

磨损失效分析案例汇集

磨损失效分析案例编委会编

本书介绍机械零件磨损失效分析的思路、实验技术并通过 35 个案例说明如何运用摩擦学理论及材料科学知识解决实际问题，是近年来这一领域的研究成果，它反映了高等院校、科研单位和厂矿企业（包括冶金、矿山、采煤、选煤、农机、建材、发电设备及其它机械设备等方面）为提高零部件的耐磨性和经济效益所做的努力。书中提供了许多有益资料和 500 多幅磨损的典型特征照片，对从事耐磨材料研究、磨损理论和实验研究的工程技术人员、大专院校师生有重要的参考价值。

磨损失效分析案例汇集

磨损失效分析案例编委会编

*

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证出字第 117 号）

湖南衡阳市全球装潢印刷厂印刷

海华新技术开发中心发行

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $20 \frac{1}{4}$ · 插页 · 字数 493 千字

1985 年 10 月湖南第一版 · 1985 年 10 月湖南第一次印刷

印数 00,001 — 12,000 定价 7.00 元

*

统一书号 15033 · 6293 H

序

磨损是摩擦学三大基本内容（摩擦、磨损、润滑）之一，磨损又是金属机械零件失效的三种主要形式（磨损、疲劳、腐蚀）之一。随着科学技术的日益发展，材料与能源的节约变得越来越重要，减少磨损的任何措施，都可节约材料和能源、人力和物力，因此防磨与抗磨对社会主义建设具有重大的意义。

在工业比较发达的一些国家里，据估计，目前能源消耗约有三分之一是由于摩擦和磨损造成的。自从1965年英国的教育科研部提出关于摩擦学教育和研究报告以后，人们日益感到摩擦和磨损对整个工业的影响。H·Peter Jost 曾经估计美国每年为摩擦和磨损开支了1000亿美元。据西德研究和技术部估计，摩擦和磨损使西德国民经济每年损失约100亿马克，其中一半是由于磨料磨损所造成的。另据美国技术评议局（OAT）的报导，美国切削机床每年维护费为750亿美元，铁道车辆为30亿美元，而一架值勤海军飞机每个飞行小时的磨损消耗值为245美元，耗油费只有376美元，可见磨损消耗之大。磨料磨损又在磨损中占十分重要的地位，例如在农业机械中，40%的配件是由于磨料磨损消耗了的，其它如矿山、建筑、煤炭、电力及铸造机械中磨料磨损也十分严重。除此以外，冲蚀磨损所造成的损失也很大，据报导，直升飞机发动机吸入尘雾使寿命缩短90%，管道输送干磷酸盐时管壁的磨损率可达 $1.65 \text{ in} / \text{Mt}$ ，我国有些煤矿管道输送原煤浆时的磨损率达 $1\text{mm} / 15000 \text{ t}$ 。

对于磨损问题有组织的研究工作我国开始得并不太晚，六十年代初期中国科学院曾在兰州召开第一次全国摩擦、磨损与润滑研究工作会议，有关课题也列入了全国科学规划。1975年机械部召开的摩擦磨损与润滑会议上曾对12个行业提出调查报告。报告中指出，国家分配给机械部各行业的钢材有一半做了配件，而配件的大部分又用于维修。例如1974年汽车产值为16.6亿元，耗用钢材27万t，配件产值为14亿元，耗用钢材23万t，其中绝大部分用于维修易磨损件，可见磨损的严重性，目前我国还正在大力组织进行各行业摩擦磨损情况的调查研究。

摩擦与磨损对人类的生活与生产有着深远的影响。摩擦生火使人与动物分开。车的发明是一种由滚动摩擦代替滑动摩擦、减少摩擦磨损的实例，我国在这方面发明也是很早的。但摩擦磨损的研究工作长期只限于力学的范畴内，阿·通·库伦（Amontons - Coulomb）定律几乎统治了两个世纪。磨损是一种十分复杂的现象，它所涉及的科学技术范围甚广，特别是磨损是一种微观的和动态的过程，仅从力学的角度去研究显然是无法解决摩擦磨损这一复杂问题的，所以摩擦磨损的研究，几个世纪以来虽有所进展，但速度较慢。直到本世纪五十年代，特别是六十年代以后，由于电子显微镜的大量和普遍的应用，磨损的研究工作才迅速地发展起来。扫描电子显微镜、透射电子显微镜结合其它一些新技术，如与俄歇电子能谱技术，x射线光电谱技术、扫描离子谱和离子衍射谱技术等联用起来，加以铁谱技术的发展，使得磨损在机理、失效分析、监测和维修各方面都有了很大的发展。

