

内燃机的润滑与磨损

NEIRANJI DE RUNHUA YU MOSUN



内 容 简 介

本书是从提高内燃机可靠性和耐久性出发,根据国外有关资料并结合我国实际情况而编写的。全书共分六章,第一章着重论述摩擦、磨损和润滑的机理。第二至五章主要以汽车、拖拉机和船用发动机为对象,详尽地叙述了各运动部件的润滑和磨损。特别是对柴油机气缸套和活塞环的异常磨损以及轴承和气阀等损伤事故,进行了较为全面的分析,并指出了应该采取的相应措施。第六章对润滑油的性能指标、选用原则、使用管理、质量检验分析以及添加剂的作用和种类作了重点介绍。

本书主要供从事汽车、拖拉机和船用发动机使用维修和管理的工程技术人员阅读,同时也可供从事发动机设计、研究的工程技术人员以及大专院校内燃机专业师生参考。

内燃机的润滑与磨损

贾 锡 印 编

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

密云华都印刷厂印刷

787×1092 1/32 印张9¹/₂ 208千字

1988年1月第一版 1988年1月第一次印刷 印数: 0001—3280册

ISBN7-118-00219-4/O24 定价: 2.45元

前 言

由于内燃机功率范围宽，能适应各种不同用途的要求，因此在汽车、船舶、铁路、农业、工程机械等各方面获得了广泛应用。

内燃机自问世以来，已经有一个世纪的发展历史，但迄今在技术上仍处于不断改进和发展的阶段。过去的发展趋势一直是增大单机功率、减少污染。可是近来，社会上对发动机的可靠性和耐久性又提出了很高的要求。由于增大功率带来了内燃机各运动部件的摩擦、磨损增加和润滑油温度升高等问题、使润滑条件更加苛刻，所以润滑已成为提高内燃机可靠性和耐久性的一个非常关键的问题。因为润滑不良的发动机在运转过程中的机械摩擦损失和零件的磨损都会增大，并可能造成损伤事故，这严重地影响发动机的动力性、经济性和可靠性。因此，各摩擦零件的良好润滑，对减少摩擦损失，提高机械效率，保证发动机最经济、最可靠的工作以及对延长发动机的使用期限具有决定性的意义。最近十多年来已受到各国的普遍重视。

本书是根据日本三菱重工有关“内燃机的润滑”等资料，同时还参考了其他国家的有关资料以及作者多年来积累的一些资料而编写的。编写中注意到以下几点：1. 密切结合我国实际情况；2. 着眼于基础知识及故障分析处理方法；3. 立足于实际应用，不涉及一些比较复杂的理论问题。全书共分六

IV

章,第一章着重讲述摩擦、磨损和润滑的机理;第二至五章主要以汽车、拖拉机和船用发动机为对象,较为详细地叙述了内燃机润滑的特点,滑油消耗的途径及其减少消耗的措施,以及测量滑油消耗的最新方法。并从实验研究和实际调查分析中比较系统地介绍了各运动部件的润滑和磨损问题。特别是对柴油机气缸套和活塞环的异常磨损、以及轴承和气阀等损伤事故,进行了较全面的分析,并指出了应该采取的相应措施。第六章对润滑油的性能指标、选用原则、使用管理、质量检验分析以及添加剂的作用和种类作了重点介绍。

由于润滑与摩擦现象是极其复杂的,影响因素很多,涉及的学科很广。在理论上确定各种条件下滑动面的润滑状态、滑动速度、表面压力的许用值等是非常困难的,在大多数情况下不得不根据经验来判断处理。为此书中列出的大量实验数据和图表资料,对在现场处理所发生的问题和故障分析都有一定参考价值。

