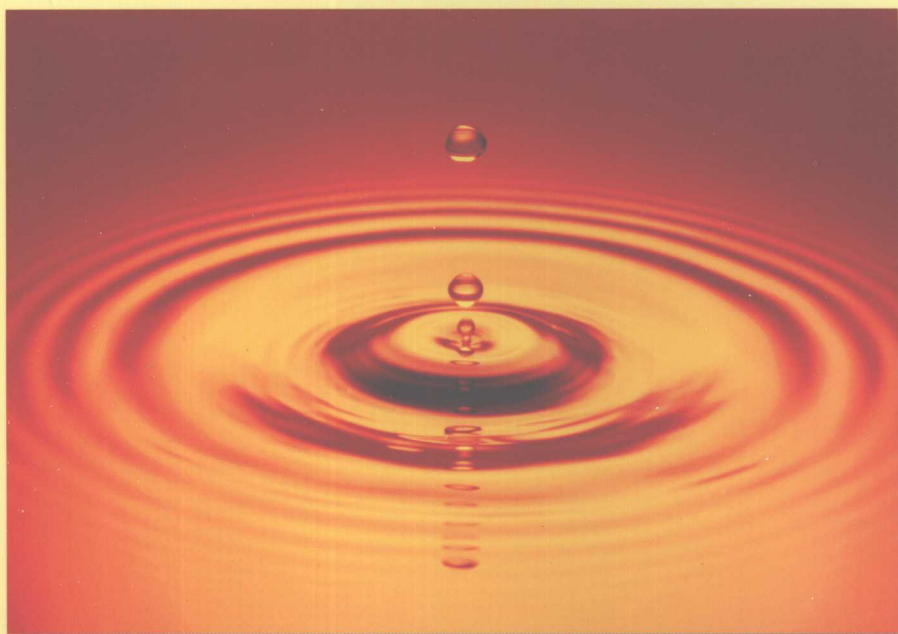


润滑油品开发与应用丛书



内燃机润滑油 产品与应用

许汉立 编著



中國石化出版社

润滑油品开发与应用丛书

内燃机润滑油产品与应用

许汉立 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书对内燃机构造及其润滑, 摩擦磨损的原理作了详细论述, 并对内燃机油的性能以及对排放和节能的影响作了叙述。分别对汽油机、柴油机、二冲程机、燃气发动机、醇燃料发动机、铁路和船舶柴油机的润滑及润滑油性能、制造及应用作了详细论述, 内容丰富。

本书反映了作者长期从事内燃机油技术攻关和指导研究生论文研究的部分结果。

本书可供从事内燃机设计、内燃机及其车辆船舶润滑油应用的技术人员和从事内燃机油研制、生产和销售技术人员参考。本书还可作为大专院校相关专业师生参考书。

图书在版编目(CIP)数据

内燃机润滑油产品与应用/许汉立编著.

—北京: 中国石化出版社, 2004

ISBN 7-80164-640-1

I. 内… II. 许… III. 内燃机-润滑油 IV. TK407.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 095048 号

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.cn

北京精美实华图文制作中心排版

北京大地印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

*

787×1092 毫米 16 开本 19.25 印张 488 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月第 1 次印刷

定价: 40.00 元

前 言

内燃机润滑油发展迅速,尤其是汽车用汽油机油和柴油机油。2002年公布了CI-4柴油机油,并开始酝酿GF-4/SM汽油机油。内燃机油配方技术和新的分析测试方法也有新的发展,对内燃机油对环保排放和燃料经济性的影响提出了更高的要求。因此,1997年出版的《内燃机润滑与用油》一书已不能完全满足需要。作者应出版社要求,编写了《内燃机润滑油产品与应用》一书。该书吸收了内燃机油上述新发展和研究内容,并进行了重新编写。

国内目前在大量使用国外复合剂(配方)及部分进口基础油的形势下,但愿本书对我国内燃机油产品的研发和应用能有所帮助。

本书编写过程,长城润滑油公司提供了部分资料,在此表示感谢。

许汉立

目 录

第一章 内燃机与内燃机润滑油	(1)
第一节 内燃机种类与工作特点	(1)
第二节 内燃机的摩擦、磨损和润滑机理	(4)
一、摩擦、磨损和润滑的基本概念	(4)
二、内燃机的摩擦副及其润滑	(10)
第三节 内燃机的润滑系统和润滑方式	(18)
一、内燃机的润滑系统	(18)
二、发动机的润滑方式	(21)
第四节 内燃机排放与润滑油	(23)
一、汽车排放污染物来源与产生原因	(23)
二、减少汽车排气污染物与排放法规	(24)
三、为达到汽车排放标准采用的相应措施	(25)
第五节 内燃机节能与润滑油	(31)
一、内燃机摩擦与内燃机油燃料经济性	(32)
二、内燃机油节省燃料的评定测试	(37)
第二章 内燃机润滑油性能与作用	(42)
第一节 内燃机润滑油性能	(42)
一、粘度与流变性能	(42)
二、抗氧化性能	(48)
三、清净分散性能	(52)
四、摩擦磨损性能	(61)
第二节 内燃机润滑油作用	(65)
一、润滑与减摩	(66)
二、冷却发动机部件	(67)
三、密封燃烧室	(68)
四、保持润滑部件清洁	(68)
五、防锈和抗腐蚀	(69)
第三章 车用内燃机润滑油	(71)
第一节 汽油机油	(71)
一、汽油机油质量分类	(71)
二、汽油机油产品	(72)
第二节 柴油机油	(82)
一、柴油机油质量分类	(82)
二、柴油机油产品	(84)