磨损研究工作的发展，对减少机器磨损、提高耐磨寿命起着决定性的作用。据美国机械工程学会的报告，美国在1976年花在交通运输、发电、透平机械和工业生产四个主要领域中

有关发展摩擦磨损研究方面的费用约 2400 万美元,而总节约量估计为美国每年能源消耗的 11 %,约相当于 160 亿美元。可见在投资方面虽化些费用,但对整个国民经济来说所得却是成千万倍的节约。

磨损失效分析是研究和解决磨损问题的前提和关键,要减轻机器零件的磨损,选择适当的耐磨材料和提出合理的耐磨方案,首先必须解剖造成磨损的原因。不仅如此,通过磨损失效分析,还能揭露材料的磨损机理,丰富磨损的理论。

刘英杰同志等选择矿山、发电、建材、采煤、农机以及其它几个方面的典型易磨损件,根据服役条件,结合现场和实验室试验,进行宏观和微观的分析,研究失效原因,指出经济意义,并提出抗磨措施和改进后效,同时也探讨了材料的磨损过程和机理。本书不仅有总结我国磨损失效研究成果的意义,同时也具有普及磨损失效的分析方法和技术以及推动此项工作深入发展的作用。本书是从事这方面的教学及科研人员几年来工作的成果,是目前我国第一本正式出版物,预计这本书的出版对学科的发展和四化建设将起积极促进的作用,值得庆喜。

本书既来之于实践,但也不乏理论分析,适合于厂矿科研单位从事磨损研究和设备维护等人员参考之用,也可做为大专院校师生的阅读资料,故乐予推荐并乐予之序。

邵荷生 1985.6

前 言

本书的 35 个案例是近几年来在磨损失效分析,特别是在磨料磨损失效分析方面的研究成果。机械工业部十分重视这方面的研究工作,早在 1979 年底就考虑安排典型零件磨损特征图谱这项课题,1981 年机械工业部重型矿山局、机械科学研究院又强调了研究这个课题的重要性。经研究,拟定为磨损失效分析案例,并出版《磨损失效分析案例汇集》,内容包括典型零件的磨损特征照片、分析说明和提高零件耐磨性的途径,争取做到图文并茂。这一设想得到了机械工业部的支持,1983 年正式列为课题,由清华大学负责组织全国各有关单位共同完成这项任务。同时,在国家科委支持的摩擦学研究课题的磨料磨损机理研究部分中,也安排了磨料磨损失效分析方面的研究内容。中国机械工程学会材料学会建立了磨损失效分析及耐磨材料的学术组织,四年时间内召开了三次学术交流会,促进了磨损失效分析的研究工作。机械研究院负责检查、督促课题进度。经过各方面的努力,通过四年的实验研究,又花费一年的总结提高和编写,初步完成了这项任务。1985 年 6 月将出稿交机械工业出版社,出版社的领导考虑到本书对提高我国磨损实验研究水平和提高易磨损零件寿命的实用性,争取以较快速度较高质量出版,尽快与读者见面。经过编辑、版面设计、封面设计、插图、贴字等方面工作人员与编委会的共同努力密切合作,终于完成了编辑出版工作。湖南省衡阳市科委、计委大力支持本书的印刷工作,安排全球装潢印刷厂印刷。经过印刷厂三个多月的努力使本书与读者见面了,在此感谢各有关部门领导和同志们的支持和帮助。

书中的案例是全国许多厂矿、研究院所和大专院校单独或合作完成的,现将完成单位和作者列在各案例的末尾,以便于对某个案例有兴趣的读者和案例作者直接联系。磨损失效分析案例编委会的成员见后。

磨损失效分析领域的研究历史不长,案例中所分析零件的服役工况条件差别很大,往往零件的磨损发生过程不同,各位作者对零件分析的深度不同,甚至同类零件分析观点也不完全一致。在编写过程中,对观点差异没有进行修改,保留了作者的原意,希望和读者共同研究、探讨,活跃学术空气。

由于编委会成员水平所限,难免有错误和不当之处,望广大读者批评指正。

磨损失效分析案例编委会
1985.10,

磨损失效分析案例编委会

顾问	邵荷生	陈南平	王小同
	陈玉民	陈长庚	
主编	刘英杰		
编委	梁建球	白新桂	姜振雄
	周平安	李石林	吴永根
	周忠林	杨崇铨	胡增文
	李茂林	金克强	沈天一
	许小棣	成克强	景焕然
	张绪江		

