

# 柴油机的机油 光谱分析检查

[比]雅克·里格著  
乔英忍译



中国铁道出版社

# 柴油机的机油光谱 分析检查

[比]雅克·里格著  
乔英忍译

中国铁道出版社

1980年·北京

## 内 容 简 介

柴油机的机油光谱分析检查，是用光谱分析的方法对机油中的金属颗粒含量进行测定，以便确定柴油机的工作状态是否正常。本书以比利时国家铁路机车用柴油机的试验、分析为基础，介绍了光谱分析检查方法的具体应用，特别是对如何排除某些干扰因素作了较详细的说明。

本书可供从事柴油机检修、运用及研究制造人员学习参考之用。

### 柴油机的机油光谱分析检查

JACQUES RIGAUX

Le Contrôle des Moteurs Diesel  
par la Spectrographie des Huiles

~~de Graissage~~  
DUNOD Paris 1961

乔英忍译

中国铁道出版社出版

责任编辑 朱全凯

封面设计 ~~程 达~~

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{16}$  印张：6.625 字数：141千

1980年5月第1版 1980年5月第1次印刷

印数：0001—4,000册 定价：0.55元

## 目 录

<b>第一章 柴油机的机油光谱分析检查及其验证</b> ·····	1
§ 1. 绪论·····	1
§ 2. 机油检查用光谱设备的比较·····	6
§ 3. 机油光谱分析技术的介绍·····	11
§ 4. 测量的重复性和再现性·····	22
§ 5. 小结·····	42
<b>第二章 浓度线和浓度区</b> ·····	43
§ 1. 绪论·····	43
§ 2. 实测浓度线的研究·····	50
§ 3. 对同类型柴油机浓度区的研究·····	89
§ 4. 小结·····	119
<b>第三章 通过光谱分析来确定柴油机的异常工作状 况</b> ·····	122
§ 1. 绪论·····	122
§ 2. 故障情况的研究·····	123
<b>第四章 机油光谱分析在柴油机试验台研究工作上的 应用</b> ·····	147
§ 1. 绪论·····	147
§ 2. 一号试验·····	148
§ 3. 二号试验·····	155
§ 4. 三号试验·····	159
§ 5. 小结·····	163

<b>第五章 颗粒大小对测量重复性的影响和机油滤清器的性能对颗粒大小的影响</b> .....	165
§ 1. 绪论 .....	165
§ 2. 粒径和测量重复性之间的关系 .....	172
§ 3. 通过滤清器和定量分析的方法确定金属颗粒的大小 .....	178
§ 4. 小结 .....	193
<b>第六章 柴油机光谱分析检查的适用范围及总结</b> .....	195
§ 1. 发生故障时 .....	195
§ 2. 柴油机正常磨耗 .....	196
§ 3. 柴油机类型的影响 .....	197
§ 4. 光谱分析在柴油机研究工作中的应用 .....	198
§ 5. 小结 .....	200
<b>附录 相对标准偏差和各试样间颗粒分配的关系</b> .....	202
§ 1. 概述 .....	202
§ 2. 概率的确定 .....	203
§ 3. 相对标准偏差和颗粒数之间的关系 .....	205

# 第一章 柴油机的机油光谱 分析检查及其验证

## § 1. 绪 论

### 一、前言

多年来，欧洲许多铁路公司在其很大一部分铁路线上努力实现内燃化。用内燃机车取代蒸汽机车，那么就在检查和修理方面提出了许多问题。为此，有关技术人员就要相应地作出极大的努力，组织生产，确保内燃机车的检修。

事实上，大部分欧洲铁路公司继续留用了原有人员，也就是本来从事蒸汽机车检修的技术人员和工人，现在要从事内燃机车的检修工作，而新招收的专门人材是很少的。

此外，柴油机数量之多，型式的繁杂，以及运用条件的不同，都要求铁路有专门维修柴油机的组织机构。

因为有的机车装有两台柴油机以及有备用机组，据估计，机车柴油机的数量约为运用机车和动车数量的 1.2 倍，因此一家铁路公司往往拥有几百台甚至数千台运用中的柴油机。这些柴油机的功率是 400~2000 马力，而 1400 马力以上柴油机的数量在半数以上，投资是很大的。

