

汽车润滑解码

Automobile
Lubricating Solutions (第二版)

石俊峰 编著

中國石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

汽车润滑解码

(第二版)

石俊峰 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书介绍了摩擦磨损的原理、基础油及车用油添加剂的性能、发展趋势,详细阐述了内燃机油、车辆齿轮油、液压油与液力传动油、汽车制动液、汽车冷却液及润滑脂的分类、规格、性能要求及应用,包括油品配方的研究、故障分析、行车试验等内容。

本书可供内燃机及车辆润滑油(液)应用的技术人员和从事润滑油(液)研制、生产和销售的技术人员参考。本书也可作为大专院校相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

汽车润滑解码/石俊峰编著. —2版. —北京:中国石化出版社, 2012. 8

ISBN 978 - 7 - 5114 - 1650 - 6

I. ①汽… II. 石… III. ①汽车 - 润滑油 - 研究 IV. ①U473. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 164973 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 20 印张 495 千字
2012 年 8 月第 2 版 2012 年 8 月第 1 次印刷
定价:60.00 元

再版前言

汽车已经成为 21 世纪中国国民经济的支柱产业，但中国要想实现从“汽车大国”到“汽车强国”的转变，却依然是任重而道远，这其中最重要的制约因素之一就在于自主技术，这些技术既包括整车的有关技术，也包括汽车润滑技术等与整车性能密切相关的技术。

“闻道有先后，术业有专攻”，由于研究方向的差异，整车、发动机技术领域的研究人员对汽车润滑技术的深层次原理及最新进展缺乏足够的了解，但事实上，润滑科技领域内的变革对于汽车产业整体的技术进步有着不可低估的重要作用。因此，在汽车润滑技术科研人员与整车、发动机技术科研人员之间，迫切需要建立一座沟通的桥梁，来打破双方多年来形成的信息不对称。

正是出于这样的—个目的，我们经过多年的努力，编写了这部《汽车润滑解码》。这本书对汽车润滑技术进行了全面而深入的剖析，同时也介绍了本世纪以来最前沿的润滑技术研究成果，是润滑油行业技术研究—人员、整车及发动机技术研究—人员深入了解汽车润滑技术奥秘的上佳选择。

《汽车润滑解码》第一版自 2009 年出版以来，得到了国内各大科研机构、汽车厂家、发动机厂家、润滑油企业相关—人士的高度认可，在市场上取得了我们始料未及的出色口碑。我们在为此而欣喜激动的同时，也深感自己肩头的责任重大。在过去的这三年里，汽油机油 SN 质量等级的诞生，防冻液、液压油等新的国家标准的执行，商用车国Ⅳ排放标准执行日期的确定等一系列事件，都为润滑油行业的技术发展带来了更多的新变化。在我们的这次修订版中，将对以上领域内的最新技术进展进行全面的介绍与阐述，希望能给读者们以帮助。

在修订本书的过程中，我们查阅、参考了大量的国内外相关资料，在此谨向这些著（译）者表示衷心感谢。同时，中国石化出版社的潘向阳编辑也为本书的再版付出了辛勤的劳动，在此一并表示感谢。

本次修订工作由江苏龙蟠石化有限公司石俊峰统稿并担任主编，江善钟参与修订。由于时间等原因的限制，书中错漏之处在所难免，恳切希望广大读者批评指正。

编 者

2012. 5. 20 于南京

目 录

第一章 概 述	(1)
第一节 世界车用润滑油市场需求现状	(1)
第二节 影响世界车用润滑油市场的因素分析	(2)
第三节 中国车用润滑油市场需求现状	(3)
第二章 摩擦与磨损基础知识	(5)
第一节 摩擦	(5)
第二节 磨损	(11)
第三章 基础油与添加剂	(18)
第一节 润滑油基础知识	(18)
第二节 润滑油的基本生产方法	(24)
第三节 润滑油产品分类	(40)
第四节 基础油应用知识问答	(42)
第五节 汽车润滑油添加剂	(69)
第六节 润滑油中的纳米材料	(82)
第七节 生物降解润滑剂的特点	(85)
第八节 润滑油添加剂遇到的挑战和发展趋势	(90)
第四章 内燃机油	(95)
第一节 内燃机原理	(95)
第二节 内燃机油的作用	(96)
第三节 内燃机油的使用性能	(97)
第四节 内燃机油黏度标准和质量规格	(100)
第五节 提高内燃机油的质量途径	(130)
第六节 内燃机油的组成	(131)
第七节 内燃机油的应用	(170)
第八节 API 发动机油认证概述与我国发动机油认证展望	(186)
第五章 车辆齿轮油	(191)
第一节 概述	(191)

第二节	车辆齿轮油的特性和标准	(192)
第三节	车辆齿轮油的配方和应用	(202)
第四节	车辆齿轮油的发展趋势	(214)
第五节	车辆齿轮油知识问答	(217)
第六章	液压油和液力传动油	(225)
第一节	液压油的分类与规格要求	(226)
第二节	液压油的性能与组成	(233)
第三节	液压油的应用	(240)
第四节	车用减震器油	(245)
第五节	液力传动油和自动传动液	(249)
第六节	润滑油液监测技术	(264)
第七章	汽车制动液	(267)
第一节	制动液产品标准	(267)
第二节	汽车制动液的性能	(272)
第三节	汽车制动液的组成	(274)
第四节	我国汽车制动液的发展趋势	(276)
第五节	汽车制动液的正确使用与维护	(277)
第八章	发动机冷却液	(278)
第一节	冷却系统和冷却介质	(278)
第二节	发动机冷却液的标准和配方	(281)
第三节	发动机冷却液的应用	(290)
第九章	润滑脂	(294)
第一节	润滑脂的分类	(294)
第二节	我国汽车润滑脂的现状 & 研制	(300)
第三节	车用润滑脂发展的里程碑—ASTM D4950	(304)
第四节	环保型高性能长寿命润滑脂	(306)
第五节	润滑脂生产工艺	(307)
第六节	润滑脂的特性与应用	(309)
参考文献		

