

耐磨奥氏体锰钢

谢敬佩 王文焱 李继文 著
王爱琴 赵永让 李洛利



科学出版社
www.sciencep.com

耐磨奥氏体锰钢

谢敬佩 王文焱 李继文 著
王爱琴 赵永让 李洛利

本书由河南科技大学学术著作出版基金资助出版

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书概述了磨料磨损的定义及分类、磨损特征及一般磨损规律,研究了静载条件下的表面接触及应力分布、动载条件下的表面接触及应力分布和磨损机理,较系统地介绍了中锰奥氏体钢、高锰钢、超高锰钢的化学成分、变质处理、合金化、热处理工艺及计算机技术在铸钢件生产中的应用,奥氏体锰钢的表面合金化,应变诱发马氏体的热力学计算等相关知识与科研成果。

本书可供从事冶金、矿山、电力、建材、铁路、机械等领域的科研工作者、工程技术人员、大专院校的教师及研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

耐磨奥氏体锰钢/谢敬佩等著. —北京:科学出版社, 2008

ISBN 978-7-03-021308-2

I. 耐… II. 谢… III. 奥氏体钢: 耐磨钢: 锰钢 IV. TG142.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 031293 号

责任编辑: 耿建业 于宏丽/责任校对: 赵桂芬

责任印制: 刘士平/封面设计: 耕者设计工作室

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 5 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2008 年 5 月第一次印刷 印张: 18 1/4

印数: 1—2 500 字数: 353 000

定价: 58.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换<双青>)

前 言

磨损是摩擦学的三个重要组成部分（摩擦、磨损、润滑）之一，材料的磨损是材料的三大失效形式（磨损、腐蚀和断裂）之一。据统计，约有 80% 的设备损坏是由于各种形式的磨损引起或诱发的。磨损失效不仅造成大量的资源浪费，而且还可能直接酿成灾难性的事故。据英、美、德、日等国近 20 年来的调查表明，因磨损造成的经济损失约占各国国民生产总值（GDP）的 2% 以上，全世界每年因摩擦磨损造成的资源损失近 2000 亿美元。我国仅在矿山、冶金、电力、煤炭和农机行业不完全统计，工件磨损造成经济损失每年 400 亿元。然而目前，磨损理论、磨损工况、耐磨材料及磨损机理仍是国内外同行研究的热点和难点。

材料的磨损与磨料特性、磨损工作条件和成分组织性能相关。磨损的研究将是多学科的综合，涉及物理、化学、冶金、材料和机械工程等方面的知识。所以说磨损研究是一项系统工程。作者从磨料磨损的定义及分类出发，分别研究了静载条件下的表面接触及应力分布、动载条件下的表面接触及应力分布、磨料磨损定义和分类、磨损特征及一般规律、耐磨材料的磨损试验、耐磨件的失效方式及分析、磨料磨损切削机制、磨粒磨损的裂纹扩展机制、塑变磨损机制、剥层磨损机理、腐蚀磨损机制、黏着磨损机理、凿削坑形成机理等。

Hadfield 教授于 1883 年研制出奥氏体锰钢以后，人们给其“耐磨钢”的美称。一个世纪以来，它被广泛地应用于矿山、电力、建材、农机、冶金等行业。作者从 1982 年开始了奥氏体锰钢的研究及应用工作，系统研究了中锰奥氏体钢、高锰钢、超高锰钢的化学成分，变质处理、合金化及热处理工艺，计算机技术在铸钢件生产中的应用，奥氏体锰钢的表面合金化，奥氏体锰钢原位动态拉伸过程中电镜观察，应变诱发马氏体的热力学计算，耐磨奥氏体锰钢的熔炼和典型耐磨件及失效分析等。形成了磨损工况、材料设计、冶炼工艺、铸造工艺及性能检测等完善的科学研究及产品开发体系。

本书共分 9 章，第 1 章～第 3 章由谢敬佩教授撰写，第 4 章和第 7 章由王文焱博士撰写，第 5 章由赵永让高工撰写，第 6 章和第 8 章由王爱琴教授撰写，第 9 章由李继文博士撰写，李洛利老师和杨晋华老师做了大量图片及实际应用工作。全书由谢敬佩教授统稿。