机车柴油机在运用中的安全可靠性能标志着铁路的水平。

考虑到柴油机数量之多、投资之大和要求工作可靠，柴油机的修理需要有一个专门组织，以便降低维修费用，减少运用中的故障。

尽管这些柴油机分散在铁路线上，但是，最好还是能够

对柴油机进行集中的预防性检查。

柴油机机油光谱分析的首要目的，就是对柴油机进行不解体诊断，以发现非正常磨耗。正如后面要提到的，这种检查能够解决一些日常检查中所不能解决的问题。

## 二、柴油机的润滑

柴油机的润滑技术近年来发展很快。这种进展一方面表现在人们试图用降低磨耗来提高柴油机的寿命，另一方面，随着柴油机比功率的提高（用增压的办法或提高转速的方法来实现），人们也在寻求柴油机的最优润滑条件。

当前，在柴油机的润滑（系统）中，普遍采用有添加剂的机油。

机油中的添加剂含有有机金属化合物，它有三种作用：

1. 添加剂通过其防氧化作用能够中和燃油在燃烧过程中形成的酸。特别是含量在0.5%~0.8%之间的硫元素能够形成硫酸，而腐蚀各种轴瓦及轴承。

2. 添加剂通过其分散作用能够使金属颗粒和未完全燃烧的碳分子悬浮。

3. 某些添加剂通过其抗磨耗作用能够改善部分运动件的工作条件。

下面一章讨论的柴油机所采用的添加剂主要具有防氧化作用和分散作用。

添加机油有两种情况，一种是更换油时重新加入新油，另一种是注入特备油，在这种机油内，添加剂的浓度较大，可以提高原机油的去垢作用。

## 三、机油中悬浮的金属颗粒的来源

柴油机机油内的金属颗粒有三种来源：1. 柴油机本身；2. 进入柴油机内的空气；3. 水循环系统。

下面我们来研究这三种污染源及其对润滑系统的影响。

## 1. 柴油机

来自柴油机本身的金属颗粒是由于下述原因而产生的：

- 1) 运动件的磨耗。
- 2) 由燃烧产生的酸蚀作用。这种作用是当机油中防氧化作用的添加剂的性能下降，以致它不能有效地防止柴油机受酸的侵蚀。

我们再来依次研究不同的运动件以及确定能引起柴油机正常磨耗的颗粒种类。为了叙述方便，一些异常情况不予考虑，同样地也不考虑金属性质的变化，尽管其浓度有显著提高。

### 1) 活塞环—缸套

有两种可能：

- ① 镀铬的铸铁缸套—铸铁环
- ② 铸铁缸套—镀铬环

这两种情况都会产生铬和铁。如果是铸铁缸套，就会出现硅元素。若发现有其它元素的微量存在，可不予考虑。

铬和铁的多少将随着间隙和磨耗情况不同而变化。这个问题后面将会讨论。

### 2) 活塞—活塞环

通常活塞是铝质的，很少情况下为铸铁。当活塞为轻合金时，那么由于活塞环在环槽内的活动，而会出现铝元素。

### 3) 活塞—连杆

活塞通过活塞销中段和青铜套与连杆小头相连，销套的磨耗会产生铜和锡。

### 4) 连杆—曲轴

连杆瓦一般为铝青铜、铜锡合金或青铜上有银或钼镀层所制。

由这些部件产生而后到机油中的金属颗粒多数为铜、



铅、锡，有时有银和铟。

正常情况下，连杆颈只有轻微磨耗，铁元素可忽略不计。

#### 5) 主轴瓦

除了某些高速柴油机采用滚柱轴承外，一般柴油机的主轴瓦为铅青铜或铜、锡轴瓦。

铜、铅、锡三种元素的出现表明主轴瓦的磨耗。有时磨合层由铟或银组成。因而，这时还必须在上述三种元素中附加这两种元素中的一种。

#### 6) 凸轮轴瓦

除了铅、铜和锡以外，凸轮轴瓦的磨耗会在机油中出现铈元素。

#### 7) 由燃油燃烧所产生的酸蚀作用

如果抗氧化添加剂的效能很好，那么，由燃烧生成的酸，特别是燃油中的硫形成的硫酸被中和，而不会对各种轴瓦起腐蚀作用。但是，如果机油的去污能力下降到规定水平以下，那么，酸就会侵蚀铅—铜—锡三层合金，这些金属会以稳定的化合物形式（如环烷酸盐）进入机油内，或者当轴瓦腐蚀严重时，呈自由颗粒状态。

