

与术集 损技文 磨磨译 粒抗 磨

中国农业机械化科学研究院工艺材料研究所 编译

中国农业机械出版社

磨粒磨损与抗磨技术译文集

中国农业机械化科学研究院工艺材料研究所 编译

中国农业机械出版社

本译文集包括综述和译文两部分。综述部分介绍了一些国家在磨粒磨损方面的试验研究工作情况,译文部分选译了关于磨粒磨损机理、耐磨材料及抗磨技术等方面的专题论述。可供有关科研人员、工程技术人员、生产人员及高等院校师生参考。

磨粒磨损与抗磨技术译文集

中国农业机械化科学研究院工艺材料研究所 编译

*

中国农业机械出版社出版

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行

新华书店经售

*

787×1092 16开 20²/8 印张 496 千字

1982年6月北京第一版·1982年6月重庆第一次印刷

印数: 0,001—2700 定价 2.50 元

统一书号: 15216·089

前 言

磨粒磨损是一种严重的磨损现象，足以引起各种机械在使用中效率降低以至完全损坏。磨粒磨损不但消耗大量金属材料，而且使设备的能源消耗相应增加，造成巨大的经济损失。因此，探索磨粒磨损机理及研究耐磨材料和抗磨技术是一项非常重要的任务。

本译文集是根据我们在从事磨粒磨损的研究工作中收集的有关资料编写和翻译而成的，着重介绍一些国家在这个研究领域中的现有水平及发展动向，以供科研人员、工程技术人员、生产人员及高等院校师生参考。

本译文集包括关于国外磨粒磨损研究试验情况的综述，以及从英、德、法、日、俄等文种中选译出有关磨粒磨损机理、耐磨材料、耐磨铸造技术、耐磨堆焊及其他方面的文献共三十多篇。此外，还编译了“近几年国际磨损会议的综合介绍”及“有关磨粒磨损专业的部分专家和学者名录”作为附录，以备查阅。

参加本译文集的编写、翻译及校订等工作的有宋鸿鼎、岳钟英、孙家枢、吴县淑、王鸿、胡家聪、周平安、李志芳、黄庆云、张伯明、魏兴宝、何乃伦、张淑英、赵廷仁、李正军、郑友德、徐根祥、齐忠莲、颜振秋和杨振恒等同志。

由于我们的水平有限，不当之处，请读者指正。

中国农业机械化科学研究院工艺材料研究所

一九八一年一月

目 录

绪 言	1
-----	---

综 述

国外磨粒磨损机理研究工作的进展	
.....中国农业机械化科学研究院工艺材料研究所	5
影响钢铁材料磨粒磨损耐磨性的冶金因素及耐磨材料和抗磨表面强化技术	
.....中国农业机械化科学研究院工艺材料研究所	22

译 文

磨粒磨损	[英] M. A. 摩 尔	57
磨粒磨损机理	[苏] B. H. 维诺戈拉多夫 等	75
磨粒磨损机理和磨粒大小的影响	H. 辛 等	79
根据综合指标评定磨粒磨损条件下材料耐磨性的方法		
.....[苏] Л. И. 波戈达也夫 等		93
材料的抗磨粒磨损性能与其累积能的关系	[苏] A. И. 拉夫林切夫	99
耐磨材料的选择	[英] R. F. 司麦特 等	101
脆性材料的磨粒磨损	[英] M. A. 摩 尔 等	110
显微组织对金属的磨粒磨损耐磨性的一些影响	[澳] P. J. 穆特恩 等	120
断裂韧性对金属材料磨损的影响	[西德] E. 霍恩博根	128
金属材料的磨粒磨损和断裂韧性的关系	[西德] K. H. 朱穆嘎尔	134
淬火温度对钢的磨粒磨损耐磨性的影响	[苏] A. A. 穆哈米多夫 等	143
氧化铝弹齿式中耕机铲尖的耐磨性	[英] A. W. 巴克尔 等	146
磨粒尺寸对渗硼、渗硼铜、渗硼铝的45号钢磨损的影响		
.....[苏] B. П. 别兹鲁切克 等		153
渗硼钢的硼化物层的耐磨粒磨损性能	[苏] Л. Г. 伏罗什宁 等	155
耐强烈磨损的铸钢和铸铁	[美] J. D. 华特逊 等	161
白口铸铁耐磨性和断裂韧性的最佳配合	[西德] K. H. 朱穆嘎尔 等	171
磨粒磨损条件下碳化物铸铁组织的作用	[南] I. 卡他维克	181
白口铸铁的组织 and 性能	[英] W. H. 摩 尔	191
耐磨锰铸铁	[法] B. 兰伯特 等	196
磨粒硬度对高铬铸铁耐磨性的影响	[美] R. B. 冈德拉奇 等	201
用膨胀仪和衍射仪研究含 5 % 锰或 5 % 钒的 15 % 铬铸铁的组织		
.....[罗] D. M. 斯特凡内斯库 等		208
复合合金化的铬铸铁的耐磨性	[苏] K. H. 米涅依洛夫斯基 等	218