本书主要供从事汽车、拖拉机和船用发动机使用维修和管理的工程技术人员使用,同时也可供从事发动机设计、研究的工程技术人员以及大专院校内燃机专业师生参考。

本书编写后,曾蒙张志华教授等同志进行了认真而仔细地审阅,并提出了不少宝贵意见,在此深表谢意。

由于编者水平所限,再加上时间仓促,内容上不当或错误之处在所难免,望广大读者多多指教。

编 者

目 录

本书所使用的国际单位	1
主要符号表	2
第一章 摩擦、磨损和润滑概述	3
第一节 摩擦	3
第二节 磨损	6
第三节 润滑	13
第二章 内燃机的润滑	26
第一节 内燃机润滑的特点	26
第二节 内燃机的润滑系统	34
第三节 润滑油的供油量和消耗量	39
第四节 润滑油消耗量的测量方法	46
第五节 润滑油的温度和压力	51
第六节 润滑油的泡沫及其消除方法	57
第七节 润滑油的滤清和净化	59
第三章 活塞组和气缸套的润滑和磨损	64
第一节 活塞的运动状态	64
第二节 小型柴油机活塞外表面的润滑油流动状态	65
第三节 大型柴油机气缸套和活塞环的润滑	68
第四节 活塞环的结构及润滑油膜形成的原理	77
第五节 通过活塞环的润滑油消耗原理	84
第六节 活塞环的磨损	92
第七节 减少活塞环磨损的措施	101
第八节 活塞环的异常磨损及其防止方法	108

第九节 活塞环的胶结	113
第十节 活塞环的断裂	115
第十一节 活塞环槽的磨损	120
第十二节 气缸套的磨损	123
第十三节 影响气缸套磨损的因素	127
第十四节 扫气空气中水分对气缸套磨损的影响	135
第十五节 使用重油时气缸套的磨损	142
第十六节 吸气中的灰尘所造成的磨损	148
第四章 轴承的润滑与磨损	156
第一节 轴承的工作特点	156
第二节 轴承合金的性能	157
第三节 轴承的使用特性	166
第四节 轴承的损坏及其防止方法	173
第五节 主轴承和连杆轴承的润滑	192
第六节 装配间隙和轴颈形状对磨损的影响	199
第七节 活塞销轴承的润滑和磨损	202
第五章 配气机构的润滑和磨损	206
第一节 配气机构的润滑	206
第二节 凸轮与推杆的磨损	211
第三节 排气阀的工作特点	215
第四节 排气阀的损坏及其影响因素	219
第五节 提高排气阀耐久性的措施	225
第六节 气阀座的磨损	232
第七节 气阀杆与气阀导管的磨损	234
第六章 润滑油	236
第一节 润滑油的主要性能	236
第二节 润滑油添加剂的种类和作用	244
第三节 润滑油的分类及性能指标	246
第四节 专用润滑油	257

