

磨料磨损与耐磨合金

(译文集)

西安交通大学耐磨课题组
西安电力机械厂耐磨件试制组

电力工业出版社

.72-53

磨料磨损与耐磨合金

(译文集)

西安交通大学耐磨课题组
西安电力机械厂耐磨件试制组

电力工业出版社

内 容 提 要

磨料磨损是破碎、研磨、运输机械中常见的一种现象。本译文集内容包括磨料磨损的基本理论，国外使用耐磨材料的化学成分、生产工艺、金相组织和机械性能，研究耐磨材料的情况等。可供冶金、矿山、建材、电力、机械等工业从事耐磨机械设备的设计、生产和研究人员参考。

磨料磨损与耐磨合金

(译文集)

西安交通大学耐磨课题组
西安电力机械厂耐磨件试制组

*

电力工业出版社出版
(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售
水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 9印张 199千字
1980年1月第一版 1980年1月北京第一次印刷
印数 0001—5170册 每册 0.95元
书号 15036·4006

前 言

随着我国重工业的发展，在冶金、矿山、建材、电力、机械工业中，对破碎、制粉、清理、排浆等各种设备提出更高的要求。不断提高这些设备主要部件的可靠性和耐久性具有十分重要的意义。

电力工业是国民经济的“先行”。随着发电机组的参数和单机容量的不断增大，火力发电厂制粉系统、除灰排渣系统广泛采用各种大功率的高效设备，运行条件更为恶化。一些易损件的早期失效，不仅浪费大量的人力、物力、财力，而且给安全经济发供电带来严重的威胁。因此，提高燃烧系统中易磨损件的使用寿命，成为发展我国电力工业的重要课题之一。

一九七三年以来，西安电力机械厂等单位开始承担电厂制粉系统易磨损件的科研攻关任务，由西安交通大学铸工教研室协作配合。在几年的联合科研攻关实践中，根据我国资源情况，研制了Mn-Cr-Cu-Mo系和高铬系耐磨白口铁，并已应用于部分产品，获得了较为满意的效果。同时，我们学习了外国在耐磨材质方面的科技资料，编译了这本《磨料磨损与耐磨合金》译文集，以供从事这方面工作的科技人员和工作参考。

本译文集内容包括：磨料磨损的机理、部分耐磨材质的成分、有关工艺、典型产品的应用情况等。

本译文集的翻译和校核工作由西安交通大学王小同、余滋璋、周庆德、陆文华、饶启昌负责，西安电力机械厂陈正

华、唐秉壮、师学梯等同志协同工作。编译过程中曾得到两个单位领导和同志们的大力支持，谨此表示感谢。

由于编译者水平有限，错误之处，恳请读者指正。

编译者

一九七九年四月

目 录

前 言
绪 言 (1)

第 一 部 分

一、磨料磨损的基本原理.....E.拉宾诺维奇(24)
二、磨料磨损R.C.D.理查森(42)

第 二 部 分

三、耐磨材料在国际上的应用
..... 克来梅克斯钼公司(52)
四、磨料磨损(摘译)C.F.沃尔顿(73)
五、在破碎、研磨、材料运输过程中合金白口铁的应用
.....R. W. 德曼(83)

第 三 部 分

六、耐磨高铬白口铁..... W.费赫斯特等(100)
七、用于抗磨料磨损的 15%Cr-Ni-Mo 马氏体白口铁
..... G. J.科克斯(128)
八、复合马氏体白口铁——性能和应用
..... P. C.肯普(146)
九、高铬白口铸铁的物理性能.....И. Я.比亚科娃等(162)

第 四 部 分

十、马氏体合金铸铁的生产、应用及发展
.....G.L.赫里森等(170)

- 十一、用于磨料磨损的Cr-Mo白口铁
.....W. 费赫斯特等(198)
- 十二、作为抗磨材料的含铜合金白口铁的发展
.....J. 迪累威恩斯等(214)
- 十三、成分、冷却速度和热处理对一种新型耐磨
白口铁性能的影响..... J.C. T. 弗吉等(239)

第 五 部 分

- 十四、白口铁的机械性能和耐磨性
..... S. 佩雷特等(253)
- 十五、粉碎硬矿石用的耐磨铸造合金
..... M. II. 勃拉乌恩等(278)

