

金属表面摩擦破坏实质

〔苏〕E.A. 马尔钦柯 著

何世禹 译 高彩桥 校

国防工业出版社

金属表面摩擦破坏实质

[苏] E.A.马尔钦柯 著

何世禹 译

高彩桥 校

国防工业出版社

内 容 简 介

本书阐述了磨损的疲劳学说。简要地描述了磨损过程，磨损产物的形成机理，在多次循环载荷作用下金属的破坏动力学；分析了表面层组织及性能的特性；并对与磨损有关的组织变化作出了评价。

本书可供从事摩擦构件的设计、制造与研究的科学工作者、工程技术人员使用，也可供有关专业的大专院校师生参考。

О ПРОЦЕССЕ РАЗРУШЕНИЯ
ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ ПРИ ТРЕНИИ

Е.А.МАРЧЕНКО

НАУКА 1979

金属表面摩擦破坏实质

〔苏〕Е. А. 马尔钦柯 著

何世禹 译

高彩桥 校

国防工业出版社出版发行

（北京市海淀区紫竹院南路 23 号）

（邮政编码 100044）

新华书店经售

新时代出版社印刷厂印刷

787 × 1092 1/32 印张 4 1/2 94 千字

1990 年 8 月第一版 1990 年 8 月第一次印刷 印数：0,001—2,065 册

ISBN 7-1 18-00205-4/TH14 定价：2.35 元

译者的话

摩擦磨损对机械零件工作的可靠性有重要的作用，对国民经济的发展也有很大的影响。据不完全统计，我国冶金机械、电力机械和建材机械等部门，每年因摩擦磨损要消耗一百五十万吨金属材料，相应的要消耗大量的能源。为了加快四个现代化的步伐应当努力节约能源与资源，克服摩擦磨损所造成的浪费已成为我们科学工作者、工程技术人员的重要任务。

苏联学者马尔钦柯所著《金属表面摩擦破坏实质》一书对摩擦磨损理论，尤其是疲劳理论做了较详细的说明。他所用的研究方法对我们的研究工作也是有启发的。书中对摩擦磨损表面及磨损产物的分析比较简明扼要。作者不但介绍了象铁谱术这样的专门研究方法，还用许多物理方法（如电阻法、X光法等）为进一步深入探讨磨损机理提供了一些新的渠道。

全书由何世禹同志翻译。高彩桥副教授对全书进行了校对。由于我们的水平有限，不妥之处在所难免，请同志们批评指正。

在翻译过程中，张吉人副教授也给予了指导，在此表示谢意。

前 言

磨损科学的现状明显地说明，要想创立同磨损作斗争的有效方法，不了解这个现象的机理是不可能的。对磨损机理的综合研究，既包括对摩擦接触时所发生的变化研究，也包括对磨屑的分析研究。这些研究指出，在各式各样的摩擦条件下，可能见到某些共同点，其中之一是关于表面层破坏的疲劳本质问题。疲劳破坏被认为是循环载荷多次作用的结果，这种破坏实际发生在各种形式的摩擦——接触作用中。可以将磨损过程理解为低周疲劳，并把疲劳本质的概念扩展到像粘着磨损那样传统的磨损形式中去。在第一次摩擦会议的材料中指出，如果不仅考虑在接触摩擦过程所发生的那些变化，而且还考虑那些因表面预先机械加工给材料带来的变化，那么讨论磨损的疲劳机理是完全自然的。

现有的工作对分析各种各样摩擦条件下的磨损过程是不够的，但在工作中从疲劳观点分析了摩擦表面层组织变化的规律性，并且对一般条件下工作的金属材料进行了分析。在作者看来，这样的分析是适宜的和现实的，因为它可以扩展为众所周知的“非疲劳”磨损形式和存在着分析关系的磨损形式，而这种分析关系是以疲劳磨损机理的概念为基础的，同时还可能对摩擦副各设计时期的耐磨性进行评价。而且在选择摩擦副材料、计算材料的疲劳强度及持久强度时，也是由疲劳磨损的物理基础所决定的。

科学技术博士、教授、И. В. 克拉盖尔斯基 (И. В.