第五节	润滑油的选择	267
• 第六节	润滑油在使用中的劣化	275
第七节	润滑油的使用管理	283
参考文献		295

本书所使用的国际单位

长度: m (米); cm (厘米); mm (毫米); μm (微米)。

体积: m^3 (立方米); L (升); ml (毫升); cm^3 (立方厘米)。

质量: kg (千克); g (克)。

力: N (牛顿); kN (千牛顿)。

时间: h (小时); min (分); s (秒)。

密度: kg/m^3 (千克/米³); g/cm^3 (克/厘米³)。

温度: K (开尔文); $^{\circ}\text{C}$ (摄氏温度); $^{\circ}\text{F}$ (华氏温度)。

压力: Pa (帕); kPa (千帕); MPa (兆帕)。

功率: kW (千瓦); W (瓦)。

转速: r/min (转/分)。

速度: m/s (米/秒)。

流量: cm^3/h (厘米³/小时)。

润滑油消耗率: $\text{g}/\text{kW} \cdot \text{h}$ (克/千瓦·小时)。

润滑油供油量: $\text{L}/\text{kW} \cdot \text{h}$ (升/千瓦·小时)。

传热系数: $\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{K}$ (瓦/厘米²·开尔文)。

动力粘度: $\text{Pa} \cdot \text{s}$ (帕·秒); $\text{mPa} \cdot \text{s}$ (毫帕·秒)。

运动粘度: m^2/s (米²/秒); mm^2/s (毫米²/秒)。

总碱值或总酸值: $\text{KOH} \cdot \text{mg}/\text{g}$ (氢氧化钾·毫克/克)。

腐蚀度: g/m^2 (克/米²)。

主要符号表

ρ	——密度
μ	——动力粘度
ν	——运动粘度
E_t	——恩氏粘度
V	——润滑油容积
P_0	——活塞环弹力
PH	——氢离子浓度
HB	——布氏硬度
HV	——威氏硬度
HRB	——洛氏硬度B级
HRC	——洛氏硬度C级
TBN	——滑油的碱值
ASE	——美国汽车工程师协会
API	——美国石油协会
$ASTM$	——美国材料试验协会
PV	——比压与滑动速度的乘积
U	——滑动速度
f	——摩擦系数
W	——外载荷
ppm	——百万分之一
cP	——公制中动力粘度单位（厘泊）
cSt	——公制中运动粘度单位（厘沲）

第一章 摩擦、磨损和润滑概述

第一节 摩擦

一、摩擦及其分类

两个相互接触的物体在外力作用下发生相对运动时，在接触面之间会产生切向的运动阻力，这种阻力叫作摩擦力。这种现象叫作摩擦。产生摩擦的两个物体叫作摩擦偶件或摩擦副，也称运动副。

摩擦可以从不同的角度进行如下的分类：

1. 按摩擦副的运动状态，可将摩擦分为静摩擦和动摩擦两类。当物体在外力作用下对于另一物体具有相对运动的趋势，并处于静止临界状态时的摩擦，叫作静摩擦。当一物体受力的作用，越过静止临界状态而沿另一物体表面发生相对运动时的摩擦，叫作动摩擦。

2. 按摩擦副的运动形式，可将摩擦分为滑动摩擦与滚动摩擦两类。当接触表面相对移动时的摩擦，叫作滑动摩擦。物体在力矩的作用下沿接触表面滚动时的摩擦，叫作滚动摩擦。滑动摩擦的例子如活塞在气缸中的往复运动，轴颈在轴承中的回转运动等。滚动摩擦的例子如滚珠或滚柱轴承中滚珠或滚柱在座圈中的滚动；火车车轮沿铁轨的滚动等。在凸轮机构和齿轮传动中，则兼有上述两种摩擦形式。

3. 按照表面的润滑情况，通常可将摩擦分为干摩擦、液体摩擦、边界摩擦和混合摩擦四类。干摩擦是指在摩擦面

之间没有加入任何润滑剂下所发生的摩擦。一般无润滑下的摩擦即属于干摩擦，有时也称固体摩擦。这种摩擦会引起摩擦表面的严重磨损。液体摩擦是指两个物体的摩擦面被一层连续的液体膜完全隔开时的摩擦。边界摩擦是在两个摩擦面之间存在一层很薄的所谓边界油层时产生的摩擦。既有液体摩擦又有干摩擦或者上述三种摩擦都同时存在时叫作混合摩擦。

4. 根据摩擦发生在同一物体之中或两个物体之间的特征，可将摩擦划分为内摩擦与外摩擦。内摩擦是由同一物体各部分间的相对移动而发生的摩擦。外摩擦则是两个相互接触的物体相对移动而发生的摩擦。

二、干摩擦机理

摩擦的机理是个相当复杂的问题，现仍在继续探索中。目前，常用“粘着理论”来说明摩擦和磨损的起因。

两个相对运动的接触表面，即使经过细心的精加工，肉眼看来似乎是很光滑的金属表面，若用放大镜来观察就会发现，其表面仍然是凸凹不平的。这种表面凸凹不平的程度叫作表面光洁度，有时也称表面粗糙度。

