

# 陶瓷颗粒增强钢铁基空间构型 耐磨复合材料

— 蒋业华 李祖来 卢德宏 隋育栋◎著 —

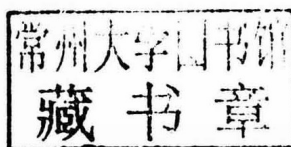
增刊



科学出版社

# 陶瓷颗粒增强钢铁基空间构型 耐磨复合材料

蒋业华 李祖来 卢德宏 隋育栋 著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

陶瓷颗粒增强钢铁基空间构型耐磨复合材料研究的科学与技术问题主要涉及界面设计及控制、结构设计、高品质制备技术和性能评价及工业应用等四个方面。本书围绕这四个方面的问题,介绍活化型界面、润湿型界面和反应型界面等界面设计原理与方法;介绍蜂窝构型复合材料和三维互穿网络构型复合材料的结构设计和方法;介绍无压浸渗过程中的反应浸渗技术原理及其分析过程;介绍陶瓷颗粒增强钢铁基空间构型耐磨复合材料综合性能评价体系和方法;介绍蜂窝构型复合材料在耐磨产品中的应用情况及失效分析。本书对空间构型复合材料的基本概念和未来发展形势也进行了描述。

本书适合从事金属基空间构型复合材料研究的学者和相关领域的教师、学生阅读,也可作为工程材料课程的参考教材;还可供耐磨材料及复合材料领域的工程技术人员和经营管理人员阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

陶瓷颗粒增强钢铁基空间构型耐磨复合材料 / 蒋业华等著. —北京:科学出版社, 2019.4

ISBN 978-7-03-060989-2

I. ①陶… II. ①蒋… III. ①金属基复合材料 IV. ①TB333.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第066418号

责任编辑:陈雅娴 侯晓敏 / 责任校对:何艳萍

责任印制:张 伟 / 封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京九州迅驰传媒文化有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019年4月第一版 开本:720×1000 B5

2019年4月第一次印刷 印张:14 1/2

字数:284 000

定价:89.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

材料是人类物质生活和社会文明进步的基础。随着工业的发展和科技的进步,传统的单一材料越来越难满足现代科技应用的需要。复合材料作为现代材料的一个重要分支和研究方向,其发展的工业化水平已经成为衡量一个国家或地区科技与经济实力的标志之一。陶瓷颗粒增强钢铁基复合材料作为复合材料的重要组成部分,由于其具备金属的韧性和陶瓷颗粒的强度而被广泛应用于耐磨损领域。陶瓷颗粒增强钢铁基空间构型复合材料利用了陶瓷颗粒预制体结构的优势,进一步提升了复合材料的综合性能,在水泥、矿山机械等领域有着巨大的应用前景。

目前陶瓷颗粒增强钢铁基空间构型复合材料的界面设计、结构设计和制备工艺尚未形成系统的理论,且国内关于空间构型复合材料的相关研究仍停留在实验室阶段,未实现工业化生产。昆明理工大学蒋业华教授课题组鉴于以上情况,提出了反应型界面设计、蜂窝构型复合材料反应浸渗等理论,并着力将这些基础理论应用于生产中,最终形成了本书的核心内容。本书关于陶瓷颗粒增强钢铁基空间构型复合材料的设计理论与经验均经过了工程实践的考验。本书填补了国内关于颗粒增强钢铁基空间构型复合材料基础理论及应用研究的空白,对于促进其走上产业化之路乃至整个金属基复合材料的蓬勃发展都起着举足轻重的作用。随着现代科学技术的不断发展,制备方法的不断完善和创新,这种空间构型复合材料有望突破瓶颈,得到进一步发展。

本书第1章对耐磨材料、陶瓷颗粒增强金属基耐磨复合材料和空间构型复合材料的基本概念及其内涵做了较为深入的分析 and 解释。第2章详细阐述了非浸润型陶瓷颗粒增强钢铁基复合材料活化型界面、润湿型界面和反应型界面的设计原理及依据。第3章详细论述了空间构型耐磨复合材料结构设计及其制备技术,并阐述复合材料的界面反应理论。第4章论述陶瓷颗粒增强钢铁基空间构型复合材料的组织及性能。第5章主要介绍锤头、板锤、磨辊、衬板等耐磨件的复合成型技术,以此为背景指导工业化生产,并分析空间构型复合材料耐磨铸件的使用情况。

本书由蒋业华主持撰写,并负责撰写反应型界面设计、润湿型界面设计、蜂窝构型复合材料结构设计、反应浸渗理论、工业化应用等核心内容(第2章大部分、第3章、第5章等),李祖来负责撰写第1章等内容,卢德宏负责撰写活化型

界面相关理论、组织及性能等内容(2.3节、4.2节等),隋育栋负责撰写第4章其他内容。全书由蒋业华统稿。

本书相关分析和研究主要依托于金属先进凝固成形及装备技术国家地方联合工程实验室,内容是对多年来课题组关于陶瓷颗粒增强钢铁基空间构型复合材料研究的系统性总结。在相关工作开展及本书撰写过程中始终得到了周荣教授的指导和帮助,在此表示由衷感谢!同时,以下人员也参与了部分研究工作,他们是(排名不分先后):侯占东、温放放、杜军、刘光亮、周谟金、张孝足、贾元伟、王楠、汝娟坚、余晶、李海舟、廖冲等。作者在此表达由衷地感谢!

