

〔联邦德国〕K.-H.哈比希 著

Verschleiß und Härte von Werkstoffen

材料的磨损与硬度



机械工业出版社

材料的磨损与硬度

〔联邦德国〕K.-H. 哈比希 著

严立译

倪文馨校



机械工业出版社

本书围绕材料的硬度与磨损性能之间关系的中心问题，分析了材料的各种性能，包括化学物理性能、组织结构和机械性能等对材料磨损特性的影响。全书共四章，导言之后的第二和第三章着重介绍了摩擦学系统分析方法及磨损和硬度的基本原理。第四章“材料的磨损与硬度之间的关系”是全书重点，它按磨损的不同类型分别以大量实验结果阐述了磨损与硬度的关系。书末附有一些表格，列出各种材料的硬度值，并介绍了许多抗粘着磨损性能优良的材料配对副等。这些内容对机械工程技术人员、科研人员及工科院校师生均有参考价值。

Verschleiß und Härte von Werkstoffen

Karl-Heinz Habig

Carl Hanser Verlag 1980

材料的磨损与硬度

〔联邦德国〕K.-H. 哈比希 著

严立译 倪文馨校

责任编辑 常燕宾 杨燕

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可出字第117号）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 新华书店经售

开本 787×1092 1/32 · 印张 12 1/8 · 字数 265 千字

1987年2月北京第一版 · 1987年2月北京第一次印刷

印数 0,001—4,550 · 定价 2.90 元

科技新书目：136-126

统一书号：15033 · 6469

译者的话

在摩擦学实际工程中经常遇到一个问题，即采用硬度高的材料或表面层能否减少磨损。不少情况往往对此没有能正确地予以回答，结果采用了不适当的材料和工艺来解决磨损问题，因为提高材料硬度并不是在任何场合下都能减轻磨损。关于这方面问题，至今已发表有大量文献，介绍了磨损试验的结果，具体分析了材料的各种性能，诸如化学物理性能、组织结构特征和机械性能等，特别是其中的硬度对磨损的影响。但目前尚很少见有其它著作象本书那样，对这个专题系统地予以论述。本书作者K-H.Habig工学博士是德意志联邦共和国材料试验研究院（西柏林）（BAM Berlin）“磨损防护、摩擦学测试及摩擦物理”实验室主任。他根据自己多年对各种材料磨损性能的研究成果，并参阅了大量（近500篇）文献资料著成本书。全书共分四章，其中第四章是全书的中心部分，以主要的篇幅详尽地说明了在哪些场合下采用高硬度材料有好处，哪些场合不能采用高硬度材料，相反，此时材料的其它一些性质显得更为重要。作为分析这些问题的基本理论依据，作者在导言之后的第二章和第三章中分别叙述了磨损和材料硬度的一些原理问题。

本书的显著特点之一是采用系统分析方法对磨损问题进行处理。这种摩擦学系统分析方法是近年来在国际上发展起来的，采用这种分析方法能使我们对摩擦学中各种复杂问题较全面地、正确地予以解决。本书批评那些认为磨损仅是材料的固有性质的传统观点，正确地指出，它是一种系统的性

质，这一点对于从事磨损试验研究的人们无疑是十分重要的。本书的另一特点是较广泛地反映了德意志联邦共和国以及其它各国摩擦学研究成果，使读者对这个领域的发展状况有一个较为系统的了解。这些研究成果不仅涉及到材料硬度与磨损的关系问题，而且也涉及到材料其它性能与磨损之间的关系，这是从事实际工作的技术人员所关心的问题。此外，本书在附录中以许多表格列出各种材料的硬度值，并介绍了许多抗粘着磨损或抗胶合性能好的材料配对副，这些都很有实用价值。

作者在将此书赠予译者的同时，表示很乐意将其献给中国的同行们。在翻译本书时，得到了作者的支持。

翻译中在注意保持原书内容同时，对一些不符合我国习惯的写法及笔误作了适当改写与更正；而某些摩擦学中的新名词，虽在我国尚未流行通用，但为不损害原意还是照翻，如“负荷集”以及某些具体磨损类型的名称等等。但这些术语本身意义很清楚，不会使读者产生误解。限于本人水平，译文中定有错误和不妥之处，恳求读者批评指正。

