



荣守范 朱永长 主编

铸造金属 耐磨材料 实用手册

ZHUZAO JINSHU
NAIMO CAILIAO
SHIYONG SHOUC



化学工业出版社

荣守范 朱永长 主编

铸造金属 耐磨材料 实用手册

ZHUZAO JINSHU
NAIMO CAILIAO
SHIYONG SHOUCE



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书侧重于耐磨材料中应用广泛的铸造金属及其合金耐磨材料的实际应用,在介绍磨损基本知识和理论的基础上,主要说明了各种铸造金属耐磨材料(耐磨铸铁、耐磨铸钢、有色金属及合金耐磨材料等)的成分设计、冶炼、铸造工艺和热处理规范,以及相关材料的耐磨性能等。此外,书中还结合作者多年对耐磨材料的研制与生产实践经验,列举了耐磨材料在典型铸件中的应用实例和应用中应注意的问题,指导读者根据设备零部件的使用工况,合理正确地选择耐磨材料。

本书可供铸造、耐磨材料相关领域的工程技术人员、管理人员阅读,也可供铸造相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

铸造金属耐磨材料实用手册/荣舒范,朱永长主编. —北京:化学工业出版社,2010.7

ISBN 978-7-122-08642-6

I. 铸… II. ①荣…②朱… III. 铸造-金属材料:耐磨材料-技术手册 IV. TG22-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第094112号

责任编辑:刘丽宏

文字编辑:张燕文

责任校对:陶燕华

装帧设计:韩 飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张19 $\frac{3}{4}$ 字数352千字 2010年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:79.00元

版权所有 违者必究

前 言

近年来，磨损现象日益受到人们的重视，耐磨材料科学正在蓬勃发展。为适应工业发展的需要，耐磨材料的品种不断增多，质量迅速提高。新型耐磨材料的兴起正逐步成为广大科研工作者的研究热点，传统的金属材料仍以其优异的抗磨料磨损能力和相对良好的抗断裂能力成为当今最受欢迎的耐磨材料之一。铸造金属耐磨材料由于生产工艺简单、成本低，在生产应用中更是一枝独秀。工业实践表明，煤矿机械、电力机械、建材机械、选矿机械、破碎机械、筑路与工程机械、农业机械中的许多易磨损件采用铸造金属耐磨材料制造而成，使用寿命成倍延长，获得了十分显著的社会效益和经济效益。

本书从生产实际的角度出发，综合介绍了铸造金属耐磨材料。第1章首先简要介绍了金属磨损的一般问题及其相关机理；第2章主要介绍了耐磨铸钢，分别从传统的高锰钢、中锰钢到当今较为流行的合金钢，探讨其相关的工艺及原理；第3章则是从耐磨铸铁出发，从传统的耐磨白口铸铁，到各种典型的合金铸铁，都分别给予了相关的工艺及原理的介绍；第4章主要探讨了各种有色合金耐磨材料的工艺及应用；第5章简要地介绍了铸造金属复合材料的相关制备工艺；第6章从生产实际应用出发，介绍了几种典型的耐磨铸件。这些内容主要源于多方面的研究成果，希望能为有关的科技工作者提供实用的基础性资料。

本书侧重铸造金属及其合金的实际应用，除介绍有关的磨损基础理论外，主要说明各种铸造金属的成分设计、冶炼、铸造工艺及热处理规范等基本内容，以及相关材料的机械、耐磨性能等。作者从事矿山用金属耐磨材料的研制与生产已有多年的经验，深感铸造金属耐磨材料的系统性资料不足，现根据作者理论研究与应用实践，辑成此书。为适应我国资源和工厂实际情况，本书尽量以国内外资料和工厂经验为主，以便应用。

本书由佳木斯大学荣守范、朱永长主编，由佳木斯大学孟祥才教授、哈尔滨理工大学汪孟春教授主审。该书的第1章由攀枝花学院王海波编写，第2章、第6章由荣守范编写，第3章、第5章由朱永长编写，第4章由攀枝花学院孙青竹编写，全书由荣守范教授统稿。