周荣教授在本研究开展和论著撰写过程中提供了很多指导和建设性意见,作者在此对周教授的指导和关心表示衷心的感谢。本书的相关内容是对国家自然科学基金“ZTA 蜂窝陶瓷增强铁基复合材料界面过渡层的形成机制及其对磨料磨损性能的影响”(资助号:50871048)、“基于合金元素活化预制坯的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{p}$ /钢复合材料的挤压铸造和界面研究”(资助号:51265019)和“空间结构韧化钢基复合材料的冲击磨料磨损行为”(资助号:51461025),以及云南省发改委高新技术产业发展项目“蜂窝状陶瓷/钢铁基表层复合耐磨构件凝固成形控制关键技术及工程应用”(项目批复文号:云发改高技[2014]1264号)研究结果的归纳总结,作者对项目的支持表示衷心的感谢!本书涉及的复合材料产业化工作得到了重庆罗曼耐磨材料公司的大力支持,在此一并表示感谢!

由于作者的理论水平和编写经验有限,书中难免有不妥之处,敬请广大读者批评指正。

作者

2019年1月

# 目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 耐磨材料的发展及现状	1
1.2.1 磨损及其影响因素	1
1.2.2 金属耐磨材料	11
1.2.3 非金属耐磨材料	17
1.2.4 耐磨材料存在的问题及不足	21
1.3 复合材料的定义及分类	22
1.3.1 复合材料的定义	22
1.3.2 复合材料的分类	23
1.4 陶瓷颗粒增强金属基耐磨复合材料的发展现状	27
1.4.1 陶瓷颗粒增强金属基复合材料	27
1.4.2 陶瓷颗粒增强钢铁基复合材料	31
1.4.3 陶瓷颗粒增强金属基复合材料制备技术	33
1.4.4 陶瓷颗粒增强金属基复合材料的界面润湿性	36
1.4.5 颗粒增强金属基复合材料存在的主要问题	38
1.5 空间构型复合材料制备及研究	39
1.5.1 空间构型复合材料分类	39
1.5.2 空间构型复合材料的制备技术	41
1.5.3 构型复合材料工业化应用中急需解决的关键技术	43
1.6 颗粒增强金属基复合材料的发展趋势	44
1.6.1 复合工况下陶瓷颗粒增强金属基表层复合材料开发及制造技术	46
1.6.2 先进陶瓷增强钢铁基表层复合耐磨构件凝固成型控制及热处理关键技术	47
1.6.3 陶瓷颗粒增强金属基表层复合材料的界面设计及控制技术	48
第 2 章 陶瓷颗粒增强钢铁基复合材料的界面设计	50
2.1 陶瓷颗粒增强钢铁基复合材料的组元及界面	50
2.1.1 复合材料的组元选择	50
2.1.2 复合材料的界面	51
2.2 与钢铁界面润湿良好的 ZTA 陶瓷设计	55
2.2.1 ZTA 陶瓷的制备	56

2.2.2	陶瓷与金属熔体之间的润湿	58
2.2.3	电熔 ZTA 陶瓷的组织	61
2.2.4	粉末烧结 ZTA 陶瓷的组织与性能	63
2.3	颗粒增强钢铁基复合材料的界面活化设计	68
2.3.1	Ti 活化对复合材料的影响	70
2.3.2	Ni 活化对复合材料的影响	72
2.3.3	Mn 活化对复合材料的影响	75
2.3.4	Cr 活化对复合材料的影响	76
2.3.5	TiO <sub>2</sub> 活化对复合材料的影响	77
2.4	颗粒增强钢铁基复合材料界面润湿设计	81
2.4.1	离子液体中 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 陶瓷表面化学镀镍	82
2.4.2	离子液体中 ZTA 陶瓷表面化学镀镍	86
2.5	颗粒增强钢铁基复合材料反应型界面设计	90
2.5.1	反应型界面产物第一性原理计算	91
2.5.2	颗粒表面包覆氧化物	93
2.5.3	颗粒表面包覆碳化物	96
2.6	本章小结	98
<b>第 3 章</b>	<b>空间构型复合材料的结构设计及制备</b>	<b>100</b>
3.1	空间构型复合材料陶瓷预制体的结构设计	100
3.1.1	结构设计依据	100
3.1.2	复合材料构型参数设计	103
3.2	空间构型复合材料预制体制备技术	110
3.2.1	蜂窝构型复合材料的预制体制备	111
3.2.2	三维互穿网络构型复合材料的预制体制备	121
3.3	复合材料的界面反应理论	122
3.3.1	复合材料界面反应热力学	122
3.3.2	复合材料界面反应动力学	126
3.3.3	复合材料浸渗动力学	130
3.4	空间构型复合材料制备技术	132
3.4.1	构型复合材料铸造工艺参数模拟及优化	132
3.4.2	构型复合材料的制备工艺	138
<b>第 4 章</b>	<b>陶瓷颗粒增强钢铁基空间构型复合材料的组织及性能</b>	<b>140</b>
4.1	陶瓷颗粒增强钢铁基空间构型复合材料的组织形貌	140
4.1.1	颗粒表面未处理的构型复合材料的组织	140
4.1.2	活化型界面三维互穿网络构型复合材料的组织形貌	146

