

高等学校试用教材

船机检修技术

(轮机管理专业用)

大连海运学院
船机工艺研究室 编

人民交通出版社

163977

高等学校试用教材

船机检修技术

(轮机管理专业用)

大连海运学院
船机工艺研究室 编



人民交通出版社

里
1
一

内 容 提 要

本书是根据大连海运学院轮机管理专业教学大纲编写的。海院长期以来，曾开设船机检修技术这门课，有过较长时间的教学实践，并在63年、65年、73年三次在校内印出过此类教材。因此，本书在编写时，既吸取了过去的教学经验，又力求反映船厂目前检修技术中的一些新技术和新经验，同时在内容方面增添了有关摩擦磨损、腐蚀、疲劳断裂、调速器和舵系检修等新内容。

本书主要介绍船用柴油机零件的损伤机理和检修技术，内容包括：摩擦磨损机理及提高零件耐磨性的途径；船机零件的腐蚀与防护；船机零件的断裂及其防止办法；船机零件的缺陷检验与修复方法；柴油机主要零件的检修；燃油喷射系统中主要机件的检修；调速器与废气涡轮增压器的检修；柴油机主要机件在船上的安装与校中；拉缸及其应急措施；船舶轴系的检修；船舶舵系的检修；系泊试验与航行试验等。

本书由吴嘉龄（一、三、九章）、王富山（六、七、八章）、李素玉（十、十一、十二章）、满一新（二、四、五章）编写，吴嘉龄统稿，上海海运学院濮龙根审阅。

本书为高等学校轮机管理专业试用教材，也可供远洋和沿海轮机人员以及船厂工程技术人员参考。

96075/21

高等学校试用教材

船机检修技术

（轮机管理专业用）

大连海运学院

船机工艺研究室

人民交通出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民交通出版社印刷厂印

开本：787×1092_{1/16} 印张：10.625 字数：261千

1983年5月 第1版

1983年5月 第1版 第1次印刷

印数：0001—5,700册 定价：1.10元

目 录

第一章 摩擦磨损机理及提高零件耐磨性的途径.....	1
第一节 摩擦分类.....	1
第二节 摩擦磨损机理.....	2
第三节 磨损规律.....	5
第四节 船机零件摩擦磨损的影响因素及实例.....	5
第五节 提高零件耐磨性的主要途径.....	10
第二章 船机零件的腐蚀与防护.....	13
第一节 化学腐蚀.....	13
第二节 电化学腐蚀.....	15
第三节 穴蚀.....	17
第三章 船机零件的断裂及其防止办法.....	19
第一节 船机零件产生断裂的原因分析.....	19
第二节 船机零件的疲劳断裂.....	20
第三节 船机零件断裂破坏实例.....	22
第四节 防止或减少疲劳裂纹的主要方法.....	24
第四章 船机零件的缺陷检验与修复方法.....	27
第一节 船机零件的缺陷检验.....	27
第二节 船机零件的基本修复工艺.....	31
第五章 柴油机主要零件的检修.....	38
第一节 气缸盖的检修.....	38
第二节 气缸套的检修.....	39
第三节 活塞组件的检修.....	42
第四节 曲轴的检修.....	49
第五节 轴承的检修.....	60
第六章 燃油喷射系统中主要机件的检修.....	70
第一节 燃油喷射系统中的常见故障.....	70
第二节 精密偶件的检验.....	73
第三节 精密偶件的修理.....	75
第七章 调速器与废气涡轮增压器的检修.....	77
第一节 调速器的检修与调整.....	77
第二节 废气涡轮增压器的检修.....	82
第八章 柴油机主要机件在船上的安装与校中.....	93
第一节 机座的安装.....	93
第二节 机架、气缸体和贯穿螺栓的安装.....	101

第三节	固定件相互位置的校中	103
第四节	活塞运动部件在船上的校中	105
第九章	拉缸及其应急措施	113
第一节	拉缸的机理和主要形式	113
第二节	拉缸举例	114
第三节	防止拉缸的主要方法	117
第四节	拉缸时的外部特征和应急措施	118
第十章	船舶轴系的检修	121
第一节	概述	121
第二节	螺旋桨的检修	122
第三节	尾轴的检修	126
第四节	尾轴管装置的检修	128
第五节	中间轴和中间轴承的检修	134
第六节	轴系的检验和调整	135
第七节	轴系校中方法	142
第十一章	船舶舵系的检修	149
第一节	概述	149
第二节	普通平衡舵的检修	150
第三节	舵系试验	152
第十二章	系泊试验与航行试验	153
第一节	系泊试验	153
第二节	航行试验	155
附录一	1. 船舶入级和船舶检验	158
	2. 计划修理类别和周期	158
	3. 修理单的编制	159
附录二	1. 我国规范、标准和国外有关验船部门、造船公司规定	
	曲轴臂距差极限值计算式	161
	2. 国产船用柴油机各机型对曲轴臂距差要求数值	162
	3. 国外船用柴油机各主要机型对曲轴臂距差要求数值	163
	4. 国产船用柴油机各机型曲轴及推力轴承装配间隙及磨损极限间隙	165

第一章 摩擦磨损机理及提高零件耐磨性的途径

众所周知，机器的运转都是由运动副零件的配合表面的相对运动来实现，而配合表面的相对运动必然伴随着摩擦而产生磨损。在船舶上，摩擦磨损是船机零件最常见的一种损伤形式，是机器丧失工作能力，影响船舶安全航行的主要因素之一。所以，轮机人员必须了解船机零件摩擦磨损机理和提高耐磨性的途径，在管理工作中努力防止零件过早磨损，以确保机器安全可靠地工作，并延长其使用寿命。

第一节 摩擦分类

根据运动副零件运动形式的不同，我们可以把摩擦分为滑动摩擦、滚动摩擦和复合摩擦三种基本形式。船舶机器上的运动副大多为滑动摩擦，根据其摩擦表面上的润滑状态，又可将滑动摩擦分为干摩擦、液体摩擦、边界摩擦、半干摩擦和半液体摩擦五种形式。

