

金属热处理丛书

金属的摩擦磨损 与热处理

中国机械工程学会热处理学会 主编



机械工业出版社

中国机械工程学会热处理学会
《金属热处理丛书》编委会

成 员

主任委员: 朱沅浦

副主任委员: 戚正凤 丁文学 侯增寿

委 员: (按姓氏笔划排列)

丁文学 邓 洋 朱沅浦 宋余九 陈 涛
陈仁梧 陈善述 杨 让 侯增寿 俞德刚
陆载厚 戚正凤 崔 崑 袁 汲 雷延权
姜东肇

序

热处理是机械制造中关键工艺之一，它是保证机器零件内在质量，延长服役寿命的有效方法。无论对于民用产品还是军用产品的制造，热处理都是必不可少的，因而在四化建设中起着极其重要的作用。

热处理的进步又与物理冶金和一些新技术的发展息息相关。很多热处理工艺的改进就是以物理冶金理论的新发展和一些新技术的应用为根据的。例如：根据组织性能研究的新成果，发展了一些强韧化的新工艺；由于激光、电子束的应用，发展了一些高能密度快速加热的表面改性工艺。这些知识已是许多热处理工作者感到不足的方面，需要通过自学加以迅速补充。

中国机械工程学会热处理学会从目前热处理行业中技术人员的普遍需要出发，由编辑出版工作委员会组织国内大专院校和科研单位及工厂具有专长的专家、学者编写了这套《金属热处理丛书》，以提高金属热处理科技人员的理论水平与技术水平，补充一些新的理论和其它领域中的新技术知识，扩大眼界，开阔思路，推动行业发展，为四化建设做出应有的贡献。

作者在编写时力求理论联系实际，取材上深度广度适宜，文字上深入浅出，便于自学，以期读者阅读后有所收获，有所提高。

由于我们的知识面不广，在选题方面和编写内容方面可

能还有不恰当之处。希望广大读者提出宝贵意见，以便在第二批丛书的选题方面和编写方面有所改进。

中国机械工程学会热处理学会
《金属热处理丛书》编委会

前 言

本书是为从事热处理和金属材料工作的同志编写的。书中除了介绍金属摩擦磨损的基本规律及常见的各类磨损形式之外，重点介绍了各种热处理，尤其是化学热处理的摩擦学特性。这也是本书与已有的摩擦磨损著作所不同的地方。

众所周知，金属表层的组织与性能对摩擦磨损有重要影响：在摩擦过程中金属表层的组织与性能有十分复杂的变化，这种动态变化对摩擦磨损的作用并不亚于试验前材料的组织与特性。诚然，要了解摩擦过程中表面的，甚至是近表面的变化信息是相当困难的。但是，不深入研究摩擦副表层在运动过程中的变化规律，我们就永远搞不清磨损的机理。因此，金相热处理工作者研究摩擦磨损问题的目的，一方面是用以解释和理解有关的现象，如机器零件的磨损，刀具、量具与模具的磨损等，更重要的是能动地变革热处理与金属材料与摩擦磨损的内在联系，以便为摩擦构件正确地选用热处理工艺与金属材料，提高零部件的可靠性和使用寿命。

在本书的编写过程中哈尔滨工业大学热处理教研室雷廷权教授给予了亲切关怀与指导，对全书进行了认真的审校，编者对他表示衷心感谢。王铀同志积极支持本书的编写工作，参加了本书部分章节的编写。清华大学的刘家澍同志，农机研究院的周平安同志，矿业学院研究生部的汪宁同志为编写本书提供了最新的资料。本书中引用的试验数据是许多

同志辛勤结晶，其中有东安机械厂的刘新明同志，哈尔滨第一机器厂的李义林同志，石油化工研究院的臧振铨同志，还有闵乃忠，张泽国，伍岩，伊晓同志等。哈工大金属材料及热处理专业的电镀，金相及力学性能组的同志给予了热情地帮助。全部书稿还经刘迨同志和戚正风同志审阅，并提出了许多宝贵意见。编者对他们表示深切的谢意。