本书除倪文馨教授认真仔细审校外，还得到武汉水运工程学院金志鸿、牛求煌副教授及陈雁荡同志的仔细审阅，在此一并表示感谢。

译者

1984年10月

序 言

材料的磨损与其硬度之间究竟有什么关系呢？约十年前，我初次思考起这个问题，那时我正开始从事高硬度材料磨损性能的研究。但很快发觉，这个问题不好简单地、笼统地予以回答。完整的回答足以写成一本书，然而当时还无处可以参考。经过不断深入思考，我意识到，这个问题只有从基本原理出发才能说明清楚。所以在本书中，首先从论述材料磨损及硬度的基本理论着手，然后再进一步分析两者之间的关系。

在本书第一章导言之后，接着在第二章论述了磨损问题。在这一章中列举了影响磨损的各种重要因素，并概述了系统分析方法；然后详细地说明了引起磨损的力学、物理和化学方面的原因，强调指出粘着作用、摩擦氧化、磨粒磨损和表面疲劳磨损等作为几种重要磨损机理的特殊意义；这一章还介绍了在生产实际和实验室中使用较多的各种磨损试验方法；与此同时也讨论了用模型磨损试验方法来模拟实机磨损状况的可能性和它的局限性。

这些内容对于工程技术人员、物理和化学工作者在处理磨损问题时颇有用处。特别是这一章末所列的德意志联邦共和国磨损标准 DIN 50 320 中的一检查表很实用。此表列出了一些影响磨损的重要因素，并对此进行了分析。鉴于目前许多大学缺乏关于材料和构件磨损问题的专业教育，故本章可供有关专业的大学生作为入门指导。这些内容也可为从事解决某些特殊磨损问题的实际工作者提供一些普遍适用的知识。

由于至今对硬度没有作出很确切的定义，所以第三章专门来讨论这个问题是有必要的。硬度通常定义为一物体抵抗另一物体压入的能力。但这个定义没有明确这种压入与哪一种变形：如弹性变形、粘滞弹性变形或者塑性变形相联系。由于本书主题是论述材料硬度与磨损之间的关系，故有必要限定硬度的含意。由于大多数磨损过程与塑性变形有关，所以本书所提到的硬度是指材料抵抗塑性变形的能力，这种塑性变形是材料表面范围内受压头的挤压所引起的。合乎这样定义的硬度可以用常见的硬度测试法来测定，如布氏测试法、维氏测试法、努氏测试法和洛氏测试法等。由于这些方法主要用于测量金属材料的硬度，因此本章把金属材料作为主要的研究对象。之所以以讨论金属材料为主，还因为磨损和硬度之间关系的试验结果大部分取自金属材料。不过陶瓷和聚合物材料的应用已日益广泛，故本章也涉及到这些材料的硬度问题。

这一章中有专门一节论述硬度与材料其它性质之间的关系，这些性质有诸如机械性能、金相组织、物理和化学性质等。金相组织结构对硬度有决定性的影响，故这里根据这一点解释了硬度的起因和提高硬度的途径。

关于硬度这一章主要为非专门研究材料的工程技术人员和科研人员而写。材料专业人员可只阅读这章的3.3和3.4两节即可，然后转入第四章。

第四章是本书的核心，它对材料的磨损与硬度之间究竟有什么样的关系进行了详细的论述。这里探讨了这样一个问题，即能否用硬度这个参数来表示出摩擦负荷的极限。为此，分析了大量的试验结果，说明材料抵抗不同类型磨损的能力与参与磨损的各物料硬度之间呈现着复杂的关系。实际上

单纯由某一磨损机理起作用的情况很少，多数情况是同时受几种磨损机理的作用。故本章还选择了一些摩擦构件及系统，说明它们处于哪些磨损机理的共同作用下，它们各自所起作用程度如何，以及在这种情况下对材料及其硬度有什么要求。

