


920679

高等学校试用教材

机床摩擦、磨损与润滑

湖南大学 李传乾 主编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI



16

机械工业出版社

高等学校试用教材

机床摩擦、磨损与润滑

湖南大学 李传乾 主编



机械工业出版社

本书内容包括金属表面特性与表面接触, 摩擦机理, 磨损机理, 流体动压润滑, 流体静压润滑, 弹性流体动压润滑简介, 边界润滑, 机床爬行运动机理, 润滑材料, 减摩、耐磨及摩擦材料, 表面强化处理, 摩擦、磨损试验简介等章。

本书可作为高等工科院校机械类专业摩擦学选修课教材, 也可供机械行业有关科研院所、工厂企业, 特别是机床厂和机械加工厂的工程技术人员参考使用。

机床摩擦、磨损与润滑

湖南大学 李传乾 主编

*

责任编辑: 孙祥根 版式设计: 张世琴

封面设计: 郭景云 责任校对: 熊天荣

责任印制: 王国光

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

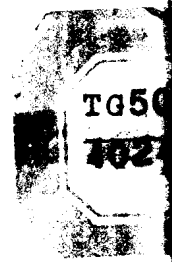
开本 787×1092 1/16·印张 10 3/4·字数 262 千字

1990年10月北京第一版·1990年10月北京第一次印刷

印数 0,001—1,500·定价: 2.20元

*

ISBN 7-111-02256-4/TH·369 (课)



前 言

本书是根据全国高等工业学校机械制造工艺与设备专业教学指导委员会确定的1985~1990年教材编审出版规划而编写的。其编写大纲经指导委员会审定。

本书力图对金属切削机床的摩擦、磨损与润滑基本知识作简明的叙述，并适当反映国内外摩擦学方面的科学技术新成就。全书共分十二章。一至三章介绍摩擦、磨损方面的基本理论与知识；四至六章讨论机床流体动压润滑，流体静压润滑，弹性流体动压润滑方面的基本知识；第七、八章讨论机床边界润滑及爬行运动机理；九至十一章介绍润滑材料，减摩、耐磨、摩擦材料及表面耐磨强化处理；第十二章介绍摩擦、磨损试验。

本书内容力求理论叙述确切，基本概念清楚，联系实际，循序渐进，简明精练，以符合教学规律及教学计划规定的教学时数。

本书可作为高等工科院校机制专业、机械设计专业以及其他机械类专业的教材，也可供从事机械工程方面的研究人员、厂矿企业技术人员及研究生参考。

本书由湖南大学李传乾教授主编。李传乾编写绪论及第一、二、三、七章；李青编写第四、五、六、十一章；李卫编写第八、九、十章；梁梅芬编写第十二章。由清华大学李民范副教授和北京机械工业管理学院王超然教授主审。

限于编者的水平，书中错误或不妥之处在所难免，敬希读者指正。

作者 1989.6

目 录

绪论	1	§ 7-5 刚体的边界润滑	98
第一章 金属表面特性与表面接触	3	§ 7-6 弹性体的边界润滑	99
§ 1-1 零件表面形貌的评定	3	§ 7-7 影响边界润滑性能的因素	100
§ 1-2 金属表面的性质	5	§ 7-8 边界润滑剂的分子结构	102
§ 1-3 表面接触	8	第八章 机床爬行运动机理	103
第二章 摩擦理论	12	§ 8-1 概述	103
§ 2-1 摩擦的定义与分类	12	§ 8-2 机床爬行运动机理	103
§ 2-2 库仑摩擦定律	13	§ 8-3 机床爬行运动的理论分析	105
§ 2-3 滑动摩擦机理	14	§ 8-4 不发生爬行的临界速度	108
§ 2-4 滚动摩擦机理	19	§ 8-5 爬行运动的临界速度与幅值	110
§ 2-5 摩擦力的动态特性	21	§ 8-6 消除机床爬行现象的途径	110
§ 2-6 影响滑动摩擦的因素	23	第九章 机床润滑材料	112
第三章 磨损理论	27	§ 9-1 润滑油	112
§ 3-1 概述	27	§ 9-2 润滑脂	118
§ 3-2 磨损机理	28	§ 9-3 润滑剂的添加剂	122
§ 3-3 磨损规律	38	§ 9-4 固体润滑剂	125
第四章 机床流体动压润滑	41	§ 9-5 润滑剂的选用原则	128
§ 4-1 概述	41	§ 9-6 部分机床主要部件用油牌号	129
§ 4-2 流体动压润滑原理	41	第十章 减摩、耐磨及摩擦材料	131
§ 4-3 雷诺方程	43	§ 10-1 减摩材料	131
§ 4-4 径向轴承	48	§ 10-2 耐磨材料	135
§ 4-5 机床常用多油楔动压轴承简介	53	§ 10-3 摩擦材料	146
第五章 弹性流体动压润滑理论简介	59	第十一章 表面耐磨强化处理	149
§ 5-1 概述	59	§ 11-1 概述	149
§ 5-2 刚性润滑理论	59	§ 11-2 表面形变强化处理	149
§ 5-3 弹性流体动压润滑理论	63	§ 11-3 表面热处理	150
§ 5-4 弹流润滑理论的应用	68	§ 11-4 表面化学热处理	151
第六章 机床流体静压润滑	72	§ 11-5 表面电镀处理	155
§ 6-1 概述	72	§ 11-6 放电熔渗表面强化处理	156
§ 6-2 静压支承计算基础	72	§ 11-7 离子注入表面强化处理	157
§ 6-3 静压轴承的设计与计算	88	§ 11-8 气相沉积表面强化处理	159
第七章 机床边界润滑	95	§ 11-9 表面喷涂与喷焊处理	160
§ 7-1 概述	95	第十二章 摩擦、磨损试验简介	162
§ 7-2 边界润滑机理	95	§ 12-1 摩擦、磨损试验机简介	162
§ 7-3 边界膜的形成机理及边界膜的强度	96	§ 12-2 摩擦、磨损试验方法	164
§ 7-4 边界润滑膜的摩擦、磨损特性	97	§ 12-3 摩擦表面的近代微观分析法	166
		参考文献	167