第三节 小型汽油机润滑油	(98)
一、二冲程汽油机工作原理	(98)
二、二冲程汽油机的润滑	(100)
三、二冲程汽油机排气	(101)
四、二冲程汽油机油	(101)
五、四冲程摩托车发动机油	(109)
第四节 气体发动机润滑油	(114)
一、气体燃料与气体燃料发动机	(114)
二、气体燃料发动机润滑油	(119)
三、气体燃料发动机油使用试验	(121)
第五节 醇燃料发动机油	(128)
一、甲醇和乙醇对汽车发动机的影响	(128)
二、醇类和含醇燃料对润滑油的影响	(130)
三、甲醇燃料发动机润滑油	(130)
四、乙醇或含乙醇燃料发动机润滑油	(138)
第六节 铁路内燃机车柴油机润滑油	(139)
一、铁路内燃机车柴油机的构造特性	(139)
二、铁路内燃机车柴油机油的发展与性能	(141)
三、铁路柴油机油评定方法	(144)
第四章 船舶用内燃机润滑油	(152)
第一节 船舶内燃机的构造特点与润滑	(152)
一、十字头型低速发动机	(153)
二、燃烧重质燃料的中速机	(157)
第二节 船用润滑油	(158)
一、船用润滑油的性能	(158)
二、船用润滑油的组成与规格	(170)
第三节 船用润滑油的分析评定	(175)
一、气缸油的分析评定	(175)
二、中速机油和系统油的分析评定	(181)
第四节 船用润滑油的应用	(185)
一、气缸油的应用	(185)
二、中速机油与系统油的应用	(188)
第五章 内燃机润滑油制造	(190)
第一节 内燃机油基础油	(190)
一、基础油分类	(190)
二、基础油的物理化学性质	(195)
三、I类基础油的研究	(197)
四、基础油的选择	(203)
第二节 内燃机油添加剂	(203)
一、金属清净剂	(204)

二、无灰分散剂·····	(211)
三、清净分散剂的作用·····	(216)
四、抗氧剂与抗氧抗磨剂·····	(216)
五、粘度指数改进剂·····	(221)
六、内燃机油用的其他添加剂·····	(225)
第三节 内燃机润滑油配方·····	(229)
一、内燃机油配方技术·····	(229)
二、复合添加剂配方原理·····	(231)
三、内燃机油配方举例·····	(235)
四、使用复合剂的油品配方·····	(239)
第四节 内燃机油生产流程·····	(241)
一、自动罐式调合·····	(242)
二、同步计量调合·····	(242)
三、自行设计的内燃机油及其复合剂调合流程·····	(242)
四、内燃机油简易调合·····	(244)
第六章 内燃机油产品应用·····	(247)
第一节 内燃机油老化变质·····	(247)
一、内燃机油本身的老化变质·····	(247)
二、内燃机油生成的沉积物·····	(249)
三、内燃机油用过油的分析·····	(256)
第二节 内燃机油老化变质检测·····	(261)
一、取样和基本分析项目·····	(261)
二、用过油质量变化控制指标·····	(265)
三、用过油正常工作和危险水平指标·····	(267)
第三节 内燃机油换油期·····	(268)
一、欧洲汽车及发动机厂家推荐的换油期·····	(268)
二、美国汽车及发动机制造厂家推荐的换油期·····	(270)
三、内燃机机油消耗·····	(272)
第四节 内燃机油 OEM 规格·····	(276)
第五节 内燃机油应用的几个问题·····	(285)
一、内燃机磨合油·····	(285)
二、内燃机的冷启动·····	(286)
三、内燃机油与外加添加剂·····	(287)
四、内燃机“卡环”与“拉缸”·····	(288)
五、内燃机润滑“亮红灯”·····	(289)
六、内燃机油质量与性能·····	(290)
七、军用内燃机油·····	(292)
八、欧洲 ACEA 与美国 API 内燃机油性能关系·····	(294)
主要参考文献·····	(296)
常用缩写词中英对照表·····	(297)

第一章 内燃机与内燃机润滑油

第一节 内燃机种类与工作特点

内燃机是指燃料在发动机内部燃烧的热力发动机，所供给的燃料是在其内部进行准备、燃烧并直接转换成机械能。因此它与那些从外部锅炉中吸收燃料能量的所谓外燃机，以及从电网中得到能量的电动机是不同的。

内燃机在广阔的技术领域内占有突出的地位是与它的一系列特点分不开的。这些特点决定了它在一定的范围内长期处于不败之地。例如陆、海、空交通运输业，几乎所有的大、中型船舶和部分铁路机车，都采用内燃机。农业和工程机械也离不开内燃机。中、小型发电站将内燃机作为应急发电机组、高峰发电机组。国防上的坦克、装甲车、摩托车、各种轻型舰艇、重型武器的牵引车中内燃机几乎是惟一的动力，内燃机在各行各业中的应用见图 1-1。那么，内燃机到底有些什么特征能使它有长期的稳定地位呢？

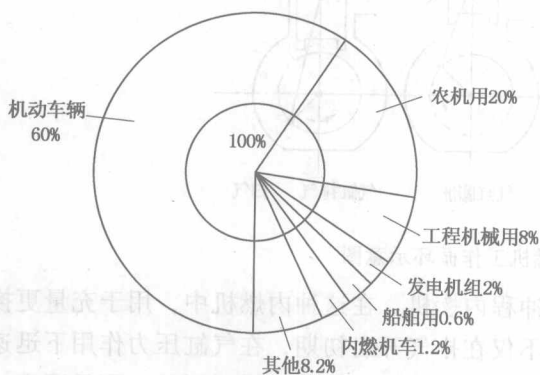


图 1-1 内燃机按功率计在各行各业应用

首先，内燃机通常使用的液体燃料使用和运输都十分方便。石油碳氢化合物的热值很高，所以内燃机只需带有体积相对较小的贮油箱就能运行较长时间，这个特点在交通运输业中尤为重要。

其次，内燃机对维护保养的要求不高。例如对于汽车，目前除了定期更换机油、滤芯和一些电器系统的触点与火花塞外，对于

内燃机来说几乎没有什么特别的地方需要维护保养，所以使用十分方便。同时内燃机的启动也十分容易。

此外，很重要的一点是内燃机的结构和外形有很大的灵活性。因为气缸可以根据需要来布置，这也促使内燃机有广泛的使用场合，如航空用的星形排列的内燃机就是一个例子。

特别重要的是内燃机具有很高的热效率，它是任何其他热机都无与伦比的。汽油机的热效率在 30% 左右，见图 1-2。特别是增压柴油机的热效率已达到 46%。这在燃料短缺的情势下更具有深远意义。内燃机的发展是与炼油工业密切相关的。

内燃机的工作原理：在化油器式内燃机中，燃料随空气一道吸入，而在汽油喷射内燃机和柴油机中，燃料则喷入进气管或气缸内。进入气缸的燃料在奥托(Otto)循环内燃机中，依靠外点火源(火花塞)点火；而在狄塞尔

