

李建明 编著

磨损金属学

MOSUN
JINSHU
XUE

冶金工业出版社

75.56
7/10

磨损金属学

李建明 编著

三K554/03

冶金工业出版社

内 容 提 要

本书从表面物理、表面化学、塑性变形及断裂理论出发,比较系统地讨论了金属材料摩擦与磨损时的一些基本问题;从理论与实际相结合的角度,着重阐述了金属材料的成分、热处理、显微组织及性能,与不同运转条件下材料磨损特性间的关系。

本书的读者对象主要是摩擦学工作者,尤其是从事耐磨与减摩材料研制的有关科研和工程技术人员以及有关专业高年级大学生和研究生,也可供广大失效工作者参考。

磨损金属学

李建明 编著

责任编辑 赵公台

*

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿大街嵩祝院北巷33号)

新华书店总店科技发行所经销

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 11 1/4 字数 296 千字

1990年11月第一版 1990年11月第一次印刷

印数00,001~2,500册

ISBN 7-5024-0783-2

TG·111 定价8.90元

序

磨损、腐蚀和断裂是工程构件三种主要的失效方式，它们所导致的经济损失是很大的。美国政府公布的材料表明，1978年“腐蚀”导致的经济损失为700亿美元，占其国民经济总产值的4.2%。美国巴特尔研究所对“断裂”及“磨损”所导致的经济损失，也进行了估算，每项每年约为1190亿美元。

失效事故是人们不希望发生而又确实发生了的“实验”。应用已有的科学知识，对这些实验结果进行科学的分析，可使人们获得有益的教训。接受这些教训，并采取相应的措施，既提高了工程结构的安全性，也提高了人们的认识水平，并发展了新兴的、综合的边缘学科，这就是“科学的发生和发展，一开始就是由生产决定的”这个科学论断的引伸和应用。

与人类的疾病类比，则“磨损”与“腐蚀”是材料的“慢性病”，而“断裂”则是材料的“暴发急性病”。很明显也很自然，断裂最易受人重视，研究的也最多。以断裂为研究对象的断裂学科，由于侧重点不一样，可以分为三个分支：

(1) 断裂力学——对缺口体及裂纹体进行连续介质的力学分析，寻求断裂的判据；

(2) 断裂物理——从材料的组织和结构，研究裂纹形成和伸展的物理过程；

(3) 断裂化学——研究化学介质对断裂过程的影响。

金属的“腐蚀”是金属受环境介质的化学及电化学作用而被破坏的现象。以腐蚀为研究对象的腐蚀学科，也因侧重点不同，而有腐蚀电化学及腐蚀金属学两个分支。当化学介质及应力协同地引起的破坏——应力腐蚀，是腐蚀与断裂的交叉，可归于断裂化学。

“磨损”来源于摩擦，减少摩擦可以采用润滑。六十年代中

期以来，以摩擦、磨损和润滑为研究对象的学科，实质上是研究摩擦的学科，取名为Tribology。此词来源于希腊字“Tribos”，其含义是摩擦(Rubbing)。因此，Tribology便是“摩擦的科学”(The Science of Rubbing)，简称为“摩擦学”。它讨论摩擦现象时，必然会涉及主要后果——磨损以及主要的减摩措施——润滑。

可以认为，摩擦学是一门技术科学，研究有相对运动时互相作用表面的科学和技术。它也是一门新兴的、综合的边缘学科，涉及到物理、力学、化学、材料科学等。类似于腐蚀金属学，李建明同志编著的这本书——《磨损金属学》便是侧重于从金属学角度，分析金属材料的磨损和耐磨性问题的。

工程构件的失效，是由于制作这些构件的材料的相关性能——耐磨性、耐蚀性、抗断性等满足不了服役条件的要求。什么是材料的性能？可以认为：

“材料的性能是一种参量，用于表征材料在给定外界条件下的行为”。

因此，性能必须量化，而行为是一种变化，需要从内因和外因的辩证关系去理解性能。这种辩证关系便是：“内因是变化的根据，外因是变化的条件，外因通过内因而起作用。”李建明同志在书中讨论耐磨性时，在分析材料内部因素影响时，十分注意了摩擦条件的作用。