绪 论

摩擦、磨损与润滑是一种普遍存在于生产和生活中的现象，对人类的物质生产和生活有着极其深远的影响。在人类的发展史上，摩擦帮助人类学会了取火，从而使人类第一次支配了一种自然力。可以说，在整个人类的发展过程中，始终是在与有害的摩擦进行斗争的同时，也在利用摩擦有利的一面，造福于人类。

例如，以滚动摩擦代替滑动摩擦，用润滑材料来改善摩擦性质，用减摩合金来代替一般金属，以耐磨材料来代替普通材料等，都是人类同摩擦作斗争，以达到降低摩擦，减少磨损，延长使用寿命，保证设备可靠的重要措施。

又如各种摩擦传动，皮带传动，是人类利用摩擦传递功率的例子；各种机器设备及各种车辆、飞机等的摩擦制动，是人类利用摩擦来消耗动能的例子；摩擦切削，摩擦焊接等，也是人们充分利用摩擦为人类服务的例子。

同样，在人类的日常生活中，各种自然现象也是与摩擦、磨损、润滑密切相关的。

所有机器，其构件都是在约束（guidance）条件下相对运动的，而约束力又总是通过各个构件和运动副来传递。由构件结构来承受拉伸、压缩、弯曲、扭转等约束力的称为“结构约束”，由相对运动表面相互作用来承受约束力的称为“摩擦约束”。摩擦约束的工作条件比结构约束要复杂得多。因此，机器的性能与可靠性，在更大程度上是依赖于摩擦、磨损与润滑的。

由于现代科学技术的发展，对机器设备的功率、速度、精度等参数的要求日益提高，生产的连续性和自动化水平日益提高，对机器设备的可靠性要求也日益提高，因而机器设备的摩擦、磨损与润滑问题就更加突出。

但是，长期以来，研究摩擦、磨损与润滑现象，往往只是从各个侧面孤立地进行。它的研究成果分散在各种学科领域。只是从60年代以后，由于科学技术的发展，它才形成一门独立的学科——摩擦学。

摩擦学（Tribology）是有关摩擦、磨损与润滑科学的总称。它是研究在摩擦与磨损过程中，两相对运动表面之间相互作用、变化及其理论与实践的一门科学技术。其含义非常广泛，所涉及的因素非常复杂，它综合了机械学、物理学、化学、冶金学、材料学、金属学、金属物理学、固体力学、流体力学等多门学科的内容。因此，它是一门边缘学科，从多学科综合分析研究是它的显著特点。

据估计，全世界约有 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ 的能源是以各种形式消耗在摩擦上。大约有80%的机械零件是由于磨损而失效。特别是机床，由于零部件磨损而丧失工作精度，将使产品质量下降，严重时将破坏生产的连续性，迫使机床停产。

目前，我国机床设备的维修一般都要耗费大量的时间与资金，象一台普通机床的大修费用，平均占其原先成本的50%~70%左右，而其所耗费的劳动量，有时甚至超过制造一台新机床所需要的劳动量。因此，怎样减少机床的修理损失，提高机床的工作可靠性和延长机床

的使用年限，即研究机床的“寿命问题”提到了重要的地位。

因此，控制摩擦，减少磨损，改善润滑，已成为当前节约能源和原材料，缩短停机和维修时间，延长机床使用寿命，提高产品质量，增加机床可靠性的重要方面。

国外，在一些可靠性要求特别高的机械设备上，正在发展机械设备损坏的早期预报或跟踪预测技术。应用这些先进技术，可以将机器设备的定期维修制度改为比较经济的早期预防维修制度，即减少非必要的拆卸给机器所造成的损坏，避免非必要的停产损失。

由于摩擦、磨损与润滑对工业生产和人民生活关系密切，因此，世界各国都非常重视，已成为近30年来发展迅速的技术学科之一。目前研究的范围主要集中在下列几个方面：

- (1) 摩擦机理及其表面状态的物理化学变化；
- (2) 磨损机理及其影响因素；
- (3) 润滑机理及其计算方法；
- (4) 减摩、耐磨材料；
- (5) 润滑材料及添加剂；
- (6) 表面强化处理工艺；
- (7) 测试方法及监控技术等。

由于摩擦现象发生在表面层，其理论分析和试验研究都比较困难，目前摩擦学研究的发展方向正由宏观转向微观；由定性转向定量；由静态转向动态；由单因素发展到多因素的综合研究阶段。

