



全国高等农业院校教材

全国高等农业院校教材指导委员会审定



摩擦磨损原理

• 农业机械化学专业用
• 籍国宝 主编

农业出版社

全国高等农业院校教材

摩擦磨损原理

籍国宝 主编

ND12/110

农业机械化专业用

林文英

农业出版社

第2.5版

主 编 籍国宝 (北京农业工程大学)
编 者 籍国宝 (北京农业工程大学)
段铁成 (河南农业大学)
李尤强 (北京农业工程大学)
主审人 邵荷生 (中国矿业大学北京研究生院)

前 言

摩擦学是本世纪60年代中期发展起来的一门边缘学科，由于它在经济效益和科学技术上的巨大意义和深远影响，正日益受到国内外工业界、科技界和教育界的重视，成为目前世界上发展最快的应用科学之一。

今后一个时期，我国机械工业的战略任务是：上质量、上品种、上水平、提高经济效益。据统计分析表明：摩擦消耗大量的能量，磨损是影响机械设备的质量和使用寿命的主要原因之一；润滑技术是减小摩擦和磨损的有效措施。因此摩擦学对完成机械工业的战略任务有重大作用；对在职的和未来的工程技术人员也是非常必需和有益的。为了教学的需要，北京农业工程大学编写了《摩擦磨损原理》讲义，曾在全国许多院校使用。本书是在该讲义的基础上，吸收了近几年的教学和科研成果，听取了许多院校的宝贵建议和意见，进行了较大地修改和补充，力求做到理论密切联系实际，内容丰富充实、通俗简明，便于自学。

本书由段铁城编写第四章四、五节，第五章，第八章；李尤强编写第七章一、二、三、四、六、八、九节；籍国宝编写其余章节并统稿。

本书是在全国高等农业院校教材指导委员会农业工程学科组指导下完成的。在编写过程中得到了邵荷生教授、陈光中副教授的热情支持。邵荷生教授全面地审查了全书。彭群、董生和柳幼之同志对本书的完成也做了许多工作，全书插图由郝淑华描绘，在此深表感谢。

由于我们水平不高，难免有错误和不足之处，欢迎专家和读者提出批评。

编 者

目 录

前言

绪论	1
第一章 固体表面的性质和接触	5
第一节 固体表面的性质	5
第二节 固体表面的接触	12
第二章 摩擦	17
第一节 摩擦的分类	17
第二节 库仑摩擦定律	18
第三节 滑动摩擦	19
第四节 摩擦振动(粘-滑运动)	29
第五节 滚动摩擦	31
第六节 特殊工况条件下的摩擦	36
第三章 磨损	38
第一节 概述	38
第二节 磨粒磨损	41
第三节 冲蚀磨损	52
第四节 粘着磨损	54
第五节 疲劳磨损	63
第六节 腐蚀磨损	69
第七节 微动磨损	72
第八节 气蚀	74
第九节 扩散磨损和电(侵蚀)磨损	77
第十节 其它磨损理论	79
第四章 润滑	88
第一节 流体润滑	88
第二节 边界润滑	97
第三节 固体润滑	102
第四节 常用润滑剂	109
第五节 机械设备的润滑管理	116
第五章 摩擦磨损类型的转化	121
第一节 润滑状态的转化曲线——Stribeck曲线	121
第二节 边界膜破裂和发生胶合的准则	123
第三节 微凸体变形性质的转化	124
第四节 磨损类型的转化	126

第六章 机器和机器零件的摩擦和磨损	127
第一节 摩擦学系统	127
第二节 系统元素性能的变化	128
第三节 机器的磨损特点和规律	129
第四节 配合零件磨损极限值的确定原则	131
第五节 提高机器耐磨性延长机器寿命的基本方法	133
第七章 机械零件摩擦磨损实例	138
第一节 发动机缸套的摩擦磨损	138
第二节 发动机曲轴轴颈及轴瓦的磨损	142
第三节 发动机凸轮与挺杆的磨损	145
第四节 汽车、拖拉机齿轮的磨损	148
第五节 犁铧的磨损	150
第六节 拖拉机履带板的磨损	152
第七节 磨粉机磨辊(齿辊)的磨损	153
第八节 饲料粉碎机锤片的磨损	155
第九节 磨损失效分析	156
第八章 耐磨、减摩和摩阻材料	161
第一节 耐磨材料	161
第二节 减摩材料	165
第三节 摩阻材料	168
第九章 摩擦磨损测试	171
第一节 摩擦磨损试验的分类	171
第二节 摩擦磨损试验机	172
第三节 摩擦磨损试验中的测试	176
主要参考文献	183

