

金属磨损和 金属耐磨材料 手册

张清 主编

冶金工业出版社

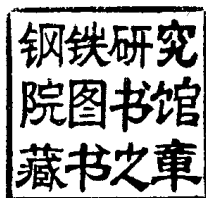
TG 113.23-62

Z

23

金属磨损和金属耐磨 材料手册

张清 主编



113.23-62

冶金工业出版社

内 容 提 要

本书主要以图表形式列出了奥氏体锰钢、耐磨合金铸铁、低合金钢、不锈钢、合金工具钢、轴承用钢、耐磨合金、硬质合金、钢结硬质合金和滑动轴承合金的性能和磨损特性数据,以及提高金属耐磨性的表面处理方法和摩擦磨损特性数据。同时,本书还以现有的金属摩擦磨损理论为依据,简要地论述了金属摩擦的基本理论、金属磨损的主要类型、机制及其影响因素。此外,对金属磨损的测试设备和测试方法也作了简要的介绍。

本书可供各工业技术部门的生产厂矿和设计、科研单位有关的工程技术人员使用,也可供大专院校师生参考。

金属磨损和金属耐磨材料手册

张 清 主编

*

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所经销

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 35 1/2 字数 844 千字

1991年 1 月第一版 1991年 1 月第一次印刷

印数00,001~2,400册

ISBN 7-5024-0748-0

TG·113 定价26.00元

前 言

磨损是机械设备中金属工件失效的主要形式之一。金属磨损与金属腐蚀、金属疲劳相比，虽很少导致灾难性危害，但由于金属磨损引起机械设备的工作效率降低、工件更换或维修频繁、能源和金属材料消耗增加等所造成的经济损失则是相当惊人的。此外，机械设备的金属工件磨损，还会引起某些工业产品质量降低，甚至影响工业技术向现代化自动化发展。所以，近30年来，对金属磨损和耐磨材料的研究，愈来愈引起国内外人们广泛的重视。

金属磨损过程是一种十分复杂的现象，它牵涉到摩擦系统中工件的外部因素和材料的内部因素。外部因素系指载荷、相对运动形式、运动速度和持续时间、环境温度、介质和润滑条件等。内部因素主要是指材料的化学成分、显微组织和力学性能。摩擦系统中任一参数变化都将引起磨损发生变化。从磨损类型来说，一般可分为五类，即磨料磨损、粘着磨损、冲蚀磨损、腐蚀磨损和表面接触疲劳磨损。但金属工件的实际磨损过程不只是一类类型的磨损，而往往从一类磨损变成两类或多类磨损结合在一起的型式。由于磨损的复杂性，多变性，同时，磨损又是一种微观和动态过程，所以摩擦系统中某一参数在某一条件下对材料的耐磨性有利，而在另一条件下可能变得不利。

当前，关于金属磨损和金属耐磨材料的研究工作正在深入开展。为了把国内外现有的研究成果中的有关技术资料和数据较系统地汇集起来便于大家使用和参考，在中国金属学会的支持下，我们组织编写了《金属磨损和金属耐磨材料手册》一书。在编写组和冶金工业出版社有关同志的共同努力下，使本手册得以出版。

本手册共分十五章。前三章简要地讨论金属摩擦、金属磨损及其机制方面的基本理论。第四章较系统地介绍磨损测试设备与测试技术。第五章到第十四章介绍奥氏体锰钢、耐磨合金铸铁、合金钢、耐磨合金、钢结硬质合金、硬质合金、滑动轴承合金等材料的技术资料，以及这些材料在一定条件下的磨损试验数据和某些应用实例。第十五章介绍提高金属材料的表面处理方法与其摩擦磨损特性的数据。