一、干 摩 擦

摩擦表面没有润滑剂（严格地说，应为既无润滑剂，又无湿空气）时的摩擦，称为干摩擦。如火车车轮和铁轨的摩擦。

二、液 体 摩 擦

摩擦表面完全被润滑剂隔开，在这种状况下，两摩擦表面没有直接接触，摩擦是发生在润滑剂的内部。我们把这种摩擦称为液体摩擦，如图1-1所示。

在船舶机器中，液体摩擦是很少的。因为，要建立液体摩擦，必须具备下列条件；否则，就无法建立。

- (1) 摩擦表面要有较高的光洁度和精度；
- (2) 运动副零件的配合间隙要适当；
- (3) 运动副零件要有足够的相对滑动速度；
- (4) 保证润滑剂的连续供应；
- (5) 在一定温度下，润滑剂有合适的粘度。

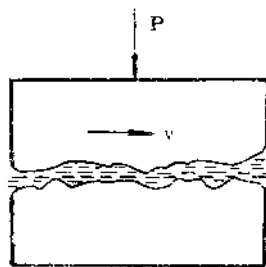


图1-1 液体摩擦示意图
 P -零件的法向载荷； v 零件相对运动速度

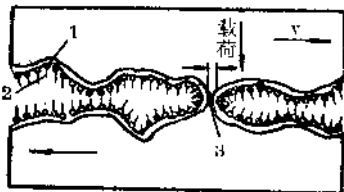


图1-2 边界摩擦示意图
1-氧化膜；2-吸附的极性分子；3-金属粘着点

三、边 界 摩 擦

摩擦表面间有一层极薄的油膜，厚度通常小于0.1微米。油膜如吸附到摩擦表面，称为吸附膜；如与表面材料发生化学变化，称为反应膜。吸附膜和反应膜的摩擦特性与润滑剂不同，因此，边界摩擦不是取决于润滑剂的粘度，而是取决于它的化学性能和边界膜的摩擦特性，如图1-2所示。

四、半干摩擦和半液体摩擦

在摩擦表面间,同时存在边界摩擦和干摩擦时的摩擦,称为半干摩擦;同时存在液体摩擦和边界摩擦时的摩擦,称为半液体摩擦。

从上述五种摩擦情况来看,干摩擦的摩擦系数最大,磨损也最大。液体摩擦是最理想的摩擦形式,摩擦系数最小,磨损也最小。边界摩擦是最常见的一种摩擦形式,由于边界膜的存在,它的摩擦系数和磨损程度都较干摩擦低得多。

在此必须指出,摩擦系数不仅与摩擦形式有关,还与运动副摩擦表面材料性质有密切联系,如表1-1所示,不同的配合材料有不同的摩擦系数。

常用材料的滑动摩擦系数

表1-1

两两配试验材料	滑动摩擦系数		两两配试验材料	滑动摩擦系数	
	无润滑条件	有润滑条件		无润滑条件	有润滑条件
钢对钢	0.1	0.05~0.1	钢对轴承合金	0.2	0.04
钢对铁	0.2	0.1~0.2	钢对夹布胶木	0.22	—
钢对铸铁	0.16~0.13	0.05~0.15	软钢对铸铁	0.18	0.05~0.15
钢对青铜	0.15~0.13	0.07	铸铁对铸铁	0.15	0.07~0.12
钢对黄铜	0.19	0.03	铸铁对青铜	0.15~0.21	0.07~0.15
钢对铝	0.17	0.02	铸铁对橡皮	0.3	0.5

另外,摩擦系数大时,磨损程度不一定随之增加。实践证明,有些材料的摩擦系数较大,而磨损率却很低,如表1-2所示。

摩擦系数和磨损率

表1-2

序号	两两配试验材料	摩擦系数	磨损率 (厘米 ³ /厘米)×10 ⁻¹²
1	软钢对软钢	0.62	157,000
2	60/40铅黄铜对淬火工具钢	0.24	21,000
3	聚四氟乙烯对淬火工具钢	0.13	2,000
4	钴钨铬合金对淬火工具钢	0.60	320
5	铁素体不锈钢对淬火工具钢	0.53	270
6	聚乙烯对淬火工具钢	0.65	30
7	碳化钨对碳化钨	0.35	2