感谢河南科技大学学术著作出版基金的资助，感谢河南省杰出人才创新基

金项目（项目编号：0621000600）的资助！

本书是作者在长期科研和实际生产中的工作总结。由于作者水平有限，加之磨损工况的复杂性，很多问题的研究正处于不断发展和深入的研究过程中。因此，书中难免会出现不妥之处，恳请读者批评指正。作者在此表示衷心的感谢。

联系地址是河南省洛阳市涧西区西苑路 48 号，河南科技大学，邮编 471003，E-mail: xiejp@mail.haust.edu.cn。

谢敬佩

2008 年 1 月于洛阳

目 录

前言

第 1 章 磨料磨损的定义及分类	1
1.1 静载条件下的表面接触及应力分布	1
1.2 动载条件下的表面接触及应力分布	4
1.3 磨料磨损定义和分类	7
1.3.1 定义	7
1.3.2 分类	8
1.4 磨损特征及一般规律	10
1.4.1 黏着磨损	10
1.4.2 磨粒磨损	11
1.4.3 表面疲劳磨损	14
1.4.4 微动磨损	14
1.4.5 冲击磨损	15
1.4.6 磨蚀	15
1.5 耐磨材料的磨损试验	15
1.5.1 冲击磨料磨损试验	15
1.5.2 高应力磨料磨损试验	16
1.5.3 冲刷腐蚀试验方法	16
1.5.4 低应力磨料磨损试验	17
1.5.5 高温高速磨损试验机	17
1.6 耐磨铸件的失效方式及分析	18
1.6.1 磨损失效	18
1.6.2 断裂失效	19
1.6.3 变形失效	20
1.6.4 磨损失效分析	20
参考文献	23
第 2 章 磨料磨损基本理论	24
2.1 磨料磨损切削机制	24
2.2 磨粒磨损的裂纹扩展机制	26

2.3	塑变磨损机制	28
2.4	剥层磨损机理	30
2.4.1	剥层磨损与裂纹产生及扩展	31
2.4.2	剥层磨损方程	31
2.5	腐蚀磨损机制	34
2.6	黏着磨损机理	36
2.7	凿削坑形成机理	38
	参考文献	39
第3章	变质处理对中锰钢组织及性能影响	40
3.1	变质处理对组织的影响	40
3.1.1	铸态和热处理组织	40
3.1.2	稀土对组织影响	40
3.2	变质剂对夹杂物作用	42
3.2.1	变质剂对夹杂物数量的影响	42
3.2.2	变质剂对夹杂物形状的影响	43
3.2.3	变质剂对夹杂类型的影响	43
3.3	铌的碳、氮化合物作用	45
3.3.1	铌的碳、氮化合物形成热力学条件	45
3.3.2	Nb 的化合物可作为异质核心	47
3.4	示波冲击和 COD 试验	49
3.5	变质剂对力学性能的影响	52
	参考文献	54
第4章	变质中锰钢的表面合金化	55
4.1	铸造表面合金化工艺及组织变化	55
4.1.1	铸渗材料	55
4.1.2	浇铸工艺	55
4.1.3	工艺因素与渗层关系	55
4.2	复合层组织分析	56
4.3	合金元素分布规律	59
4.4	铸造表面合金化	62
4.4.1	铸造表面合金化过程	62
4.4.2	合金的扩散	63
4.4.3	稀土的催化作用	65
	参考文献	65

