落等。

② 来自工作环境，如水、砂土、气体、灰尘及杂物。这些外来物有造成磨料磨损或堵塞油流动管道，有的污染润滑油使油质变坏而性能下降。

2.3 设备的磨损

设备运动部件的摩擦磨损基本知识，已见于各种有关手册及教材，这里只把与本论文内容关系密切的概念扼要阐述。

1、磨损分类和特点

相对运动表面运动中发生的物质转移现象可称为磨损，发生在设备上的磨损的类型，不同书中的分类大同小异，这里只取常用类别，这些分类如下：

①粘着磨损，接触表面的材料由于高温产生塑性变形，转移到另一表面，这种现象一般为润滑不良和负荷过重所致，其表面或主要表面外观通常有高温变色及塑性变形痕迹。

②磨料磨损，两个运动表面间存在硬度不同的颗粒造成材料的转移，这些颗粒可能来自设备本身的磨损或外部，产生这种情况的表面有时有刮痕，其磨粒较圆滑。

③疲劳磨损，运动表面在长时间承受交变应力作用下，达到疲劳极限至强度下降至材料转移，一般受的应力较大，产生的剥落和点蚀较多，磨粒有片状和钝粒状。

④腐蚀磨损，金属表面与周围介质发生化学反应，形成低强度产物而造成物质损失，这些介质可能是油老化产物或外来污染物，腐蚀磨损的金属表面外观粗糙，无光泽，有内部掏空的点蚀，磨粒细小。

⑤其它，如微震、流体冲击、电蚀等磨损。

各类磨损示意图如图 7。

正常的磨损使摩擦副配合间隙扩大，造成设备性能下降，减少使用寿命，严重的磨损造成拉伤、剥落乃至烧结等破坏性故障。表 10 是较新的磨损分类。实际发生的磨损

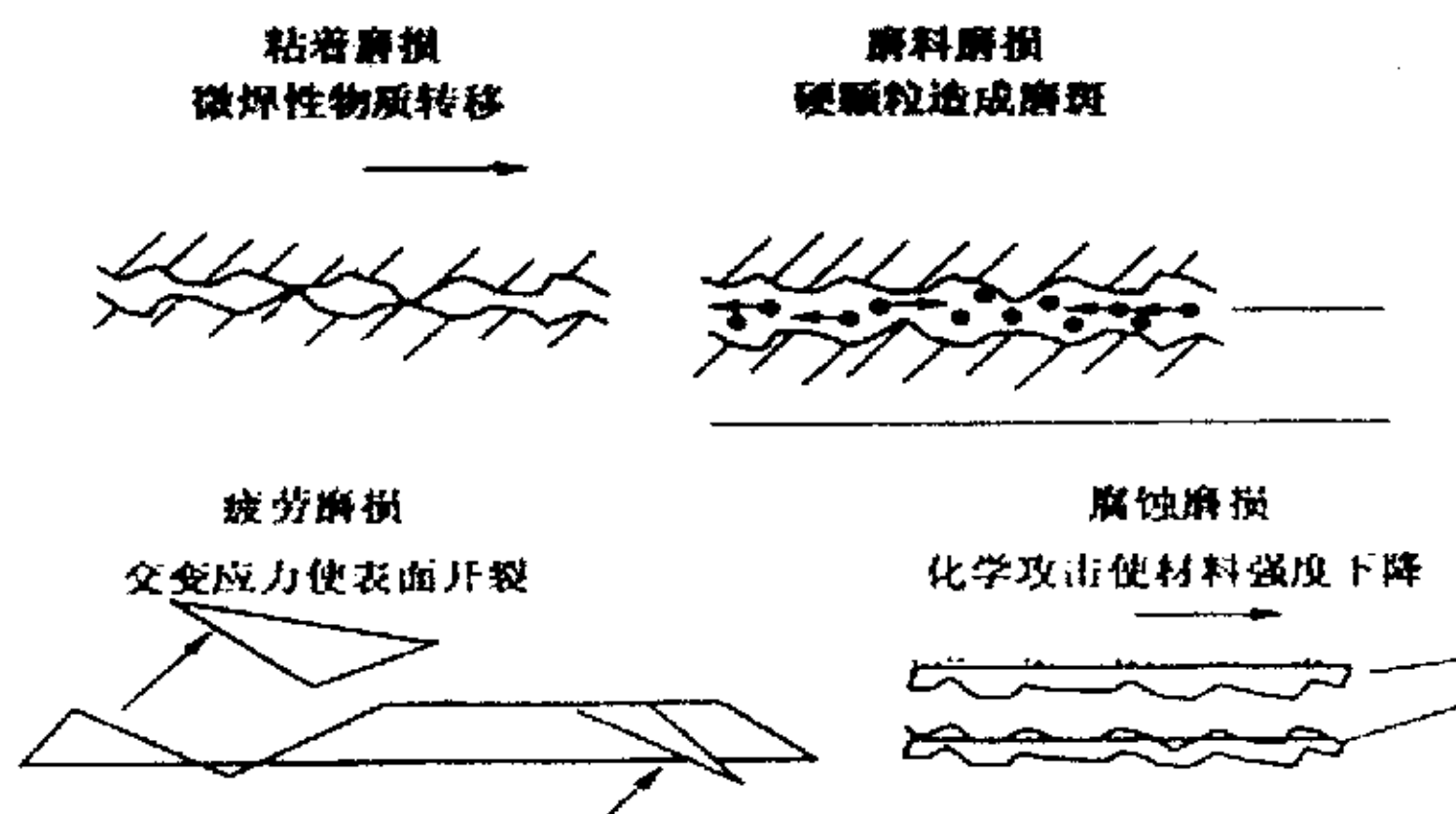


图 7 各类磨损示意图

Figure 7 The sketch map of some types of wears

较为复杂，各种磨损形式会相互交错，例如由于粘着磨损和疲劳磨损产生的磨粒又会造成磨料磨损，由于腐蚀磨损使金属表面强度下降而易于疲劳等，因而区分的难度较大，应抓住其主要特点作分析，如粘着磨损一般都与高温相伴，因而磨损部位都有与高温有关的变色或由于达到熔点后的金属塑性流动形状，而表面有点蚀、剥落或外观色调变暗等肯定与疲劳磨损或腐蚀磨损有关。

表 10 磨损的分类

名称	别称	定义	发生部位	条件
温和粘着磨损	正常磨损	仅相对运动金属表面间膜的物质转移	全部	中等负荷转速温度，表面清洁干燥，好润滑剂
苛刻粘着磨损	擦伤，咬住，刻伤	金属间紧密接触造成表面焊住	环—气缸，阀系，轴承，齿轮，链条	高速高温高负荷，润滑剂不良
磨料磨损	擦伤，刮伤，起毛，刻槽	因硬颗粒造成擦伤和变形	相对运动表面全部	硬颗粒污染油，表面硬度不够
磨蚀	固体颗粒冲击腐蚀	硬颗粒在高速流体中冲击表面造成擦伤	轴承没孔附近，阀，喷嘴	含固体的高速气或液体冲击表面
抛光	磨光	细磨料使表面膜连续除去	柴油机缸套，齿轮尖，阀杆	腐蚀液体与油中细磨料结合
接触疲劳	疲劳磨损，表面疲劳剥落	在滚动和滑动循环应力下，造成开裂和点蚀而除去金属	滚动及滑动轴承，阀系部件，齿轮	长期循环应力，油中有水或杂物
腐蚀	化学磨损，氧化磨损	表面内腐蚀产物磨掉	轴承，缸套壁，阀系，齿轮，链条	腐蚀环境，腐蚀金属，锈，高温
微振腐蚀	虚假硬度微振，摩擦氧化	固体面间相对低振幅摆动造成磨损	震动机械，轴承套，销，键及固定件	相对运动造成震动
电腐蚀	磨蚀，化学腐蚀	低电流的导电液体中金属的溶解	航空液压阀，泵，转子	高速液体流造成电位差
放电磨损	电火花点蚀	表面间电火花造成金属除去	高速旋转轴承如压缩机，喷雾器	高速旋转，两相流体高速混合，高压差接触点火
穴蚀破坏	流体磨蚀	洞穴流体气泡破裂造成金属损失	液压阀，泵，齿轮齿，缸，套，活塞环，滑动轴承	由于液体流速，形状或部件运动的变化使液体压力突然变化

2、磨损颗粒的分类也较复杂，如外观、锐利度、纹理、大小、颜色、厚度等都分别分类，较简单的大致识别有如图 8 所示的几种。把磨粒放在合适的显微镜上，从磨粒的外形、大小、厚薄、色泽等可估计磨损的类型、程度。还有的把它们加热到特定的温度，从变色情况估计合金类型，从而推测磨损部位。







1	正常磨损粒子	2	切削型磨损粒子
 <ul style="list-style-type: none"> • 薄片状 • 表面平滑 • 0.5 ~ 5 μm 		 <ul style="list-style-type: none"> • 卷状 • 砂等混入 • 25 ~ 100 μm 	
3	球状磨损粒子	4	平板状磨损粒子
 <ul style="list-style-type: none"> • 球状 • 轴承疲劳 • 1 ~ 5 μm 		 <ul style="list-style-type: none"> • 表面，粗糙 • 齿轮疲劳 • 20 μm 以上 	
5	重磨损粒子	6	其他粒子
 <ul style="list-style-type: none"> • 边缘直线状 • 条痕 • 20 μm 以上 		 <p>砂 聚合物 锈迹</p>	

图 8 典型磨损颗粒形态
Figure 8 The shapes of typical wear grains

2.4 取油样方法

对在用润滑油分析作诊断就要取油样，这是一项简单的工作，同时又是一项极重要的工作，若取的油样无代表性，从其分析数据得出的结论只会起误导作用。同时，油样分析费钱费时，如何合理安排取样周期以尽量减少分析工作量又能反映实际情况，因此决不能轻视取样，这里提出几个原则。

①取样位置，较理想的应在油流动时从主油道处取。这样取的样品中各种成分较均匀，能反映设备当时状况。油箱中的油流动差，混合不够均匀，油不溶物会沉降分层，其他部位如滤清器前后、运转部件附近的油中某些我们关心的成分的浓度呈忽高忽低现象，使人看不出规律或了解不到真实情况。如条件不允许，只能在油箱中取时，也应在停机前取，避免固体物沉降。每次取样位置固定。

②取样时间，从故障预测的角度取样间隔应从疏到密，新设备开始运转或用新油时发生故障可能性少，有害物浓度低，油的降解慢，取样间隔可疏些。运转中至后期，频率逐渐加大，某些项目有异常或设备情况有异常则取样间隔加密，从某些分的项目的结果与运行时间做出的曲线形状可看出此项目的变化趋势。通常应在设备低速运转中取样或停机后油仍热时立即取样。

③补加新油前取样，以免受新油干扰。

④打开放油阀先放掉一些油后再取样，先放的油是原管线管积存的不流动的油，这些油没有代表性。从没有放油阀的部位取油样时，应备有吸油器，吸油时吸油口应与油箱底保持合适的距离。

⑤静止油取样一般取上中下三个位置的油混合再分析。

⑥油样量为分析项目所需油量再加 0.5 倍以上，因为完成分析后仍要保存此样以备

复查某些项目。

⑦取油样器具必需干燥洁净。

⑧取样后瓶子标签填好油名、运动时间（里程）、设备名称、取样日期、取样人等，并进行登记及编号。尽量做到固定取样人和取样位置。

2.5 本章总结

本章主要研究表述润滑油在设备运行中的重要作用，设备运行中润滑油在使用中的温度、空气、金属催化、机械剪切、有害介质等的作用下，其组成中的基础油（占润滑油的大部分，由碳氢化合物组成）会发生氧化、裂化、聚合等反应，性能逐渐消耗和失效，导致性能下降，产生对设备有害的组分，从而对设备造成损害，同时采用取样油分析的方法初步对设备故障进行预防。

第三章 润滑油的变质和外来物污染与设备故障

1988年云南和贵州省的交通部门在短期内有二千多辆货运载重卡车的后桥动齿轮副发生烧结事故，大量车辆停运，由于这二省铁路线短，山多，公路运输在经济和人民生活中占重要地位，一下子这么多车停驶影响巨大，以云南省交通科学研究院为首的工作组进行调查后，得出原因有三：一是超载严重，山高路陡，使齿轮超大型负荷严重；二是用的齿轮油是几个小厂生产的：双曲线齿轮油，质量低劣；三是齿轮质量参差不齐，大多不是原厂品，1994年江西省某施工单们一大批施工车辆的柴油机同时因不同程度拉缸而停工，损失惨重，经查主要原因是用了茂名市某小厂的所谓“CD”油，后来告上法庭索赔成功。河南省某公路总段汽车队1986年5~6月连续损坏15套双曲线齿轮和3副轴承，此地区同期有80台车的双曲线齿轮损坏，河南省石油公司及第二汽车厂受委托对齿轮油和齿轮作质量鉴定证明原因是齿轮油质量低劣。

上述大事故均与润滑油质量有关，若能对润滑油进行监测，事故完全可以得到预警而避免。

3.1 润滑油在使用中的降解使理化指标变化

润滑油在运行中的降解主体为烃类的氧化反应，产物为醛、酮、醇，最终产物为各种有机酸类，降解的结果使油的各项指标变差，性能变坏，危及设备的正常运转及使用寿命。在润滑油的规格中指标一般可分三类：一类为理化指标，也称常规指标，可在实验室方便地测量，是大多数润滑油都应具有的物化特性，如粘度、闪点、酸咸值、水分、机械杂质含量等；第二类为模拟性能的性能指标，表示润滑油的普遍性能，如抗氧、抗腐蚀、抗乳化等、也在实验室测量，但比理化指标费力费时；第三类为性能试验，一般某类油就用此类油的有代表性的设备按有代表性的工况制定的试验条件作评定方法，如齿轮台架，内燃机油用发动机台架，液压油用液压泵方法等，润滑油在此使用中的性能，但评定比前二类费力费时得多，在对润滑油的通常品质检验中，一般仅做理化及部分模拟项目，其余作为控制项目，在基础油和添加剂配方基本固定时，每隔1~2年或原材料有重大变化才进行评定，在用润滑油大多从快捷省力的理化指标变化情况即可达到监测设备的工作状况的目的，这些理化指标变化如下。

(1) 粘度变化

润滑油在较高的油温下工作，使油中的轻组分蒸发和油高度氧化，润滑油的粘度增大，停机后常温时油呈胶冻状，再启动时机油泵工作失效，油道及滤清器堵塞，造成拉缸和烧瓦等到事故，在某些发动机上机油温度与油变稠的关系如图10。油温不特别高时润滑油也会随降解程度增加在而变粘，如图9。表11是美国由于油变稠使车祸增加的例子。当然，油的档次越高，降解的速度越慢。近代重型柴油机为了改善排放，采用排气回循环(WGR)技术、能改善排气指标和燃料经济性，但也使用润滑油中含有较多烟炱，造成机油粘度上升。

多级内燃机油中含有一定量的高分子聚合物作粘度指数改进剂，使低粘度的润滑油粘度增加和提高油的粘度指数，这些聚合物在使用中有可能受机械或热的剪切使分子断链，增粘作用下降，使油粘度降低。此外，内燃机燃料雾化实验欠佳时，未燃烧燃料掉

在润滑油中稀释机油，也会造成故障隐患。

表 11 美国汽车因润滑油变稠而出事故的统计

Table 11 The Stat.of the American automobile accidents caused by the thickening of lubricating oil

年份	1965	1966	1967	1968	1969	1970 头三个月
事故数	0	4	9	22	54	13

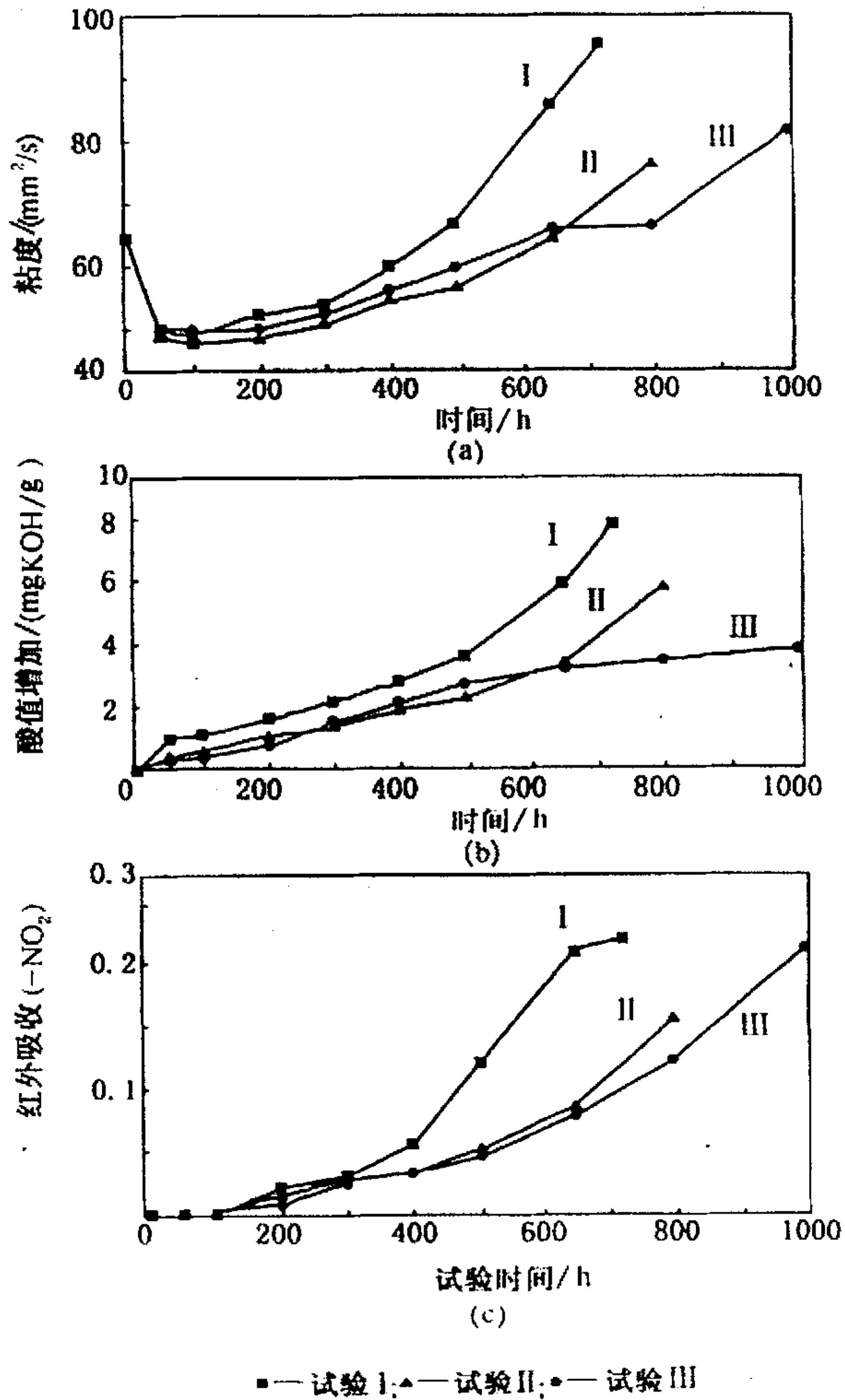


图 9 汽油运转时间对润滑油指标的影响

Figure 9 The affection to the index of lubricating oil from the automobile running time.

Figure 10 The affection to the lubricating oil condensing from its temperature

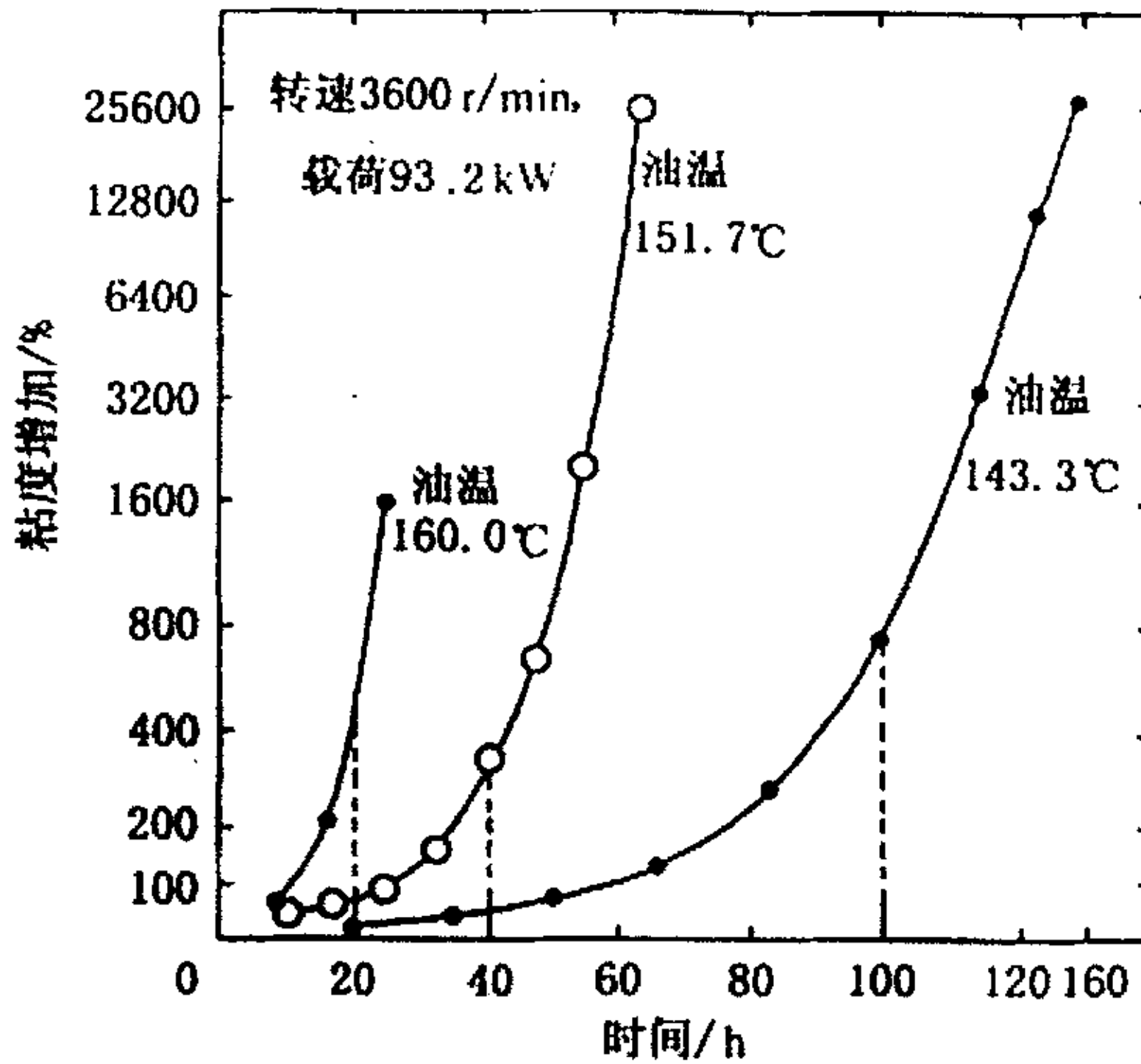


图 10 润滑油温度对粘度变稠的影响

润滑油粘度的测定按标准方法 GB/T265 (新油或浅色油)、CB/T11137 (用过油或深色油), 一般内燃机油及车辆齿轮油用 100°C 粘度作分类, 工作用油以 40°C 粘度作分类。

(2) 酸值

润滑油的降解主要是烃类氧化, 最终产物是有机酸, 降解程度越深, 酸值也越大, 如图 12 酸性化合物会攻击金属表面, 造成腐蚀磨损 (图 12)。另一方面, 柴油中的硫燃烧后与水结合生成硫酸, 也对金属造成剧烈的腐蚀磨损、蚀洞有掏空, 因此, 润滑油配方中要有好的抗氧化剂, 降低油的氧化速度, 同时还要有碱性添加剂, 中和有害的酸性化合物, 减轻腐蚀磨损的危害, 一般我们控制油的酸值按不同油类在不同值以下, 超过此值要换油, 否则易造成故障 (表 12)。这里要注意的是, 某些改善润滑油性能的添加剂如抗磨剂二烷基二硫代磷酸锌, 防锈剂十二烷基丁二酸等的酸值很高的变化过程, 开始时酸值高是润滑油中添加剂带来的, 使用中添加剂消耗而酸值下降, 消耗到余量少油氧化很大时, 酸值又上升。润滑油的酸值测定有国家标准方法 GB/T7304。

Table 12 The limited index of the present lubricating oil acid number

表 12 在用润滑油酸值限制指标

项目	抗氨汽 轮机油	汽轮 机油	汽, 柴 油	HL 液	HM 液压 油	回转空 压机油	普通车辆 齿轮油
酸值/ (koh/g)	0.2	新油 0.1	新油 2.0	0.3	新油 0.4 或 降 35%	新油 0.2	新油 0.5

某矿山有一批装有德国风冷柴油机的运输矿石用的载重卡车, 其中几台行驶未到 4000km 即发现润滑油粘度大大增加, 油色变黑, 用户投诉润滑油质量有问题, 现场取样分析, 所用新油质量无误, 在用油粘度和酸值均高于换油指标数倍, 由于用同一油的其他车辆运行正常, 首先排除油质量的原因后, 肯定粘度和酸值高是由于这几台车是长期

在很高的油温下工作而造成。由此思路去查，发现使油温高的主要原因是冷却机体散热片的冷却风导风罩损坏，使机体冷却差而持续高油温。

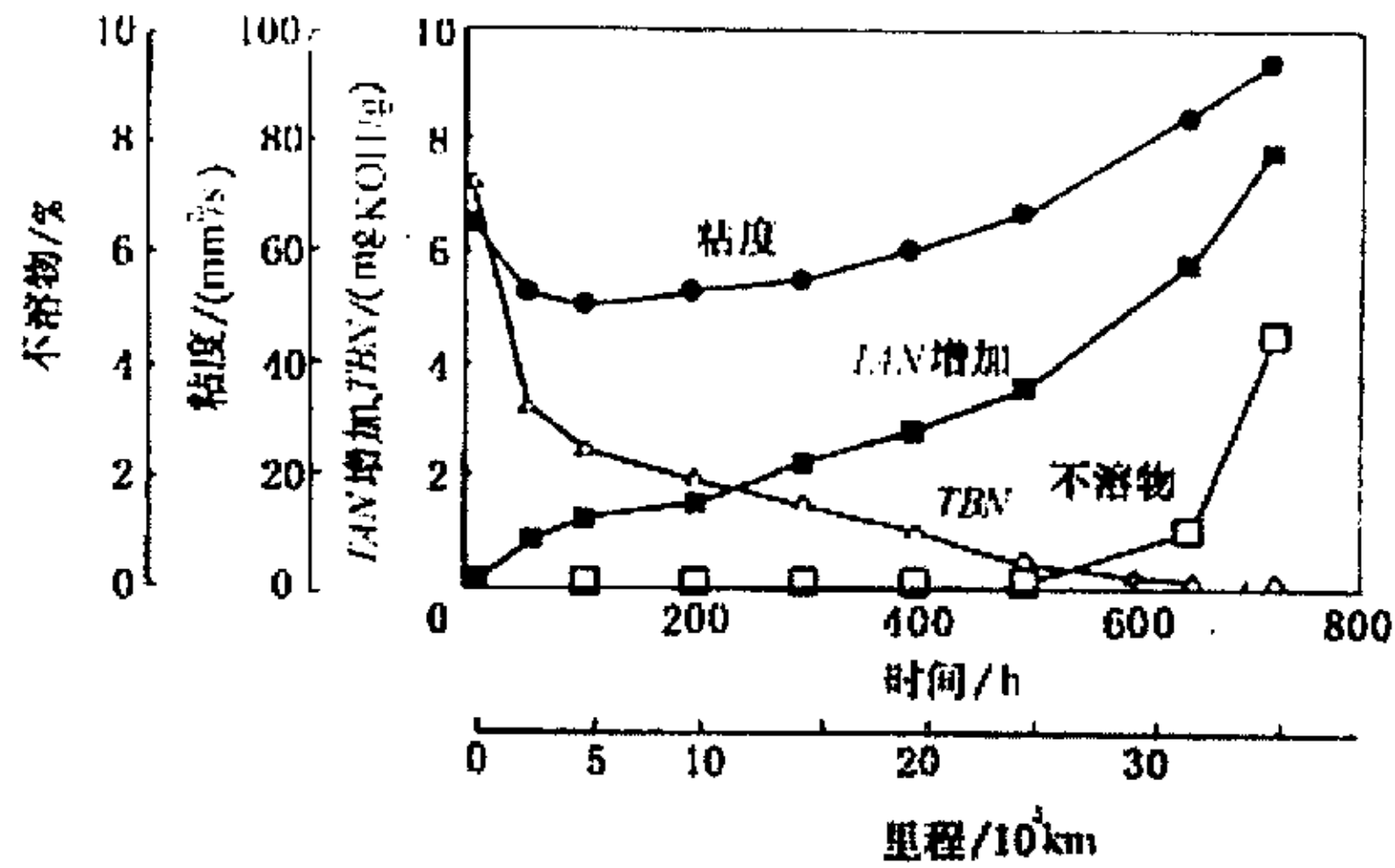


图 11 润滑油降解与指标变化

Figure 11 The lubricating oil dilution and the index

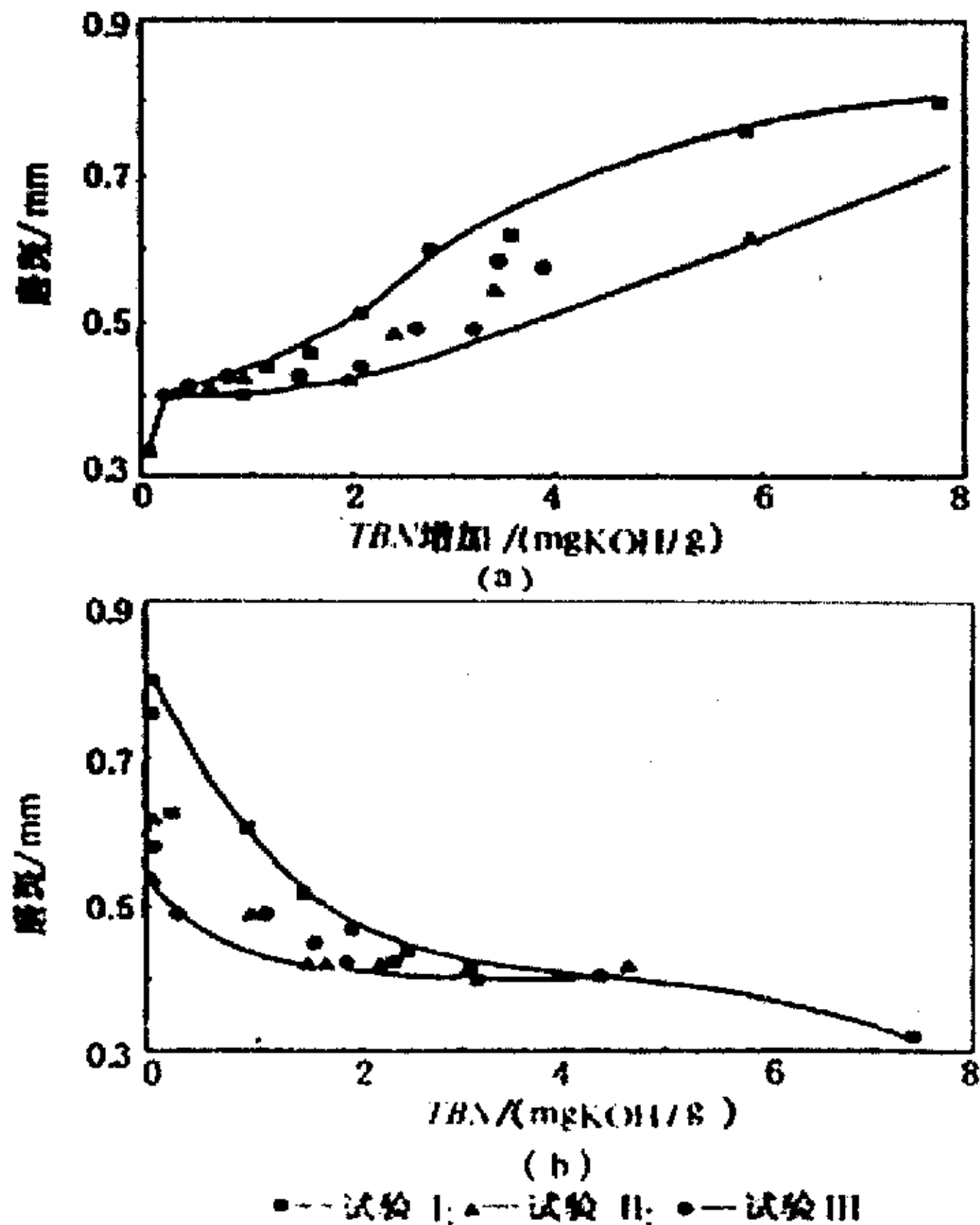


图 12 柴油机酸值上升使机器磨损增加
(a) TAN 增加与磨损的关系; (b) TBN 与磨损的关系

Figure 12 The increasing of diesel engine acid number aggravates machines wearing.
(a) The relation between TAN increasing and wearing;
(b) The relation between TBN increasing and wearing;