由于编者水平所限，不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

本书的部分研究工作是在教育部耐磨材料及表面工程技术研究中心及黑龙江省重点基金项目（编号：ZD200909）的资助下完成的。该书在编写和资料收集过程中，得到了很多工厂、科研单位以及兄弟院校的大力协助，在此谨向他们表示衷心的感谢。

编者

目 录

第 1 章 金属材料磨损基础 1

1.1 金属摩擦的基本理论	1
1.1.1 金属表面的特性	1
1.1.2 金属表面的接触	4
1.2 金属的磨损	8
1.2.1 磨损的类型	8
1.2.2 磨损的评定方法	13
1.2.3 磨损的失效分析	15
1.3 磨损机制及其影响因素	20
1.3.1 粘着磨损	20
1.3.2 磨料磨损	24
1.3.3 表面疲劳磨损	29
1.3.4 腐蚀磨损	32
1.3.5 冲蚀磨损	32
1.3.6 微动磨损	36
1.4 磨损的试验与分析	39
1.4.1 磨损试验	39
1.4.2 表面形貌的测试	43
1.4.3 磨损表面失效与磨屑分析	45
1.4.4 磨损的动态测试	50
参考文献	53

第 2 章 耐磨铸钢 55

2.1 高锰钢	56
2.1.1 高锰钢的化学成分标准	56
2.1.2 高锰钢的化学成分	59
2.1.3 合金元素在高锰钢中的应用	70

2.1.4	高锰钢的铸造	80
2.1.5	高锰钢的具体铸造方法	91
2.1.6	高锰钢的热处理	95
2.1.7	高锰钢的强化处理	103
2.1.8	高锰钢的加工硬化机理	114
2.1.9	Mn17 高锰钢	115
2.2	奥氏体中锰钢	115
2.2.1	化学成分的选择	116
2.2.2	中锰钢组织及性能	117
2.2.3	中锰钢中的夹杂物	118
2.2.4	中锰钢的加工硬化	120
2.3	耐磨合金钢	120
2.3.1	耐磨钢中合金元素的作用	121
2.3.2	耐磨低合金钢	124
2.3.3	耐磨中合金钢	141
2.3.4	耐磨高合金钢	143
2.3.5	抗磨耐蚀不锈钢	146
2.3.6	轴承钢	148
2.3.7	耐热耐磨钢	152
	参考文献	155

第3章 耐磨合金铸铁 157

3.1	耐磨铸铁中常用的合金元素	157
3.1.1	白口铸铁的稳定性	157
3.1.2	合金元素与碳的相互作用	161
3.1.3	常用合金元素	162
3.1.4	常用合金元素在铸铁中的应用	165
3.2	减摩铸铁	175
3.2.1	含磷铸铁	176
3.2.2	钒钛铸铁	177
3.2.3	硼铸铁	177
3.2.4	铌铸铁	178
3.3	抗磨铸铁	180

3.3.1 常用白口铸铁分类	181
3.3.2 普通白口铸铁	183
3.3.3 低合金白口铸铁	184
3.3.4 镍硬白口铸铁	186
3.3.5 中合金白口铸铁	188
3.3.6 高铬钼白口铸铁	190
3.3.7 高铬白口铸铁	194
3.4 冷硬白口铸铁	200
3.4.1 冷硬白口铸铁的成分及性能特点	200
3.4.2 冷硬白口铸铁的应用	202
3.5 中锰耐磨球墨铸铁	204
参考文献	205

第4章 有色合金及其他耐磨材料

208

4.1 概述	208
4.1.1 轴承合金的组织与性能	208
4.1.2 轴承合金的种类	209
4.2 锡基合金	209
4.2.1 锡-锑二元相图及锡-锑-铜合金的组织	209
4.2.2 锡基轴承合金化学成分及其性能	210
4.3 铅基合金	210
4.4 铜合金	214
4.4.1 锡青铜	214
4.4.2 铅青铜	218
4.4.3 铸造铝青铜	221
4.4.4 其他青铜	224
4.4.5 变形青铜轴承合金	229
4.4.6 黄铜(铜锌)合金	231
4.5 铝基轴承合金	235
4.5.1 铝基轴承合金的性能特点及其类型	235
4.5.2 铝基轴承合金的化学成分、力学性能与应用范围	236
4.6 锌基轴承合金	237
4.6.1 锌合金的组织	238