近代技术的发展，提出了更加复杂的摩擦学问题，如核能工程、空间技术、生物技术、医学工程等特殊情况下的摩擦学问题，都促进了摩擦学的迅速发展。

第一章 金属表面特性与表面接触

§ 1-1 零件表面形貌的评定

一、零件表面的几何形状

加工出理想的零件表面几何形状，当然是金属切削机床所追求的目标。实际上宏观看来很平整、很光滑的加工表面，在显微镜下仍然是粗糙得像地球表面一样，凹凸不平、有波峰波谷、也有微小的平面。这是因为任何机器零件的表面，都是由各种不同的方法加工出来的。在加工过程中，由于切屑分离时的塑性变形、切削留下的刀痕、以及机床—刀具—工件系统的振动等原因，都使实际加工表面与理想表面存在一定的几何形状误差。这种表面几何形状误差，即通常所说的直线度、平面度、圆度、圆柱度、线轮廓度、面轮廓度等。

在许多表面上还经常看到波长较长的粗糙度，这种粗糙度称之为波纹度。是零件加工过程中周期性重复出现的一种几何形状误差。图1-1表示圆柱面表面波纹度；图1-2表示平面表面波纹度。

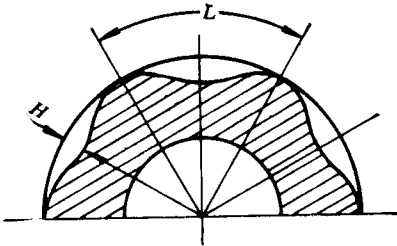


图1-1 圆柱面表面波纹度

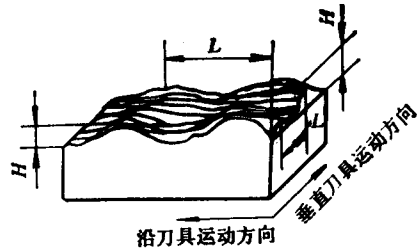


图1-2 平面表面波纹度

波纹度可用两个参数来表述，即波高与波距。

H ——波高，表示波峰与波谷之间的距离；

L ——波距，表示相邻两波形对应点的距离。

表面波纹度将直接影响零件的实际接触面积。

表面微观几何形状误差（微观粗糙度），对机床零件的使用性能影响很大。表面愈粗糙，实际有效接触面积就愈小，单位面积上的压力就愈大，零件就愈容易磨损。反之，表面过于光滑，也会增加零件接触表面之间的分子吸引力，会使摩擦系数增大，反而会增加磨损。

表面微观粗糙度（微凸体）的分布，与精加工方法有关，可以是定向的，也可以是异向的。如经过车削、铣削等定向加工后的表面，其微凸体的分布显然具有一定的方向性。而经过电抛光或研磨等非定向加工后的表面，其微凸体的分布显示出异向分布或等概率分布。

试验表明，表面微观粗糙度的条纹（加工痕迹）方向，对摩擦阻力的影响很大。当摩擦表面的运动方向与加工痕迹方向一致时，摩擦阻力较大，而当它们之间成某一角度或条纹不规则时，摩擦阻力较小。

二、零件表面形貌的评定

对零件表面形貌作出定量评定，是解决各种摩擦学问题的重要方面。摩擦学问题主要取决于两相对运动表面之间的实际接触面积的性质，而这种性质又取决于微凸体的分布、尺寸和形状。因此，研究各种表面接触现象，必须测量表面的形貌。

测量表面的微观或宏观几何形貌，有许多种方法。如应用电子、干涉或反射显微术的光测法；应用斜剖和测量表面轮廓的机械测量法。光测法能对表面作三维鉴别，但用它来作零件表面形貌的定量评定是比较麻烦的。

由于测量时很难显示整个表面内的每个凹凸不平度，所以必须采取抽样测量的办法。但所取的样本必须具有高度的概率，以便使样本能够代表整个表面。

现有的大多数表面测量方法，一种是得到小面积表面样本的高分辨率图像，但所测的小面积往往不具有代表性；另一种是得到有代表性的样本，但其分辨率图像很低。两者总是有一定的矛盾。表1-1介绍了几种表面形貌测量方法。

表1-1 表面形貌测量方法

序号	测量方法	分辨率/ μm		序号	测量方法	分辨率/ μm	
		横 向	竖 向			横 向	竖 向
1	光学显微镜	0.25~0.35	0.18~0.35	5	复光束干涉	5	0.005
2	干涉显微镜	0.25	0.25	6	光轮廓	0.25	0.25
3	反射电子显微镜	0.03~0.04	0.02~0.08	7	斜剖面	0.25	0.025
4	电子显微镜	0.005	0.005~0.0025	8	表面轮廓仪	1.3~2.5	0.005~0.25

工程上通常用表征粗糙度的下列参数来确定表面轮廓的一维形貌（图1-3）。

1. 轮廓算术平均偏差 Ra 即轮廓上各点至轮廓中线的竖向偏差的算术平均值。

$$Ra = \frac{\int_0^l |y(x)| dx}{l} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (1-1)$$

2. 轮廓均方根偏差 Rq 其表达式为

$$Rq = \sqrt{\frac{\int_0^l [y(x)]^2 dx}{l}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (1-2)$$