本手册可供各工业部门的生产厂矿和设计、科研单位的有关工程技术人员使用，也可供大专院校师生参考。

本手册各章初稿撰写人有：陈华辉（第一章），林福严、许小棣（第二章），邵荷生（第三章），许小棣（第四章），朱广泰、苏中顺（第五章），贾福盛（第六章第一节）、周宏（第六章第二节）、周庆德（第六章第三、四、五节），王洪发（第七章），朱维翰（第八、九章），沈梨庭（第十章），张清（第十一章），萧玉麟（第十二章），陈献廷（第十三章），项宏瑶（第十四章），高彩桥、王铀（第十五章第一、二节）、杨瑞林（第十五章第三节）。

全稿由刘嘉禾、张清审校。

本手册内容涉及面较广，由于撰写、编审人员水平有限和经验不足，不当之处恳请广大读者给予指正。

主编 张 清

一九八九年八月

目 录

第一章 金属摩擦的基本理论	1
第一节 金属表面的特性	1
一、工程金属表面层的特性与组成	1
二、金属表面的几何形状	1
三、表面参数	2
第二节 金属表面的接触	5
一、接触面积	5
二、接触力学	7
三、接触变形	8
四、接触表面的相互作用	10
第三节 摩擦分类与古典摩擦定律的讨论	10
第四节 干摩擦	11
一、分子吸引理论	11
二、机械啮合理论	12
三、分子机械理论	12
四、粘着摩擦理论	13
五、影响干摩擦的因素	15
第五节 边界摩擦	19
第二章 金属的磨损	22
第一节 磨损的分类	22
一、磨损分类	22
二、磨损类型的确定	26
第二节 磨损的评定方法	27
一、磨损量	27
二、材料耐磨性	27
三、冲蚀磨损率	28
第三节 磨损失效分析	28
一、磨损失效模式的确定	28
二、磨损分析基本方法	31
三、磨损状态检测	33
第三章 磨损机制及影响因素	37
第一节 粘着磨损	37
一、机制	37
二、粘着磨损过程	40
三、粘着磨损方程	40
四、影响粘着磨损的主要因素	42
第二节 磨料磨损	49

一、机制	49
二、磨料磨损定律和计算	51
三、影响磨料磨损的主要因素	56
第三节 表面疲劳磨损	69
一、机制	69
二、疲劳磨损的理论	72
三、影响疲劳磨损的主要因素	74
第四节 腐蚀磨损	75
一、氧化磨损	76
二、特殊介质中的腐蚀磨损	77
第五节 冲蚀磨损	79
一、冲蚀过程中材料和磨粒发生的变化	79
二、冲蚀磨损机制与计算	80
三、与冲蚀磨损有关的因素	85
第六节 微动磨损	91
一、机制	91
二、微动磨损的模型	92
三、影响微动磨损的主要因素	94
第四章 磨损测试设备与测试技术	100
第一节 磨损试验	100
一、磨损试验的类型	100
二、试验条件	100
三、磨损试验机类型	101
四、试样试验常用的磨损试验机	101
第二节 表面形貌的测试	105
一、表面形貌的一般测量方法	105
二、表面粗糙度电动轮廓仪	106
三、实际接触面积的测量	106
第三节 磨损表面失效与磨屑分析	108
一、磨损失效常用的分析方法	108
二、近代表面微观分析仪器	110
三、磨屑分析	112
第四节 磨损的动态测试	114
一、在光学显微镜下的动态测试	115
二、在扫描电镜中的动态测试	115
三、在其他表面分析仪器中的动态测试	116
第五章 奥氏体锰钢	118
第一节 奥氏体锰钢的化学成分	119
一、化学成分	119
二、元素的影响	119
第二节 奥氏体锰钢的组织 and 性能	126
一、奥氏体锰钢的平衡状态组织图	126