第一章 概 述

润滑油作为石油产品的一个品类，具有技术含量高、产品附加值较高的特点。一个国家润滑油使用水平的高低，直接反映了这个国家的经济发展程度、设备控制状况、生产效率和环保意识的状况。

国际市场润滑油产品结构见图 1-1。

我国已经成为全球第二大润滑油生产和消费国，车用润滑油的消费量占其润滑油总消费量的 54% 以上。我国汽车工业飞速发展，给润滑油行业带来了无限广阔的前景，车用润滑油是润滑油升级换代最快的品种，代表了润滑油的发展水平，也是润滑油行业利润的主要来源。但由于我国的地区发展跨越较大，市场上的

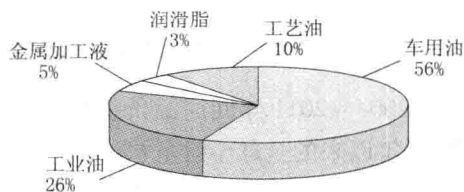


图 1-1 润滑剂产品结构示意图

润滑油产品几乎涵盖了从低档 SG、CD 到高档 SN、CJ-4 的所有质量级别。同时，随着环保观念的加强，环保法规将会逐渐健全，我国车用润滑油的质量标准也必将由低级向高级发展。随着我国汽车产业的快速发展，汽车尤其是小轿车正在以惊人的速度走进千家万户，由此对高档车用润滑油的消费需求将迅速增加。在占世界润滑油需求一半以上的车用润滑油市场份额中，高、中、低档润滑油分别占 15% ~ 20%、50% 和 30% ~ 35%；但是，车用润滑油 80% 的利润却来自这 20% 的高档润滑油市场，这是一个非常值得注意的问题。所以，有必要对影响世界及我国车用润滑油市场的主要因素进行研究，以便及时了解其发展趋势。

随着我国经济的快速发展和人民物质文化生活水平的提高，汽车工业成为国民经济的支柱产业，轿车进入家庭已经成为人民提高生活质量的一种追求和发展趋势。汽车润滑油作为保证车辆安全行驶、长期运行的重要产品，越来越受到汽车制造厂家、车辆维修人员、车辆用户及经销商的重视和关注。

本书作为系统介绍汽车润滑知识的专著，为读者全面了解与汽车相关的润滑知识，解决在用车实际中遇到的与润滑相关的问题，提供全方位信息。为此，本书从介绍润滑原理、基础油生产开始，着重阐述了内燃机油、车辆齿轮油、液压油及液力传动油、润滑脂、制动液和防冻液诸多方面的知识，详细介绍了这些油液的性能、配方组成、规格、标准、发展现状及趋势，对油液在使用中常见问题以问与答的形式展示，尽量做到通俗易懂。

第一节 世界车用润滑油市场需求现状

在世界润滑油消费结构中，车用润滑油占各类润滑剂总需求的一半以上，例如 2000 年为 59%，2009 年为 55%。从全球范围来看，目前全球润滑油需求趋于稳定，基本维持在 3500 ~ 4000 万吨/年，全球润滑油产量和消费量平均年增长率为 1.4%。根据 Fredonia 集团公司市场研究部的最新研究报告，2010 年全球润滑油的需求量达到 4170 万吨，并将进一步增长到 2015 年的 4660 万吨。增长的地区主要是亚洲、拉美和东欧的发展中国家。我国经济

持续高速发展,使亚太地区取代北美成为市场份额最大的区域性市场,2010年,亚太地区润滑油消费量占全球的34%,北美第二,占26%,欧洲第三,占20%。

同时,由于环保和发动机技术进步的双重作用,北美、欧盟和日本等发达国家生产商为了生产性价比更好、质量较高的润滑油,以达到减少润滑油的用量,他们都更趋向于采用天然气合成油或以高度精制基础油调制的高质量等级的环保型润滑油。

第二节 影响世界车用润滑油市场的因素分析

一、原油价格的波动对车用润滑油市场的影响

2004~2011年间原油价格发生了很大的变化(见表1-1)。世界经济的波动,尤其是2008年以来的全球金融危机、世界地缘政治因素的变化,欧佩克及世界其他地区原油供应的变化以及美国政府对油价的态度,都是影响原油价格的原因。

表1-1 世界原油年均价格

美元/桶

年 份	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
WTI ^①	41.41	56.44	66.00	72.41	96.00	61.92	78.83	95.00

① WTI—West Texas Intermediate, 美国西得克萨斯轻质原油。

由表1-1可以看出,在2008年之前,世界原油价总体趋势是上涨的。2008年7月,国际原油价格突破每桶147美元大关,创出历史新高,随后便在美国金融风暴的影响下一路下跌,到2008年12月,最低价跌至每桶40美元以下。2009年开始,因经济回暖,原油价格又重新进入上升通道,2011年平均价格达到95美元/桶。但总体而言,由于刚性需求的作用,润滑油价格的波动幅度要小于原油,润滑油价格的平均变化率也高于同期全球通货膨胀率,因为润滑油技术含量较高,其价格构成中既包含了通胀因素,也包括了技术含量提高的部分。