润滑油降解后部分活性化合物聚合而生成微小的固体物悬浮在油中，它们会堵塞滤网和油道，易使供油不畅而发生故障，一般以戊烷不溶物含量（%）表示，随油的降解其含量增加（图 11），一般控制在表 13 的量内，超过就要换油。用过的润滑油不溶物含量测定法为 GB/T8926。

Table 13 The limited index of pentane in present lubricating oil

表 13 在用油的正戊烷不溶物限制指标

项 目	HM 液压油	回转式空压机油	普通车辆齿轮油	汽油机油	柴油机油
不溶物/%	0.1	0.2	2.0	1.5—2.0	1.5—3.0

(4) 总碱值 (TBN)

发动机油含有大比例的清净分散剂有机碱金属盐类，都带有强碱性，其作用是中和润滑油，在使用中这种添加剂不断消耗，碱值也就不断下降，降到一定程度其中和能力不足时就要换油。润滑油的总碱值测定有行业标准方法 SH/T0251。

3.2 润滑油的降解使性能下降

润滑油在使用中降解除了理化指标变化外，其使用性能不断下降，其一是最低抗氧能力，油的降解主要是氧化反应，所以油的抗氧性能是最主要的性能。研究表明，润滑油在使用中抗氧能力，再经较长时间，此值再度下降，油就很快变坏，不能保证基本功能，就需要换油。其他主要性能如抗磨性及清净分散性都有相似的规律，都有突变性。我们找到突变的拐点，此时应是科学的换油时机，但由于此拐点的数值随润滑油的组成、设备类型、使用条件的不同而变化，没有一个通用值，在实际上很难操作，因而在故障诊断上较少应用。

3.3 润滑油在设备内零件表面形成沉积物

润滑油在运行中不断降解，除了本身性能降低外，还在零件表面生成各种沉积物，这些沉积物给设备的正常工作造成障碍，严重时造成大的故障。由于生成的沉积物类型和严重程度与温度的关系密切，我们可从事事故现场沉积在设备某些部位的由润滑油生成的沉积物性质及严重程度，了解事故前后设备工作时这些部位的温度状态，从而分析事故原因，这些沉积物的简况如表 14，沉积物生成机理示意图如图 13。

1999 年末一台凌志小汽车在高速行驶时死火，再也动不了，打开发动机检查发现阀室及活塞沉积物堆积严重，活塞环粘结，初步怀疑可能用了劣质润滑油或换油不及时，但检查后否定了这一原因。若润滑油质量正常时能发生如此严重的沉积，只能是发动机的工作温度非常高，而造成高温首先想到的是冷却失效，检查水箱冷却液很满，再检查发现冷却液泵皮带断裂，终于找到故障的真正原因是冷却液泵停转使机内温度过高而胀死。1989 年某市一台英国产大功率中速筒状活塞柴油机发电机组，运行时其十六缸的柴油机中两组连杆轴承烧死，主轴断裂，机械检查断裂处未发现机械缺陷，而抱死的轴

瓦表面合金有熔化流动现象，有炭状沉积物，显然事故前此处温度高于合金熔点，主轴断裂是由于此两个轴承烧死而另外几个缸的连杆还要转动而折断，主因是两个轴承抱死，而轴承抱死的原因是什么？首先考虑的是供油不足造成干摩擦导致至高温，检查发现主轴的油道被大量沉积物堵塞大半，这主要是供油不足的原因，而造成油道内沉积物多的原因是所用的润滑油高温清净性欠佳，后来按建议选用另一品牌机油后再没发生此类事故。某市一台德国造的中速筒状活塞柴油机运转中三个连杆瓦同时烧毁，怀疑是润滑油的质量问题，但检查未烧瓦的另几缸的连杆瓦表面润滑良好，表面无沉积物，这几个瓦中间油道设计与烧毁的瓦有明显差别，与德方联系，原来出事的瓦是他们改良的设计，技术不成熟，事故损失由他们承担。

还有一种常见的情况，就是发动机使用较低档的润滑油时运转正常，换用高档油后不久，发现油色变黑快，油中沉积物多甚至堵塞滤网，用户因而怀疑高档油质量不如低档油。原因是原有润滑油由于质量低而在发动机体有关表面内生成大量沉积物，换用清净性好的高档油后会使这些沉积物疏松而脱落，掉在油中而产生上述情形，应是好现象，只须把含有大量沉积物的油换掉，再换新油后就会更好。表 15 是油泥造成事故实例。

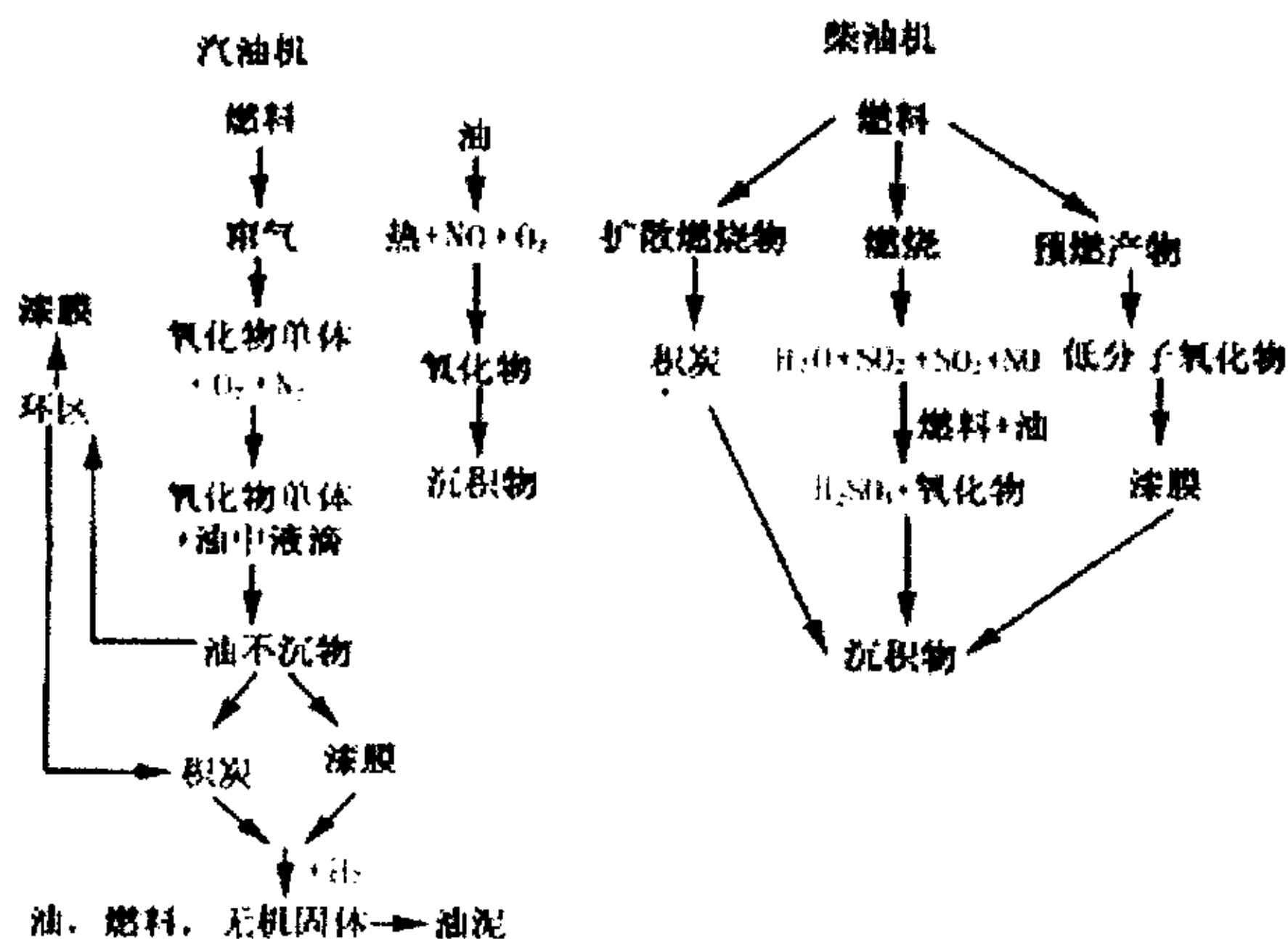


图 13 内燃机油沉积物生成机理

Figure 13 The building mechanism of oil deposit in internal-combustion engine

Table 14 The deposit on the equipment caused by lubricating oil

表 14 润滑油在设备上生成的沉积物

沉积物	组成	所在部位	主要危害
积炭	润滑油的高度以炭化物	发动机燃烧室, 排气口或阀, 活塞环区同心协力热油管, 压缩机阀室	汽油机提前点火, 排气不畅, 拉缸, 磨损大, 机油耗大
漆膜	烃类的高聚物	发动机的活塞区	内燃机沾环, 冷地不良, 活塞胀死
油泥	润滑油与炭粒、水等的乳状物	油箱, 滤清器处	堵塞油道, 滤网, 使供油不畅而拉伤等

Table 15 The accident instances of present oil mud

表 15 现场油泥事故实例

项目		北美			欧洲		
		1	2	3	4	5	6
检查原因		连杆碰	油压低	油耗高	阀过度磨损	常规检查	挺杆卡住
润滑剂	摇臂罩	3.7—5.5	6.6—6.5	5.3	5.3—7.5	5.0—6.0	—0.7
	阀系	4.6—6.8	4.5—5.5	2.6	5.4—7.6	5.5—6.5	8—9
润滑剂		SF/CD	SF	SF	SF/CC	SF/CC	SF/CC
发动机	年份	1984	1984	1980	1984	1984	1983
	排量/L	5.7	5.2	3.8	2.3—2.6	2.8—2.3	1.3
	缸数	V8	V8	V6	5—6	L4	L4
里程/10 ³ km		100—116	80—96	90	40—48	56—72	64
使用条件		苛刻警车			一般		
换油期/km	实际	4000	5600	12000	9700	9700	9700
	推荐	5600	5600	12000	19000	9700	9700

3.4 润滑油中的异物污染

润滑油在运行中除了含有自身劣化而生成的沉积物及不溶物外, 还会被很多外来物污染, 其中有发动机未燃烧燃料和燃烧产物, 如汽油、柴油、烟炱、酸、水和窜气等, 有磨损的磨粒, 还有来自设备环境的外来物如尘土、水等, 它们都是故障之源, 检测油中异物种类、含量和性质, 对监测设备状态及故障预测十分重要。

1. 水份

运转的设备大都需水冷却, 发动机燃料燃烧后生成二氧化碳和水, 汽轮机的水蒸气和大气中的水, 都可能通过各种途径进到润滑油中, 降低油的性能及造成故障。润滑油中混入水有如下危害。

(1) 添加剂损失

润滑油中都含有数量不等的改善各种性能的添加剂，它们一般为有机化合物，有的遇到水会水解，有的为胶束状悬浮在油中，遇水会沉淀，有的溶于水后被水从油中“抽提”出来，这些都造成添加剂失效，使其相应功能下降。如柴油机油的添加剂配方中含量最多的是具有高碱值 (TBN) 清洁分散剂，它们大多为胶体溶液，其胶体状态有可能被水破坏，碱值下降，性能也变坏。如有人做试验，船用柴油机在 80% 额定功率下运行 100 h，被水污染的润滑油 TBN 下降了 58%，不溶物为 2.8%，而未被水污染的油 TBN 仅下降 22%，不溶物 0.7%。被水污染的润滑油比未污染的油使活塞环磨损增加二倍，活塞组沉积物生成速度增加 2~3 倍。

(2) 造成腐蚀磨损和锈蚀

润滑油中的水使零件生锈，造成腐蚀磨损。内燃机在低工况运转时，产生的水蒸气冷凝成水与燃料中的硫燃烧后生成的氧化硫相溶成酸，对金属造成严重的腐蚀磨损，所以内燃机在低工况下运转磨损反而大 (图 14)。

(3) 降低润滑能力

水把运动表面的油膜冲走，造成干摩擦。20 世纪 80 年代末某市有一台日本产的中速筒状活塞柴油机发电机组发生事故，柴油机有两个缸的活塞环严重偏磨，有一个方向已磨得很薄，而相反方向基本无磨痕，厂方怀疑润滑油的抗磨性太差所致。技术人员在现场注意到两个现象：一是无磨痕方向的气缸及环表面覆盖有厚油层，而偏磨方向表面干燥；二是活塞顶部的燃烧室凹处存有水。从环是另一半并未磨损首先肯定润滑油的抗磨性能无问题而问题在水上，推测是气缸垫片坏使冷却水窜进气缸，把缸套表面油膜冲掉造成偏磨，检查冷却系统证实判断正确。图 15 是液力传动油不同含水对其传递力矩影响。

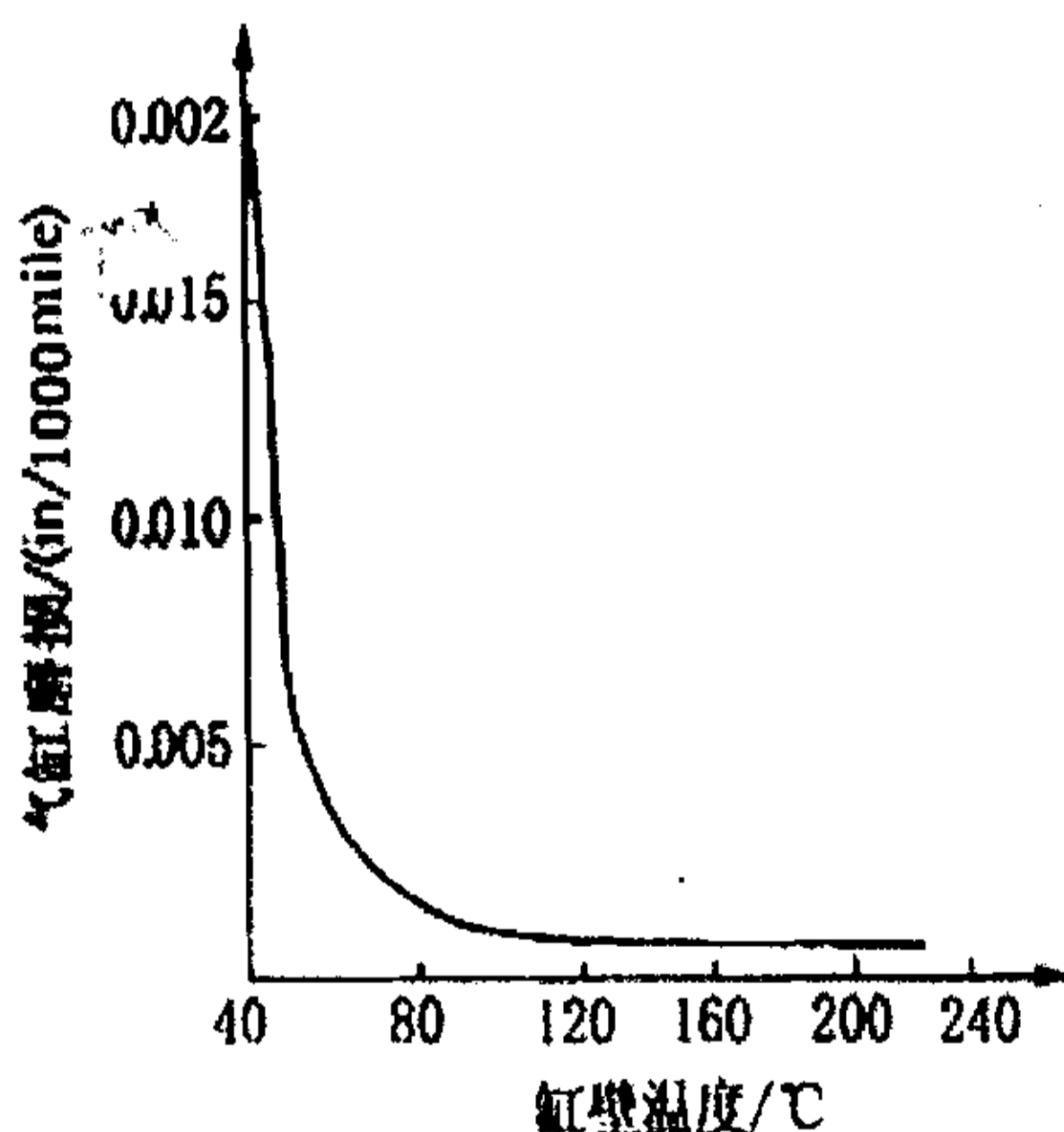


图 14 汽缸机油与温度磨损的关系

Figure 14 The relation between the temprature of cylinder machine oil and wearing.

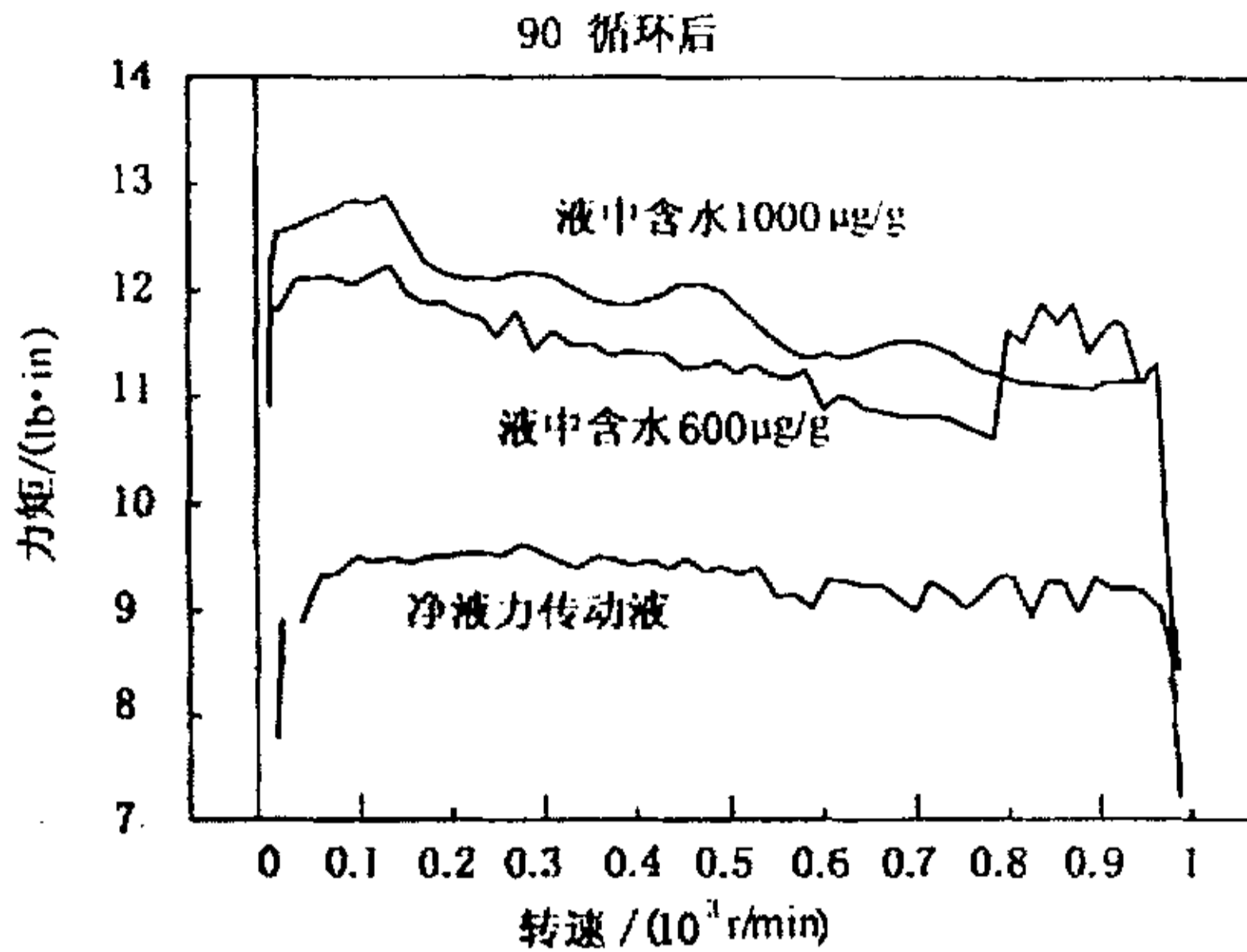


图 15 液力传动液中水含量对力矩传动的影响

Figure 15 The affection to moment transmission from the water percent of the transmission liquid

(4) 乳化和生成油泥

除了几种润滑油（液压油、汽轮机油、齿轮油、船用油等）对抗乳化性能有明确要求外，很多润滑油被水污染易乳化，润滑油性能变差。混入的水还会与油和其分污染物生成油泥，堵塞油道和滤网，使供油失效而出故障。图 16 是发动机油泥组成。

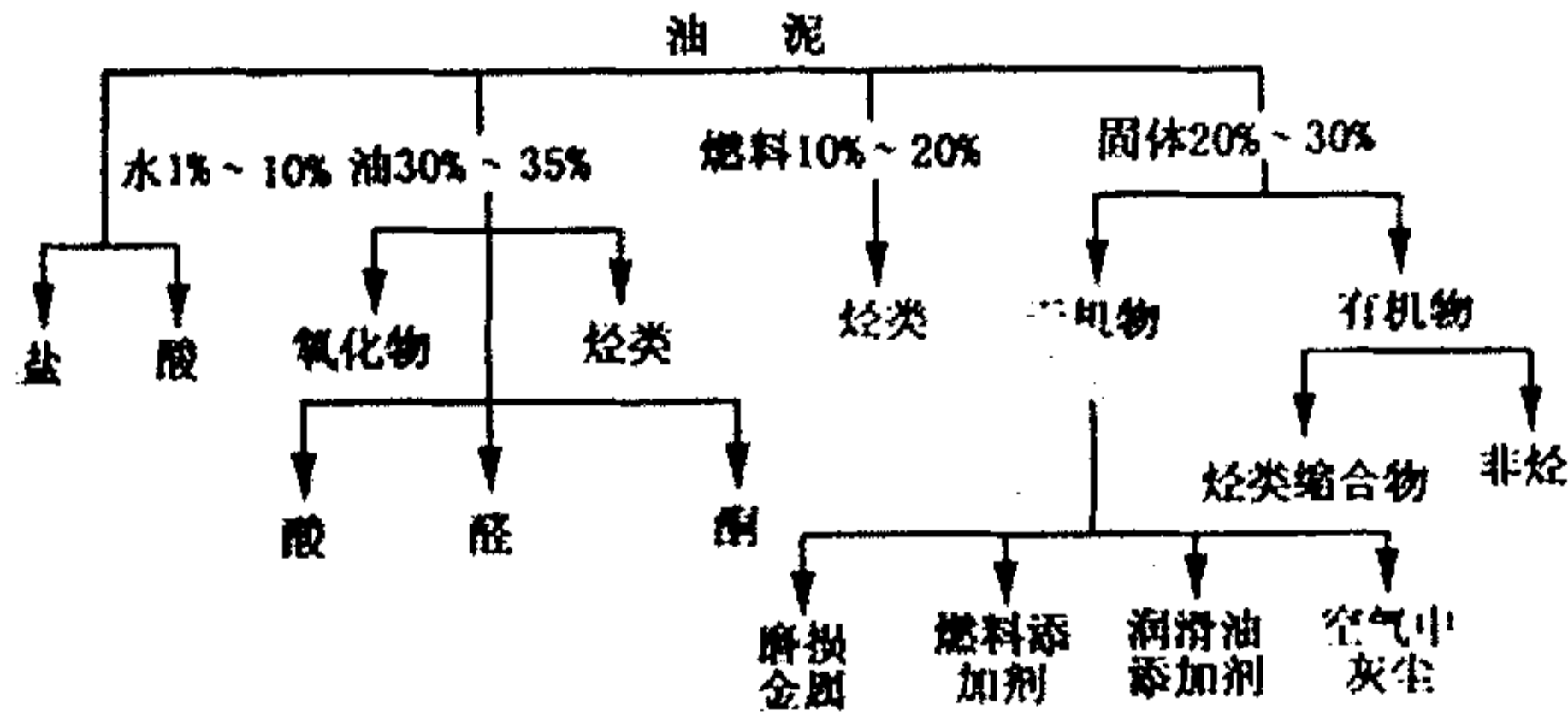


图 16 发动机中油泥的组成

Figure 16 The composition of oil mud in engine

(1) 影响润滑油的工作性能

技术人员多次接到用导热油的加热系统升温时升不上去的投诉，一般导热油工作温度为 200℃ 以上，但升至稍高于 100 再也升不上去，怀疑是润滑油质量问题。经检查，发现都是润滑油中含水所致，这些设备有新安装或检修后用水试压或冲洗，在系统中的水未清除干净时加入导热油，升温至 100℃ 后油中的水沸腾，在水蒸发干净前油温是升不上去的。对电器用油，微量水的存在大大影响油的绝缘特性，易使用电系统出故障，因而一般电器用油使用前有严格的干燥脱水和精密过滤工序。与润滑油中含水有关的测

定方法有三种：

①润滑油中的水含量测定方法，国标 GB/T260。润滑油中有水时其外观大多浑浊。

②抗乳化性能。除了测润滑油中水含量外，某些润滑油还要求另一指标即抗乳化性能，表示油水分离的能力，在有些润滑油的应用场合，总是会有水进到润滑油中，要求润滑油应尽快与水分层而不能乳化，让油水分离系统把水除去。如液压油、汽轮机油、工业齿轮油和船用柴油机油等都有这一要求，其试验方法为 GB/T7305（船用柴油另有方法），测定时把润滑油和水各 40mL 在特定温度下搅拌一定时间后静置开始计时，以分离到 40mL 水/37mL 油/3mL 乳化层时的时间（min）为指标。

③水解稳定性。润滑油中的添加剂遇到水会水解而失效，专有一个表征添中剂此性能的指标，称水解安定性，试验方法为 SH/T0301。

1、燃料，烟炱

发动机的汽油和柴油由于雾化不良而未燃烧，会流到润滑油中，稀释润滑油，参与生成润滑油泥及破坏添加剂，使设备磨损增加，产生故障。润滑油中的燃料也对某些添加剂有破坏作用，一般可从润滑油的粘度和闪点下降中测出。闪点测定有国家标准方法 GB/T3536。G 一般汽油闪点低于 10℃，煤油为 28~40℃，轻柴油为 45~65℃，而润滑油绝大多数大于 200℃，它被燃料稀释后闪点明显下降。表 16 是 300CC 油被不同比例的柴油稀释后其闪点和粘度变化情况。