包层铸件的生产技术和设备·····	苏联驻日贸易代办处	220
复合合金的磨粒磨损·····	[苏] Ю. А. 尤兹文科 等	223
以高铬铸铁为基体的组合材料·····	[苏] В. П. 波诺马连科 等	225
组织转变对Y25X6T4M碳化物钢耐磨性的影响·····	[苏] И. И. 弗鲁明 等	228
不稀缺的耐磨堆焊填充材料·····	[苏] А. Н. 沙司柯夫 等	231
利用热滚压加工提高管状焊丝ΠΠ-AH125堆焊金属的耐磨性 ·····	[苏] И. В. 尤若柯夫 等	234
用粉末材料电接触堆焊的方法硬化平土机刀片 ·····	[苏] М. Р. 尼古拉耶柯 等	237
马铃薯收割机犁铧的等离子堆焊·····	[苏] Н. 巴特雷卡雷夫 等	240
橡胶轮磨损试验·····	[美] F. 保瑞克	243
土壤造成的磨粒磨损·····	[英] M. A. 摩尔	253
耕耘机械磨粒磨损的研究·····	[法] C. 森格	261
在土壤中摩擦时确定磨损量因素的分析·····	[苏] И. В. 尤若柯夫 等	280
中央黑土带土壤磨损能力的研究·····	[苏] В. Н. 维诺库罗夫 等	283
零件的磨损及其防护的实例·····	美国金属手册	286

附 录

近几年国际磨损会议的综合介绍·····	中国农业机械化科学研究院工艺材料研究所	301
有关磨粒磨损专业的部分专家和学者名录·····		311

绪 言

摩擦学又称摩擦磨损润滑学。它是研究相对运动的相互作用表面及其有关实践的一门科学技术。或者说,它是研究相互接触的摩擦表面之间的摩擦磨损与润滑的一门科学技术。作为一门学科,它只是在英国政府于1966年公布了乔斯特提出的一份关于摩擦磨损与润滑的调查报告以后才形成的新学科,但是摩擦磨损与润滑问题,却早已为人们所注意和利用。远在史前时代,人类就利用摩擦热取火,从而最终把人类和动物区分开来,甚至可以把摩擦热取火看作是人类历史的新纪元。摩擦学对人类生活和生产有着深远的影响,人类文明随着劳动工具的发展而不断发展。早在3000年以前,古人从实践中认识到,在搬运重物时利用滚木可以节省力气。接着发明了车轮并懂得使用液体润滑剂。在中世纪的欧洲,应用石头作为有效的耐磨材料来制造耕地的犁铧和车轮的轮缘。我国早在仰韶文化时期(距今五、六千年)就应用石头制造翻地的石铲,在殷代以前发明了车子,在战国时期就已经应用耐磨的白口铸铁来制造耕地用的犁铧。这些发明和发现,都使劳动工具得到改善,从而提高了生产力。人类对摩擦现象和控制摩擦的措施已经研究了几个世纪,润滑技术和理论则是随着近代工业的形成才开始进行系统研究的。磨损问题虽在许多年代以前就为人们观察到,但对这方面的系统研究,则是近代的事,大约在本世纪四十年代后期才开始。三十多年来的研究工作表明,磨损是一个远未探明的重大科学技术领域。有人认为,摩擦学今后研究工作的重点将转移到磨损上来。甚至有人认为,磨损将从摩擦磨损与润滑学科中分离出来而成为一个独立的分支。

所有的机器设备都是依赖其零件副的相对运动而进行工作的,有相对运动必然有摩擦磨损。有人认为目前世界上应用的能源有三分之一到二分之一最终以各种方式表现为摩擦损失。由于现代工业的需要,机械产品向大型、高速、高载荷及高度自动化发展,对设备的可靠性、精度保持性、延长寿命、节约能源及降低成本等方面提出了越来越高的要求。这些要求与摩擦磨损和润滑都有密切的关系。因此,摩擦学是国内外这些年来发展较快的学科之一。根据美、英、日、西德、苏联等国早些年估计,若充分运用现有的摩擦磨损和润滑的技术,可使这些国家分别获益十几亿以至几十亿美元。我国在1975年曾对12个行业的机械产品进行了调查,由于这些产品的主要基础件使用寿命短,国家分配给这些行业的钢材大约有一半用于制造配件,而配件的大部分是用于维修。这不但消耗大量的钢材,而且占用一半以上的生产能力,给国民经济造成很大的损失。这些基础件失效的原因大部分都是由于磨损造成的。其中矿山机械、农业机械、石油机械和工程机械的磨损问题最为严重。农业机械中的耕作部件和履带板直接与土壤砂石接触,收割部件则与带有土壤颗粒的作物茎秆或块根和块茎摩擦而发生磨损。工作在田间的拖拉机和联合收割机等很难避免土壤颗粒越过各种防护措施而进入机器的摩擦副,从而造成严重的磨损。

对摩擦磨损和润滑问题的研究,其经济效益是非常巨大的。从某种意义上来说,摩擦学是减少或防止资源出现不必要的浪费的一门学问。英国人首先在这方面进行调查研究和作出估计,1966年公布的乔斯特的报告认为,如能很好地应用摩擦学知识,每年可以为英国节约5.1亿英镑。据近期的资料介绍,英国这几年来实际上节约7~10亿英镑。乔斯特在1974年还对日本的情况加以估计,认为它每年可节约120~160亿美元。近年来美国和西德也进行了类似