绪 论

一、概 述

“摩擦、磨损和润滑”自古以来就已存在，人们一直力图控制摩擦和减少磨损。然而直到本世纪60年代才将其做为是一门学科提出来，并用一个新词“Tribology”来概括这门学科的内容。该词是在1966年由英国H. P. Jost主持撰写的“英国润滑教育与研究的现状和工业的需要的报告”（称Jost报告）中首先提出来的，它是由希腊字“Tribos”（意为摩擦）派生出来的，我国译为“摩擦学”。摩擦学是研究相对运动的相互作用的表面及其有关理论和实践的科学与技术。摩擦学把关系密切，相互依赖的摩擦、磨损、润滑汇集到一起，全面描述“相对运动中的相互作用的表面”。这一新的综合概念已被广泛接受，成为一门公认的学科。

摩擦和磨损是自然界普遍存在的现象。物体接触表面有相对运动时，就出现摩擦，有摩擦必然伴随着摩擦面的磨损，润滑则是减少摩擦，降低磨损的有效而经济的手段。研究摩擦学的目的在于提高摩擦表面的设计和制造工艺水平、选择适宜的材料、采用合理的润滑技术，以使机械设备的效率最高，磨损最少，寿命最长，费用最低。

摩擦学是一门边缘学科，其范围广泛，涉及多种学科领域，如物理、化学、工程力学、冶金学、机械工程、材料科学、石油化工等。摩擦学属于技术基础学科，是许多工业部门的通用科学技术。

我国摩擦学学会设置了十个专业组，它们是：（1）流体润滑理论与应用；（2）润滑材料与摩擦化学；（3）磨损及表面技术；（4）内燃机轴瓦；（5）密封技术；（6）滚动轴承；（7）气体润滑；（8）摩擦材料；（9）摩擦学系统监测；（10）润滑技术。

二、摩擦学的意义

摩擦学是科学、技术和工程实践的重要组成部分，它与机械设备中能量的消耗和材料的损失密切相关，在经济、技术等方面具有重要意义。

1. 摩擦学的经济意义 摩擦是能量消耗的主要原因之一。据估计，世界上工业部门生产的能源约有1/3—1/2消耗于各种形式的摩擦上。据有关报道，汽车中各种摩擦消耗的功率约为其有效功率的20—50%，有些纺织机械中因摩擦损失的平均能耗占其能耗的85%左右。理论和实践证明，其中许多摩擦损失可以利用现有的摩擦学技术加以改进而得以减少。据估计，内燃机中的摩擦损失可减少至现在的一半。

磨损不但导致机械设备的故障发生、可靠性降低，而且是50—80%机械设备报废的原

因，因此，磨损消耗大量的材料。与摩擦相比，它所造成的经济损失更大。

由上可见，对机械设备的摩擦和磨损的任何减小，都将得到相当大的节约。

Jost报告中指出：“摩擦学教育和研究作了改进后，可能产生巨大的经济影响”。英国通过现有摩擦学知识的应用，工业上每年（1966年估计）可节约5亿1千多万英镑，为当年英国国民生产总值的1%。预期节约的项目如下表所示，由表可以看出，节约的费用主要是节约维修和更换零件的费用（占44.66%），减少了机械设备的故障（占22.33%）和延长零件的寿命（占19.24%）。

序 号	所 估 计 的 节 约 项 目	每年百万英镑	%
1	通过减少摩擦、减少能量消耗	28	5.44
2	减少人力	10	1.94
3	节约润滑油费用	10	1.94
4	节约维修和更换零件费用	230	44.66
5	由于提高机器利用率和效率而节约投资	22	4.27
6	因减少故障所造成的损失而节约	115	22.33
7	由于延长机器寿命而节约投资	100	19.24
总 计		515	100

美国工程师学会（ASME）润滑研究会，在其“通过摩擦学节能的战略”一文中估计：通过摩擦学知识的应用，在陆上运输、发电、涡轮机械和工业加工四个主要领域中，每年（1976年）可以节约160亿美元，而投资估计仅花费2400万美元。Jost估计，在美国摩擦和磨损造成每年约1000亿美元的损失。