二、全球汽车工业的迅速发展对车用润滑油市场的影响

近年来,尽管世界汽车保有量已超过10亿辆,但由于润滑油质量档次的提高,延长了车辆换油期,因此润滑油总需求量增长并不明显。全球及主要国家汽车产量见表1-2。2003~2007年,世界汽车产量稳固上升,2008~2009年,由于金融危机的影响,汽车产量大幅下降,但随着经济回暖,2010~2011年,汽车产量又开始回升,这为车用润滑油需求量的稳定增长提供了强有力的保障。

同时,从表1-2还可看出,作为经济发达地区的北美和西欧,它们的汽车产量在逐年下降,北美地区汽车年产量由2003年的1469.3万辆下降到2011年的1078.9万辆,下降了26.5%;西欧地区汽车年产量由2003年的1622.4万辆下降到2011年的1497.4万辆,下降了8%。而南美和亚洲地区的汽车年产量分别由2003年的343万辆和1915.6万辆上升到2011年的608.6万辆和3541.1万辆,上升了77.4%和84.9%。汽车销售量的增减,直接影响着车用润滑油的需求量,这也预示着世界各大润滑油公司会根据汽车市场重心的转移,向着有更大市场潜力的亚太和南美市场进军。

表 1-2 全球及主要国家汽车产量^①

单位：万辆

年份	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
美国	1214	1201	1198	1126	1078	869.3	573.1	776.3	865.4
加拿大	255.3	271.1	268.8	257.2	257.8	208.2	149.0	206.8	213.5
巴西	185.5	234.6	252.8	261.1	297.1	321.6	318.3	338.2	340.6
墨西哥	157.5	157.9	167.0	204.6	209.5	216.8	156.1	234.2	268.0
比利时	91.0	90.3	92.9	91.8	84.4	72.5	53.7	55.5	56.2
法国	362.2	366.9	354.9	316.9	301.9	256.9	204.8	222.9	229.5
德国	551.7	558.0	575.8	582.0	621.3	604.6	521.0	590.6	631.1
西班牙	303.1	301.4	275.3	277.7	289.0	254.2	217.0	238.8	235.4
俄罗斯	129.6	140.5	135.1	150.8	166.0	179.0	72.5	140.3	198.8
英国	184.8	185.8	180.3	164.8	175.0	165.0	109.0	139.3	146.4
日本	1029	1052	1080	1148	1160	1157.6	793.4	962.9	839.9
韩国	319.4	348.3	369.9	384.0	408.6	382.7	351.3	427.1	465.7
中国	451.0	531.3	570.8	718.9	888.2	929.9	1379.1	1826.5	1841.9
印度	116.2	151.1	162.7	202.0	230.7	233.2	264.2	355.7	393.6
全球	6066	6449	6648	6912	7310	7052	6179.2	7762.9	8006.4
增长率/%	2.8	6.3	3.1	4.0	5.4	-3.7	-12.4	25.8	2.83

①数据来源于国际汽车制造商协会(Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles, 简称 OICA)。

三、车用润滑油质量标准的发展对其市场的影响

从世界车用润滑油的发展历程来看，车用润滑油的质量是由低级向高级发展的，其发展主要是为了适应汽车设计的改进、道路状况改善以及节能、环保的社会要求。具体地讲，车辆的技术进步、延长换油期、降低对尾气处理装置及对排放的影响、提高燃油经济性以及更严格的环保法规，都将继续推动车用润滑油质量的发展。例如，随着排放法规要求的不断苛刻，美国自 20 世纪 80 年代末、90 年代初以来，每 4~5 年就推出一代新的内燃机油规格来满足更为苛刻的排放要求。内燃机油的升级换代不但反映了发动机技术的进步，反映了社会在节能、环保等可持续发展方面所做的努力，而且还代表了各润滑油公司的技术实力和品牌形象，因而内燃机油的研究和发展在润滑油行业最为瞩目。

第三节 中国车用润滑油市场需求现状

随着中国经济的快速增长，国内润滑油消费需求逐年增长。1996 年国内润滑油消费量为 336 万吨，2003 年超过 400 万吨，销售收入超过 300 亿元人民币，首次超过俄罗斯，成为仅次于美国的世界第二大润滑油消费国，润滑油消费量年均增长率达 4.1%，而同期全球润滑油消费量年均增长率仅 1.4%。我国润滑油企业的产能比例见图 1-2。2010 年，国内润滑油消费量达到 680 万吨。2011 年全年，润滑油产量为 826.5 万吨，同比增长 7%。

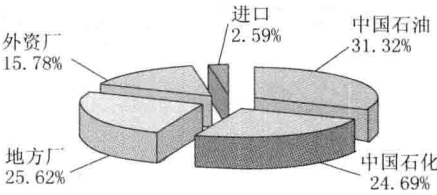


图 1-2 我国润滑油产能比例示意图

一、中国汽车工业的发展对国内车用润滑油市场的影响

目前中国已成为世界第一大汽车消费国，第一大汽车生产国，同时，汽车出口也进入快速增长阶段。由表 1-2 可见，2011 年中国汽车产量为 1841.9 万辆，高居世界第一位。

中国汽车工业的迅速发展，标志着润滑油这一带有一定专业性的产品正从工业品向日常民用消费品转化。随着乘用车产量的增长(表 1-3)，我国高档车用润滑油的需求量将会成倍增长，促使我国车用润滑油产品升级加快。近几年新出厂的轿车，都已要求使用 SL 等级以上的发动机油，2011 年，CH-4 与 SL 以上中高等级的发动机油的市场需求量比上一年增长了 3 倍以上，国内高等级的润滑油产品，近两年的销量也都连续成倍增长。汽车工业的发展促进了我国车用润滑油的升级换代和用油质量水平的提高，必然会对我国车用润滑油的发展产生深远的影响。