表 16 300CC 柴油机油被柴油稀释后其闪点和粘度变化实例

柴油漏入 10%	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
开口闪点℃	244	242	236	235	228	214	208	198	188
粘度(100℃) mm ² /s	11.67	11.22	10.75	10.60	9.36	9.12	8.05	7.43	7.0

发动机尤其柴油机燃烧后会产生微小碳状物称烟炱，也会混入到润滑油中产生坏作用。多年来发动机的技术进步主要围绕二个主题：节能和减少排放，近年来负荷柴油机采用排气回循环（EGR）装置可大大改善排放，但使润滑油中烟炱含量增加（图 17），而润滑油中烟炱给发动机带来很多害处：

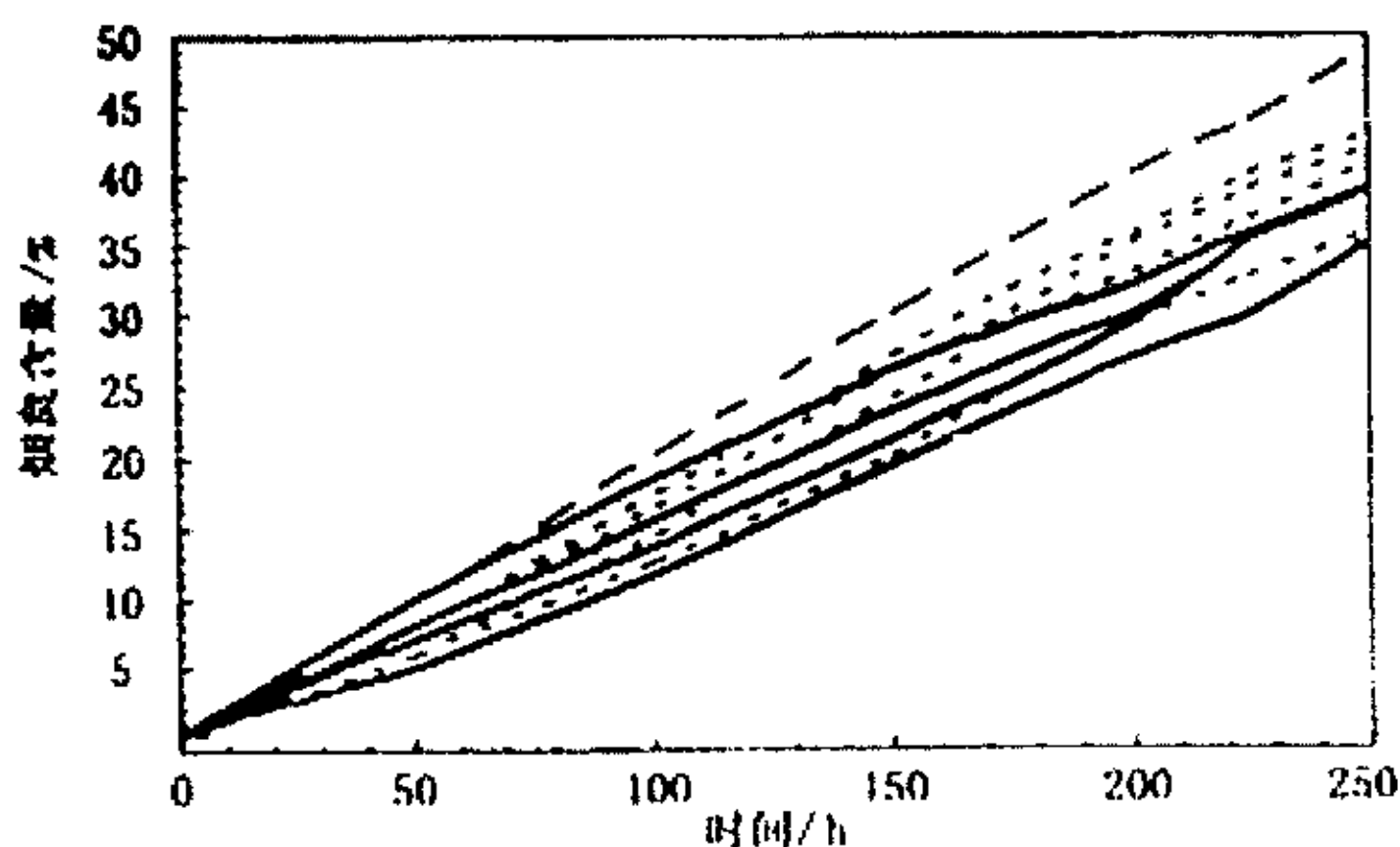


图 17 发动机运行时间与润滑油中烟炱含量
——发动机 A；——发动机 B；——发动机 C

①使润滑油粘度增加，在含量达到一定值（例如大于 3.5%）后粘度快速上升（图

18), 使润滑油流动性差, 因供油不足而造成的故障。

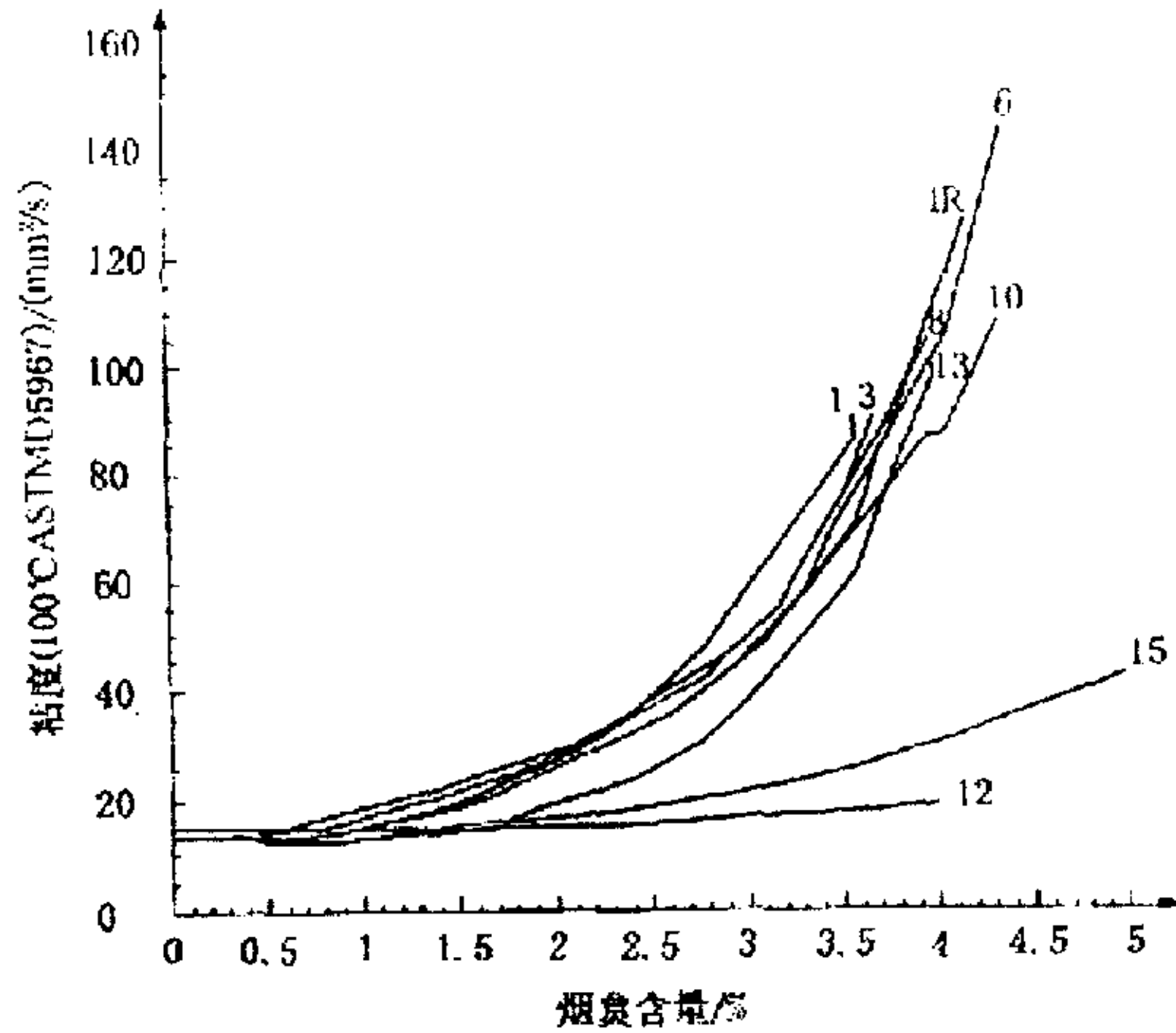


图 18 润滑油中烟炱含量与粘度关系
(图中数字为试油编号)

使磨损增加。一方面烟炱的颗粒较大(图 19), 可作为磨料而造成磨损, 另一方面它吸附了一些燃料燃烧后的酸性物, 当它吸附在金属表面时会造面腐蚀磨损, 因而含在烟炱的润滑油对发动机的阀系、气缸表面磨损严重(图 20)。表 17 是 Mack T-8 柴油机试验中润滑油的烟炱对粘度和磨损的影响。

表 17 MackT-8 柴油机试验中润滑油的烟炱含量与粘度和滚动随动轴的磨损

油样序号	分散剂水平/%	$v/v_0(100^\circ\text{C})$	$v/v_0(45^\circ\text{C})$	烟炱含量/%	平均磨损/ μm
3	4.8	1.78	1.78	5.8	0.59
8	4.8	2.26	2.17	7.0	5.8
12	4.8	1.40	1.52	6.1	0.50
15	4.8	2.23	2.86	10.1	0.58
1	1.2	2.3	1.68	4.3	0.53
6	1.2	4.13	2.45	6.6	1.31
10	1.2	4.28	2.63	8.0	1.26
13	1.2	5.05	2.94	9.5	0.81

烟炱含量无特定测定方法, 可通过测不溶物法及沉淀物(SH/T 0473)法或显微镜观察得知。

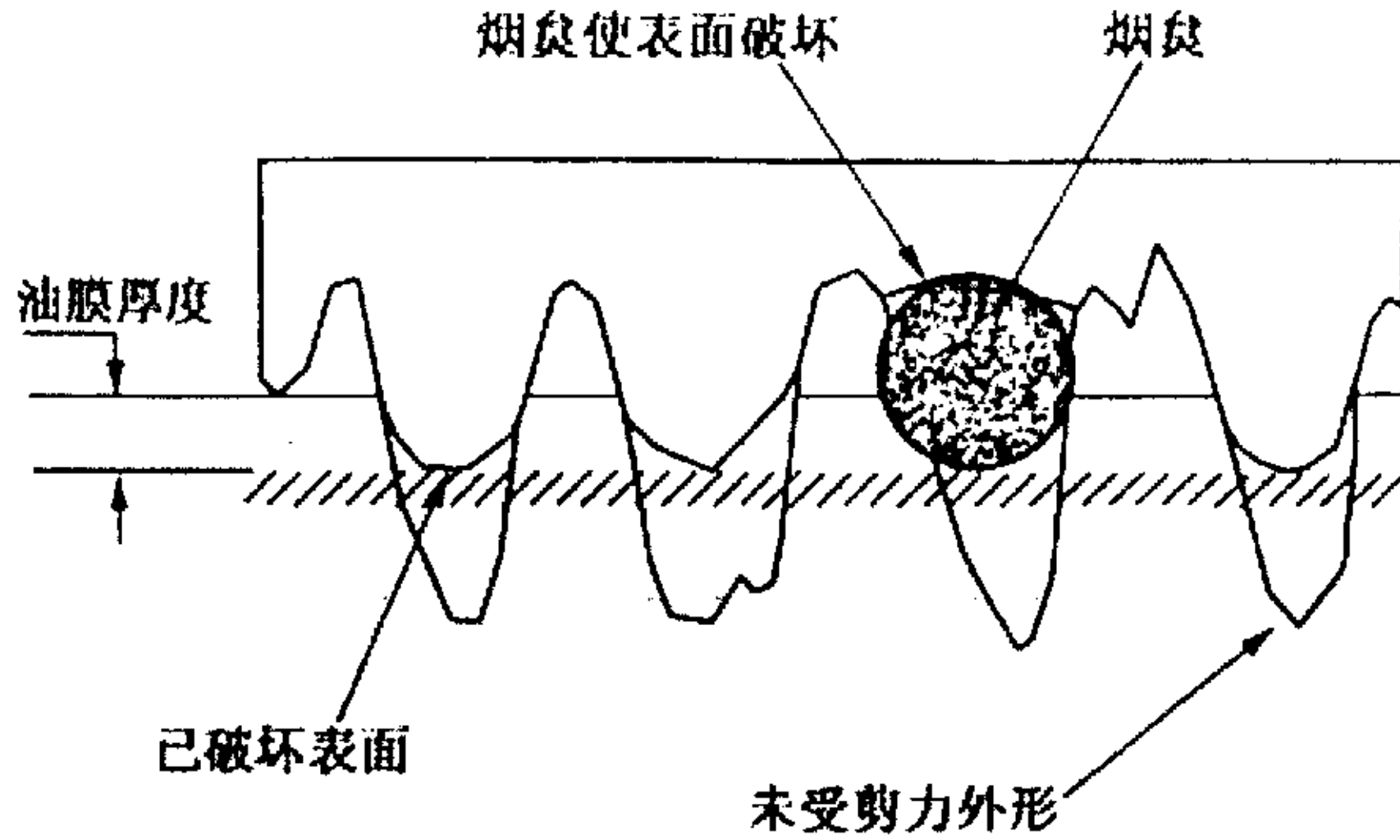


图 19 润滑油中烟炱使金属表面破坏



图 20 润滑油中烟炱含量对缸套磨损的影响

3. 灰尘和杂物

设备和车辆所处环境灰尘大时，各种颗粒也会进到润滑油中。这些杂物中的很多硬颗粒造成设备不同程度的磨料磨损，其他杂物也会堵塞油孔、油道和滤网，造成供油障碍而发生恶性事故。我国某机车厂 1983~1985 年修东风 4 柴油车 289 台，发生磨料磨损而损坏的缸套 234 个，占 5.8%，机油的杂质中砂粉占 59.69%，纤维状物 18.94%，金属粉末 18.91%，其他 2.46%，可见灰尘之大。又如资料显示，哈密机务段为多风沙地区，风沙季前后润滑油中硅的含量相差巨大（表 18），也因此造成大量故障（表 19）。不同大小的灰尘颗粒影响不同，太大的颗粒进不到摩擦表面之间，一般 10~40μm 的颗粒能造成显著磨损，灰尘量和颗粒大小对发动机磨损的影响如表 20、表 21。润滑油中杂物多除了造成故障外，也表明设备的过滤系统有故障。有人认为，液压系统故障中有 70%~80%是由于液压介质不清洁所造成的。污染物对液压元件的影响如表 22。

表 18 大风前后润滑油的光谱分析数据比较

序号	车号	检测日期	修程	光谱分析/ (ug/g)		评定
				铁	硅	
1	1112	1998. 2. 19(风前)	F2	3. 18	4. 13	正常
		1998. 3. 18(风后)	中检	665	229	危险
2	0178	1998. 3. 5(风前)	中检	16. 0	5. 38	正常
		1998. 3. 18(风后)	F7	331	145	危险
3	7276	1998. 3. 13(风前)	F1	15. 6	15. 9	正常
		1998. 3. 24(风后)	跟踪	118	52. 6	危险
4	0423	1998. 3. 9(风前)	X2	10. 7	14. 4	正常
		1998. 3. 26(风后)	跟踪	113	66. 3	危险

表 19 柴油机典型故障预报与检查一览表

序号	车号	预报日期	状态	拆检日期	故障情况	措施
1	1112	1998. 3. 18	危险	1998. 3. 26	活塞环磨损严重, 侧隙大于 0. 32mm5 个, 大于 0. 30mm7 个	更换活塞缸套
2	0151	1998. 4. 21	注意	1998. 5. 8	8 缸活塞碎	更换
3	3399	1998. 3. 24	注意	1998. 3. 26	环侧隙大于 0. 30mm14 个	更换
4	0751	1998. 4. 1	注意	1998. 4. 13	环磨损严重 12 个	换活塞缸套
5	1279	1998. 4. 7	危险	1998. 4. 23	环磨损严重 11 个	换活塞缸套
6	1009	1998. 4. 23	危险	1998. 6. 8	活塞到限 12 个, 缸套到限 2 个	更换不良活塞缸套
7	6146	1998. 4. 27	危险	1998. 5. 8	活塞到限 14 个	更换
8	7505	1998. 4. 28	危险	1998. 5. 23	活塞到限 14 个, 缸套到限 9 个	更换
9	3498	1998. 5. 8	注意	1998. 6. 1	活塞到限 14 个	更换
10	7213	1998. 5. 6	危险	1998. 5. 26	活塞到限 14 个, 缸套到限 10 个	更换
11	1013	1998. 5. 12	注意	1998. 5. 26	活塞到限 8 个, 缸套到限 6 个	更换
12	0423	1998. 3. 26	危险	1998. 4. 13	活塞到限	更换
13	9285	1998. 3. 26	注意	1998. 4. 15	环侧隙过大	整修
14	7125	1998. 3. 27	危险	1998. 3. 30	4 缸一、三环碎, 缸套磨损大于 0. 42mm	提前厂修

表 20 进入发动机的灰尘量对某发动机磨损的影响

灰尘量/ (mg/min)	环磨损 (mg/h)	缸套磨损/ (mg/h)
0.5	0.06	0.54
2	0.28	1.44

表 21 外来物颗粒大小对磨损影响 (3.7L6 缸发动机试验)

颗粒尺寸/ μm	0~5	10~20	20~40
灰尘量/ (g/h)	1	1	1
时间/h	8.333	8.333	8.333
灰尘总量/g	8.333	8.333	8.333
漏气增加%	23	18	13
气环间隙增加/mm	0.5	0.55	0.5
缸径增加 (顶) mm	0.025	0.045	0.010
轴承失重/g	0.263	0.550	0.715
连杆轴承失重/g	0.271	0.387	0.357
轴承油流量增加/%	28	106	152
缸径增加 (中) mm	0.70	0.130	0.065
缸径增加 (底) mm	0.035	0.070	0.040
油环间隙增加/mm	2.2	2.5	2.1

表 22 污染物对液压元件的影响

元件	损 害 情 况
泵	冲蚀和划伤齿轮泵的减流板
	叶片泵的叶片卡死, 使动作不符合要求
	轴、滑动和滚动轴承磨损加快
	使柱塞、滑块、叶片等磨损增加, 液压压力下降, 效率减低
	配流盘磨损
溢流阀	导致自激振荡
	溢流阀失灵, 系统压力欠稳
	阀座磨损
方向阀	堵塞节流孔, 能量传递受限制
	阀芯和阀体磨损, 造成泄漏
	阀芯卡滞使电磁体失灵
	产生冲击负荷, 损坏软管, 接头

此外, 润滑油在储运及换油中由于机体及用具清洗较差而使油污染, 会影响润滑油的重要性能, 如汽轮机油、抗磨液压油等被污染后, 其抗乳化性能、空气释放性等会大受影响。

润滑油中杂物一般以机械杂质的指示表示, 测定方法 GB/T511.。国外有的行业制定润滑油的污染 (洁净度) 等级, 衡量润滑油被固体颗粒污染程度。应用较广的有 NAS1638 (表 23, 表 24) 和 SAE749D (表 25), 前者为飞机制造业采用, 后者为美国汽车工程师

学会 (SAE) 和美国材料与试验协会 (ASTM) 采用, 国际标准化组织统一为 ISO 4406, 如表 26。一般润滑油系统的要求如表 27。

表 23 NAS1638 污染度等级 (计数法, 每 100ml 油中污物粒数)

污染物粒 径/ μm	等 级						
	00	0	1	2	3	4	5
5~15	125	250	500	1000	2000	4000	8000
15~25	22	44	88	178	356	712	1425
25~50	4	8	16	32	63	126	253
50~100	1	2	3	6	11	22	45
>100	0	0	1	1	2	4	8

污染物粒 径/ μm	等 级						
	6	7	8	9	10	11	12
5~15	16000	32000	64000	128000	256000	512000	1024000
15~25	2850	5700	11400	22800	45600	91200	182400
25~50	506	1012	2025	4050	8100	16200	32400
50~100	90	180	360	720	1440	2880	5760
>100	16	32	64	128	256	512	1024

表 24 NAS1638 污染等级 (重量法)

等级	100	101	102	103	104	105	106	107	108
污染物	0.02	0.05	0.10	0.30	0.50	0.70	1.0	2.0	4.0

表 25 SAE749D 污染等级 (计数法, 每 100ml 油中污物粒数)

污染物粒 径/ μm	等 级						
	0	1	2	3	4	5	6
5~10	2700	4600	9700	24000	32000	87000	128000
10~25	670	1340	2680	5360	10700	21400	42000
25~50	93	210	380	780	1510	3130	6500
50~100	16	28	56	110	225	430	1000
>100	1	3	5	11	21	41	92

表 26 ISO4406 油污染分类 (每 ml 油中颗粒数)

等级号	颗粒数	等级/号	颗粒数	等级/号	颗粒数
24	80000~160000	16	320~640	8	1.3~2.5
23	40000~80000	15	160~320	7	0.64~1.3
22	20000~40000	14	80~160	6	0.32~0.64
21	10000~20000	13	40~80	5	0.16~0.32
20	5000~10000	12	20~40	4	0.08~0.16
19	2500~5000	11	10~20	3	0.04~0.08
18	1300~2500	10	5~10	2	0.02~0.04
17	640~1300	9	2.5~5	1	0.01~0.02

表 26 各润滑油系统要求的清洁度

系 统	SAE 级	ISO 4406
罕见清洁	0~1	13/11
非常清洁	2	14/13
液压系统	3~4	15/13~16/14
汽轮机发电系统	4~5	16/4~17/15
一般润滑系统	5	17/15

4. 进入空气

在润滑油中的空气有三种存在的形式：自由空气、进入空气和溶解空气。自由空气随润滑油的流动而进进出出；进入空气指空气在润滑油中以气泡形式稳定地存在；润滑油在常温常压下一般含有 7%~8% 的溶解空气，溶解空气对造成设备故障并无作用，但由于系统的温度和压力变化时使溶解度下降，溶解空气析出，在润滑油表面形成泡沫，在润滑油中形成微泡，就会有危害。润滑油在流动或搅动中也不断夹带进空气，又不断释放出来，对设备有危害的是以稳定状态存在于润滑油中的空气，它们主要对设备有如下危害。

- ① 使油泵抽空, 造成供油失效;
- ② 空气的可压缩性使液压系统工作不稳, 易出故障;
- ③ 产生噪音;
- ④ 使泵体发生穴蚀, 磨损增大;
- ⑤ 使油温升高, 加剧氧化, 减少润滑油润滑寿命;
- ⑥ 造成油的假液面, 易于泄漏;

人们从外观易于感知泡沫, 却不知存在于润滑油内的微泡有更大的危害, 因而润滑油的指标中有专有“空气释放值”项目, 测润滑油中空气释放的快慢, 而改善润滑油的抗泡性能的添加剂以改善空气释放值往往有反作用。表 28 是几类润滑油规格中对其要求例子。

表 28 几类润滑油规格中对抗泡和空气释放值要求

项目		欧洲规格 内燃机油	车辆齿轮油 L-2105E	抗磨液压油 HM	汽轮机油 DIN51515
抗泡要求(稳 向/稳定 性)/(ml/ml)	前 24℃	10/0	20/0	100/10	—
	94℃	50/0	50/0	100/10	—
	后 24℃	10/0	20/0	100/10	—
	150℃	100/0	—	—	—
空气释放值 /min	N32	—	—	5	5
	N46	—	—	5	5
	N68	—	—	7	6
	N100	—	—	10	—

润滑油的抗泡性能测定有国家标准 GB/T12579, 要测三个油温下的抗泡性: 前 24℃, 93℃, 后 24℃, 表示为“泡沫倾向 ml/泡沫稳定性 ml”。润滑油的空气释放值测定

方法为行业标准 SH/T0308, 单位为 min.

造成空气能在润滑油中稳定存在的原因：一是润滑油的质量，润滑油中的添加剂很多是表面活性剂，可使泡沫稳定，所以做配方研究时一定要考虑消泡问题；二是设备原因，若其构造不合理或密封受损使空气不断进到润滑油中，也使泡沫增多；三是润滑油受污染，在储运或操作中被某些化学活性物污染。

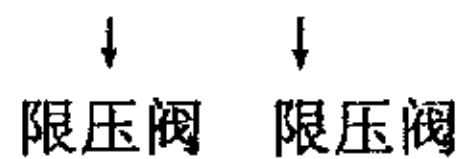
5. 其他污染

润滑油换油时旧油放不干净，使残存的旧油污染新油，旧油中的氧化产物加速新油的降解。由于工作失误，有时在补加油时加入不同品种或不同品牌润滑油到原用油中，由于添加剂配方差异，造成润滑油变质。新设备或设备大修后往往用水、燃料或清洗剂等冲洗内部，若这些清洗介质排不干净就加润滑油进行试运转，这些残存的介质污染润滑油，使润滑油性能变差。

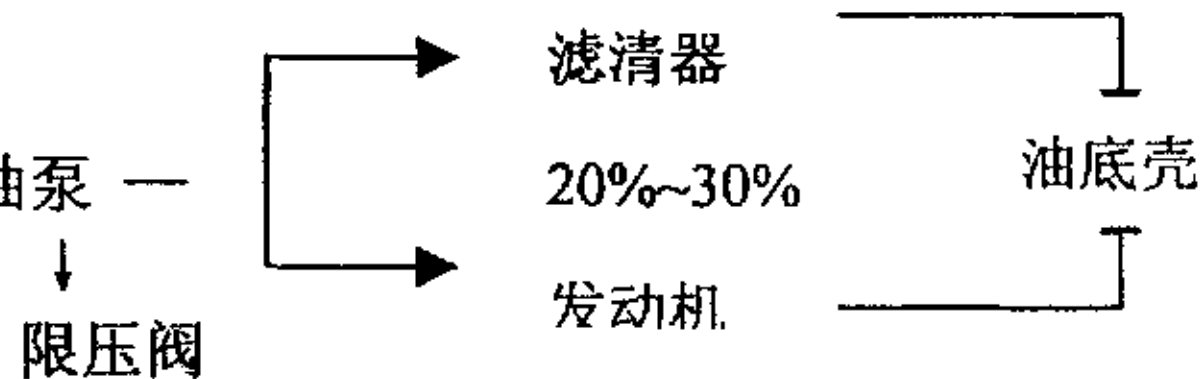
3.5 润滑油的过滤系统

为了减少受固体物污染的润滑油对设备的危害，设备都有一套有效的过滤系统，越精密的设备，过滤系统要求也越严格。图 21 是发动机的几种滤清器典型配置，不同配置的发动机各部分的磨损也各异（图 22，图 23）。润滑油中磨粒较多或固体物多时，应考虑滤清系统是否失效的问题，有些设备在重要的滤清器前装有油压表，当固体杂质过多导致堵塞严重使油压升至某值时发出警告，需清洗滤网。滤清器选用时首先考虑的是过滤精度，它是过滤材料最大微孔尺寸的量度。但精度也不是越高越好，还要考虑其他几方面，如油的流通能力、压降、纳垢容量、对各种流体介质的相容性和拆装清洗的方便程度等。一般来说，运动偶件的配合间隙越小，则要求过滤精度越高，如表 29 所示。