注:圆销和圆环的摩擦磨损试验,载荷4牛顿,速度1.8米/秒。

第二节 摩擦磨损机理

在摩擦过程中,摩擦表面发生了尺寸、形状和表面质量的变化,这种变化称为磨损。

摩擦磨损是与摩擦表面形貌、表层性质等因素有关,为了说明摩擦磨损机理,首先要讨论表面形貌和表层性质。

一、表面形貌和表层性质

表面形貌是指零件表面的几何形状，而几何形状由光洁度（微观粗糙度）和波纹度（宏观粗糙度）组成，如图 1-3 所示。

表层性质则是指表层的金相组织和物理化学特性。

船机零件因材料和制造方法不同，不仅表面形貌相异，而且，表层的金相组织和物理化学特性也不一样。在机械加工时，表面熔融和

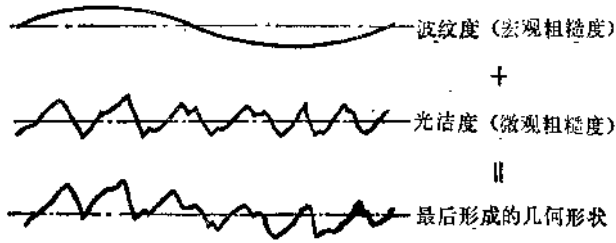


图1-3 表面几何形状示意图

流动产生一个很薄的冷硬层，这个冷硬层又称毕氏层。在毕氏层上面，有一个氧化膜。在毕氏层和基体材料之间，还有一个变形层。如图 1-4 所示。

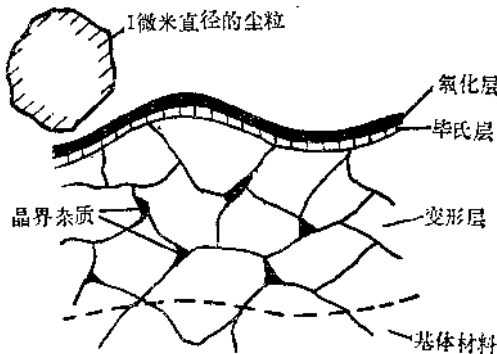


图1-4 表层剖面示意图

塑性变形的同时，接触点上的氧化膜也被压碎或剪切掉。这时，接触点金属分子间相互吸引力增大，有可能相互扩散而溶合在一起。我们把溶合在一起的现象称为冷焊。

二、摩擦磨损过程

摩擦时，由于粗糙度的影响，两摩擦表面仅仅在少数孤立点上发生接触。这时，法向载荷便由这些接触点传递。接触面积越小，法向应力越大。当法向应力超过材料的屈服极限时，接触点就产生塑性变形。在塑性变形的同时，接触点上的氧化膜也被压碎或剪切掉。这时，接触点金属分子间相互吸引力增大，有可能相互扩散而溶合在一起。我们把溶合在一起的现象称为冷焊。

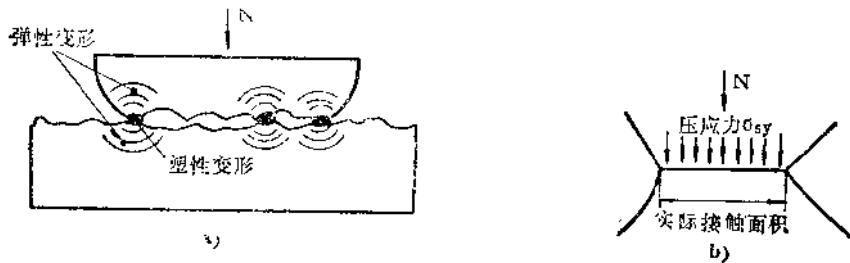


图1-5 表面接触情况示意图
a)表面接触情况；b)实际接触情况

当相对运动继续进行时，由于剪切而使冷焊点破裂，以后，又在接触点发生塑性变形、冷焊和破裂，直到真实接触面积增大到足以支承法向载荷时为止，如图 1-5 所示。这时，表面硬度增加了，光洁度也有所提高了。

摩擦磨损过程是一个复杂的过程，当金属产生塑性变形时，要释放热量，因此，在摩擦表面上的温度要比基体金属的温度高得多。当温度高于再结晶温度时，因变形而引起的表面强化现象将消失；当温度继续升高时，金属被软化，摩擦表面金属分子相互粘结；当温度升高到相变温度，摩擦表面金属就会产生相变，强度和硬度也发生了变化。

在摩擦磨损过程中，摩擦表面要与周围介质起作用，例如，当氧化膜被压碎或剪切后，

裸露的金属表面迅速与氧气起化学反应，形成氧化膜。氧化膜和基体金属的结合力较弱，容易被压碎或剪切。另外，空气中的水分和润滑油中的硫分，均能与摩擦表面起化学反应，产生化合物，加剧磨损。

因此，摩擦磨损过程就是由于机械和化学的作用，使物质从表面不断损失或产生残余变形的过程。

三、摩擦磨损形式

根据摩擦磨损过程的不同特征，磨损又可分为粘着磨损、磨粒磨损、表面疲劳磨损和腐蚀磨损四种基本形式。

1. 粘着磨损

上面已经说过，在法向载荷作用下，接触点产生塑性变形，氧化膜被压碎或剪切，接触点发生冷焊。如果运动速度较小而法向载荷较大，摩擦表面温升很高，金属软化或熔化，接触点金属就相互粘着在一起。当继续运动时，粘着处被剪切，这样粘着、剪切、再粘着、剪切的过程，就构成粘着磨损。

根据剪切部位的不同，粘着磨损又可分为轻微磨损、涂抹、擦伤、撕裂和咬死五种。当剪切发生在粘着面上，表面转移的物质极轻微；当剪切发生在离粘着面不远的软金属浅层内，软金属就涂抹到硬金属表面上；当剪切发生在软金属的亚表层内，软金属表面出现擦伤（或拉毛）痕迹；当剪切发生在摩擦副较深处，表面就出现撕裂；当粘着强度比基体金属剪切强度高，而且粘着区域大，相对运动时的剪切应力又低于基体金属的剪切强度，摩擦表面咬死。

2. 磨粒磨损

零件摩擦表面间存在磨粒时，它能使表层产生部分塑性变形，有时磨粒还切削表层金属，使表层产生擦伤和拉毛。

表层产生塑性变形后，氧化膜被剪切，因此，促进表层金属继续氧化，使氧化磨损速度加快。

磨粒磨损有两种。在法向载荷作用下，一硬物体滑过软表面时，在软表面上刨出许多沟槽，这就叫两物体的磨粒磨损。若摩擦表面进入硬质颗粒，并从摩擦表面上切下微细切屑，这就叫三物体磨粒磨损。硬质颗粒可以是磨损产物，也可以是空气或润滑油中的杂质。大多数机械在含有污垢和灰尘中工作，属于第二种磨粒磨损。

3. 表面疲劳磨损

两摩擦表面作滚动或滚动、滑动复合摩擦时，在交变接触应力作用下，使摩擦表面疲劳而产生裂纹后，分离出碎片、颗粒的现象，称为表面疲劳磨损。

在滚动中，尽管两个零件没有直接接触，但摩擦表面仍受到由油膜传递的载荷影响，产生应力。其中，最大压应力发生在表面上，而最大剪切应力则发生在表层内。当应力超过持久极限值，材料就破坏了。