目 录

序

前言

第一章 绪论 1

第二章 金属的磨损 6

一、磨损的分类 6

二、粘着磨损 9

(一) 粘着磨损的实质与分类 9

(二) 粘着磨损的表达式与抗磨强度 12

(三) 粘着磨损的影响因素 14

(四) 提高粘着抗力的措施 29

三、磨料磨损 30

(一) 磨料磨损的实质与分类 30

(二) 磨料磨损的表达式 32

(三) 影响磨料磨损的因素 34

(四) 提高材料磨料磨损抗力的措施 40

四、接触疲劳 41

五、腐蚀磨损及其它 44

第二章参考文献 46

第三章 磨损的试验研究方法 47

一、真实接触状态的测定方法 47

(一) 接触电阻法 47

(二) 光学测量法 48

(三) 放射性同位素法 49

二、摩擦系数的测定方法 49

(一) 静摩擦系数的测定 50

(二) 动摩擦系数的测定	50
三、磨损量的测量方法	52
(一) 称重法	53
(二) 测长法	53
(三) 划痕法及压痕法	53
(四) 台阶法和切槽法	54
(五) 磨痕计算法	54
(六) 沉积法	55
(七) 放射性同位素方法	55
(八) 电记录方法	55
四、摩擦温度的测量	58
五、磨损产物的研究	60
(一) 铁谱分析技术	60
(二) 放射性同位素照像术	62
(三) 电子显微术	62
六、研究磨损表面和亚表面的方法和仪器	67
第三章参考文献	70
第四章 摩擦磨损的金属学问题	71
一、金属在摩擦磨损中的变形与断裂	74
(一) 金属摩擦表层的塑变本质	75
(二) 塑性变形的深度	78
(三) 塑性变形沿深度的分布	81
(四) 塑性变形与粘着理论	82
(五) 摩擦表面的裂纹萌生与扩展	84
二、金属组织与性能对摩擦磨损行为的影响	92
(一) 钢铁组织对粘着磨损的影响	93
(二) 钢铁组织对磨料磨损的影响	102
三、摩擦磨损过程中金属组织与性能的变化	116
(一) 表面形貌的变化	118

(二) 表面层中组织结构的变化	120
第四章参考文献	124
第五章 耐磨材料及其热处理	127
一、耐磨钢	128
(一) 低碳低合金钢	129
(二) 中碳钢及中碳合金钢	129
二、高锰钢	133
(一) 成分	134
(二) 热处理	136
三、耐磨铸铁	140
(一) 白口铁的组织与适用条件	141
(二) 灰口铁的组织与应用	146
第五章参考文献	148
第六章 提高金属耐磨性的表面强化技术	149
一、表面热处理	150
(一) 火焰淬火	150
(二) 高频淬火	151
(三) 形变热处理	152
(四) 真空热处理	154
二、化学热处理	156
(一) 渗碳层的耐磨性	156
(二) 渗氮层的耐磨性	166
(三) 渗硼层的耐磨性	175
(四) 丰田工艺	177
(五) 气相沉积超硬覆盖层	180
(六) 表面润化处理	182
第六章参考文献	185

第一章 绪 论

延长机器和机构的寿命，提高它们工作的可靠性是一项十分重要的技术任务，并且具有巨大的政治经济意义。其中一个重要方面就是设法减少磨损，越是重要的机器和结构，越是工作条件复杂的摩擦副（如航空与航天器械，低温与高温及特殊条件下工作的零、部件），寿命问题越突出。

有人指出世界能源的 $\frac{1}{3}$ 到 $\frac{1}{2}$ 是以不同形式消耗在克服机械零件对偶表面相互作用的摩擦上。由于摩擦所导致的磨损是机械设备失效的主要原因之一。正因为如此，随着生产和科学的进步，世界上工业技术发达的国家都在积极的开展着摩擦学的研究与应用。