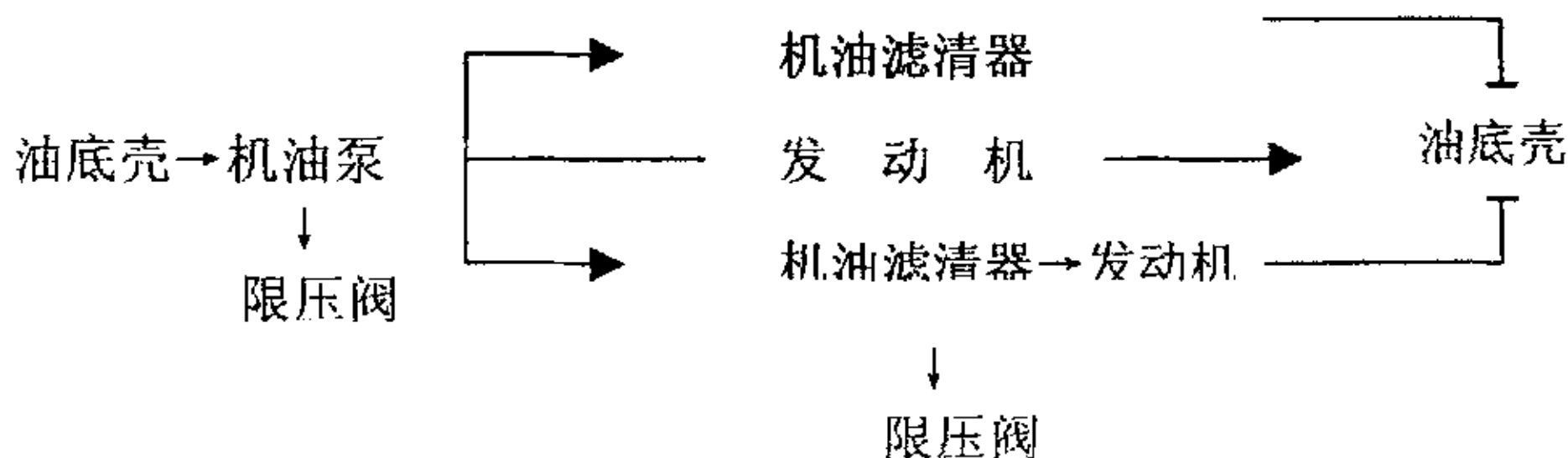
1. 全流式滤清器：油底壳→油泵→滤清器→发动机→油底壳



2. 旁通式滤清器：油底壳→油泵→



3. 合系统：即全流和旁通联合系统。



4. 独立系统：在有些情况下，除上述系统外，也有使用从油底壳吸油的辅助机油泵，把机油送到另一个机油滤清器，然后直接再循环到油底壳的。

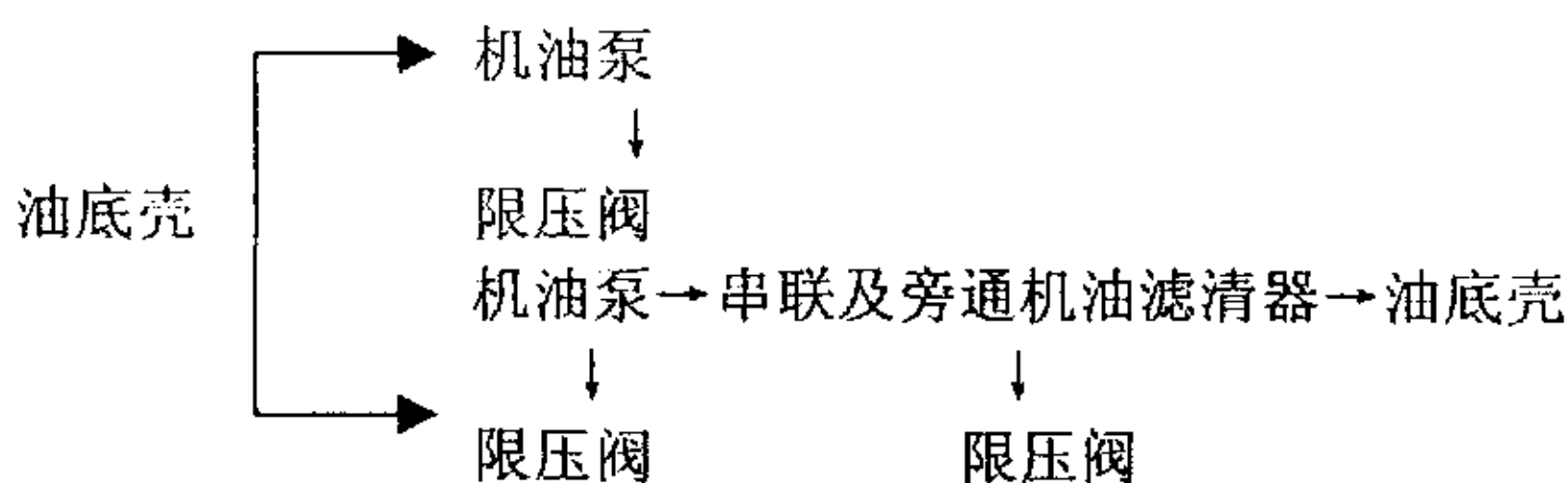


图 21 发动机的过滤系统

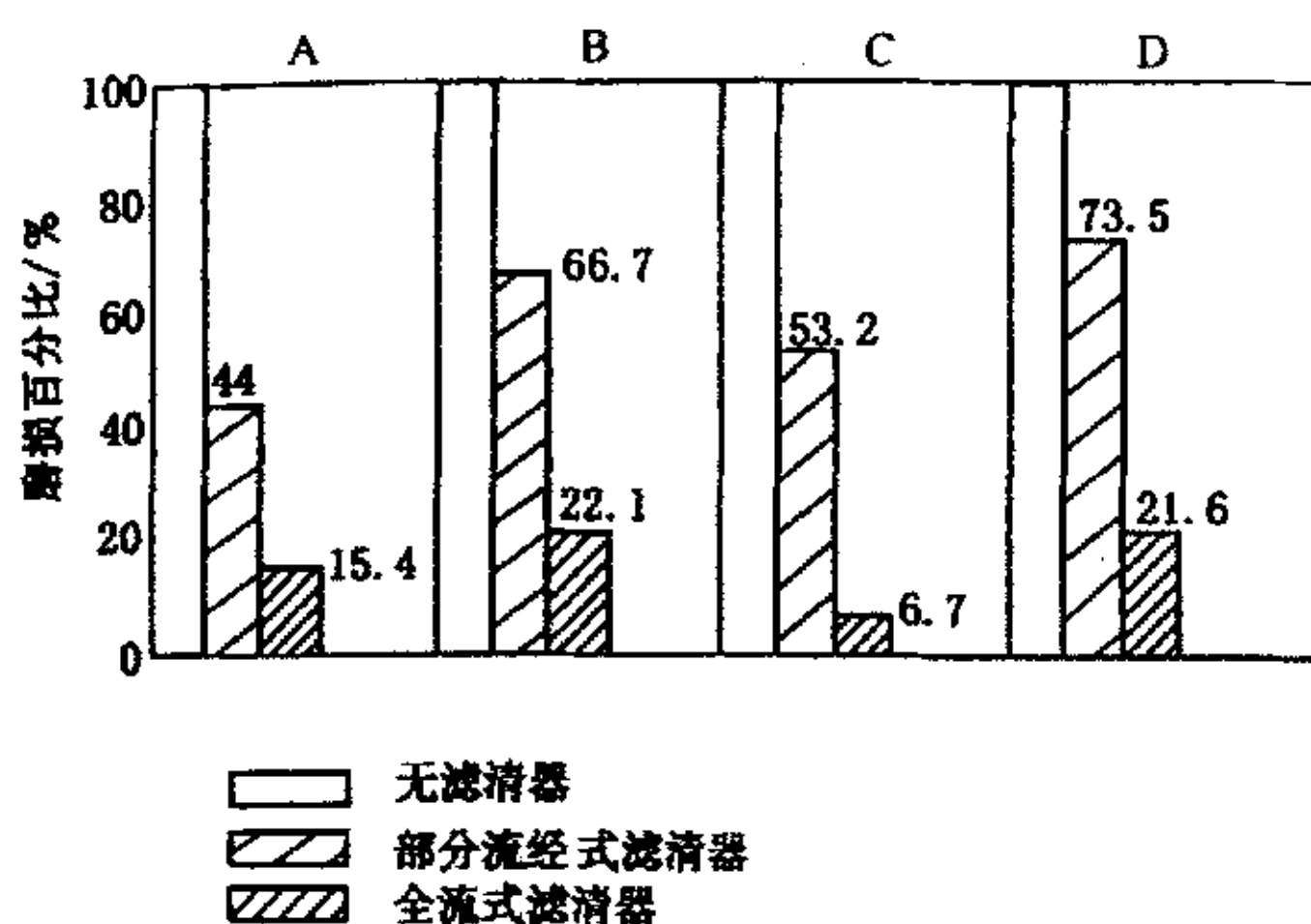


图 22 发动机磨损与润滑油过滤系统关系的试验
 A——筒磨损； B——主轴承磨损；
 C——连杆轴承磨损； D——活塞磨损

表 29 液压系统过滤要求

系 统	过滤精度/ μm
低压工业液压系统	150~100
7MPa 以下工业液压系统	50
7~10Mpa 工业液压系统	25
10Mpa~14MPa 工业液压系统	
往复运动	15
速度控制装置	10~15
机床进给	10
14~20Mpa 重型液压系统	10
带电液伺服阀	5~2.5
带精密电液伺服阀	2.5

美国的一个车队专做了换油和换滤清器的对比试验，情况如表 30，表 31。试验每组行驶 48000km，从结果看，即使使用润滑油的质量高（如 CD 级油），按期换油和换滤清器，磨损也明显比用低档油（CC 油）高。

表 30 发动机换机油和换滤器对磨损的影响

润滑油级别	CC	CC	CD
换油和换滤清器	每 60d 换	不换	不换
进气阀杆磨损/10-4in ^①	31	90	57
排气阀杆磨损/10-4in	17	44	33
环间隙增加/10-3in	20	30	28
挺杆磨损/mm	10	144	144

① 1in=25.4mm, 下同。

表 31 机油滤清器对发动机磨损的影响

项目	相对磨损			
	气缸	曲轴颈	连杆轴承	活塞
无滤清器	100	100	100	100
有旁通滤清器	44	66.7	53.2	73.5
有全流滤清器	15	22.1	6.7	21.6

从表 31 看出，滤清器对减少磨损的效果非常明显。对抗磨液压油还专有一个指标，称过滤性，评定其在水存在下通过滤清器的顺畅程度，单位为 s。

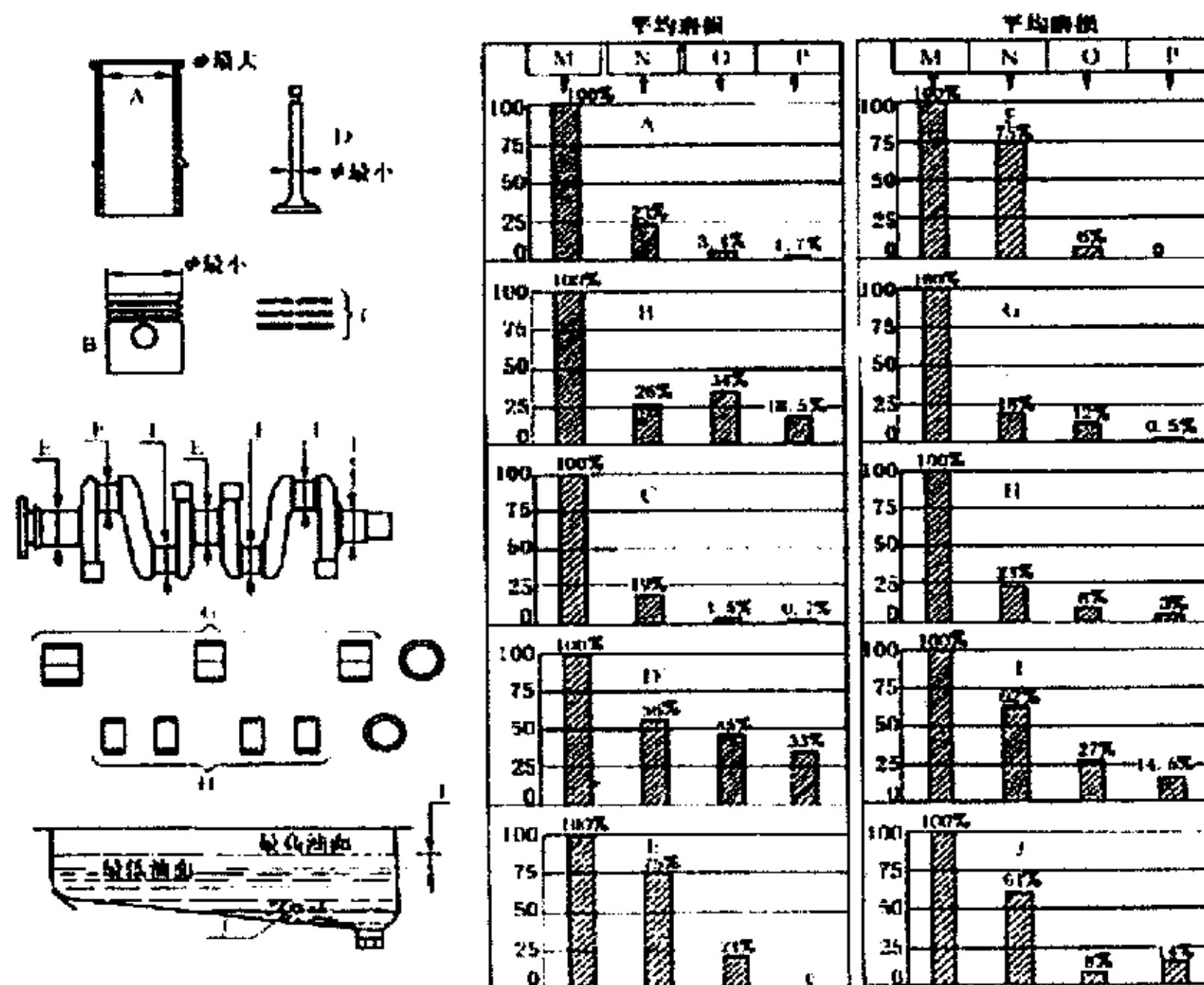


图 23 润滑油和空气过滤对发动机磨损的影响

A—气缸；B—活塞；C—连杆；D—曲轴；E—连杆轴承；M—曲轴；N—连杆轴承；O—气缸；P—活塞；
 A—机油滤清器；B—机油中的杂质；C—旁通滤清器；D—旁通滤清器和旁通式机油滤清器；
 E—旁通滤清器和全流式机油滤清器

图 23 润滑油和空气过滤对发动机磨损的影响

3.6 润滑油与橡胶密封件的相容性

设备的弹性体（很多为各种材料的橡胶）密封件损坏是常见的故障之一，大都认为是密封件材料及其设计的问题，其实与润滑油的质量关系很大。很多橡胶密封件材料与润滑油不适应，在润滑油的长期浸泡下其硬度、体积、弹性变化大，使其密封不良和强度变差而损坏，因此，很多润滑油品种的规格中都有橡胶相容性指标，规定把特定的几种密封件材料试件浸泡在润滑油中，在规定的油温中经规定时间后，试件的体积、硬度、弹性等的变化应在规定的范围内，此油才合格。目前，抗磨液压油、液力传动油、美军规格的车辆齿轮油和欧洲规格的内燃机油都有此项要求。表 32 是一些润滑油在这方面要求的举例，基础油的性质和添加剂配方对不同材料的橡胶密封件的敏感性不同。做润滑油的配方研究时，不但考虑主要性能能否达到要求，还要考虑对此类设备的密封材料能否相容。因此在密封件损坏较频繁时不但考虑密封件的材料及设计的原因，还要考虑润滑油对密封件的相容性。

表 32 一些润滑油对橡胶密封件的相容性要求

名称规格品种	密封件材料	张力 强度/%	长度/%	硬度/点	体积/%
车辆齿轮油 MIL-L2104E	聚丙烯酸酯		-60	-25~+5	-5~+30
	氟橡胶		-75	-5~+10	-5~+15
液力传动油 DEXRONIII	聚丙烯酸酯 (A)			-8~+1	5~12
	Nitrile			-3~+6	1~6
	聚丙烯酸酯 (C)			-4~+4	2~7
	氟橡胶			-5~+6	0.5~5
	硅橡胶			-30~+13	23~45
	乙丙橡胶			-17~+7	13~27
抗磨液压油 DIN51524P2 N46	专有品种				
重负荷柴油机油 ACEA E4-99	专有品种	-45~+10	-20~+10	-25~1	-1~+30

试验方法，每类油的试验条件各不相同，故不能对比。

3.7 本章总结

润滑油在使用中由于降解理化指标变化，其使用性能不断下降，其一是最低抗氧能力，油的抗氧性能是最主要的性能，此值过度下降，油就很快变坏，不能保证基本功能，如不及时换油易引发设备故障。

第四章 从润滑油对设备故障的诊断

润滑油变质及携带的外来污染物均会造成设备的故障,设备有故障时产生的颗粒及泄漏物也会落在润滑油中,因此我们检测润滑油的各指标及污染物的含量,即可推测设备状况和作出故障预测,下面介绍此类诊断技术。

4.1 润滑油常规指标变化

总结润滑油在运行中几个常规指标的变化原因如表 33 所示。指标变化到一定程度后,继续使用该润滑油就会影响设备的正常工作或使设备磨损加剧而发生故障,措施就是更换新油。为了保护设备,润滑油生产厂或管理者作为换油的指导。反过来,我们也可把这些值作为设备将可能发生故障的警告值,并从设备运行过程中这些值的异常变化推测设备发生故障的可能性。如某设备在运行中润滑油粘度突然快速上升,酸值也随之快速上升,数值已高于换油的警告值,就可肯定润滑油在这阶段在高温下工作而剧烈氧化,应从造成油温高的原因去跟踪。又如某柴油机油使用中粘度下降较大,其闪点也随之下降,可以肯定原因是润滑油被柴油稀释,就去检查柴油雾化系统有无问题。表 35~表 36 是一些润滑油品种换油指标。

表 33 润滑油在运行中几个常规指标的变化与设备故障

项目	上升趋势	下降趋势	规律
粘度	设备操作温度过高,提前点火,检查冷却系统	内燃机燃料雾化不良,气缸-活塞间隙过大	
酸值	换油期过长,工况苛刻		一般为上升
闪点	设备温度高	内燃机雾化不良,气缸-活塞间隙过大	
残炭灰分	外来污染大,油过滤失效		一般为上升
碱值		换油期过长	一般为下降
不溶物	换油期过长,工况苛刻		一般为上升
水分	操作温度过低,漏水		一般为上升

表 34 我国液压油类换油指标的推荐标准

用油类型	HL 液压油	HM 液压油	回转空压机油
标准号	SH/T0476-92	SH/T0599-94	SH/T0538-99
外观	不透明,浑浊	——	——
允许粘度变化(40℃)/%	+10~-10	+15~-10	+10~-10
色度变化(比新油大)	3	2	——
酸值/(mgKOH/g) 大于	0.3	增加 0.4	0.2
水份% 大于	0.1	0.1	——
机械杂质/% 大于	0.1	——	——
铜片腐蚀 大于或等于	2	2a	——
正烷不溶物% 大于		0.1	0.2
氧化安定性/分 小于	——	——	60

表 35 我国发动机油换油指标的推荐标准

标准号	GB/T8028-94			BG/T7607-95
油类别	汽油机油			柴油机油
质量等级	SC	SD	SE	
粘度变化 (100℃) %	±25			±25
水份/% 大于	0.2			0.2
闪点/℃ 小于	165 (单级油), 150 (多级油)			180 (单级油), 160 (多级油)
酸值增加/ (mgKOH/g) 大于	2.0			2.0
Fe/ (mg/kg) 大于	250	200	150	100~200
烷不溶物/% 大于	1.5	1.5	2.0	1.5~30
TBN (低于新油) %	—			50

表 36 几种润滑油换油指标的推荐标准

项目	抗氨汽轮机油	汽轮机油	工业闭式齿轮油	普通车辆齿轮油
标准号	SH/T0137-92	SH/T0636	SH/T0586-94	SH/T0475-92
允许粘度 (40℃) %	±10	±10	+15~-20	+20~-10(100℃)
闪点/℃ 低于	8	170~185		
水分/% 大于	0.1		0.5	1.0
抗乳化/分 大于	80	40~60		
锈蚀	锈	轻锈		
抗氧/分	<60	60		
抗氨	不合格			
烷不溶物/%				>2.0
Fe/%				0.5
外观			异常	
机械杂质/%			≥0.5	
Cu 值/N			3b	
酸值/ (mgKOH/g) 大于	0.2	增加 0.1	≤ 133.4	

应指出的是, 在用润滑油测试出某一指标达到规定值时, 表明此油已不胜任其工作而需要更换新油, 若继续使用, 会影响设备的正常工作或对设备有损害, 但与设备将发生故障并无直接关系, 只有一定的因果关系。事实上, 凭以上的几个常规指标对润滑油及设备状态监测已很足够, 并不一定要动用很多复杂的仪器。例如在很多情况下设备会

因进水而发生不正常磨损，我们只要从油中含水量即可得到警告，而不必从润滑油中颗粒分析得知异常磨损，再去进行油的常规分析，从含水量超标得知异常磨损的原因，才去寻找水的来源，这种因果倒置的思路大大增加了工作量，贻误了处理故障的时间。又如从润滑油的闪点和粘度大幅下降肯定润滑油应及时检查燃料供给系统。

4.2 润滑油的性能指标测定

润滑油在降解后，除了各常规理化指标发生变化外，性能也随之变坏，如抗氧化性、抗磨性、抗泡性、抗乳化、空气释放值等与新油比也越来越差，也预示故障的发生，因而也要定时测定。但与理化项目比，他们的测定较麻烦，有些用于新油的测定方法对在用油不适用，因而状态监测中较少做，仅作选测项目。

4.3 红外光谱分析

从润滑油一些常规理化指标的变化能了解润滑油降解后的外在情况，而油降解的化学组成变化要通过红外光谱分析，它可检测出油氧化后的醇、醛、酮、酸等含氧化合物及硝化物等官能团的量，从而得知油的降解程度。此外它还可检测油中某柴添加剂和污染物含量，其情况表 37、图 24 所示。

表 37 红外光谱对在用油的分析

品名	吸收峰位置/cm ⁻¹	意义	警告值
烟炱	200	油污染程度	>0.7ABS/0.1mm
氧化物	1700	降解程度	>0.02ABS/0.1mm
硝化物	1630	降解程度	>0.02ABS/0.1mm
水	3400		
柴油	800		2.0%
汽油	750		1.0%
乙二醇	880	冷却液污染	0.1%
硫化物	1190	油的降解	>0.02ABS/0.1mm
硫磷锌盐	960	添加剂消耗	->0.02ABS/0.1mm

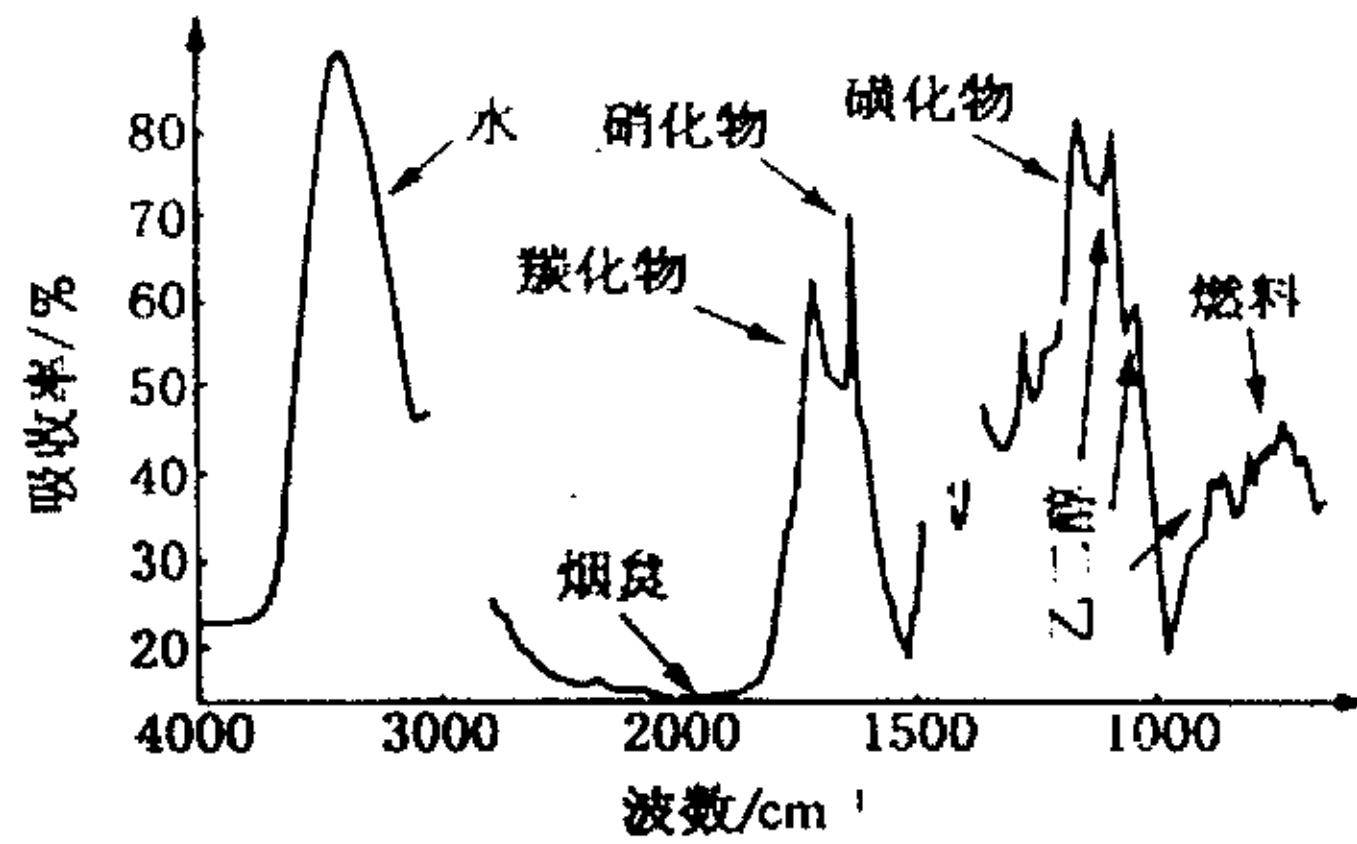


图 24 红外光谱中各物质的特征峰

茂名石化公司研究院从 1994 年开始进行多年高档汽油机油性能的行车试验, 试验中把油温升至 150℃ 以强化氧化, 模拟汽车在高速公路上持续行驶时润滑油的工作条件, 试验后机油的粘度上升与红外光谱的氧化值和硝化值如表 38。从表看到, 粘度上升与润滑油的氧化值是一致, 说明粘度上升是油高度氧化所致。

表 38 10W/30SH 油高温行车试验后油的红外光谱分析

项目	A16 号车			A19 号车		
	40℃粘度 增长/%	氧化值/ (A/cm)	硝化值/ (A/cm)	40℃粘度 增长/%	氧化值/ (A/cm)	硝化值/ (A/cm)
4000	14.32	5.05	4.37	10.78	4.37	3.98
8000	28.96	11.9	7.77	24.15	10.40	6.41
12000	42.35	20.10	10.10	38.02	19.90	12.60
16000	56.92	24.90	13.80	61.94	60.10	32.00
20000	80.72	39.90	25.00	123.60	71.50	28.00
24000	127.20	63.90	29.00	2221.11	74.70	25.40

由于油温特别高, 润滑油高度氧化, 其红外光谱的氧化值增长快, 分散性能消耗不大, 因而硝化值增长慢甚至负增长。红外光谱仪是一种应用范围很广泛的分析仪器, 专用于润滑油分析时有一套软件, 如美国 PE 公司的软件。工作过程是, 先分别做出参比油和要测的在用油的谱图 (图 25, 图 26), 除去相同的吸收峰, 得出差值 (图 27), 找出差值的基线 (图 28), 就可定量得到在用油中各降解产物和污染的读数 (图 29)

4.4 磨损颗粒分析

设备磨损下来的金属颗粒被流动的润滑油携带出来, 我们可从润滑中磨粒的数量和大小推测磨损程度, 从磨粒的形貌推测磨损发生的类型, 从磨粒的合金成份推测发生磨损的部位。原理上, 润滑油的理化分析从设备故障的原因 (如油降解, 进污染物, 进水, 进燃料) 进行故障诊断, 颗粒分析是从故障的后果进行故障诊断。目前常用的颗粒分析