书的末尾附录了一些表格，其中列出了摩擦学工程中一些重要材料的硬度值。还列出了抗粘着磨损性能良好的材料配对副，以有助于选择材料。因为粘着磨损与硬度之间没有明显的关系，不能以硬度为依据来选择抗粘着磨损的材料。

什么情况下材料的耐磨性和硬度有关，什么情况下，材料其它性质又起决定性的作用，解释这些问题的最终目的是为了正确地选择材料或材料配对副，以便对不同的磨损情况找到合适的材料技术措施，从而减少出现严重磨损和失效的危险。

在编写本书过程中得到了许多同事的支持，对此深表谢意。特别应感谢联邦材料试验研究院 (BAM) 的“耐磨防护、摩擦学测试和摩擦物理”实验室的全体工作人员，他们是 W. Evers、M. Gienau、N. Kelling、W. Schrag 等工程师以及 S. Binkowski、R. Pahl 和 R. Rambow 女士。此外，G. Blamberg、G. Gabriel 和 I. Walther 等女士为本书绘制了图；M. Awe 女士制作了表格；H. Czichos 教授、K. Kirschke 教授和 P. Feinle 工程师审阅了稿子；J. Ziebs 博士很仔细地审阅了第三章关于硬度的内容，对此表示衷心感谢。联邦材料试验研究院 (BAM) “流变学与摩擦学”组自 1967 年以来所编的文献索引“摩擦学-磨损、摩擦与润滑”对本书的编写帮助甚大。

特别要感谢我的妻子 Elke 和我的孩子 Ingo 和 Ellen，他们为我写这本书给予了支持。

作者 1979年6月15日

于西柏林

目 录

第一章 导言	1
第二章 材料的磨损	7
2.1 磨损的基本原理	7
2.1.1 磨损的系统分析	10
2.1.2 摩擦系统的功能	13
2.1.3 负荷集和材料抗力	14
2.1.4 参与磨损过程的物料要素	26
2.1.5 各要素中与磨损有关的重要性质	28
2.1.6 磨损机理	30
2.1.6.1 粘着作用	32
2.1.6.2 摩擦氧化	35
2.1.6.3 磨粒磨损	39
2.1.6.4 表面疲劳	39
2.1.6.5 摩擦升华和扩散	41
2.1.6.6 几种磨损机理的共同作用	43
2.1.7 按磨损形式与机理划分的磨损类型	44
2.2 磨损试验	46
2.2.1 磨损试验的特殊性	46
2.2.2 磨损测量参数	47
2.2.3 测量磨损方法	53
2.2.4 实机磨损试验	59
2.2.5 模型磨损试验	63
2.2.6 构件磨损试验	89
2.2.7 不同磨损试验方法的比较	90
2.3 磨损与摩擦和润滑状况之间的关系	92

2.4 处理磨损问题的检查表	95
第三章 材料的硬度	101
3.1 硬度的定义	102
3.2 硬度测试法	103
3.2.1 静负荷硬度测试法	104
3.2.2 压头作切线运动的硬度测试法	107
3.2.3 脉冲负荷硬度测试法	113
3.2.4 按不同测试法所确定的硬度值的比较	114
3.3 狭义的硬度定义	120
3.4 对布氏、维氏、努氏和洛氏硬度的 主要影响因素	120
3.4.1 硬度与负荷方面参数的关系	121
3.4.2 测试系统结构对硬度的影响	126
3.4.3 硬度测试时引起的材料抗力	134
3.5 硬度与材料其它性质之间的关系	137
3.5.1 硬度与其它机械和工艺性能的关系	138
3.5.2 硬度与金相组织特性的关系	146
3.5.3 硬度与物理性质的关系	149
3.5.4 硬度与化学性质的关系	150
第四章 材料的磨损与硬度之间的关系	151
4.1 硬度测试和磨损时承受负荷情况的 相似性和差别	153
4.2 摩擦负荷引起的硬度变化及其对磨 损的影响	154
4.3 材料的容许应力与其硬度的关系问题	160
4.4 各种磨损机理的作用与参加磨损过 程中的各物料要素硬度之间的关系	164
4.4.1 粘着磨损与硬度	164