目 录

序

前言

磨损失效分析概述	1
第一部分 矿山机械典型零件的磨损失效分析	6
案例1: 挖掘机斗齿的磨损失效分析	13
案例2: 4m ³ 挖掘机镶铸高铬白口铁斗齿的磨损失效分析	20
案例3: 斗轮式挖掘机斗齿的失效分析	27
案例4: 楔齿滚刀的磨损失效分析	32
案例5: 圆锥式破碎机衬板磨损失效分析	38
案例6: 腭式破碎机齿板失效分析	51
案例7: 锤式破碎机锤头磨损失效分析(1)	67
案例8: 锤式破碎机锤头磨损失效分析(2)	75
案例9: 球磨机衬板磨损失效分析(1)	80
案例10: 球磨机衬板磨损失效分析(2)	94
案例11: 球磨机衬板磨损失效分析(3)	102
案例12: 磨球磨损失效分析(1)	111
案例13: 磨球磨损失效分析(2)	118
案例14: 高铬铸球失效分析(3)	130
案例15: 4PH杂质泵过流部件——护套的磨损失效分析	141
第二部分 采煤、选煤机械典型磨损零件失效分析	146
案例16: 刮板输送机中部槽磨损失效分析	147
案例17: 采煤机截齿的磨损失效分析	154
案例18: 矿用截齿磨损失效分析	162
案例19: 采煤机油泵配油盘失效分析	170
案例20: 条缝筛板、弧形筛板及筛篮磨损失效分析	176
案例21: 重介斜轮选煤机排矸轮腐蚀磨损失效分析	183
第三部分 农业机械典型零件磨损失效分析	193
案例22: 拖拉机履带板的磨损失效分析	196
案例23: 犁铧的磨损失效分析	204
案例24: 调质轧花机锯片的磨损失效分析	220
案例25: 粉碎机锤片的磨损失效分析	227
案例26: 榨轴磨损失效分析	236
案例27: 锥磨磨面机磨头失效分析	243

第四部分 发电设备易磨损件失效分析	246
案例28: 风扇磨煤机打击板磨损失效分析	251
案例29: 风扇磨煤机护勾、护甲磨损失效分析	267
案例30: 水轮机叶片失效分析	274
案例31: 金属材料的汽蚀破坏过程分析	282
第五部分 其它机械设备零件失效分析	289
案例32: 抛丸机叶片磨损失效分析(1)	290
案例33: 抛丸机叶片磨损失效分析(2)	297
案例34: 泥浆泵缸套—活塞磨损失效分析	305
案例35: 高锰钢铸件断裂的失效分析	314

磨损失效分析概述

近几年来,国内磨损失效分析的研究发展很快,通过对典型磨损零件的失效分析,对深入了解零件的磨损过程、合理选材、正确的制定工艺、指导设计和改善设备的维护保养等方面都起到了重要作用。由于磨损过程是个十分复杂的过程,机械设备零件的磨损机理还很不完善,还有许多本质问题没有揭示出来,为了将实验室的研究与实际使用零件的磨损过程紧密结合起来,对磨损零件进行失效分析是有其特殊意义的。

机械零件磨损失效分析,与机械设备的失效分析有共同点也有区别。共同点是分析设备或零件未达到预期使用要求的原因,采取措施,提高零件的使用寿命。其区别在于磨损零件的损坏原因很明显,就是磨损所致。不同磨损类型的零件也容易区分,提高零件使用寿命的方法决定于磨损类型,这往往与零件的使用条件、运转参量有密切关系。不同工况条件下零件磨损的过程不完全一样,通过对磨损零件的失效分析,可较深入地揭示不同磨损系统中零件的磨损过程,为深入研究磨损机理提供许多有益的信息,为合理选用耐磨材料提供可靠的依据。

本书选择了35个典型零件的失效分析案例,提供给生产耐磨零件厂和耐磨零件使用厂技术人员作为参考,可与本厂使用或生产同类零件对比,了解这些零件的磨损过程,分析选材是否合理,积累第一手材料,以便对更多的磨损零件进行失效分析,促进这项研究工作的深入发展。也为研究机关科技人员和高等学校师生提供一些生产实际资料,促进理论与生产实际密切结合。此书的出版希望能为发展生产力,提高我国机械产品的质量起到促进作用。

本书大部分案例的内容是介绍磨料磨损类型零件的失效分析,其磨损失效分析的思路 and 有关的实验技术对其它类型磨损零件的失效分析也有参考价值。

为了便于读者更快地理解案例的内容,在此,对书中的共同性问题做一概述。

一、进行磨损研究的意义

1966年,英国(H. Peter Jost)提出调查报告以后,各国学者纷纷调查本国由于摩擦、磨损及润滑等方面造成的经济损失。据最新资料统计,美国机械设备零件的磨损,腐蚀和断裂的三种主要失效形式所造成的经济损失很接近,分别占国民生产总值的4%左右。如果其使用寿命延长一倍,相当于国民经济总值提高2%。而研究抗磨损措施的费用十分有限,仅占1%就可取得明显效果,这说明进行磨损研究意义十分重大。