第 5 章 变质中锰奥氏体钢锤击和形变动态观察	66
5.1 锤击硬化动态观察	66
5.2 奥氏体锰钢应变诱发马氏体相变热力学	69
5.2.1 奥氏体转为马氏体自由能计算	69
5.2.2 中锰钢和高锰钢的 M_s 温度及 $\Delta G_{\text{FeMnC}}^{\gamma \rightarrow \alpha}$ 在 M_s 和室温的相变驱动力计算	71
5.2.3 机械驱动力计算	72
5.3 中锰钢原位动态拉伸过程中电镜观察	73
5.3.1 位错动态变化	73
5.3.2 碳化物强化作用	73
5.3.3 层错与孪晶	75
5.3.4 形变诱发马氏体相变	78
5.3.5 裂纹形成及扩展	80
参考文献	80
第 6 章 高锰钢	81
6.1 高锰钢的化学成分	82
6.1.1 高锰钢的平衡状态组织	83
6.1.2 高锰钢的化学成分	84
6.2 合金元素在高锰钢中的作用	94
6.2.1 铬	94
6.2.2 钼	96
6.2.3 镍	98
6.2.4 钛	99
6.2.5 钒	100
6.2.6 铌	102
6.2.7 稀土	103
6.3 高锰钢的加工硬化	108
6.3.1 形变诱发马氏体相变硬化假说	108
6.3.2 孪晶硬化假说	109
6.3.3 位错硬化假说	109
6.3.4 动态应变时效硬化假说	110
6.3.5 Fe-Mn-C 原子团硬化假说	111
6.3.6 纳米晶与非晶镶嵌分布	111
6.3.7 综合作用硬化假说	112

6.4	高锰钢的铸造工艺	113
6.4.1	造型材料	113
6.4.2	收缩、冒口和冷铁	120
6.4.3	浇注系统	127
6.5	高锰钢铸件的主要缺陷	132
6.5.1	黏砂	132
6.5.2	气孔	133
6.5.3	晶粒粗大	133
6.5.4	裂纹	136
6.5.5	组织不致密性	137
6.6	高锰钢铸件的热处理	139
6.6.1	高锰钢在加热过程中的行为	139
6.6.2	高锰钢加热过程参数选择	140
6.6.3	普通高锰钢热处理工艺	142
6.6.4	高锰钢热处理新工艺	143
6.7	高锰钢的标准及性能	147
6.7.1	高锰钢标准	147
6.7.2	高锰钢性能	150
	参考文献	154
第7章	超高锰钢	155
7.1	超高锰钢化学成分的选择	155
7.1.1	碳含量	155
7.1.2	锰含量	157
7.1.3	硅、磷、硫的含量	157
7.2	合金元素在超高锰钢中的作用及合金化	159
7.2.1	铬	160
7.2.2	钼	160
7.2.3	镍	161
7.2.4	钒	162
7.2.5	钛	163
7.2.6	稀土元素	163
7.3	超高锰钢的热处理工艺	164
7.3.1	水韧处理	165
7.3.2	沉淀强化工艺	167

7.4 超高锰钢的力学性能、金相组织	171
7.4.1 超高锰钢铸态组织	171
7.4.2 热处理工艺对超高锰钢组织和性能的影响	172
7.4.3 回火温度对超高锰钢组织和力学性能的影响	176
参考文献	181
第8章 计算机技术在铸钢件生产中的应用	182
8.1 概述	182
8.1.1 计算机铸造过程模拟仿真技术的发展历史	182
8.1.2 铸造软件的分类与研究现状	183
8.2 铸钢件工艺设计特点及规范	187
8.2.1 铸钢件工艺设计特点	187
8.2.2 大型铸钢件工艺规范	190
8.3 铸造工艺计算机辅助设计与优化技术	191
8.3.1 计算机工艺优化流程	191
8.3.2 铸造工艺 CAD 的特点	192
8.4 计算机铸造工艺优化应用实例	193
8.4.1 球磨机端盖铸造工艺优化	193
8.4.2 球磨机衬板铸造工艺优化	197
8.4.3 履带板铸造工艺优化	199
8.4.4 磨盘计算机工艺优化	202
参考文献	206
第9章 耐磨奥氏体锰钢的冶炼	207
9.1 奥氏体锰钢冶炼用原材料	207
9.1.1 金属炉料	207
9.1.2 造渣材料	210
9.1.3 氧化剂	213
9.1.4 脱氧剂和增碳剂	213
9.1.5 石墨电极	214
9.1.6 冶炼用耐火材料	215
9.2 炼钢生产的理论基础	220
9.2.1 炉渣	220
9.2.2 炼钢供氧	224
9.2.3 钢液的脱碳(碳氧化反应)	226
9.2.4 冶炼过程中硅、锰的氧化和还原	229