4.1.3	润湿型界面蜂窝构型复合材料的组织形貌	150
4.1.4	反应型界面蜂窝构型复合材料的组织形貌	150
4.2	界面活化后三维互穿网络构型复合材料的性能	151
4.2.1	界面活化对复合材料硬度的影响	151
4.2.2	界面活化后复合材料的界面润湿性	152
4.2.3	界面活化对复合材料三点弯曲性能的影响	156
4.2.4	界面活化对复合材料磨损性能的影响	156
4.3	界面润湿后蜂窝构型复合材料的性能	158
4.3.1	颗粒表面离子镀 Ni 对润湿性的影响	158
4.3.2	离子镀 Ni 对复合材料磨损性能的影响	163
4.4	具有反应型界面的蜂窝构型复合材料的性能	165
4.4.1	蜂窝构型复合材料的硬度	165
4.4.2	蜂窝构型复合材料的压缩性能	168
4.4.3	蜂窝构型复合材料的磨损性能	180
<b>第 5 章</b>	<b>耐磨件的复合成型技术及工业化应用</b>	<b>182</b>
5.1	概述	182
5.2	耐磨件的构型设计	182
5.2.1	非环状耐磨件的构型设计	182
5.2.2	环状耐磨件的构型设计	183
5.3	耐磨复合构件的成型工艺	186
5.3.1	非环状复合材料耐磨件的成型工艺	186
5.3.2	环状复合材料耐磨件的成型工艺	188
5.4	多材质复合材料耐磨件热处理工艺	195
5.4.1	非环状复合材料耐磨件热处理工艺	195
5.4.2	环状复合材料耐磨件热处理工艺	205
5.5	典型复合耐磨件的工业化应用	207
5.5.1	非环状复合耐磨件的应用	207
5.5.2	环状复合耐磨件的应用	208
5.6	典型复合耐磨件的使用寿命及失效分析	210
5.6.1	非环状复合耐磨件的使用寿命及失效分析	210
5.6.2	环状复合耐磨件的使用寿命及失效分析	213
	参考文献	217

# 第1章 绪 论

## 1.1 研究背景

随着科学技术和现代工业的高速发展,机械设备的运转速度越来越快,受摩擦的零件被磨损的速度也越来越快,其使用寿命日益成为影响现代设备(特别是高速运转的自动生产线)生产效率的重要因素。尽管材料磨损很少引起金属工件灾难性的危害,但其造成的能源和材料消耗是十分惊人的。据统计,世界工业化发达国家约30%的能源是以不同形式消耗在磨损上。例如,在美国,每年由于摩擦磨损和腐蚀造成的损失约1000亿美元,占国民经济总收入的4%。而据不完全统计,我国仅在冶金、矿山、电力、煤炭、建材领域,耐磨材料的需求量已经超过400万吨,数据相当惊人,造成的经济损失约为400亿元。因此,耐磨材料的延寿和节能降耗已经成为我国甚至世界耐磨材料行业急需解决的重要课题。

在机械零部件的磨损中,冶金、电力、建材、机械等行业需要的大型耐磨设备的磨损消耗较为严重。近年来,随着科技的进步和现代化工业技术的不断完善,各行业生产节奏不断加快,机械设备的运转速度也在逐步提高,耐磨材料的使用工况越来越复杂,其不仅需要具备较高的耐磨性,同时还要兼顾抗冲击、高温、腐蚀、甚至抗热疲劳等性能,高铬铸铁、耐磨合金钢、高锰钢等传统的单一金属耐磨材料已经不能完全满足需要,因此复杂磨损工况下新型耐磨复合材料的研发及应用成为目前耐磨材料行业的重中之重。