在各类磨损形式中,磨料磨损所造成的经济损失最为严重,约占总经济损失的50%以上。特别是冶金、矿山、建材生产、煤炭生产、水力及火力发电、农业和粮油加工等的机械设备上的许多零件的磨损所造成的经济损失更为严重。仅备件费就耗资达30亿元。

此外,磨损理论研究也是很重要的。虽然磨损现象到处可见,摩擦磨损的理论还很不成熟,一方面它涉及许多学科的理论及实验技术;另一方面又有其相对的系统性、动态性的特点,使得研究进展缓慢。这就需要投入更多的人力、物力以揭示其规律。

二、磨损及磨损分类

当两个接触物体发生相对运动,某物体表面物质发生流失的现象,称为发生了磨损。到

目前为止,关于磨损的定义还处于争论阶段。美国机械工程师协会的定义为:“由于机械作用而造成物体表面材料的逐渐损耗”。苏联(I. V. Kragelski)的定义为“由于摩擦结合力的反复扰动而造成材料的破坏”。欧洲合作发展组织的定义为:“由于表面的相对运动使物体工作表面逐渐丧失物质”。并且指出,磨损通常是有害的,但某些零件磨合阶段的轻微磨损可能有益;轻微的塑性变形,几乎在所有的磨损过程都会发生。总之,随着对磨损研究的深入,磨损的定义会逐渐确切、统一起来。

同样,磨损的分类也存在着争论,可以按磨损发生的主要机理来分类;也可以按磨物特性及对磨物之间相互作用状态分类。现按一般分类方法磨损分为五类:

1. 磨料磨损;
2. 粘着磨损;
3. 疲劳磨损;
4. 冲蚀磨损;
5. 微动磨损。

本“汇集”的案例主要是磨料磨损及冲蚀磨损零件的失效分析结果。而磨料磨损又可分为①凿削式磨料磨损;②高应力辗碎式磨料磨损;③低应力擦伤磨料磨损。冲蚀磨损又可分为冲刷、冲击两类。许多冲蚀磨损零件的磨损过程中还伴有腐蚀和气蚀的综合作用,它们加速了磨损的过程。

三、磨损机理

磨损机理就是研究两个相对运动物体界面上物理化学变化的规律。磨料磨损是研究磨料颗粒与材料表面相互作用过程的物理化学变化规律,以及磨损系统中各参量变化对磨损特性的影响规律。

研究磨损机理的方法通常是把复杂的自然现象或系统,分解成几个主要过程,分别研究它们的规律及现象的本质,对主要规律进行综合,提出物理模型并用数学式给以定量的表达。

由磨料、机械零件及运转参量和环境介质组成的磨损系统,随着系统中某参量变化,反映磨损系统特性的综合指标——材料的耐磨性也将发生变化,即决定磨料磨损过程的主要机理将发生变化。磨料与零件相互作用的主要方式有两种类型:滑动及变形。即磨粒以一定速度接触并压入表面切削材料或使材料变形,所以材料的磨损机理则可分为:

1. 切削磨损;
2. 变形磨损;
3. 脆断和剥落磨损。

所谓切削磨损就是与零件接触的磨料中某些颗粒像刨刀刨削那样的,使材料以微细切屑状的颗粒逐步从零件表面流失。此种情况下磨粒对材料的磨损称为切削磨损。这些能切削材料的颗粒具有前导面与零件表面法线之间的夹角比临界迎角更大的角度,否则只能使材料表面变形,而不能形成那些有剪切皱折的磨屑。

所谓变形磨损是指相对零件表面而滑动的那些以犁沟、推挤、辗压等方式使材料变形的磨粒,磨粒以一定速度压入零件表面,多次压入,使材料多次变形。这些材料变形超过它的强度极限而最后以微细薄片状颗粒从零件表面流失。称为变形磨损。材料的应变疲劳强度对磨损率影响最大。

所谓脆断和剥落,是指如果材料很脆、或者材料内部有脆性相,在磨粒与材料相互作用

过程中,以脆性断裂方式使材料以微细颗粒从零件表面流失的磨损。或硬脆性相周围的材料被磨粒选择性磨掉,使脆性相失去支撑而脱落。

一个零件的磨损过程,往往不是一种机理在起作用,而是几种机理的综合作用,甚至是几种磨损类型的综合作用。尽管如此还是有一种磨损机理起决定性作用,它与整个磨损系统的特性有关系。

许多文献把斗齿和颞式破碎机齿板都列入凿削式磨损,但是斗齿与岩石相互作用的方式是撞击及沿齿面滑动,其磨损机理主要是切削磨损及犁沟(变形磨损)。对高锰钢来说,有冲击加工硬化效应,变形层厚度可达4~6mm。对合金钢一类材料来说,变形层厚度仅0.01~0.2mm。但是,齿板与矿石相互作用的方式不是滑动,确切的说是矿石棱角刺入表面形成压坑并将坑中的金属挤出发生塑性变形。矿石多次压入金属表面,变形金属多次变形,最后碎裂,以薄片状从零件表面脱落。如果有脆性相,而矿石的硬度与之相当或更硬,这些脆性相有被压碎的现象,这是脆断剥落机理起作用。