式中 l ——测量长度；

$y(x)$ ——微凸体高度函数；

y_i ——各测量点的高度值；

n ——测量点数。

这里的所谓中线系指轮廓的平分线，即在中线上下轮廓所包围的面积之和相等。

图1-4给出了轮廓很不相同的四种表面形貌的 Ra 值和 Rq 值。由此看出，四种表面轮廓的 Ra 值均相同，而形貌差别却很大，可见用 Ra 值表示形貌不很确切。采用 Rq 值表示有所改善。但对于相反的轮廓，仍无法分辨。这是因为这些参数主要只与轮廓沿竖向的相对偏差有关，而不反映微凸体的斜度、形状和尺寸，以及其出现的频率和规律。所以，这些参数只能用于同一方法加工的同类表面进行比较。

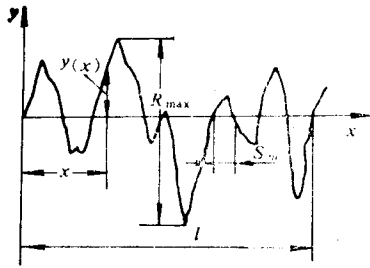


图1-3 一维形貌

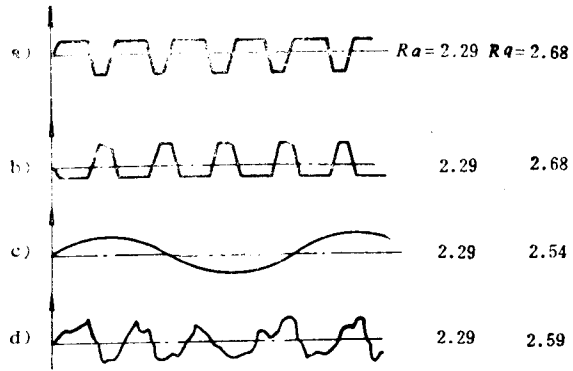


图1-4 不同表面轮廓的Ra值和Rq值 (Ra、Rq的单位为μm)

3. 微观不平度十点高度 Rz 系指在长度 l 内, 以平行于轮廓中线的任意一条线起, 所测轮廓的五个最高点 (峰) 和五个最低点 (谷) 之间的平均距离 (见图1-5)。其表达式为

$$Rz = \frac{(h_2 + h_4 + h_6 + h_8 + h_{10}) - (h_1 + h_3 + h_5 + h_7 + h_9)}{5} \quad (1-3)$$

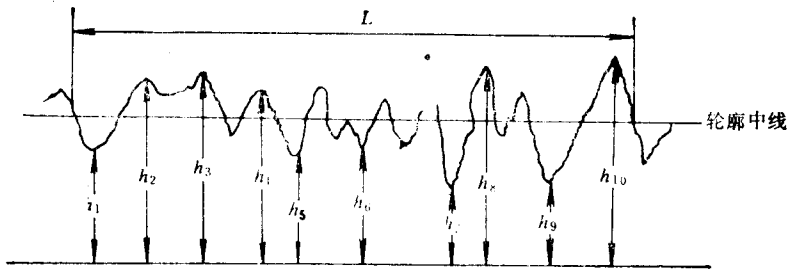


图1-5 轮廓平均高度Rz值

4. 轮廓最大峰高度值 RP 系指表面轮廓经常出现的微观最大高度 RP , 而不是偶然的特大高度值 RP' , 如图1-6所示。 RP' 不能代表整个表面轮廓的微观几何特性。

若在表面轮廓上测量了几个基本长度 l 内的 Ra 或 Rz 值, 则应取 Ra 或 Rz 的平均值作为表征该表面几何形貌的参数。当然, 更为全面的评定表面轮廓形貌的是二维形貌参数和三维形貌参数, 这里就不一一介绍了。

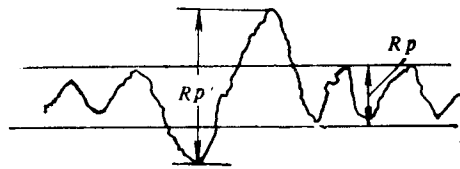


图1-6 轮廓最大高度值RP

§ 1-2 金属表面的性质

摩擦学是研究作相对运动的相互作用表面所发生的摩擦、磨损与润滑过程的科学。它涉及的面很广泛, 是一门边缘学科。因此, 在我们深入研究摩擦学问题之前, 有必要对零件表

面的性质作一些了解。金属切削机床的零件绝大多数是金属制成，金属表面的物理、化学、机械性能将直接影响着摩擦、磨损过程。

一、金属的晶体结构

金属及其合金都是由原子或分子所组成的物质。通常在固态下都是晶体，其原子结构呈有规则的排列（图1-7）。这种具有一定几何形状的排列称为空间晶格（图1-8）。空间晶格的基本单位叫晶胞（图1-9）。