鉴于此,本研究旨在开发一种具有先进结构的空腔型陶瓷钢铁基表层耐磨复合材料,并获得关键制造技术,实现工程应用。该技术可大幅度提高耐磨件的综合性能,延长使用寿命,降低生产成本。本书涉及的先进结构与复合材料符合我国“十三五”科技规划重点发展的关键技术领域,对提高耐磨材料研发和应用水平有较大的促进作用,能够提升耐磨材料的工业实力,实现降本增效、节能减排,加快耐磨材料生产企业由传统制造向现代化生产转化的步伐,打破该类材料在研发和应用上的国际技术封锁。

## 1.2 耐磨材料的发展及现状

### 1.2.1 磨损及其影响因素

#### 1. 磨损的定义

磨损是一种复杂的现象,到目前为止,尚未有一条简明的定律及确切统一的

磨损定义。英国机械工程师协会的一个委员给磨损下的定义是：由于机械作用而造成物体表面材料的逐渐损耗。克拉盖尔斯基的定义为：由于摩擦结合力反复扰动而造成的材料破坏。前者似乎排除了电和化学所产生的作用，后者则过于强调疲劳的作用。

邵荷生认为：由于机械作用或伴有化学或电的作用，物体工作表面材料在相对运动中不断损耗的现象称为磨损，并指出：

(1) 磨损并不局限于机械作用，还包括伴随化学作用而产生的腐蚀磨损，界面放电作用而引起物质转移的电火花磨损，以及伴随热效应而造成的热磨损等现象。

(2) 特别强调磨损是相对运动所产生的现象，因而橡胶表面老化、材料腐蚀等非相对运动中的现象不属于磨损研究的范畴。

(3) 磨损发生在运动物体材料表面，其他非表面材料的损失或破坏不包括在磨损范围之内。

(4) 磨损是不断损失或破坏的现象，损失包括直接耗失材料和材料的转移(材料从一个表面转移到另一个表面)，破坏包括产生残余变形、失去表面精度和光泽等。不断损失或破坏说明磨损过程是连续的、有规律的，而不是偶然的几次。

## 2. 磨损的分类

由磨损的定义可知，磨损是一种十分复杂的微观动态过程，影响因素甚多，因此关于磨损的分类方法也较多(图 1.1)。最常见的磨损分类是按磨损机理来分类，即黏着磨损、磨料磨损、冲蚀磨损、微动磨损、接触疲劳磨损等。实际工况中，材料的磨损往往不只是一种机理在起作用，而是几种机理同时存在，只不过是某一种机理起主要作用而已。而当条件变化时，磨损也会发生变化，会以一种机理为主转变为以另一种机理为主。这就要求我们对实际的磨损情况具体地加以分析，找出主要的磨损方式或磨损机理。

## 3. 磨损的评定方法

目前对磨损的评定方法还没有统一标准，常用的评定方法有：磨损量、磨损率和耐磨性，在冲蚀磨损中一般用冲蚀磨损率来度量磨损。

### 1) 磨损量

评定材料磨损的三个基本磨损量是长度磨损量  $W_l$ 、体积磨损量  $W_v$  和质量磨损量  $W_w$ 。长度磨损量是指磨损过程中零件表面尺寸的改变量，这在实际设备的磨损检测中经常使用。体积磨损量和质量磨损量是指磨损过程中零件或试样的体积或质量的改变量。通常在实验室测量中，往往是首先测量试样的磨损质量，然后再换算成体积磨损量，也可以通过测量磨痕宽度等计算出磨损体积。对于密度