Крагельский) 和国立机械制造科学研究所摩擦理论实验室的同事们参加并审议了这一工作，作者对他们表示感谢，并愿意接受读者对本书提出宝贵意见和希望。

目 录

第一章 磨损过程的一般特征	1
第一节 现代技术中的摩擦与磨损	1
第二节 摩擦接触的机械和物理特征	2
第三节 磨损时的表面状态	8
第四节 磨损的分类	9
第五节 磨损的疲劳理论	16
第二章 多次循环作用下金属和合金破坏动力学	21
第一节 表面层的性能和组织特性	21
第二节 摩擦时组织变化的某些规律	27
第三节 在循环载荷条件下, 金属和合金的破坏动力学及组织 变化	34
第三章 磨损疲劳本质的物理基础	40
第一节 研究组织变化规律性的方法	40
第二节 塑性变形沿深度的分布	48
第三节 组织变化的周期特性——磨损疲劳本质的物理证实	52
第四节 摩擦条件对组织变化数量特征的影响	67
第五节 摩擦及整体循环载荷作用下破坏机理的共性	76
第六节 在接触摩擦作用下组织变化规律实用性	83
第四章 磨损产物的研究	93
第一节 铁谱术——未来的研究方法	93

第二节	磨屑的尺寸和形状	95
第三节	磨屑的成分与性能	98
第四节	磨屑在磨损分类和监督摩擦副工作中的 作用	102
第五章	磨屑形成的机构	105
第一节	薄层状磨屑	105
第二节	粘着磨损时的磨屑	112
第三节	球状磨屑	115
第四节	往复运动的磨屑	118
第五节	疲劳在磨屑形成的作用	119
结 论		121
附 录	部分法定计量单位与公制单位换算 关系	126
参考文献		127

第一章 磨损过程的一般特征

第一节 现代技术中的摩擦与磨损

恩格斯在《自然辩证法》中写道：“摩擦是物体运动的障碍，几百年来都被看作消灭物体运动即消灭动能的东西”。摩擦问题，换句话说，运动物体与另外的物体或者与周围介质作用使能量散失的问题，在人类技术发展的全部阶段中都存在着^(1,2)。同运输载重量、运输工具的数量和速度的增加相联系的摩擦，已成为节约资源和能源以及保护周围环境比较普遍的问题之一。根据某些判断，人类所利用的总能量的 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{3}$ 是在摩擦中消耗掉了⁽²⁾。

摩擦几乎总是伴随着磨损，并逐渐地使机械系统失去效能。按照文献〔3〕的意见，导致构件失效的原因有三个——陈旧、断裂和磨损。而在人类现代物质生活中，对于在现代人类社会生活中有重要地位的机械系统，磨损是最危险的。例如，汽车可能陈旧，也可能因故障而修理，但它失效的最广泛原因是其构件的磨损。根据不完全统计，同磨损有关的经济损失的数量是巨大的。例如，仅在英国，每年由于磨损就损失了七亿英镑以上⁽⁴⁾。在苏联实际使用的机械设备表明，大部分机器失去自己的工作能力不是因为断裂，而是个别零件表面磨损的结果。有60~70%汽车发动机进行修理的原因是轴承、轴以及其他零件的磨损。每年修理掘土机所消耗的经费比生产新的掘土机大1.3倍⁽⁵⁾。构件的磨损是材料

和能量损失的重要渠道之一，因此，目前人们非常重视创立同磨损斗争的有效方法。

摩擦和磨损的有益作用尽管很重要，但不易被觉察到。摩擦对于人类在地球上运动是不可缺少的。为了使运输工具安全可靠地工作，必须使机轮与道路表面之间有足够摩擦，而且制动设备还要不停的工作。借助于不同粒度的磨料加工不同光洁度等级的表面，就是利用磨损现象。用铅笔进行各种情况记录的质量取决于磨损过程。而切削工具的自刃磨也是磨损的有益运用⁽³⁾。

长时间以来，磨损过程对于评定机械工作能力没有直接的意义。因此，同磨损现象进行斗争问题的研究开展得比较晚。

最近，在研究磨损机理的问题上发展得很快，这不仅是因为减少由磨损造成的损失是必须的，而且也是为了保证在特别紧要条件下或者存在限定间隙的情况下工件能可靠地工作，并可为预测摩擦副的寿命提供有效的方法。摩擦接触的物理和机械特征以及摩擦过程中在接触区所发生的变化，对于了解磨损机理有重要的作用。