的估计, 据称美国每年可节约160亿美元, 西德每年可节约100亿马克。由此可见, 对摩擦学的研究在经济上蕴藏着巨大的潜力。

两个相互接触的物体产生相互移动和摩擦时, 由于对接触表面施加压力的结果, 以致接触表面的部分材料从表面上脱落或产生位移, 这种现象称为磨损。机器设备的零部件失效, 大约有80%是由于磨损造成的。苏联机械产品因磨损所造成的损失每年达100~120亿卢布, 其中农业机械占20亿卢布。在各种类型的磨损中, 以磨粒磨损最为严重。摩尔和艾尔分别对农机和一般工业机器设备的磨损问题进行分析后认为, 在所有因磨损而失效的零部件中, 磨粒磨损占40%到50%, 由此可见磨粒磨损问题在摩擦学中所占的地位。磨损现象是颇为复杂的, 但是按磨损损坏的原因大致可分为四类, 即磨粒磨损、粘着磨损、接触疲劳磨损和腐蚀——机械磨损, 其中以磨粒磨损所造成的危害最大。所谓磨粒磨损, 就是硬的颗粒或突起物在摩擦过程中, 由于力的作用使所接触的表面的部分材料产生脱落或位移。根据磨损过程作用力的不同, 磨粒磨损一般可分为三类, 即凿削式磨粒磨损(常件有一定的冲击载荷, 如挖掘机斗齿等)、高应力碾碎式磨粒磨损(如球磨机的磨球和垫板等)及低应力擦伤式磨粒磨损(如耕作机械的犁铧等)。就磨粒磨损机理来说, 世界各国学者迄今还没有统一的认识, 但是归纳起来主要有显微切削、疲劳破坏及擦伤三种假说。显微切削假说认为磨粒磨损是由于磨料颗粒在金属表面产生微量切削过程所引起的; 疲劳破坏假说认为磨粒磨损是由于磨料颗粒对材料表面产生反复的塑性变形而导致疲劳破坏所引起的; 擦伤假说则认为磨料颗粒既不产生显微切削, 也不产生疲劳破坏, 只是使金属表面受到严重塑性变形, 在其后到来的磨料颗粒的作用下, 很容易使材料表面产生颗粒脱落, 从而引起磨损。

由于磨损在摩擦学这门学科中发展较晚, 还处在开创时期, 目前对磨损的许多问题, 并没有进行过深入的系统研究。对于磨损机理的许多论据, 尤其是不够充分, 其中有些仅能算是推论。虽然磨损问题在近三十年来已引起一些学者的注意, 但是这门学科仍处于实验科学阶段和定性处理阶段。现已了解, 材料的磨损特性与材料的强度和硬度特性不同, 它不是材料固有的特性, 而是条件与材料的机械、物理及化学特性的综合表现。若条件改变, 占支配地位的磨损机理也要改变, 因而材料的磨损特性也就相应改变。过去, 大多数人都是根据耐磨材料的化学成分和硬度来确定其磨损性能, 现在则转到对整个系统进行研究。实践证明, 不但对于相同硬度的不同材料来说其相对耐磨性不同, 就是成分相同和硬度相同的材料, 由于外界环境条件不同而在耐磨性能上表现出巨大的差异。例如我国犁铧在东北粘性土壤地区的寿命为300~500亩, 在北京壤土地区为200~300亩, 在海南岛砂土中为50~80亩; 美国凯特匹勒公司的履带板试验, 在华盛顿州的寿命为6130小时, 而在亚利桑那州仅为1485小时。高锰钢在破碎较硬的矿石后材料表面硬度可上升到HV500~600, 显示了较高的耐磨性能, 而在破碎较软的石灰石或煤块时, 材料表面硬度上升很少或不升高, 表现不出高锰钢的优越性。奥氏体锰钢和含碳0.3%的合金钢制成的挖掘机拉斗唇, 在干砂中工作时寿命相同, 而在江河中挖泥时则寿命相差五倍。另有资料表明, 等温退火的组织比同样硬度的淬火和回火的组织具有更高的耐磨性。贝氏体组织比同样成分和同样硬度的马氏体组织更耐磨。马氏体与奥氏体混合组织比单纯的马氏体组织更耐磨, 甚至硬度低得多的T12钢的等温淬火贝氏体组织(HB385~415)比硬度高得多的中碳犁铧钢马氏体组织(HRC56~62)更耐磨, 经过改进的等温淬火法得到的贝氏体与马氏体混合组织, 比普通淬火回火的割草机刀片寿命高一倍以上。著名的奥氏体锰钢在土壤磨损中却表现不出优异的耐磨性能。上述情况说明, 没有任何

一种材料或组织能满足各类磨损条件的使用要求,也说明磨料本身或周围环境条件一旦改变,材料的磨损特性也就相应改变。因此,要找出防止或抑制磨损的对策,必须对整个系统进行详尽周密的研究。