不同的材料，用体积磨损量评定磨损的程度比用质量磨损量更为合理。

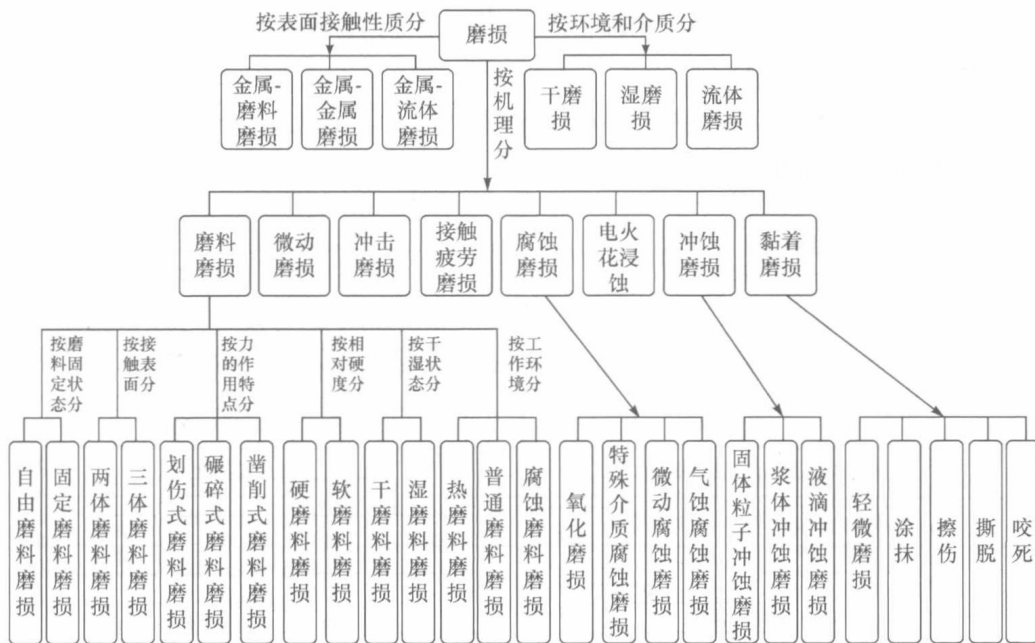


图 1.1 磨损的分类

### 2) 磨损率

有时也用磨损率  $\dot{W}$  来表示磨损的特性，如单位时间的磨损量、单位摩擦距离的磨损量。

### 3) 耐磨性

材料的耐磨性是指在一定工作条件下材料耐磨性的特性。材料的耐磨性分为相对耐磨性和绝对耐磨性。

材料的相对耐磨性  $\varepsilon$  是指两种材料 A 与 B 在相同的外部条件下磨损量的比值，其中材料 A 是标准(或参考)试样，表示为

$$\varepsilon = W_A / W_B$$

式中，磨损量  $W_A$  和  $W_B$  一般为体积磨损量，特殊情况下可使用其他磨损量。

绝对耐磨性通常用磨损量或磨损率的倒数来表示，即

$$W^{-1} = 1/W$$

$$\dot{W}^{-1} = 1/\dot{W}$$

耐磨性使用最多的是体积磨损量的倒数。

#### 4) 冲蚀磨损率

冲蚀磨损率=材料的冲蚀磨损量(质量或体积)/所用的磨料量，冲蚀磨损率应在稳态磨损过程中测量。

磨损量、磨损率、耐磨性、冲蚀磨损率都是在一定实验条件下的相对指标，不同实验条件下所得到的值是不可比较的。

#### 4. 磨损类型的确定

(1) 根据接触表面和工作条件确定磨损类型。如图 1.2 所示，可以根据摩擦副的表面作用类型、磨料或介质类型以及运动类型推断零件的磨损类型。

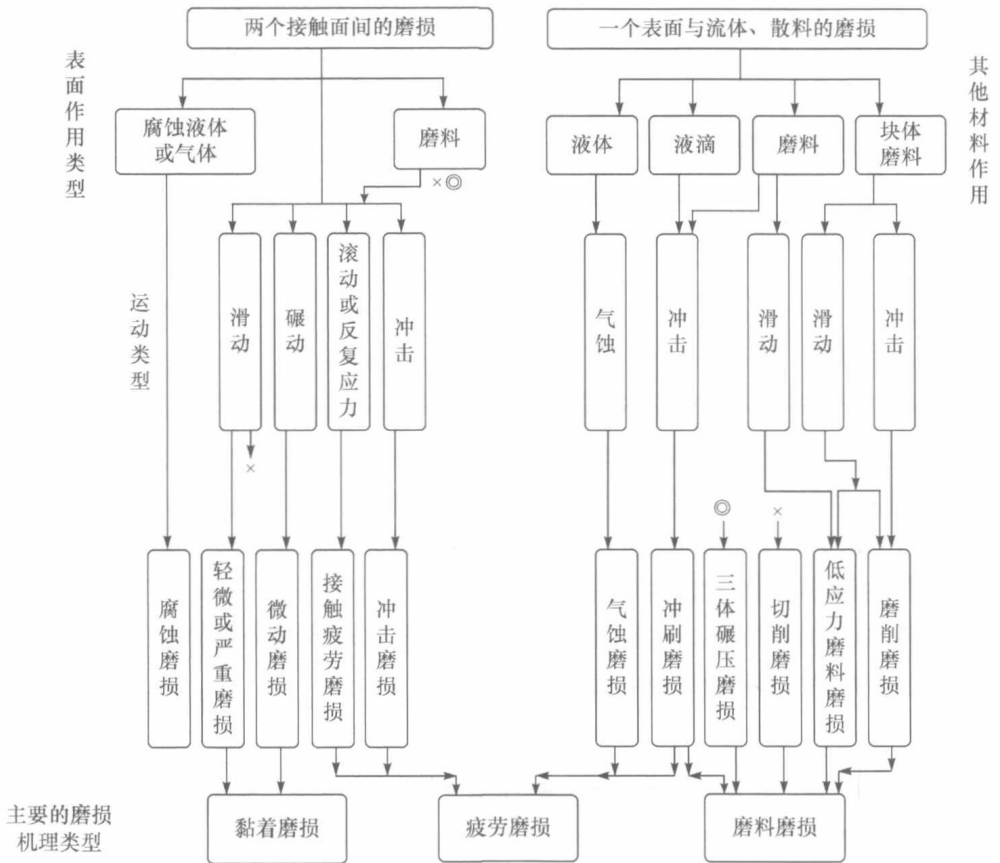


图 1.2 根据接触表面和工作条件确定磨损类型

(2) 根据表面损伤特征确定磨损类型。表 1.1 列出了一些磨损表面损伤特征与基本磨损类型的对应关系，表中的符号及数字意义见表 1.2。

表 1.1 材料的磨损表面损伤特征及磨损类型的确定

表面损伤特征	磨损类型
锈斑, 凹坑 f	表面腐蚀或冲蚀磨损/腐蚀 滑动机械 a1+e, 流动机械 a2+d2
抛光或细磨纹 a1+c+e 或 a2+c+e	
擦伤(短沟槽)b3+c+e	磨料磨损 b3+c
凿削 b2+d1	(多次擦伤)
咬合 a1(一次性)	凿削 b1+d1+e
d2+e(周期、永久性)	干磨损或无润滑滑动 b1+d3+e 或 a1+c+e 金属-金属磨损 a1+c+e 或黏着磨损 b1+d3+e
犁沟(光滑或粗糙)a1	
反复周期进行的过程 d1+e	
粗糙表面 b2	冲蚀磨损(大冲击角)b2+d4
分层剥落或剥层 d4+c	冲蚀磨损(小冲击角)b3+d1 或 d2
点蚀 b2 和(或)d5 剥落 d4 熔化 a3 微动点蚀 a1+d5+f	微动磨损 a1+d5+f

表 1.2 表 1.1 中符号及数字表示的磨损表面物理特性(宏观和微观)