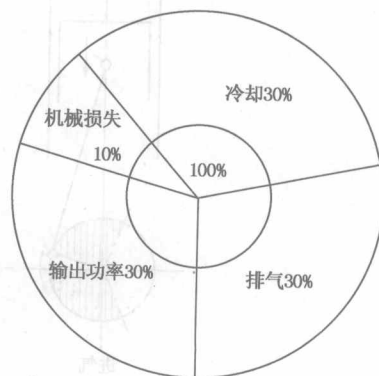


图 1-2 汽油机燃料能量转化

(Diesel)循环内燃机中，则依靠压缩自燃着火。燃烧过程一般在压缩终了的上止点前即已开始。它所释放出来的化学能将充量加热到 $2000 \sim 2500\text{K}$ 的温度，导致气缸内气体压力急剧升高，最高燃烧压力(或称最大爆发压力)可达 $5 \sim 10\text{MPa}$ 。气缸中的压力在推动活塞下移做功的过程中逐渐降低，气体的推力经活塞连杆推动曲轴旋转输出有效功率。在燃烧结束废气排出，新鲜充量重新进入气缸以后，开始下一次压缩过程。

上述包括充量更换和着火燃烧在内的整个过程称为工作循环。在往复式活塞式内燃机中，一个工作循环可在曲轴旋转一周或两周内实现。曲轴旋转一周完成一个工作循环的叫做二冲程内燃机，在这种内燃机中，充量更换在活塞行至下止点附近时进行，通过气孔或气门来实现，见图 1-3。因此，当活塞上行时，气缸内已存在一定量的新鲜充量，因而可以保证曲轴每旋转一周实现一个工作循环。

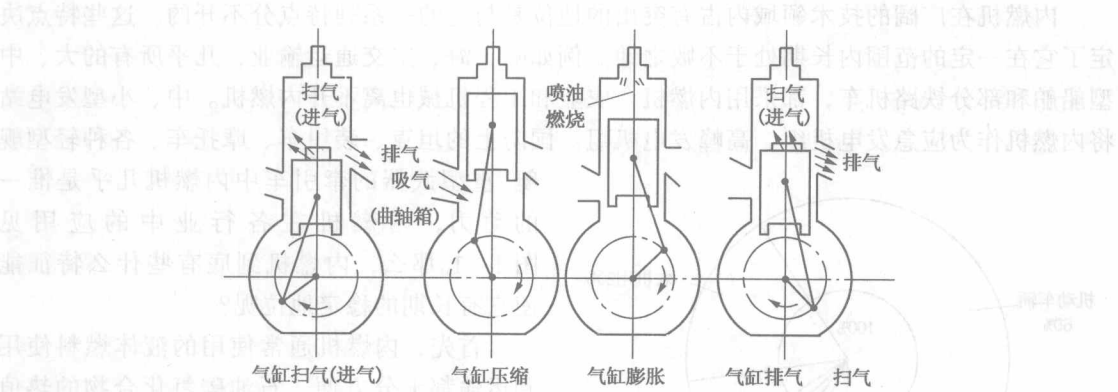


图 1-3 二冲程内燃机工作循环示意图

曲轴旋转两周完成一个工作循环的叫做四冲程内燃机。在这种内燃机中，用于充量更换的时间比二冲程内燃机长得得多，燃烧后的废气不仅在排气开启初期，在气缸压力作用下迅速排至排气管，并在排气后期受到新鲜充量的清扫(这两点与二冲程内燃机相似)，而且还有一个专门的排气冲程，利用上行的活塞将气缸内废气尽可能排除干净，见图 1-4。排气冲程结束后，只是在压缩容积中还存在残余废气；而在增压四冲程内燃机中，当活塞下行时，完

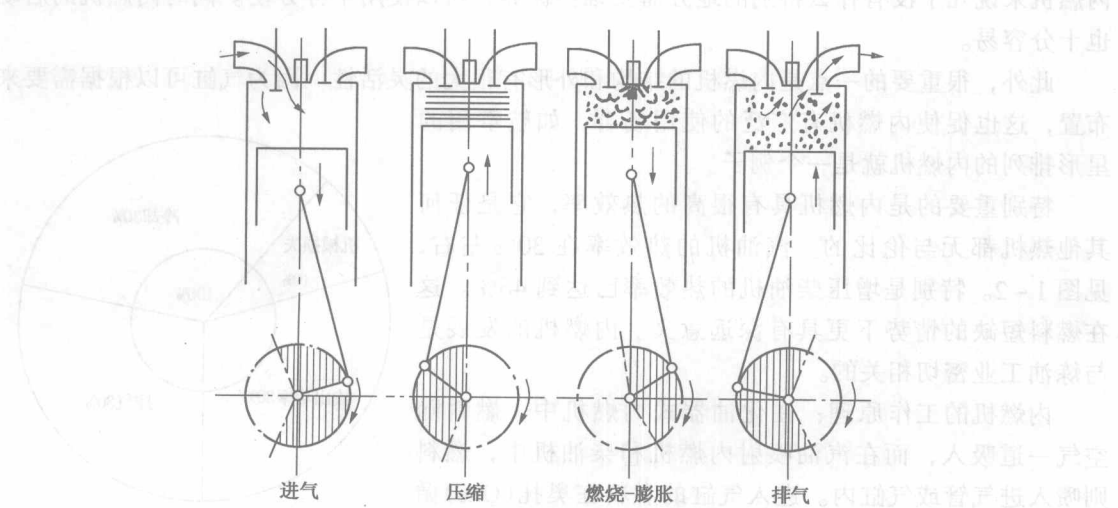


图 1-4 四冲程内燃机工作循环示意图

成进气冲程,新鲜充量进入气缸,因而当下次压缩冲程开始前,气缸中已充满了比二冲程内燃机“纯净”得多的新鲜充量,这是四冲程内燃机的一个重要优点。但是另一方面,由于有专门的进排气冲程,四冲程内燃机每个工作循环所持续的时间也较长,即曲轴要旋转两周才有一次做功冲程。这意味着在转速相同、气缸压力变化过程相同的情况下,四冲程在单位时间内输出的功只有二冲程内燃机的一半,这正是四冲程内燃机的缺点。这是目前二冲程和四冲程内燃机能同时存在的原因。