4.6.2 锌基轴承合金的化学成分与性能	239
4.7 钴基和镍基耐磨合金	241
4.7.1 钴基耐磨合金	241
4.7.2 高碳低钴合金和高碳镍基合金	255
参考文献	259

第5章 铸造金属复合耐磨材料 260

5.1 铸渗复合	260
5.2 铸镶复合	266
5.3 双液双金属复合铸造抗磨材料	268
5.4 铸造原位合成复合技术	270
5.5 压力铸造法制备复合材料	271
参考文献	272

第6章 典型耐磨零件生产实例 273

6.1 磨球	273
6.2 球磨机衬板	275
6.2.1 平做立浇法双金属复合衬板	276
6.2.2 双液双金属复合铸造衬板	279
6.3 破碎机颚板	279
6.3.1 双液浇注可变铸型双金属复合铸造颚板	280
6.3.2 双液双金属复合铸造颚板	281
6.3.3 双金属组合式齿板	282
6.4 锤头	282
6.4.1 双液双金属复合铸造锤头	285
6.4.2 组合式双金属复合铸造锤头	286
6.4.3 镶铸法复合铸造锤头	287
6.4.4 消失模真空吸铸工艺镶铸双金属复合铸造锤头	288
6.5 风扇磨冲击板	290
6.5.1 复合铸造冲击板	292
6.5.2 镶铸冲击板	294
6.5.3 铸渗冲击板	295

6.6 抛丸机叶片	295
6.7 组合式双金属复合铸造板锤	298
6.8 截齿	299
6.9 轧辊	299
6.9.1 轧钢机轧辊	299
6.9.2 面粉轧辊	300
6.9.3 冶金轧辊	301
6.10 泵壳与叶轮	301
6.11 高炉料钟	302
参考文献	302

第 1 章 金属材料磨损基础

1.1 金属摩擦的基本理论

1.1.1 金属表面的特性

(1) 工程金属表面层的特性与组成

工程金属表面大多经切削加工然后再经研磨或抛光。工程金属表面层在加工过程中发生了强烈的塑性变形与加工硬化。其最外层由于切削过程中分子层的熔化与流动被淬硬成为微晶或非晶体的结构层，称为贝氏层。接着是严重变形层和轻微变形层。大部分金属在大气中表面都受到氧化形成一层氧化膜，而且根据环境条件的不同，可形成其他表面膜（如硫化物和氮化物膜等），这些化学膜对表面相互作用的性质影响极大，而实际效应则根据膜的性质有很大区别。在活性环境中，除了化学腐蚀膜外，还有吸附膜。在空气中的吸附膜主要为水汽，此外还有油膜与脂膜。同时金属表面常有裂纹与空洞。图 1-1 所示为金属表面层特性的剖面示意。图 1-2 所示为表面层特性的量级。

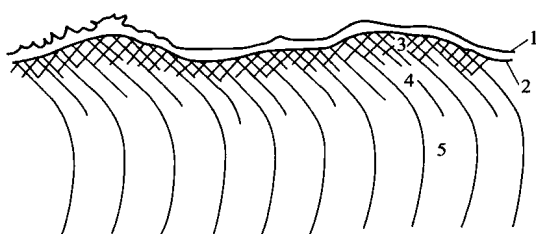


图 1-1 在空气中经磨削和抛光的
金属表层剖面示意

1—氧化物（约为 $0.02\mu\text{m}$ ）；2—贝氏层（约为 $0.1\mu\text{m}$ ）；
3—严重变形层（约 $1\mu\text{m}$ ）；4—轻微变形层
（约 $25\sim 60\mu\text{m}$ ）；5—基体