<p>a 微观(光滑)</p> <p>1. 表面层逐渐剥落和再生(由于细磨料磨损作用或者黏着作用、切向力的作用造成);</p> <p>2. 非常细的磨料磨损作用, 除表面层脱落外也伴有基体的损失;</p> <p>3. 熔化结果</p>	<p>b 微观(粗糙)</p> <p>1. 因黏着磨损作用产生的切向力造成的结果;</p> <p>2. 因疲劳而产生微观点蚀;</p> <p>3. 中等粗磨料颗粒造成的磨料磨损</p>
<p>c 宏观(光滑)</p> <p>磨料颗粒处于光滑的固体支承面上或处于中间位置</p>	<p>d 宏观(粗糙)</p> <p>1. 由于粗颗粒造成的磨料磨损(包括在滑动过程中, 从材料上剥落下来的碳化物和其他夹杂物);</p> <p>2. 在管状流体中, 由于细颗粒造成的凹坑、波纹等缺陷的磨料磨损;</p> <p>3. 早期严重损坏的黏着磨损;</p> <p>4. 由于反复的滚动接触应力、热梯度和高摩擦作用的滑动, 或者由于冲蚀磨损中, 硬颗粒的冲击造成的点蚀或凹坑的局部疲劳失效类型;</p> <p>5. 在点蚀坑之间几乎没有受影响的表面</p>
<p>e 发亮</p> <p>非常薄的表面层(&lt;25<math>\mu\text{m}</math>), 如氧化物、硫化物、氯化物等</p>	<p>f 不发亮或暗褐色</p> <p>厚度可能大于 25<math>\mu\text{m}</math> 的表面膜(包括高温影响在内的侵蚀环境条件下产生的结果)</p>

(3) 综合分析法。此法是根据零件的使用条件、磨损表面和磨屑基本特征对其磨损进行综合分析来判断磨损的类型(表 1.3)。

表 1.3 根据综合分析方法判断磨损类型及抗磨措施

磨损类型	基本特点	磨损表面特征	磨屑基本特征	抗磨措施	应用举例
磨料磨损	相对运动表面具有硬凸出物, 或环境条件和工作对象有非金属磨料存在	条痕、沟槽(犁沟)、凹坑	切削型条状磨屑; 二次变形块状磨屑或脆断碎屑	提高材料硬度或综合性能, 防止磨料进入	犁铧, 履带板, 铲齿
黏着磨损	高应力作用下润滑不良的配合件	在配合表面上出现严重撕裂或黏附转移层, 凹坑磨点	不规则形状碎屑、块状屑、鳞片	改进润滑条件, 改善加工条件, 降低微区应力, 选择合适的配对材料	汽缸套, 活塞, 径向滑动轴承
疲劳磨损	高、低周交变应力接触条件下的摩擦副	点蚀剥落; 宏观表面粗糙, 次表层下有微裂纹	片状或球状磨屑	设计上增加接触面积, 降低表面粗糙度, 改善润滑条件, 降低接触应力, 选择高疲劳强度材料	滚动轴承, 凸轮挺杆, 齿轮
冲蚀磨损	高速粒子流或液流对零件工作表面冲击时经常产生的磨损形式	鱼鳞状规则小凹坑, 变形层有微小裂纹	小碎片	选用硬度和韧性好的材料, 适当改变液流冲击角及固体粒子组成	泵体, 叶轮, 管道输送构件
腐蚀磨损	在腐蚀气氛或介质及高温氧化条件下工作, 同时又产生相对运动和磨损的零件	腐蚀点坑, 龟裂纹, 表面有氧化物腐蚀层	氧化物碎屑, 球形磨屑	改善介质条件, 采用既耐腐蚀又抗磨损材料及保护层	水田耕作机械零件, 泵及阀体