内燃机的种类,按所用燃料分,有汽油机、柴油机、燃气内燃机等。按一个工作循环冲程数分,有四冲程和二冲程内燃机。按气缸冷却方式分,有水冷和风冷内燃机。按燃料在气缸内着火性质分,有压燃式和点燃式内燃机。按气缸排列分,有直列式和卧式、V型、星形和X型等内燃机。按气缸转速和活塞平均速度分,有高速、中速和低速内燃机。按气缸数目分,有单缸和多缸内燃机。按用途分,有农用、汽车用、工程机械用、拖拉机用、内燃机车用、船用、发电用等内燃机。种类繁多,但都是将燃料的化学能,通过燃烧转化为热能,再转变为机械能的热力机械。

内燃机同一般机械一样,有各种轴和轴承、活塞和气缸、凸轮和推杆、齿轮、阀等摩擦副,见图1-5。为保证这些摩擦副能良好而持久的工作,就必须考虑到它们的耐磨性能和润滑措施。但是,同其他机械相比,内燃机的润滑有其特殊性,也就是说有以下一些特点。

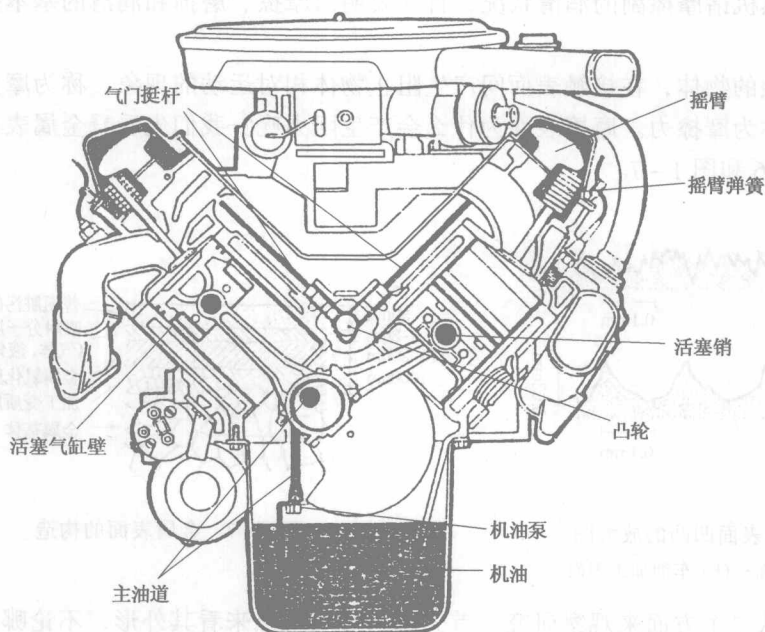


图1-5 V型汽油机(图中黑色代表润滑油)

(1) 现代内燃机总的要求是在体积小、重量轻的前提下发出更大的功率。因此摩擦副的单位面积上承受的负荷量很大。

(2) 除了摩擦热之外,还要受到燃烧热量的影响,因此摩擦副的温度很高。

(3) 在燃烧室里生成的燃烧产物会腐蚀金属,也会促进润滑油变质。同时,燃料和润滑油及其中的某些添加剂在燃烧时产生沉积物,积聚在活塞上,会起促进磨损的作用。

(4) 一些往复运动的部件,如活塞、气门等,它们的运动速度在上下止点处瞬间变为零,使此处油膜形成困难。

- (5) 燃烧室内及其周围难以充分提供润滑油。
- (6) 对于一些温度很高的内燃机零件，由于热膨胀和热变形，会使间隙变化而卡死。
- (7) 吸入的空气中，虽然经过空气滤清器，仍不免有灰尘、盐分等有害物质而加速磨损。
- (8) 由于振动、冲击负荷和压力的急剧变化，有时会产生气蚀现象。
- (9) 内燃机的各部位对润滑油的性能要求是不同的，例如活塞上部温度很高，要求润滑油能耐高温；曲轴和轴承间受冲击负荷，要求润滑油有合适的粘度；而对齿轮和凸轮机构则要考虑边界润滑性能。但是，对大多数内燃机来讲，发动机内只能用一种润滑油，因此它必须满足多种性能要求。

由于内燃机的这些特点，在考虑内燃机润滑和磨损性能时，必须与一般机械区别对待。但是内燃机还是遵循摩擦、磨损和润滑机理的共同规律。

第二节 内燃机的摩擦、磨损和润滑机理

一、摩擦、磨损和润滑的基本概念

为了说明内燃机诸摩擦副的润滑状况，首先要明白摩擦、磨损和润滑的基本概念。

1. 摩擦

两个相互接触的物体，在接触表面间产生阻止物体相对运动的现象，称为摩擦。由于摩擦而产生的阻力称为摩擦力。摩擦表面为什么会产生阻力呢？我们先看看金属表面究竟是什么样子，见图 1-6 和图 1-7。

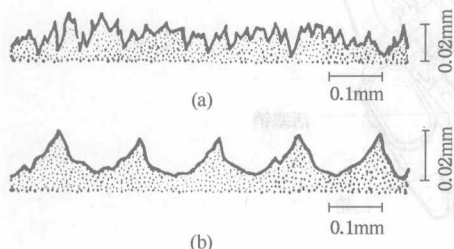


图 1-6 加工表面凹凸的放大图

(a) 研磨加工表面；(b) 车削加工表面

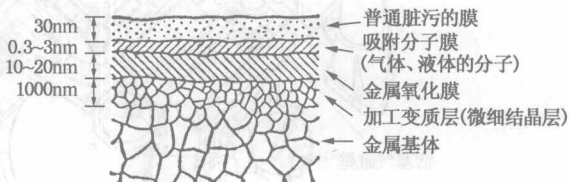


图 1-7 金属表面的构造

金属的表面可以从二个方面来观察研究。首先以宏观的观点来看其外形，不论哪一种加工方法，其表面都存在着凹凸，连最精的加工表面，其凹凸高度仍有 $0.1\mu\text{m}$ 上下。

金属表面外形上的再一个重要之点是，乍看很干净的固体表面，事实是由各种物质的薄膜覆盖着的，图 1-7 系金属表面的一般结构。在原来金属的基体上覆着三层或四层的异物层。