(2) 金属表面的几何形状

金属表面的几何形状或几何织构取决于金属表面加工方法的特性。即使经仔细加工的表面，在显微镜下仍然是凹凸不平的，这种状况常用粗糙度来

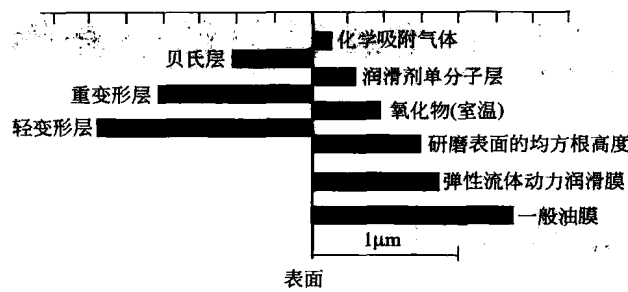


图 1-2 表面层特性的量级

表示。粗糙度是由表面上波长很短的凹凸体组成的（图 1-3）。表面上的微小凸出体，称为微凸体。微凸体的分布根据加工方法的特性而不同，可以呈一定的方向性（如车削、铣削和刨削加工的表面），也可以是各向同性的（如经抛光或研磨加工的表面）。

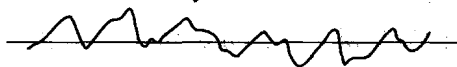


图 1-3 表面粗糙度示意

表面形貌的特征对摩擦磨损影响很大，因此必须对微凸体的分布、尺寸和形状等进行测量。表面测量方法很多，如光学或电子显微镜、光轮廓、斜剖面及表面轮廓仪等。表面轮廓仪可提供有代表性的表面长度且在垂直平面有高的分辨率，但其所记录的图线因竖向放大率高会使轮廓失真，其实大多数表面上的微凸体是具有平缓的坡度，而不是轮廓仪记录图上所看到的那种锯齿状迹线（图 1-4）。

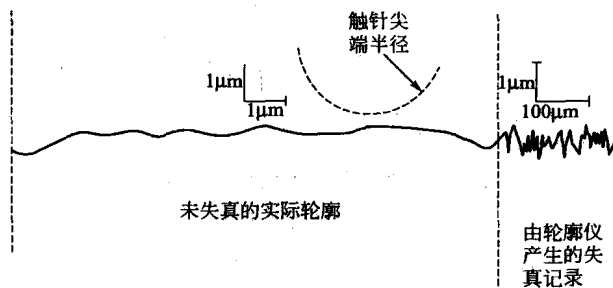


图 1-4 轮廓仪记录的失真迹线与真实的轮廓

(3) 表面参数

除了某些由切削加工产生的表面有较好的周期性织构外，表面纹理的高度分布与间距的分布是随机变化的。从统计学来看，描述不同种类的表面织

构可以从简单的平均形式到复杂的相关函数。

① 高度 最常用的两个高度参数是粗糙度的 cla 值, 即中线平均高度和 rms 值即均方根高度。 rms 值一般约为 cla 值的 1.1 倍。

还有几个用于高度的参数。如从一段迹线中测定最高波峰到最低波谷的总高度, 用 R_t 表示。还有一种是选择几个总高度的平均值, 如十点高度 R_z , 即在所有记录的迹线上选择 5 个最高峰和 5 个最低谷求其平均值。德国用的 R_{tm} 是用同样长度的 5 个样品的 R_t 平均值。

虽然一种高度的测量与另一种测量所得的比值是随着形状和轮廓的变化而变化的, 但在一定程度上仍可互相换算, 见表 1-1。

② 间距 峰间的间距是十分重要的。单位长度的峰数应当计出, 波峰数的计算是按邻近的波谷超过一定深度以后的波峰来决定的。这样就可以得到在一定水平线上单位长度的支承截段数。