4. 腐蚀磨损

在摩擦过程中，摩擦表面与周围液体、气体或汽体发生以化学或电化学腐蚀为主的磨损，称为腐蚀磨损。腐蚀产物通常与表面结合不牢，因而继续摩擦会使它们分离，然后，这一过程又重复进行。

当腐蚀成为磨损的主因时，通常有几种磨损形式同时发生。例如，常见的表面膜，往往

是氧化铁，从表面脱落后都变成磨料，因此，两摩擦表面将同时发生腐蚀磨损和磨粒磨损。

第三节 磨损规律

船机零件在运转过程中产生的磨损是有一定规律的。任何一对配合零件，在正常使用条件下，其运转时间和磨损量关系都如图1-6曲线所示。

船机零件的磨损程度可用零件尺寸、质量和体积的变化来衡量。把质量（或尺寸等）变化量作为纵坐标，运动时间（或滑动距离）作为横坐标，划出磨损曲线OAB。

磨损曲线反映了三个不同阶段。OA是第一阶段，称为磨合期（跑合期）；AB是第二阶段，称正常磨损阶段（稳定磨损阶段），直线斜率表示单位时间内的磨损率。BC是第三阶段，称急剧磨损阶段。

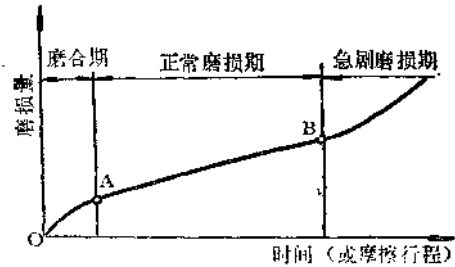


图1-6 磨损量与时间关系示意图

磨合期，是摩擦初期改变摩擦表面几何形状和表面层物理化学特性的过程。在磨合期内，由于表面高低不平，实际接触面积小，接触点的压应力大，磨损较大。如果在两表面定期注入润滑油，也往往由于摩擦产生大量热而使油膜遭到破坏，引起粘着磨损。所以，在磨合期运行时，要求载荷和速度小，润滑油多些。载荷小，接触点压应力小，磨损小，因塑性变形产生的热量也少；润滑油多，使摩擦表面获得较好的润滑和冷却，并将磨屑带走，减少磨粒磨损。如果在磨合期一开始就提高载荷和速度，润滑油也供应不充分，这时，摩擦表面不仅不能获得光滑表面，而且越来越粗糙，使配合性质发生恶化。

机器只有获得良好的跑合后，才能投入正常的安全运转。当前，由于耐磨材料广泛应用于船机零件，使磨合困难，磨合期延长。要使磨合期短，磨损量又少，这不仅取决于磨合期载荷分配、润滑油品质和供给情况，还涉及到零件修造质量，特别是表面光洁度、安装质量和配合件选用材料等。

正常磨损期，磨损趋于缓慢。因为磨合以后，摩擦表面已较光滑，冷加工硬化层也逐步形成，表面硬度增加，磨损显著减少。这时，可以承受较大的载荷和较高的速度。

在正常磨损阶段，要加强维护保养工作，注意排除某些增加磨损的因素（例如，润滑油是否清洁，供给是否充分，冷却是否良好等），使正常磨损阶段尽可能延长。

急剧磨损期，是磨损的最后阶段。经过长期运行以后，不仅使零件摩擦表面几何形状发生较大变化，而且使零件精度和配合性质变坏，产生振动，温度升高，磨损急剧增加，此时机器应停止运行，进行检修。否则，零件将失去正常工作状态，最后导致机损事故。

第四节 船机零件摩擦磨损的影响因素及实例

船机零件摩擦磨损的影响因素很多，包括载荷、温度、速度、润滑油、表层材料等方面，而且，他们是互相影响的。例如，表面高温可由重载和高速所引起，温度影响表面膜的形成，并会引起表面结构和硬度的变化。下面用两个实例来作进一步讨论。

一、活塞环和气缸套的摩擦磨损

1. 摩擦磨损影响因素分析

活塞环和气缸套是一对运动副。气缸套静止不动，活塞环则沿缸壁以一定速度上下往复运动。在活塞环和缸壁之间，用注油泵或曲轴溅射方法定期供给润滑油。

前面已经说过，两个摩擦表面间的润滑状态，是区别摩擦磨损形式的根本条件。滑油注入气缸后，通过油槽分布到周围缸壁上，并由活塞环刮到缸套工作表面上，用曲轴溅射的润滑油也是由活塞环刮到缸套工作表面上。平行滑动的活塞环无法在缸套工作面形成压力油膜，而用注油泵或曲轴溅射的方式，也只能在活塞环和气缸套摩擦表面上形成一层边界膜。因此，活塞环和气缸套是属于边界摩擦形式。

活塞环和气缸套的摩擦磨损是复杂的，影响因素很多，在摩擦过程中，要保持一层边界膜，还是十分困难的。为了使讨论深入，我们仅就第一道活塞环和气缸套的摩擦磨损作一深入分析。

(1) 载荷 作用在活塞环、气缸套的法向载荷有活塞环弹力和燃气作用力。

对于每台柴油机来说，活塞环弹力是定值，它使活塞环紧贴气缸壁，以保持密封作用。但是，在摩擦磨损过程中，随着活塞环和气缸套工作面磨损的增加，活塞环弹力就会逐步丧失。实践证明，活塞环弹力过小，在摩擦表面间容易出现窜气，把滑油烧掉；弹力过大，容易把吸附在两摩擦表面上的滑油刮去。

对于每台柴油机来说，燃气作用力也是一定的，一般都以爆发压力和平均指示压力来表示。例如，Sulzer RND68M 型柴油机气缸爆发压力为9.6兆帕斯卡，平均有效压力1.256兆帕斯卡。但是，就每个冲程来说，燃气作用力是变化的。当活塞上死点喷油燃烧时，燃气压力很高，但是，在燃气膨胀做功过程中，随着活塞向下移动，燃气压力越来越小，在下死点时压力降到最低值。