有如下几种方法。

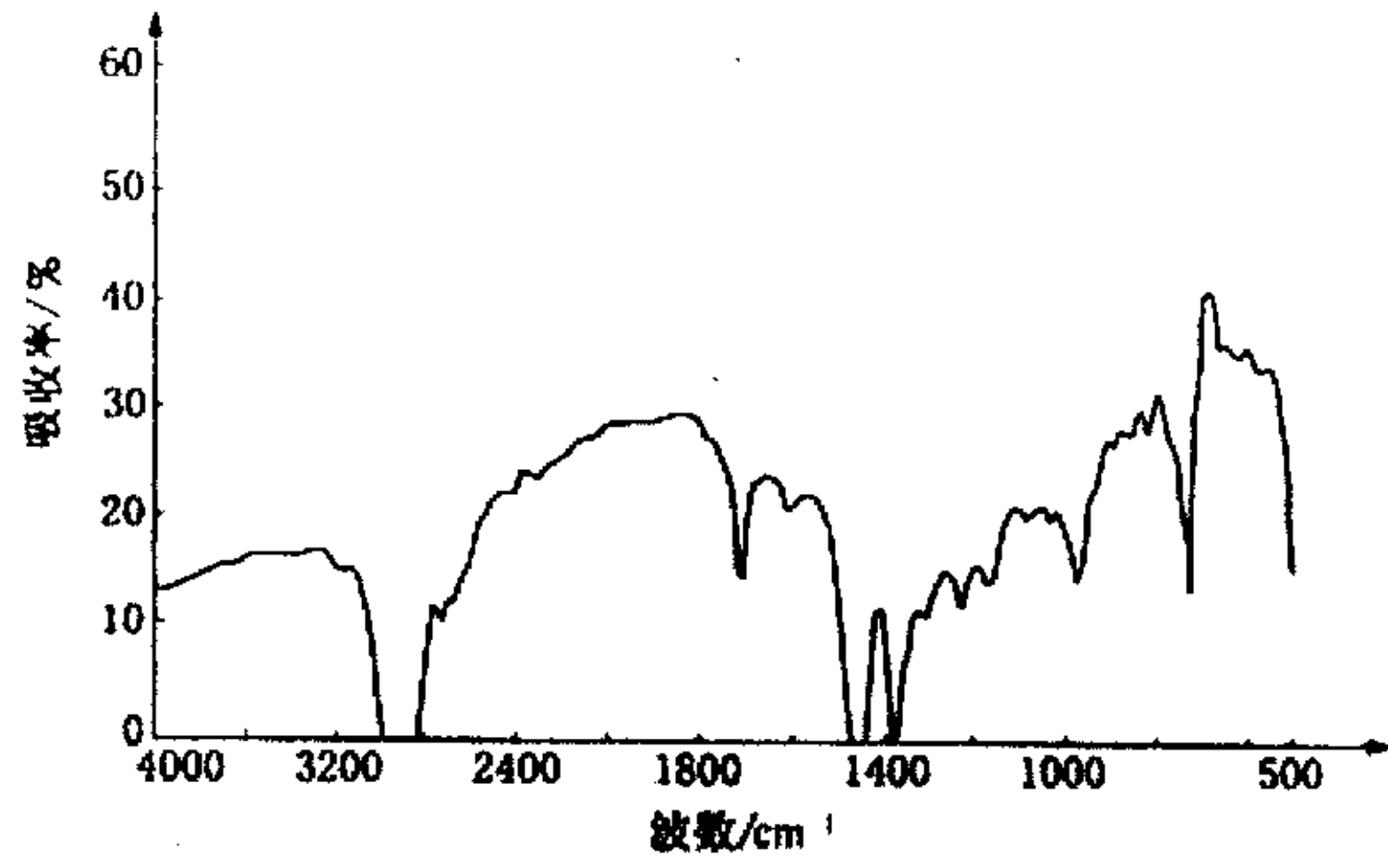


图 25 在用油的谱图

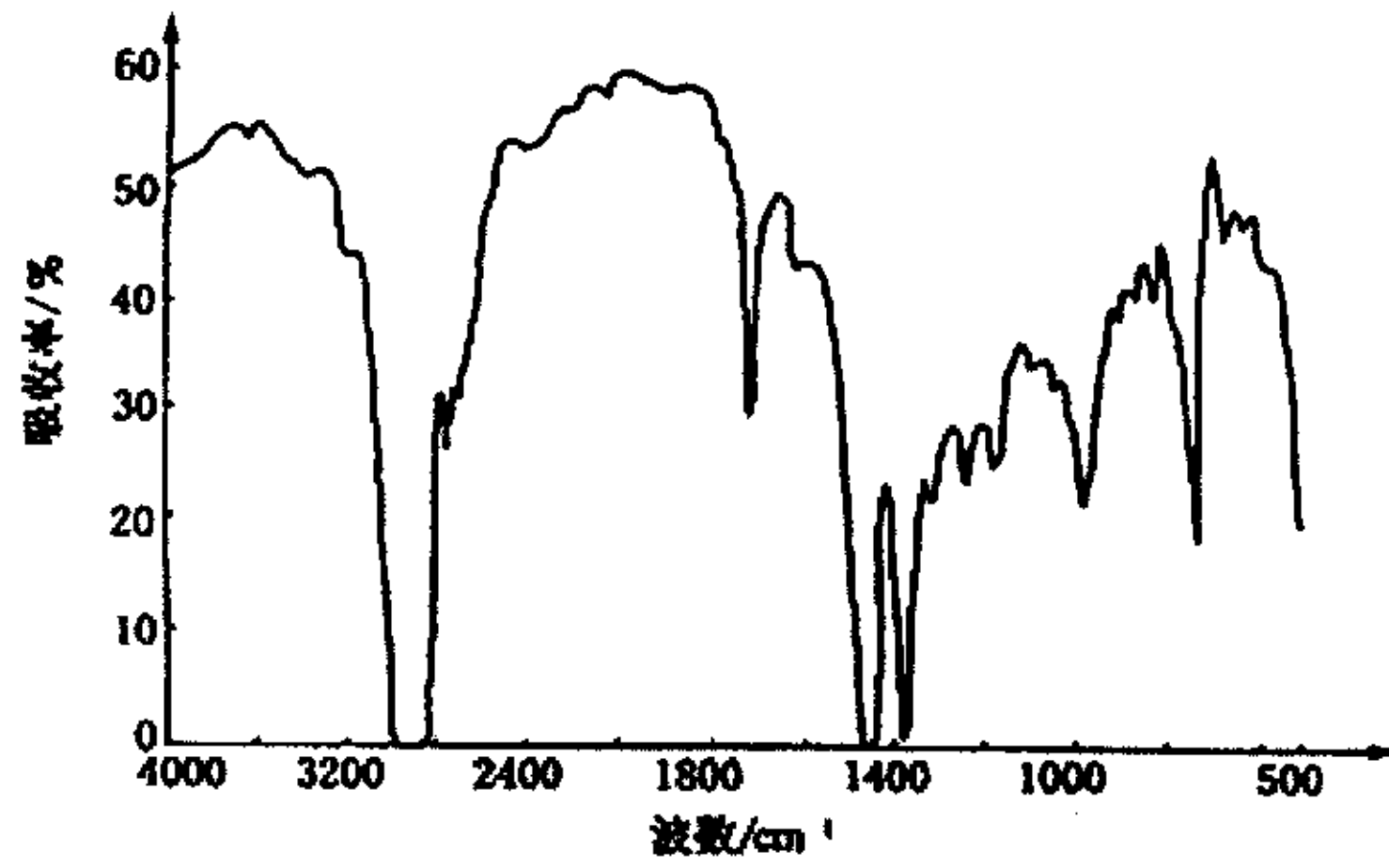


图 26 参比油谱图

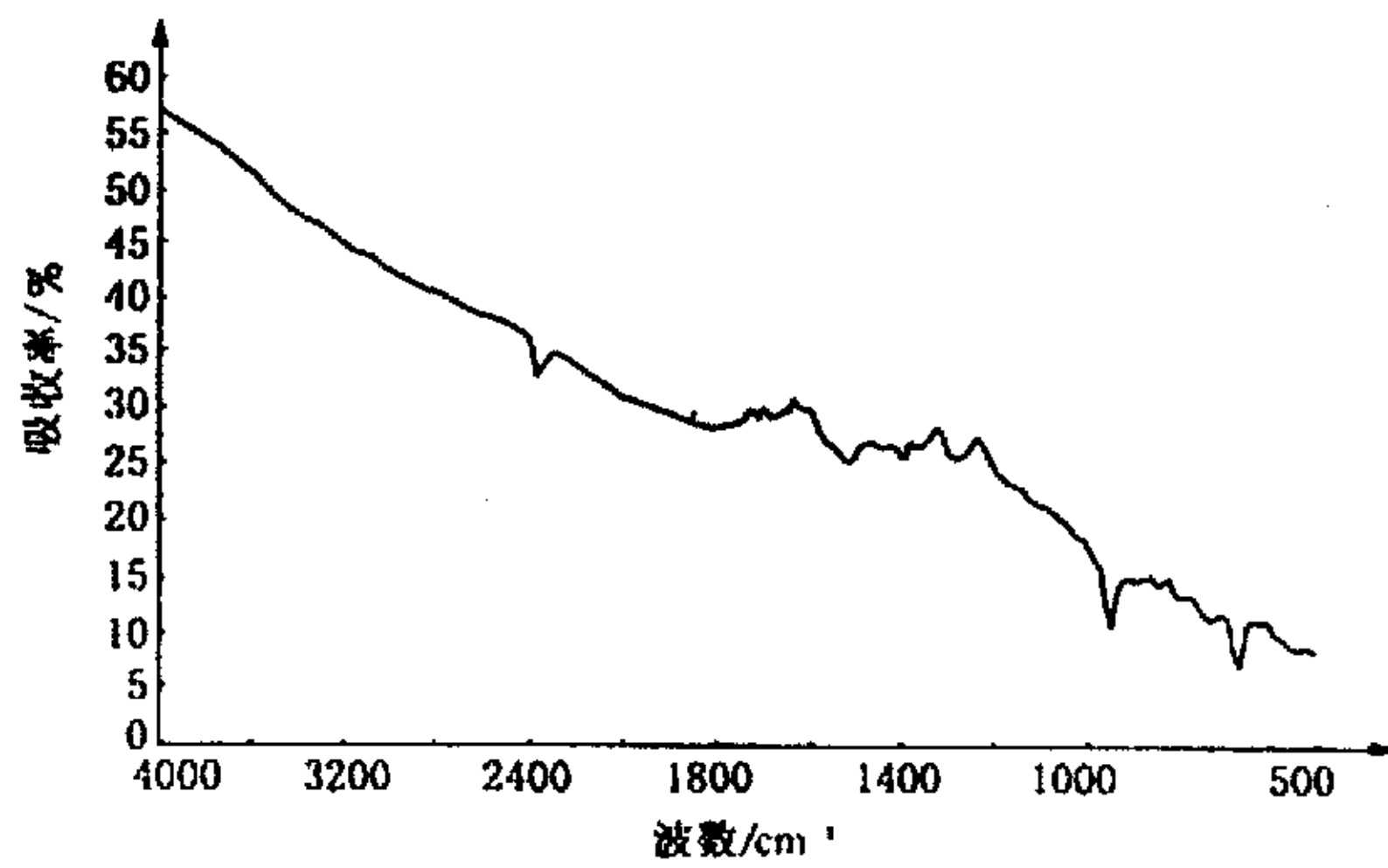


图 27 在用油与参比油吸收峰差值

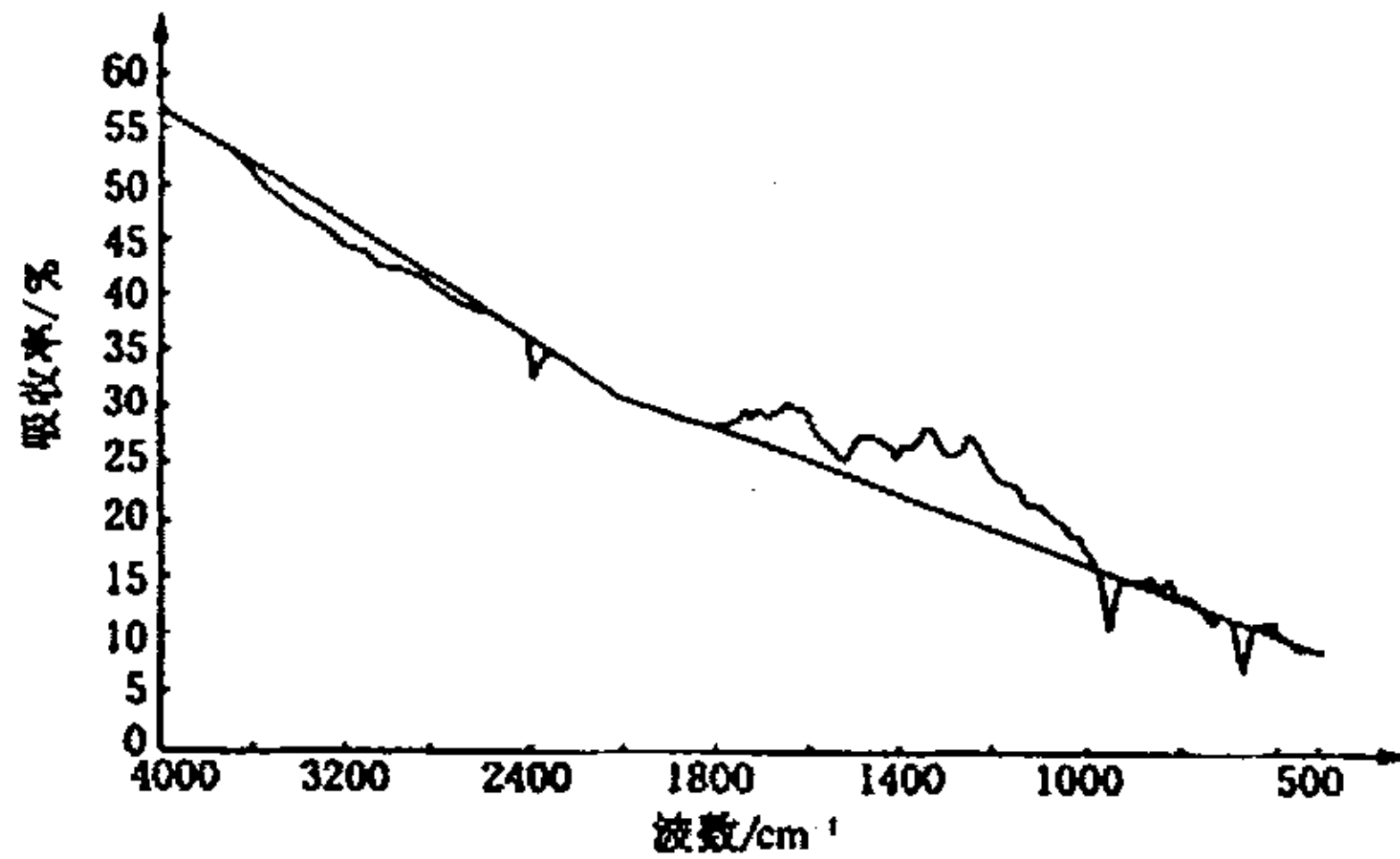


图 28 在用油中各物质读数

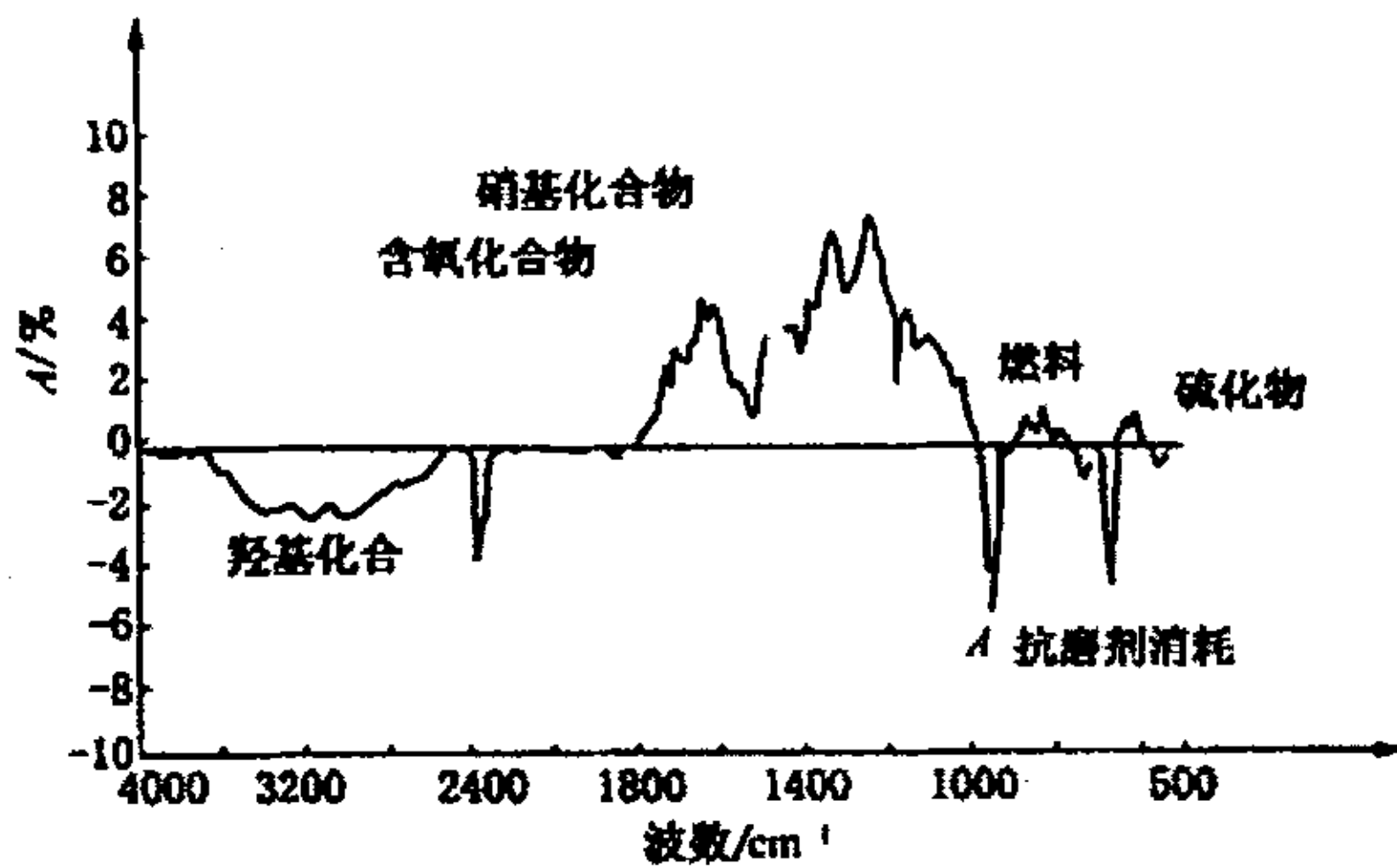


图 29 在用油中各物质读数

(1) 光谱法

原子发射光谱或 X 荧光光谱、等离子光谱等可同时测出润滑油中几十个金属元素的含量，也可测出磷、硫等非金属的含量，试验设备较贵而操作简便。原子吸收光谱仅能逐个对有限的几个元素测定，设备较便宜而操作较麻烦。光谱法只能测溶于油中（也可以金属化合物形式溶于油中）或以极小颗粒（ $<5\mu\text{m}$ ）分散、悬乳于油中的元素含量，也就是添加剂中金属元素、小于 $5\mu\text{m}$ 的磨损颗粒和腐蚀磨损的金属元素。某船务公司对两台车的润滑油中铁含量和发动机磨损作了测定，关系较吻合，如表 39 所示。

表 39 润滑油铁含量和磨损数据

车型	100h 平均铁增加 / ($\mu\text{g/g}$)	运行累计/h	缸套磨损 /mm	活塞环搭口间隙增加/mm
大发 DS-26	1.55	900	0.03	0.4~0.5
大发 DS-18	0.26	2700	0.03	0.5~0.6

(2) 铁谱

它是 20 世纪 70 年代出现的以磁力梯度和重力梯度将金属磨损，从原理上它对

研究设备磨擦磨损很理想，因为它能把磨粒按大小分开和计量，而大磨粒是恶性磨损的结果，可从大磨粒的量判断磨损的严重程度；又能观察磨粒形貌，由此判别磨损的性质和类型；还可以从加热后磨粒的变色情况了解是何合金，从而推测磨损的部位。但多年实践表明它也存在不可克服的缺点，一是它的取样代表性很差，因金属颗粒仅悬浮在润滑油中或被油的流动所携带，颗粒在油流动中不断沉降，颗粒越大，沉降越快，同时又把原沉降的颗粒带走，因而颗粒不可能均匀地分布在油中，这就必然造成同时取的样品间差别大，不同时间取的样检测结果规律性差，也就是样品代表性欠佳。二是做谱时大小颗粒间的相互重叠、相互阻挡不可避免，使准确性大打折扣，对非磁金属颗粒的分离和分辨力较低。三是结果的准确性与操作者的经验及水平的依赖性很大。一些铁谱数据的规律性很差，就是因上述原因，而一些有规律的数据，很多也是经整理出来的，这就带很多主观性，还有对故障诊断不利的是较难给出一个可比较的定量数值，要靠描述才能成一个完整的测定结果。铁谱在对磨粒的分辨上有它的优点，但在如何把设备中产生的磨粒有代表性的携带出来上则无能为力。上述缺点大大限制了它的应用，国外 20 世纪 90 年代后关于它的研究逐渐减少，仅能做一些故障警告等用途，似乎更适用于理论研究。

(3) 其他的颗粒分析器、计数器和磁性塞等

各种润滑油中磨损颗粒检测方法汇总如表 40 所示。

(4) 磨粒分析方法的应用

从设备的典型磨损过程模式（图 30）和设备故障率模式看（图 31），除了初始阶段差别大外（故障的发生除了磨擦磨损外，还有很多因素，如材料强度、安装质量、设计水平、操作失误等），后两个阶段趋势基本一致，在发生异常磨损前，应用一般磨损逐渐增加的过程，也就是在磨粒大量产生前，小磨粒的浓度增加也预示非正常磨损即将到来，所以在磨粒分析中，以光谱法应用较多，也较有用。小磨粒及腐蚀磨损的金属化合物能均匀分布在油中，样品代表性好，其测量快速方便，在发生恶性磨损前一般有一个正常磨损增加（也就是小磨粒浓度升高）的过程，能给出一个明确的数值对故障作准确的预测。铁谱原理是搞理论研究的好工具，但由于它的先天性缺点，再加上监测时试验较麻烦，很难给出个通用数值，限制了它在故障诊断上的应用，适合做些抽查式检查及对一些怀疑现象的验证。表 41 是润滑油中一些金属的来源和相应的检查，表 42 是一些在光谱法测定中金属元素含量的警告值。

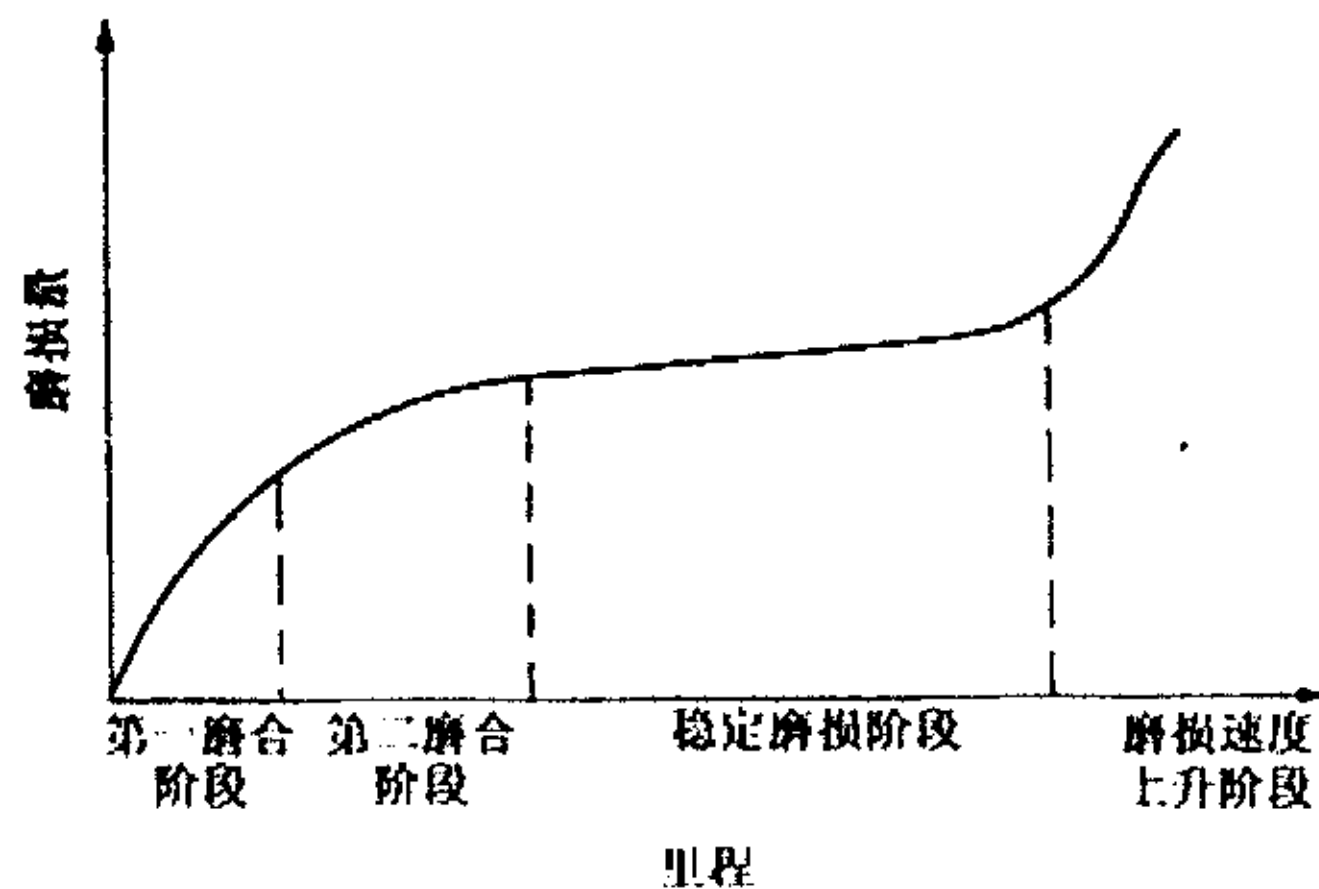


图 30 发动机磨损曲线

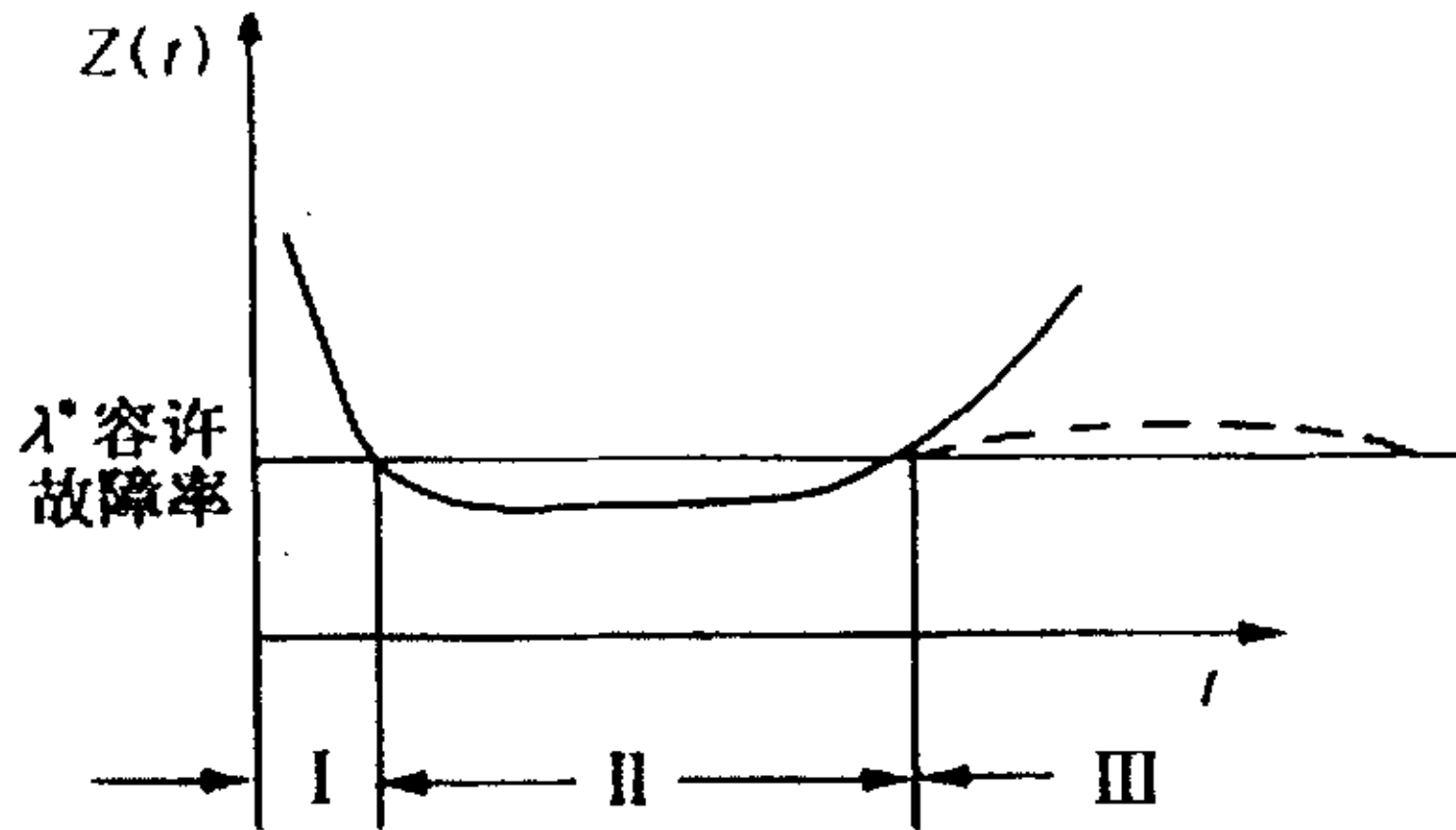


图 31 设备故障率典型模式
 I —— 早期故障阶段
 II —— 偶发故障阶段
 III —— 损耗故障阶段

表 40 润滑油中磨损颗粒检测方法汇总

方法	方式	检测颗粒/ μm	优点	缺点
原子发射光谱, 等离子光谱, X 荧光光谱	离线	<5	定量, 溶或不溶于油的金属或非金属均可, 快速	只能测小颗粒
原子吸收光谱	离线	1~100	定量	费时间, 可测元素少
铁谱	离线, 在线	5~50	检出大颗粒量和外貌	限于磁性物, 不表示浓度, 操作麻烦
颗粒计数器	离线	1~3	费用低	限于磁性物
磨屑探测器 (非指示式)	在线	100~400	连续输出	限于磁性物
磨屑探测器 (指示式)	在线	100~400	可用于非磁性物	易指示错
磁塞	在线	>6	连续输出	限于大磁性物
颗粒传感器	在线	>1	连续	对粒径和流量敏感
碎片检测器	在线	>150	对碎片随时检出	对温度敏感
超声法	在线	35~75	快速低费用	限于磁性物
X 射线法	离线	1~10	便携	需液氮
X 射线法	在线	1~10	连续检测	对特定金属
放射性同位素法	在线		灵敏度高	接触放射性物

表 41 仅是简单的举例, 实际发生的情况是多种因素相互作用造成的。表 42 中的范围值视某设备的金属构成而定。

某矿对大型矿井减速机用油进行监测, 用了 7440h 的润滑油的光谱法元素含量如表 43。同时又做了铁谱、红外光谱及常规分析, 然后用 GOAFDS 系统进行计算, 得出“可能轴承存在异常磨损”的诊断, 拆机后证实巴氏合金轴承磨损严重。从表 43 中铅含量

大，也就会怀疑含铅大的轴瓦有大问题而立即拆机检查。

表 41 润滑油中金属磨粒的来源和检查原因

金属	来源	检查原因
硅	外来尘砂, 硅抗泡剂	环境灰尘大, 进气过滤失效
铝	铝活塞, 铝合金轴瓦磨损	动力损失大, 噪音大
铁	各部分都可能磨损大	窜气, 油耗、噪音大
铜	轴套磨损	油压不够, 噪音大
铬	镀铬环、铬合金轴颈磨损	窜气大, 振动
钠	含钠添加剂的冷却水泄漏	查垫片和密封
铅	汽油污染、镍合金部件磨损	动力下降, 振动
钒、镍	重油污染, 镍合金部件磨损	燃料系统失效
钼	钼合金部件磨损	检查相应部件
钙、钡 锌、镁	添加剂消耗	换油期过长