第二节 摩擦接触的机械和物理特征

接触的不连续性。众所周知，由于实际表面的波纹度和粗糙度，当两个物体接触时，总是不连续的。根据这种情况，接触面可分为三种不同的形式：名义的，轮廓的，实际的⁽⁶⁾。实际接触面积的大小对于评定应力和变形以及摩擦热源的尺寸是重要的，也就是说，通过这些参数可以确定摩擦表面的变化与破坏。实际接触面积的确定与表面的粗糙度有明显地联系，这个联系的主要研究结果已在文献(6-9)中叙述。实

实际的接触面积约是轮廓面积（或者是没有波纹度的名义面积）的1%^(6,10)。

接触点的尺寸。单个接触点的直径取决于接触面的个别不平度的几何外形，它与载荷的大小关系不大。按照文献(6)，接触点的直径变化与载荷的关系是 $1/2v$ ，这里 v 是支撑表面近似曲线的参数。如果 $v=2$ 时，接触面积增加十倍，而接触点的直径相应增加1.7倍。对于弹性接触，这个关系有些不同，但是接触点直径的变化还是不大的，在实际接触面积增加十倍时，其直径相应增加1.4倍。因此可以认为，在较大的载荷时，接触面积的增加是以接触点数量增加为条件的，而不是改变接触点的直径^(6,11)。在文献(12)中，作者已利用加工薄的碳膜的方法，确定典型的电接触器K-200-Д的单个接触点的直径尺寸和建立它的分布曲线。这个曲线具有高斯曲线的形式。对于选定的接触试验条件，接触点直径的最大可能尺寸是 $3\sim 4\mu\text{m}$ 。这个尺寸波动范围在 $1\sim 8\mu\text{m}$ 之间。在其他条件下，单个接触点直径的近似值载于文献(9,10,13)中。

实际压力。由于外加载荷分布在真实接触面上，使这些点上的真实压力可能达到很大的值。实际接触面积的计算^(10,14)和分析形成白亮层的必须条件表明，真实接触压力值为 $(2\sim 3)\times 10^4\text{ kgf/cm}^2$ 是完全符合实际的，在某些情况下可能达到材料的理论强度 $2\times 10^6\text{ kgf/cm}^2$ ⁽¹⁰⁾。按照文献(9)介绍，不管总载荷是多少，在实际接触点上实加的单位压力等于材料理论强度的 $1/5\sim 1/10$ 。

残余变形。在摩擦时由于受到正应力和切应力的同时作用，使接触材料的表面处于复杂的应力状态。在这些条件下，塑性变形可能达到很大的值，甚至脆性的物体也表现出很高

的塑性⁽¹⁶⁾。由于有相当大的实际压力值，在极微小名义载荷作用下，实际接触的地方就可能发生残余变形。

在实际接触的地方，由于法向载荷的增加，残余变形区的增加是通过接触点数量的增加实现的。除此而外，由于接触前后的切应力会改变接触时的应力分布，使处于弹性接触的接触面也发生残余变形。另外按照文献〔17〕，在摩擦时外力所做的全部功（从92%到100%）几乎均变成与变形有关的热量。

变形的特征。摩擦接触作用的特征是摩擦副元件的多次加载（齿轮传动，滚动和滑动轴承，制动装置，轮，滚子等等）。在每经过一次作用后，每一个不平表面的微峰都是追赶在自己前面的变形材料的波浪，使前面的被压缩，后面的被拉伸，也就是在接触区其变形符号发生变化，关于这个问题的首批试验载于文献〔18〕中。

变形区的深度。材料变化区的深度是由摩擦条件决定的。在弹性压缩变形时，它不超过 $3a$ （ a ——接触宽度的一半），也就是实际可能的变形区深度等于接触点的直径。在这种情况下，最大剪切应力在 $0.47a$ 处。对于圆柱体，在 $f=0.3$ 时，沿着平面滑动的最大切应力产生在接触表面⁽⁶⁾。

为了确定在摩擦条件下塑性变形区产生的深度，广泛地应用下面的公式。

$$t = \sqrt{P/2\sigma_s} \quad (1.1)$$

P — 法向载荷；

σ_s — 屈服极限。

这个公式是在轧制钢件的轧辊上获得的⁽¹⁹⁾。根据这个公式，塑性变形区的扩展深度比接触点的直径要大一些⁽⁶⁾。上述关系的不足之处是没有把在塑性变形区深度中的摩擦系

数考虑进去。而在文献(20)中考虑了这个情况,其公式如下:

$$\Delta = R (\sqrt{2h/R + (h/R)^2} - h/R), \quad (1.2)$$

$$p = 2kR \frac{(2\mu + 1.57\sqrt{2h/R + (h/R)^2})\sqrt{2h/R + (h/R)^2}}{1 - h/R}, \quad (1.3)$$

k — 材料的塑性常数, $k = \sigma_s / \sqrt{3}$;

h/R — 相对的作用深度;