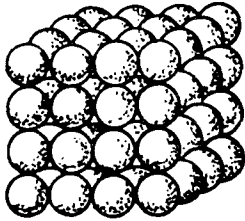


图1-7 原子排列结构

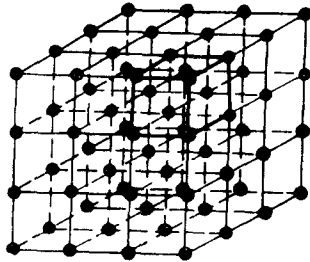


图1-8 晶格

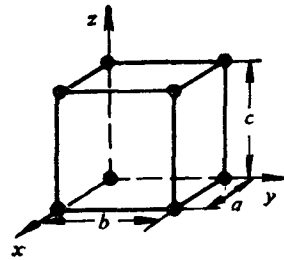


图1-9 晶胞

金属元素绝大多数属于下列三种晶格形式。

（一）体心立方晶格

它的晶胞是由8个原子构成的立方体，并在其中心还有一个原子（图1-10）。属于这种晶格的金属有铁、铬、钼、钒、钨等。

（二）面心立方晶格

它的晶胞也是由8个原子构成的立方体，但在立方体的每面的中心还各有一个原子（图1-11）。属于这种晶格的金属有铜、镍、铅、金、铝等。

（三）密排六方晶格

它的晶胞是由12个原子构成的六方体，且在上下两面的中心各有一个原子，在上下两六方面的中间还有三个原子（图1-12）。属于这种晶格的金属有镁、铍、镉、 α -钛等。

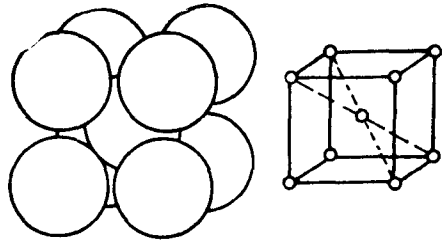


图1-10 体心立方晶格

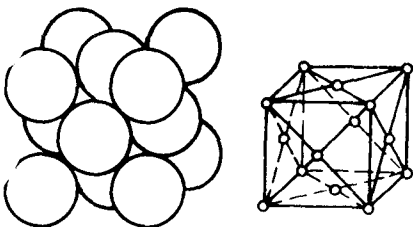


图1-11 面心立方晶格

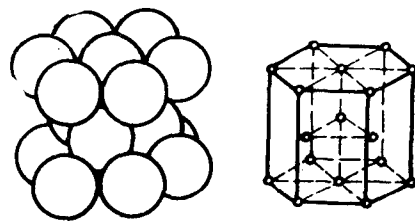


图1-12 密排六方晶格

二、晶格缺陷

一个完整的晶格或晶体，应该是按一定的规律排列的。否则，就认为这个晶格有缺陷。有缺陷的晶格将显著地影响其物理、化学和机械性能。常见的晶格缺陷有以下几种。

(一) 点缺陷

最常见的点缺陷有“晶格空位”或“间隙原子”两类。

如图1-13所示，在晶体中，原子在其平衡位置上作高频热振动。在一定温度下，其中某些原子因振动能量而脱离其平衡位置，使晶体内留下一个空点，这个空点就称为“空位”。

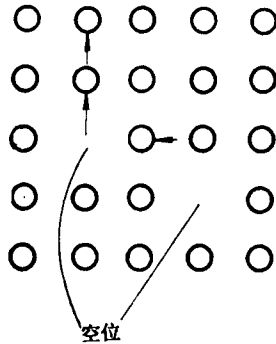


图1-13 晶格空位

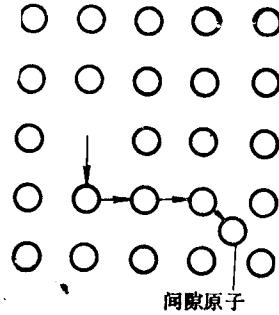


图1-14 间隙原子

如图1-14所示，若晶体中的一个原子跑到晶体内的间隙位置，晶格内部就多了一个原子。这个原子就称为“间隙原子”。

晶体中存在的杂质，也是一种缺陷。这种缺陷将使周围的晶体发生畸变，明显地影响着晶体的性质。

(二) 线缺陷

晶格中一部分晶体相对于另一部分晶体产生局部滑移的结果称为位错。其滑移部分与未滑移部分的交界线即为位错线。如图1-15所示，若按图中所加的切应力 τ 方向滑移，在晶体中部的 b 处便出现一个半原子面 $abcd$ 。在下端 bc 附近的原子排列规则被破坏，发生弹性畸变。这种线缺陷可看成是一维的，也称刃型位错。

金属晶体中的位错经常大量存在，且相互连接呈网状分布。由于位错可以看成是滑移与未滑移区域的分界线，所以晶体的形变可以由位错的运动来实现。晶体的塑性变形也可以从位错运动来解释。

(三) 面缺陷

晶体的缺陷若是沿二维方向展开，而另一维的变化甚小，则称之为面缺陷。晶体表面、晶界、亚晶界等都属于面缺陷。

晶体表层的原子，其内面受晶体内部原子的结合作用，其外面则受环境的作用，这种受力的不对称性，必然要求其表层原子适当调整它们的分布位置，这样，其表层原子结构就与晶体内部原子的晶格发生偏差，致使晶格的完整性受到破坏。晶体表面具有表面张力和表面能，容易吸附外来原子，也容易被外部介质所腐蚀，这些都是晶格缺陷的结果。

金属材料绝大部分都是多晶体，由晶粒和亚晶粒所组成。而其晶界与亚晶界都是不同取向的晶体之间的界面，它们同属于面缺陷。

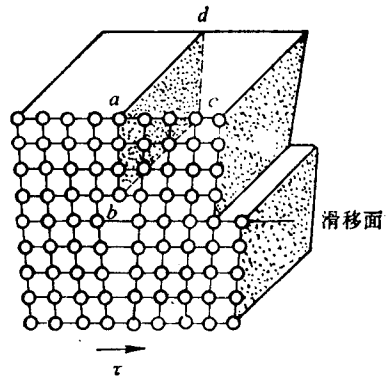


图1-15 位错

由于晶界处原子排列的不规则性，使其在常温下对金属材料的塑性变形产生阻碍作用，表现为晶界较晶粒内部具有较高的强度和硬度。显然，晶粒越细，金属材料的强度和硬度也越高。