③ 支承面积 阿博特 (E. J. Abbot) 将表面轮廓最低点以上各处轮廓内长度的百分率测量出来, 作出了该轮廓的支承面积曲线 (图 1-5), 这对阐明两表面在载荷作用下作相对运动的情况是有帮助的。

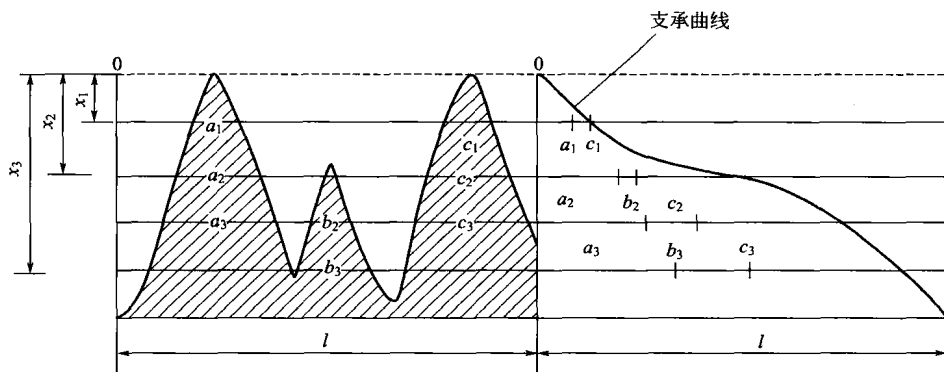


图 1-5 支承面积曲线

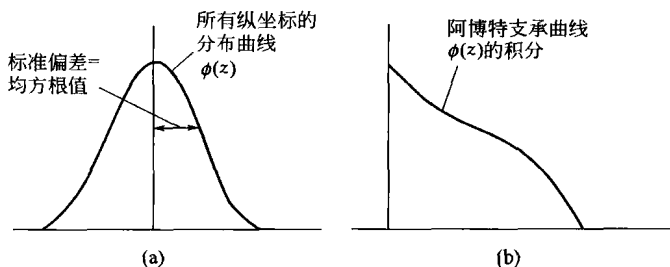


图 1-6 支承曲线与所有纵坐标曲线的累积分布关系

绝大多数金属表面织构高度都接近于高斯分布 [图 1-6(a)], 故支承面积曲线实际上是所有纵坐标分布曲线的累积分布 [图 1-6(b)]。

表 1-1 各种粗糙度高度间的比值

表 面	$\frac{rms}{cla}$	$\frac{10 \text{ 点法}}{cla}$	$\frac{R_z}{cla}$
车削	1.1~1.15		4~5
磨削	1.18~1.36	4~5	7~14
研磨	1.3~1.5	5~7	7~14
随机统计	1.25		8.0

④ 峰顶曲率与高度分布 峰顶平均曲率半径与高度分布和塑性指数有关, 即与接触时弹塑性有关。这些量可以容易地从轮廓记录输入电子计算机中得出。

除上述几种参数外, 还有微凸体的斜度及其空度和实度等。

1.1.2 金属表面的接触

(1) 接触面积

如果将两个几何学的平面相互压在一起, 则整个面都接触。如果只是某些微凸体相互接触, 而不是整个固体表面相互接触, 则其接触具有不连续性和不均匀性。如图 1-7 所示, 接触面积可分为三种: 表观 (或名义) 接触面积, 即接触表面的宏观面积, 由接触物体的外部尺寸决定, 以 A_n 表示, $A_n=ab$; 轮廓接触面积, 即物体的接触表面被压扁部分所形成的面积 (如图 1-7 中小圈范围内面积), 以 A_p 表示, 其大小与表面承受的载荷有关; 实际接触面积, 即物体真实接触面积的总和 (如图 1-7 中小圈内的黑点表示的各接触点面积的总和), 以 A_r 表示。