表 1-3 中国乘用车销量占汽车总销量的比例

年 份	2008	2009	2010	2011
所占比例/%	59.7	75.7	62.6	78.2

二、中国车用润滑油质量标准的发展以及对市场的影响

目前中国市场上车用润滑油产品几乎涵盖 API(American Petroleum Institute, 美国石油学会)低档 SG、CD 到高档的 SN、CJ-4 的所有质量级别，但主流产品为 SJ、CH-4 及以下的中、低档产品。根据环保部的公告，2011 年 7 月起，我国全面实施乘用车第 4 阶段排放标准；2013 年 7 月起，全面实施商用车第 4 阶段排放标准。可以断定，执行国 IV 乃至未来更高的国 V 排放标准，将使汽车和设备制造商进一步改进自己的设计，生产出符合环保要求的产品。这些符合环保要求的汽车发动机与设备都将对润滑油性能提出要求。

我国对于车用润滑油产品目前采用的是 API2006 版标准，这一标准废除了 SC、SD 等低档品种，新增了汽油机油 SG 和柴油机油 CF 以上共计 11 个品种，最高级别已经达到汽油机油的 SL/GF-3 级别和柴油机油的 CI-4 级别；在通用油的品种设置、黏度等级设置及产品标记等方面均有较大的变化，并新增试验方法 20 余项。同时，根据国内农用车辆和机具对于柴油机油的大量需求，制定了《农用柴油机油》国家标准。新标准有以下几点特点：

① 采用 GB 标号，表示标准采用强制执行的方式。

② 标准指标要求更加严格，对达到标准的产品所需原材料的要求越来越高，有些产品常规 I 类油难以达到，意味着新标准的推行将推动我国高档基础油的发展。

③ 标准与国际接轨更加明显，但在 SM、SN、CJ-4 等高质量的汽油机油、柴油机油品种引入方面，仍然落后于美国石油学会 API 的标准。

④ 标准要求严格，意味着难以达标的部分企业在标准推行之后将难以生存。

第二章 摩擦与磨损基础知识

摩擦消耗了世界一次性能源的 1/3 以上, 磨损是材料与机械设备失效的 3 种主要形式之一。润滑则是减少摩擦、降低或避免磨损的最有效手段。在我国, 每年因摩擦导致的机械磨损所损耗的材料高达几百亿元, 并且由于我国石油资源短缺, 造成了经济快速发展与石油需求之间的矛盾, 解决这一矛盾的有效途径之一为“减少摩擦、降低磨损、提高油品的燃油经济性、改善润滑条件、节约能源”, 这已成为我国各行业科技攻关的重大课题。为了满足发展现代工业的发展和环境保护的需求, 未来新兴润滑剂和润滑技术必须立足高速发展的现代工业, 同时兼顾环境友好, 即满足绿色、高效、多功能(或多效化)的多重需求。新兴的润滑技术已为现代工业、国防等领域的发展提供了无限可能, 相信通过努力届时必将会有很多奇特的润滑材料出现, “超润滑”、“零摩擦”的新型润滑材料的出现完全有可能。

虽然关于摩擦材料的摩擦磨损机理研究很多, 但由于摩擦材料中成分和组织以及材料性能的复杂性, 迄今为止还没有一个公认的理论能解释摩擦过程中摩擦磨损的机理。例如, 在低负荷和低温下, 主要磨损机理既有认为是摩擦磨损的, 也有认为是黏着磨损或疲劳磨损的。一般来说, 摩擦材料中金属对偶件可出现 5 种磨损类型, 即磨粒磨损、黏着一撕裂磨损、疲劳磨损、热磨损和宏观剪切磨损。

由于对磨损机理的认识不尽相同, 且各种磨损机理都未能完全解释各种材质和工况下的摩擦学现象, 所以很难建立摩擦磨损的计算模型与公式。目前已有的公式大部分是基于某种磨损机理而建立的, 或是根据特定的试验条件而建立的经验公式。

第一节 摩 擦

两个相互接触的物体, 在外力作用下发生相对运动或者具有相对运动的趋势时, 在接触表面之间产生阻止发生相对运动或者相对运动趋势的阻力, 这个阻力称为摩擦力, 这种现象称为摩擦现象。为了降低两个相对运动的接触表面间的摩擦与磨损, 保证摩擦副长期可靠地工作, 节约能源, 必须选择良好的润滑。润滑工程已经成为新兴的摩擦学的重要内容。摩擦学是关于摩擦、磨损和润滑的科学。摩擦系统由四个基元组成: 一个接触件, 对应接触件, 上述两者之间的界面和界面上的介质以及环境, 在润滑轴承中, 润滑剂位于此间隙中。在普通滑动轴承中, 材料副是轴和轴瓦; 在内燃机中, 材料副是活塞环和汽缸壁, 或者凸轮和挺杆。互相接触的物体相对运动时产生的摩擦现象, 被科学家归纳为三条基本定律:

- ① 摩擦与两物体的接触面的大小无关;
- ② 摩擦阻力与垂直负荷成正比;
- ③ 在动摩擦中, 摩擦阻力与滑动速度无关。

根据上述定律得出摩擦力 F 与负荷 W 的关系: $F = f \cdot W$, f 称为摩擦系数, 在一定条件下, 摩擦系数 f 是一常数。

随着科学技术的不断发展, 在实际生活中, 出现了与摩擦定律相矛盾的现象, 较明显的

是对于非常光滑、清洁的表面，摩擦力是与接触面积成正比的；当滑动速度较大时，摩擦阻力会下降。此外，还发现对于光滑表面，摩擦阻力还随着表面粗糙度下降而变化。总之，摩擦现象是产生在两个摩擦表面之间的，它与摩擦表面的相互作用有着密切的关系。它可能是物理过程、物理-化学过程（例如吸附、解吸过程），或者本质上是化学过程（摩擦化学）。摩擦计量参数如摩擦、磨损和温度等数据可从应力面积获取。摩擦应力是表面和接触几何形状、表面负荷或润滑剂黏度等众多指标的产物。摩擦表面如图 2-1 所示。