9.2.5 钢液的脱磷	230
9.2.6 钢液的脱硫	233
9.2.7 钢液的脱氧	235
9.3 奥氏体锰钢的冶炼特点	238
9.3.1 合金元素的加入时间	238
9.3.2 合金元素的收得率	239
9.3.3 铁合金处理	239
9.3.4 合金加入的操作要点	240
9.4 碱性电弧炉冶炼奥氏体锰钢的冶炼工艺	240
9.4.1 冶炼前的准备工作	240
9.4.2 熔化期	244
9.4.3 氧化期	245
9.4.4 还原期	250
9.5 高锰钢碱性电弧炉操作要点	258
9.5.1 不氧化法冶炼高锰钢操作要点	258
9.5.2 氧化法冶炼高锰钢操作要点	259
9.6 中频感应电炉冶炼	260
9.6.1 中频感应电炉工作原理	260
9.6.2 感应电炉冶炼特点	263
9.6.3 感应电炉炉衬	263
9.6.4 感应电炉冶炼操作工艺	269
9.6.5 高锰钢感应电炉冶炼操作要点	271
9.7 现代电弧炉炼钢冶炼新工艺	271
9.8 现代电弧炉炼钢技术	272
9.8.1 节约电能技术	273
9.8.2 强化冶炼技术	275
9.8.3 电炉炼钢余热利用技术	277
9.8.4 优化炉料结构技术	278
参考文献	279

第 1 章 磨料磨损的定义及分类

磨损是摩擦学的三个重要组成部分之一,磨料磨损又是磨损研究领域中最重要研究方向之一。产生磨料磨损的实例处处可见,广泛地存在于工业、农业、交通运输和日常生活中。发生磨损的磨料如与土砂、矿石、煤、水泥等物料相互作用的矿山机械、工程机械、粉磨设备中许多机械零件;耕作、收割、粮油加工等的农业机械;水力、火力发电设备中许多机械零部件;人体的牙齿、鞋底、笔尖及多种生活用品等。磨料磨损造成的经济损失在磨损领域中是最大的。

磨料磨损最严重、耗费备件最多的行业是冶金矿山的采矿、选矿;石油钻探、采煤选煤;水力火力发电;水泥、玻璃和制砖的生产设备以及农业机械设备等。据 1981 年的不完全统计,上述部门制造备件耗费钢材为百万吨左右,再加上更换备件影响了生产效率,一年耗费资金达 20 亿元以上。全国汽车拖拉机用钢每年约 $6 \times 10^6 \text{ t}$,而备件生产用钢也要 $6 \times 10^6 \text{ t}$,其中磨料磨损耗费钢材在 $2 \times 10^6 \text{ t}$ 以上。

1.1 静载条件下的表面接触及应力分布

磨损可以认为是磨粒在载荷的作用下与基体相互运动中发生的物质损失^[1~6]。在滑动状态下,作用在磨粒上的载荷为 P ,相互运动的速度为 v ,磨料与表面接触时应力分布如图 1.1、图 1.2 所示。 q 和 τ 分别为试样接触圆域内的法向应力和切向应力, q_0 和 τ_0 分别为突点施加的最大法向应力和切向应力。 q_0 接触应力与接触面圆域半径为 a 的半球面的纵坐标成正比, $q = \frac{q_0}{a} \sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}$,其中 q_0 是最大接压应力,位于接触圆的圆心, $q_0 = \frac{3P}{2\pi a^2}$ 。对于切向力分布可近似地用摩擦定律来确定,即认为切向力等于法向力乘以摩擦系数 μ ,于是接触面的剪应力 $\tau = \mu q = \frac{\mu q_0}{a} \sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}$,显然最大剪应力也发生在圆域中心处。知道表面正应力和剪应力分布形式,就可以根据弹性理论来计算试样在突点接触面下方任意点的应力大小。

在表面圆域上有突点作用的压应力和剪应力。圆域半径为 a ,建立 $Oxyz$ 坐标系, x 轴与剪应力 τ 的方向一致, z 轴与压应力 q 的方向一致, O 点在接触圆域