表 42 光谱分析法润滑油中金属含量警告值

元素	铅	硅	铁	铬	铝	铜	锡	银
含量/ (ug/g)	5~14	10	100~200	30~60	15~40	5~40	5~15	5~10

表 43 某矿交流机组减速机润滑油样检测

元素	Fe	Cr	Pb	Al	Si	Na
含量/ (ug/g)	20	<1	105	6	3	1

对宝钢蜗轮蜗杆箱的润滑油作元素含量光谱分析如表 44。又做了铁谱，最后推测蜗轮磨损严重，拆机后得到证实。其实从表 44 中铜和硅含量惊人的高知铜蜗轮磨损严重和进砂子多，应立即拆检和换机油。

表 44 Z1530 澄清池驱动机润滑油样的发射光谱数据

元素	Fe	Cu	Cr	Ni	Sn	Pb	Mn	Sb	B	Si	Al
含量/ (ug/g)	42.27	366.99	1.06	1.71	3.24	2.28	40.79	1.01	1.02	86.73	5.74

从配件磨损表面状况及磨粒形态推测故障性质及原因，实际发生的磨损现象较难分辨，必需在现场作判断，才能推测故障原因，从而提出处理措施，一般从磨损的各自特征出发，抓主要矛盾推测原因。表 45 是在这方面可供参考的提示。若有色金属与黑色金属配件一起工作时，情况复杂得多，这就有赖于经验及从其他方面的验证。

表 45 几类磨损的磨擦副表面及磨粒特征及原因推测 (以黑色金属为例)

类型	磨损表面形态	磨粒	发生原因推测
粘着磨损	从严重程度分划伤, 拉伤, 烧结。表面粗糙, 有高温变色, 可见金属突头或楔形流动形成	大而厚, 长<15um, 厚 0.15~1um, 边缘粗糙尖锐, 也有熔融金属冷却后的珠状	接触面过小而造成局部压力过大; 油质差而油膜破裂; 供油失效; 冷却差使局部热膨胀; 金属表面强度差
磨料磨损	磨料为大而硬的颗粒造成沿运动方向有直线沟槽, 小颗粒造成表面光亮	切削状如卷曲、螺旋及带状, 大颗粒长 25~100um, 宽 2~5um, 小颗粒为几微米	外部硬颗粒侵入, 磨损颗粒侵入, 润滑油过滤效果差
疲劳磨损	表面片状剥落, 有孔穴、空洞、裂痕, 有倒锥形麻点坑	剥落碎片, 扁平, 外轮廓不规则, 最大 100um, 长厚 ~10/1	表面强度不足或匹配不好, 压强过大, 油膜强度不够
腐蚀磨损	麻坑状点蚀, 有的表面变暗, 有的经腐蚀表面强度差而被磨去而光亮	红色氧化物屑, 有碎片状, 很多成极小悬浮油中	油降解程度高, 进水, 操作温度高, 环境有腐蚀物, 设计不合理造成表面受高速流体冲击

4.5 机油压力

人的血液在体内流动要有一定压力以保持循环, 血压过高过低不但表示血液系统可能有毛病, 也表示可能其他有关器官有毛病。同样, 机油泵为了保持润滑油在设备中不断循环, 要有一定的油压, 如果高于或低于规定范围, 预示有故障发生的可能, 应及时检查及排除。因此很多设备特别是车辆都设有低油压报警。从故障诊断的角度, 油压的变化有如表 46 的可能情况, 应及时处理。

表 46 机油压力变化的可能原因

油压	过高	过低
原因	滤网或管路部分堵塞 油粘度过高或油温过低	机油泵工作不良 油路漏油 油箱油面过低 燃料稀释或油温过高 运动件间隙过大 油路部分堵塞

下面典型的关于油压故障的修理过程记录，思路清楚，照抄如下。

问：一台扬子中客 495 柴油机，修理后试机时，油压表指针处于最高位置，连续冲坏 3 个滤芯，开始时认为滤芯质量有问题，换一新滤芯仍然被冲坏，这才断定是油压过高所致，为什么会出现油压过高的现象呢？

答：拆下限压阀螺丝，取出限压阀弹簧，但怎么也取不下柱塞阀体，估计是柱塞被卡所致。启动发动机，但借助机油压力冲出柱塞，可发动了足有 8min，柱塞体仍无动于衷，洞口也无机油渗出，将发动机提至高速，滤芯又被冲变形且渗出了机油，柱塞阀体还是没有动静。再次更换滤芯，一边用中速运转，一边用细钢棒敲击振动阀体，运转 15min 后，限压阀才有机油渗漏出来，这才将柱塞阀体取了出来。原来是修理工修发动机过程中冲洗主油道时，用高压水枪冲洗，冲洗完未擦干就装上了限压阀，阀体遇水形成铁锈层，导致限压阀体锈死在里面不能活动，过高的机油压力就是这样形成的。将限压阀除锈后装复，油压才低下来，经重新调整油压才正常，故障彻底排除。

问：一台大修后不久的 4102 扬柴发动机，刚开始时机油压力正常，约半个月后，机油压力变低，中高速时为 300~400kpa。随后不久，怠速时油压为 200kpa，提高转速后，机油压力表指示油压为零。

答：检查机油压力表和机油压力感应塞，结果表明工作可靠，指示准确。拆下机油泵限压阀检查有没有卡滞，检查机油泵进油管路有没有堵塞，结果也没有发现问题。接着，拆下发动机油盘，对机油泵和集滤器进行检查，分解检查机油集滤器时发现，其滤网密度过高，中间部分有几乎被细小的纤维堵死，且滤网中间没有安全孔。因此，故障的原因是装上了不合格的机油集滤器造成，更换带有安全孔的集滤器滤网后，发动机机油压力正常，故障消失。

原来，当发动机熄火时，滤网的中间部分抵在机油集滤器的底板上，机油只能从滤网周围进入过油管路及机油泵，发动机启动后怠速运转时，由于机油泵过油量较少，滤网周围通过的油量可以满足过油需要，所以机油压力正常，随着发动机转速提高，机油泵的吸油量增加，但由于滤网中没有设置安全孔，且滤网被细小纤维堵住，故当吸力增加时，滤网被进油口处的低压吸上而将进油口堵住，从而导致机油泵和过油管路缺油，使润滑油路中出现低压或无压现象。

有一个常见的问题是同一发动机用单级油（粘度指数较低）时油压正常，换用多级油（粘度指数较高）或较低粘度的润滑油后油压偏低，有的低于报警值而亮红灯，于是用户怀疑多级油的质量有问题，担心供油不足。这种担心是多余的，原因：一是多级油粘度指数高，在油箱中油温低于 100℃ 时其粘度也就低，粘度低油压就低；二是多级油含的粘度添加剂受到剪力时会产生“瞬间粘度损失”，也使油压低。也就是多级油的低油压是由于它的流动性好，油泵无需用太高的压力即可保证油的循环，已测试过，在发动机中用 20 号油时油压虽然比 40 号油时低，但流速反而高，无需担心供油不足。我们注意到，有这种情况的往往是发动机内摩擦副配合间隙大的老设备，解决办法一是维修设备，把间隙大的部件换掉，二是通过调压阀把压力调高，三是换用高级粘度的润滑油。

4.6 润滑油消耗量

设备设计水平越高，制造精度越高，其润滑油消耗量越小（图 32）。许多设备特别是发动机都把机油耗作为一个指标列在规格上。设备的油耗途径如图 33，随着运行时间加长，运动件不断磨损使配合间隙加大，油耗就会不断增加，若有油耗异常变化，也预示将出现有关故障，这些故障可能是：

- ① 油路漏油或密封件失效；
- ② 运动件间隙过大造成窜油；
- ③ 发动机活塞环搭口排成一线
- ④ 活塞上的刮油环坏；

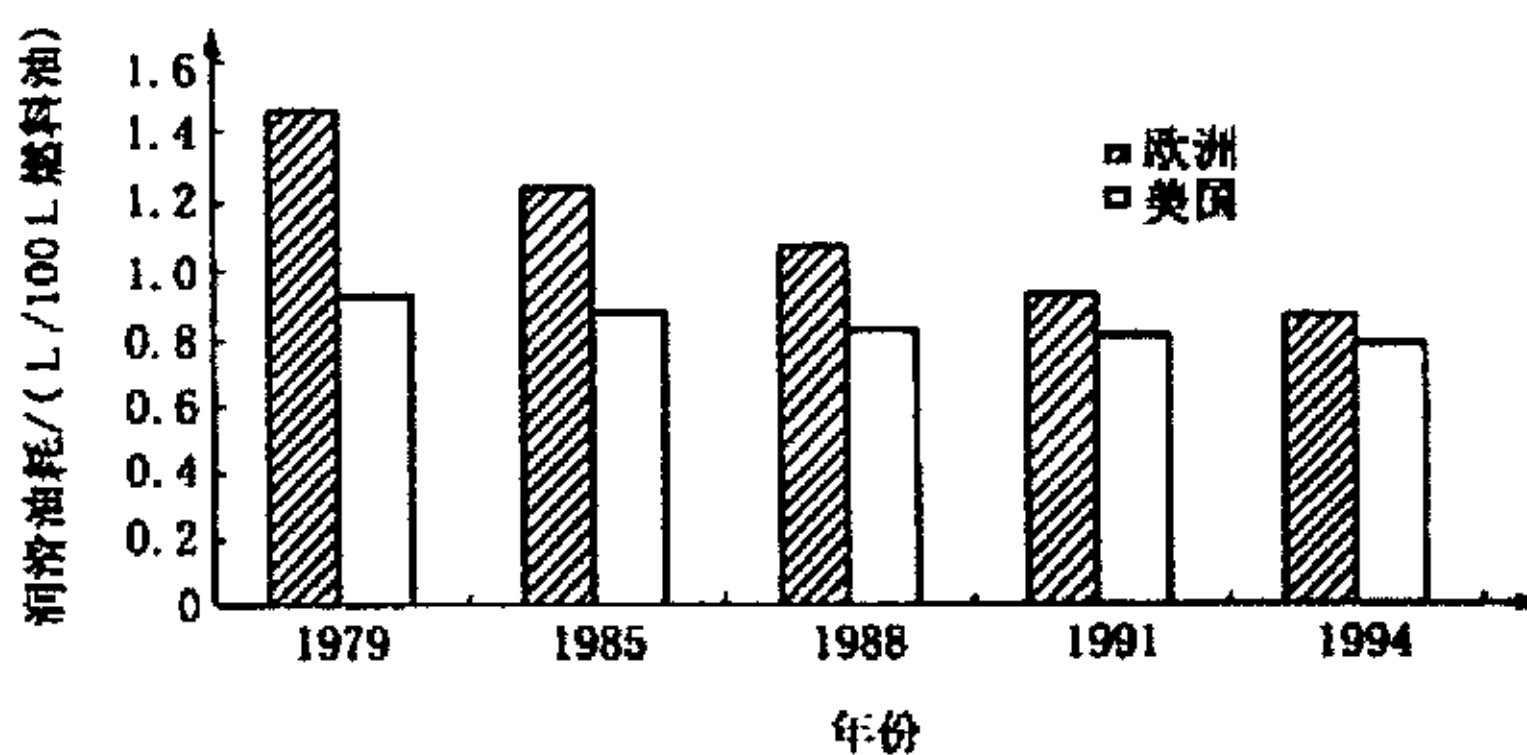


图 32 欧美发动机油消耗量比较

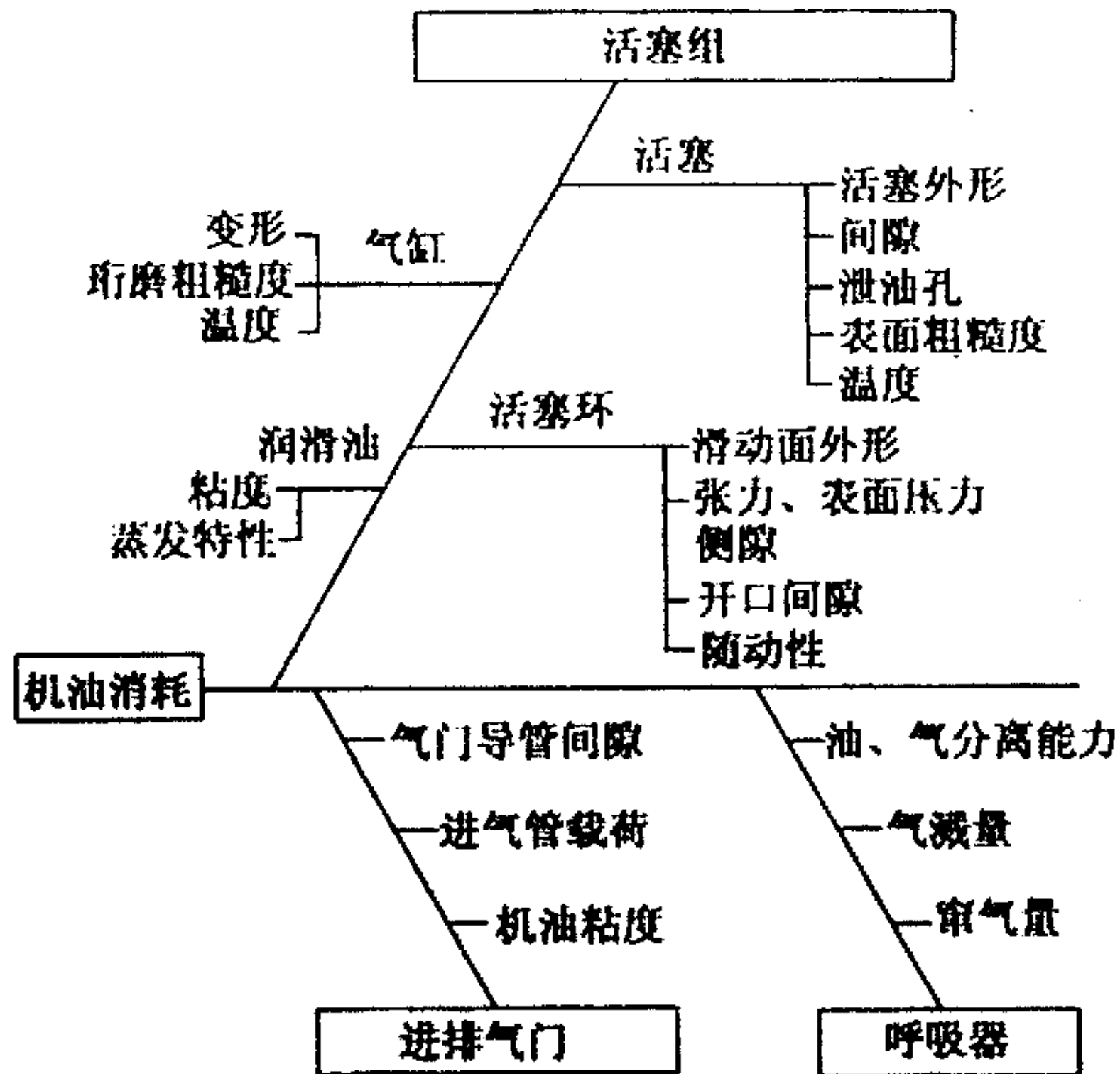


图 33 润滑油在设备中消耗途径

- ⑤ 活塞上的回油孔堵塞;
- ⑥ 油温过高;
- ⑦ 活塞顶环岸积灰堆积

我国的平均设备管理水平不高，设备更新慢，设备状况不够良好，表现之一是漏油窜油严重，而没有引起管理者足够重视。表 47 的数据表明，漏窜的油量（等于补加的油量）远大于换油量！如不认真对待，又是故障之源。

表 47 6135 型柴油机机油耗统计/kg

项目	台架		内河船		发机机组		总计	
	换油	补加	换油	补加	换油	补加	换油	补加
CD-1	70	170	65	89	17	131		
CD-2	93	179						
CC-1	100	183	87	124	26	297		
CC-2	162	163	87	89	26	114		
CA	260	195	173	139	87	384		
总计	685	890	412	441	156	926	1253	2257

表 47 数据是从中石化系统多个单位进行几年油料试验中取出，从表看到途中补加的油量大大高于换油量。一方面浪费油，另一方面危害环保，还使发动机的性能下降。应提高设备的制造工艺水平和加速设备的更新。表 48 是工厂内生产用设备的漏油例子，也说明该问题的严重性。

表 48 一汽集团几年内设备漏机油治理情况

年份	治理台数	每季节油/t	节费/(万元/年)
1993	190	79	99.5
1994	600	309.3	389.7
1995	308	155.7	196.2
共计	1098	554	685.5

表 48 说明漏油的严重，治漏不但节费用和节油，还改善环境，同时避免油漏光缺油而造成设备故障。

4.7 几种简易机油分析方法及在线监测

从润滑油对设备故障诊断较为全面，不但能从故障的后果（产生磨粒和漏损物）上监测，还能从故障的原因（润滑油的降解及其有害物）上监制，但缺点是需专用的试验室，不能在线监测，给诊断带来不方便。为此又发展了一些快速简易便携性化验箱，可在现场监测，但精确度比在试验室稍低，同时还开发一些对润滑油某些指标敏感的传感器，安装在润滑油系统中，可在线监测油的变化值，下面作简单介绍。

1、水分

(1) 声响法

把润滑油放在铝箔或锡纸做的小盘上，用酒精灯或打火机烧 1~2min，若飞溅或冒泡则含水量大，若有连续爆裂声则含水大于 0.03%，若一点爆裂后无声，含水小于 0.03%。

(2) 华特斯摩 (Wates Mo) 试纸

把此试纸浸入油中，遇水有蓝色斑点，按表 49 判断水含量。

表 49 华特期摩试纸在油中斑点与水含量

斑点数/cm	1, 微小	1~2	约 5 个	约 10 个
含水量/%	小于 0.5	0.5	1.0	2.0

(3) 汉罗铁 (Hydrokit) 白色粉剂

与水接触呈紫色斑点，按表 50 判定水含量

斑点数/cm	1, 微小	1~2	5~10	大量	大片	全部
含水量/10-6	小于 20	20~40	140~60	60~200	200~500	大于 500

2、碱值

加 2ml 油样于试管中，加 10ml 指示剂（50umg/g 高锰酸钾溶于 50ug/g 醋酸），每注入 0.5ml 酸性试剂（高氯酸）相当于 2.5mgKOH/G 总碱值，充分摇匀后若呈紫色，该油仍可用，绿色为临界状态，黄色表示碱值耗尽，需换油。

3、斑点试验

斑点试验是应用已久的简单实用的判断在用润滑油状态的现场试验方法，方法是将几滴在用润滑油滴在定量滤纸中心，润滑油扩散后会成为图 34 图形，判别的原则是：沉积

区的颜色越深，面积越大，降解程度越深，沉积层与扩散层间的分界线很模糊，表明润滑油仍有好的清净分散能力，若分界线很清晰，表明润滑油的分散能力已很差。外围的油环在润滑油新鲜时为透明无色，随着油氧化的加深，由浅黄至黄至棕红色。为了操作方便，按润滑油中沉积物量的多少做成几张参考图谱，沉积物从小到大分成一、二、三、四等几级，将某在用油的斑点与之比较，得出此油的降解程度。也有的把某一润滑油按运行里程或时间顺序各滴在同一张滤纸不同位置上分别扩散，其斑点比较起来非常直观（图 35）此方法简单易行，应用非常广泛，并向定量和半定量发展。下面是几个应用例子。

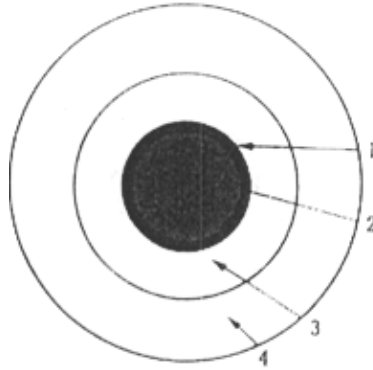


图 34 润滑油斑点图

1- 黑晕圈；2-沉淀区；3-扩散区；4-透明区

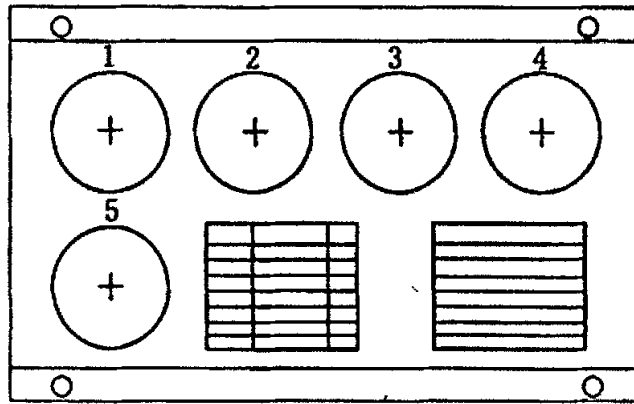
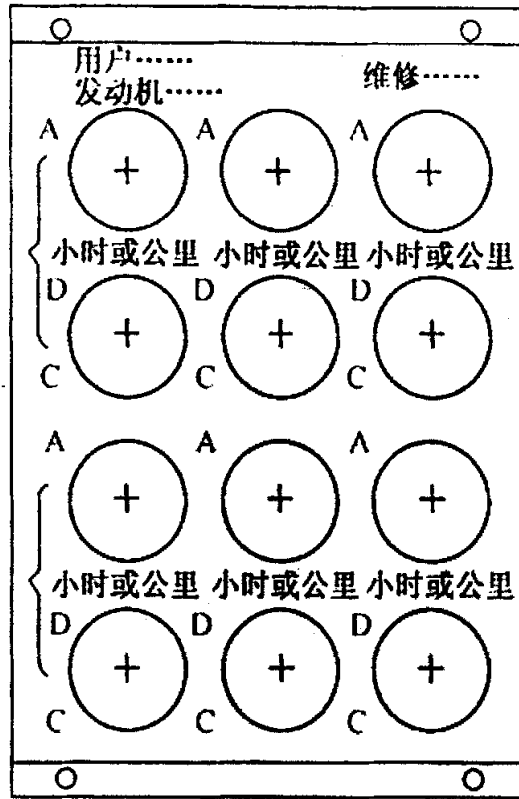


图 35 润滑油斑点图小装置示意图

(1) 壳牌润滑油公司方法

把油样加热到 24° C5min, 滴 2mL 在 Durieux paper grade 滤纸上 (每张可滴 16 个油样) 其扩散, 再让烘箱中干燥 (100° C, 1h), 把斑点图放到专用的仪器 VPH 5G 中评定和照相, 仪器给出两个结果, 一个是污染指数 (IC), 表示油中不溶物的量, 表示为 0、1%、2%、3%、4%, 另一个为分散性 (DM), 表示油的剩余分散能力, 为 100 (新油的分散性) 到 0 (无分散性)。总评分为: $DP = (100 - DM) \times IC$ 。

中国石化集团公司石油化工科学研究院研制出 DSP 1000 型数字化分散度测定仪, 专用于定量化斑点试验中沉积层的颜色和面积。一般以油斑的相对灰度 (SRG) 作比较。

$$SRG (\%) = 100 (G_0 - G_m) / G_0$$

式中, G_m 为测出在用油样的斑点灰度, G_0 为 0 km 灰度。

图 36 是某行车试验中油样灰度的变化情况。

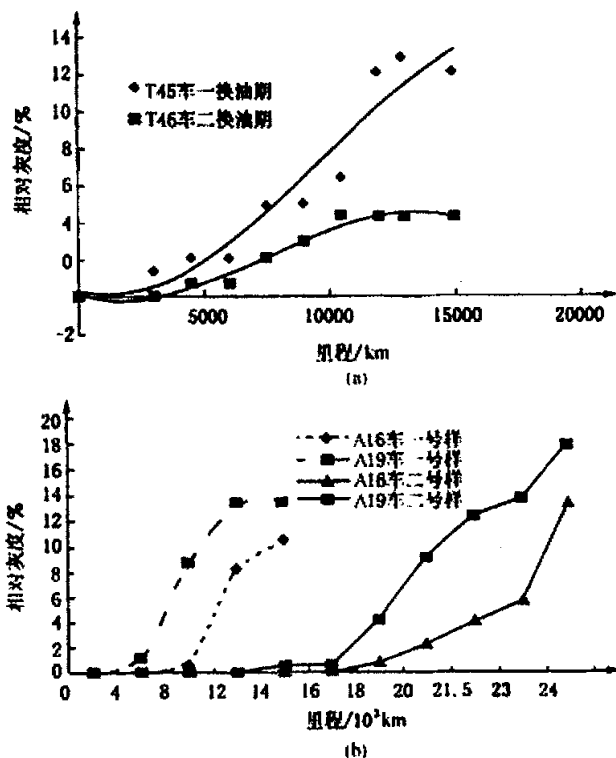


图 36 汽油机油行车试验中油样灰度变化
(a) SG 油样油斑分析; (b) SH 油样油斑分析

国家标准 GB8030-87 润滑油现场检验法, 其中的滤纸斑点试验法方法是把在用润滑油在滤纸上滴 5~6 滴, 室温下静置 0.5~1h, 从扩散的斑点按四级时行评定。

一级: 油斑的沉积环和扩散环间没有明显界线, 整个油斑颜色均匀, 油环浅而明亮, 油质良好;

二级: 油斑的沉积环色深, 扩散环较宽, 二环纹间有明显的分界线, 油环呈不同程度的黄色, 油质已污染, 应加强机油滤清, 润滑油继续使用;

三级: 油斑的沉积环深黑, 沉积物密集, 扩散环狭窄, 油环颜色变深, 油质已达劣

化；

四级：油斑只有中心沉积环和油环，无扩散环，沉积乌黑，沉积环稠厚而不易干燥。

4、润滑油污染度或老化度测定仪

它是一种对润滑油的降解程度的综合评价方法，一般新油的导电性能很差，在降解及受污染后，其导电性能会发生变化。对润滑油中的添加剂、降解产物和污染物在不同的电极中的电流和电压的变化做大量的比较，得出新油和不同程度老化的油在导电性能上的差异规律，从而用以测定润滑油的剩余能力和污染度，此方法简单易用直观，适用于现场检测，但由于润滑油的降解过程较复杂，其导电性能的变化仅能反映润滑油在某种情况下的降解过程，不是在任何情况下都好用，因而应用不普遍。这类仪器结构简单，价格不贵，通常为便携型，国内外均有此类商品供应。

应说明的是上述一些快速简易现场测试方法都不是标准方法，其结果的准确性低于试验室标准方法，仅供现场作判断时参考，如对数据有怀疑，应以标准方法为准。

4.8 传感器型的在线直读油质变化仪表

近几年对此类传感器的研究工作开展较多，已接近于实用，发表了若干专利，一般是把传感器安装在油箱或主油道的油中，其相应的仪表在汽车驾驶室或设备操作室的仪表盘上，操作者从表的指针可看出油的指标变化，达到某值即要换油，几种类型介绍如下。

(1) 特殊的油压传感器

它带有温度修正值，使其压力与油粘度变化成正比，在油粘度过大或过小时，油压表的指针即超过范围而需换油。

(2) 根据油温效应

E. Schwarty 等通过数理统计得出油温的老化及碱值变化等有一定的依从关系，由此根据大量的数据做成数学模型，建立了由发动机转速及油温等数据进入计算机处理得出换油的指示。此法对正常运行的车有好的指导作用，但对发动机进水等其他情况无能为力。

(3) 根据油的老化和导电性的相关性

油是电的不良导体，使用中酸碱值的变化、添加剂消耗、油生成沉积物和异物侵入等都使导电性变化，从此原理出发研制了各种不同传感器，把电极装在油箱到主油道的油路中，驾驶室的仪表盘仪表显示电压变化，从变化平缓到突变表示某油性质变化大而需换油。此法原理简单但实用难度大。Hansheng Lee 等研制的晶体管构造的指状组合型双电极做成的传感器装在油箱量油尺的位置上，试验中其传感器电压如图 38。不同油种、工况试验效果较好。Komatiu 公司的一种由“银”、“铱”、“参考”三电极组成的传感器，认为银电极对添加剂消耗很敏感，铱电极对酸值变化敏感，传感器得到三个电压讯号如图 37：（铱/参考）、（银/参考）及（铱/银），这三个数据处理后即得到油的状态。