二、铸态奥氏体锰钢	126
三、水淬状态的奥氏体锰钢	127
四、奥氏体锰钢的加工硬化	128
五、奥氏体锰钢水淬后再热	135
六、影响奥氏体锰钢性能的其他因素	136
七、奥氏体高锰钢的物理性能	139
第三节 奥氏体锰钢的制造工艺	141
一、奥氏体锰钢的冶炼	141
二、奥氏体锰钢的铸造	142
三、奥氏体锰钢的热处理	146
四、切割、焊补和切削加工	155
第四节 奥氏体锰钢的耐磨性	158
一、抗磨料磨损	158
二、影响耐磨性的因素	160
第六章 耐磨合金铸铁	174
第一节 减摩铸铁	174
一、高磷铸铁	174
二、钒钛铸铁	176
三、铌铸铁	178
四、硼铸铁	179
第二节 低合金铸铁	182
一、普通白口铸铁	182
二、锰白口铸铁	182
三、钨白口铸铁	184
四、硼白口铸铁	188
五、钒白口铸铁	190
第三节 镍硬铸铁	194
一、化学成分	194
二、物理性能	196
三、力学性能	196
四、铸造	196
五、热处理	198
六、应用	204
七、耐磨性数据	205
八、焊接和机械加工	206
第四节 高铬钼铸铁	208
一、化学成分	210
二、金相组织	214
三、物理性能	214
四、力学性能	220
五、铸造性能	220
六、铸造	223

七、热处理	224
八、应用	227
九、耐磨性数据	231
十、焊接及切削性	232
第五节 高铬铸铁	234
一、化学成分	234
二、金相组织	239
三、力学性能	245
四、铸造性能	245
五、铸造工艺	245
六、应用	246
七、耐磨性数据	249
第七章 碳素钢和低合金钢的磨损特性	252
第一节 碳素钢的磨损特性	252
一、磨料磨损	252
二、冲蚀磨损	258
三、粘着磨损	260
第二节 低合金钢的磨损特性	262
一、16Mn钢	262
二、45Mn2钢	263
三、50Mn2铸钢	263
四、65Mn钢	264
五、31Mn2Si钢	264
六、30MnSiTi钢	265
七、50SiCrMo (原钢号为EDSi)	266
八、30Cr4Mn2钢 (原钢号为Fe/4Cr/0.3C/2Mn)	266
九、30Cr3Mn2Mo钢	268
十、40Cr2Mo2V钢	269
十一、32Cr2MnSiMoR铸钢	270
十二、40CrMnSiMoR铸钢	272
十三、45Cr2MnSiMo钢	272
十四、50Cr5Mo3W2V1钢 (原钢号为B1)	272
十五、23MnNiMo钢	273
十六、30CrNiMoR铸钢	275
十七、35MnCrNi和30Mn2CrNi钢	275
十八、40CrNiMo钢 (美国钢号为4340)	275
十九、40CrNiMoAlSi和50CrNiMoAlSi (原钢号为4340+1.5Al+1.5Si和4350+1.5Al+1.5Si)	277
二十、40CrNi3Mo2Si2V钢和40CrNi3Mo2SiAlV钢 (原钢号为A1和A2钢)	278
二十一、40Cr2Ni3Mo2V	279
第八章 不锈钢的磨损特性	282
第一节 不锈钢的磨料磨损	282