关于磨损研究工作,目前世界各国在粘着磨损和接触疲劳磨损方面取得较大的进展。磨粒磨损的研究开展较晚,进度也慢。各国从事这方面研究的专家和学者也少。因此对磨粒磨损的认识上仍有很多空白。但无论如何,通过近年来的努力,已打开了磨粒磨损研究工作的局面。拉宾诺维奇于1965年、理查逊于1969年、赫鲁晓夫于1974年及摩尔于1978年先后写出总结性的评论文章,概述了磨粒磨损研究工作已取得的成就和存在的问题以及发展方向,为进一步开展此项研究工作提供了线索。

磨粒磨损研究工作的主要任务,首先是磨损机理的研究,其次是耐磨材料和抗磨技术的研究。研究磨损机理的目的在于查明在各种条件下磨损的发生和发展过程、各种因素的影响及其规律,然后才能自觉地而不是盲目地制定出减少或抑制磨损的对策,有针对性地研究新的耐磨材料和抗磨工艺,发展新的抗磨技术。磨损机理涉及磨粒的形状、粒度、锐度、硬度、强度和湿度,以及作用力的大小、冲击力的有无和是否存在腐蚀介质等因素;涉及材料成分、物理特性、化学特性、机械性能(硬度、强度、塑性、断裂韧性等)、基体组织以及碳化物成分、晶体的结构、数量、形状及其分布等因素。因此有人建议采用系统工程的方法进行研究。磨损机理研究的结果,一定要落实到耐磨材料和抗磨技术的研究工作中去,把基础理论研究转化为应用技术。本译文集在刊登有关磨损机理、耐磨材料、表面硬化技术、抗磨铸造技术和堆焊技术等方面的译文的同时,发表了农机院工艺材料研究所编写的关于磨损机理和耐磨材料以及抗磨技术等方面的综述。希望这些文章对我国开展磨粒磨损研究工作及提高机器设备的零部件寿命有所帮助。

中国农业机械化科学研究院工艺材料研究所

综 述

国外磨粒磨损机理研究工作的进展

中国农业机械化科学研究院工艺材料研究所

摘 要

关于磨粒磨损机理研究的发展过程和趋向,最初基于对磨粒磨损表面的观测,提出磨粒显微切削作用模型所得到的磨损量、耐磨性对纯金属和退火钢的硬度的关系式与试验结果相符合。注意到以磨粒显微切削作用为主的磨损过程显然和材料的最终抗断裂强度有关。从塑性断裂强度出发同样得出耐磨性与硬度的关系。观测到磨损表面上有很大的塑性变形和变形硬化,进一步建立了相对耐磨性和磨损表面硬度的关系,同时解释了磨损前的一般(没有相变)变形加工硬化能提高材料的硬度而不能提高耐磨性的问题。金属的变形硬化和其中的位错运动有密切关系,注意到磨损表面层中的位错运动,进一步解释硬质析出相对耐磨性的贡献。借助于与磨损表面层中的位错运动相关的磨损的剥离理论及考虑到磨粒作用下的应力场,又在磨损表面上用扫描电子显微镜观测到在磨粒磨损过程中裂纹的形成和扩展而导致磨损碎屑的形成,建立了磨损率和材料断裂韧性之间的关系,在这个关系中初步考虑了磨料粒度的影响,解释了韧性相的存在及在一定硬度范围内提高材料韧性对相对耐磨性的贡献。使材料磨粒磨损耐磨性和机械性能之间的关系方面的研究取得明显进展。但是对于磨粒磨损的物理过程的研究还有待进一步深入。

磨粒磨损机理是研究磨粒磨损过程中材料的磨损是怎样发生的及磨损的产物——磨屑是怎样形成的。

关于磨粒磨损机理,目前尚没有完全一致的意见。揭示金属材料磨粒磨损的物理本质(过程),确定它与材料的物理机械性能之间的关系,对于研制耐磨材料、合理选择提高材料耐磨性的工艺措施具有重要的意义。

鉴于磨粒磨损机理和整个摩擦系统的特性有关,同一种材料在不同的摩擦系统中,其磨损破坏的特征可能是不同的。因此研究磨粒磨损机理的几个重要方面是:在磨粒磨损系统中,对于磨粒(磨料)特性的分析(组成、粒度、硬度等)、介质(温度、湿度等)、磨粒对工件的作用方式(力、相对速度、方向等)的分析(以上可通称“工况条件”);对于材料磨粒磨损表面的观测(宏观的、微观的——用光学显微镜或扫描电子显微镜等);以及对磨损碎屑的分析等。

本文主要讨论磨粒以不大的相对速度作用于金属材料表面时的磨粒磨损机理。

1977年4月在美国召开的国际材料磨损会议上,泰鲍(Tabor)所作的特约报告中^[1],关于金属的磨粒磨损,他讲到:“若硬的粒子或硬的粗糙的表面切削或磨损相摩擦的表面时,发生磨粒磨损。……磨粒磨损类似于显微切削,而且磨损率相当高。……若磨粒不比被磨表面硬时,也发生一些磨损,但是速度非常低。这时过程大概可归因于疲劳而不是磨损。”还说“磨粒磨损的本质与金属被硬的物质辗滚作用变形相似。”这些论述都在一定程度上谈到了磨粒磨损机理的问题。