西德研究技术部的一个委员会估算，摩擦和磨损造成德国每年（1976年）100亿马克的经济损失。

日本对摩擦学的经济效果进行的调查表明，由于对摩擦学作了正确的实践，从1966—1968年发表的数字看，可能节约了2兆日元。

1982—1985年，在摩擦学会主持下，我国石油、冶金、煤炭、农业机械、铁道运输、机械制造、纺织、交通运输等八大行业进行了摩擦学工业应用调查研究，调查结果表明，应用摩擦学技术在我国工矿企业的潜力是很大的，估计到2000年可节约400亿元，而需要的投入资金仅8亿—10亿元。

2. 摩擦学的科学技术意义 自第二次世界大战以来，机器的工作日益繁重，即速度、载荷、尺寸和工作温度的变化范围都在迅速扩大，新的工业部门不断出现（如宇航工业、原子能工业等），要求机器零件在高压、高速、高温、低温、真空或特殊介质等条件下工作。这些都要求更好地了解在上述工况下摩擦表面相互作用的性质和规律，研究新的摩擦学技术，这样才能满足机器工作的要求，推动新产品的发展。例如，要成功地发展“绝热柴油机”，就要寻求适合在高温条件下摩擦的新材料、新结构，特别是高温润滑技术要有大的突破，这样才能达到人们可以接受的可靠性和寿命。

摩擦学涉及相对运动的表面之间能量（力）的传递、材料消耗的一切问题，其任务之一是解释其过程的机制和阐明其复杂的作用。

三、摩擦学的发展

由于摩擦学具有投资少，收益大的经济意义和对促进科学技术发展的重大作用，受到了工业化国家的普遍重视，成为当前发展最快的学科之一。1973年在伦敦召开了第一届欧洲摩擦学学术会议，并成立了国际摩擦学学会，以后每四年举行一次国际摩擦学学术会议。我国在1979年成立了摩擦学学会，并规定每四年举行一次全国摩擦学学术会议。近十多年来，我国在摩擦学管理机构的设置、摩擦学的研究、摩擦学的教育和培训以及摩擦学的工业应用上做了大量的工作，这对节省能源、减少经济损失、提高机械产品的可靠性和寿命，增强产品在市场上的声誉和竞争能力起到了积极的作用。

随着科学技术的发展，摩擦学的研究和应用进入了一个新阶段。在研究方法上由宏观的研究进入到微观的研究；由定性的研究进入到定量的研究；由单因素的研究进入到多因素的综合研究；由静态研究进入到动态研究。它的研究内容和领域不断扩大，从一般工况下的摩擦到特殊工况下的摩擦；从金属的摩擦到非金属的摩擦（如塑料、陶瓷等）；从矿物润滑剂到合成润滑剂；从机械设备摩擦学到地质摩擦学、仿生摩擦学等。为了使生产能够直接应用摩擦学研究成果，一些国家成立了摩擦学中心和工业摩擦学机构，编写了摩擦学手册……。摩擦学已成为当今世界上发展最快的新学科之一。

四、本课程的重要内容和内容

任何机器的运转都依赖其零件的相对运动来实现，而相对运动必然伴随着摩擦和磨损，因此，解决摩擦和磨损问题，就成为机械工业部门的重要任务之一。一台复杂的机器，有许多摩擦接触部位，例如一辆现代化汽车有2000多个摩擦接触部位。对机器可靠性和寿命的要求，需要科技人员在开始设计阶段就要考虑如何控制摩擦，减少磨损的各种因素。在现代的机械设计中，若不考虑摩擦学，那就不是先进的设计。因此这门学科对从事各种机械工程的人来说，已变得日益重要。

据有关资料介绍，我国机械产品的寿命虽然有了很大提高，但与先进国家相比仍存在摩擦损失大、消耗润滑油多、寿命短等问题。如我国火力发电厂汽轮机组轴承的能量消耗，大约为其总能耗的0.5—0.6%，而设计完善的可减少到0.3%；我国每辆汽车年平均消耗润滑油为130 kg，先进国家的水平则不到20 kg。目前，我国机械产品的寿命一般为国外同类产品的1/2左右，如下表所示。对农机系统，由于农业机械的设计、使用、维修水平较低，使用环境恶劣，实际生产中存在的摩擦学问题就更为突出。因此，我国摩擦学的重要任务之一就是使机械工业中量大面广的基础零件和摩擦副，如滑动和滚动轴承、齿轮、制动器、挖掘机斗齿、机床导轨、犁铧、耙片、缸套、活塞环以及刀具、模具等的摩擦，磨损，润滑问题得到合理的解决，重大成套设备及单机的关键部件，例如大型发电机