一、Cr21-Ni12奥氏体钢与沉淀硬化不锈钢	282
二、Cr18-Ni10奥氏体不锈钢	282
三、304不锈钢钢球	283
四、铬不锈钢	283
五、马氏体不锈钢在热状态下的磨料磨损	284
第二节 不锈钢的粘着磨损	286
一、几种不锈钢的粘着磨损试验	286
二、不锈钢在不同气氛下的磨损	286
三、含氮不锈钢的擦伤	289
第三节 不锈钢的冲蚀磨损	290
一、316、304钢的冲蚀磨损	290
二、不锈钢的高温冲蚀磨损	293
第四节 不锈钢的腐蚀-磨料磨损	294
一、在球罐中的腐蚀-磨料磨损	294
二、在新旧砂浆中的腐蚀-磨料磨损	294
三、几种不锈钢的磨损-腐蚀-磨料磨损	296
第九章 合金工具钢的磨损特性	298
第一节 磨料磨损	298
一、合金工具钢的磨料磨损	298
二、高速钢的磨料磨损	303
第二节 粘着磨损	304
一、合金工具钢的粘着磨损	304
二、高速钢的粘着磨损	306
第三节 $\Delta 7X\Phi H111$ 钢的冲蚀磨损	307
第四节 工具钢应用中磨损的实例	308
一、刀具的磨损	308
二、模具的磨损	311
第十章 轴承钢的磨损特性	316
第一节 滚动轴承的磨损特性及影响因素	316
一、接触疲劳磨损	316
二、滑动磨损	319
三、微动磨损	319
第二节 高碳铬轴承钢的磨损特性	321
一、钢的成分和应用场合	321
二、高碳铬轴承钢的接触疲劳寿命	321
三、铬轴承钢的耐磨性	340
第三节 高温轴承钢的磨损特性	349
一、钢的化学成分及应用	349
二、高温轴承钢的接触疲劳寿命	350
三、高温轴承钢的耐磨性	356
第四节 不锈轴承钢的磨损特性	359

一、钢的化学成分及应用场合	359
二、不锈轴承钢的接触疲劳寿命	360
三、不锈轴承钢的耐磨性	360
第五节 渗碳轴承钢的磨损特性	361
一、渗碳轴承钢的化学成分和应用场合	361
二、渗碳轴承钢的接触疲劳寿命	362
第十一章 钴基和镍基耐磨合金	368
第一节 钴基耐磨合金	368
一、钴基合金的化学成分	369
二、钴基合金的力学性能	369
三、钴基合金的抗氧化和耐腐蚀性	370
四、钴基合金的耐磨性	372
第二节 高碳低钴合金和高碳镍基合金	384
一、高碳低钴合金的化学成分和性能	385
二、高碳镍基合金的化学成分和性能	387
第十二章 钢结硬质合金	390
第一节 钢结硬质合金的系列代号、牌号、成分和性能	390
一、代号和牌号	390
二、成分和性能	390
第二节 钢结硬质合金的加工	397
一、钢结硬质合金的机械加工	397
二、钢结硬质合金的电加工	399
第三节 钢结硬质合金的热处理	400
一、临界点与S曲线	400
二、热处理	401
三、时效硬化热处理	404
四、表面化学热处理	404
第四节 钢结硬质合金的耐磨性与摩擦磨损特性	408
一、钢结硬质合金的耐磨性	408
二、钢结硬质合金的摩擦磨损特性	408
第五节 钢结硬质合金的应用效果	412
一、几种模具结构典型实例	412
二、钢结硬质合金的应用效果	415
第十三章 硬质合金	417
第一节 硬质合金牌号、成分、性能及用途	417
一、硬质合金分类	417
二、我国硬质合金牌号的表示方法	417
三、金属切削加工用硬质合金牌号、性能及用途	417
四、矿山地质工具用硬质合金牌号、性能及用途	417
五、模具、耐磨零件用硬质合金牌号、性能及用途	423
六、铸造碳化钨牌号、性能及用途	423
第二节 硬质合金标准制品	425

一、硬质合金焊接刀具	425
二、硬质合金拉伸模坯	426
三、矿山地质工具用硬质合金	428
第三节 提高硬质合金强度和耐磨性的工艺方法	428
一、热处理	428
二、金刚砂轮磨削	431
三、振动加工	431
第十四章 滑动轴承合金	439
第一节 概述	439
一、滑动轴承合金应具备的组织与性能	439
二、滑动轴承合金的种类	439
第二节 滑动轴承合金的牌号、成分、性能和用途	440
一、锡基轴承合金	440
二、铅基轴承合金	444
三、铜铅轴承合金——铅青铜	449
四、铜锡轴承合金——锡青铜	453
五、铜铝轴承合金——铝青铜	456
六、变形青铜轴承合金	463
七、铜锌轴承合金	465
八、铝基轴承合金	468
九、锌基轴承合金	473
十、金属-非金属复合轴承材料	478
第十五章 提高金属材料耐磨性的表面处理方法	492
第一节 表面扩散处理	492
一、一般化学热处理	492
二、渗金属及耐磨性	510
第二节 其他表面强化技术	520
一、熔融覆盖法	520
二、喷涂与喷焊技术	532
三、气相沉积技术	537
四、离子注入技术	542
第三节 铸渗和铸镶复合技术	545
一、铸渗复合耐磨材料	545
二、铸镶复合耐磨材料	550