基于对磨粒磨损表面的观测,通常认为磨粒磨损是当磨粒以一定的角度与材料表面相接触时,作用在磨粒上的力可分解为垂直于材料表面的分力和平行于材料表面的分力。垂直分力使磨粒压入材料表面,水平分力则使压入表面的磨粒作切向运动,在材料表面产生擦伤和显微切削作用,结果在材料表面留下磨痕。当被磨损的材料具有一定的塑性时,压入的磨粒可分为两类。一类是其运动方向和棱角较有利于切削,对金属表面产生显微切削作用。另一类是压入深度较浅的圆滑的磨粒,倾向于只在材料表面造成擦伤而产生塑性变形,即在磨粒作用处材料被磨粒挤压而推移到磨粒运动路径的两侧,中间形成犁沟,两侧形成堆积隆起,这种沿着擦痕两侧堆积的材料已受到严重的塑性损伤,很容易在其他磨粒的作用下而“磨掉”。当被磨材料塑性很差时,磨沟可能是由于裂纹扩展而导致表面材料的剥落所形成。

由此可见,材料的磨粒磨损与磨粒的特性(硬度、粒度、尖角程度等)、载荷及材料的特性(硬度、强度、韧性等)有关。下面着重论述金属材料的特性与其磨粒磨损的特性之间的关系。

一、磨粒磨损与材料硬度的关系及磨粒磨损的显微切削模型

从对材料磨粒磨损进行的大量实验发现,磨损取决于磨粒的硬度 H_a 和金属材料的硬度 H_m 之间的关系,可以分为三个区域^[2,3,4,5,6](如图1所示)。

- I—低磨损区域: $H_a < H_m$ (一般在 $H_m > (1.25 \sim 1.30)H_a$ 以上);
- II—过渡磨损区域: $H_a \approx H_m$ (大约在 $0.8H_a < H_m < 1.25H_a$ 范围内);
- III—高磨损区域: $H_m < 0.8H_a$ 。

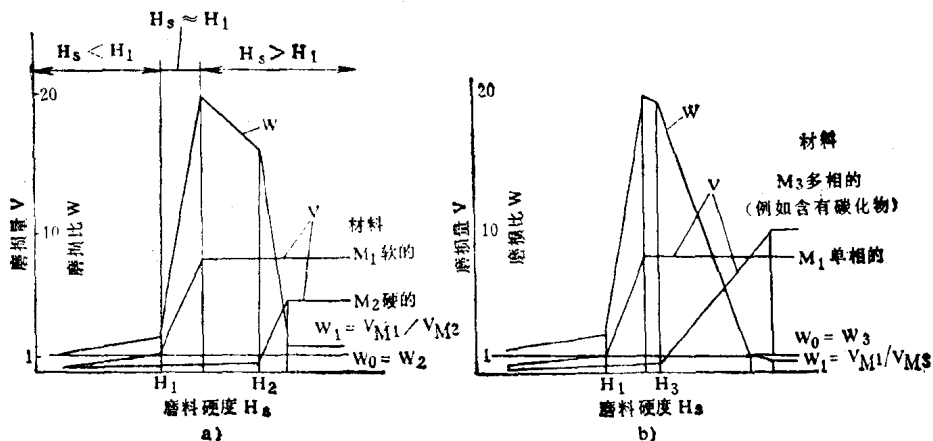


图1 金属磨粒磨损量和磨损比与磨粒硬度的关系

H_1 、 H_2 分别为材料 M_1 、 M_2 的硬度

a) 对于软和硬的单相(均质)材料 b) 对于均质和异质(多相)的材料

由此可见,要提高材料的耐磨性,就要提高其硬度。当 $H_m \approx 1.3H_a$ 时,磨损就很小了,这时再提高材料的硬度,磨损量的减小已不显著。在实际生产中广泛使用的钢铁材料,在热处理状态时,其硬度大多数为 HV600~700。实际工况中常遇到的磨料为石英,其硬度大约为 HV1000~1300。即是说,经常遇到的磨粒磨损大多数是在高磨损区域。

在这个区域里金属材料可看成是具有相对的塑性。拉宾诺维奇(Rabinowicz)曾提出简化的显微切削模型^[7](图2)。

设产生磨屑的载荷为 ΔW , 则

$$\Delta W = P \Delta A = \pi r^2 P \quad (1)$$

式中 P 是硬度。如果滑过距离为 Δl , 磨损的体积为 ΔV , x 为压入深度, 可得:

$$\Delta V = r x \cdot \Delta l = r^2 \operatorname{ctg} \theta \Delta l \quad (2)$$

由式(1)

$$r^2 = \frac{\Delta W}{\pi P}$$

代入(2), 得出:

$$\frac{\Delta V}{\Delta l} = \Delta W \operatorname{ctg} \theta / \pi P \quad (3)$$

改写成

$$\frac{dV}{dl} = W \operatorname{ctg} \theta / \pi P \quad (4)$$

式中 $\operatorname{ctg} \theta$ 为所有磨粒平均侵入角之半的余切。

由上式可看到磨损率(单位摩擦长度的磨损量)与载荷成正比, 并与材料表层硬度成反比, 同时也与磨粒的形状有关。

式(4)与阿恰德(Archard)的公式^[8]相似:

$$\frac{dV}{dl} = kW / 3P \quad (5)$$

为了统一起见, 拉宾诺维奇建议用式(5)。在阿恰德的公式中, 对于粘着磨损来说, 系数 k 是无量纲的, 形成一片磨屑的纯接触的概率。在磨粒磨损时, 它表示磨粒平均角的余切。