对于材料性能的认识和分析，材料科学和工程领域的工作者长期以来积累了一些有效方法。从系统分析的观点，这些方法可以归纳为三类：

(1) 黑箱法——不考虑材料内部的结构，在外部环境 ϵ 恒定的条件下，从表示输入信号 X 和输出信号 Y 之间关系的传递函数 K 去理解性能：

$$Y_{\epsilon} = K \cdot X \quad (1)$$

例如，若 X 为应力， Y 为对应的应变，则依据虎克定律，在一定的应力范围内，杨氏模量 E 这个材料性能便是 $1/K$ 。在这里，值

得强调的是，必须保持环境条件恒定，这对分析耐磨性时尤其重要。

(2) 相关法——从大量的实验结果，建立性能 P 与组织结构参量 S 之间的相关性关系：

$$F(P, S_1, S_2, \dots) = 0 \quad (2)$$

应用这种关系，便可通过工艺 T 去改变组织结构，从而控制性能：

$$T \longrightarrow S \longrightarrow P \quad (3)$$

(3) 过程法——从外因如何通过内因而起作用去理解性能的表现过程，这就可以较深入地去理解性能，从而可以更有效地去控制性能。

李建明同志在分析金属材料的耐磨性时，注意到上述三种方法的特点：他强调黑箱法中环境恒定性的重要；搜集了类似式 2 的经验关系式或图表；讨论了磨损中各种物理、力学、化学、相变过程等对于耐磨性的影响。

我理解，李建明同志采用了如图 1 所示的框图，由简入繁地分析了金属的摩擦、磨损和耐磨性这些“磨损金属学”的重要问题。

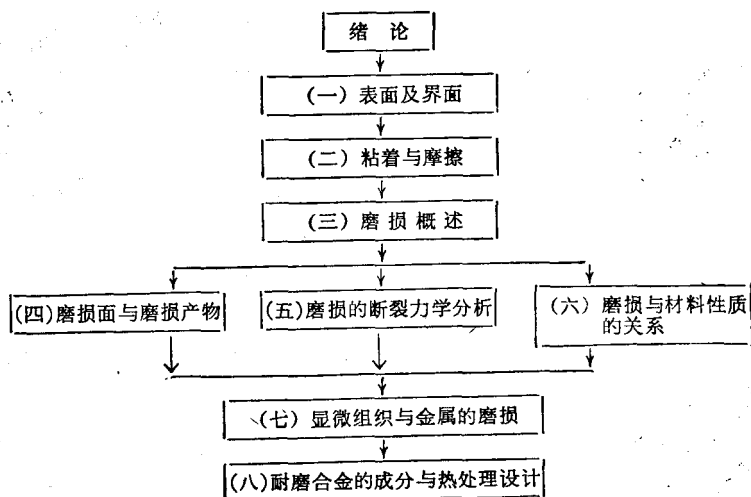


图 1 全书各章之间的关系

在绪论中，讨论了金属摩擦与磨损研究的经济意义和方法。

由于摩擦与磨损是表面及表面层现象，因此，第一章先介绍了从理想到实际的表面结构和表面能，然后讨论了表面偏聚、吸附及化学反应。粘着是摩擦的特有现象。在第二章，从粘着讨论摩擦、摩擦力和摩擦系数。第三章承前启后地概述了磨损、磨损的分类和特征，以及磨损系数和耐磨性。

如图1所示，从三方面展开讨论了磨损与耐磨性：在第四章，分析了摩擦面的形貌、温度、应力-应变、成分组织结构变化，指出了磨屑分析的重要性；在第五章，从断裂力学角度，讨论了裂纹的形成和扩展，介绍了剥层磨损理论；在第六章，讨论了耐磨性这个复杂性能与其他力学性能之间的关系，特别是材料的各种硬度和韧性与耐磨性之间的关系。

展开之后又需要综合，而认识 and 解释客观世界的最重要的目的，在于改造和控制客观世界。因此，如图1所示，为第八章的耐磨合金的成分及热处理设计做准备，在第七章，按基体及第二相分别讨论了显微组织与耐磨性之间的关系。