燃气进入活塞环槽内，作用在活塞环背面（内表面）上，使活塞环压向气缸壁上。由于燃气进入环槽时的减压结果，作用在第一道活塞环上的压力为燃气压力的73%左右，而第二道活塞环上的压力则下降更多。显然，作用在活塞环背面上的燃气作用力随燃气压力的变化而变化，同样，活塞在上死点（上止点）时第一道活塞环最大，面下死点时第一道活塞环最小。

因此，当活塞处于上死点时，第一道活塞环上的法向载荷最大，往往超过边界膜强度，加剧磨损。法向载荷的变化如图1-7a所示。

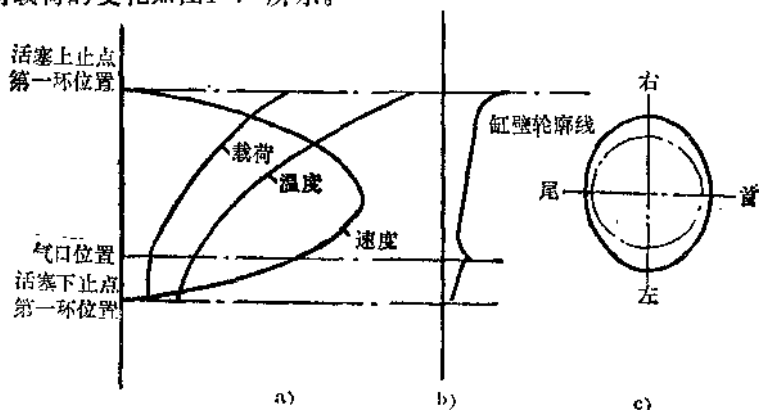


图1-7 活塞环、气缸套运动状态示意图

a) 载荷、温度、速度变化曲线；b) 磨损后，缸壁纵截面轮廓线图；c) 磨损后，缸壁横截面轮廓线图

(2)温度 船用柴油机燃烧室产生的热量,一部分传给气缸套和活塞,并由冷却水带走,而活塞环上的热量一部分传给气缸套,而大部分传给活塞。所以,控制活塞和气缸套冷却液温度就能控制活塞环和气缸套温度。例如, SulzerRD-90 型柴油机活塞上死点时第一道活塞环的最高温度 180°C ,而与活塞环相对应的缸套处最高温度为 220°C 。

温度过高,滑油氧化严重,结炭增加,滑油粘度降低,气缸套温度超过 200°C 后,油膜必然遭到破坏,摩擦形式也就由边界摩擦转变为半干摩擦。如果柴油机冷却水温度过高,超负荷运行以及排气温度过高,都能使活塞环和气缸套温度增高,使润滑条件恶化,磨损加剧。

气缸套的温度变化如图1-7a 曲线所示。

(3)速度 活塞到达上、下死点时,活塞环速度为零,中间位置时,活塞环速度最大。如图1-7a 曲线所示。

活塞环运动速度的变化,对润滑的状态影响不大。而上下死点时,由于运动方向的改变而引起速率的较大变化,使活塞环与环槽上下平面发生撞击,而对活塞环与气缸套的摩擦磨损影响不大。

(4)滑油 润滑油性能好坏直接影响活塞环、气缸套的摩擦磨损。不仅要求润滑油具有一定的油性,能迅速湿润缸套工作表面,而且要求具有足够的化学安定性、抗氧化和中和酸的能力,低的残炭值,机械杂质和灰分少。如使用含硫量较高的燃油,一般选用碱性润滑油以中和酸性,对降低腐油磨损比较有效。所以,大型低速柴油机在燃用重油或劣质油时,都选用碱性润滑油。为了减少高温磨损,往往在滑油中添加二硫化铝,以便于建立反应膜。此外,滑油的污染对气缸套的磨损影响突出。当滑油中混入机械杂质后,必然增加气缸套的磨粒磨损。因此,必须认真滤清润滑油。

(5)燃油 燃油含有机机械杂质和灰分,会污染润滑油;燃烧不良时,轻者污染滑油,重者将活塞环卡在环槽内,破坏活塞环在环槽内的自由滑动和转动。燃油中的硫,燃烧后生成 SO_2 和 SO_3 ,在缸壁温度低于露点时,形成硫酸腐蚀,在柴油机低负荷和启动时尤为严重。高硫燃油燃烧时形成较多的固体颗粒,这是因为硫的氧化物促使燃油和滑油中的碳氢化合物加速骤合,浓缩在炭垢中形成坚硬物,如硫从 0.1% 增到 1.5% 时,炭垢的密度增加15倍。这样,必然增加磨粒磨损。

(6)材料 柴油机活塞环和气缸套常用铸铁制造,因为铸铁中含有石墨,易被剪切并涂抹到摩擦表面上,作为润滑剂。石墨从基体中离开后,铸铁表面出现微形空洞,好似一些储油罐,这对于边界摩擦特别有利。

2. 磨损形式讨论

活塞环、气缸套摩擦磨损以后,活塞环径向厚度减薄,开口增大;气缸套直径扩大,缸壁厚度减薄。下面着重讨论气缸套的磨损形式。

(1)纵截面 沿气缸套中心线方向,按缸套磨损值划出一条曲线。这条曲线实际上代表经过一定运转时间后缸套直径的扩大规律和缸套内表面纵截面形状。

图1-8a 为正常磨损图形,其特点是气缸套最大磨损区在活塞上死点第一道活塞环位置附近。这是因为:在正常工作条件下,活塞上死点时第一道活塞环处载荷大,温度高,油膜极易破坏,经常处于半干摩擦状态,形成局部高温,摩擦表面出现粘着现象。而且,第一道活塞环处的结炭、机械杂质、硫酸腐蚀也较大。实践证明,第一道活塞环处含酸量较活塞下部多四倍。在油膜破坏的情况下,硫酸腐蚀加剧。此外,空气中的灰尘、燃油的机械杂质、