后来, 拉宾诺维奇^[9]又把上式写成:

$$V = \frac{\operatorname{tg} \theta \cdot L \cdot X}{3P_w} \quad (6)$$

式中 V 为磨粒在工件上滑动 X 距离的磨损量, L 为载荷, P_w 为工件的侵入硬度, $\operatorname{tg} \theta$ 为所有磨粒的粗糙角 θ 的平均正切。这是对于上述的高磨损区域的磨损量的表达式。

对于过渡磨损区域($0.8P_a < P_w < 1.25P_a$), 拉宾诺维奇指出, 这时磨损的对数值随 P_w 的对数值的升高以大约为 3.5 的斜率下降。在这个区域里:

$$V = \frac{\operatorname{tg} \theta \cdot L \cdot X}{5.3P_w} \left(\frac{P_a}{P_w} \right)^{2.5} \quad (7)$$

他给出的磨粒磨损体积与试样硬度 P_w 对磨料硬度 P_a 之比的关系, 如图3所示^[6]。

对于式(6), 若以磨损体积的倒数表示耐磨性 c_w , 对给定的载荷、磨料及摩擦的距离

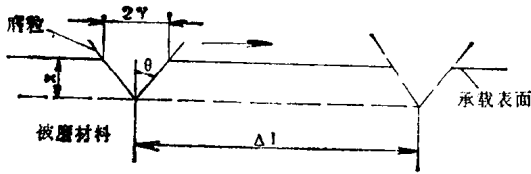


图2 圆锥体形的磨粒端部从材料表面磨掉金属的示意图

为:

$$\varepsilon_w = C \cdot H_m \quad (8)$$

可以看到, 材料的耐磨性 ε_w 和它的硬度成正比。

赫鲁晓夫 (Хрущов) 在这高磨损区域 ($H_a > H_m$) 中, 在 X4-B 型试验机上, 以电解刚玉 ($H_a = 2290$ 公斤/毫米²) 砂纸作为磨料, 对各种材料进行了固定磨粒磨损试验。以 Pb-Sn 合金作为对比的标准材料, 试验材料的硬度用金刚石锥体压痕硬度测量, 得到各种材料的相对耐磨性 ε 与其硬度 H 的关系即 ε - H 图 (图 4)。

由图 4 看到, 对于退火态的工业纯金属和退火钢, 相对耐磨性 ε_w 和材料锥体压痕硬度 H_m 有正比关系:

$$\varepsilon_w = C_{\text{金属}} \cdot H_m \quad (9)$$

这里系数 $C_{\text{金属}} = 13.8 \times 10^{-3} \cdot \text{牛顿}^{-1} \cdot \text{毫米}^2$ 对于硬的非金属材料 and 矿石, 耐磨性和硬度有类似的线性关系:

$$\varepsilon_w = C_{\text{矿物}} \cdot H_m \quad (10)$$

这里系数 $C_{\text{矿物}} = 1.3 \times 10^{-3} \cdot \text{牛顿}^{-1} \cdot \text{毫米}^2$

比较式 (8) 与式 (9)、(10) 可以看到试验结果和由显微切削模型推导的结果是一致的,

说明在固定的磨粒磨损条件下磨粒的显微切削作用起主要作用。

赫鲁晓夫得到经过正常淬火和不同温度回火的热处理钢的相对耐磨性 ε 与材料硬度 H 的关系为:

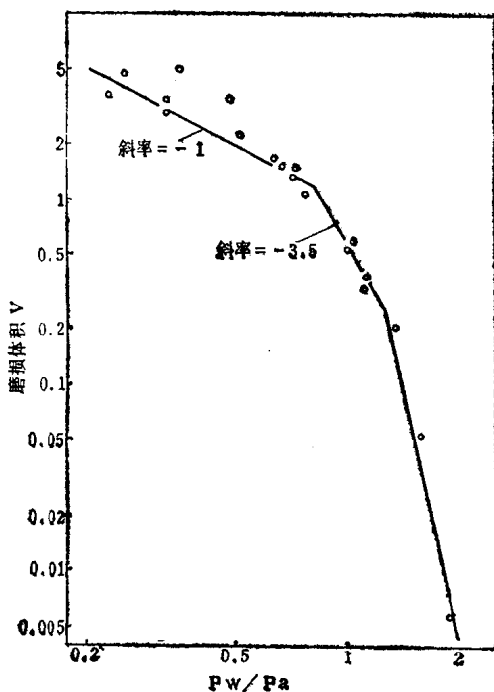


图 3 磨粒磨损体积与工件硬度对磨料硬度之比的关系

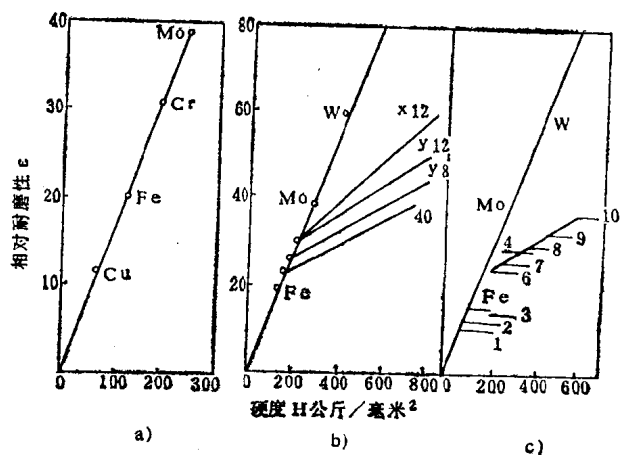


图 4 相对耐磨性与材料硬度的关系^[10]
a) 工业纯金属 b) 热处理结构钢 c) 冷作硬化材料

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + b'(H - H_0) \quad (11)$$

式中 ε_0 和 H_0 为这种钢在退火状态下的相对耐磨性和硬度, b' 为相应于各种牌号钢的斜率系数。

这样, 由图 4 和式 (9)、(11) 可以看到, 相对耐磨性和材料硬度之间并不是单值关

系。对于同样硬度而有不同成分组织的钢，其相对耐磨性不同。在相同硬度的情况下，退火态纯金属的相对耐磨性要比热处理钢高得多。同时看到，磨损试验前一般的（没有相变的）加工硬化，虽能提高材料的硬度，但是耐磨性没有提高。赫鲁晓夫认为，在磨粒磨损前，塑性变形所造成的材料加工硬化对金属的磨损影响很小，这是由于不管以前所施加的加工硬化如何，在磨粒磨损时材料达到一个极限硬度和极限流变应力。

理查逊等在类似于 X4-B 型的固定磨粒磨损试验机上进行试验，测定了一系列金属和合金的磨粒磨损表面的硬度 H_u ，描述对相对较硬的磨料（如刚玉）进行的试验及以工业纯铁为参照试样的相对耐磨性 β 与磨损表面最大硬度 H_u 的关系曲线（图5），以及相对较软的磨料的相对耐磨性 b 与 β 之比 (b/β) 与 H_u/H_a

(H_a 为磨料的硬度) 的关系曲线(图6a和图6b)。可以看到，对于 H/H_a (H 为材料的整体硬度)

来说， b/β 在 $H > 0.8H_a$ 时比 $H_u > 0.8H_a$ 时上升得快；比较图 6a 图 6b 还可看到，用较粗的磨料试验（图 6b）不如用较细的磨料试验时 b/β 随 H/H_a 上升得快。而且由图 5 已看到相对耐磨性 β 和试样表面硬度并不是完全的线性关系。相同硬度的不同材料，其相对耐磨性不同，以及这里对不同粒度磨料进行试验所得结果的差异，说明从简单的锥体显微切削模型所得到的耐磨性与材料硬度之间的关系模式，虽能在一定程度上定性地说明问题，但它过于简化了。莫顿 (Mutton) 等人的近期研究结果指出^[18]，材料的耐磨性和硬度不成线性关系，用称重法测得的材料的磨损量要比用显微切削模型估算者小得多，退火态工业纯金属由于在磨沟两侧所发生的塑性变形量相互成比例而表现出耐磨性与硬度有线性关系。

最近，辛 (Sin) 及苏 (Suh) 等研究指出^[14]，简单的切削模型和实际磨粒磨损过程之间的差距主要是由磨损表面层的塑性变形造成。在磨粒磨损过程中，在表面和近表层发生很大的塑性变形。磨粒的“犁”的作用形成隆起的脊背，它在其后多次重复变形后去掉。因此，磨损率与材料的塑性有关。他们的研究结果指出，低塑性的材料，如有机玻璃和 AISI 1095 钢通常有比塑性高的材料（如商品化的纯镍和铜）高的磨损系数。另由表 1 数据可以看到，退火态的镍和完全冷作的镍，尽管硬度相差很多，但是有几乎相同的磨损率，而且高硬度的经过冷作的镍甚至有稍高的磨损率。他们认为这是由于在磨损过程中造成的冷作的量要比金属加工过程中造成的冷作硬化的量大得多，而且预先的冷作可能已经造成了相对于退火金属加速磨损的“损伤”。在近表层中所造成的塑性变形的大小取决于由一个磨粒施加在表面上的载荷和磨粒的大小。由此可见研究磨损表面区的变形具有一定的意义。