## 2. 柴油机的进气

目前，在线路上，小功率柴油机的进气通过油浴式空气滤清器，大功率柴油机的进气则通过金属网空气滤清器。

但是，尽管有这些滤清元件，而一部分空气中的尘粒还是能够进入柴油机内。这些杂质的性质和浓度将随着运用地点、气候条件而不同。

在机车牵引中，这些空气中的杂质将随着内燃机车运用地区而变化。起破坏作用的主要元素为硅和铝，它们以二氧化硅和氧化铝的形式出现。

此外，制动时闸瓦的铁末也会通过滤清器而被吸入柴油机内。

表 1—1

元素名称	来源
铁	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 闸瓦产生的粉末</li> <li>2. 缸套</li> <li>3. 活塞环</li> <li>4. 曲轴轴颈和各种轴销</li> </ol>
铅	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 连杆瓦</li> <li>2. 主轴瓦</li> <li>3. 活塞青铜销套</li> <li>4. 凸轮轴轴套</li> </ol>
铜	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 连杆瓦</li> <li>2. 主轴瓦</li> <li>3. 活塞青铜套</li> <li>4. 凸轮轴轴瓦</li> <li>5. 热交换器的铜管</li> </ol>
锡	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 连杆瓦</li> <li>2. 主轴瓦</li> <li>3. 冷却器组中的管子</li> </ol>
铬	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 镀铬缸套</li> <li>2. 镀铬活塞环</li> <li>3. 冷却水中的铬酸盐</li> </ol>
硼	冷却水中的硼酸盐
硅	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 柴油机进气带人的粉尘</li> <li>2. 铸铁缸套</li> </ol>
锑	凸轮轴轴瓦
铝	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 活塞</li> <li>2. 柴油机进气带人的粉尘</li> </ol>
银	镀银的活塞销

### 3. 水循环系统

在正常情况下，机油和冷却水是绝对分开的。但是，当发生故障时，例如气缸盖裂纹或冷却元件泄漏，都会使水渗入机油内。这样在处理水过程中的硼酸盐或铬酸盐就会污染机油，因此，硼和铬的出现表示漏泄。

### 四、分析程序

分析程序主要是从上面叙述中归纳而成的。

机油内金属悬浮物的种类和浓度主要和柴油机及其辅助装置的性质有关。而值得我们重视的有关金属元素一般不超过 10 种。用光谱分析法来检查和诊断这 10 种金属元素对于高、中速柴油机的状况来说是可以的了。这 10 种金属元素是：铁、铅、硅、铝、银、锡、铬、铜、铈、硼。

表 1—1 中示出了每种金属元素的种类及其可能的来源。表中只列出了待光谱检查的柴油机的一些有关金属元素。很明显，当主轴瓦或连杆瓦等含有其它金属时，如铜等，那也必须考虑在内。

## § 2. 机油检查用光谱设备的比较

### 一、概述

由磨损而产生的金属颗粒是很微量的。例如，有一个八缸柴油机，缸套没有镀铬。铁元素是在磨损生成物中浓度最大的，因为缸套是承受磨损件中最大的零件。

在经过四十万公里运行后，其缸径的磨耗量不超过 0.2 毫米。假设缸套磨耗部分的高度为 700 毫米，那么每缸油槽内含铁粉的重量为

$$P = 7.8H(D_1^2 - D_2^2)\pi/4$$

式中  $D_1$ ——运行四十万公里后的缸径（分米）；  
 $D_2$ ——运用前的缸径（分米）；

$H$ ——缸套磨耗部分高度（分米）。

又设  $D_1 = 3.002$  分米

$D_2 = 3.000$  分米

$H = 7$  分米

那么，对于一个缸来说，磨耗铁粉的重量

$$P = 0.515 \text{ 公斤。}$$

这样，经过四十万公里运行后，八个缸共为4.120公斤。那么每一千公里磨耗铁粉的重量则为0.0103公斤。

假设机油的消耗量为7克/公里，那么运行一千公里后，机油耗量为7公斤。如果油底壳容量为650公斤，则这种变化可以忽略不计。

如果其浓度用重量计，则浓度等于金属生成物的重量与油底壳中机油重量之比，或者

$$0.013/650 = 1.6 \times 10^{-5}$$

机油光谱分析时，测量单位为ppm（百万分率）。它相当于 $10^{-6}$ 的重量浓度。这样走行一千公里后，浓度的增长可用16ppm来表示。事实上，这种增长是很小的，因为机油滤清器阻止了大粒径的金属粒子的进入。

因此，测量浓度的单位用ppm表示。

我们再来研究一下如何通过定量分析来既快又精确地解决这个问题。

我们可以选用一台直径为2米的光栅摄谱仪。这个光栅按斯温斯（Swings）法计算。仪器为直读式，摄像机用光电管代替。

在我们选用这种仪器之前，我们考虑了其他几种可能解决的方法。

下面将逐个审查以验证我们的选择。

## 二、各种分析方法

### 1. 化学分析法

目前用的微量化学方法不能达到万分之一以下，也就是 $10^{-4}$ 的浓度。另外，这些方法比较费事。然而我们要解决的问题却是一个工业应用中的分析问题。

实际上，目前约有柴油机400台，若每台柴油机每日取样2~3次，也就是平均2.5次，那么分析次数就为1000次。如果每次定量分析中有9种元素，那么每月需要定量分析的元素就有9000种。