三、金属的表层结构

金属表面在加工过程中，新生面一旦暴露在空气中，很快就会与空气中的各种气体起作用而形成各种膜，这种膜的结构性质对摩擦性能影响很大，若摩擦主要发生在表面膜层内，则该表面膜的发生、破裂与再生规律，将直接影响着摩擦、磨损的性质。一般讲，膜的存在将使金属不易发生粘着，有利于降低摩擦，减少磨损。

表面层的基层是基体材料的变形层，其顶部为非晶或微晶结构层。这一层是由于切削加工中分子层熔化和表面层流动而产生的，它沉积在冷的底层材料（变形层）上而被淬硬，如图1-16所示。

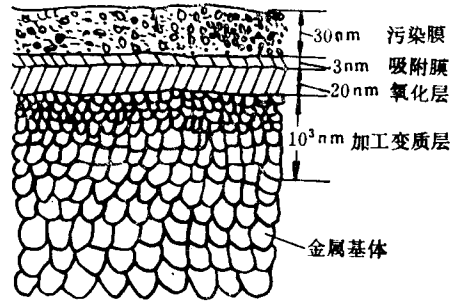


图1-16 金属表层结构

§ 1-3 表面接触

一、表面接触概述

当我们研究一对摩擦副的摩擦与磨损过程时，首先遇到的问题是分析它们之间的表面接触状况。一般经机械加工的零件表面，不可能是理想的光滑表面，都存在着一一定程度的平面度。因此，一对摩擦副在相互接触时，其表面接触具有不连续性和不均匀性。最先接触的是两表面之间微凸体高度之和最大的部位。随着载荷的增加，其他成对的微凸体也相应地接触。每一微凸体开始接触后，首先是弹性变形，然后，当载荷超过某一临界值时，则发生塑性变形，或者说处于弹塑性变形状态。

随着载荷的进一步增加，零件表面的波纹度也将发生弹性变形，于是参与承受载荷的微凸体数增加，实际接触面积进一步扩大。但是，由于表面轮廓上的微凸体高度不同，其参与接触后的变形也不同。高的变形大，低的变形小。

如果是一对不同材料的摩擦副表面接触，则比较硬的微凸体将压入比较软的微凸体内，此时，硬表面的粗糙度和软表面的物理—机械性能将影响着这对表面的接触性质。

一对摩擦副表面，在跑合过程中，开始是微观几何形状变化，参与接触的微凸体产生塑性变形，得到某种表面粗糙度的轮廓，相应的具有跑合阶段的接触特性。当进入稳定磨损阶段后，表面的微观几何形状虽然会再变化，但由于此时表面微凸体主要是弹性变形，故其表面接触性质没有多大改变。

二、表面接触模型

由于粗糙表面微凸体的随机性，因此表面接触模型不可能具有某种简单的几何形状。为了研究问题的方便，我们可以近似假设粗糙表面的微凸体具有三种可能的模型——即球形、圆柱形、圆锥形，如图1-17所示。其中球形微凸体模型比较常用，因为它便于计算实际接触面积，能较客观地反映出摩擦各向同性，有利于从力学的角度来考虑表面接触问题。例如，机床中的滚动轴承、齿轮轮齿等接触，都属于圆弧面接触，用球形微凸体模型来研究比较切合

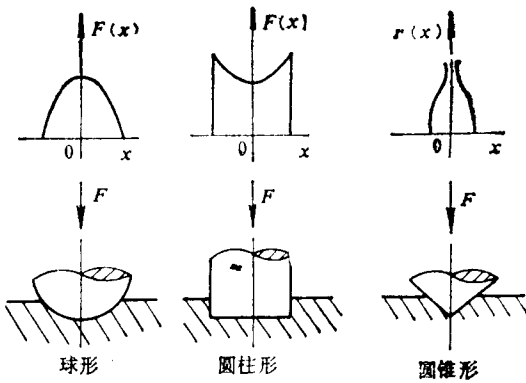


图1-17 三种表面微凸体模型

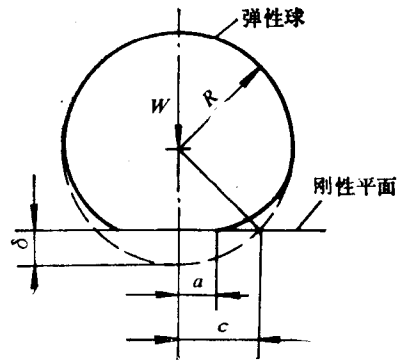


图1-18 球体与平面的弹性接触

实际。

(一) 球体与平面的弹性接触

如图1-18所示,在载荷 W 作用下,弹性球体与刚性平面之间产生法向变形量 δ ,弹性球体变形后的形状如图中实线所示。由此可见,弹性球与刚性平面的接触区是以 a 为半径的圆,即球体被压平的部分,而不是以 c 为半径的圆截面。根据弹性力学的分析可知

$$\delta = \left(\frac{9WR^2}{16E'R} \right)^{1/3}$$

$$a = \left(\frac{3WR}{4E'} \right)^{1/3}$$

即

$$W = \frac{4}{3} E' R^{\frac{1}{2}} \delta^{\frac{3}{2}} \quad (1-4)$$

式中 E' —— 弹性球体的当量弹性模量;