“腐蚀”是从材料表面发生的化学变化所导致的材料的失效；“断裂”一般是从材料表面发生的力学现象所导致的材料的失效；当温度升高时，分别有高温腐蚀及高温蠕变；当化学介质与应力共同作用时，将会引起材料的应力腐蚀断裂。材料失效的第三种主要形式——“磨损”，也是从表面开始而发生的表面层的力学破坏现象，这就与断裂有关；在另一方面，磨擦不是在真空中进行，而是在化学介质中进行，因而又与腐蚀有关。有些现象，例如磨蚀、气蚀、微动腐蚀等，又是磨损与腐蚀两个领域交叉讨论的问题。此外，对于这三种失效所采用的分析方法也有若干相似而可相互借鉴之处。例如，与医学界的剖尸类似，断裂、腐蚀及磨损分别地采用断口分析、腐蚀产物分析及磨屑分析。

综上所述，李建明同志编著的这本《磨损金属学》，从金属学角度分析了金属的磨擦、磨损与耐磨性，在内容与体系上，都有独到之处，丰富了磨擦学的内容，不仅可供这方面工作者阅

读，也可供广大的失效工作者参考，我将高兴地看到它的出版。

肖纪美

一九八六年一月

于北京钢铁学院

前言

摩擦学 (Tribology) 是近二十多年来迅速发展起来的一门新兴边缘学科。它主要包括摩擦、磨损和润滑等研究领域。摩擦导致大量机械能的损耗,而磨损则是机械零件失效的一个重要原因。据估计,工业化国家能源的约30%消耗于摩擦。对一个高度工业化的国家,每年因摩擦和磨损所造成的经济损失差不多占其国民经济年产值的1~2%。在我国,由于磨损在汽车、拖拉机以及电力、采矿、建筑等行业造成的材料损耗,其数量也是很大的。至于能源的消耗,仅据大庆油田的粗略估计,油田每年总能耗的 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$,是因无功损耗而消耗掉的。因此,摩擦与磨损的研究是一个有重大社会效益的课题。

摩擦与磨损自古以来就存在。人们一直在力图控制摩擦与减轻磨损。随着工业的发展,特别是在现代工业与技术中,高速、重载的运转条件,核反应堆、宇宙飞船那样的恶劣工作环境,对摩擦与磨损提出了越来越高的要求,为这门新兴学科的发展提供了强大动力,使以摩擦与磨损为主要内容的摩擦学获得了高速发展。据统计,自摩擦学这个术语提出(1966年)以来的17年间,在这个领域内发表的论文就有近80000篇,相当于每年有5000~6000篇摩擦学文献发表。

摩擦与磨损是发生在相对运动的接触界面上的复杂现象,包含着许多物理、化学及力学过程。物理学、化学及材料科学工作者对此相当关注。摩擦与磨损直接影响机械零件间力、功或运动的传递,因此,又是机械工程师们重视的问题。不难看出,摩擦和磨损的研究将是多学科的综合,涉及物理、化学、数学、材料科学和机械工程等方面的很多基础知识。

首先,作为摩擦组件的材料都是具有一定微观结构的。在摩

擦力作用下，不同结构的材料会表现出不同的行为。尤其是，摩擦与磨损是发生在接触界面上的现象，材料表面原子的结构或组态，以及与之相连的表面效应不能不对摩擦与磨损产生一定影响。不深入分析和认识这些效应及其影响，^{*}显然是难于正确认识摩擦和磨损的规律的。对这一点，人们虽然早就有所认识，但只有在现代表面分析技术，如低能电子衍射，俄歇谱仪、扫描电镜、透射电镜等有效的研究工具出现后，才能正确认识摩擦和磨损的规律。

在摩擦与磨损过程中，接触界面之间的作用力主要是一种机械力。对于本书所考虑的金属材料来说，在这种力的作用下，表面及其附近的一定范围内将发生大的塑性变形；与此伴随，结构和组织将发生显著变化，如大量位错增值、出现胞状结构、形成表面织构，甚至发生相变。在摩擦热作用下，还可能发生恢复与再结晶过程。表面与亚表面层中的这些变化必然改变表层材料的某些性质。例如，在机械性能方面产生加工硬化或软化；在化学性能上，则可能使表面材料的活性增加，在大气环境或有润滑剂存在时，将改变表面与介质间的相互作用。所有这些，都会给随后的摩擦与磨损过程带来重要影响。然而，这些方面的问题，在现代表面分析技术应用于摩擦学研究之前，了解也是很充分的。