第一章 金属摩擦的基本理论

第一节 金属表面的特性

一、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。从肉眼来看似乎很平滑，但在显微镜下看，仍是凹凸不平的，我们用粗糙度来表示其特征。

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融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，可形成其它表面膜（如氮化物、硫化物和氟化物膜等），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为金属表面层特性的剖面示意图。图1-2为表面特性的量级图。

二、金属表面的几何形状

表面的几何形状或几何结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表示。粗糙度是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）。

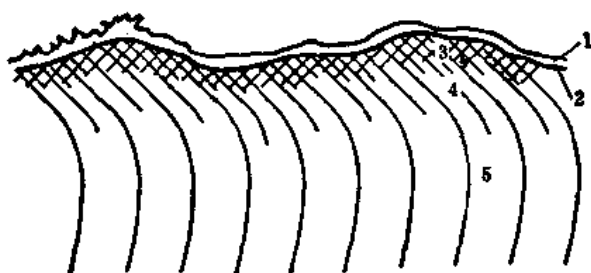


图 1-1 在空气中经磨削和抛光的金属表层剖面图⁽¹⁾

1—氧化物（约 $2 \times 10^{-2} \mu\text{m}$ ）；2—贝氏层（约 $10^{-1} \mu\text{m}$ ）；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

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及在垂直平面有高的分辨率。但表面轮廓仪所记录的图

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）。要全面了解实际表面形貌，可以绘制三维表面轮廓图，从而清晰地鉴别实际的凸峰（图1-5）。