与宏观的观察相反，微观上从分子论的角度看，表面与内部究竟有什么不同？金属表面是具有能量的，最好的证明就是表面张力。

当两个金属表面相对运动，金属表面的凹凸和表面能量使其产生阻力，就是摩擦力。对摩擦机理的解释历来就有凹凸说和粘合说。

在机械运动中，发生相对运动的零件或部件统称为摩擦副。例如内燃机中的轴和轴承、活塞组和气缸套、凸轮和随动件、气门杆和气门导管等都构成摩擦副。

(1) 摩擦产生的不良效果

有摩擦存在,必然同时存在摩擦阻力、摩擦热和磨损三个现象,因此产生下列不良效果。

① 消耗大量能量。由于要克服摩擦阻力,必然要消耗大量能量去做功,这个摩擦阻力包括外摩擦(摩擦副间)和内摩擦(润滑油膜内部)。对于内燃机来讲,降低了燃油的经济性。

② 产生热量。根据能量守恒定律,克服摩擦阻力而消耗的那部分能量必然会转变为热能,如果不及时的散发出去,零件的温度会愈来愈高,结果降低机械强度,甚至产生热变形、热疲劳、间隙变小而磨损、卡死,造成内燃机损坏。

③ 摩擦副磨损。过早的磨损,使得内燃机寿命缩短,或间隙变大,燃烧压力降低,振动和噪音加大,燃烧不完善。

根据内燃机中各种摩擦副运动形式不同,摩擦可分为滑动摩擦和滚动摩擦。当接触表面相对滑动(或具有相对滑动的趋势)时的摩擦,叫做滑动摩擦,如曲轴主轴颈和主轴承、连杆轴颈和连杆轴承,活塞组和气缸套等。物体在力矩作用下沿接触表面滚动时的摩擦,叫做滚动摩擦,如滚珠或滚柱轴承中滚珠或滚柱在座圈中的滚动时即为滚动摩擦。现代内燃机凸轮和随动件中已使用滚动轴承,如 GM6.5L 发动机采用滚动随动件(滚针轴承)。内燃机中的齿轮传动和凸轮工作时,兼有上述两种摩擦。

(2) 摩擦分类

从摩擦表面的润滑情况看,摩擦又可分为:

① 干摩擦。物体表面无任何润滑剂存在时的摩擦,称为干摩擦,也称固体摩擦。纯粹的干摩擦在内燃机中很少存在,因为各个摩擦副中或多或少会有润滑剂存在。

② 流体摩擦。两物体表面被润滑油膜完全隔开时的摩擦,称为流体摩擦,也就是流体润滑。在内燃机中,为润滑油供应充足时的理想状态。此时摩擦发生在界面间的润滑油膜内,它可以有效地降低零件磨损,延长使用寿命。又因为润滑油分子间的摩擦系数远小于摩擦副间的直接摩擦系数,故显著降低了功率消耗。

③ 边界摩擦。两物体表面被具有润滑性能的边界膜分开时的摩擦,称边界摩擦,也就是边界润滑。这种边界膜是润滑油中的极性分子吸附在摩擦表面上。一般当内燃机在高温或低速运转时产生这种情况。边界摩擦普遍存在于滑动轴承、气缸和活塞环、凸轮和随动件等处。相对于干摩擦来说,边界摩擦具有较低的摩擦系数,能有效的减少零件磨损,提高承载能力。

④ 混合摩擦。半干摩擦和半流体摩擦都叫混合摩擦。半干摩擦是指在摩擦表面上同时有干摩擦和边界摩擦。半流体摩擦是指在摩擦表面上同时有流体摩擦和边界摩擦。混合摩擦在内燃机的各摩擦副中普遍存在。凡摩擦副出现两种润滑状态的都可称为混合润滑。各种润滑状态的示意图及其摩擦系数的大致范围见图 1-8。斯特里贝克(Stribeck)曲线特性因数

$C = \frac{\nu N}{P}$, C 值变小,则润滑趋于苛刻。

2. 磨损

两个相互接触的物体做相对运动时,物

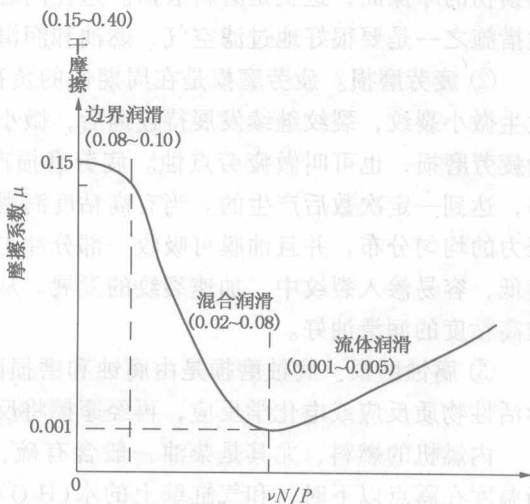


图 1-8 润滑状态曲线(Stribeck)

ν —粘度; N —速度; P —载荷

体表面的物质不断转移和损失。大部分的磨损现象是摩擦的结果。可以说有摩擦存在必然会产生磨损，只是要尽量减少磨损而已。

(1) 正常磨损过程

内燃机零部件正常磨损过程，一般分为3个阶段，见图1-9。

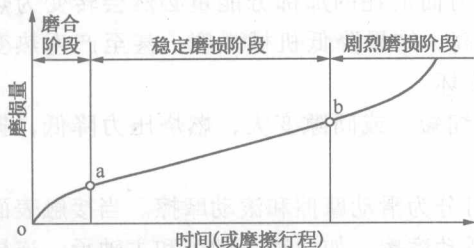


图 1-9 磨损量与时间的关系

① 磨合阶段。新的摩擦副表面具有一定的表面粗糙度，这时真实接触面积较小。磨合阶段可以使表面逐渐磨平，真实接触面积逐渐增大，磨损速度变慢，见图中的 oa 段。通过人为的磨合阶段的轻微磨损，为正常运转的稳定磨损创造条件。内燃机一般都要选择合理的磨合规范。在内燃机的磨合过程中，使用加有磨合剂的润滑油，可以缩短磨合时间，提高磨合质量。这些磨合添加剂在摩擦面凸起点处瞬间高温作用下分解，与铁反应生成化合物，它再与铁生成低熔点的共融合金，这种共融合金膜易被剪切磨掉，更适宜于加速内燃机磨合。

② 稳定磨损阶段。这一阶段磨损缓慢而且稳定如图中的 ab 段。在图上这段曲线的斜率是不变的，说明磨损速度不变，磨损稳定。通常机械寿命的长短就是指这一阶段时间的长短。

③ 剧烈磨损阶段。经过长时间的稳定磨损后，摩擦副表面之间的间隙和表面形状有了改变，并产生了疲劳磨损，磨损速度急剧加快，直到摩擦副不能正常工作。这时机械效率下降，精度下降，产生异常的噪音和振动，摩擦副温度迅速升高。对于内燃机讲，还会导致输出功率下降，燃油和润滑油消耗增加，排放变坏，这时必须进行大修。