R —— 弹性球体的当量曲率半径;

W —— 外加载荷。

由图1-18可得

$$a^2 = R\delta$$

所以实际接触面积 A_r 为

$$A_r = \pi a^2 = \pi R\delta \quad (1-5)$$

由图1-18可得

$$c^2 = R^2 - (R - \delta)^2 = 2R\delta - \delta^2 \approx 2R\delta$$

因此,因弹性变形 δ ,弹性球体被切割的几何接触面积 A_0 为

$$A_0 = \pi c^2 = 2\pi R\delta = 2A_r \quad (1-6)$$

由此可见,球体与平面弹性接触的实际接触面积 A_r 仅为其几何接触面积 A_0 的一半。

(二) 理想粗糙表面的接触

一般讲任何表面都具有粗糙度,但为了分析问题方便,我们设想粗糙表面具有理想的模型。即假设粗糙表面上的微凸体均看作是球形体,在它完全光滑的表面接触时,其弹性变形特性可用赫兹理论来加以说明。同时还假设各微凸体之间无相互影响,各微凸体承受的载荷

与变形均完全一致。

如图1-19所示,设基准面为 xx ,理想粗糙表面的微凸体在 xx 面上的最大高度为 h ,在载荷作用下,设刚性平面与 xx 面间的距离为 d ,则微凸体的法向变形量为 $(h - d)$ 。

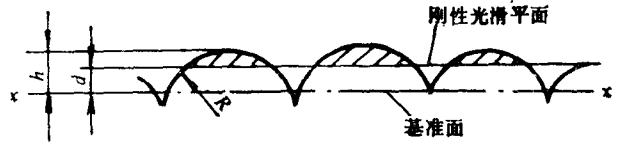


图1-19 理想粗糙表面的接触

设单位面积上有 n 个接触点,每个接触点所受的载荷为 W_i ,实际接触面积为 $A_{r,i}$ 。则总载荷 W 为〔由式(1-4)〕

$$W = nW_i = \frac{4}{3}nE'R^{\frac{1}{2}}(h - d)^{\frac{3}{2}} \quad (1-7)$$

式中 R ——微凸体半径;

其他符号同式(1-4)。

同理,总的实际接触面积 A_r 为〔由式(1-5)〕

$$A_r = nA_{r,i} = n\pi R(h - d) \quad (1-8)$$

化简式(1-7)、(1-8)得

$$W = \frac{4E'}{3\pi^{\frac{3}{2}}n^{\frac{1}{2}}R} A_r^{\frac{3}{2}} \quad \text{即} \quad W \propto A_r^{\frac{3}{2}} \quad (1-9)$$

由此可见,当理想粗糙表面处于弹性变形接触时,其实际接触面积 A_r 与载荷 W 的 $\frac{2}{3}$ 次方成正比。

若微凸体在接触处发生塑性变形,并假设其顶部材料作垂直向下的塑性变形时不产生水平方向的扩展。则各微凸体与刚性光滑平面的接触面积应为其几何接触面积 $A_{0,i} = 2\pi R(h - d)$,而接触应力则为其屈服应力 σ_s 。故各微凸体所受的载荷 W_i 为

$$W_i = \sigma_s A_{0,i} = 2\sigma_s A_{r,i}$$

故总载荷为

$$W = nW_i = 2\sigma_s n A_{r,i} = 2\sigma_s A_r \quad (1-10)$$

即

$$W \propto A_r$$

可见,当理想粗糙表面处于塑性变形接触时,其实际接触面积 A_r 与载荷 W 成线性关系。

(三) 实际粗糙表面的接触

实际粗糙表面的微凸体分布是随机的,其接触点数必须按概率计算。如果在载荷作用下,弹性粗糙表面与刚性光滑平面相接触,如图1-20所示。

设粗糙表面中心线与光滑平面之间的距离为 d ,那么,只有高度 $h > d$ 的微凸体表面才发生接触,并且接触后的法向趋近量为 $(h - d)$ 。

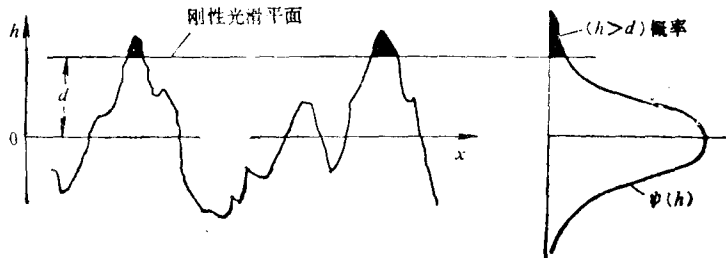


图1-20 实际粗糙表面的接触

设 $\psi(h)$ 为表面微凸体高度分布的概率密度函数, 则 $(h > d)$ 的概率 (即微凸体发生接触的概率) 为

$$(h > d) \text{ 概率} = \int_d^{\infty} \psi(h) dh$$

设整个粗糙表面的微凸体数为 n , 则实际接触的微凸体数 m 为

$$m = n \int_d^{\infty} \psi(h) dh \quad (1-11)$$

按照球体与平面的弹性接触分析可知, 各接触点的载荷 W_i 可按式 (1-4) 求得, 实际接触面积 A_i 可按式 (1-5) 求得, 式中 δ 为法向趋近量 $(h - d)$ 。因而总的载荷 W 和实际接触面积 A_r 为