摩擦磨损的研究与金属材料，热处理工作者有十分密切的关系，这不仅表现在磨损要浪费大量的材料，更重要的是综合利用摩擦学（摩擦、磨损与润滑）的知识能研制新材料，创立新工艺。

美国国家材料政策委员会向美国国会提出了一份最后报告，即D. W. 巴勒德报告，报告指出由于摩擦磨损而引起的损失，使美国经济每年支付1000亿美元的巨款，这项损失中的材料部分约为200亿美元。乔斯特指出，根据英国的经验，只要花费不大的代价，节约20%的损失是很容易作到的。英国摩擦学研究中心的收支比为：300：1。正因为如此，美国机械工程师学会在一本名为《通过摩擦学节约能源的战略》的书中写道：美国交通、电力、加工、商业和民用等部门耗能占美国的80%，其中约有一半是没做功而损失掉

了, 1990年这个数字可能达到56%。又有文章指出, 自从蒸气机发明以来的近两个世纪中, 能源节约的重点是原动机热循环效率的提高, 但是, 近十多年的历史证明, 现在这方面的潜力已很有限了。报告认为今后节约能源的着重点应该是改善摩擦学技术, 因为这能显著地节约原材料和动力消耗, 还能提高机器的可靠性, 延长服役时间, 减少维修费用。

在材料利用方面摩擦磨损现象有非常重要的意义。1957年我国机械行业对十二个部门进行了摩擦学调查, 结果发现我国某些零、部件的寿命远比国外先进产品低。1974年我国汽车拖拉机用钢量新产品的消耗(51万吨)与维修配件的消耗(47万吨)几乎相等, 这说明产品质量差, 寿命短, 因此设备可靠性差, 效率低。

利用热处理, 尤其是化学热处理能显著改善材料表面抗摩擦磨损能力, 例如表面超硬覆盖技术, 可使表层硬度提高到HV3000~5000, 即比淬火工具钢高5~7倍, 因此, 用这种新工艺处理的零件和工具的寿命能成倍甚至几十倍地增加。根据摩擦学原理创立的复合化学热处理新工艺, 使摩擦副之间摩擦系数能减少 $1/2 \sim 2/3$, 摩擦构件工作平稳, 无噪音, 磨损率减少一个数量级以上, 近年来研究各种材料、各种组织状态以及各种热处理工艺耐磨性的工作不断增多。虽然摩擦磨损方面的研究工作有很多困难(象基础理论不成熟, 影响因素多, 现象难以暴露及其微观特征等)。但是, 目前由于各国的极大重视, 因此, 投入了巨大的人力与物力使它成为当今世界上发展最快的学科之一。

摩擦磨损的研究趋势明显的倾向于微观本质及冶金方向, 表层及磨屑的成分与结构分析, 铁谱仪等新型分析手段的运用, 以及对白层, 二次组织, 二次淬火, 二次回火的研

究等都与材料及热处理有密切关系。因此，我们的任务就不仅是运用摩擦学的已有知识，而且要在实践中推动摩擦学向前发展。

金属在当今的科学技术和人类生活中仍是一个基本材料。所以，提高金属材料、金属制品的耐磨性具有巨大的技术经济意义。不过这样重要的问题长期以来研究得很不充分，因此，有必要编写一本有关金属材料磨损机理与改善耐磨性措施的系统著作。摩擦磨损现象的复杂性及其微观特征为这一问题的解决带来了许多困难。尽管在几百年之前关于摩擦的研究就开始了，但由于生产水平和科学技术发展的限制，人们首先注意的只是摩擦副的机械接触和机械应力等方面的作用。过去认为材料的成分是耐磨性的主要影响因素，几乎忽略了组织结构对耐磨性的影响，更没有考虑摩擦磨损过程中的组织变化。