(2) 磨损类型

根据磨损产生的原因和磨损过程的本质，内燃机常见的磨损类型有：磨料磨损、疲劳磨损、腐蚀磨损、粘着磨损。

① 磨料磨损。内燃机由于进气过滤不良吸入砂尘，或机油内含有杂质，或磨损下来的金属屑，这些硬粒进入摩擦副，在摩擦表面由于滑动而犁出沟槽所致。这种产生塑性变形受到损伤的摩擦面，这就是磨料磨损。这在内燃机的磨损中是常见的。为了减少磨料磨损，有效措施之一是要很好地过滤空气、燃油和润滑油，减少硬粒物进入摩擦副。

② 疲劳磨损。疲劳磨损是在周期性的负荷长期作用下发生的，首先在固体表面或内部发生微小裂纹，裂纹继续发展待连通后，微小金属块脱落，表面出现微小的坑，这种情况称为疲劳磨损，也可叫做疲劳点蚀。疲劳磨损产生的主要原因是零件承受反复作用的接触应力，达到一定次数后产生的。当有高粘度润滑油存在，不易从摩擦面挤掉时有助于接触区域压力的均匀分布，并且油膜可吸收一部分冲击能量，从而降低最高接触应力值。润滑油的粘度低，容易渗入裂纹中，加速裂纹的发展。从减少疲劳磨损的角度，内燃机摩擦副还是选用较高粘度的润滑油好。

③ 腐蚀磨损。腐蚀磨损是由腐蚀和磨损两个过程造成的。固体表面先与环境介质中化学活性物质反应或电化学反应，再经摩擦将反应物去除。

内燃机的燃料，尤其是柴油一般含有硫，硫燃烧后生成 SO_2 ，其中一部分氧化成 SO_3 。当温度在露点以下时，和气缸壁上的水 (H_2O) 化合成硫酸，对气缸套的表面产生酸性腐蚀。当使用劣质燃料，或低温启动，低负荷运转时更为严重。所以不应该使发动机长时间在低温

状态运转。另外对燃烧重油的大型内燃机,因重油中含有钒,燃烧后生成 V_2O_5 和 V_2O_3 ,常对活塞冠部和排气门、气门座产生腐蚀。

内燃机使用的滑动轴承中常含有铅、锡等元素,它们易被润滑油中的酸性物质所腐蚀,在轴瓦表面先生成黑点,再逐渐扩展成海绵状空洞,从而在摩擦过程中呈小块剥落。当滑动轴承中含有银、铜等元素时,若温度不太高时,会和润滑油中的硫化物生成硫化物膜,起到减摩作用。在高温状态,硫化铜膜变硬变脆,在摩擦中会剥落。

④ 粘着磨损。摩擦副相对运动时,表面微凸体之间由于密切接触而形成结点,使得接触表面的材料从一个表面转移到另一个表面的现象,称为粘着磨损。根据摩擦表面的破坏程度,可分为五类。

a. 轻微磨损。由于粘结的结合强度比摩擦副的两个基体金属都要弱,因此剪切破坏只发生在粘着结合面上,材料转移极轻微,这属于正常的机械磨损。如气缸壁和活塞环之间,曲轴和轴承之间的正常运转时的磨损。

b. 粘附。又称金属转移。由于粘着结合强度大于摩擦副中较软金属的剪切强度,因此剪切破坏发生在离粘着结合面不远的软金属浅层内,使得软金属粘附在硬金属表面上。例如,由于润滑不良造成轴瓦的软金属转移到轴颈。

c. 擦伤。由于粘着结合强度比摩擦副两个基体金属都高,转移到硬金属面上的粘着物质又拉削软金属面,使得破坏主要发生在软金属的亚表层内,有时硬金属亚表面也有划痕。在内燃机中,当齿轮啮合面润滑不良时,或铝制活塞和气缸套之间产生“拉缸”时均属于擦伤。

d. 撕脱。当粘着结合强度大于任一基体的剪切强度,剪切应力高于粘着结合强度时,剪切破坏发生在摩擦副一方或两方金属较深处。由于润滑条件不好,造成摩擦点的温度极高,摩擦粘着后又被撕开,许多滚动轴承中钢球与滚道之间和滑动轴承与主轴之间经常可见到。

e. 咬死。由于粘着强度比摩擦副任一基体金属的剪切强度都高,而且粘着面积大,剪切应力低于粘着结合强度,使得摩擦副之间咬死,不能相对运动。内燃机中因润滑系统的故障,润滑严重不良,摩擦副内产生高温,滑动轴承的烧瓦抱轴事故即是咬死情况。

防止粘着磨损的基本方法是避免油膜破裂,在发动机运转中尽可能不要突然加速和增加负荷,保持润滑系统正常运转,充分供油,使得各摩擦副处于良好的润滑和冷却状态。

内燃机中除了以上四种磨损外,还有一种微动磨损,常产生在键和键槽、轴承座和轴瓦背等没有明显相对移动的配合表面处。微动磨损的机理是,这些配合表面之间的压力使表面凸起部分粘着,粘着处被外界小振幅引起摆动所剪切,剪切表面被氧化,氧化的磨屑呈红褐色,以 Fe_2O_3 为主,以后这些氧化磨屑又起到磨料磨损作用。故微动磨损是一种复合磨损形式。

此外还有一种气蚀磨损,在内燃机的滑动轴承、水泵、油泵、管线、柴油机的缸套外侧等处出现。气蚀发生在零件与液体接触并有相对运动的地方。液体与零件接触处的局部压力比其蒸气压力低时,会形成气泡,同时溶解在液体中的气体也可能析出。气泡流到高压区时,压力超过气泡压力而使其消灭,这时会产生瞬间的极大的冲击波和高温。气泡的形成和消灭的反作用,使零件表面的材料产生疲劳而逐渐脱落,呈麻点状,随后扩展呈泡沫海绵状。气蚀是一种比较复杂的破坏现象,它不仅仅由机械力所引起,而且也有液体的化学和电化学作用,当液体中带有磨料时也会加剧这个过程。

3. 润滑

能减少摩擦降低磨损的作用称为润滑。在摩擦副间加入的这种减少摩擦降低磨损的物质称为润滑剂,它可以是液体,如各种各样的润滑油、水等,也可以是气体,如空气、氨、氢等,也可以