两个固体表面接触时, 实际接触面积仅为表观接触面积的很少一部

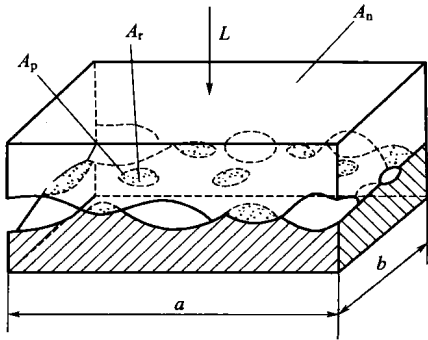


图 1-7 接触面积

分, 一般为 $0.01\% \sim 0.1\%$, 而轮廓接触面积一般为表观接触面积的 $5\% \sim 15\%$ 。

实际接触面积 A_r 与所加载荷 L 的关系, 理查德 (Archard) 认为在弹性接触的情况下可用下式表示:

$$A_r = KL^m \quad (1-1)$$

式中, K 为与材料弹性性质和假设的表面结构有关的一个系数; m 依不同的表面接触模型而异, 表面接触的形式越复杂, 实际接触面积与载荷越接近线性关系。

实际接触面积与载荷之间的关系不但取决于变形的形式, 而且还取决于表面轮廓的分布。当微凸体发生塑性变形时, 对于微凸体高度的任何分布, 载荷与实际接触面积均呈线性关系。当微凸体发生弹性变形时, 仅在微凸体高度的分布接近于指数型的情况下, 载荷与实际接触面积才具有线性关系。对于大多数工程表面, 无论是弹性接触还是塑性接触, 实际接触面积均与所加载荷成正比。

对于金属之间的接触, 实际接触面积可表示为

$$A_r \propto \frac{L}{P_y} \quad (1-2)$$

式中, P_y 是较软材料的屈服压强。它与表面的轮廓和弹性变形的类别 (如挤压等) 有关。在很多情况下, 可取 $P_y = HB$, HB 为较软材料的布氏硬度。由式(1-2) 可以看出, 载荷越大, 实际接触面积越大; 硬度越高, 实际接触面积越小。

(2) 接触力学

① 法向载荷作用下的接触应力

a. 压应力。假设图 1-8 中为一半球形的硬滑块与一软平面接触, 由于载荷的作用, 接触处发生弹性变形, 则接触区为一个直径为 $2a$ 的圆形面积。从接触面积的中心到任何半径距离 r 处的压应力可用下式表示:

$$\sigma_r = \sigma_{\max} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-3)$$

最大的压应力位于接触圆的中心, 而在接触面积的边缘即 $r=a$ 处, 则应力为零。其形状分布如图 1-8 所示, 最大压应力为

$$\sigma_{\max} = \frac{3L}{2\pi a^2} \quad (1-4)$$

$\sigma_{\max}$ 作用于表面上, 即 $z=0$ 处。

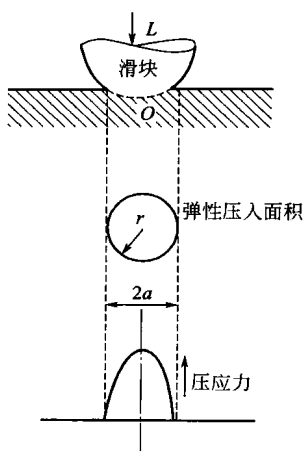


图 1-8 半球形滑块和平面接触

b. 切应力。最大切应力 $\tau_{\max}$ 作用于离表面 $0.47a$ 的材料内部 (图 1-8 的 O 处), 与 $\sigma_{\max}$ 有如下关系:

$$\tau_{\max} = 0.31\sigma_{\max} \quad (1-5)$$

② 法向载荷与切向载荷同时作用下的接触应力 当法向载荷与切向载荷同时作用时, 则将切向载荷 μL 所产生的应力场与法向载荷产生的应力分布进行合成, 这时, 最大切应力值有所增加且作用的位置移得更接近表面。

(3) 接触变形

在大多数实际情况下, 较高的微凸体可能发生塑性变形, 而较低的接触着的微凸体仍然只发生弹性变形。因此遇到的是一混合的弹塑性系统。这时载荷越大, 法向接近量也越大, 塑性接触点的数目就越多。