燃烧后的积炭和腐蚀产物，都能形成磨粒磨损，加剧磨损。

以后，随着活塞向下运动，载荷和温度迅速下降，腐蚀、结炭等影响减少，气缸套磨损减少。对于二冲程柴油机来说，由于排气口筋部和排气口四周几何形状复杂，壁厚不均，热变形大，加上进、排气的冲刷，油膜容易破坏，经常产生粘着磨损。还有气口堆积杂质的影响，气口部位的磨损又增加。

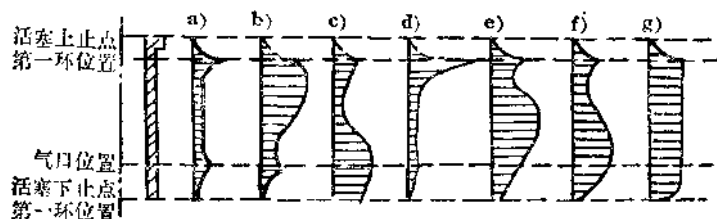


图1-8 气缸套沿中心线直径扩大规律

图1-8b到g则是非正常磨损图形。

b和c是典型的磨粒磨损。b为柴油机从上部大量吸入尘埃或严重积炭后，产生严重的磨粒磨损，磨损最大值接近活塞上死点时第一道活塞环处；c为润滑油中含有硬质颗粒造成的。润滑油自下而上布油，硬质颗粒较重，残留在气缸套下部，造成磨粒磨损，下部磨损大。

e和f是典型的腐蚀磨损。e的形成是由于燃油中含硫量高或柴油机低温启动频繁，使活塞上死点时第一道活塞环处气缸套腐蚀磨损严重，一般磨损量为正常磨损量的1~2倍。腐蚀产物脱落后，在气缸套中部又形成磨粒磨损，磨损量为正常磨损的4~6倍。所以，中部出现桶形；f为冷却水温过低，在气缸套下部形成低温腐蚀，故磨损最大值又向下移动。

d为粘着磨损图形。在活塞上死点时第一道活塞环处，产生严重的粘着磨损，甚至出现直线拉痕或者粗大的拉伤。

g是b和c两图形的综合，说明在气缸套上部和下部工作面上都出现磨粒磨损。

(2)横截面 从横截面看，气缸套磨损成椭圆形。对于筒形活塞式柴油机，由于侧推力的影响，在垂直于曲轴轴线方向的磨损较严重；对于十字头式低速柴油机，则往往由于活塞运动装置对中不好引起偏磨。如图1-7c所示。

二、曲轴和轴瓦的摩擦磨损

1. 摩擦磨损影响因素分析

曲轴主轴颈和主轴承是一对运动副，曲柄销颈和连杆大端轴承则是另一对运动副。当曲轴作回转运动时，主轴颈就在静止不动的主轴承内作回转运动，在轴瓦上形成楔形油膜，轴承圆周和轴向长度上的油压分布曲线如图1-9所示。显然，油膜厚度受载荷、速度、润滑油质量和轴承材料的影响。

对于另一对运动副，曲柄销颈则在摆动的连杆大端轴承内作回转运动，这时，

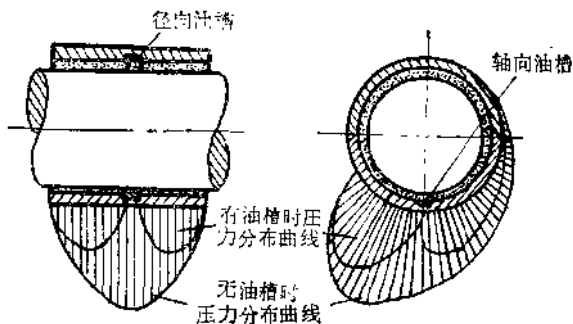


图1-9 轴承油压分布曲线图

在轴瓦上很难形成楔形油膜。所以，曲柄销和连杆轴承是边界摩擦，也受载荷、速度、润滑油质量和轴承材料的影响。下面，依次作一具体分析。

(1) 载荷 在柴油机运行过程中，曲轴不仅承受着燃气压力的作用，还受着活塞连杆装置惯性力的影响。对四冲程柴油机来说，燃气压力由连杆传至曲柄销颈外侧（离曲轴轴线较远的一侧），载荷比较大，但就整个作用时间来说，是比较短暂的。而其它三个冲程中，连杆大端所产生的惯性离心力却起着主要作用，它有迫使连杆脱离曲柄销颈的倾向，并经常地压向曲柄销的内侧（离曲轴轴线较近的一侧）。由于作用时间长，摩擦功也大，曲柄销颈内侧磨损比外侧大些。对二冲程柴油机来说，则与四冲程柴油机相反，即曲柄销外侧比内侧的磨损大些。

至于主轴颈和主轴承的受力情况，要复杂得多。在多缸发动机里，主轴承的数目很多，例如一台六缸柴油机就有七个主轴承，每个主轴承上的载荷与各缸燃气压力、活塞连杆装置惯性力和曲轴本身重量有关，其中燃气压力和活塞连杆装置惯性力都是变化的。为了简化起见，可以认为曲轴是弹性体，主轴承负荷只与前后相邻气缸有关。

就一个主轴颈来说，在回转过程中，载荷的大小和方向都在周期性地发生变化。因此，油膜厚度也将随轴承内主轴颈轴线位置的变化而变化。油膜厚度不能保持恒定，而且最小油膜厚度区域内，局部压力达到很高值，甚至为轴承平均比压的6~10倍。所以，如果载荷过大，油膜就破坏了，轴和轴瓦就直接接触。