在磨粒沿零件表面滑动时,摩擦和磨损过程中的生热是不容忽视的问题,生热的多少取决于磨损系统参量。生热可以使零件表面回火软化、再结晶、退火或重新淬火,产生绝热剪切层,甚至使表面一薄层熔化形成非晶态层。这些物理化学变化对磨损过程有重要影响。从许多磨损失效零件表面可以观察到这种特征,目前其规律还不甚清楚。

绝热剪切层,又称为白层,是磨损过程中零件表面形成的一种特殊性能的组织结构,耐腐蚀、高硬度是其特殊性能,是超细晶粒马氏体组织。产生的原因是由于磨损过程中,金属大变形快速变形,使金属变形层的热量瞬时升高,而热量又不能及时地向周围传递,在变形及温度的综合作用下,使变形层的组织结构发生了变化。白层的形成与耐磨性关系也是需要进一步深入研究的问题,通常认为白层的产生标志着这种材料容易产生塑性失稳,对零件的抗磨性是不利的。例如高锰钢就不容易塑性失稳,所以在最恶劣工况条件下还具有相当好的耐磨性。

从磨损失效零件上观察分析磨损发生发展的过程,对研究磨损机理是非常重要的。

四、磨损失效分析

机械零件的失效有三种方式:断裂、腐蚀和磨损,分析零件损坏导致机械设备不能正常运转的技术科学称为失效分析。通过对许多事故的失效分析,使人们认识到了失效分析对提高产品质量的重要性,促使了许多新学科的形成和发展。例如:对火炮炸膛事故的分析推动了金属学的发展,由于对火车轴的低应力脆断事故的分析就提出了疲劳断裂和疲劳极限的概念,逐步形成了“疲劳”这一分支学科;对二千多艘货轮脆断事故及火箭、导弹等脆断事故进行失效分析推动了断裂力学的形成和发展等等。同时,也促进了失效分析方法本身的发展。

磨损是机器零件及各种工具损坏的主要原因之一,对磨损零件进行失效分析是失效分析技术和思路在这一领域中的实际应用。随着近代工业的迅速发展,要求获得高精度,高质量的优等零件以确保机器正常和高效能地运转,并尽可能地减少材料和能源的损失。因此,对磨损零件的失效分析愈加受到重视,这本汇集就是近几年来,国内的研究成果。

(一) 磨损失效分析的步骤

1. 收集原始资料

当机械设备或零件发生了磨损,首先要掌握它们的设计依据、选材原则、制造工艺、使用条件、运转参量、环境条件、操作情况、服役历史以及经济消耗等基本情况,并应注意收

集保管好损坏的样品

当我们计划分析某个没有达到预期使用要求的磨损零件时，特别要掌握其工况条件，如果是矿山机械设备，那么零件的磨损与矿石或岩石的性能有密切的关系。除查找有关技术档案资料外，必要时测定矿石的硬度、抗压强度等性能指标。

收集和积累原始资料是对机器零件进行磨损失效分析的基础，过去往往由于对原始情况不明或提供错误甚至是臆想的数据而作出错误的判断是值得引以为戒的。

2. 收集具有新鲜磨损表面的零件残体这是进行磨损失效分析工作中的关键环节。它是判断零件磨损类型和失效原因的主要依据。

3. 判断零件磨损类型。

4. 为了搞清磨损发生过程及分析表面材料所承受的应力状态，需对零件亚表层进行分析，测定变形层的厚度和变形硬化程度、裂纹形成的部位及裂纹扩展的特征。

5. 测定磨损零件材质的各种性能，如机械性能、组织状态、化学成分、钢中气体含量等。

6. 从零件的磨损系统中回收磨屑，对磨屑的形貌、组织结构变化进行分析，为找到磨损失效的原因提供更可靠的依据。当然，有许多工况条件下不可能回收磨屑，就应在模拟试验中争取得到。

7. 进行必要的实验室内的模拟试验，为提出改进措施，选择最佳方案提供依据。

8. 综合上述结果，判定零件早期失效原因，提出提高零件寿命的措施。

(二) 磨损失效分析的主要内容

1. 磨损表面分析

要进行宏观和微观形貌分析。这是磨损零件的第一个直接的资料，它代表了该零件在一定的工况条件下，设备的运转特性，也一定程度的反映了磨损的发生发展过程，所以对磨损失效零件表面要严格保护，防止碰撞损坏或长锈。