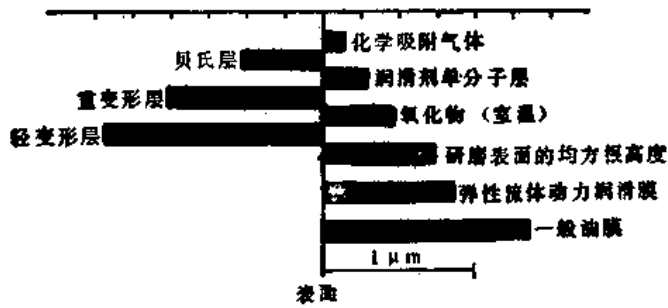


图 1-2 表面层特性的量级⁽²⁾

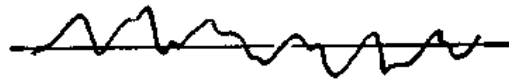


图 1-3 表面粗糙度示意图⁽²⁾

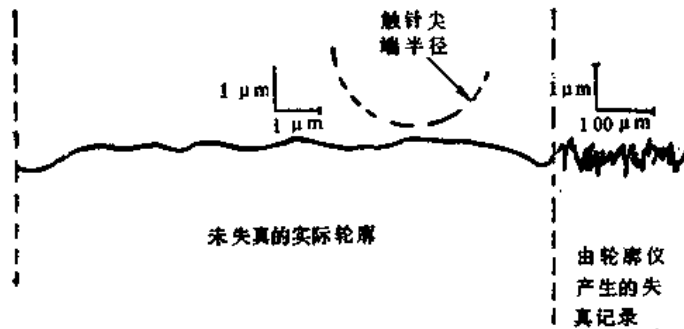


图 1-4 轮廓仪记录的失真迹线与真实的轮廓⁽²⁾

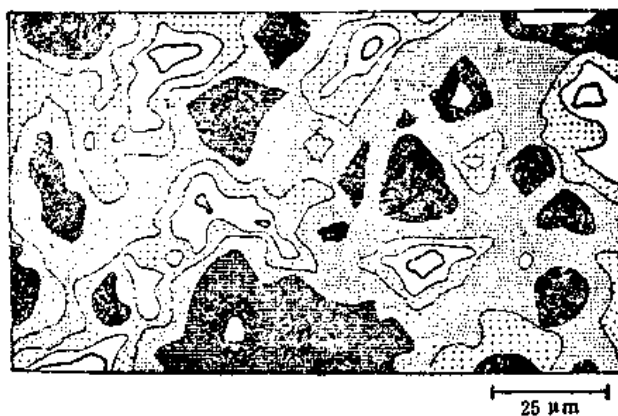


图 1-5 实际表面形貌图（淡的面积为高区）⁽¹⁾

三、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结构外，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类型的表面结构可以从简单的平均形式到复

杂的相关函数。

(一) 高度

最常用的两个高度参数是粗糙度的 cla 值(相当于我国粗糙度标准的 R_a 表示法)即中线平均高度和 rms 值即均方根高度,如图1-6。

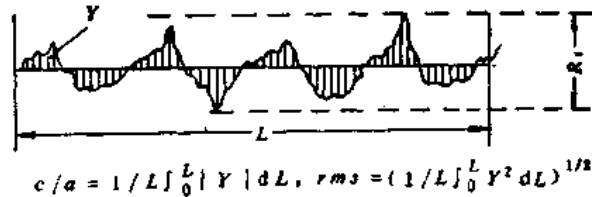


图 1-6 cla 和 rms 与表面轮廓^[3]

rms 一般约为 cla 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5个样品的 R_t 平均值。

虽然一种高度的测量对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如表1-1。

(二) 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段数。

(三) 支承面积

E.J.阿博特(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1-7),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。

表 1-1 各种粗糙度高度间的比值^[3]

表 面	$\frac{rms}{cla}$	$\frac{10点法}{cla}$	$\frac{R_t}{cla}$
车 削	1.1~1.15	4~5	4~5
磨 削	1.18~1.30	5~7	7~14
研 磨	1.3~1.5		7~14
随机统计	1.25		8.0

绝大多数金属表面织构高度都接近于高斯分布(图1-8a),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1-8b)为:

$$\psi(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \phi(z) dz$$

式中 z ——从一参考平面开始测量的轮廓高度;

$\phi(z)$ ——这些高度分布的概率密度函数。

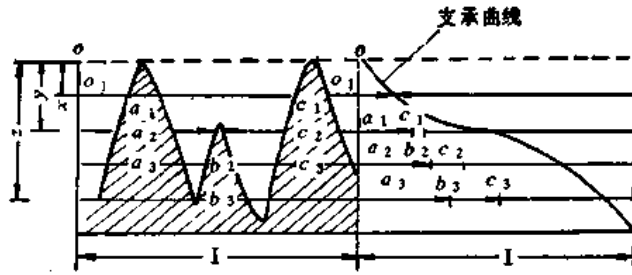


图 1-7 支承面积曲线^[7]

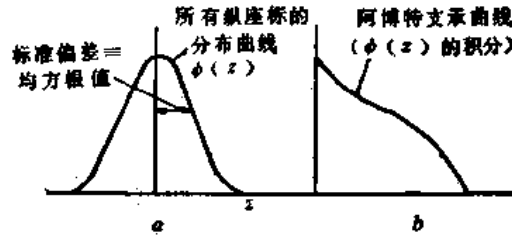


图 1-8 支承曲线b与所有纵坐标曲线a的累积分布关系^[7]