μ — 一级近似摩擦系数 ($0 \leq \mu \leq 0.5$);

p — 在销子单位长度上的载荷;

Δ — 塑性变形的深度;

公式(1.2), (1.3) 是在研究刚性圆柱体沿着变形的平面滑动时得到的。

塑性变形沿深度的分布。在摩擦表面下塑性变形的分布特征有两种曲线形式: 在表面最大或者在某一个深度下最大 (图 1-1)。

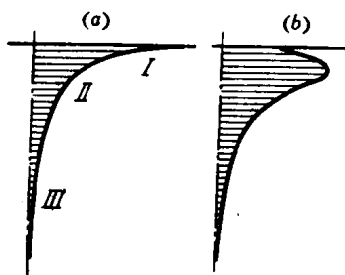


图 1-1 塑性变形沿深度的分布

在大多数情况下, 塑性变形程度随着离表面的距离增加而减少, 并且在摩擦表面以下整个变形层可以分为三个区⁽²¹⁾ (图 1-1a):

I——金属最大变形区，它在摩擦表面以下，这个区的深度不超过整个变形区的10%。这个区的特点，是沿着滑移平面金属表现出强烈地变形，并沿着深度存在着相当大的变形梯度。

II——过渡区，它占整个变形层厚度的20~30%。在这个区内变形梯度比第一区小一些，而且变形本身有比较均匀的特点。

III——这个区的变形分布几乎成直线规律。而它们的最大值是摩擦表面整个变形值的10~15%。这个区伸展的长度可达整个变形深度的60~70%。

对于脆性和高弹性材料，表面区是最危险的，在这些材料中，拉伸时的强度比压缩时的强度低($\sigma_{\text{拉}}/\sigma_{\text{压}} \rightarrow 0$)^(13, 22)。

但是，正如文献(23)分析指出的那样，除了表面危险区之外，还存在着深处危险区(图1-1b)，这个危险区随着摩擦力的增加而向表面移动。深处危险区是在研究工业纯金属——铜和铝的表面性能时发现的⁽²⁴⁾。在严酷摩擦条件下，当有相当大的热量从表面放出时，最初的放热过程有重要的作用，并且在显微硬度的分布曲线上表明沿着深度也有明显的最大值。作者用它来表征材料的应力状态。这样一来，接触材料物理-机械性能与摩擦条件共同决定了塑性变形沿深度的分布特征。塑性变形最大的地点决定了第一个裂纹发生的地方：在表面或者在表面下的一定距离。

在不大的滑动速度下，可能忽视接触处温度的提高以及润滑对塑性变形沿深度分布特征的巨大影响⁽²⁵⁾。

相互作用的两重性本质是在相互作用的两个物体的分子中，使接近的两个物体的分子之间发生了结合以及在相互作用的两个物体被压缩表面的机械作用中表现出来。

五种摩擦破坏形式中的三种：1)材料的弹性挤压，2)材料的塑性挤压，3)显微切削——它是发生在机械作用时。而另两种：4)坚硬物体覆盖的表面膜的胶合破坏，5)表面分子胶合并伴随着在一定深度上的材料剥落。

在实际接触区的摩擦结合可以用几何的观点加以描述，也可以用材料的力学状态加以描述。用几何观点来描述摩擦结合时，采用了半球形的积屑瘤模型，此模型的表面有一定的不平度，而且按照它们的高度，采用与实物相近的条件加以排列。球有相同的半径 R ，它等于实际表面微观不平度的曲率半径的平均值。摩擦结合的几何特征可用摩擦深度或者压缩后的单一不平度值与它的半径之比 (h/R) 来表示，还可用它来区别接触区的材料机械状态。这个特征是摩擦结合的物理和机械特征的总和，这个特征是基体材料分子结合的剪切强度和材料屈服极限的比 (τ/σ_s)，通过它可以确定内外摩擦之间的界限。在第一种情况下，摩擦结合的破坏发生在两个不同物体的表面或者是它们的表面覆盖膜中，在这种情况下，不涉及基体材料层。在外摩擦向内摩擦转变时，摩擦结合比某一物体材料的强度大，因此使基体材料破坏并发生在一定的深度上。