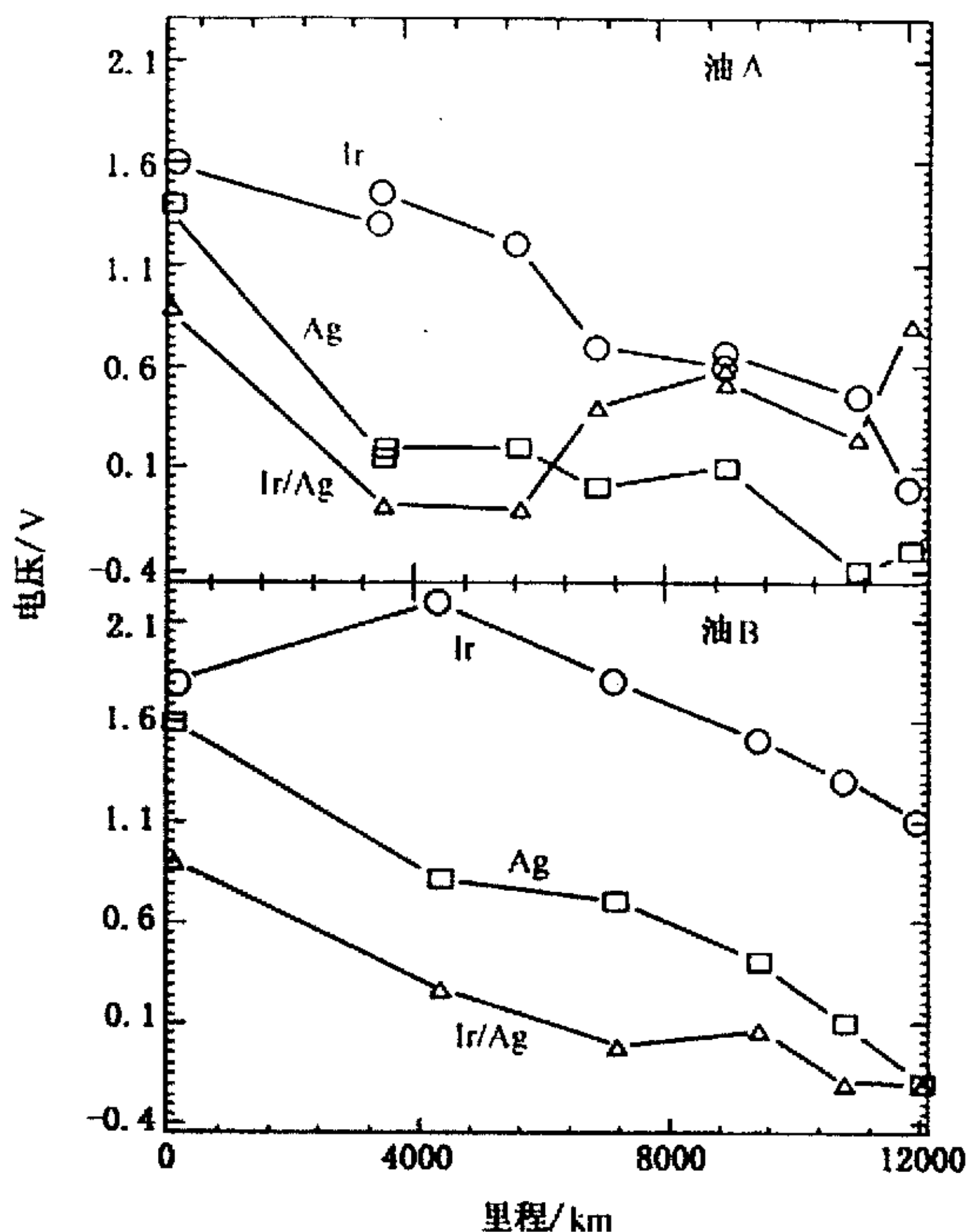


图 37 润滑油的使用里程和传感器电压

(4) 汽轮机油颗粒污染物在线监测系统

图 38 所示，用电磁阀控制使有 1/3 油通过在线监测装置，这些油先后通过两个孔径为 $10\mu\text{m}$ 和 $18\mu\text{m}$ 的过滤器，测量过滤器的压差以检测过滤器被某种大小的颗粒堵塞程度，算出此种尺寸颗粒在油中浓度，再换成 ISO 4406 标准，这些数据输入计算机处理及发出警报。下面是计算例子。

孔径 $10\mu\text{m}$ 的过滤器有 5000 个孔，油流量 $600\text{mL}/\text{min}$ ，仪器压力降 p^0 为 40kPa ，无堵塞时油流过滤孔的初压力为 p^i 120kPa ，流过 10s 后压力 p^f 达 240kPa ，则堵塞比为：

$$(p^i - p^0) / (p^f - p^0) = 0.4$$

设每个孔被一个颗粒堵塞，则 10s 中通过 100ml 油时有 $0.4 \times 5000 = 2000$ 孔被堵，则每毫升油中大于 $10\mu\text{m}$ 的颗粒有 20 个。

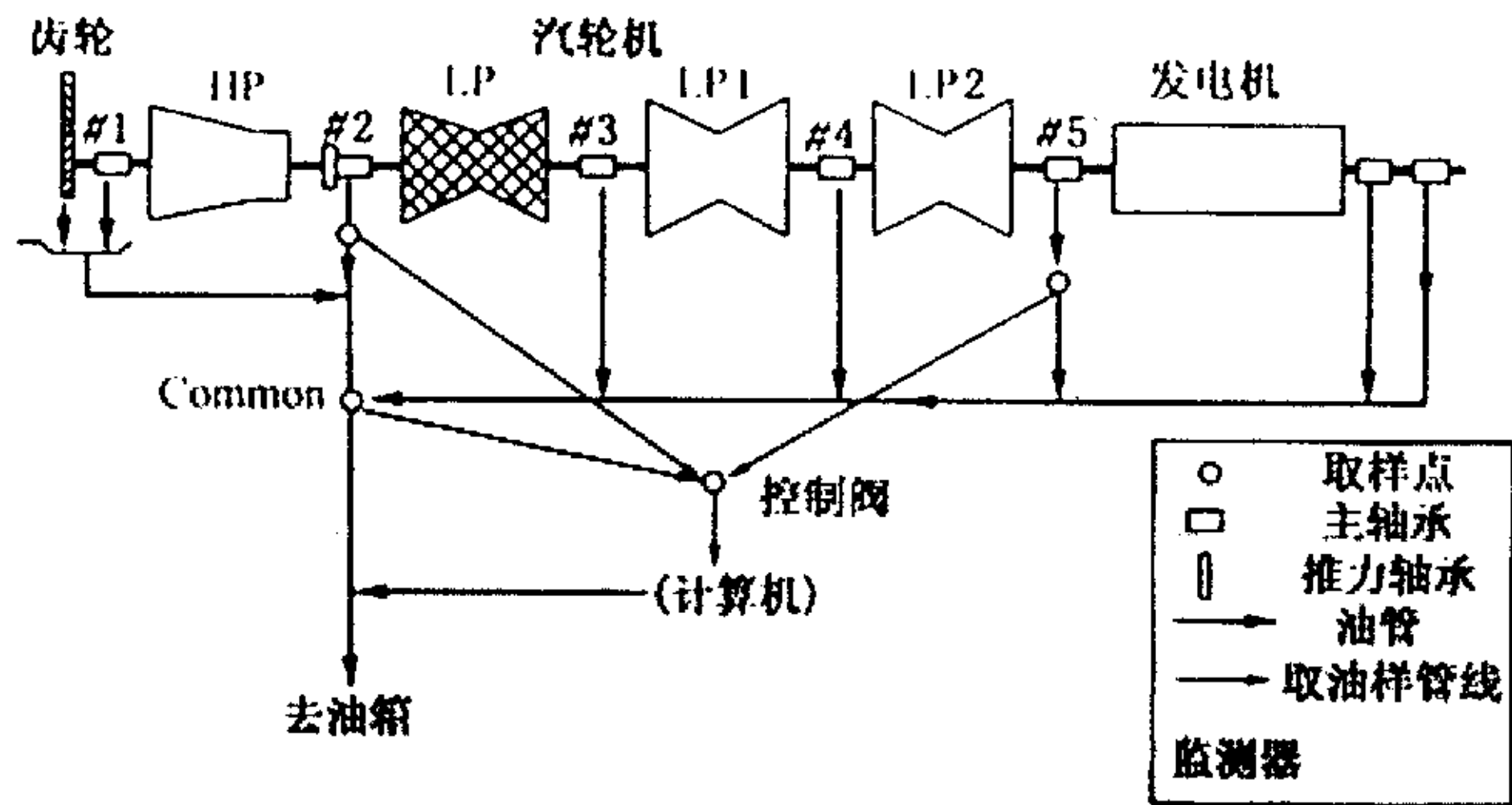


图 38 汽轮机油颗粒污染物在线监测系统

NAS1683 是美国国家航空空间标准，用以评定油中颗粒污染程度，有计数法和重量法，计数法分 6~12 级，级别越高，污染越大。

4.9 有关专家系统的一些情况

监测数据由电脑处理，使油和设备的状态监测智能化，此类软件系统作为“专家系统”。这里举两个例子，一个是用于润滑油质量状况的监测，一个是用于设备状况的监测，从这两个例子可看出思路的差异。

(1) EXXCARE

ESSO 公司用于船用润滑油状态监测的专家系统 EXXCARE 把数据分三类，基础试验数据：外观、闪点、40° C 粘度、PH 值、中和值、总碱值（TBN）、水含量、戊烷不溶物；追加试验数据：燃料稀释、100° C 粘度、酸值、氯含量、苯不溶物、元素含量；选择试验数据：元素含量、颗粒计数。每个指标有个界限值，测出的指标与此界限值比较后分三种情况：通过、界限、超标。超标的数字再重复并作追加试验。然后都输进计算机做趋势分析。表 51 是 TBN 趋势分析的例子。

判断的代号 301、313 等为各种可能性，如 316 是表示“TBN 低于发动机制造商要求，可能与水的存在有关”。

(2) Lube Analyst

BAIRD 公司是一个制造原子发射光谱仪的公司，他们提出的系统如图 39，其专家系统软件称 Lube Analyst。

表 51 EXXCARE 的 TBN 趋势分析

	TBN									
	通 过			临 界			超 标			
	与上次样品对比									
$A_1 > 22$ $B < 20$	< 5	≥ 5		< 5	≥ 5		< 5		≥ 5	
$20 < A_2 < 22$	V	油中水含量 /%		V	油中水含量 /%		油中水含量 /%			
		≤ 0.2	> 0.2		≤ 0.2	> 0.2	≤ 0.2	> 0.2	≤ 0.2	> 0.2
		V	V		V	V	V	V	V	V
评 分	A_1			A_2			B			
判 断	元	301	302	306	307	308	313	315	314	316

作者认为，要做成一个好的专家系统，一定应具备二个起码条件：一是要有大量的实际使用数据做基础；二是在这方面有经验的专家从这些数据中总结出若干规律，用这些规律做成有各种逻辑关系的软件，指导以后的工作。

此外，研究者还围绕铁谱的故障诊断作了很多理论探讨，如果铁谱技术用多元统计分析、函数分析、趋势分析、灰色理论等进行处理诊断。由于铁谱的各环节有“随机性”，其结果与操作者关系大，说明其数据存在很大程度上的不可靠，以这些不甚可靠的数据套进上述理论中得出的规律去预测，诊断结果的可信度不太高。

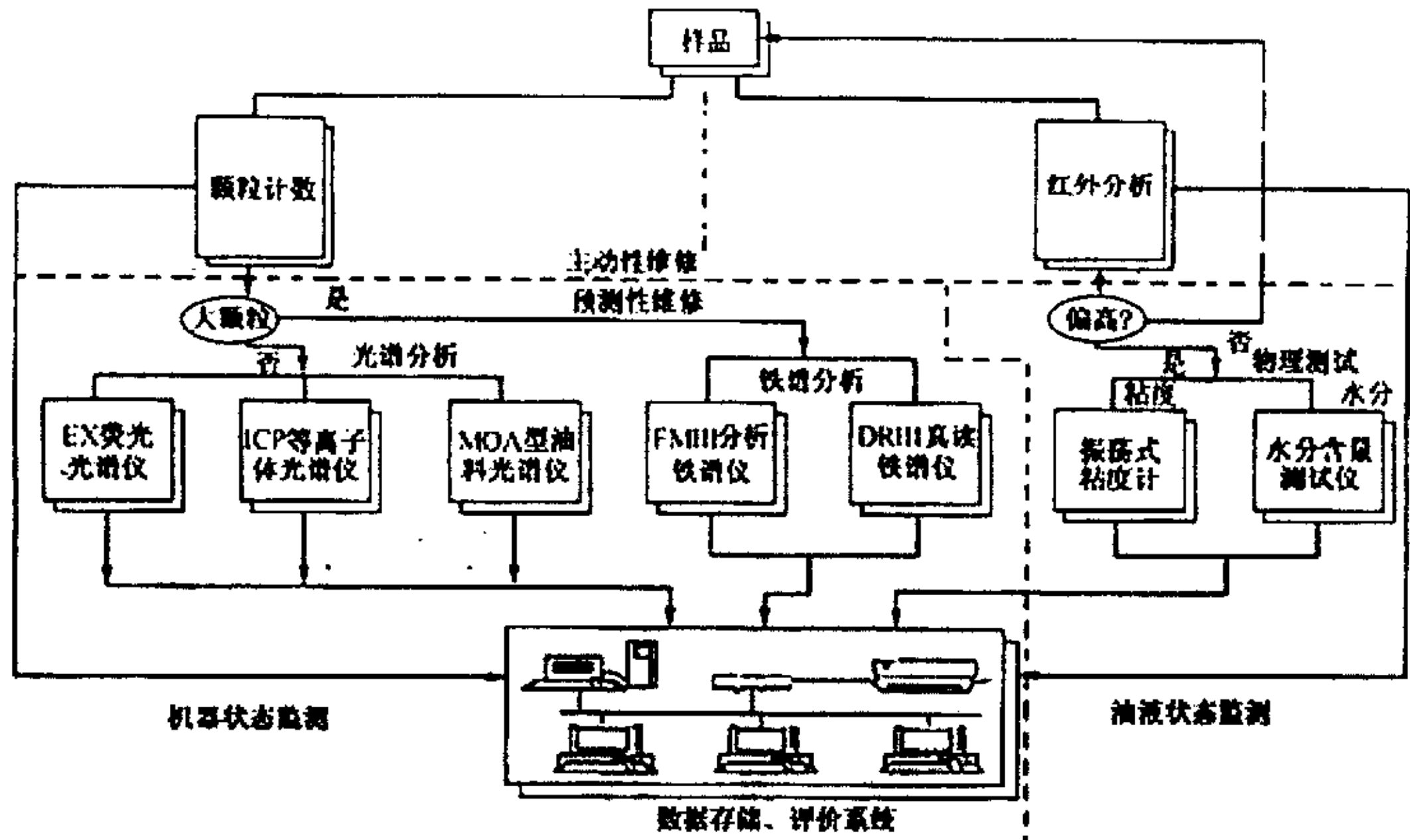


图 39 BAIRD 的油料分析状态监测系统

4.10 本章总结

润滑油变质及携带的外来污染物均会造成设备的故障，设备有故障时产生的颗粒及泄漏物也会落在润滑油中，因此我们检测润滑油的各指标及污染物的含量，即可推测设备状况和作出故障预测。

第五章 以润滑油为主题的几种监测方法以及对设备故障的诊断

1999年在广州召开的“99全国铁谱技术会议”论文中除了包含很多铁谱技术的理论探讨及应用内容外，同时也有很多对油用理化分析、红外光谱、原子发射光谱等手段作故障诊断的内容，是从润滑油对设备故障诊断的成果，在一定程度上反映了我国油液故障诊断的现状，说明从事设备故障诊断的人员已认识到润滑油也是设备诊断的组成部分。

如何评价诊断技术在应用中的价值，应考虑以下几点。

- 1、尽早预报，在原发故障前后发出预报，及时采取措施，减少故障造成的损失，容易找到故障原因。
- 2、尽量准确，能预测其故障部位及性质。
- 3、先简后繁，操作简单，省时间省费用的方法优先选用，再适当以其他复杂些的方法作补充。
- 4、找出故障原因，便于明确责任和采取改进措施。

5.1 现行润滑油诊断技术的缺陷

由于从事故障诊断的人员以机械专业为主，他们对润滑油分析大多把注意力集中在油中的磨粒携带作用的介质，因而较少首选从润滑油的变化和其中污染物去考虑分析，只有从颗粒分析发现问题后再回过头来检测润滑油本身的变化，这方面还存在明显不足。

1、“诊断”与“预测”概念模糊，及时性差

大多诊断仅起到“证明”作用，即从润滑油中磨粒情况“推测”设备中“已”发生了什么故障，而并未“预测”到设备“将”发生什么故障。在很多例子中，从光谱或铁谱中提出“预报”，拆机后发现不同程度的故障已发生，如拉缸、断环、断齿、烧瓦等，“证明”预报正确，避免更大事故的发生。如表52中96台次的预测中除16次油粘度低并未造成故障外，其余80次均已发生了机械故障，这并不能算是预报，只能是状态监测。也就是说铁谱分析并没有预测故障的发生，仅能在不停机时从润滑油中携带出来的磨粒分析去推测机内已发生的故障。希望及时处理以避免由已发生的故障而造成后继更大故障的发生。因而这种诊断仅能做故障诊断的一部分工作，而且已是有所滞后了。

2. 因果颠倒，多走弯路

实际操作中很多例子是先做铁谱，发现问题再做油的理化分析，或所有方法都做，再找出原因去排除。如某次检测中空压机油样先做铁谱，发现磨粒有氧化，再做油分析，发现含水达10%，采取措施后正常。若先做油的水含量分析，工作量会小得多，同时在水含量远未到10%即可警告，可避免已发生的故障。同时检测蜗轮蜗杆箱润滑油机械杂质高达5%，再做光谱发现铁、铜、硅大大超标，然后做铁谱有异常后拆机检查，蜗轮磨损严重。其实仅从油的机械杂质含量超高或至多从光谱中铁等浓度异常的高足以判断应拆机检查了，后面的工作已是多余。某次检测中对减速机油样做了光谱、铁谱和理如表52所示

表 52 张家界机务段对东风 4 机车两年多的机油监测汇总

铁谱分析	故障	措施	台数
磨粒浓度突增, 入口严重堆积, 多 20 μm 铝和筹铁粒, 粗糙有划痕	活塞破, 缸套拉伤	测压缩压力, 检查缸套	11
25 μm 以上铝多, 层状, 加热到 230 °C 不变色	连杆瓦、主轴瓦碾瓦	油底壳有铝片, 拆瓦检查	17
25~40 μm 铁多, 周边不规则疲劳状, 伴有球状料	齿轮剃齿、崩齿、严重肃落	检查各齿轮情况	19
铁谱分析	故障	措施	台数
磨粒浓度变化不大, 20~30 μm 铁薄片增加, 光亮	轴承保持架碎		7
铁浓度及粒度大增, 有 50 μm 以上块状, 大至 200 μm, 厚度大, 有麻点	曲轴、主机油泵齿轮轴断裂	开曲轴箱盖	6
磨粒浓度一直大, 加热 330 °C 变草黄	活塞不断	吊活塞	7
直读数直线上升, 20~30 μm 的铁多	凸轮轴拉伤	开凸轮轴箱盖	9
20 μm 以上铜颗粒多	连杆小铜套坏	检查铜未沉积	4
磨粒表面变蓝、黄、黑色氧化物多	润滑油变稀, 常自动停车	化验油粘度, 换油	16

理化分析, 用 GOAFDS 系统计算得出“轴承可能异常磨损”的诊断, 拆机发现巴氏合金轴承磨损严重, 其实仅从光谱、铁谱和理化分析, 用 GOAFDS 系统计算得出“轴承可能异常磨损”的诊断, 拆机发现巴氏合金轴承磨损严重, 其实仅从光谱分析中铅含量奇高即能作出诊断, 后面的工作可以节省。机械使用中经常由于冷却水泄漏造成故障, 某文献中用光谱和铁谱的监测工作内容之一是通过有光谱测油中冷却剂的元素(Si、Na、B)含量及铁谱磨粒而监测冷却液泄漏情况, 若用理化方法做油中水含量又快又省又准确, 何必等到由于冷却液造成恶性磨损后反过来推测冷却系统的泄漏问题。该文献中 16 个油样被柴油稀释粘度下降的例子, 只要做闪点或粘度即可检出, 比从铁谱分析磨粒去推测来得直接、及时和省力。

当然上述观点是从实用出发, 若作为理论研究则另当别论。

从上述例子可以看出, 现有的故障诊断手段不够理想: 一是故障警告的及时性较差; 二是警告不准确, 无法指出事故在哪里; 三是对故障发生的原因指导不够, 无法指导以后的整改措施。

5.2 几种方法的比较及合理配置

在润滑油对设备故障诊断技术中，常规理化分析、光谱和铁谱的合理配合很重要。设备故障的发生是设备本身的质量（设计、材质、加工精度）、操作、管理、环境及润滑油质量的综合结果，相互影响，情况复杂，只有通过几种方法从不同角度分析，才能提高诊断的准确性，我们从该次会议论文，看到如下些规律。

1、在正常情况下，光谱中磨损颗粒浓度与铁谱结果有大致一致关系，据资料记载在研究了发动机、液压系统及变速箱等大量油样数据后得出结论：在正常磨损期，大磨粒与小磨粒变化速度率之比保持不变（图 40~图 423），在研究的 11 例中，有 4 例二者预测一致，其他则是某种方法预测有故障，拆机后均得到证实。也就是说作为磨粒浓度测定，在大多情况下不必二者都做，仅做其一即可，当然首选油样品均匀，操作简单而易定量的光谱法。

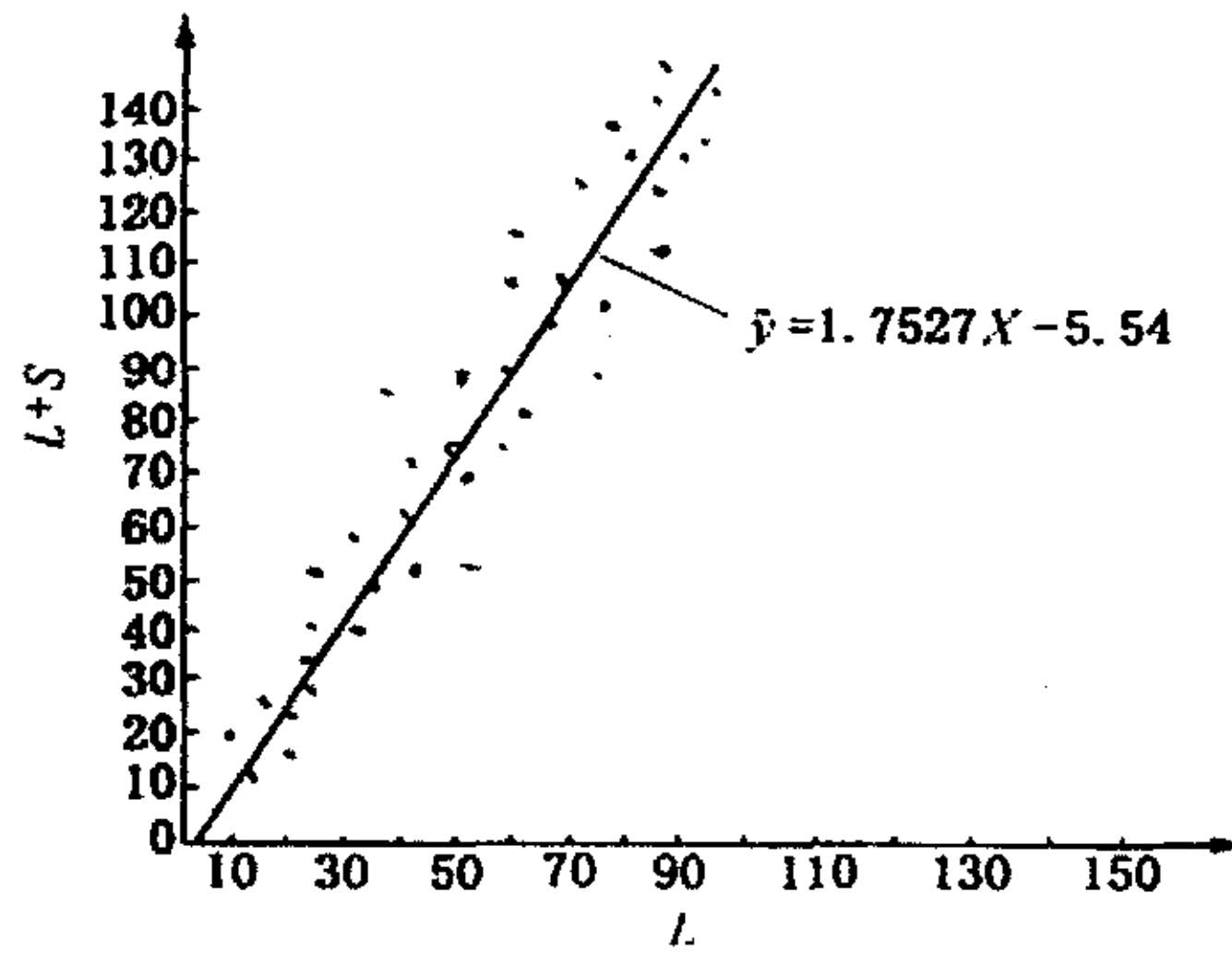


图 40 在直读仪上发动机油的大颗粒 (L) 和小颗粒 (S) 的关系

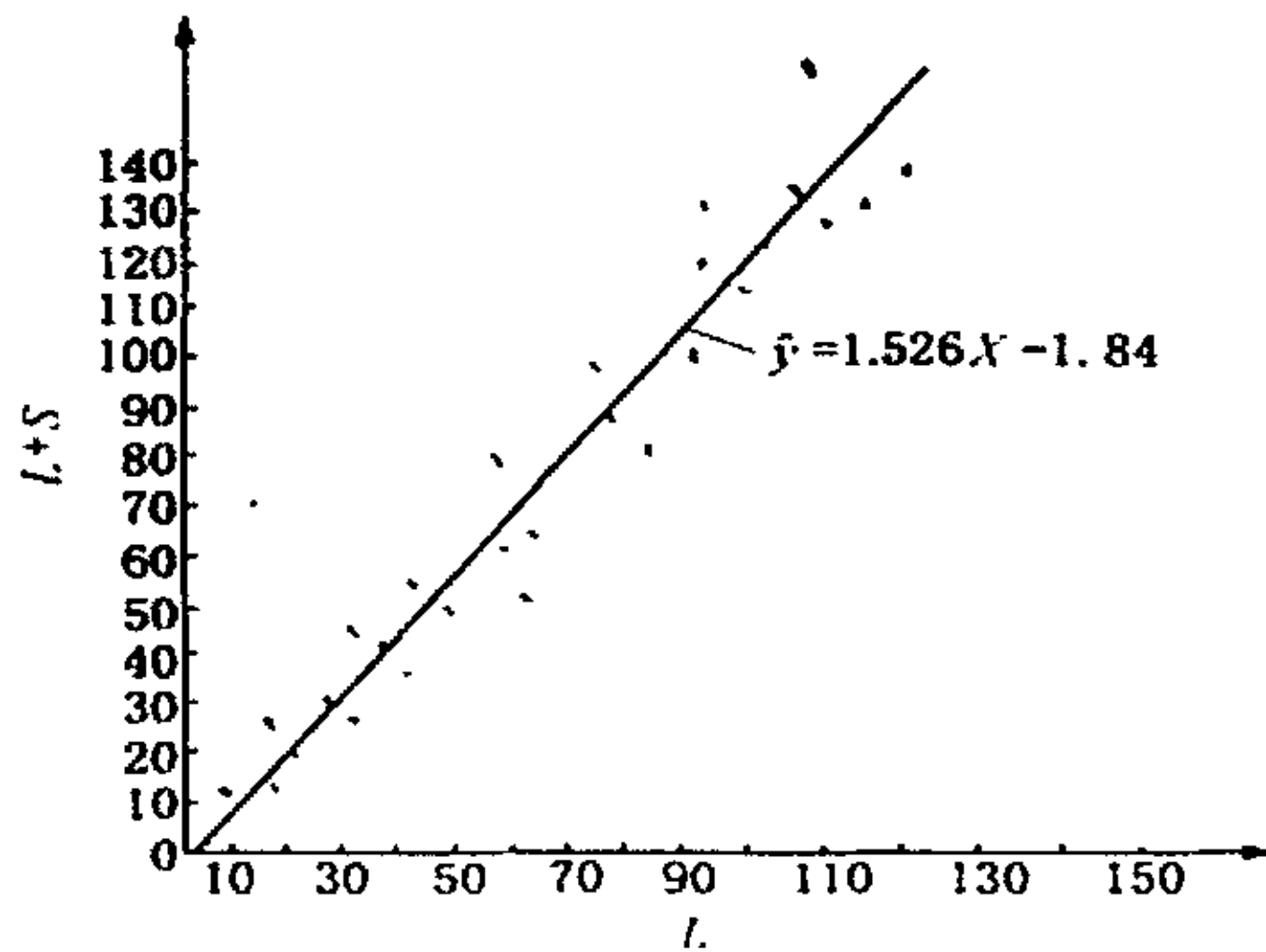


图 41 液压油中 L 与 S 的关系

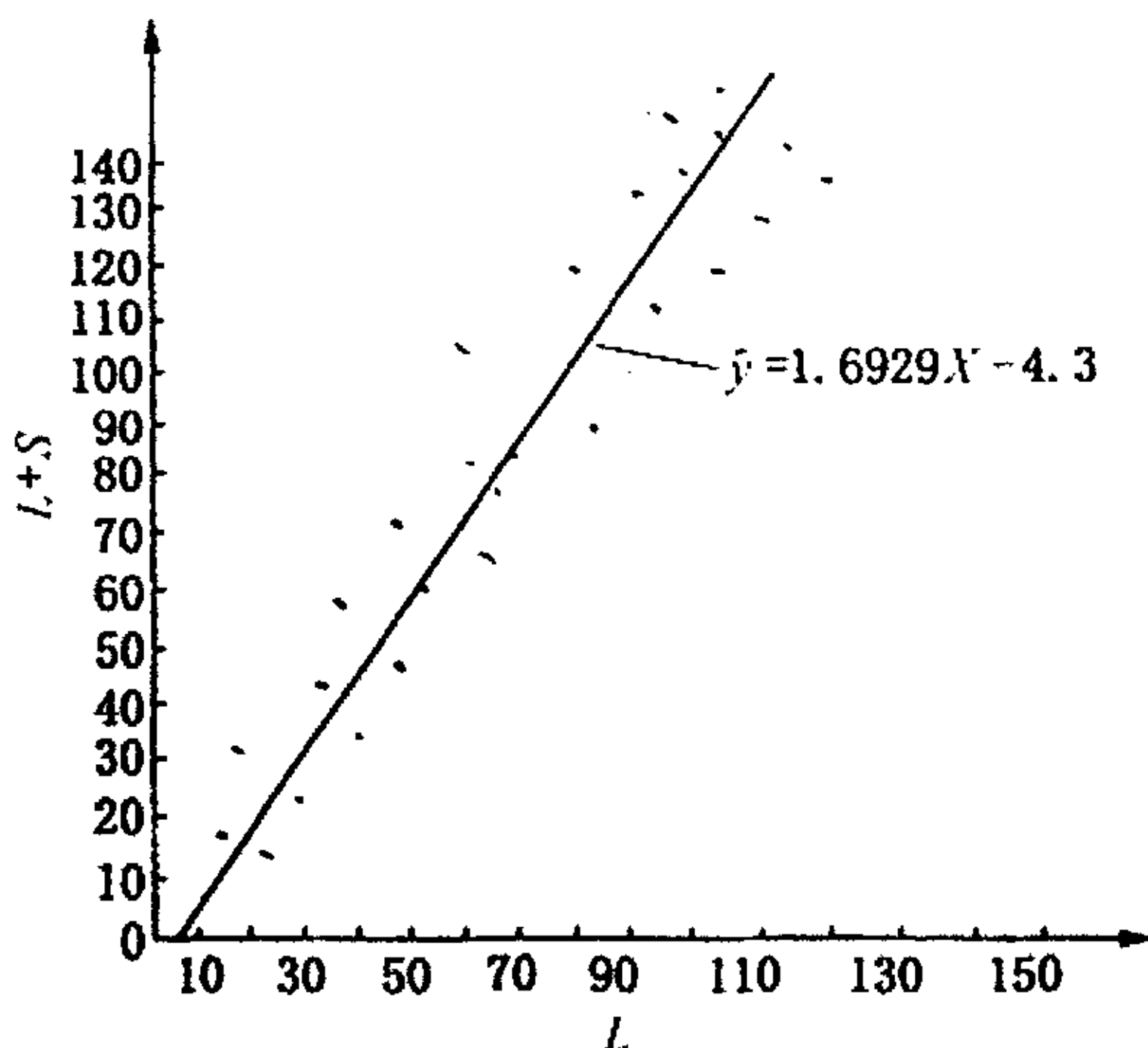


图 42 齿轮传动条油中 L 和 S 关系

2、铁谱与光谱预测结果一致的也有很多例子，如表 53 的 11 例中，光谱正常而铁谱正常的故障有 4 例。这里面有仪器本身的局限和取样的代表性的问题，同时也反映了故障的复杂性。也就是说不同的磨粒分析仪器从不同方面检测磨粒情况，互相替代不了。