4.4.1.1	关于真实接触面积的大小	165
4.4.1.2	粘着结合力	166
4.4.1.3	粘着系数	168
4.4.1.4	粘着磨损	176
4.4.1.5	粘着引起的胶合	181
4.4.1.6	减少粘着磨损的措施	185
4.4.2	摩擦氧化与硬度	186
4.4.2.1	摩擦氧化的热力学平衡方程	187
4.4.2.2	关于摩擦氧化的反应速度	189
4.4.2.3	腐蚀磨损	191
4.4.2.4	减少摩擦氧化和腐蚀磨损的措施	194
4.4.3	磨粒磨损与硬度	195
4.4.3.1	凿削磨损	196
4.4.3.2	冲刷磨损	221
4.4.3.3	碾磨磨损	231
4.4.3.4	划伤磨损	233
4.4.3.5	喷射磨损	235
4.4.3.6	减少磨粒磨损的措施	242
4.4.4	表面疲劳磨损与硬度	244
4.4.4.1	滚动磨损	245
4.4.4.2	撞击磨损	252
4.4.4.3	滑动磨损	256
4.4.4.4	气蚀和穴蚀	258
4.4.4.5	减少表面疲劳磨损的措施	259
4.5	常用构件的磨损与其所用材料硬度的关系	260
4.5.1	滑动轴承	262
4.5.2	滚动轴承	274
4.5.3	齿轮传动机构	276
4.5.4	配合副	280

4.5.5 凸轮与挺杆.....	282
4.5.6 车轮与导轨.....	286
4.5.7 摩擦制动器.....	290
4.5.8 电气接触开关.....	296
4.5.9 切削加工刀具.....	298
4.5.10 成形加工工具	304
4.5.11 受矿物质摩擦负荷作用的构件	307
附录	309
A 德意志联邦共和国标准DIN 50 150 维氏硬 度、布氏硬度、洛氏硬度和抗拉强度的换算表	309
B 各种材料与耐磨表面层的硬度值	319
C 矿物质材料硬度值	328
D 固体摩擦时抗粘着磨损性能好的材料配对 副	330
参考文献	337
中德名词对照	352
单位换算表	378

第一章 导 言

为了使机器设备在技术和经济方面具备最佳特性，设计者和制造者就应该考虑危害安全运行的各种损伤的可能性。对于各种具有运动构件的结构和机器，可能由于体积负荷引起机械应力而造成构件的断裂或不允许的大变形；而表面遭受机械的或化学的负荷，则是引起磨损和腐蚀的基本原因(图1.1)。

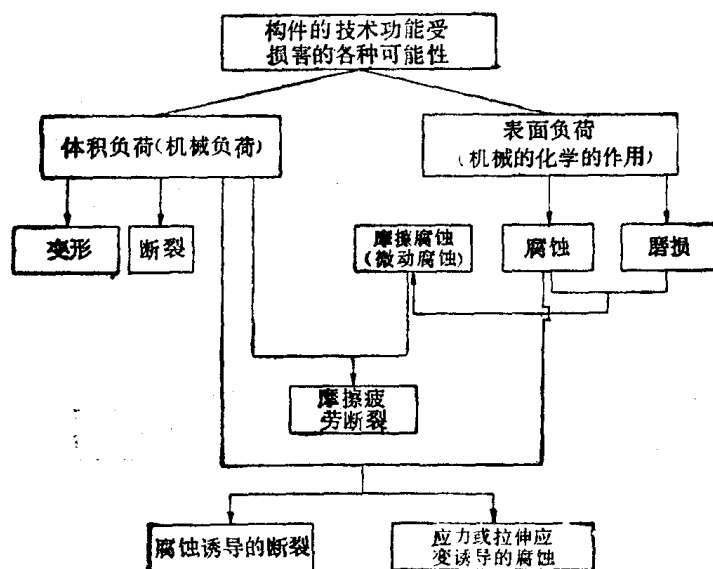


图1.1 材料的各种主要损伤形式

在不少情况下，有几种不同负荷同时起作用，因而可能同时或先后出现几种不同的损伤形式。例如，由于腐蚀使零

件的承载截面尺寸减小，其结果应力上升，导致构件断裂。另一方面，机械应力和应变往往可使腐蚀过程加速。

相互接触的构件，当其有相对振动运动时，会同时引起腐蚀和磨损。这个过程即为熟知的摩擦腐蚀或微动腐蚀。在实际工作中，它的危害性很大，因为这往往是摩擦疲劳断裂的根本原因。