这里给出区分三种接触形式的判据⁽⁶⁾：

当 $h/R \leq 2.4 (c \sigma_s / E)^2$ —— 弹性接触；

当 $h/R \geq 2.4 (c \sigma_s / E)^2$ —— 塑性接触；

当 $h/R \geq 0.5 (1 \sim 2\tau/\sigma_s)$ —— 显微切削。

物理-力学特征 (τ/σ_s) 确定摩擦结合的两破坏形式：

1) 沿着两个物体的表面，或者沿着这两个物体的覆盖膜；2) 在基体金属的深处（从外摩擦向内摩擦转变）⁽⁹⁾。

提出的摩擦接触特征对于定量评定磨损强度是必须的，

其中也包括疲劳磨损形式的磨损强度。

第三节 磨损时的表面状态

由于摩擦构件材料的不同,工作条件也有差异,使接触处发生摩擦过程的种类是多种多样的。而且磨损强度的变化范围也是很宽的: $10^{-2} \sim 10^{-12}$ 。以上这些都说明,系统研究表面破坏的问题是很复杂的,并且工作量也很大。在这些工作中研究摩擦时表面层组织和性能变化,是为了解决每一种摩擦情况下耐磨性的问题。这些工作的一部分已在文献〔9, 26〕中综合概括了。按照文献〔9〕,接触区的变化可分为三类: I—表面几何外形轮廓的变化; II—影响机械摩擦的近表面层组织的形成; III—影响分子表面膜的生成。

在摩擦接触点中往往还有中间磨屑,由于它的存在将影响接触点的几何特征,并使接触表面的粗糙度、波纹度发生变化,把所有的这些变化列入第一类。而这些变化,除了磨损最终阶段以外,在很大程度上既影响摩擦,又影响构件的磨损。

摩擦时表面层的组织变化研究表明,对它的分析和系统研究能给出改善摩擦构件耐磨性能的某些一般方向。这种组织变化,包括晶体缺陷,相和组织转变,表面层的强化和弱化等等。当摩擦构件在不同介质中工作时,表面形成不同成分的膜:从周围介质中吸附而形成的吸附膜,化合物膜,由摩擦构件转移来的膜等等。

关于表面层形式的某些一般概念以及不同磨损条件下表面组织系统的描述载于文献〔27, 28〕工作中。

在接触处发生的多种类型的磨损过程也有共同的特征。属于这方面的例子有塑性变形引起的强化和弱化,或者局部

加热时的氧化。这些过程实现的程度和形式取决于具体磨损形式。

第四节 磨损的分类

摩擦时表面层破坏的系统研究形成了一系列磨损形式的分类。但到目前为止，还没有统一的分类方法，也没有一个特征可能成为这样分类的依据。

最初对磨损形式的分类，是建立在摩擦过程的外部条件上。例如，布里涅里（Бринелль）（1921年）将磨损分为：1)带润滑和没有润滑的滚动摩擦；2)带润滑和没有润滑的滑动摩擦；3)分离下来的中间研磨粉末的硬物体摩擦。

В. Ф. 罗伦茨（В. Ф. Лоренц）（1939年）⁽²⁹⁾和 А. К. 扎依采夫（А. К. Зайцев）（1947年）提出了比较扩展的分类⁽³⁰⁾。

最近根据在接触处所发生的过程特征，又提出了混合分类法。Б. И. 柯斯切茨基（Б. И. Костецкий 1950年）⁽³¹⁾将磨损分为氧化，热磨损，磨料和痘斑磨损，后来的作者研究工作又补充和扩大了这个分类，目前已有下列基本的分类原则⁽²⁷⁾：

1. 研究机械零件工作时的破坏本质。
2. 在实验室条件下研究重复这些过程。
3. 磨损的动力学和损伤的研究，它取决于材料的性能、摩擦介质、摩擦工艺，它还和从一种破坏形式到另外一种破坏形式的过渡有一定的关系。

把正常的、理论上不可避免的和实际允许的磨损过程，以及机器工作所不允许的病理现象（图1-2），作为上述摩擦表面破坏形式分类的特点。