由于加工后的金属表面实际上是凸凹不平的，当两个金属表面互相接触时，就不可能每个地方都紧密贴合，而是只是一些个别凸起点上发生接触，如图1-1所示。我们把宏观的表面面积叫做名义接触面积 A ，而把各真实接触部分的微小面积的总和叫做真实接触面积 S ，即图中白圈内表示的各接触点面积 a_i 的总和。真实接触面积远远小于名义接触面积，即 $S \ll A$ 。其比值 (S/A) 因负荷、接触材料的机械性能及接触表面的光洁度等情况的不同，可在十万分之一至十分

之一的范围内变化。

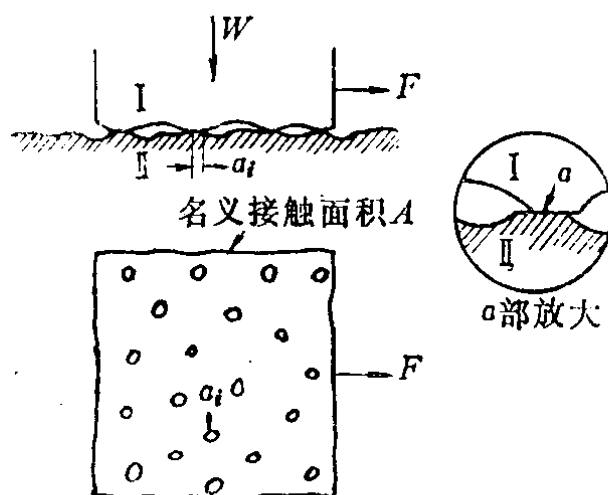


图1-1 粗糙接触表面示意图

粘着理论认为：在载荷 W 的作用下，虽然名义表面压力（ W/A ）很小，而真实接触面积上的压力（ W/S ）却很大，以致超过了金属的弹性极限而发生塑性变形，形成小平面接触，直到接触面积增大到能够承受全部载荷为止。

在这种情况下，金属表面将出现牢固的粘着结点。在切向力的作用下，粘着结点被剪断，表面随即发生滑动。摩擦的过程，就是粘着与滑动交替进行的过程。这种过程使运动受到阻力。该阻力等于各粘着点被剪断时阻力的总和，它是构成摩擦力的主要部分，称为摩擦力的剪切项。此外，在摩擦偶件表面粗糙时，硬表面的粗糙凸起会嵌入较软金属的表面，在运动时也会增加一点滑动阻力，这是构成摩擦力的另一部分，称为摩擦力的粗糙度项。但在一般情况下，它只占

全部摩擦力的百分之几，可以略去不计。因此，摩擦力可以近似地等于剪断金属各粘着点时所需的剪切力，即摩擦力近似地等于剪切面积（即真实接触面积 S ）与材料剪切强度 τ 的乘积：

$$F = \tau S \quad (1-1)$$

摩擦时，粘着点的形成和破坏就造成磨损。摩擦产生的热量也集中在占比例很小的真实接触面积上。虽然整个物体的温度升高不多，但真实接触部分的温度却可能升得很高。这些迅速产生的、集中在局部地区的摩擦热，可以使粘着点的温度瞬时升高到 1000°C 以上，以致超过金属的熔点，使金属表面发生熔着或烧损，摩擦偶件随之损坏。所谓“抱轴”现象，即轴承合金熔化而附着在轴颈上，就是干摩擦造成损伤的常见例子。因此，在实际使用的机械中，特别是在内燃机中，滑动表面绝不允许在干摩擦状态下工作。因为零件所承受的载荷大，而且相对运动的速度高，干摩擦会引起破坏性的磨损，严重时立刻损坏机器。

第二节 磨 损

一、零件的磨损过程

机械零件正常运行的磨损过程一般分为三个阶段（图1-2）：

1. 磨合阶段（又称跑合阶段）

新加工的摩擦副零件表面比较粗糙，人们有意地利用磨合阶段（图中 $0-a$ 线段）使之轻微磨损，把粗糙表面逐渐磨平，真实接触面积逐渐增大，为正常运行时的稳定磨损创造条