本书不可能，也不想涉及到所有的损坏形式，而主要讨论磨损，偶而也将谈到摩擦腐蚀。

磨损问题是整个摩擦学的一个组成部分，后者的定义是：“研究相对运动表面之间的相互作用和关于这方面实践的一门科学技术”。

摩擦学作为一门学科是1966年由英国教育部在一份“润滑（摩擦学）”的报告中首次提出的。从此，它出乎意料地迅速被各国所接受。除磨损外，摩擦学还包括摩擦和润滑两大部分（图1.2）。此外，加工过程、粉碎处理或者用摩擦化学反应的方法少量地制取一些材料等也属于摩擦学范畴的问

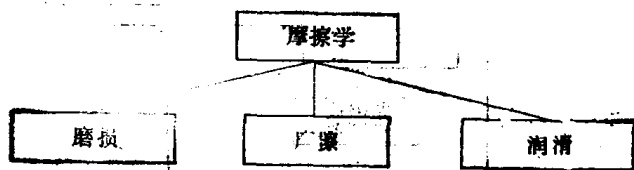


图1.2 摩擦学的组成

题，但这只是一些附属的问题。

润滑可以减少摩擦和磨损。对于磨损，人们总是希望尽量减少它，可是对于摩擦，却并不一定都要求很低，甚至有时不允许太低。例如摩擦制动器或由力闭锁的离合器中绝不

允许加润滑剂。它们通常只能采取结构上和材料上的措施，使其磨损限制在一定允许范围之内。

至于谈到高耐磨材料应当有什么性质，则一般认为，这些材料主要应有高的硬度。的确，很多受磨损作用的构件，特别是刀具之类，事实上就是用硬的材料制成的。磨削工具甚至采用金刚石之类最硬的材料。可是大量的构件还是采用比较软的材料，这不仅是由于经济方面的、而且也是由于技术上的原因，滑动轴承就是这方面的一个例子。

即使在普遍采用硬材料的刀具制造中，金刚石也不见得总比其它材料优越。

用于磨削钢材的工具尤其如此。为了证实这一点，图1.3列出三种磨削材料的磨损率和其硬度的关系。此处磨损率用磨损量与加工量的比值来表示。虽然硬度低的刚玉磨损率最高，硬度居中的立方体氮化硼的磨损率却比金刚石

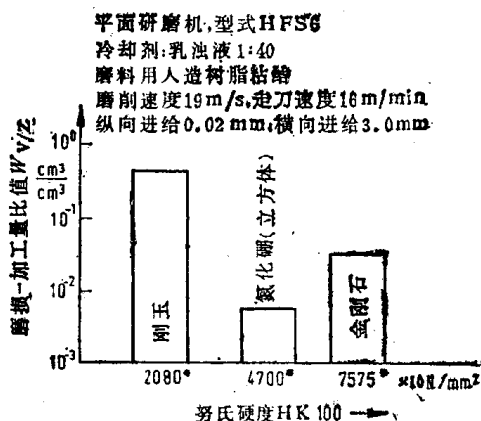


图1.3 磨削高速钢S12-1-4-5时磨削材料的磨损^[1]

低。初看起来有点意外。这究竟是什么原因呢？众所周知，钢中含有碳元素，通过渗碳处理，它的浓度会增加。在磨削时，局部地区可能出现高温，以致金刚石中的碳元素以类似于渗碳处理时的方式扩散到钢的表面层内。结果金刚石质量明显下降，这即表现为磨损。相反，氮化硼不会溶于钢，所以不存在由于扩散过程而引起磨损的情况。

原子由加工工件向刀具扩散的过程可看成是摩擦副之间物料相互作用的一种方式。很多磨损过程都伴随着物料间相互转移作用,但一般来说,扩散的后果不如粘着作用和摩擦氧化那样严重。粘着作用和摩擦氧化是四种主要磨损机理中的两种。另外两种是磨粒磨损和表面疲劳磨损,它们是由于摩擦副间的力或应力相互作用的结果。Burwell 首先指出用这四种磨损机理可以说明大部分磨损过程^[2]。