40~50年代有人用金相方法研究过磨损过程，企图将耐磨性与磨损前的组织进行比较，后来才研究金属表面的组织与性能在摩擦过程中的变化。可是，摩擦产物的弥散度很高，用光学显微镜和一般化学分析方法了解其细节有困难。后来采用X射线衍射仪，电子显微镜，电子衍射及放射性同位素等新技术探索摩擦时金属表层与次表层的一些组织、状态变化。晚近，研究表面仪器的进展很快，象俄歇电子能谱仪、X线电子能谱仪，低速电子衍射仪等许多新技术的出现使金属摩擦表面上一些微观成分及组织变化的研究成为可能，例如俄歇电子能谱仪，可以分析表面1~10个原子层（3~30 Å）的成分变化。可以分析3号以上的所有元素。

今天金属摩擦表面的研究不仅限于组织的静态分析，不仅限于光学显微镜的一般金相分析，而是深入到极薄的表层

组织中研究温度等各种因素的影响，去追究磨损的原因以及在表面微峰上发生的形变、相变及破坏的规律。

不难设想，深入研究摩擦磨损过程中的形变与相变规律对突破摩擦磨损中的一些关键性课题将会有非常积极的意义。综上所述，可以看出：

(1) 由于近代工业的发展，机器设备的功率、速率、精度等参数不断提高，以及生产的连续性和自动化，金属零件耐磨性问题将会变得更为突出，所以，这个课题受到了普遍的重视。

(2) 研究金属材料的摩擦学问题有巨大的技术经济效益，运用现有的摩擦学知识与经验，在花费不大的条件下，可以为国民经济提供巨大的效益，收益与投资之比不是几倍而是几十倍，甚至几百倍。

(3) 现代科学研究手段的不断完善，人类认识金属摩擦过程的一些障碍正在或者已经被克服，目前微区及薄膜的成分、结构分析技术，以及金属组织与成分的动态分析技术的完善，为这门科学的发展创造了有利条件。

(4) 由于许多国家认识到这个问题的重要性，因此相继投入巨大的人力、物力，为它的突飞猛进奠定了物质基础。

(5) 技术交流的开展尤其是国际间的技术交流，使人们的认识和科技信息成倍的增加。在这种条件下材料的摩擦磨损现象的研究在全世界正在迅速发展，同时也利用现有的理论和技术解决了大量的技术与经济问题。

在金属摩擦磨损研究中，从70年代中期以来，我国老一辈科学家在磨损机理，耐磨材料等方面做出了可贵的贡献，中年科技工作者在接触疲劳，磨料磨损，微动磨损以及选择转移，固体润滑等方面也取得许多成绩，还有一批年轻的学

者更是生气勃勃踏踏实实地在工作着。

在设备方面我们虽还不算先进，可是近年来自行制造和进口了相当数量的通用和专用仪器，全国已有相当的研究单位开展了这方面的研究工作。

国家对摩擦磨损的研究十分重视，不但把这项工作正式列入五年计划和长远规划，并且拨出巨款支持有关单位开展摩擦磨损的基础研究工作。

我们相信，我国的摩擦磨损工作者，在党的关怀下，在国家和人民的大力支持下，一定会在不远的将来，对我国的耐磨材料和抗磨技术，在理论研究和实际应用方面取得更大的进步。

第二章 金属的磨损

一、磨损的分类

材料的磨损是由于摩擦力以及与摩擦力有关的介质、温度等的作用使其发生形状、尺寸、组织、性能变化的过程。

磨损是材料的重要失效形式，对零、部件的寿命、可靠性有很大的影响。研究材料的磨损机制，创建实用的抗磨材料与工艺具有巨大的技术经济价值和深远的科学理论意义。

磨损过程的研究还不够透彻，分类尚不统一。目前多以破损的特点把磨损分为四类：

- 1) 粘着磨损；2) 磨料磨损；
- 3) 接触疲劳；4) 腐蚀磨损。

在这些磨损形式中磨粒磨损最为普遍，约占磨损事例的50%，粘着磨损为次，约占15%，腐蚀磨损为8%左右。

磨损也可以按破坏程度即磨损速率分类：

在一定磨损速率（例如 $10^{-6} \sim 10^{-8} \text{mm}^3/\text{kgf} \cdot \text{mm}$ ）以上为严重磨损，在一定磨损速率（例如 $10^{-8} \sim 10^{-9} \text{mm}^3/\text{kgf} \cdot \text{mm}$ ）以下为轻微磨损。