几种方法在故障诊断上的优缺点比较如表 54 所示。

从表 54 可看到，几种方法各有优缺点，以理化分析最为简单、节省，分析结果便于诊断，光谱次之。因此在把润滑油分析作为工作主体时可分为如下几类。

1. 必做项目：润滑油的主要理化指标，含粘度、酸值、碱值（发动机油）、水分、机械杂质、不溶物、闪点，上述指标的变化一方面表示油的降解，油降解到一定程度会引发故障，另一方面也反映设备运转状态，如泄漏等本身就是故障或很快就会由泄漏物造成故障，若不处理将引起更大故障，因此原则上超标即停机检查、拆检或换油。检测这类项目的仪器较便宜，设置容易，操作费低，技术难度不高，省时省事，都有标准方法，分析结果都有明确且通用的数值。

2、次必做项目：这类项目检测的频率较 1 疏，接近油降解后期或污染物量接近警告值时加密，它们包括发射光谱、红外光谱等，这些项目反映了故障发生前夕或初期的后果，应及时检测。这类仪器价格较贵，但操作简便，能给出定量数据。由于设备较贵，配置不普遍。

3、选做项目：这类项目在 1 和 2 项目接近警告值或需更明确的做检测，主要指铁谱。它能使人们更清楚认识到故障的发生及磨损性质，在不停机拆机的情况下，通过铁谱能从更深层次了解机器内发生的摩擦磨损情况，因而在光谱测出某些有关金属元素浓度达到一定值后，按需要或抽检做铁谱是必要的。选做项目还包括某些油的性能指标，如抗泡、抗乳化、剩余抗氧能力等，需要时才做。

表 53 广州机务段 1998 年 1~10 月机车故障预测情况

车号	取样时间	光谱, 铁谱分析结果					检查日期	修程	拆检情况	
		元素、铁谱分析/ (kg/g)								铁谱分析
		Fe	Cr	Mo	S n	Al				铁谱分析
DF43789	1998. 1. 13	83	21	11	2	19	较多钢磨粒, 少量铝粒	1998. 1. 13	辅 5	4. 12缸连杆瓦剥离
DF43877	1998. 3. 23	150	2	17	3	22	磨粒细小且少, 正常	1998. 3. 24	辅 3	7缸套砂眼漏水, 2缸活塞换
DF40056	1998. 4. 10	27	0	1	0	15	大量钢磨粒, 较多黑色氧化物, 少量铝粒	1998. 4. 28	临修	5位主轴瓦下瓦剥离
DF40062	1998. 4. 13	20	1	1	0	5	铝粒多, 大至20 μ m 其余10~15 μ m 另有小切削铁粒	1998. 4. 13	辅 1	由曲轴裂引起主轴瓦烧
DF43877	1998. 5. 21	175	3	17	1	26	磨粒少, 正常	1998. 4. 28	临修	4缸活塞裙部崩块
DF43877	1998. 5. 21	96	3	17	6	30	少量铁粒, 铝粒	1998. 5. 28	小 3	12缸套崩快
DF40049	1998. 6. 4	75	2	6	0	10	黑、红氧化物, 锈多, 漏水	1998. 7. 4	临修	5缸环断, 伤及活塞缸套
DF43387	1998. 7. 30	406	5	21	0	99	铜铝磨粒多, 铝磨粒大至20 μ m, 铜磨粒10 μ m, 少量钢磨粒	1998. 8. 5	辅 4	3活塞裙及11缸套崩, 8缸槽磨损严重
DF40056	1998. 8. 24	59	1	1	0	13	严重腐蚀, 铝粒多10 μ m以上, 大至40 μ m, 黑色氧化物多	1998. 9. 4	辅 5	5缸环断伤及活塞缸套
DF40024	1998. 9. 9	69	1	3	0	9	铝磨粒多, 大至30 μ m 多粘着疲劳磨粒	1998. 9. 11	辅 2	32位主轴瓦碟片

表 54 润滑油的故障诊断技术比较

项 目	设备费用	操作费用	操作简便程度	结果定量性	取样均匀性	对操作者要求	便携性	在线性	显示故障原因	显示故障后果
理化分析	低	低	简	定量	好	中	有	在发展	可	可
光谱	高	低	简	定量	中	低	无	无	可	可
铁谱	中	中	繁	定性为主	差	高	无	无	可	可
红外	高	中	中	定量	好	中	无	无	可	否

4、观察项目：油压、油耗等的异常也是故障的征兆。

在实际的设备故障中，有 40%~60%与润滑直接有关，其余虽与润滑油无关，但其信息可从润滑油中检出，因而从对在用油的监测作故障诊断已包含绝大部分而且是最主要的故障源，从表 55 可看出，虽然行业相差很大，使用油的品种也不同，但故障原因惊人的相似，其中杂质污染高踞榜首，加上水污染占了故障的大部分而这些故障可从油的理化指标和机械杂质、粘度、酸值、水分等的监测方便而定量的测出，并在接近界限值前发出警告或及时采取措施，因此首选油的常规理化分析很有必要：一是它可作为以后跟踪油质量低劣或用错油，就易于造成故障，查出后立即换用就避免了故障；二是对用油的质量作检查，如新油质量低劣或用错油，就易于造成故障，查出后立即换用就避免了故障；三是它的费用及时间花费相对低，试验室配置容易。

表 55 实际发生与润滑油有关的故障原因实例/%

项 目	杂质污染	酸碱变化	水污染	粘度变化	其他
株洲冶炼厂	48	23	17	10	2
广州市政工程公司	53	20	13	9	5

在我们做润滑油的质量跟踪工作中，有多例从油中水含量和铁颗粒浓度超标而提示用户及时处理，从而避免了事故。对比从铁谱分析中发现有异常磨粒，找出原因是油中有水造成，拆机后已发生了故障（只有发生了故障才有异常磨粒）。二者相比，从故障诊断的角度，从油的常规理化分析入手的做法更合理更方便。

总的说来，设备故障的原因多种多样，还相互作用，因此其诊断是一个综合的体系，从润滑油对设备故障作诊断同样也是一个综合体系，从事此项工作的人应拓宽知识面，不应把油液故障诊断局限在油中磨粒的问题中，它不但不是全部，而且也不是最主要的部分。磨粒仅是“果”，只有从润滑油本身才能找出一些“因”，因果印证，才能提高诊断的预知性和准确性。

5.3 润滑油对设备故障诊断的实施形式

一般有自助式、独立化验室两种形式，简述如下。

1、自助式

是我们当前的情况，也是我们传统企业的“小而全，大而全”模式的体现。就是各使用或生产大设备的公司自立油料化验室，对各自的设备及使用的油料质量作监制，把测得的结果提供给有关部门作诊断。这种形式缺点很多；一是它们仅为主体的辅助部门，各个试验室仪器配置不可能很齐全，利用率较低，工作饱满程度低；二是人员技术素质不易保证，因这些化验室归属非润滑油行业，方法标准的制定和修改是润滑油行业的事情，这些化验室无法得到及时的方法修改信息及人员培训和分析结果的校验，数据准确度难保证。优点是较及时，与各公司自身具体设备结合好。

2. 独立化验室

这是现行国外流行的模式，一般为跨国连锁式。它专为社会上的用户化油品化验服务，收取化验费经济来源，它通过严格的管理及人员定期培训和交流，仪器定期校验，以保证数据质量。它一般是石油行业协会标准分会的成员，信息畅通，再加上它不属于任何有产品经营的企业，故又能起仲裁作用。它的存在使各公司不必自建化验室，省了人员和资金，方便了企业，同时它专业化程度高，设备利用率高，工作人员技能熟练，劳动生产率高，因而其化验费用肯定比自助式要低，数据可靠，受到企业欢迎。应指出，我国目前也有些大型石油企业由于其仪器配置较齐全，技术力量强，被有关部门任命为可服务于社会的“检测中心”，其性质与本形式不相同，由于这些中心的母体也生产或经营石油产品，从理论上失去了它的公正性，这些“中心”也不以服务社会为生。

如美国 PDMA 公司的润滑油分析部门提供的服务就包括：24~48h 内得到分析结果；监测机器和润滑剂状态；每个报告有有用的解释和推荐；省费用的预测技术；电子数据传递等。他们除了提供分析结果外，还根据此结果给出对设备和油的状态得出的初步判断和提出建议。另一个例子是美国石油化验有限公司 (Analysts, INC)，1960 年在加州建化验室，现在美国有 5 个化验室（分别在加利福尼亚，得克萨斯，新泽西，佐治亚及伊利诺斯州）每天完成约 3500 个油品化验，它给用户的广告词是“这张纸（油品化验诊断单，付费用 700 元港币）如何替你省一回一百万”。这是较先进的形式，随着经济发展和社会进步，有可能在我国出现。我们应大力创造条件，促进先进形式的发展。我国有人提出搞“油液诊断医院”的建议，是没搞清楚医院主要内容是治病，诊断仅是其中一个环节，而上述化验室是根据油的分析结果提出诊断意见，还要结合其他背景资料（如操作、设备原来情况和环境等）作最后诊断，因此从润滑油的诊断仅是初诊断，与维修（治病）还有一大段距离。

5.4 设备故障诊断技术的应用和实例

具备扎实的润滑油和机械原理的基本知识对故障原因分析是必不可少的，掌握了这些内容也等于为诊断打下了基础，上述很多例子是各种故障诊断技术的应用。归纳起来，应用中应注意下列几点。

1、信息准确最重要

保证信息准确迅速的传递最为重要，设备发生故障后，一定要尽量和及时到现场调查研究，收集第一手资料。实践证明，传递过来的故障信息与实际发生的情况往往相差甚远，根据传递过来的信息会得出错误结论。一般造成信息传递失真的原因有：

①责任因素。找故障原因首先的任务是分清责任，是设备质量、润滑油质量还是操作失当的问题。每方面都希望不是自己的责任，而故障的在场者一般是操作者，他在反映情况时，自觉或不自觉的有所偏向。

②多重环节因素。信息要经几层传递（先是由现场人员传到发生故障的设备管理者或领导者，再到设备使用者的润滑油采购部门，最后才到润滑油或设备的生产经营者），后面几个传递环节都没有在故障现场，每个环节得到信息后再加上自己的理解后再传递至下一环节，每层都有信息丢失和误传的可能。

③专业知识因素。操作者和信息的传递者并不是润滑油方面的行家，对设备的熟悉程度远低于设备生产厂家，因专业敏感性而具有的该了解的细节未注意，会忽略一些重要情况。

④人不因素。因事故而涉及到经济处罚或赔偿问题时，有时反映者会故意隐瞒一些对己不利的事实或提供假信息。

因此只有亲临现场，通过询问，察看故障现场，查阅有关运行及维修记录等，才能了解到真实情况，从而找出真正原因。

2、比较法

比较本行业或本单位用同一类设备或油料有无出现较多的同类故障，若没有或大家都有则可排除其责任。

某厂有 12 台不同产地的进口柴油机供发电用，其中一台用国产润滑油，另 11 台分别用几个牌子的进口润滑油，厂方投诉国产油质量差，表现是机油滤清器经常堵塞使油压力升高而报警，需停机清洗洗滤网。国产润滑油方派人调查其操作记录，发现其他柴油机也有超压报警情况，但严重情况参差不齐，由于操作人员对进口油质量无怀疑，不予反映其他柴油机的超压报警的压力数值高低不一，原来他们在柴油机安装使用时并未按说明书要求调整此值，原来多大就多大，结果有的堵得很大未报警，有的稍堵即报警（很不巧，用国产油的那台属于稍堵即报警），与润滑油质量无大关系。原因查清后厂方把各柴油机的滤清器油压超压报警压力调整一致，再无此类事发生。

某塑料制品厂有 40 台注塑机，用同一品牌同一品种的液压油，发现有 3 台的润滑油箱的油泡沫很大，厂方投诉油的抗泡性差。供油方觉得，若抗泡性差应 40 台全部或大部分的油均起泡，而不光是 3 台，肯定这 3 台有其他问题。经现场检查是这 3 台机器轴承末端密封失效而不断窜进空气，致使油起泡，消除故障后油再无泡。

3. 注意惯性思维的误区

用户的习惯或先入为主的印象，使他们对所有由此发生的事情会熟视无睹，习以为常，换了一种新产品或对其质量有怀疑的产品后，对发生的所有事情都很注意，一切被认为是异常情况的责任都算在它头上，尤以用国产油代替质量等级相当的进口油时这种情况最普通，往往要作对比试验进行验证才能解决。

某汽车运输公司所有的进口豪华客车全用进口润滑油，为了降低成本，考察了某国产品牌油的质量后，经领导研究决定各车队均要改用国产品牌的润滑油。实行后其中有些用惯进口油的司机用国产油时，发现了几个被认为的质量问题，联名上书反映此油质量差，抵制用国产油。为了弄清是非，公司即与此润滑油生产厂家联合在反映问题的司机们的车上做两种油的使用对比试验，发现用国产油时发现的问题，用进口油也同样存在，有些甚至更严重，但在未用国产油前未注意，说明并非国产油质量问题。通过对比，司机们消除了怀疑，也增长了认识。

某矿区一台载重卡车发动机大修后换用与原来油不同品牌的润滑油，不久有两个缸的连杆瓦烧死，考虑到用原来的油时从未发生此类故障，就认为是新品牌油质量差造成，要求赔偿。到现场了解，观察到烧瓦的瓦面有部分合金已溶化有流动痕迹，润滑油生成的沉积物多，而另外部分则未磨到，刮瓦痕仍可见，显然瓦面处于少部分接触状态，在高负荷下压强过大致使接触面温度高至合金熔点，使之溶化，润滑油也生成沉积物。讨

论后各方认定原因一是大修刮瓦质量不高，接触面过小，二是大修后未适当磨合即超载运行，不是润滑油质量的问题。

4. 一定要取得润滑油样

故障发生后应及时取得发生故障的设备在用润滑油及其新油样品（若找不到新油，可从其包装物上的批号查到制造厂的保留油样及数据），通过两个油样的分析数据的对比，得知其中重要指标的变化和异物含量，对查清故障原因十分有用。尤其是设备在出行途中补加润滑油时错加入另外品种或低质油品，或超期不换油等极易造成事故，此时检查油品指标寻找原因更显得重要。

5. 了解故障前后润滑油和设备的背景资料

此举对找出真正原因帮助很大，如故障前有无同类故障前科，中途加油有无问题，加新油前系统的清洁程序等。如有些液压设备维修后，用金属清洗剂或肥皂水清洗系统，再加液压油进行试机，发现泡沫大，油压不稳，认为该品牌的液压油质量差，把油排净后换另一品牌的油工作正常，就断定前一油差后一油好。其实这是冤案，前油替后油“受了过”由于系统中残存的金属清洗剂中的表面活性组分污染了前油而使其抗泡性变差，使设备工作异常，前油排净时也同时把系统冲刷干净，后油也就正常了。类似情况我们碰到多次。

6. 着力寻找故障主体或原发性故障

有的故障主体很明显，有的很模糊，如有些看起来是机械问题引起的故障有可能含有润滑油质量的原因，有些看起来是润滑油质量造成的故障中也可能含有机械原因，应仔细分析，切勿仅从表面现象就匆匆下结论。例如有很多设备的橡胶密封件易损坏而漏油，一般都归因于密封件的质量问题而从其材质和结构设计上去改进，忽略了润滑油的因素，一些油（如液压油、自动传动液和欧洲规格的内燃机油等）的规格中都有“密封件或弹性体相容性”指标，要求把几种指定的密封件材料试件泡在特定油温的油中经规定的时间后，其硬度、体积和弹性变化都要在要求范围内。而一般机械工程师不注意用的油有无此指标要求，若用的油无此指标要求，可能因油的橡胶相容性差而泡坏密封件，不应把责任算到密封件质量问题上。又如液力传动器有时“换挡感觉”差，动作滞后，一般认为是传动器质量问题，并不清楚使用液力传动油大有学问。绝大多数润滑油都努力提高其润滑性能，摩擦力越低越好，而液力传动油除了有好的润滑性能外还要有一定的摩擦性能，才能适应高低速间的频繁和及时变换，也专用一摩擦试验机作控制项目，这是其他润滑油不具有的，因此若用了不合格液力传动油，肯定会有上述现象，不能怪罪于传动器质量。至于由于机械原因而归罪于润滑油的例子更是比比皆是，如前文中润滑油在短期中粘度及酸值上升快，是由风冷效果变差使油温过高而致；润滑油中杂质堵塞滤网是报警油压调节不当造成的等。

下面是近期笔者在工作中遇到的两个案例。

①收到润滑油用户的一份“发电机组检修报告”，原文称：“故障情况：机组排放蓝烟，无法使用。检查结论：将机组拆除检查发现：凸轮轴磨损，凸轮轴锁位磨损外移，造成机组正时偏差，故凸轮轴摇臂断裂，将其中一缸缸套打裂，引起机油进入燃烧室内而排放蓝烟。故障所产生的铁屑进入增压器内，造成增压器损毁。以上故障原因据我公司技术人员判断：因机油润滑不良造成不当磨损所引发。建议：贵公司更换润滑油品牌，以免以后再发生类似故障。”从此份报告可看出，该维修公司的“技术人员”连柴油机的基本结构也没搞清楚：第一，断了的摇臂在缸外面，决没有通道进到缸中把缸套打裂；第二，缸套外部被冷却水包围，缸套裂了冷却水会进入，与润滑油进入燃烧室并无关系；第三，进入增压器的是大气中的空气和柴油机的排气，磨损的铁屑不可能进入这两类气

体中，铁屑有可能进入机油中，但由于进入增压器中的机油从机油滤清器来，里面的铁屑已被滤去，也不会进增压器中。由于报告内容错误，所得结论及建议自然也是错误的。

②关于压缩机油的报告称：“现有某公司使用我公司的压缩机油，用于某品牌的空压机中，一个月后，发现空压机打出的压缩空气含有水分，严重到无法生产，经此压缩机厂的技术人员检查，说的是润滑油有问题。客户将油换成其指定的油后，没有出现类别似情况”。从所周知，压缩空气中的水的来源，只能是空气太潮湿或冷却水泄漏，润滑油不能变成水，这些水也不能跑到压缩空气中。

由此可看出：一是部分“技术人员”素质较差，本职工作（机械）的基本知识欠缺，客观上是欺骗了对设备真正外行的用户；二是在追究责任时，把故障责任推入机械技术人员和用户都不熟悉的润滑油上是最简单也是最不负责任的处理方法，结果是并未找到故障的真正原因。

一般寻找原发性故障大多采用倒推法，故障现场见到的情况应是最终后继故障的结果，从此故障现象和理论推测上下班级后继故障，一直推测到原发性故障而找出故障原因。倒推时根据现象会有几种可能性，越往后推把某些可能性排除，可能性就越少，到最后找到较肯定的原发性故障。如上述案例①原因明白简单，就是某阶段的空气潮湿度高造成压缩空气带水，后来空气干燥了，问题就解决了，与润滑油质量毫不相干。而案例②拆机后应是同时见到几个破坏性故障：摇臂断，缸套裂和增压器坏，几种情况是建立的，还有原发性和后继性关系？既然肯定原因是润滑油质量差，机械原因的可能性如何排除？此等问题技术人员都没有解决。

表 56 从润滑油分析对设备故障诊断简单提示

润滑油分析	故障原因分析	故障责任
在用油及新油各指标正常 闪点过低 水含量大 油污物多	同类设备也多次发生同类故障 燃料燃烧雾化不良 冷却水泄漏，密封不良 机况差，过滤失效	设备质量
在用油指标正常	同类设备极少发生此类故障	操作不当
新油指标不合格 使用中主要指标变化快	用了劣质油 油的质量档次低	润滑油质量
渍在使用中指标突变 在用油指标超警告值 机械杂质高	补加油时加错油 换油期太长 环境太差	管理不善

5.5 本章总结

在润滑油对设备故障诊断技术中，常规理化分析、光谱和铁谱的合理配合很重要。设备故障的发生是设备本身的质量（设计、材质、加工精度）、操作、管理、环境及润滑油质量的综合结果，相互影响，情况复杂，只有通过几种方法从不同角度分析，才能提高诊断的准确性。

第六章 结论与展望

国内外在以润滑油为主体的故障诊断的研究开展的较少,而且是对某一具体的设备故障进行分析,提出有针对性的解决措施,没有一个全面综合性的故障分析和解决措施,因此,进行以润滑油为主体的设备故障诊断方法和措施具有重要的意义。本人通过润滑油对设备故障产生的原因和机理的学习研究,并与实际工作相结合,取得了一些经验和认识:

1. 润滑油在设备运行中具有重要的作用,在使用中其性能指标会因外界条件的影响而发生变化,因此在设备运行初期对润滑油的取样分析是预防发生故障的基本手段之一,对油样中各种理化指标如粘度、酸值、水分以及金属颗粒含量的分析,是极其重要的工作。

2. 设备故障诊断常用的是机械方面的方法,如振动、温升等,与润滑油有关的也仅是对其携带出来的磨粒的监测。本文提出的从润滑油的变化作为主体(油的降解、生成沉积物、进入异物及油压、油耗等)对设备故障诊断是一种行之有效的方法,可以及早发现故障,采取预防措施,降低设备维护成本。

3. 避免设备故障的发生,还应以人为本,规范设备的润滑油使用和检测制度,结合实际,以预防为主,将设备故障的发生消除在萌芽之中。

设备故障的诊断是一项复杂的工作,基于润滑油变化对设备进行故障诊断还是一项新的课题,因而有待提高和完善的地方很多,展望未来,在以后的工作中以下几个主要方面需要更加完善和充实:

①警告指标的重新确定。本文引用的指标数值是润滑油行业用以控制换油期的数值,它们与故障息息相关,但并非用以作故障诊断的专用警告值,是否应有另一专用值,尚需研究。

②研究用于现场的快速简易的与润滑油有关项目的分析方法,以便操作更快捷及时和节省,开发传感器型的直读式油质变化仪表,做到在线监测。

③加强与其他机械方法诊断技术的互相配合的研究,提高诊断的预知性、准确性和及时性。

④加强机械行业和润滑油行业的交流和协作,发展以润滑油为主体的故障诊断技术。目前行业间交流少,人员知识面窄是主要问题。一些从业人员认为“油样分析技术”内容就是铁谱、光谱和磁塞,似乎与润滑油有关的故障诊断内容就只是识别磨粒,而识别磨粒的主要手段就只是铁谱。如此狭窄的知识面大大妨碍了从润滑油中对设备的故障诊断技术的发展。所以从事设备故障诊断的人才应具有多学科的知识,现从事此工作的人员也应“补课”,扩大思考范围;其次应组织跨行业的有关试验,达到大的共识。

⑤应在我国推广和支持先进的故障诊断的实施形式,组建独立式油料化验所等社会服务性和仲裁性机构。

从全文内容可看出,要减少故障,提高效益,除了有好的硬件(高质量的设备和润滑油)外,软件(设备的操作和管理)的作用十分重要。在硬件已固定的情况下,只要我们把操作和管理搞好,就可做到高效和安全生产。本文的内容就是围绕这个宗旨展开的,希望实际工作岗位人士能针对具体情况,创出一套行之有效的软件,使设备故障诊断技术更完善。

参考文献

- [1] Y. W. Liu. Adv. etc. X-Ray Anal. 29(1986)503
- [2] R. W. Sanders. etc. Anal. Chem. 55(1983)1911
- [3] A. Zararsiz. etc. Determination of wear metals in used lubricating oils by X-ray fluorescence spectrometry. Nuclear Instruments in Physics Research B 108(1996)385-388
- [4] H. S. Ahn. et al. Practical contaminant analysis of lubricating oil in a steam turbine-generator. Tribology international .1996. 2
- [5] Ray Beebe. Condition Monitoring of Steam Turbine Generator Governing System[J]. COMADEM Proceedings, 1998.
- [6] Liu Chao. The Development of a MIMOSA Compliant Condition Monitoring System[J]. Condition Monitoring in Practice, 1996.
- [7] Chris K, Mechefske. Automatic Machinery Fault Detection and Diagnosis Using Fuzzy Logic[C]. Condition Monitoring 96 Conference, USA, 1996.
- [8] Bernhard P, Bettig, Ray P S, Han. Predictive Maintenance Using the Rotordynamic Model of a Hydraulic Turbine-Generator Rotor[J]. 1998, July, ASME Journal of Power Industry , 1998
- [9] Scheibel, John R, Iman, Imada Ebben, Thomas G, Blomgren Rick. Expert system-based, on-line rotor crack monitor Power Conference v51 Apr 24-26 1989 Publ by Illinois Inst of Technology pp. 369~380
- [10] Bosmans, Ronald F, Hewitt, James A. Expert system for machinery vibration diagnostics[J]. American Society of Mechanical Engineers, International Gas Turbine Institute, IGTI v7 Sep1-3 1992 ASME pp. 365~371.
- [11] Ashley G, Duggan P E, Shoe SWW, Teller A. Expert systems provide help in life extension, availability improvement [J]. Power Engineering , 1988, 92(5):46~50.
- [12] Douglas J Smith. Artificial intelligence-today's new design and diagnostic tool[J]. Power Engineering, 1989, 93(1):26~30.
- [13] John Reason. Expert systems promise to cut critical machine downtime (J). Power, 1987, 131(3):17~24.
- [14] Rudolf Thom. Extend oil drain intervals conservation of resources or reduction of engine life. SAE981443
- [15] J. Sutherland NPRA nature Fuel and Lubricant Meeting , 1989
- [16] 赫贵一. 润滑油品质与发动机故障. 使用与维修. 1996
- [17] 王世敏. 润滑油铁谱分析和光谱分析在电厂设备故障诊断中的应用. 广东电力. 1999. 5
- [18] 王家宏. 基于润滑油分析技术的船舶柴油机故障诊断. 浙江海洋学院学报. 2001. 2
- [19] 张志刚. 检测润滑油预报发动机故障. 工程机械与维修. 2000. 8
- [20] 阮跃. 振动故障诊断系统中的征兆获取[J]. 热能动力工程, 1999(5)
- [21] 刘仁德. 油液诊断技术在宝钢设备状态监测中的应用. 润滑与密封, 1999年
- [22] 潘仁伦. 中高档柴油机油应用经济性研究. 石油商技, 1996. 2
- [23] 莫燕玲. 东风4型机车柴油机故障与铁谱分析. 润滑与密封, 1999年增刊
- [24] 刘树新. 风季光铁谱分析在DF4型内燃机车检修工作中的应用. 润滑与密封, 1999年
- [25] 崔万江. 机械正常磨损期直读铁谱数据特性的研究. 润滑与密封, 1999年
- [26] 虞锋. 浅析施工机械润滑故障及管理. 润滑与密封, 1999. 3
- [27] 李国华. 设备故障诊断. 北京: 化学工业出版社, 1999
- [28] 徐扬光. 设备综合工程学概论. 北京: 国防工业出版社, 1998

- [29] 关子杰. 内燃机润滑应用原理. 北京: 机械工业出版社, 1994
- [30] A. 希林著. 殷丁译. 汽车发动机润滑. 北京: 人民交通出版社, 1981
- [31] 盛焕侯. 各国石油产品手册. 上海科技文献出版社, 1995

致 谢

一年来，我的导师曹利新教授在生活和学习上都给予了我很大的帮助，尤其是在论文的热忱指导和大力支持，为我能够顺利完成这次设计工作付出了很多的时间和精力，在此我向曹教授表示诚挚的谢意。曹老师的学风、学识和对事业孜孜不倦的追求精神永远值得我学习。

同时，对论文的完成其他老师和厂矿的领导及朋友给予的帮助，还有提出的宝贵意见和独特的见解，再次表示衷心的感谢。

褚 凤 林

2003.4.17