是固体,如二硫化钼、石墨等。采用不同润滑剂的润滑分别为液体润滑、气体润滑和固体润滑。

内燃机各摩擦副均采用的是液体润滑,可以使用液膜将摩擦副隔开,摩擦为液体摩擦。内燃机的各个摩擦副在工作时,不允许有干摩擦状态存在,尽可能用油膜将其隔开,即力争维持在液体润滑或边界润滑状态。为维持液体润滑,除提供足够的润滑油外,还必须注意到摩擦表面大小、形状和间隙,以适应承载的负荷、摩擦副的相对速度和润滑油的粘度、温度等条件。研究这些关系的理论称为流体润滑理论。

摩擦表面被润滑油膜完全隔开,表面凸起点不直接接触,这种润滑状态叫流体润滑。流体润滑又分为两种情况,流体动力润滑和流体静力润滑。在流体动力润滑中,分离摩擦副表面的油压是由于滑动表面的相互运动引起的。在流体静力润滑中,油压是由外界供给的。

雷诺方程表述了流体动力润滑中流体压力、油膜厚度、润滑油粘度、运动速度等因素之间的关系。此时摩擦阻力与润滑油粘度有关。

$$\frac{\partial}{\partial x}(h^3 \frac{\partial p}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(h^3 \frac{\partial p}{\partial y}) = 12u\eta \frac{dh}{dx}$$

式中 p ——流体压力;

h ——油膜厚度;

u ——平均速度;

η ——润滑油粘度。

以下以轴与轴承摩擦副的流体润滑为例说明油楔作用,见图 1-10。轴(中心是 O)以油膜为媒介嵌合在轴承(中心是 O')内。假设 O 和 O' 一致。但即使间隙很小(图上作了放大的描绘),在轴上承担载荷 P ,两中心点应该是错开的。因此油膜在 ABC 之间,成为末尾缩小的号角形状,而 CDA 成为逐渐扩大的号角形状。轴若按箭头方向旋转,由于油有粘性,随着接触轴表面的油的旋转,油便按箭头方向从号角的宽口被引向窄口。其结果,ABC 间的油膜弯成号角状起到一种楔子的作用,产生使轴和轴承隔开的力。不过其油楔的力(压力)在 ABC 间各部分的大小有所不同,其所作用的方向如图所示,与轴表面成直角。将作用于这轴表面的压力合计起来,与载荷方向相反的,借 P' 的力构成将轴托起的作用,它与施予轴上的载荷 P 保持平衡。这个称做 P' 的油膜压力之总和,根据 O 与 O' 之间隔不同以及号角的形状不同,楔子的作用也因之有所不同,其大小也随之不同。

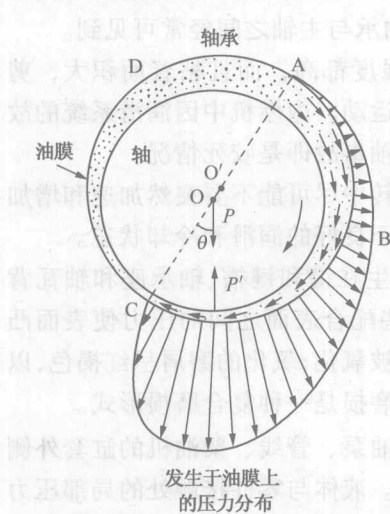


图 1-10 滑动轴承的原理

在这种润滑状态下,因为轴与轴承已为流体膜彻底隔离开,轴承的摩擦当然不是轴承材料的摩擦,也不是由于吸收了分子膜而产生的边界摩擦。因此在这种流体润滑状态下,摩擦系数很小,从理论上说完全不产生磨损。实际上由于粘上灰尘和表面的粗糙等原因,稍有损伤或磨损。

另外,油压的产生不仅限于有楔形油膜的场合,当粘性润滑油由窄缝间隙处被挤出时,或当两个面接近时,或滚轮滚动时,或齿轮齿面啮合时,同样会产生油压。

边界润滑是一种极为普遍的润滑状态,它是从流体润滑过渡到摩擦表面直接接触之前的临界状态。这时摩擦界面上存在一种吸附的薄膜,厚度通常为 $0.1\mu\text{m}$ 左右,具有一定的润

滑性，称之为边界膜。

(1) 吸附膜的形成原理

吸附膜的形成原理有以下 3 种：

① 物理吸附膜。物理吸附膜是靠分子吸引力使极性分子定向排列吸附在金属表面上，这层膜可以是一个或几个润滑剂分子的厚度，吸附膜愈厚愈牢。吸附在高温时容易脱附，所以适用于常温、低速和轻载。例如含有脂肪酸极性分子吸附在金属表面。

② 化学吸附膜。润滑剂吸附在金属表面上以后，一些极性分子的有价电子将与金属或其氧化表面的电子发生交换而产生新的化合物，使金属皂的极性分子定向排列吸附在金属表面上形成化学吸附膜。化学吸附膜很薄，且吸附热较大。

③ 化学反应膜。对含有硫、磷、氯等元素的润滑油，在较高温度下，这些元素能与金属表面进行化学反应，生成厚度较大的化学反应膜。化学反应膜比任何吸附膜都要稳定得多。

我们把摩擦表面间存在一层极性吸附物形成的物理吸附膜、化学吸附膜以及润滑剂与金属表面进行化学反应生成的化学反应膜时摩擦称为边界摩擦，在边界摩擦条件下，界面摩擦的润滑性能取决于这层薄膜的性质，而与润滑油的粘度无关，所以边界摩擦又叫做边界润滑。

边界润滑的机理尚在不断研究探索中，一般认为，润滑油在金属表面构成吸附层后，在界面上所有的极性分子就形成垂直于金属表面定向排列的分子栅结构，见图 1-11。当摩擦副滑动时，表面吸附膜的极性分子稍微倾斜和弯曲，好像两个毛刷似的相互搓动，使摩擦发生在具有极性分子的边界膜之间，如图 1-12。