(四) 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，尚有微凸体的斜度及其空度和实度等。

(五) 相关方法

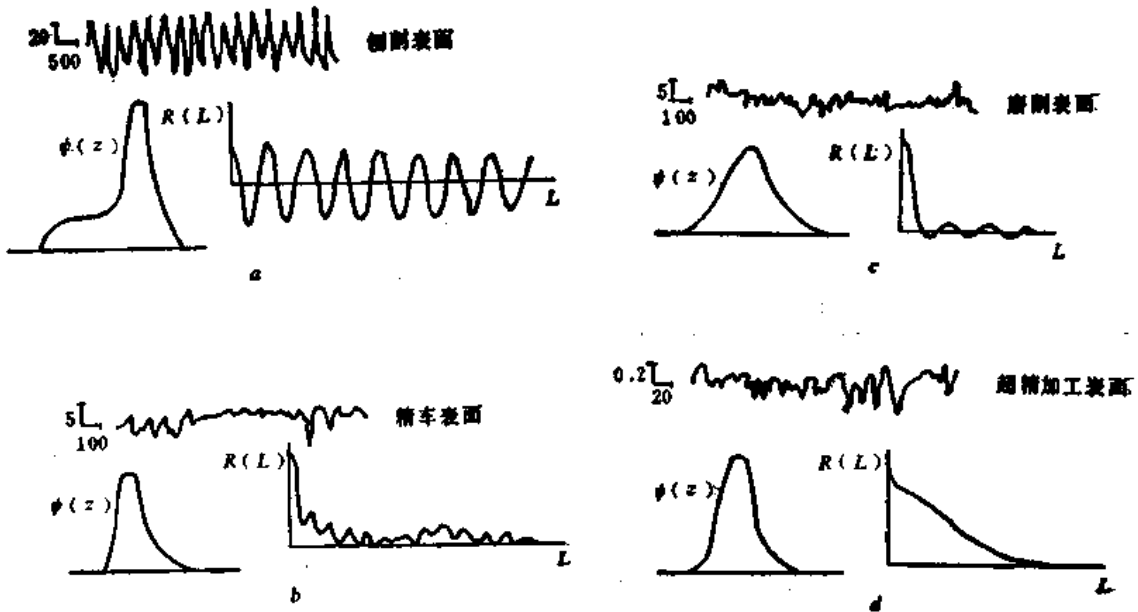


图 1-9 典型表面及求得的自相关函数^[14]

这种方法用以区别廓形形状，揭示轮廓的某些特性。

廓形的自相关函数为:

$$R(l) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{+L/2} z(x) \cdot z(x+l) dx \quad (1-1)$$

式中 $z(x)$ ——廓形在给定横坐标 x 处的高度;

$z(x+l)$ ——是相邻横坐标 $(x+l)$ 处的高度;

l ——取样距离;

L ——所取的轮廓长度。

图1-9表示切削加工表面的某些典型结果, 由图可知自相关函数可用来说明轮廓的一般特征。

第二节 金属表面的接触

一、接触面积

如果将两个理想光滑的平面相互压在一起, 当然是整个面积都接触。如两个粗糙表面相接触时, 则如图1-10所示, 实际上只是某些微凸体相互接触, 而不是整个固体表面相接触。因此有表观接触面积和实际接触面积之分。

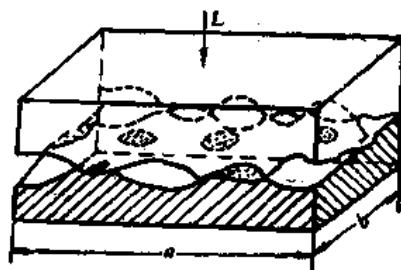


图 1-10 粗糙表面的接触 (a)