绪 言

本译文集共选辑了十五篇有关磨料磨损和耐磨合金的译文。我们由于研制火力发电厂制粉系统易磨损件的需要，查阅了一些国外资料。为了便于有关人员参考，选译了一些重要的文献。本译文集就是在这个基础上选辑的。

一

十五篇译文共分为五个部分：第一部分是关于磨料磨损的基本理论，有两篇；第二部分是关于国外破碎、研磨行业中使用耐磨材料的实际情况，有三篇；第三部分是关于高铬型耐磨白口铸铁的化学成分、生产工艺、金相组织、机械性能及其抗磨能力，有四篇；第四部分是关于镍硬型耐磨白口铸铁的成分、工艺、组织、性能及其抗磨能力，有四篇；第五部分则是介绍研究耐磨材料抗磨性的一般情况，有两篇。

我们开始参加研制工作时，没有能够查阅到有关制粉设备中耐磨材料的设计资料和技术文献，所以只能从手册和杂志中查阅国外有关破碎、研磨行业中使用耐磨材料实际情况的一般资料，从中了解国外制粉行业中使用耐磨材料的情况。第二部分的三篇译文就是在这一阶段选译出来的。我们分析了国外的实际使用情况，认识到高锰钢在一定的使用条件下是很好的耐磨材料，并且在调整成分、改革工艺后，还能大大提高其机械性能和抗磨能力；但是在另一些使用条件下，高锰钢却不适用，不能成为耐磨材料。在这种情况下，

为了适应生产需要，研究和发展的许多耐磨材料。在这许多耐磨材料中，镍硬型白口铸铁和高铬型白口铸铁尤为突出。

这两种耐磨白口铸铁都是在四十年代初期研制成功的。镍硬型白口铸铁由于生产工艺方便(可以在冲天炉中熔炼)，较早地得到推广使用；而高铬型白口铸铁则于六十年代以后，由于电炉熔炼普遍采用才得到推广使用。高铬型白口铸铁由于其成分设计的特点，具有比镍硬型白口铸铁更好的组织、性能和抗磨能力。这样，我们就着重查阅这两个方面的技术文献，翻译了其中比较重要的几篇。第三部分四篇就是关于高铬型耐磨白口铸铁的；第四部分四篇就是关于镍硬型耐磨白口铸铁的。

在查阅和翻译这些技术文献时，我们深刻地感到学习磨损的基本理论对深入理解技术文献内容是很有必要的。因此，学习了一些教科书和有关磨料磨损的专著，并从中选译了第一部分的两篇文章。在此之外，我们还译了登载在 *Wear* 杂志28卷(1974年)一月号69~88页上的[苏]赫鲁晓夫著：“磨料磨损原理”一篇，后来看到武汉材料保护研究所编辑出版的“摩擦磨损译文集(一)”上已经译载了这篇文章，我们这里便不再刊登了。在该译文集(一)中还译载了[美]汽车工程师协会钢铁技术委员会报告“磨料磨损”和[英]P.L. 哈里克斯著：“控制钢的抗粘着磨损和磨料磨损的一些冶金因素(评述)”一文。这两篇文章对我们学习磨料磨损的基本理论也有很大的用处，为了避免重复，这里也不再译载。

二

我们在学习磨料磨损基本原理的文献时，感到这方面的

论述比较头绪纷繁。其原因是由于这方面研究工作的历史较短,各个研究单位各自使用不同的方法研究其所面临的问题,其所得结论就可能有一定的分歧。关于摩擦和磨损研究的历史,拉宾诺维奇在其所写的《材料的摩擦和磨损》(1965)教材的导言中有一简单的描述,现译述在这里,对我们学习这个课题是有益的。

“在这里,简单地描述有关我们对于摩擦、磨损和粘着的知识的发展过程,可能是有用的。关于摩擦,由于一方面它是物质的普遍特性,因而自然科学家有志于此,另一方面它又是影响机件运行的最重要因素之一,因而工程技术人员关心于此,所以对于摩擦的现象进行了最彻底的观测调研。

在工程技术方面,摩擦有更长的渊源。摩擦的一个实际应用,亦即利用摩擦热取火,其根源在史前时代。摩擦的另一个应用,表示出人们对摩擦现象的理解,即在搬运重物时利用雪撬、滚木或车轮,并辅以液体润滑剂,以减少所需的人力,这一事件可以追溯到三千年以前。