在生产现场可以使用放大镜，实物显微镜等设备观察，观察磨损表面的宏观特征，为了进一步分析磨损发生过程，了解工况条件对磨损过程的影响，还必须进行微观分析，可使用扫描电镜等分析设备分析判断。

2. 磨损亚表层分析

在磨损表面下相当厚的一层金属，在磨损过程中发生了重大变化，这就为判断磨损发生过程提供了重要依据。这种突出变化有：①冷作硬化；②产生磨损热效应；③先受到磨损的组织发生相变；④裂纹的形成和扩展；⑤元素的转移，等等。

3. 磨屑的形貌及结构分析

磨屑是磨损过程中的产物，它最能代表对磨物相互作用过程中瞬时状态，如形貌和磨屑内部组织结构变化能表明磨损机理，内部结构变化能代表对磨物相互作用的严重程度。磨屑的回收有两种 一种是从磨损系统中直接回收并用双色显微镜或扫描电镜观察，例如：铁谱技术用于监测齿轮箱、轴承的运转。再如从面粉或水泥中回收磨屑进行分析。另一种是在与工况条件类似的模拟试验机上进行磨损试验回收磨屑，这比直接从磨损系统中回收磨屑来分析磨损过程要差一些。

(三) 磨损失效分析过程中的取样和制样

1. 从现场收集到的零件磨损残体必须是新鲜磨损表面的零件，用无水乙醇、丙酮、乙

醚一类有机溶剂擦洗后，迅速贴上醋酸纤维素薄膜，必要时可贴2~3层，也可涂抹无酸碱性油脂，然后贴上一层纸，用麻布片包好运到实验室。寒冷冬天或潮湿的夏天，最好将磨损零件残体放在烘箱中，于40~50℃烘烤2h，然后采取上述保护磨损表面措施。

2. 切取试样最好选用电火花线切割机，按要求部位切取，如果样品太厚可用电火花切片机切取。砂轮切片机的热影响区较大，一般情况下最好不用。

线切割机的热影响区约0.5mm，制备金相样品时务必去掉。在观察磨损表面时，可能会残存电火花熔球，其大小约几微米，有时熔球会存留在样品的裂缝中，防止产生对图像的误解。防止的办法是在线切割的样品上涂以较厚的无腐蚀性油脂，清洗时能洗掉。清洗用超声波清洗器仔细清洗样品，第一次20~30min，第二次10~20min。

电火花切片机的热影响区较大，通常有2mm左右，而且表面十分粗糙，最好在磨床上磨掉，磨后表面还有0.1mm左右的变形层，特别是高锰钢一类材料变形层较厚，宜用电解抛光的方法，制备金相样品时也要考虑用化学抛光试剂。

下面收集了矿山机械、采煤、选煤机械、农业机械和电力机械设备中共35个典型磨损零件的失效分析案例提供给读者，供进一步深入研究参考。这些案例分析的深度不同：进行分析所要达到的目的也不同：同一种零件由于不同作者，可能观点或提法存在着差异，这些都是正常的。因为磨损失效分析这门科学还正在发展，正在深入。但是，磨损失效分析都为进一步认识磨损发生过程，为合理选择材料、工艺提供了可靠的依据。

第一部分 矿山机械典型零件 的磨损失效分析

磨料磨损方式是各类磨损类型中造成经济损失最为严重的一类。仅冶金、电力、建材、煤炭、农机等五个部门不完全的统计，每年消耗钢材备件达百万吨以上，耗资 20 亿元以上。再加上兴修水利、港口建设、筑路工程、交通运输、国防工程、化肥生产等部门的磨料磨损所造成的经济损失就更为可观了。

能源、建材、冶金、煤炭等部门是若干年内国民经济发展的重点，就是说由于磨料磨损所消耗的钢材备件还要大幅度增加。如果使各类易磨损零件的耐磨性提高一倍，每年可节约备件资金达 20 亿元。

下面以一个矿山为例，说明五种典型易磨损零件的消耗。我国多数铁矿属低品位矿（含铁量 30 ~ 40 %），选出的精矿粉含铁量要达到 65 % 以上。因而破碎，研磨的矿石量就比高品位矿增加很多。黑色冶金矿山生产精矿粉的工序主要是：①钻孔爆破；②采掘、装载运输；③破碎；④研磨磁选；⑤精矿粉输送及尾矿排除。下面是一个矿山的各主要工序磨损件消耗的状况以及造成的经济损失。

矿山每年：	剥离岩石	3000 万 t
	采掘矿石	1200 万 t
	生产精矿粉	350 万 t

所消耗的主要备件及费用见表

主要工序	钻 孔	采 掘	破 碎	研 磨	排 尾 矿
主要磨损零件名称数量	潜孔钻头	4 M ³ 挖掘机	各种型号破碎机衬板	端衬板 486 t	灰渣泵壳、 叶轮、 挡板、 护套
	年进尺 412 km	斗齿 130 kg / 支		筒衬板 1298 t	
	耗费钻头 1000 支	合 260 t 2000 支		磨球 8500 t (钢) 3500 t (铁)	
价 值	47 万元	47 万元	45 万元	825.7 万元	30 万元