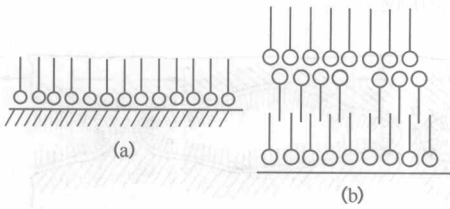


图 1-11 边界层定向结构

(a) 单层；(b) 多层

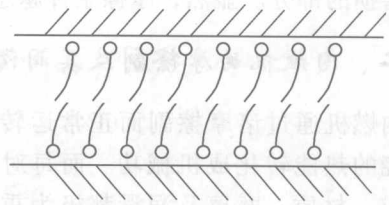


图 1-12 吸附膜润滑机理

边界膜既能承受一定载荷，又降低了摩擦系数，避免了金属直接接触，起到润滑作用。

当边界膜是反应膜时，由于摩擦主要发生在这层熔点高、剪切强度低的反应膜内，因而也有效地防止了金属表面直接接触，从而也使摩擦系数降低。

(2) 影响边界润滑性能的因素

影响边界润滑性能的因素很多，但边界膜的润滑性能与温度、速度及载荷却有密切关系。

① 温度影响。摩擦表面的工作温度对边界膜性能的影响很大，因为各种吸附膜只能在一定温度范围内存在，超过时会发生失去方向脱吸等现象使润滑失效。图 1-13 给出几种吸附膜在不同温度下对摩擦系数的影响。在润滑油中加入匹配适当的油性剂和极压剂，低温时靠油性剂，高温时靠极压膜，这样，在低温及

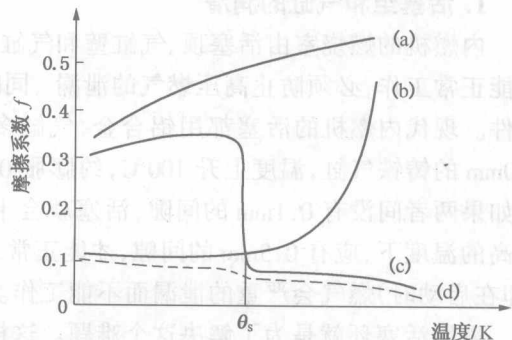


图 1-13 几种吸附膜在不同温度对摩擦系数影响

(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

高温都能保持相当低的摩擦系数，是比较理想的情况。

② 速度的影响。一般在稳定而平滑的摩擦情况下(速度大约在 $10^{-3} \sim 2\text{cm/s}$ 之间)，摩擦系数受速度影响很小而保持某一定值，但在速度非常低的情况下，即有静摩擦向动摩擦过渡的速度范围内，吸附膜的摩擦系数随速度增加而下降然后达到某一定值，化学反应膜的摩擦系数则随速度的增加而增加然后达到某一定值。

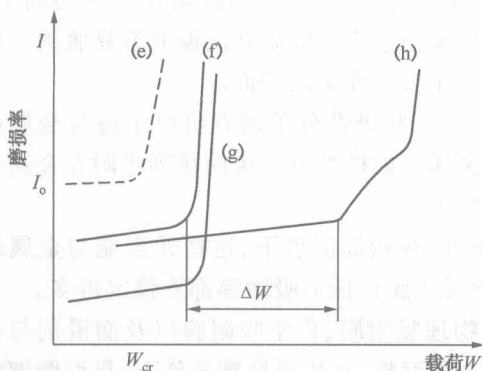


图 1-14 边界润滑的磨损性能

(e) 金属对金属干摩擦；(f) 基础油；

(g) 加抗磨剂；(h) 加极压剂

③ 载荷的影响。在滑动摩擦情况下，当载荷不致使吸附膜脱吸时，吸附膜的润滑效果良好，吸附膜的摩擦系数不受载荷的影响，摩擦表面的磨损量小，当载荷增大到一定程度时能使吸附膜发生脱吸，局部地方甚至发生破坏时，这时摩擦系数和表面磨损量将急剧升高。由图 1-14 看出在摩擦副中载荷对边界膜破裂的作用。

以上分别叙述的几种摩擦和润滑类型，在实际上是混合存在的，通常不是完全由流体润滑或边界润滑状态来支承负荷的。图 1-15 简明地表示了这种情况。在整个摩擦表面中，除 A 以外的表面为流体润滑， A 部分为边界润滑，而其中 αA 部分为摩擦表面直接接触的干摩擦，此是引起磨损的部分。显然，摩擦条件越恶化，则 αA 部分越大。

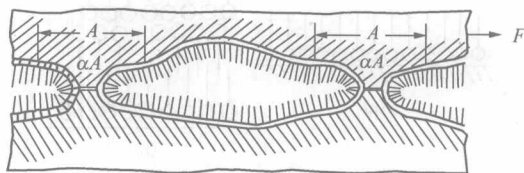
二、内燃机的摩擦副及其润滑

内燃机通过诸摩擦副而正常运转，将燃料燃烧的热能转化成机械功。而每对摩擦副的构成、材质、摩擦及润滑都极为重要。内燃机主要有八对摩擦副见图 1-16。以下将逐个对摩擦副的工况、摩擦及润滑情况给予叙述。图 1-16 给出汽油机及其有关摩擦副。图 1-17 给出相应的摩擦损失。

1. 活塞组和气缸的润滑

内燃机的燃烧室由活塞顶、气缸壁和气缸盖组成，所以活塞处于很高的温度中。要使内燃机能正常工作，必须防止高压燃气的泄漏，同时要使活塞在气缸内的运动阻力小，这是必要的条件。现代内燃机的活塞都用铝合金，气缸多用铸铁，两者的热膨胀系数不同。例如缸径为 100mm 的铸铁气缸，温度上升 100°C ，约膨胀 0.114mm ，而铝合金的活塞则要膨胀 0.220mm ，这样如果两者间没有 0.1mm 的间隙，活塞就会卡死。实际上活塞的温度可达 $250 \sim 300^\circ\text{C}$ ，在这样高的温度下，应有 0.5mm 的间隙，才能正常工作。但是若内燃机有这样大的间隙，在常温下(即在启动时)燃气会严重的泄漏而不能工作。即使高温下燃气泄漏也是不可避免的。

采用活塞环就是为了解决这个难题。这样活塞和气缸这对摩擦副，实际就变成了活塞环和气缸之间的摩擦。设计良好的活塞环，虽然在高温高压的燃气作用下，在润滑油帮助下能够顺利滑动，而只能允许的燃气泄漏。活塞环的摩擦力很小，磨损也是可以接受的。现代汽车发动机已可做到行驶 $2.0 \times 10^5\text{km}$ 而不更换活塞环。



固体、边界层、流体的混合摩擦

图 1-15 各种摩擦混合存在说明