若按照铁路牵引动力内燃化计划，近几年内燃机车将达1000台。

假设对每种元素进行微量化学法测量时，需要15~30分钟，那么，每月就需要2500~5000小时。这就要求有15~20个化学分析人员的实验室。

因此，化学分析的方法是不可取的，还是应该探讨一下光谱分析法。

### 2. 光谱分析法

在许多光谱技术中，发射光谱是行之有效的，它可对微量金属颗粒进行一系列的分析。

目前有两种单色射线的解决方法：棱镜和光栅；也有两种记录方式：摄影和利用光电管直读。这样，摆在我们面前的就有四种选择：胶片记录带式棱镜摄谱仪；带电子摄像机的直读式棱镜摄谱仪；胶片记录带式光栅摄谱仪；直读式光栅摄谱仪。

#### 1) 胶片记录带式或直读式摄谱仪

不管元素的性质和浓度范围如何，表1—1所列分析项目总是不变的。

用胶片记录带进行记录，需要进行许多操作过程：显影、

冲洗、定影和用光密度计测量照度。此外，胶片本身还要仔细校正。每一项分析都要利用一种内定标准。整个操作过程，至少需两个人的全部时间。

每一次操作或测量都可能出现误差，从而使测量结果分散。

解决问题的最好办法是用直读仪。

这种仪器通过测微缝，将各定量的单色射线分隔开来。一个光电管将光通量转换成电流，经放大后输入测试电桥。这一套自动的电子装置代替了上述手工操作的记录带。另外，正如后面还要提到的，直读式的分析项目能够避免使用内定标准。

## 2) 棱镜摄谱仪或光栅摄谱仪

我们有意排列了序列，按照这个序列，审查了记录问题和射线的色散方式，因为摄谱仪的选择主要与记录有关。

对于棱镜摄谱仪来讲，平均色散约为10~15埃/毫米（接近3000埃），而最大色散仪器的色散不超过6埃/毫米（接近3000埃）。除了随波长而色散发生变化外（棱镜系统的特点），对于整个射线来讲，波带扩展不会超过20厘米左右。

使用棱镜仪时，如果定量分析的元素的数量超过8~10个，则很难在每一条射线上安置一个测微缝和光电管。在这种情况下，为了使之直接读出，则所采用的系统中将有一个测微缝和一个活动的光电管，它将能按照预先规定的项目移动到每条射线上。这个系统很细微，工作起来很不可靠而容易失调；因此，对一些贫射线的合金，如铝和镁的合金还是可用的，而对一些富射线的合金来说则很不合适。这样，我们的意向还是选择直读式光栅摄谱仪。

## 三、摄谱仪简介

用于机油分析的直读式光栅摄谱仪由比利时电子管及电

子设备制造厂 (M. B. L. E.) 制造, 其设备包括光源、摄谱仪和测量架。

### 1. 光源

光源有两种作用: 按照需要产生电弧或电火花, 并稳定电脉冲, 无论光栅电压如何变化, 由马克革专刊许可并由比利时制造的闸流管控制的光源主要性能如下:

- 1) 电极间的电离系统触发放电;
- 2) 电容系统通过放电, 提供电火花;
- 3) 调节系统保证放电的稳定性。

### 2. 摄谱仪

摄谱仪的性能如下:

- 1) 帕斯尚·伦格 (Paschen Runge) 装配;
- 2) 罗郎德 (Rowland) 圈直径 2 米;
- 3) 斯温斯 (Swings) 光栅:

每毫米 981.6 刻线

曲率半径 1999.5 毫米

楔角  $11^{\circ}30'$  和  $18^{\circ}$

鉴别率  $78560 \times 75\%$

色散率 4.8 埃/毫米 (第一等级内)

由于有两个楔角和沿着法线的照明, 因而有可能用两个全光谱, 在光轴每边各一个。对于机油分析, 只利用摄谱仪一边装有光电摄像机的一个。为了研究的需要, 以后还可通过电子方式或摄像机的方法利用另一边的一个。