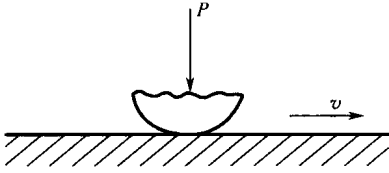


图 1.1 磨粒与基体相互运动

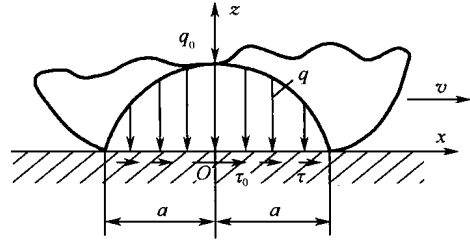


图 1.2 基体与磨粒接触表面上受力分析

的圆心。考虑到无限体接触面的应力大小,考虑在圆域内任一点 A 的接触应力为 q 和 τ ,于是 A 点单元面积承受载荷为 $q dx dy$ 和 $\tau dx dy$ 。由 A 点单元面积上作用的载荷引起的半无限体内 M 点的应力可以利用叠加原理写成

$$\left\{ \begin{array}{l} d\sigma_z = -\frac{3xz^2}{2\pi R^5} \tau dx dy - \frac{3z^3}{2\pi R^5} q dx dy \\ d\sigma_x = \frac{x}{2\pi R^3} \left[\frac{1-2\nu}{(R+z)^2} \left(R^2 - y^2 - \frac{2Ry^2}{R+z} \right) - \frac{3x^2}{R^2} \right] \tau dx dy \\ \quad - \frac{1}{2\pi R^2} \left\{ \frac{3x^2 z}{R^3} - (1-2\nu) \left[\frac{z}{R} - \frac{R}{R+z} + \frac{x^2(2R+z)}{R(R+z)^2} \right] \right\} q dx dy \\ d\sigma_y = \frac{x}{2\pi R^3} \left[\frac{1-2\nu}{(R+z)^2} \left(3R^2 - x^2 - \frac{2Rx^2}{R+z} \right) - \frac{3y^2}{R^2} \right] \tau dx dy \\ \quad - \frac{1}{2\pi R^2} \left\{ \frac{3y^2 z}{R^3} - (1-2\nu) \left[\frac{z}{R} - \frac{R}{R+z} + \frac{y^2(2R+z)}{R(R+z)^2} \right] \right\} q dx dy \\ d\tau_{xz} = -\frac{3x^2 z}{2\pi R^5} \tau dx dy - \frac{3xz^2}{2\pi R^5} q dx dy \end{array} \right.$$

式中 R 是指 A 点与 M 点距离, $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$; 坐标 $x = x_M - x_A$, $y = y_A$, $z = z_M$, 这里的 x_M 和 z_M 是常量, x_A 和 y_A 是变量; ν 是泊松比。整个圆域上因接触力引起的 M 点应力可用叠加法计算,也就是对上式进行积分,积分变量 x_A 从 $-a$ 到 a , y_A 由于对称,积分限从 0 到 $\sqrt{a^2 - x_A^2}$, 整个积分再乘系数 2。为便于计算,假定摩擦系数 $\mu = 1/4$, 于是

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau = \frac{1}{4} q = \frac{q_0}{4a} \sqrt{a^2 - (x_A^2 + y_A^2)} = \frac{3P}{8\pi a^3} \sqrt{a^2 - (x_A^2 + y_A^2)} \\ q = \frac{3P}{2\pi a^3} \sqrt{a^2 - (x_A^2 + y_A^2)} \end{array} \right.$$