(2) 速度 上而已说过，曲轴回转时，在主轴承内产生油膜。一般来说，转速越高，越容易形成楔形油膜，但转速高，摩擦功也大，轴承内的温度升高，润滑油粘度下降，油膜破坏；转速太低，特别是低速重载时，轴承内也难于形成油膜，往往处于边界润滑。这时，主轴颈和主轴承是边界摩擦；当柴油机停车后起动时，由于停车时主轴颈和主轴承内润滑油被挤出，因此，在起动瞬间主轴颈和主轴承就处于半干摩擦状态。所以，频繁停车、启动，使主轴承磨损加快。

连杆轴承和曲柄销颈原为边界摩擦，当转速过高，摩擦功大，发热量大，容易使边界膜破坏。现代高速柴油机轴瓦表面与曲柄销之间的相对速度已达10米/秒以上，由于高负荷和高速的结果，轴承很容易发热和损坏。

轴承内产生的热量主要由润滑油带走。所以，如果在柴油机运行过程中，中断滑油供应，则在极短时间内就会发生轴瓦合金材料融化事故。

(3) 润滑和供油 轴承润滑油也像气缸油一样，除具有一定粘度外，还要有足够的化学安定性、抗氧化和中和酸的能力，机械杂质和灰分要少，以利于建立压力油膜和减少磨损。

润滑油是通过轴承上的油孔和油槽流向油隙的，但是，如果在压力区开有油楔，轴承的承载能力仅为相同面积的无油槽轴承承载能力的四分之一，故载荷较大的连杆大端轴承上瓦和主轴承下瓦最好不开油槽。

轴承上的油孔与油槽部位，油槽的深度与宽度比，以及油孔和油槽过渡圆角都对滑油的供给和油膜压力的分布产生极大的影响，要注意按机器说明书要求加工装配，千万不要马虎大意。

(4) 材料 轴承材料要有较高的承载能力和疲劳强度，在工作温度（一般为100~150℃）下有足够的热强度与热硬度，并且柴油机曲轴价格昂贵，因此要求轴承硬度低，可不伤轴，软金属还很易变形，从而使轴变形或不同轴线而引起的局部重载得以重新分布，并能吸收外来磨粒。即使在润滑剂全部失漏，由于轴承熔点低，也能短期内避免轴的损坏。现在，大型

低速柴油机轴承常采用锡基白合金，而中速和高速大功率柴油机则采用铜铅合金、铅青铜、锡青铜和铝青铜。

2. 磨损形式

轴颈和轴承摩擦磨损后，轴颈横截面是椭圆形，纵截面是锥形；轴承也出现磨损、擦伤和熔化。这时，装配间隙（油隙）扩大。

主轴承下瓦和连杆大端轴承上瓦出现较大的磨损，是属于正常磨损。因为即使在正常工作条件下，也要产生较大的磨损。

单边磨损、擦伤、疲劳剥落、熔化等形式都是非正常磨损。在粘着磨损时，就会出现涂抹，轴瓦合金层擦伤、撕裂，严重时熔化和相互咬死；磨粒磨损时，由于轴承油隙中侵入硬质颗粒，在工作面旋转方向上拉出沟槽或无数细密刻痕，有时在主要承载区工作表面上，在旋转方向上有大面积的细微擦痕，或在油孔、油槽边缘产生冲刷痕迹。疲劳磨损是合金层过载、过热和合金层内夹有杂物，使合金层疲劳强度降低，产生微细裂纹，然后，在应力的重复作用下，裂纹向深处发展，达到合金层和钢背的接合面附近，再沿中间面的平行方面蔓延，与其它裂纹汇合成片状剥落。腐蚀磨损使轴瓦工作表面上出现针状小孔，或因穴蚀而在表面上出现点状或滴状斑点，加速轴承破坏。

当然，不正常磨损还由于轴颈和轴承加工、装配和安装质量不好，轴承刚性不足，机座变形等原因造成的。根据统计，轴承故障的产生，44.9%是由于污物引起的；13.4%是由于安装不良；12.7%是由于对中不佳，10.8%是由于润滑不良，9.5%是由于过载引起的。而且，润滑油中断供应，或油温过高，往往酿成轴瓦熔化的重大事故。这是应该特别加以注意的。

第五节 提高零件耐磨性的主要途径

运动副零件摩擦磨损影响因素很多，因此，为了延长零件使用寿命，必须从零件的结构和设计、加工和装配质量、运转管理和维护保养等方面着手解决。下面着重讨论提高零件耐磨性的一些主要途径。

一、摩擦表面的光洁度和几何精度

一般说来，表面光洁度越低，表面就越粗糙，就越容易磨损。但是，若表面光洁度太高，表面不能贮存润滑油，或分子吸引力加强，也会加速磨损。

零件几何精度不高，例如具有较大的圆柱度、圆度等误差，也会影响配合间隙和改变配合性质，影响磨损，引起不正常的运转。

因此，我们要注意零件表面光洁度和几何精度。

二、硬度和相溶性

在选择配合件的材料时，要注意硬度和相溶性问题。一般说来，零件磨损是与载荷大小成正比，当载荷超过某一极限值时，零件将由轻微磨损转变为强烈磨损。这个极限值是：

$$\bar{W} = \frac{H}{3} \cdot A_s$$

式中： $\bar{W}$ ——载荷；

A_a ——表观接触面积,

H ——硬度。

因此,当作用在零件上的载荷比较大时,就应该选用硬度较高的材料。金属材料的硬度与温度密切相关,温度超过一定值后,硬度就会下降,因此,在高温条件下工作的零件必须采用红硬性好的材料,例如,喷油咀针伐材料最好采用高速钢,因为高速钢在 600°C 之内,可保持有较高的表面硬度。