### 3. 测量装置

测量装置包括一些光电管和充电电容, 而测量桥则由一个静电计构成。

被分析的 10 种元素对应着 10 个光电管, 每个光电管又连接着两个敏感电路, 以便能控制 1~100 的浓度变化范围。

各元素的测量是半自动的，只要按一下相应元素的按钮就可以了。

图 1—1 表示光谱测量仪原理图。

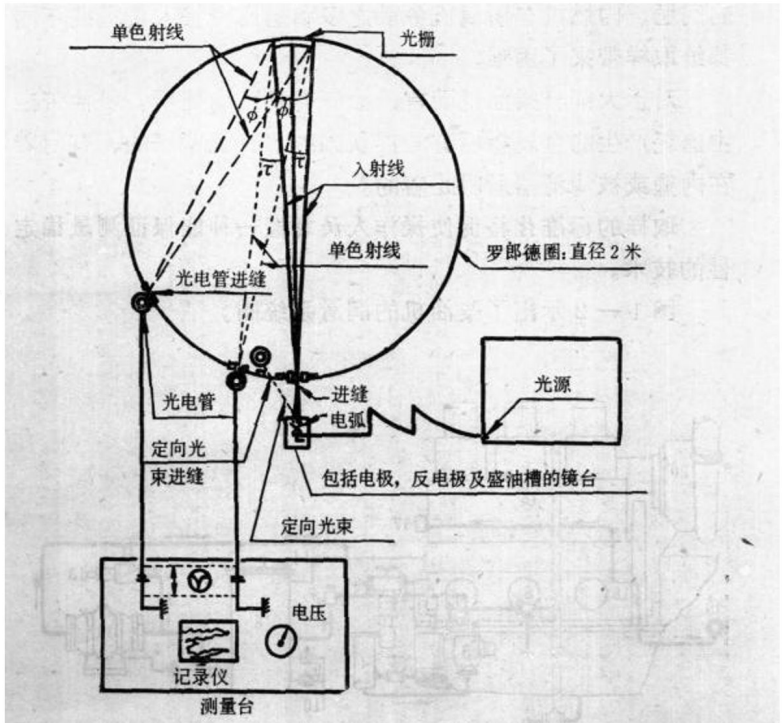


图 1—1 光谱测量仪原理图

### § 3. 机油光谱分析技术的介绍

我们顺序探讨以下几个方面的技术：1. 取样；2. 试样的准备；3. 特性分析的叙述。

#### 一、取样技术

对于一个铁路网来说，进行柴油机机油检查所遇到的特



殊问题是柴油机的数量很多，一般都在几百台，而较大的铁路网则超过千台。

再之，内燃机车分布在整个铁路线上，这又是一个附带的问题。内燃机车所属机务段之多和运用检修人员程度不同都给取样带来了困难。

对于大部分柴油机而言，油底壳是贮油处所。机油带走由磨耗产生的金属颗粒有悬浮状态的、有沉了底的、有附着在内壁或被滤清器所阻止着的。

取样的标准化将促使操作人员掌握一种能保证测量稳定性的技术。

图 1—2 示出了柴油机的润滑系统图。

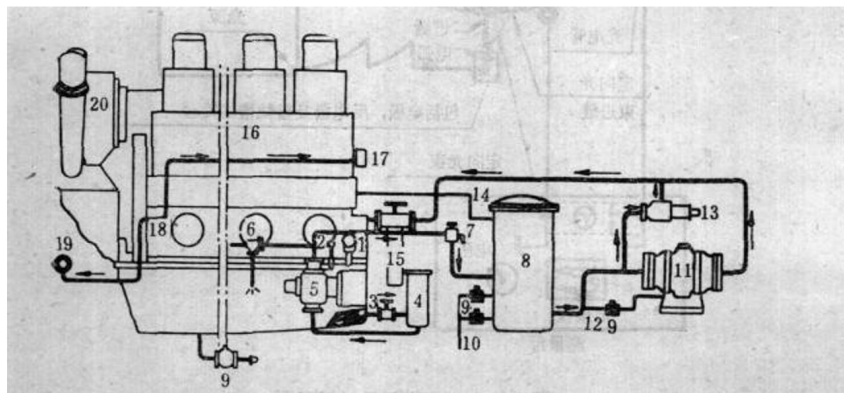


图 1—2 柴油机润滑系统

- 1—充油螺塞\*，2—油标尺\*，3—流量计，4—金属网滤清器，5—油泵\*，6—安全阀(125磅/英寸<sup>2</sup>)，7—取样龙头，8—滤清器，9—截止阀，10—滤清器和油路的排油管，11—油冷却器，12—冷却器排油管，13—旁通阀(25磅/英寸<sup>2</sup>)，14—排油通气管，15—档板式滤清器，16—柴油机，17—油压断电器，18—压力油管，19—压力表。

• 置于柴油机排气侧。

• • 置于柴油机燃油泵侧。