上式代入并进行积分,所得表达式的解析解一般很难得到,故此需要数值积分。本文采取用复步长辛普生方法求二重积分,计算程序用 FORTRAN 语言编

写,把二重积分 $I = \int_a^b dx \int_{y_1(x)}^{y_2(x)} f(x,y) dy$ 化成两个单积分: $I = \int_a^b S(x) dx$, $S(x) = \int_{y_1(x)}^{y_2(x)} f(x,y) dy$ 。下面把计算结果用应力曲线图表示出来。图 1.3(a)、(b)、(c)、(d) 分别是 xOz 面内的 σ_z 、 σ_x 、 σ_y 、 τ_{zx} 四种应力曲线。由图 1.3(a) 的 σ_z 应力曲线可以看到,在 z 轴附近应力值最大,愈靠近接触表面,压应力 σ_z 的最大值愈接近于 q_0 ,并且愈靠近 z 轴,这一点与单纯接触压应力的 σ_z 情况相近。在接触圆域以内, σ_x 都是压应力,但在切向力后方的圆域外侧,当深度为 $z=0.1a$ 时, $x=-1.2a$ 处, σ_x 变为拉应力(图 1.3(b)),最大拉应力为 $0.15q_0$,此应力值虽然比较小,但仍有可能造成接触圆后方产生横向裂纹。由图 1.3(c) 的 σ_y 应力曲线可以发现, σ_y 关于 z 轴对称,同一深度的最大应力发生在 z 轴上,愈靠近表面, σ_y 越大,接近于 $0.8q_0$,这一点与单纯接触压应力下半无限体内的 σ_y 情况相同。考虑到表面切向力方向沿 x 轴方向,与 y 轴垂直,因此表面切向应力对 σ_y

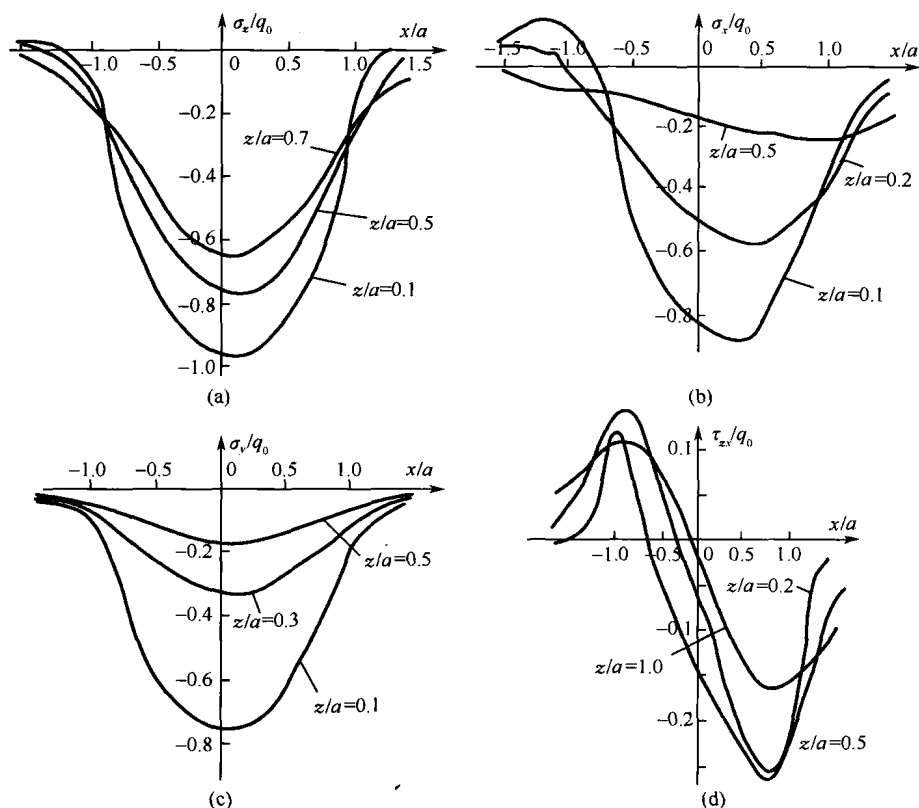


图 1.3 静载条件下应力计算结果

的影响可以忽略,于是可以分析 z 轴上单元体在 yOz 面上的应力情况。可知最大 σ_y 发生在表面接触圆圆心处, $\sigma_{y\max} = 0.8q_0$, 进一步可推知单元体上 yOz 面的最大剪应力 $\tau_{\max}$ 应在 z 轴上距表面 $0.48a$ 处, 其作用方位仍应与水平面呈 45° 方向。