件。磨合中可以用特殊的润滑油，必要时还可加入粉状磨料以缩短磨合期。

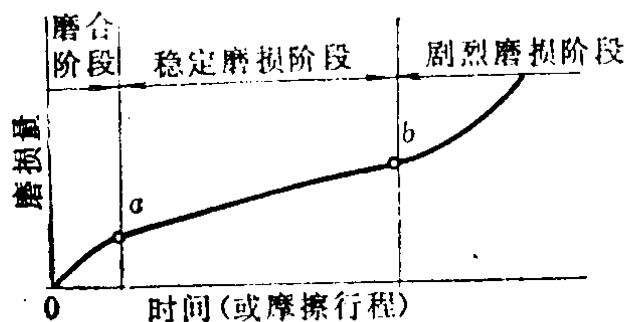


图1-2 磨损量与时间的关系

2. 稳定磨损阶段

这一阶段磨损比较缓慢而且稳定，如图中 $a-b$ 线段。 $a-b$ 线的斜率就是磨损的速度， a 与 b 横坐标之差就是零件的耐磨寿命。

3. 剧烈磨损阶段

在图中 b 点以后，磨损速度急剧增长。这时机械效率下降，精度大大降低，产生异常噪音及振动，摩擦副温度迅速升高，最终导致零件损坏。

二、内燃机磨损的种类

按照磨损的机理，在内燃机中所发生的磨损主要可分为磨料磨损；粘着磨损；腐蚀磨损；疲劳磨损；微动磨损等。

1. 磨料磨损

这种磨损是由进气吸入的尘砂、磨损下来的金属屑、燃油和润滑油中的杂质等所引起的，这些坚硬的杂质颗粒，嵌入两滑动面之间时，就会引起象锉刀锉东西似的磨损。在相配合的摩擦零件中，当硬材料的表面粗糙度很大时，软材料就是

磨损的主体,而磨损下来的微粒,更加快了表面的磨损。若杂质比硬的滑动面还坚硬时,杂质就埋在软材料中,使硬的表面加速磨损,造成表面的划痕。个别粗大的磨料也会造成严重的擦伤,在气缸里发生这种现象就是俗称的“拉缸”。

为了减少磨料磨损,可以精细地加工摩擦表面,减少表面的粗糙度;降低负荷;减少滑动距离以及增大软材料的硬度等。另一方面,更重要的是应很好的滤掉空气、燃油和润滑油中的杂质。这是减少发动机磨料磨损的有效措施。

2. 粘着磨损

一般在正常运转中,不会发生粘着磨损,使用上不会出现什么问题。但是,当发动机的运转条件急剧改变时,即在负荷大、润滑和冷却不良时,就会出现局部油膜破裂,两滑动面有极微小的部分,金属表面直接接触,摩擦造成局部高温,使之熔融粘着、脱落,逐步扩大就发生粘着磨损。与磨料磨损相比,这是一种破坏性更大的异常磨损。有时发生在数分钟之内,一旦发生,就会使滑动面遭到严重损伤,以致于使零件很快报废。在气缸和活塞之间就会造成“咬缸”;在轴承和气阀导管中就会产生烧损;在齿轮中发生粘着磨损时有可能使轮齿折断;在凸轮中就会使桃尖磨光等。

避免粘着磨损的基本方法是防止油膜破裂。在发动机运转中尽量避免突然增加负荷和转速,并保证充分的供油,以便使滑动面处于良好的润滑和冷却状态。

此外,还要注意摩擦偶件的材料匹配,因为这在粘着磨损中也是一个重要的因素。两种材料硬度相同,或者硬材料的粗糙度比其相配对的材料粗糙度大得多时,润滑一旦恶化就容易引起金属的直接接触,由于金属之间的粘着力,局部