比起这些可以叙述的应用来,关于摩擦现象的科学研究,则只是很近代的事。关于物体在运动中的摩擦,即动摩擦的研究,那只能是牛顿第一定律发表以后的成果,因此说那是十七世纪和后续几个世纪的产物。

早期关于摩擦的研究工作者包括阿门顿斯(1699),科隆布(1785)和莫里恩(1833)等。这些科学家和工程师假设摩擦力是由于互相接触的物体表面上的粗糙度,或者说是表面上的机械突出点的互相作用而造成的;根据这种假定,就能解释为什么摩擦力和载荷成比例而和接触面积的大小没有关系。关于摩擦现象的这种解释一般称为“粗糙度假设”。在阅读他们的著作时,清楚地看出他们曾严肃地对待

另一种解释，即摩擦力是由于互相接触的物体表面间的粘着力造成的解释。他们否定这种“粘着力假设”，因为这种假设意味着摩擦力是和接触面积的大小成比例的，是和实验证明相违背的。

经过整个十九世纪，而且还进入二十世纪，这种粗糙度假设一直是多数人的观点。不过从二十世纪二十年代开始，由于哈迪（1919）和汤姆林森（1929）等科学家的研究工作，开始有了恢复粘着力假设的想法。在那个时期，由于兰米尔等人在二十世纪之初的工作，表面化学这门科学得到良好的发展，已完全有可能来研究具有不同污染程度的表面之间的摩擦性能。改变表面的污染程度，所造成的摩擦力有很大的差别，看来这个实验只能比较容易地用粘着力假设来解释而不能用粗糙度假设来解释。但是根据粘着力假设，摩擦力应该和接触面积成比例，这个论点和实验证明不符的难题仍然保留着。

在1940年左右，由于三个不同的研究集体，从很不相同的基础上研究了这方面的问题，扫清了这个疑难。这些研究工作是：霍尔姆（1938）研究电触点的性能，欧恩斯特和默琴特（1940）研究金属切削的过程，以及鲍登和塔博尔（1942）有了研究表面化学的经验。这些研究工作者都指出，在“外观接触面积”和“实际接触面积”之间存在着严格的差异，而只有实际接触面积决定摩擦力的大小。由于实际接触面积可以表达为：与载荷成正比而与外观接触面积没有关系，所以粘着力假设现在就能用来解释摩擦力和（外观）接触面积大小没有关系这一个实验成果了。

从那时起，对于详细研究摩擦过程以及造成摩擦力的原因的兴趣逐渐增加。实际接触面积是由大量的细小接触区，

或者称为‘结合点’组成的。许多研究工作，从理论方面以及从实验方面，来研究接触点的大小、形状、强度、变形及其存在周期。这个工作的成果是，证明了既有必要、也有可能修正粘着力假设，使我们现在有一个合理的综合性的全面知识。

力学领域内的研究工作者和教师们几乎完全没有注意到这个摩擦理论的发展经过，这真是一件怪事。他们仍然坚持粗糙度假设，坚持‘光滑’表面和‘无摩擦’表面是同义语。尽管贝利和科特尼-普拉特于1955年指出，由解理而形成的两个云母片具有原子一级的光滑表面之间，表现出极大的摩擦，他们还是这样坚持着。

关于磨损和粘着的现象，显然也在许多年代以前为人们所观察到，但对这方面的系统研究，则是极为近代的事，因此这方面的历史也只能写得极其简短。在磨损方面，研究工作的高潮是在四十年代的后期。在那个时候，作为核能时代的副产品，工程用普通金属的放射性同位素成为通用的试剂，这就使得研究磨损可在磨损过程中进行，而不必在磨损过程之前和磨损之后进行两次测量。必须指出，相对于磨损过程的极大经济重要性而说，在这方面从事研究工作的人数实在是太少了。

对于粘着的早期研究工作，大部分是为了研究表面间相互作用的方式而进行的，其目的在于这种研究能增加人们对于摩擦过程的知识（例如麦克法累和塔博尔，1950的工作）。早期对于磨损的研究工作（拉宾诺维奇和塔博尔，1951），在某种程度上，也是这个样子的。……”