磨损是相对运动的接触固体表面上，材料逐渐分离和损耗的过程。扫描电镜及表面分析技术对磨损面及磨损碎屑的分析表明，材料从表面上的这种逐渐分离过程是一片一片或一块一块地进行的。很显然，这种形式的材料分离必然包括有裂纹形成、裂纹扩展以至最后与基体脱开的过程。从这个角度讲，磨损是机械力作用下，发生在表层中的一种特殊断裂过程。对于通常的金属材料来说，磨损的全过程多半包括有在磨损力作用下的塑性应变积累、裂纹形成及裂纹扩展等几个阶段。正是它们决定了材料的磨损特性。但是，对不同材料，控制其磨损特性的重要阶段可能不同。很清楚，针对各种显微组织的金属材料，了解影响磨损裂

纹形成及扩展的因素，这无论在理论上还是实际上，都具有十分重要的意义。

应该指出，磨损并不是材料固有的特性。它与运转条件密切相关，是一种与整个系统有关的特性。然而，从给定运转条件下影响磨损的材料性质看，硬度是一个重要参数。在同样的摩擦应力作用下，硬度高的材料塑性变形小。但是仅用硬度来衡量材料的耐磨性又往往是不可靠的。因为磨损过程还包括有裂纹形成与扩展的过程。在这方面，层错能与断裂韧性的影响常常是不可忽略的。

当然，从根本上看，在给定的运转条件下，决定材料磨损特性的还是材料本身的成分与微观结构。就整体材料而言，现代物理冶金学已经为成分、结构与组织和性能之间的关系，建立了越来越完善的理论。如何应用现代物理冶金的成就来处理发生在相对运动界面的摩擦磨损现象，这无论从理论上，还是实践上都是有重大意义的课题，因而引起了人们极大关注。仅以1977~1978年发表的摩擦学材料性质方面的文献看，绝大部分都是属于这方面的（见表1）〔1〕。

本书试图在近十几年来上述这些方面的研究进展基础上，比较系统地把从表面物理、表面化学、塑性变形及断裂理论对材料摩擦与磨损的研究，同工程合金的摩擦磨损特性联系起来，从理论与实际相结合的角度，讨论金属材料摩擦与磨损的一些基础问题，着重阐述金属材料的成分、显微组织与性能和不同运转条件下磨损特性之间的关系。

尽管人们对磨损现象的研究给予很大重视，但由于磨损过程十分复杂，影响因素也很多，至今对磨损还没有一个普遍接受的统一分类，使用的术语也存在不同程度的混乱。不过，比较多数的工作者认为，工业中最重要的两种磨损机制是磨粒磨损与粘着磨损。因此，本书所着重讨论的也是这两种作用机制下的磨损。

最后要再次指出，磨损是与整个运转系统有关的一种现象，是外因通过内因发生作用的结果。因此，同种材料在不同试验条

**表 1 1977~1978年磨损学文献中,材料性质
研究方面的分类统计**

材 料 性 质	发 表 的 论 文, %
整体性质 (成分、物理性质、显微结构、 强度性质、硬度等)	39
表面性质 (表面能、热处理等)	31
表面形貌、波纹度、吸附表面层	16
吸附表面层	7
与设计有关的性质	7
总 计	100

件下,会有不同的磨损行为,当然试验结果就会不同。在对比材料的磨损特性时,这点是必须特别予以注意的。

本书所讨论的问题,涉及到诸多不同学科。为适应不同专业的读者,对一些有关的基本概念力求给予简明的定性说明。但由于笔者水平有限,加之,所讨论问题的复杂性,以及其中很多问题的研究正处于不断发展、深入的过程中,因此,对书中存在的缺点或错误之处,恳请读者批评指正。