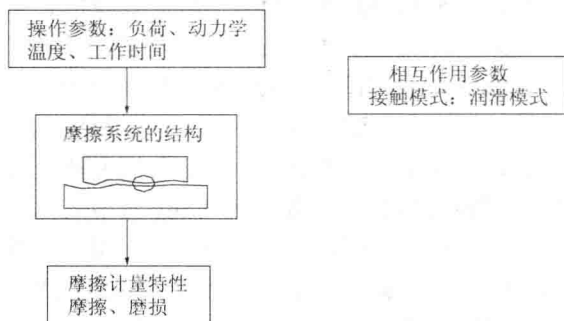


图 2-1 摩擦表面示意图

金属加工零件的表面层是由不同物质的薄层构成的，其性质与金属零件材料的基体不同。最外面的一层是脏污物质，如油污、灰尘等，其厚度约为 30nm；第二层是吸附分子膜，是从周围大气中吸附来的气体、液体分子，厚度为 0.3 ~ 3nm；第三层是氧化层，是金属表面与空气中的氧化合而成，厚度为 10 ~ 20nm；第四层是加工变质层，厚度约为 1000nm；再下面就是金属的基体。

加工变质层是金属零件在加工过程中，表层受到车削、研磨等机械加工作用而熔化、流动，最后冷却，沉聚在冷的金属基体上，形成一种不定形结构或是微晶结构的硬化层。

由上述可看出，金属零件的表面是不平滑的，有凸峰及凹陷，这种高低不平程度用粗糙度来表示。粗糙度的大小由加工方法决定，加工愈精细，粗糙度愈小。在加注润滑油的条件下，金属表面还附有油膜等，这些情况对金属零件的摩擦、磨损、润滑都有重大影响。

所有汽车制动系统都是利用摩擦作用进行制动的，车轮制动器利用摩擦制动车轮，轮胎与路面间的摩擦力使汽车停驶，可见摩擦的产生和存在对汽车制动系统是非常重要的。摩擦是两接触表面互相滑动时产生的力，分静摩擦和动摩擦，制动控制包含了两种摩擦形式。汽车动力及传动设备中，凡是相互之间有相对运动和相互接触的两个零件就组成一对摩擦副，如轴与滑动轴承、滚动轴承里的滚动体与保持架等。

根据摩擦副的运动形式，可分为滑动摩擦和滚动摩擦。根据摩擦零件工作条件和润滑油在摩擦表面间所起的作用，将润滑分为两种类型：流体润滑和边界润滑。

流体润滑是在两个摩擦表面之间有一薄层具有一定压力的流体，流体将摩擦表面完全隔开，流体中的压力平衡了摩擦零件所受的外载荷，流体润滑的主要优点是摩擦阻力小。流体润滑还可进一步分为液体动力润滑、液体静力润滑和气体润滑。液体动力润滑是由摩擦面间的相对运动，使收敛形缝隙中的黏性液体产生压力，用以平衡外载荷，并使液体形成足够厚

的油膜,将两摩擦表面完全隔开。也就是说,液体动力润滑不需借助外力作用,而靠部件本身运动,在摩擦表面间建立一高压油膜,使摩擦面分开,减少机械表面的摩擦和磨损。液体动力润滑在工业中有很重要的作用,汽车及机械设备都离不开液体动力润滑。液体动力润滑要靠润滑油,起主要作用的是润滑油的黏度。根据操作条件、油膜厚度及材料性质将润滑分为三个区域:

① 流体润滑区域,包括弹性流体润滑。此区域内油膜厚度大于两表面的粗糙度,摩擦系数 f 的大小与液体及零件材料的力学性质有关;

② 混合润滑区域,或称部分弹性流动力润滑区域。此时油膜厚度接近表面粗糙度,较高的微凸体互相接触;

③ 边界润滑区域。油膜厚度仅几个分子层厚或更小,微凸体接触数量增多,此时负荷几乎全部靠接触微凸体的变形所承担,摩擦系数与两接触面液体的力学性质、物理性质和化学性质有关。

液体的黏度表示液体阻止运动的能力,黏稠的液体黏度较大,流动比较困难。液体黏度的物理含义是由黏性液体的牛顿定律确定的,在黏性液体中的任何一点,剪切力与剪切速率成正比。测定液体黏度的方法很多,在实验室中应用最多的是玻璃毛细管黏度计,其原理是,一定量的液体流过毛细管的时间 t 与液体黏度 ν 成正比,即 $\nu = ct$ 。每一支玻璃黏度计的常数 c ,可用已知黏度的标准液来测定。

我国石油产品的运动黏度按国家标准 GB/T 265 进行测定,即一定量的试油在一定温度下流过毛细管的时间,乘上已知系数即得试油的运动黏度,运动黏度的国际单位 m^2/s 。过去,在 CGS 制中,曾以斯托克斯(简称斯, St)作为运动黏度单位,St 与 m^2/s 之间的关系为 $1\text{St} = 10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$, $1\text{cSt}(\text{厘斯}) = 10^{-6}\text{m}^2/\text{s} = 1\text{mm}^2/\text{s}$ 。美国石油学会建议从 1978 年 1 月 1 日起测定黏度的温度为 40°C (工业用油)和 100°C (车辆用油)。