在这里，关于磨损方面的研究工作的情况说得过于简单了。D.H.巴克利在“在磨损基本性质的研究工作中表面分

析仪器的应用”（载Wear杂志1978年一月号）一文的导言中，有一段介绍这方面历史的叙述，译载于此，以作补充参考。

“霍尔姆于1946年提出一个磨损理论^①，这个理论考虑到磨损是在原子一级上进行的，认为在互相接触的两个固体之间，原子和原子通过界面起作用。但是在磨损研究史的那个阶段，不能用实验来证明这个理论，因此未能被广泛接受作为论证磨损实质的有用工具。其后，伯韦耳和斯特伦季（1952），阿恰德（1953），赫鲁晓夫和巴比切夫（1941）等人提出了一系列磨损理论，他们和霍尔姆一样，也考虑几个相同的材料性能参数，即载荷和硬度，但是他们只在宏观上进行研究而没有在原子一级上进行研究。这些理论得到广泛的接受，因为这些理论所研讨的磨损是那些只用肉眼或者辅之以普通光学显微镜而不需其它仪器就能看到的磨损。

到了五十年代后期，拉宾诺维奇再次把磨损的原子作用的概念引进到磨损过程中来。在这个混合的磨损理论中，以表面能的形式表现出来的表面的原子性质和材料的总体机械性能（即材料对总体变形的流变抗力）一起都得到重视。这个理论，由于它的简单明白，以及其计算方法中所需的常数比较容易查到，曾经获得普遍接受。

最近提出的一些磨损理论，例如萨赫（1973）和维季赫^②（1975）等的理论，都曾考虑到材料的原子性质。萨赫研究了位错的运动；维季赫则研究了原子内聚结合能。”

这两部分的介绍虽然很简单，但从中可以看出：（1）

① 霍尔姆关于电触点的论文，首次是在1938年于杂志中发表的，其后在1946年写成专书出版。

② 萨赫(Suh)的论文发表在Wear杂志1973年25卷上，武汉材保所译文集已译载全文；维季赫(Vijh)的论文发表在Wear杂志1975年35卷上——译者。

关于摩擦、磨损、润滑（最近把这三部分的总体称为摩擦学）的科学研究工作是从四十年代开始的，到现在还不到四十年，可以说是一门年轻的科学。（2）关于磨损的研究，在工程技术方面虽然有比较长的历史，但在科学研究方面，一直只是作为研究摩擦的辅助工作来做的。把磨损现象作为独立的课题来进行系统的研究，只是最近的事情。所以说，研究磨损的历史更短，因此，许多理论还是不很成熟的。

1977年四月，由美国五个学会联合组织，开了一次材料磨损的国际会议。与会者来自十四国的350位代表，分16组，宣读了85篇论文。会议论文集已经出版，Wear杂志1978年一月号选登了其中的二十三篇论文，作为一个专辑。杂志的编辑部文章写道：“会议主席宣称，磨损课题，范围广阔，很难在与磨损有密切联系的各部分之间，划定磨损课题的界限。因此没有一个成为磨损课题‘老家’的科技协会。不过这次会议引起了许多研究工作者的注意，要成立一个讨论他们工作的广大论坛。看来我们已经到了把‘磨损’作为‘摩擦与润滑’一个分枝的结束时期了。”这一段话更能说明磨损研究工作发展的历史情况和现状。

我们在查阅文献中，除了关心磨损理论方面的科学研究工作以外，也注意了工程技术部门在磨损方面进行的试验工作。初步，我们查到了美国克来梅克斯铝公司的科研部门长期以来对这方面进行了大量的工作，一部分以论文的形式在各种期刊上发表，另一部分以该公司科研部门技术报告的形式发表。1974年，该公司还组织了一次“采矿工业用材料”会议，出版了会议录。此外，美国材料试验学会（ASTM）于1969年和1977年两次出版了关于磨损试验方法的专刊STP

446和STP615。英国农业工程研究所近十几年来有 R.C.D. 理查森和M.A.穆尔等人从事这方面的试验工作，其报告也分别在各种期刊上发表。

三

“没有万能的磨损试验”^①，这句话充分说明磨损现象的复杂。不但在不同的机械部件上表现出不同的磨损现象，就是在同一机械部件上，工作条件有所改变时，表现出来的磨损现象也有所不同。过去曾经有人试图对每一种现象提出一种磨损机理，但是始终不能搞清磨损的本质问题。五十年代初期，几个研究中心综合分析了大量研究工作，初步提出了这样的一个意见：磨损现象虽然纷繁复杂，但是都有一个“磨屑”脱离母体的过程。从磨屑形成过程的观点来看，基本上有四种不同的磨损类型：