表中所列的易磨损零件所耗费的总金额达 1000 万元，但这只是磨损零件总费用的 30 ~ 50 %。这个矿矿石的普氏硬度 $f = 12 \sim 14$ ，研磨每吨矿石消耗约 1 kg 的磨球。另一个矿的普氏硬度 $f = 14 \sim 16$ ，则研磨每吨矿石消耗 1.4 kg 磨球。说明上表中所提供数字是消耗量的下限。如果全国生产生铁 3000 万 t，则精矿粉需要 5000 万 t，消耗的易磨损件量，再加上生产各种有色金属所消耗的易磨损件量就达 60 万 t。

上述五种易磨损件可分为三种磨损，即凿削式磨料磨损；高应力磨料磨损和冲蚀磨损，国外同类零件的寿命一般比国内生产的备件寿命高 1 ~ 2.5 倍。有的甚至高 5 ~ 7 倍，这说明

提高这些易磨损件寿命的潜力还是很大的。

一、钻孔用钻头及刀具

开发矿山时在岩石上钻孔是不可缺少的工序。孔钻成以后,填入炸药对岩石进行爆破,把岩石炸碎以供挖掘机采掘。

在钻孔工序中常用潜孔钻和牙轮钻两种。钻头的形状结构不相同。最常用的还是潜孔钻,潜孔钻头磨损失效的实例如图 01-1 所示。它是在钢制钻头上压嵌有硬质合金球形压头。工



图 01-1 磨损失效的潜孔钻头 $\frac{1}{4} \times \frac{4}{5} \times$



a) 楔齿滚刀



b) "NCT" 刀具

图 01-2 开发竖井用刀具形状

作时靠硬质合金压头与岩石对磨，将岩石研磨成碎块或粉末，用压缩空气将岩石粉末吹出所钻的孔。所以硬质合金的耐磨性就决定潜孔钻头的寿命。如果硬质合金碎裂脱落，则钻头的寿命更短。图 01-1 中几支潜孔钻中多数是属于硬质合金压头的碎裂。

为开发地下煤炭需建设竖井，竖井的直径可达 4~9 m，这样就要把十几把刀具固定在一个大圆盘上，使刀具与岩石对磨，刀具的寿命对钻井的效率影响很大。图 01-2 是刀具的外形，其磨损类型属于高应力碾碎式磨料磨损，楔齿滚刀（图 01-2a）的齿及 NCT 刀具（图 01-2b）的硬质合金球就是抗磨损的关键部位。

二、挖掘机斗齿

我国目前有 2 万台以上不同型号的挖掘机在各种不同的工况条件下使用，图 01-3 是一台 2 m³ 挖掘机正在剥离岩石的工作状况。设备中的斗齿是消耗量很大的易磨损件。一个大型水利工程或中等规模矿山通常有 10 台以上挖掘机处于使用状态，每年消耗的斗齿备件达几百吨，价值 60 至 70 万元，

如果矿石或岩石的普氏硬度 $f = 16 \sim 18$ ，则消耗量还要增加。近年来发展的露天煤矿连续采煤的斗轮式挖掘机在剥离砂岩一类岩层时，每三天就要更换 48 支~72 支斗齿，使设备不能连续运转。

斗齿的磨损被国外学者归于凿削式磨料磨损一类，实际上斗齿的工况条件不同，挖掘机的型号不同，斗齿的磨损过程差异很大，其使用寿命在几天至几个月的范围内。大型



图 1 挖掘机斗齿工作状况

图 01-3 2 m³ 挖掘机剥离岩石的工作状况

挖掘机，工况条件恶劣，斗齿的消耗量就大。当斗齿接触岩石时，有一个撞击作用。斗齿插入岩石堆时，是岩石在齿面上滑动，岩石的棱角从斗齿表面切削或犁削材料。所以斗齿的磨损是由于撞击和磨料在高应力下滑动作用方式，为切削及变形机理占支配地位的磨损。如果是斗轮式挖掘机，则冲撞力大大减小；如果是松散土砂，则冲击和接触应力均减小；如果磨料很软，象石灰石一类的岩石，则岩石棱角不能刺入斗齿表面，岩石在齿面上滑动时，也不能切削或犁削表面，起支配作用的磨损机理就要改变，应力和应变疲劳作用将起主要作用。