摩擦系数随着轴承特性因数的减少而降低,当降到一个临界值时,摩擦系数迅速增大。临界点主要与摩擦表面的粗糙度有关。零件表面加工比较精细,表面的微凸体比较矮小,虽然油膜比较薄,但仍能保证两表面的微凸体不直接接触,因而仍能满足流体润滑条件。相反,如加工粗糙,表面微凸体比较高,虽然油膜厚也保证不了流体润滑要求。

在液体流动润滑中,润滑油膜有效隔开两摩擦面,由于表面不直接接触,因此就不出现黏附和磨料磨损,摩擦阻力的大小仅由润滑油的黏度决定。但是液体动力润滑必须在润滑油的黏度和运动零件的转速、负荷配合适当的条件下才能实现,在负荷增大或黏度、转速降低的情况下,液体动压油膜将变薄,当油膜厚度薄到小于摩擦面微凸体的高度时,微凸体将会直接接触,这时摩擦系数增大,并出现能控制住的有限磨损。此时对摩擦副的减摩抗磨作用,不仅取决于润滑油的黏度,更重要的是取决于润滑油化学成分与表面的互相作用,这种情况就属于边界润滑。边界润滑大部分摩擦面上存在一层与润滑介质本体性质不同的薄膜,这层薄膜厚度小于表面微凸体的高度,不能防止摩擦面微凸体的接触,但有良好的润滑性能,可减少摩擦和磨损。

边界润滑广泛地出现于摩擦零件中,如齿轮、发动机汽缸的上下止点及凸轮等处,汽车启动或停车时均会出现边界润滑,边界润滑的状态决定于摩擦面的性状及边界膜的性质,其形成与表面的特殊性有关,特别是摩擦过程中引起的一系列物理和化学效应,有利于边界膜的形成。边界润滑主要特征是,在摩擦过程中摩擦副的表面要与润滑剂及环境介质共同发生

作用。在边界润滑过程中，摩擦产生的机械能所引起的表面效应起着很重要的作用，在机械能的作用下，摩擦副表面缺陷增多，剥离出具有活性的新鲜金属表面，激发出外逸电子，形成高强度电场，出现瞬时高温、高压等。这些效应激发和促进了摩擦表面间物理和化学作用的进行，使周围介质和摩擦表面相互作用，在表面形成保护膜和改进膜，减缓了零件的摩擦和磨损。具体地说，金属在摩擦过程中会产生塑性变形，导致能量的大量消耗，进而转化成热量，集中在金属表面的热量瞬时温度可达 $500 \sim 1000^{\circ}\text{C}$ ，这么高的温度下，化学反应很容易进行。例如内燃机油常用的抗磨剂 ZDDP、齿轮油中极压抗磨剂硫化异丁烯、亚磷酸酯胺盐，温度在 200°C 就开始分解，分解出活性元素，还会与摩擦表面发生化学反应，生成极压膜。因此，为了在边界润滑条件下降低摩擦力，在润滑油中加入极压抗磨剂、摩擦改进剂、油性剂，这些添加剂根据它们摩擦表面的不同作用，能在表面形成吸附膜、沉积膜、反应膜或渗透膜。

吸附膜是润滑剂的极性分子吸附在摩擦表面上形成的，又可进一步分为物理吸附膜和化学吸附膜，前者是由分子吸引力的作用形成，后者是由极性分子的价电子与金属表面的电子交换作用形成。在金属表面形成的吸附膜是物理吸附还是化学吸附，决定于金属表面的活性程度及油中极性分子的性质，化学吸附膜强度较大。当负荷过大或速度过高时，摩擦产生的热量较多，摩擦表面温度逐渐升高，当温度升到吸附膜失效或者熔化时，油膜破裂，摩擦系数迅速增大。

吸附膜和沉积膜在缓和的摩擦条件下工作，而在苛刻条件下工作则选用含硫、磷、氯等元素的添加剂，如硫化烯烃、亚磷酸酯、氯化石蜡，来增强润滑剂的抗磨损、抗黏附作用。硫、磷、氯元素在较高温度下与摩擦面金属发生化学反应，生成能承受较大负荷及剪切强度较低的极压膜。这类反应膜实际上是摩擦面上金属与硫、磷、氯等元素作用生成低熔点无机膜，它们在形成过程中能流动到接触点周围表面，使表面变得平顺光滑，起着化学抛光作用，使单位面积上承载负荷下降。

了解金属表面的性状和负荷与真实接触面的关系，是为了研究产生摩擦与磨损的原因，以及减少摩擦和磨损的方法。汽车燃料燃烧释放的能量中 40% 用于汽车驱动，30% 被汽缸冷却系统消耗，30% 的能量由排放消耗；如果单独就摩擦损失来讲，燃料通过燃烧释放的能量中有 20% ~ 25% 被零件间的摩擦所消耗，降低这部分消耗是节能的关键。

发动机的摩擦部位主要来自阀系、活塞/缸套和轴承，其润滑方式包含了边界润滑、混合润滑和弹性流体润滑，而且在不同的转速、负荷和温度下，各种润滑方式的影响程度也会发生变化。一般而言，轴承主要处于弹性流体润滑状态，阀系和活塞/缸套处于边界/混合润滑状态，要达到降低摩擦和改善燃油效率，就要根据具体的润滑方式采用不同的解决办法。目前，根据发动机的润滑特点进行节能研究主要集中在两方面：在流体润滑和弹性润滑状态下，两摩擦副被润滑油膜隔开，摩擦阻力的大小仅由润滑油的黏度决定，较低的黏度意味着较小的摩擦损失，减少摩擦的关键因素是黏度；在混合和边界润滑状态下，含有减摩剂的润滑油可以在摩擦副表面生成一种剪切强度低、具有层状结构的物理吸附膜或化学反应膜，可以有效降低摩擦损失。关于产生摩擦的原因，有诸多看法，其中黏附理论较为合理。黏附理论认为，金属表面间的摩擦首先是在接触点发生了黏结，当两表面相对运动时，必须有足够大的切向力来剪断这些黏结点。另外，较硬的金属表面的微凸体会陷入较软的金属表面，两表面相对运动时，硬的微凸体会在软的金属面上犁出沟来。黏结和犁沟就是引起摩擦的原