1.2 动载条件下的表面接触及应力分布

从试验条件可知,在冲击磨料磨损过程中,试样一方面从上向下以频率为 200 次/分冲击到试验轮上,同时下轮也在自旋运动。所以磨料对试验的作用力为正冲力 F_n 和切应力 F_s 。由于 F_s 远小于 F_n , 所以把试验考虑为单纯冲击问题。将磨料看成是圆形的,取其半径为 ρ , 这样就近似的把试验转变为磨料半径为 ρ 的小球与半径无限大的上试样发生的碰撞问题。根据中球体的碰撞理论可知,磨料与基体碰撞过程中,球相对于半无限体的速度的改变率决定于

$$m \frac{dV}{dt} = -P \quad (1-1)$$

式中 P 是冲击力; m 是磨料的当量质量,可看成上试样质量 M 与接触颗粒数 N 之比,即 $m = \frac{M}{N}$, 设 S 是碰撞中磨料局部压缩的距离,则有: $V = S'$, 于是由式(1-1)可得

$$S'' = -\frac{P}{m} \quad (1-2)$$

根据静弹性接触理论有

$$S = \sqrt[3]{\frac{9\pi^2}{16} \frac{P^2 (k_1 + k_2)^2}{\rho}} \quad (1-3)$$

可得出

$$P = S^{3/2} \sqrt{\frac{16\rho}{9\pi^2 (k_1 + k_2)^2}} = nS^{3/2} \quad (1-4)$$

式中

$$n = \sqrt{\frac{16\rho}{9\pi^2 (k_1 + k_2)^2}} = \frac{4}{3\pi(k_1 + k_2)} \rho^{1/2}, \quad k_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1}, \quad k_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2}$$

其中 ν_1 、 E_1 、 ν_2 、 E_2 分别代表磨料和上试样的泊松比和弹性模量。把式(1-3)代入式(1-2)得

$$S'' = -\frac{n}{m} S^{3/2}$$

方程两边积分得

$$\frac{1}{2}(S'^2 - V_0^2) = -\frac{2}{5} \frac{n}{m} S^{5/2} \quad (1-5)$$

式中 V_0 是碰撞开始时的速度。以 $S=0$ 代入式(1-5)得出磨料压缩的最大距离

$$S = \left(\frac{5}{4} \frac{m}{n} V_0^2 \right)^{2/5} \quad (1-6)$$

将式(1-6)代入式(1-4)可算出碰撞期间作用在磨料上的最大压力 P 及接触面圆域半径 a

$$P = nS^{3/2} = \left(\frac{5}{4} m V_0^2 \right)^{3/5} n^{2/5} \quad (1-7)$$

$$a = \left[\frac{3}{4} \pi P \rho (k_1 + k_2) \right]^{1/3} \quad (1-8)$$

式(1-7)、式(1-8)是冲击磨料磨损中磨料对试样表面作用下的力学方程式。

虽然冲击磨损过程是一动力作用问题,但经上述计算,动力作用问题可看成是静力作用的重复过程,把冲击磨损过程的瞬间进行静力分析,从而使问题得到简化。由于磨料粒径很小,为了从宏观上分析基体在磨料作用下的受力情况,先考虑半无限体的情况(图 1.4(a))。半无限体内某一点 k 的水平面上受到的总应力 P_3 是沿 Ok 方向的压应力,其实际大小将为 $P_3 = \frac{3P}{2\pi r^2} \cos^2 \theta$, 其中 θ 是 Ok 线与 z 轴夹角, r 是 Ok 线的长度。作一直径为 d 并且与 z 轴重合的球面,该球面经过 k 点,并与 $z=0$ 的平面相切于原点 O , 与 z 轴交于 c 点。于是有 $\overline{Ok} = r = d \cos \theta$, 此时作用在 k 点水平微元上的应力又可写成