在选择配合副材料时,还必须具有低的相溶性 and 低的摩擦系数。相溶性是评定金属在固态时互相溶解的量度,如果相溶性高,则两个金属互相固溶,摩擦系数高,磨损大。所以,两个配合材料切忌采用相同材料,以避免产生较高的磨损。

三、表面层的耐磨性

摩擦磨损都是在零件表面层进行的。因此,提高表面层的耐磨性,特别是抗咬合性能,是近年来提高零件耐磨性的重要途径。

提高表面层耐磨性,传统的办法是采用热处理表面淬火,表面渗碳、渗氮、渗硫、渗硼和碳氮共渗,以提高表层硬度,改善金相结构,提高耐磨性。近年来,则采用电镀、喷镀、化学镀覆的办法,在表面镀覆一层铬、钼等硬质合金,或者采用镀层与热处理扩散相结合的综合办法,以增加表面层硬度,改善贮油结构,并使镀层与基体材料结合好,提高零件的耐磨性、耐疲劳性和耐腐蚀性能。

1. 电镀层

例如,电镀铬层。铬层硬度高,摩擦系数小,又有较高的耐磨和耐腐蚀性能,零件耐磨性可提高 $3 \sim 6$ 倍。松孔镀铬层有凹坑和沟纹,改善了润滑性能。

松孔镀铬层的耐磨性还取决于沟纹网的密度、宽度和深度。宽度深度太小,分布稀疏,达不到改善润滑的条件,网纹太密太宽,承压面积减少,导热性差。实践证明,网纹宽度小于 0.06 毫米,深度 $0.04 \sim 0.09$ 毫米,孔隙率为 $25 \sim 35\%$ 较好。铬层表面图形如图1-10所示。

如果镀铬层与基体材料结合不紧密,铬颗粒脱落,造成磨粒磨损,将加快配合件磨损(详见第四章)。

2. 电镀——低温扩散处理

例如,锡、铟等软金属镀层经低温扩散处理后,不仅保持锡和铟抗粘着和抗咬合特性,而且形成硬度较高的金属间化合物,并与基体金属牢固结合。锡镀到钢铁零件上,并经 $400 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 氮气中扩散,就形成 FeSn_2 、 FeSn 、 Fe_3Sn 和 Fe_3SnC 二元或三元化合物。经过处理过的工具钢,在载荷为 24 千牛顿仍未咬合,摩擦系数为 $0.04 \sim 0.05$;相反,经过正火的工具钢,加载到 7.5 千牛顿时就开始咬合,这时摩擦系数剧增。

铜锡合金镀到铸铁零件后,再在 $580 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 氮气中扩散处理,表面硬度高,锡基(锡和铜)合金镀到黄铜、锡青铜和铝青铜零件,加热到 $400 \sim 450^{\circ}\text{C}$ 进行扩散热处理,表层最外层

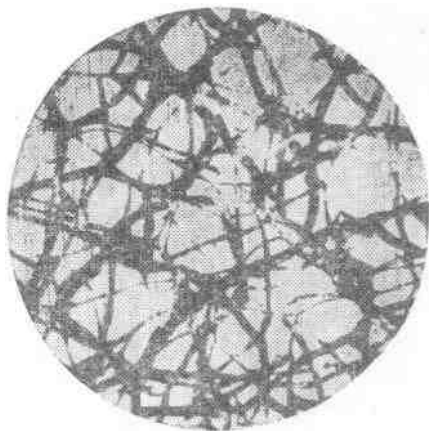


图1-10 松孔镀铬层 (65X)
镀层厚 0.27 毫米,松孔深 0.20 毫米,孔隙率 40% 。

有一很薄的抗咬合层，磨去后能再生。

白合金、铜铅合金和铅基合金等轴承材料，也可镀覆一层铟等软金属。铅基合金电镀铟合金后，再在 $120\sim 150^{\circ}\text{C}$ 温度下扩散处理，形成铟的金属间化合物；铜铅合金镀一层 $0.02\sim 0.04$ 毫米的铅锡、铅铟或白合金后，构成以铜铅合金为基体的三层合金轴瓦材料，以提高抗咬合能力。

3. 零件经化学镀镍磷后，再进行低温扩散热处理

镍磷合金镀层中析出微细的 Ni_3P 结晶弥散在 $\text{Ni}-\text{P}$ 固溶体中，硬度可提高到 1000HV 。

4. 离子扩渗层

利用电场力，将碳、氮等元素扩散到金属表层内。经离子扩渗处理后的化合层包括白亮层和扩散层，交界处呈犬牙交错的复杂形态。如图 1-11 所示。由于形成金属间化合物 $\text{Fe}_2\text{-}_3\text{N}$ ，化合层硬度可提高到 $1100\text{HV}_{0.1}$ 。

例如，铸铁 HT24-44 经氮、碳、钛三元共渗后，白亮层厚度为 $9.5\sim 32.5$ 微米，扩散层厚度为 $0.22\sim 0.34$ 毫米，在干摩擦试验时，经离子扩散处理的铸铁耐磨性比未经处理的铸铁高 100 倍以上，扩渗层耐疲劳好，以及电极电位高，耐腐蚀性能好，可广泛应用于船舶机器零件上。

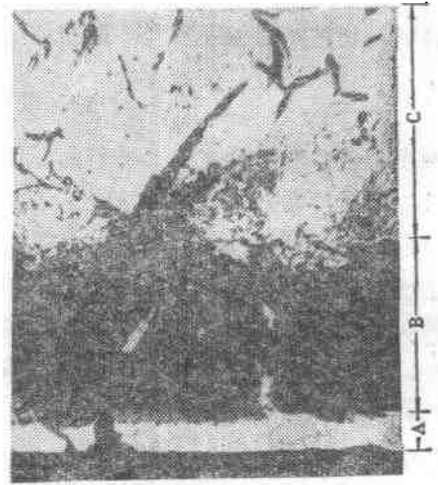


图1-11 铸铁氮化层 (200X)
A-白亮层；B-扩散层；C-基体金属