① 表征变形程度的指标 塑性指数是一很有用的指标参数, 它是显示表面的物理和几何性能的无量纲群。以球与平面的接触来讨论, 如图 1-9 所示, 当弹性接触时, 塑性指数表示为

$$\Omega = \frac{E'}{H} \left(\frac{\sigma}{R} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-6)$$

式中 E' ——两材料的综合弹性模量;

H ——材料的压痕硬度;

σ ——微凸体高度均方根偏差;

R ——微凸体平均曲率半径。

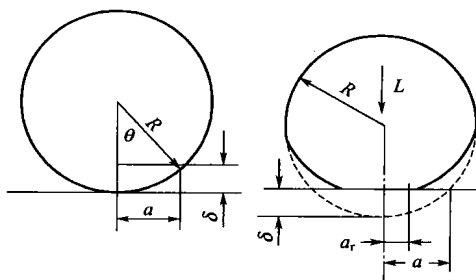


图 1-9 球与平面的弹性接触

当 $\Omega < 0.6$ 时, 为完全弹性接触; 当 $\Omega > 10$ 时, 为完全塑性接触; 当 $0.6 \leq \Omega \leq 10$ 时, 是弹性变形和塑性变形同时存在的混合状态。

② 减少塑性指数的方法 增大材料的硬度和微凸体的峰顶曲率半径或

减小微凸体高度，都可以使塑性指数减小。如用抛光、研磨、磨合或利用特殊加工方法来降低表面粗糙度、增大微凸体的曲率半径，则可降低塑性指数，使摩擦表面呈弹性接触状态，从而达到减少摩擦磨损、防止胶合的目的。图 1-10 所示为磨合过程中塑性指数随时间的变化，由此图，可以决定磨合时间，并根据磨合过程中塑性指数的变化，来判断表面是否正在向弹性状态即磨合完成状态转变。

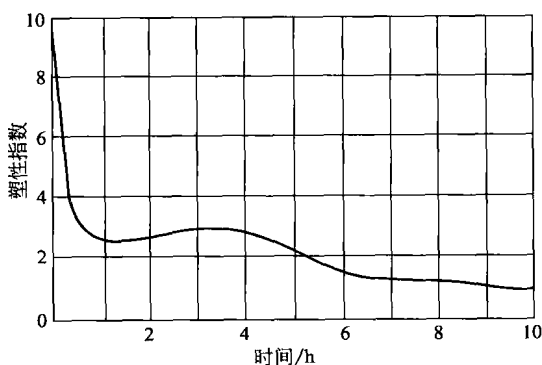


图 1-10 磨合过程中塑性指数随时间的变化

(4) 接触表面的相互作用

当两个粗糙的金属表面在载荷作用下相接触时，最先接触的是第一个表面的微凸体高度和对应的第二个表面微凸体高度两者之和为最大值的部位。随着载荷的增加，其他较高的成对的微凸体也相应地逐渐发生接触。每一对微凸体进入接触时，开始是弹性变形，然后，当载荷超过某一临界值时，则发生塑性变形。因此，金属表面是处于弹塑性变形状态。由于微凸体的高度不一，所以每一时刻，同一表面不同高度的微凸体变形程度也不同。成对的最高的微凸体变形最大，成对的较低微凸体也可能不发生接触，而介于以上两者之间的较高的微凸体依高度不同则发生程度不同的变形。

当两个表面相互接触时，表面间相互作用的一种形式就是在接触区的某些部位发生粘着。这是因为即使经过精密加工的表面，从微观上看仍是凹凸不平的，所以两表面相互接触时，实际上只在少数较高的微凸体上产生接触，由于实际接触面积很小而接触点上的应力很大，因此在接触点上发生塑性流动、粘着或冷焊。这种接触点称为接点，也称为粘着点或结点。对于产生粘着的微观机制目前还没有统一的见解，一般认为与两接触表面间分子的相互作用有关，因此这种接触表面间的相互作用也称为分子相互作用。