$$P_3 = \frac{3P}{2\pi d^2} \quad (1-9)$$

由此可知球面上任一点水平方向微元上的应力都相等,此球面是等应力曲面,这一点可由光弹试验结果给予验证(图 1.4(b))。图 1.4(b)中的黑线为等应力曲面。这是仿半无限体受集中压力作用下拍照的应力条纹照片。由式(1-9)可知以下两点:①当圆曲面直径 d 趋近于原点 O 时,则应力 P_3 趋近于无穷大。而实际上接近于 O 点处应力不可能是无穷大,显然,这是因为把实际处于分布力状态的载荷(尽管此分布区域非常小)看成集中载荷所造成的。因此要想符合实际情况就需要按赫兹接触压应力分布来考虑接触点附近区域的应力分布。②在 $z=d$ 的平面上,显然只有在平面与 z 轴相交点 c 处受到应力最大,并且等于 $3P/(2\pi d^2)$, 因此,作磨料与试样的接触受力分析主要应考虑 z 轴上的受力情况。现在有赫兹接触问题方法来考虑磨料在压力 P 作用下与试样的接触应力。在接触点,试样将产生局部变形与试样基体形成一个圆接触面区域,其半径为 a , 远小于磨料粒径。根据赫兹定理,接触面压应力分布与以 a 为半径的半球体

成正比(图 1.4(c)), 于是距 O 点 r 处的压应力为

$$q = \frac{q_0}{a} \sqrt{a^2 - r^2} \quad (1-10)$$

式中 q_0 是圆心 O 处的最大应力

$$q_0 = \frac{3P}{2\pi a^2} \quad (1-11)$$

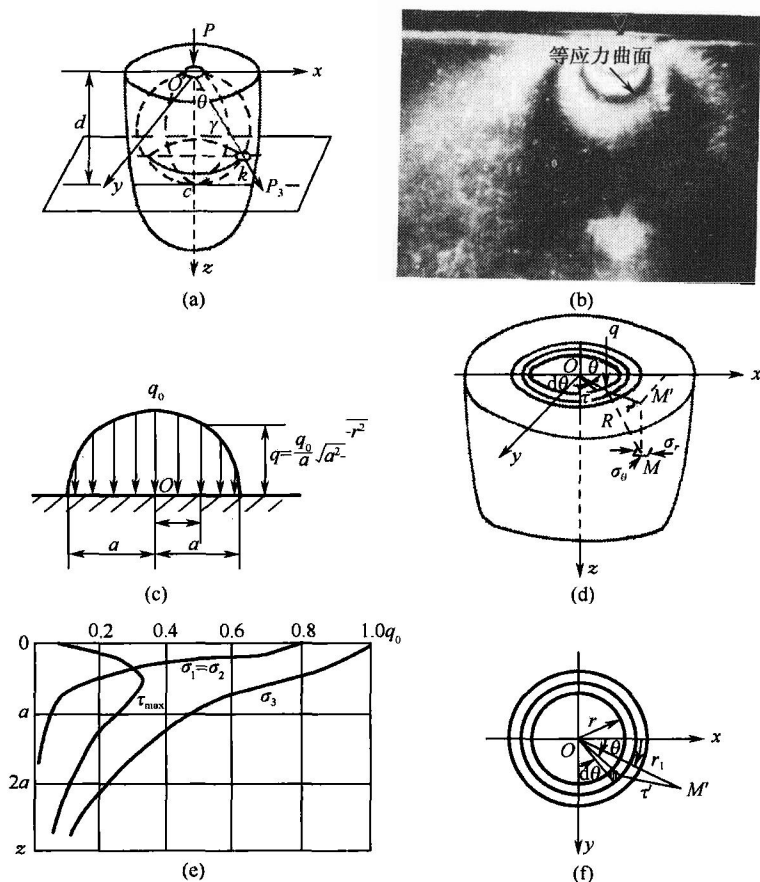


图 1.4 动载条件下力学计算及光弹应力分析

那么在接触区附近任一点 M , 应力可从半无限体上作用集中力的应力公式进行积分求得。关于应力 P 可用 $qrdrd\theta$ 代替

$$\sigma_z = - \int_0^a \int_0^{2\pi} \frac{3z^3}{2\pi R^5} qrdrd\theta$$