(一) 表观接触面积与实际接触面积

1. 表观接触面积 A_n

接触表面的表观接触面积由接触物体的外部尺寸所决定。图1-10中表观接触面积 $A_n = a \times b$ 。

2. 实际接触面积 A_r

实际接触面积是物体真实接触面积的总和, 即图1-10中黑点所示的面积, 它仅为表观接触面积的很少一部分, 一般只有百分之一到千分之一左右。在实际例子中, 精确估计一对表面间的真实接触面积是十分困难的。因此建立了一些粗糙面模型, 建立通用模型不仅可用于计算实际接触面积, 而且还可用于计算摩擦磨损, 通常采用具有轴对称形状的球型模型。

(二) 实际接触面积与载荷的关系

1. 微凸体等高的情况

可把粗糙表面上的微凸体看作是球面弓形体, 并假设一个微凸体上由载荷产生的位移并不影响相邻微凸体的高度。这些微凸体相对于某一基准平面 xx' 具有相同的高度 z (图1-11)。当有一单位表观面积的光滑平面在载荷作用下接近时, 法向接近量将为 $(z-d)$,

这里 d 为光滑表面和基准平面之间的间距。显然，各个微凸体发生相同的变形并承受相同的载荷 L_i ，当单位面积上有 η 个微凸体时，总载荷 L 将等于 ηL_i 。

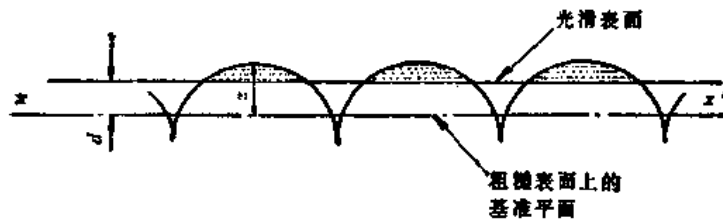


图 1-11 光滑平面和理想粗糙表面间的接触⁽¹⁾

(1) 弹性接触

由赫兹理论可求得载荷与总的实际接触面积 $A_r = \eta A_i$ 的关系为：

$$L = \left[\frac{4E'}{3\pi^{1/2}\eta^{1/2}R} \right] A_r^{3/2} \quad (1-2)$$

式中 R ——微凸体半径；

E' ——综合弹性模量， $\frac{1}{E'} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$ ，其中 ν_1 、 ν_2 和 E_1 、 E_2 分别为材料 1 和材料 2 的泊松系数与弹性模数。

(2) 塑性接触

如果载荷使微凸体在一恒定的流动压力 P 下发生塑性变形，可假设材料作垂直向下的位移而不作水平扩展，可求得：

$$L = 2PA_r \quad (1-3)$$

即实际接触面积与载荷成线性关系。

2. 微凸体不等高的情况

实际表面上的各个微凸体具有不同的高度，可用其峰高的概率分布来表示。如果光滑表面与基准平面的间距为 d ，则原来大于 d 的任何微凸体都将发生接触（图1-12）。因此，总的接触面积和予期的载荷可求得为：

$$A_r = \pi\eta R \int_d^{\infty} (z-d)\phi(z)dz \quad (1-4)$$

和
$$L = \frac{4}{3}\eta R^{1/2} E' \int_d^{\infty} (z-d)^{3/2}\phi(z)dz \quad (1-5)$$

用这些方程可以计算对应任何给定高度分布的总实际接触面积和载荷。

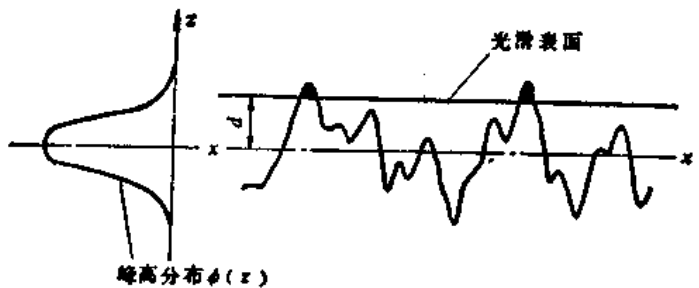


图 1-12 光滑平面和粗糙表面间的接触⁽¹⁾