因此,在下一章将用大部分篇幅详细说明对磨损有决定意义的几种机理;同时概括地分析各种重要的影响因素,这些影响因素包括所有与磨损有关的物料要素的性质和负荷条件。此外,还介绍一些常用的磨损试验方法。在第二章末尾列有检查表,它有助于处理一些实际磨损问题。

因为磨损使材料表面受到损伤,所以就会提出这样一个问题:材料的表面性质究竟用什么参数来表征。无疑,首先会提出以硬度来作为机械工艺性能的参数。如果简单地把磨屑的分离现象视为原子键破坏的结果,那末硬度当然是很重要的一个参数,因为材料的硬度与其键能大小有关。由于键能的测量通常十分困难,Vijh 推荐用熔化温度来反映键能大小^[7]。由图1.4可知,硬度和熔化温度有着相同的上升趋势,不过有很大的离散度。最突出的是钢的硬度变化范围很大。这说明对于硬度,除了键能外,还有其它性质起着重要的影响。这个性质就是金相组织结构特性。根据Hornbogen 提出的定义^[8],组织结构特性是由材料原子晶格中不符合热力学平衡规律的缺陷来表征的。同时,相同硬度的材料很可能具有完全不同的组织结构。在第四章中,将探讨材料硬度对磨损性能有哪些影响,同时指出,材料的磨损性能与形成硬度的金相组织结构密切相关,换句话说,在同样的硬度

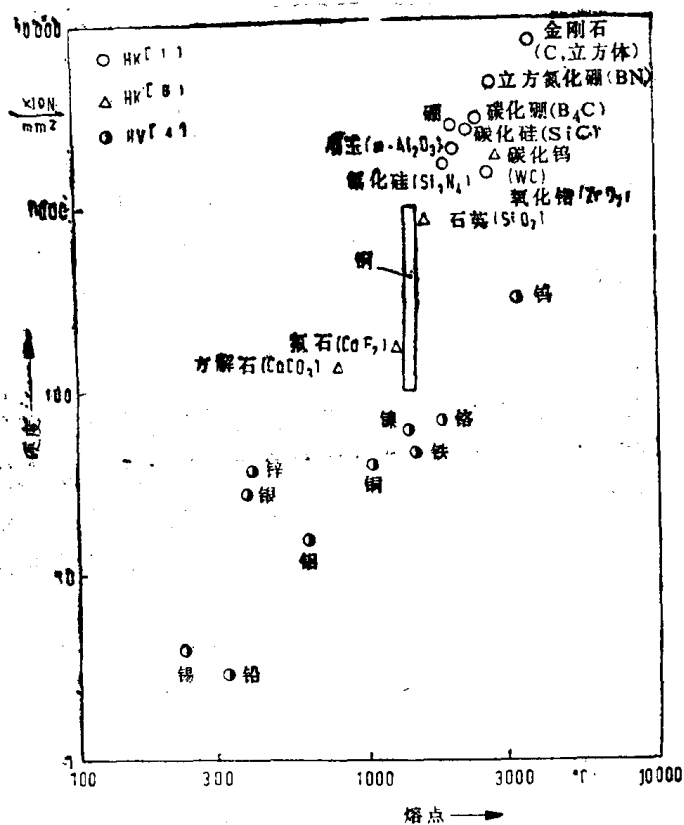


图1.4 材料的硬度和熔化温度的关系

条件下，组织结构不同时，其磨损情况也会大不相同。

综上所述，我们可以理解到，为什么要在第三章中专门讨论硬度问题。在第三章中首先提出硬度的不同定义，然后介绍常用的硬度试验方法。鉴于本书的宗旨，我们把硬度狭义地定义为材料表面抵抗塑性变形的能力。按此定义，硬度可用众所周知的布氏、维氏、努氏和洛氏硬度测试法来测定。其中有专门一部分还分析这些测试法测得的硬度值与试