因, 剪切黏结点和犁沟时所需的切向力就是用来克服摩擦阻力的。

摩擦副在一些部位之所以会发生“黏附”, 是因为金属表面压在一起时, 仅微凸体的尖端相互接触, 由于接触处的面积很小, 接触点间的应力很大, 大到足以引起接触处的材料产生塑性变形。在接触处产生塑性流动时, 摩擦表面的油污等薄膜和氧化层被破坏, 暴露出洁净的金属表面, 当洁净的两金属表面接触时, 表面的原子间会形成较强的金属键结合, 出现了两表面金属材料的黏附。黏附理论能解释摩擦定律, 还能进一步说明摩擦系数和金属材料性质的关系。该理论还推导出摩擦力与负荷成正比, 这是因为摩擦力是与真实接触面积成正比, 而真实接触面积又与负荷成正比, 最后表现为摩擦力与负荷成正比的关系。至于说古典摩擦定律中提到的摩擦力与接触面积无关, 应该说或是与表观接触面积无关, 而与真实接触面积有关的。

两金属表面接触时, 硬金属表面的微凸体会刺入软金属表面, 当发生相对运动时, 硬金属表面的微凸体所经过之处, 使软金属表面发生塑性变形而犁出一条沟来, 犁沟效应是引起摩擦阻力的原因之一。当黏结作用较轻微时, 犁沟效应将是产生摩擦阻力的重要原因。例如, 交界面间有润滑油膜的情况就是如此。

黏附-犁沟学说较为成功地解释了金属表面的干摩擦现象, 但是摩擦现象是比较复杂的, 不能认为黏附和犁沟效应是引起干摩擦的全部原因。实际上除了黏附和犁沟效应外, 摩擦还包含表面粗糙度和产生静电等因素。在不太光滑的表面, 粗糙度一般情况下给整个摩擦系数的影响为 0.01 个数量级或者更小些, 在比较光滑的表面上, 随着粗糙度的减小, 摩擦阻力反而增大, 这是因为在此种情况下黏附的倾向增加了。

滚动摩擦阻力很小, 但是滚动摩擦机理却很复杂。滚动时不发生滑动摩擦时的“犁沟”和黏着接点的剪切现象。一般认为滚动摩擦主要来自四个方面: 微观滑移、弹性滞后、塑性变形、黏着作用。

温度对黏度的影响较大。液体黏度基本上由分子间吸引力决定, 当温度升高时, 体积膨胀, 分子间的距离增大, 分子间吸引力减弱, 导致液体黏度的下降。几种润滑油基础油黏度随温度变化的情况见图 2-2。

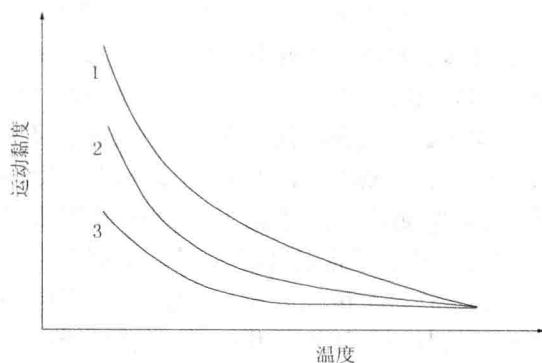


图 2-2 基础油黏度与温度的关系

1—环烷基油；2—石蜡基油；3—合成油

润滑油的黏度随温度升高而变小的性质为黏温特性, 特别对在宽温度范围使用的汽车润滑油来说尤为重要。黏温特性是评价润滑油性质优劣的主要标志之一, 黏度指数就是用来衡

量润滑油黏温特性优劣的指标。

黏度指数是人为地选择两种标准油与之比较而得出的质量标准,选择一种黏温性能好的石蜡基原油,由它制取的基础油黏度指数 VI 定为 100;再选择一种黏温性能差的环烷基原油,由它制取出的基础油黏度指数定为 0;要求某一润滑油黏度指数时,先测出此油 40℃ 和 100℃ 的运动黏度,根据推导出来的计算公式,换算出油品的黏度指数。在实际工作中多不采用算法,而采用比较简单的查表法。我国计算石油产品黏度指数的方法 GB/T 1995 与国际标准组织的方法一致,以 40℃ 及 100℃ 的运动黏度来计算黏度指数。从基础油黏度与温度关系图(见图 2)看出,三种油的黏度在 100℃ 相同,但由于黏温特性不同,低温时黏度差别很大,高黏度指数的合成油黏温性能好,低温时黏度变化不大,反之,黏度指数小的环烷基油低温黏度变化相当大。黏温性能较好、黏度指数较高、价格较低的石蜡基基础油广泛用于汽车润滑油中。

润滑油降低摩擦、减缓磨损的能力统称为润滑性能。润滑油的此种性能可以使摩擦表面的摩擦系数减小,从而降低摩擦损失,提高工作效率,并且能减缓摩擦表面的相互磨损,使机械的使用寿命延长。在其他条件相同的情况下,黏度较大的润滑油,在摩擦表面间形成的油膜厚度,较之黏度较小的润滑油所形成的要大。总之,液体的润滑性能仅与液体黏度有关。在选择润滑油时,应根据机械的工作状态来选择黏度适当的润滑油,以保证在设计时规定的工作状态下,能形成足够厚的油膜,防止摩擦面直接接触。同时,还应避免黏度过大,以造成过大的摩擦损失。在液体润滑中,除可按油膜厚度、运动速度、承受压力等计算所需要的润滑油黏度外,还可利用经验数据和图表等来估计所需润滑油的黏度。