编 者

一九八五年十二月

目 录

序

前 言

第一章 表面及界面效应 1

第一节 固体表面 1

一、理想的固体表面 2

二、实际晶体表面 8

第二节 表面偏聚 17

一、表面偏聚的理论描述 18

二、偏聚原子的分布与结构 23

三、合金(杂质)元素在铁表面的偏聚 25

第三节 表面吸附与化学反应 27

一、固体表面上气体的吸附 27

二、表面化学反应——氧化膜的形成 36

三、固-液界面上的效应 38

四、罗斯可衣效应与里宾德尔效应 40

参考文献 44

第二章 粘着和摩擦 47

第一节 接触的宏观描述 48

一、固体表面的形貌 48

二、实际接触面积 53

第二节 固体表面接触时的粘着力 57

一、粘着和粘着系数 57

二、双金属界面粘着的理论 59

三、金属粘着的试验观察 62

四、影响粘着力因素 65

第三节 摩擦 77

一、摩擦力 77

二、纯金属的摩擦特性 79

三、合金的摩擦特性	88
四、相变的影响	93
五、吸附和表面反应的影响	95
参考文献	102
第三章 磨损概述	104
第一节 磨损的分类	104
一、分类	104
二、轻微磨损与严重磨损	109
第二节 磨损特征及一般规律	111
一、粘着磨损	111
二、磨粒磨损	115
三、表面疲劳磨损	120
四、微动磨损	121
五、冲击磨损	121
六、磨蚀	121
第三节 磨损特性参数	122
一、常用磨损特性参数	122
二、磨损系数	122
参考文献	127
第四章 磨损面与磨损产物	129
第一节 磨损面的形貌特征	129
一、轮廓线的变化	129
二、犁沟	133
第二节 摩擦面的温度	135
一、表面温度的计算	136
二、试验结果	138
第三节 摩擦面附近的应力应变分布	139
一、表层附近的应力分布	139
二、亚表面层中的塑性变形	143
第四节 亚表面层显微组织与结构的变化	152
一、位错密度与胞状结构	152
二、再结晶效应	161

三、表面织构	165
四、摩擦面中的相变	165
第五节 摩擦面成分的变化	169
一、表面与介质的相互作用	169
二、摩擦时的表面偏聚	171
三、转移膜的发展	174
第六节 磨损产物——磨屑	176
一、磨屑的形貌及尺寸分布	177
二、磨屑的结构及成分	179
三、磨屑与磨损率	180
参考文献	182
第五章 磨损的断裂力学分析	185
第一节 剥层磨损理论	186
一、剥层磨损理论概述	186
二、剥层磨损方程	187
第二节 单相金属及合金中磨损裂纹的形成	190
一、表面裂纹的形成	191
二、亚表面裂纹的形成	195
第三节 复相合金中磨损裂纹的形成	201
第四节 裂纹的扩展	207
一、疲劳裂纹的扩展	207
二、磨损裂纹的扩展速率	210
三、磨损裂纹扩展的位错理论分析	212
参考文献	215
第六章 磨损与材料性质之间的关系	217
第一节 磨损特性与硬度	218
一、硬度概述	218
二、磨损特性与材料的整体硬度	222
三、加工硬化及表面硬度	229
四、高温硬度	232
第二节 磨损与层错能	233
第三节 磨损与断裂韧性	237

一、断裂韧性与磨损机理	237
二、朱姆-盖尔等的工作	239
三、莫里等的工作	242
第四节 耐磨性与其它性能的关系	243
参考文献	245
第七章 显微组织与金属的磨损	247
第一节 第二相的影响	247
一、一般考虑	248
二、金属化合物	250
三、碳化物	254
四、残余奥氏体	265
第二节 基体组织对耐磨性的影响	271
一、不同组织耐磨性的一般比较	271
二、珠光体钢的磨损	273
三、奥氏体钢的磨损	277
四、马氏体钢的磨损	280
第三节 石墨形态对铸铁磨损的影响	281
一、铸铁中的石墨	281
二、铸铁磨损的一般特征	283
三、片状灰铸铁的磨损	288
四、球墨铸铁的磨损	289
参考文献	291
第八章 耐磨合金的成分设计与热处理	293
第一节 化学成分与合金磨损概述	293
一、固溶于基体的合金元素	293
二、形成化合物的合金元素	299
第二节 合金元素与粘着磨损	303
一、珠光体钢	303
二、奥氏体不锈钢	303
三、灰铸铁	307
四、铜基合金	308
五、铝-硅合金	314

六、钴基合金	317
第三节 合金元素与磨粒磨损	320
一、低合金钢	322
二、工具钢及几种其它合金钢	324
三、高碳奥氏体锰钢	328
四、白口铸铁	330
第四节 热处理与钢的磨损	334
一、奥氏体化温度的影响	335
二、回火温度的影响	337
参考文献	342