还有一些学者（例如日本的木村好次⁽¹⁾，苏联的克拉盖尔斯基等⁽²⁾）提出了别的分类，这里就不一一赘述了。

下面对常见的分类（粘着、磨料、腐蚀磨损及接触疲劳）作一简单介绍。

粘着磨损

两个物体互相滑动时产生摩擦破坏，磨损产物由一个表面脱落粘到另一个表面，然后在相继的摩擦过程中表面发生断裂，形成自由质点，也可能再粘到原来的表面上。粘着磨损可以在任意的循环中形成，粘着以后的分离断裂并不一定在起初的接触表面发生。

磨料磨损

是硬质点（或软基体中含有硬质点）滑过或犁过金属表面时产生的破坏形式。形成与机械加工相似的微型切屑，磨料磨损表面常有犁沟或犁皱。

腐蚀磨损

在腐蚀介质中进行摩擦时，金属表面形成的薄膜在摩擦力作用下发生破坏，由于腐蚀作用不断发生，腐蚀、破坏、再腐蚀、再破坏不断出现。在氧化性介质中形成的这种磨损叫氧化磨损。它的磨损产物为各种氧化物。氧化磨损时，表面比较平滑。

接触疲劳

又称疲劳磨损或表面疲劳。在滚动或在滚动与滑动的混合摩擦条件下，金属表面因反复加载与卸载，表面或者皮下形成裂纹，随后导致的磨损称为接触疲劳。它的磨屑成块状，表面形成大小不等的麻斑，因此又称痘斑磨损。接触疲劳发生之前没有预兆，研究比较困难。

各种磨损形式的特征示于表2-1与图2-1。

在许多情况下磨损现象是多种形式同时发生的。例如粘着磨损可能伴有磨料磨损，接触疲劳又可能有氧化磨损同时出现。在解决实际的磨损问题时，要尽力寻找其主导因素，并设法首先解决。

表2-1 各种磨损形式的特征

磨损形式	表面特征	磨屑特征	例证
粘着磨损 (图2-1a)	表面有细的划痕, 严重时会有金属转移现象	多为片状或层状	蜗轮-蜗杆 凸轮-挺杆 缸套-活塞环
磨料磨损 (图2-1b)	表面有划痕或“犁沟”	条状 切屑状	犁、铧、斗齿
接触疲劳 (图2-1c)	表面有裂纹, 小坑等	块状 饼状	滚动轴承 齿轮表面
腐蚀磨损 (图2-1d)	表面有反应膜, 比较光滑	薄的碎片或粉末	

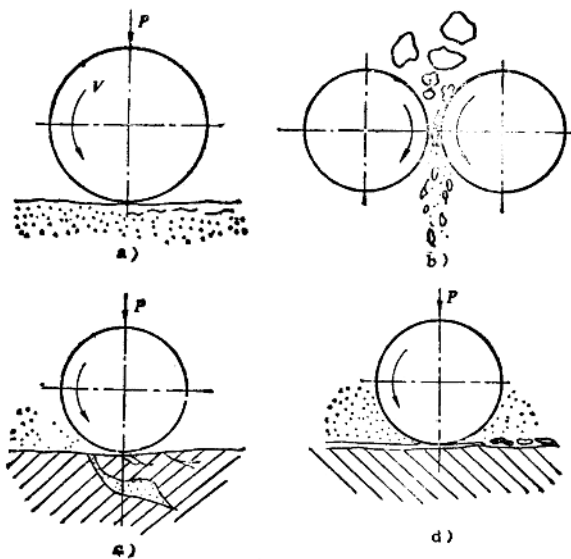


图2-1 各类磨损的特征示意图