(1) 粘合磨损 两个光滑的金属表面在压力下作相对滑行时，界面上的实际接触面积可能结合起来（焊合），同时，不在结合面断裂而在突出部的本体中断裂，这就使某一表面上的金属磨屑脱离其本体。

(2) 磨料磨损 一个粗糙的硬质金属表面（例如锉刀表面），在压力作用下在一个软金属光滑平面上滑行时，粗硬的突出点将压入软金属表面并把它‘犁’出一道道沟槽。犁沟是切削作用，所以原来在沟中的金属就被切削成磨屑而脱离其本体。

^① 引自武汉材保所译文集第一篇《磨料磨损—J965》第三节“磨料磨损耐磨性试验”。该书3页左栏。

砂纸和砂轮在金属表面上进行磨削时，情况与此相同，所以也属于磨料磨损，不过这里粗的硬粒磨料已经不是金属而是非金属的硬质颗粒，如果磨料是固定在摩擦平面上的，这类型式的磨料磨损称为两体磨损。如果磨料不是固定的而是松散地在压力作用下在两个金属表面之间滑行（例如在平盘磨中研磨矿石，矿石成为磨料，在磨辊的压力作用下，在磨盘表面和磨辊表面之间滑行）时，它对金属所起的切削作用应当也是相同的，也属于磨料磨损。但这类型式的磨料磨损则称为三体磨损。

（3）腐蚀磨损 这种磨损是在腐蚀介质存在时发生的。在腐蚀条件下，在金属表面将形成一层腐蚀产物。如果金属表面间没有相对滑行时，这层腐蚀产物将延缓或阻止腐蚀作用的进行；但有相对滑行时，这层腐蚀产物将被磨损掉，使金属受到继续的腐蚀和磨损。

（4）表面疲劳磨损 例如在滚动轴承中，滚珠与滚道之间的接触点上，其作用力是短暂的，但这种作用是不断地反复进行的。这样多次反复的加载和卸载，可能导致在接触面上以及在稍低于接触面的皮下形成垂直于或者平行于接触面的疲劳裂纹。这些裂纹的扩张以及互相交割，可能使金属表面开裂，以至剥落——磨屑脱离母体。这种磨损就称为表面疲劳磨损。

虽然关于这四种基本磨损类型本身还有许多争论，但是在这个基础上，磨损的研究工作却取得了显著的成绩。这种意见认为，在生产实际上遇到的磨损现象之所以纷繁复杂，就是因为在每一个实际磨损现象中，不可能只有一种磨损过程在起作用，而是几种过程都在起作用；根据工作条件（如压力大小，速度快慢，温度高低，介质的性质，金属的硬度

和磨屑的硬度等)的不同,起主要作用的磨损型式便有所不同,而且各种磨损型式还能互相影响。这就指出在研究磨损问题和耐磨材料时,首先必须弄清楚工作条件的具体情况以及起主要作用的磨损型式,然后才能选用适当的方法——改变工作条件或者改用材料,以提高耐磨件的寿命。

破碎、研磨机械中受磨件的磨损,起主要作用的是磨料磨损。本集选辑的文章都是属于磨料磨损的。关于磨料磨损的研究工作,拉宾诺维奇于1965年,理查森于1969年,赫鲁晓夫于1974年,都先后写了总结性的评论文章。在这几篇文章中都讨论了几个具有规律性的问题,这些讨论对我们研究磨料磨损具有指导作用。下面说一说我们对于学习这几个问题的体会。

(一) 关于磨料磨损的模型问题

为了推导磨料磨损的定量公式,一般都采用本集第一篇中所用的简单模型(如图1-1所示),假定磨料是锥形的,在压力作用下锥头压入较软金属的基体,在平行力的推动下,磨料对软金属表面作平行滑动,磨料的锥头在滑行中用切削的方法从基体中切去一定体积的磨屑。其表达式为

$$\frac{dV}{dl} = \frac{\Delta L \tan \theta}{\pi \cdot P}。$$

式中 dV/dl —— 滑行单位长度中被切削下来的软金属的磨屑体积;

ΔL —— 磨粒所承受的载荷;

P —— 软金属的硬度;

θ —— 磨粒锥面和软金属基体水平面的夹角,是表示磨粒特性的常数。