$$W = \frac{4}{3} n E' R^{\frac{1}{2}} \int_d^{\infty} (h - d)^{\frac{3}{2}} \psi(h) dh \quad (1-12)$$

$$A_r = n \pi R \int_d^{\infty} (h - d) \psi(h) dh \quad (1-13)$$

实践表明, 许多实际的粗糙表面, 其微凸体峰高的分布接近于 Gauss 概率密度函数, 很近似于指数函数。因此, 上述各式中的 $\psi(h)$ 可以令其等于 $e^{-\frac{h}{\sigma}}$, 式中 σ 为表面微凸体峰高分布的标准偏差。将这一关系代入上述各式, 则,

$$m = n e^{-\frac{d}{\sigma}} \quad (1-14)$$

$$W = \frac{4}{3} n R^{\frac{1}{2}} \sigma^{\frac{3}{2}} E' e^{-\frac{d}{\sigma}} \quad (1-15)$$

$$A_r = \pi n R \sigma e^{-\frac{d}{\sigma}} \quad (1-16)$$

从上述三式中可以看出

$$W \propto A_r, \quad W \propto m$$

由此可见, 实际粗糙表面处于弹性变形接触时, 其实际接触面积 A_r 和接触点数 m 均与载荷 W 成线性关系。

而当实际粗糙表面处于塑性变形接触时, 则实际接触面积

$$\left. \begin{aligned} A_r &= 2\pi n R \int_d^{\infty} (h - d) \psi(h) dh = 2\pi n R \sigma e^{-\frac{d}{\sigma}} \\ W &= \sigma A_r \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

由此可见, 实际接触面积 A_r 与载荷 W 成线性关系, 与微凸体的分布无关。

综上所述, 实际接触面积与载荷的关系, 不仅取决于表面形貌的分布情况, 而且与接触变形状态有关。当接触点在载荷作用下处于塑性变形状态时, 对于各种表面形貌, 其实际接触面积都与法向载荷成线性关系; 而当接触点处于弹性变形状态时, 只有微凸体的高度分布曲线接近于指数函数时, 实际接触面积才与载荷成线性关系。

以上分析比较接近机械加工表面的实际情况。

第二章 摩擦理论

§ 2-1 摩擦的定义与分类

一、摩擦的定义

当两个相互接触的物体，在外力作用下发生相对运动，或具有相对运动的趋势时，在接触表面之间将产生阻止其相对运动或有相对运动趋势的作用力，这种阻力称之为摩擦力，这种现象称之为摩擦现象。或者说，阻止两物体接触表面产生切向相对运动的现象称为摩擦。两接触表面有相对运动必然有摩擦，其摩擦力的方向永远是沿着接触面的切线方向，与物体的相对运动方向相反，或与物体有相对运动趋势的方向相反，阻碍着物体之间的相对运动。

当两物体接触界面间的切向外力不足以克服摩擦阻力时的摩擦状态，称为静摩擦。静摩擦力 F 随切向外力的增大而增大，当外力增大到一定数值，使物体处于要动而未动的瞬间，静摩擦力达到最大数值时叫静摩擦极限。只有当外力超过静摩擦极限，使物体产生相对运动时的摩擦力称动摩擦力 F_d 。

机床的运转都依赖其零件的相对运动来实现。当机床运转时，其相对运动表面必然有摩擦力产生。为克服这些摩擦力必须消耗一部分能量，致使机床的效率降低。因此，摩擦力是机床运转中最主要的有害阻力。它一方面使机床温度增高，导致机床部件或零件因温升而热变形，轻者影响机床的原始装配精度和正常运转，重者则可能使机床运动零件发生咬死现象，使机床遭受破坏。另一方面，由于摩擦将使机床运动表面产生磨损，导致其配合间隙增大，影响机床的精度、寿命和可靠性。

但是，机床中不少机构又是靠摩擦力来工作。如皮带传动、摩擦离合器、摩擦传动等，都是靠摩擦力来传递扭矩；像摩擦制动器等，则是靠摩擦力矩来吸收其惯性能，使机床迅速停下来。

二、摩擦的分类

摩擦可按不同的形式来分类。

(一) 按运动形式分

1. 滑动摩擦 两物体接触表面具有相对滑动或滑动趋势时的摩擦，叫滑动摩擦；
2. 滚动摩擦 物体在力矩作用下，沿接触表面滚动时的摩擦，叫滚动摩擦。

(二) 按润滑状况分

1. 干摩擦 常指名义上无润滑的摩擦。实际上无润滑的摩擦不等于干摩擦，只有既无润滑又无湿气的摩擦，才能称为干摩擦。
2. 边界摩擦 在摩擦表面间存在一层极性吸附膜时的摩擦，称为边界摩擦。其吸附膜可以是物理吸附膜、化学吸附膜或化学反应膜等。
3. 流体摩擦 在两相对运动表面间有一层具有压力的流体将其隔开时的摩擦，称流体摩擦。
4. 半干摩擦 即部分处于干摩擦，部分处于边界摩擦的摩擦状态。