在流体润滑中,润滑油的润滑性能可由黏度来判别,而在边界润滑中,润滑性能不能只用一些简单的理化指标来判别,因为边界膜的形成很复杂。即使不考虑其他因素的影响而单纯从油的成分来分析也是比较复杂的,如油中所含极压剂、油性剂,甚至胶质和沥青等都有影响。

由于这些反应膜的熔点、剪切强度低,又能降低单位表面的负荷,所以它们能减少金属的黏结、磨损并提高承载能力。这类添加剂对于齿轮油而言是至关重要的,齿轮油配方中,90% 以上都是含硫、磷元素的极压抗磨剂。选择添加剂来增强边界膜的润滑作用时,除了要求在界面上形成的牢固边界膜能起到良好的润滑作用外,还要求形成的边界膜必须稳定,不易被氧化或水解而产生酸性物质或胶质等。此外,还要考虑到边界膜与接触材料的配伍性,有的边界膜在形成过程中要与金属表面发生化学反应,但是反应不能过强,以免引起金属的化学腐蚀。例如在车辆齿轮油中,亚磷酸酯(T304)是相当好的抗磨剂,但其化学活性太强,致使腐蚀、锈蚀严重,因此齿轮油中多选用活性温和的磷酸酯胺盐类的 T305、T307 和 T308。因此,在选择添加剂时,必须根据具体的油品、金属材料等进行实验室模拟试验,使生成的边界膜在润滑性、稳定性、配伍性等各方面能满足使用要求。如果要求润滑油在边界润滑的缓和及苛刻条件下都能起到良好的润滑作用,应加入多种油性剂和极压抗磨剂,以适应较宽的温度范围。

任何摩擦和磨损的过程都可分为极压和抗磨两个过程,只是对于不同的过程,二者各自所占的比重不同而已。例如,四球磨损试验机测得的钢球磨斑直径既与抗磨性有关,也与极压性有关,如下式所示:

$$d = f(0.6\alpha_w + 0.4\alpha_{EP})$$

式中 d ——在 $(1470 \pm 50) \text{ r/min}$ 、 400 N 、 1 h 条件下磨斑直径；

α_w ——与抗磨性有关的系数；

α_{EP} ——与极压性有关的系数。

在目前所使用的润滑油添加剂中，任何一种单剂都很难同时满足极压性、抗磨性的要求。不同结构、不同活性的极压剂、抗磨剂以及油性剂各自在不同的摩擦过程中起作用，油性剂在较低的温度下起作用，而在这温度下，极压剂、抗磨剂基本上不起作用；对于极压剂而言，主要取决于金属表面的反应，而这种反应则属于化学腐蚀，常温下难以进行。因此，为了取得较好的综合抗磨效应，将不同化学活性的极压剂、抗磨剂、油性剂复合使用，取得协同效应。图 2-3 给出了极压剂与油性剂对摩擦系数的影响。

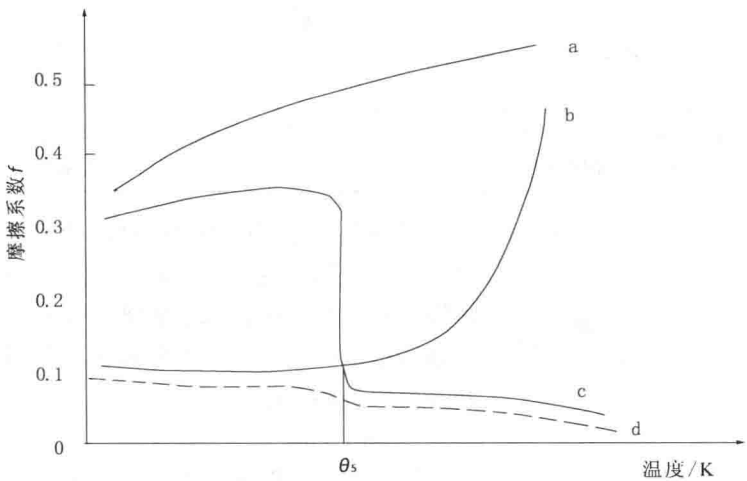


图 2-3 几种吸附膜在不同温度下对摩擦系数的影响

a—非极性润滑油；b—含脂肪酸润滑油；c—含极压剂润滑油；d—b、c 两种情况混合

摩擦过程是一个十分复杂的过程。摩擦系数不仅随着材料的不同而不同，而且还受其他因素的影响，即摩擦系数不是材料的固有特性，而是材料和工作条件综合的特性。通过实验证明了负荷、粗糙度、滑动速度、温度、表面膜等因素对摩擦系数均有相当的影响，同一种摩擦副在不同的因素影响下可能有极不相同的摩擦系数。

第二节 磨 损

磨损是伴随着摩擦而产生的必然结果，是摩擦副在做相对运动时，表层材料不断发生损耗的过程。汽车运动部件失效模式中，磨损失效约占 60%，所以人们极其关注磨损机理、影响磨损的因素和降低磨损的措施等问题。磨损和摩擦一样，是十分复杂的现象，也是一种微观和动态的过程。在这个过程中，表面材料含有弹性、塑性变形，摩擦表面和表层也会伴生一系列物理、化学和机械变化。

一、磨损的分类

两个相互接触的金属表面相对运动时，便会发生摩擦和磨损。磨损的分类方法很多，有