## 5. 磨损的失效分析

### 1) 磨损失效模式的确定

磨损失效在自然界、日常生活和工业生产中广泛存在, 分析磨损失效的原因, 首先要确定失效的模式。表 1.4 列出了几种磨损失效模式以及诱发因素和表现形式, 只概括了主要的磨损失效模式和最主要、最典型的诱发因素和表现形式。实际情况要复杂得多, 图 1.3 中的失效诱发因素可以单独或以各种组织诱发不同的失效模式。

表 1.4 磨损失效模式以及诱发因素和表现形式

失效模式	诱发因素	表现形式
黏着磨损	表面相对运动	表面损伤
磨料磨损	硬质点研磨	表面损伤
腐蚀磨损	相对运动、硬质点、腐蚀介质	表面损伤、化学变化
表面疲劳磨损	交变接触压应力	表面剥离
变形磨损	过高的冲击载荷	表面塑性变形、裂纹、掉粒
气蚀	瞬时冲击	表面剥离
微动磨损	机械和化学作用或它们的联合作用	物理变化
冲击磨损	反复冲击	表层金属掉块
咬合	匹配表面相对运动	咬合、咬死

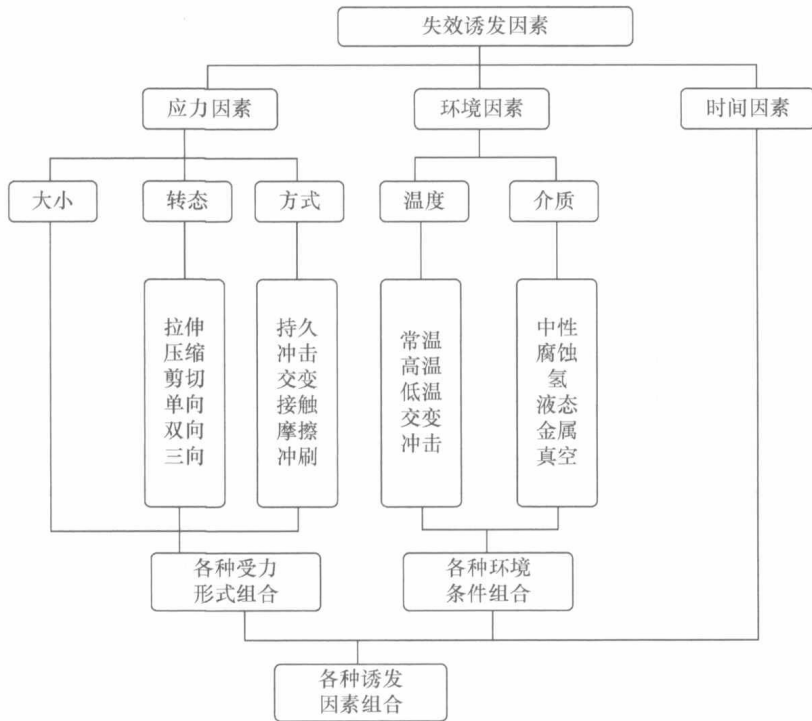


图 1.3 失效诱发因素

(1) 失效模式分析。

失效模式是一种或几种物理和(或)化学过程，由于它们的产生和作用导致机械零件或部件在尺寸、形状、状态或性能上发生改变，致使整个机器丧失其预先规定的的能力。人们根据磨损件(包括表面、亚表面)的特征和残留的有关失效过程

的信息(包括磨屑),首先判断失效模式,进而推断引起失效的根本原因。这是失效分析通常采用的方法,也是失效分析的核心。

## (2) 失效的统计分析。

统计方法研究的不是某一具体的失效事件,而是研究一批、一个时期、一个型号产品的失效规律。以失效模式、失效方式或失效部位等为横坐标,而以失效频度、失效百分比或失效的经济损失为纵坐标可作出巴雷特(Barrett)图,从图中可确定主要且需优先解决的失效模式、方式或部位。图 1.4 为巴雷特图应用举例,该图形象地指出失效模式 A 最需优先解决。