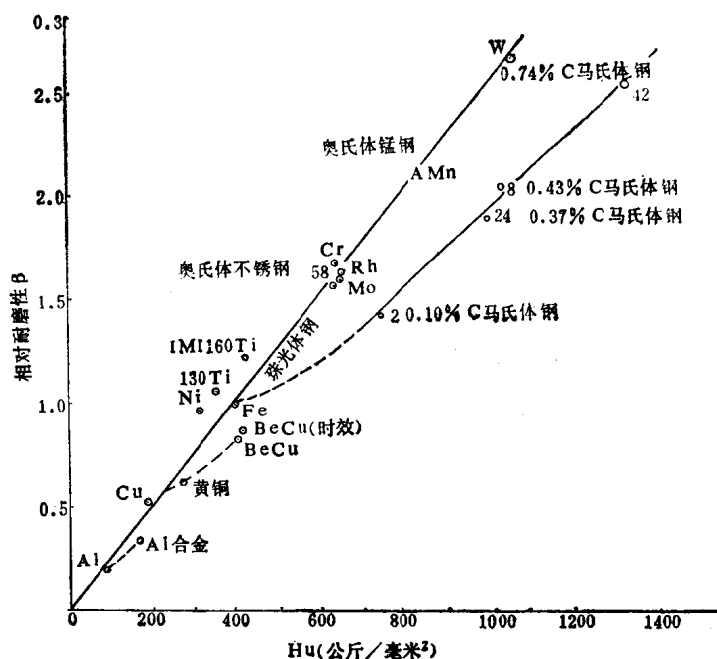


图 5 在 180 目刚玉砂布上的相对耐磨性

表1 冷作对商品化的纯镍磨粒磨损的影响

状 态	硬度 (兆帕)	磨损率 (米 ³ /米)	磨 损 系 数	试验后的硬度 (兆帕)
退 火 态	870	8.07×10^{-10}	0.053	≈ 2350
完 全 冷 作	2370	8.66×10^{-10}	0.157	≈ 2370

注：这是在 39.2 牛顿额定载荷下在 60 目粒度磨料上进行的试验。

二、关于磨损表面区的变形

摩尔(Moore) 等人在研究磨损表面的塑性变形问题中指出^[15], 磨粒磨损后, 磨损表面下 2.5 微米处最大应变大约为 2.5, 变形区的总的深度取决于磨粒的大小和所加的载荷 (见图 7a 和图 7b)。磨粒磨损试验在 X4-B 型试验机上进行, 磨程约 5 米, 磨料粒度按英国标准 410。所得到的这种相互关系可用磨沟形成的简单模型来解释, 若磨粒的大小以 d 来表示, 在砂纸的单位面积上的磨粒数 $N = K_a/d^2$, 这里 K_a 取决于磨料形状

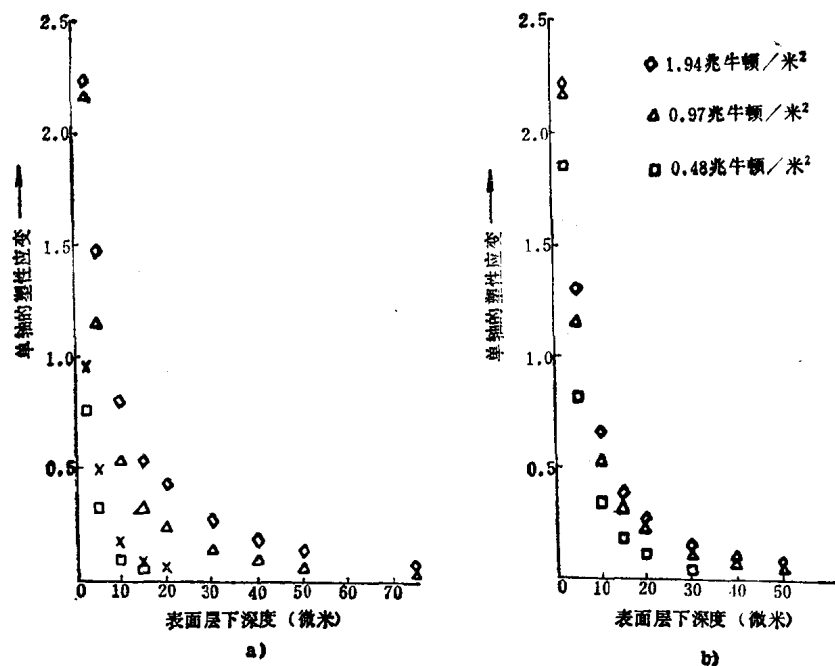


图7 磨料粒度和载荷对磨粒磨损后应变分布的影响

a) 磨料粒度的影响(◇40号, △60号, ×180号, □320号)

b) 所加载荷的影响(60号粒度磨料)

和在砂纸上分布的常数, 对于给定试样单位面积上的载荷 P , 每个磨粒上的平均载荷为: $P/(k_h N)$ 。 k_h 为与试样相接触的磨粒的百分数, 其值根据磨粒在砂纸上的高度分布而定。若磨粒的形状不取决于它们的大小, 由一个磨粒造成的计算压痕的面积为 $A = K_g p^2$, 其中 p 是磨粒的压入深度, K_g 是取决于磨粒形状的系数。这样若把磨粒的作用考虑为一个有一定形状的擦伤压头, 试样的硬度为 $H = Pd^2/K_a \cdot K_g \cdot k_h \cdot p^2$, 即:

$$H \propto P(d/p)^2 \quad (12)$$

若试样硬度与载荷、压痕深度和加载速度无关, 压痕深度为:

$$p \propto P^{1/2} \cdot d \quad (13)$$

在磨粒磨损时, 塑性变形的深度与 P 成线性关系。在磨损表面下的塑性变形区内, 深度 D 处的应变取决于无量纲比 D/p , 由 (13) 式得:

$$\epsilon = \epsilon[D/(P^{1/2} \cdot d)] \quad (14)$$