金属被剥离而造成严重的磨损。从使用工况上来看，当发动机在试车或高负荷运转而出现严重窜气现象时，则常常发生粘着磨损。

粘着磨损的特征，从外观上看一般有局部的金属熔融粘着情况，带有不均匀不规则的边缘、沟槽和绉折；从显微结构上看，粘着磨损在摩擦面呈熔融流动状态。

3. 腐蚀磨损

燃烧室的腐蚀有低温腐蚀和高温腐蚀。

高温腐蚀是由于重油中含有的钒燃烧后，经 V_2O_3 生成 V_2O_5 所引起的腐蚀。常发生在活塞头部和排气阀及其阀座处。

低温腐蚀是由于燃料中所含的硫引起的，硫燃烧后生成 SO_2 ，其中一部分氧化成 SO_3 ，在露点（ $40\sim 50^\circ C$ ）以下，和气缸套壁面上的水（ H_2O ）化合生成硫酸（ H_2SO_4 ），对气缸套表面产生酸腐蚀。其原理如图1-3所示。若是单纯的水，由于润滑油膜的作用防止了水向金属表面的侵蚀。但水分中含有硫酸时就呈现酸性，一般润滑油容易被酸侵蚀，进而使金属受到酸腐蚀。特别是在劣质燃油中含硫量达 $2\sim 4\%$ 时，在低温下（例如，低温起动，停车之后温度降低时，以及在低负荷运转时）产生的酸腐蚀磨损较为严重。

4. 疲劳磨损

上述的粘着磨损过程可理解为由液体润滑→边界润滑→金属表面直接接触而最后达到磨损的现象。在磨损过程中存在着油膜破裂现象。因此，为了防止发生这种磨损就要设法防止油膜破裂。但疲劳磨损与油膜破裂毫无关系。

关于产生疲劳磨损的机理，有以下三个学说：

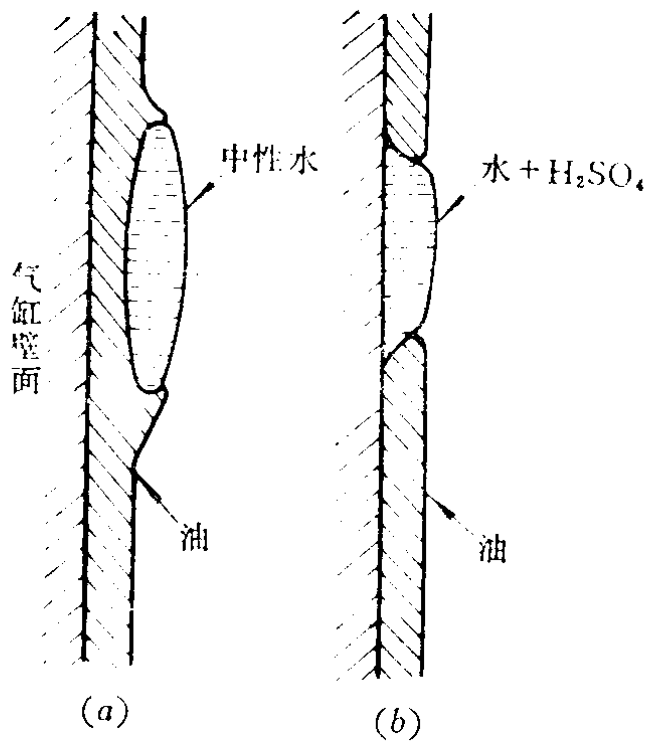


图1-3 酸腐蚀的原理图

- (a) 油能防止水的侵蚀；
(b) 酸容易侵蚀油膜，腐蚀金属。

- (1) 在表面存在或产生龟裂的情况下，润滑油被封闭在裂纹中，由于尖劈效果使龟裂扩大，而发展成裂痕；
(2) 由于表面的交变接触应力，使内部产生了剪切应力。因此，在表面下产生龟裂，龟裂发展成裂痕；
(3) 在不产生加工硬化的材料中，交变接触应力达到塑性变形的极限就产生点蚀。

总之，接触应力是产生疲劳磨损的最主要原因。在它的作用下，零件产生重复变形，导致表层材料疲劳而剥离的现象。

疲劳磨损常发生在滚动轴承、齿轮、凸轮等摩擦副表面。防止产生疲劳磨损的措施是降低接触应力。