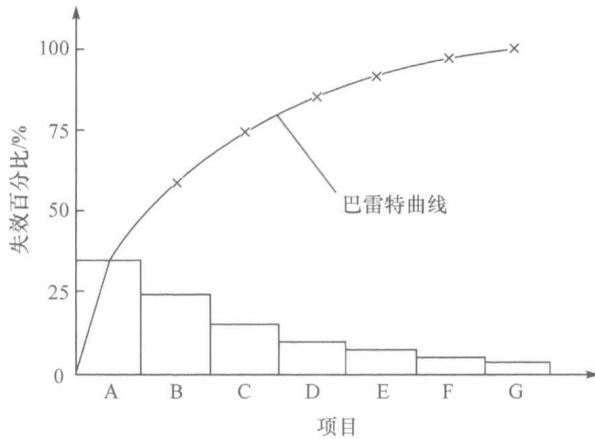


图 1.4 巴雷特图解

表 1.5 列出了工业领域中各种磨损失效模式所占比例(表中未考虑疲劳磨损),可见磨料磨损和黏着磨损占了最大比例。

表 1.5 各种磨损失效模式所占的比例

磨损类型	所占比例/%	磨损类型	所占比例/%
磨料磨损	50	微动磨损	8
黏着磨损	15	腐蚀磨损	5
冲蚀磨损	8	其他	14

## 2) 磨损分析基本方法

### (1) 磨损问题的系统分析。

如图 1.5 所示,一组材料 1、2(称为摩擦组元)在载荷  $F_N$  下以相对速度  $v$  滑动距离  $s$  时,显然材料的磨损特性与复杂的系统有关。该系统的磨损量  $W$  是由摩擦组元 1 的磨损量  $W_1$  和摩擦组元 2 的磨损量  $W_2$  的总和决定的。磨损特征  $F$  还取决于组元 1 的性能  $P_1$  和组元 2 的性能  $P_2$  以及 1 和 2 之间的相互关系  $R_{1,2}$  和工作变

量  $F_{N,s}$  等, 即

$$W = W_1 + W_2$$

$$F = f(P_1, P_2, R_{1,2}, F_{N,s})$$

为了分析磨损系统, 还需了解以下一些参数: ①相互作用的组元以及它们的相关性能; ②工作变量, 特别是有关相对运动的类型、载荷、速度以及实验时间等参数; ③相对运动界面的磨损机理。

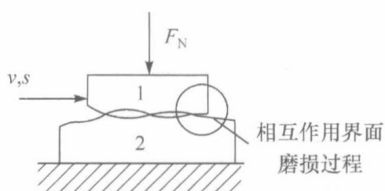


图 1.5 磨损实验系统示意图

由此可见, 与材料的力学、物理化学性能不同, 材料的磨损特性不是材料的固有性能, 而是与其使用条件和实际工况密切相关的摩擦学系统性能。解决磨损问题时必须考虑整个系统的性能及各组元相互间的影响, 这就是系统分析的基本出发点。

磨损的封闭系统由系统组元  $A$ 、它们的相关性质  $P$  以及相互作用  $R$  组成, 用  $S = \{A, P, R\}$  表示。

图 1.6 为一个磨损系统的损耗输出特性。在对某种磨损状态作出分析时, 根据一个给定的机械系统, 磨损损耗输出  $Z$  可以视为输入工作变量  $X$  对系统结构  $S = \{A, P, R\}$  输入作用的结果。

因此, 磨损损耗 =  $f$ (工作变量, 系统结构), 即  $Z = f(X, S)$ 。

契可斯(H. Czichos)将摩擦学参数分为四组(表 1.6), 编制了以这四组参数为主要内容的系统分析数据表。

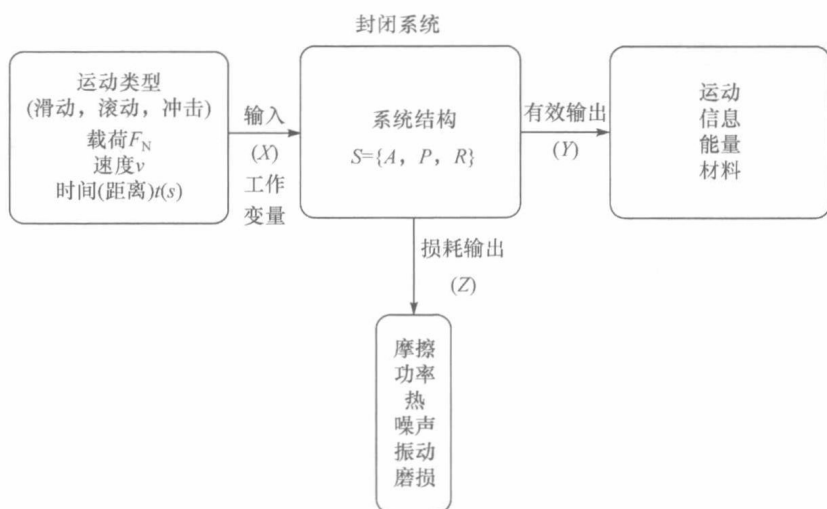


图 1.6 一个磨损系统的损耗输出特性