某些斗齿要求能具有自磨刃特性，如斗轮挖掘机斗齿要求在使用过程中能在齿尖部位自磨锐利，这样可减少切割阻力。有些 2m³ 挖掘机的使用单位也提出了这种要求。

由于大型挖掘机所服役的工况条件恶劣，对斗齿材质要求很高，要求斗齿在保证不断裂的情况下尽可能的提高耐磨性。多年来，许多单位投入很大的力量研究提高斗齿寿命的措施。到目前为止，绝大多数斗齿还是用高锰钢制造，但仍不能满足生产的需要。提高斗齿耐磨性的方法有：①在高锰钢成分的基础上加入少量合金元素，如 V、Ti、Mo 等，采取两次加热

冷却方法,使高锰钢奥氏体基体上弥散分布着硬的碳化物质点,提高耐磨性;②在高锰钢斗齿上或低碳低合金钢斗齿上堆焊耐磨层来提高耐磨性。堆焊层可以用等离子喷焊或火焰堆焊法堆焊耐磨层;③用高锰钢做支撑体材料镶铸钢结硬质合金或高铬白口铁等类耐磨块提高耐磨性,这种新工艺可以保证斗齿韧性又有较好的耐磨性,它能成倍提高使用寿命;④发展具有较好韧性的低合金铸钢斗齿,使其显微组织为贝氏体或板条状马氏体,多用于 1m^3 挖掘机以下的小型斗齿等等。

三、破碎机易磨损件

破碎机主要有圆锥式破碎机、颚式破碎机和锤式破碎机。这些设备广泛用于冶金矿山选矿流程中对矿石的初破、细破;在建筑材料生产中破碎石英、长石等玻璃原材料,破碎花岗岩、大理石等装饰材料,破碎石灰石、高炉炉渣等水泥原材料等。在发电厂中用于破碎煤或煤矸石等。

有色或黑色冶金矿山使用的破碎机,破碎的物料块度大而且硬,对设备的要求高,要求大的破碎比,消耗功率小,多采用圆锥式破碎机。破碎机的衬板是典型易磨损件,提高易磨损件的使用寿命,对提高工效、减少成本都是十分重要的。某些矿山也用颚式破碎机,但多用于二次破碎。颚式破碎机主要用于建材生产流程中,它所破碎物料的硬度与许多矿石硬度不相上下,但这些岩石压碎强度稍低一些,石灰石一类岩石就软得多,而砂纸、砂布用的棕刚玉、碳化硅和石榴子石、石英石等物料又是较硬的,不同硬度物料对齿板磨损快慢不同,其主要磨损机理也不同。在水泥生产或玻璃生产中许多工厂使用锤式破碎机,用于破碎石英、长石、炉渣等。在一些发电厂中用于破碎煤、煤矸石的锤头,板锤是消耗量大的易磨损件。

多年来,这类易磨损件被归入凿削式磨料磨损,属于严重磨损;但是,它不同于斗齿一类零件的磨损发生过程;三种破碎设备中易磨损件的磨损过程本质也不同。甚至矿料改变或制造易磨损件的材质改变对零件的磨损发生过程也有影响,这方面的规律还不十分清楚,通过后面的几个案例可以看到这三种典型易磨损件磨损机理的差别。

四、研磨过程中的易磨损件

把矿石、水泥、煤炭等物料研磨成细粉需使用各种型号球磨机。选矿用球磨机多用湿磨。水泥熟料的研磨多是带有一定温度的干磨,温度有时可达 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。把煤磨成细粉送入锅炉燃烧,煤中往往含有一定水份,又常夹有石块,这对球磨机的易损件寿命也有一定影响。由于研磨物料不同,干或湿的状态不同,磨机型号不同,则对抗磨零件的选择和成分设计应区别对待。

球磨机中的易磨损件——衬板和磨球——是所有零件中消耗量最大,损耗材料最多的两种零件。1980年冶金部统计衬板的总消耗量为21万t,加上建材、电机部门,则衬板的消耗量可达30万t,几乎占全年钢产量的1%。目前多数球磨机衬板用的还是高锰钢,完全有可能用其它材料代用提高寿命,如果能提高寿命20%,则经济效益达亿元以上。据1980年统计,磨球的年消耗量达60万t左右,如果磨球的寿命提高一倍,则有2亿元以上的经济效益。

目前国内使用的磨球有两类,即锻钢球和铸铁球,以使用锻钢球为主。由于锻钢球以轧钢料头为原料,钢种的成分差异很大,影响了制造工艺的稳定控制,难于保证磨球的质量,致使磨球单耗在大范围内波动。根据初步调查,火电厂钢球单耗为 $200\sim 500\text{g/t}$ 煤,水泥厂钢球单耗为 $700\sim 1000\text{g/t}$ 水泥;矿山选矿用钢球单耗为 $1300\sim 1700\text{g/t}$ 矿左右。若球质量未达到要求,则单耗大大超过上述上限值。为了提高磨球的寿命,降低单耗,近年来国内进行了