序 号	产 品 或 部 件	国 内 产 品	国 外 产 品
1	载重汽车平均大修里程	10万—15万km	30万km
2	拖拉机大修间隔小时	2 000—3 000h	6 000—8 000h
3	工程机械第一次大修间隔	1 000—3 000h	8 000—12 000h
4	机床使用寿命	平均 5 年	10 年
5	滚动轴承寿命	为SKF的1/3	
6	起重机械减速器寿命	3—5年	10 年
7	载重汽车刹车片	2万—5万km	5万—10万km
8	汽车油封	5万km	15万km以上
9	掘进机刀具寿命	20—50m	200m以上
10	犁铧寿命	约200亩	约500亩

组、大型轧钢机、高速线材轧机、磨粉机、重型机床、挖掘机、工程机械、矿山设备、农业机械、内燃机、高速齿轮增速器等的使用寿命和可靠性得到较大提高，减少维修工作量，提高技术完好程度，以得到最大的经济效益，使我国摩擦学科研及生产应用达到世界先进水平，并为机械工业培养出一批摩擦学专门人才。

“摩擦磨损原理”将系统地论述材料的摩擦和磨损机理和规律，对于润滑部分则重点介绍固体润滑和边界润滑。在上述基础上还论述机械零件的磨损失效分析，机器的摩擦和磨损以及提高耐磨性的途径。最后一部分内容是摩擦磨损试验和测验技术。通过本课程的学习，可以掌握摩擦学的基础知识和获得解决摩擦学问题的能力。

第一章 固体表面的性质和接触

167

摩擦、磨损和润滑是在物体表面进行的。摩擦磨损现象，包括润滑现象，基本上是固体和液体的表面现象。了解和研究固体表面的性质和表面的接触是理解摩擦学问题的基础。机械零件绝大多数是金属材料制成的，这里所说的固体表面主要指金属的表面。

第一节 固体表面的性质

固体表面的性质包括表面形貌和表面组成两部分内容。表面形貌是研究固体表面的几何形状；表面组成则讨论表面的化学和物理性质。

以竹节物形方法

一、固体表面的形貌

实际表面指物体与周围介质分隔的表面。几何表面则是理想表面，其形状由图样或其他技术文件规定。

从宏观看，实际表面有的光滑像镜面；也有粗糙像锉刀。但以现有的加工技术无法制成几何学平面，即使是经过仔细抛光的表面，仍有许多远大于分子（原子）级尺寸的凸起和凹陷。在显微镜下观察实际的机械零件表面，会看到它是由许许多多的波峰和波谷所组成，如图1-1所示。凸起的单峰叫微凸体，它表示表面结构的独立单体，是轮廓图上两相邻最低点之间的轮廓。所谓轮廓图系指一个平面与固体表面相交所得的交线。微凸体的分布、尺寸和形状，影响两表面间实际接触面积的性质，而实际接触面积的性质对摩擦磨损有重大影响。

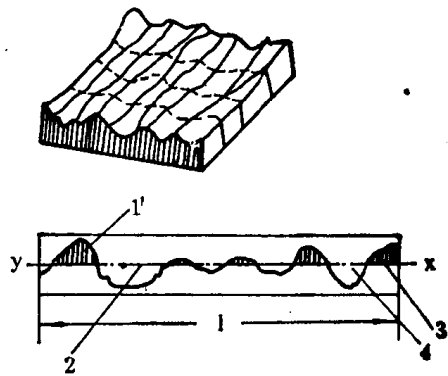


图 1-1 表面形貌和轮廓图形
1. 轮廓线 2. 中线 3. 实体 4. 空腔

相互配合的机器零件，其表面是由不同的加工工艺过程（如车削、刨削、磨削、抛光等）形成的，表面的几何形状是很复杂的。任何实际的工程表面，对于理想的光滑平整表面来说都存在一定的几何形状偏差。这种偏差主要有三类，见图1-2。（1）形状误差，如不直度、不圆度、不柱度等；（2）波纹度，是表面有规则的重复出现的凸起和凹谷，其波长较长。它一般由机床或刀具在加工时的振动引起；（3）粗糙度，又称微观不平度，是

指表面上具有较小间距的峰谷所组成的微观几何形状特性，波长一般为2—800 μm 。它主要是加工时刀具留下的加工痕迹以及切屑分离时的塑性变形等形成的。经过车削、铣削和刨削加工的表面，其微凸体的分布显示一定的方向性；经过抛光研磨等加工的表面，则显示各向同性或等概率分布。

虽然形状误差、波纹度是影响机器零件工作性能的重要因素，但粗糙度与摩擦、磨损和润滑的关系更密切，影响更大。

研究和测量表面微观几何形状的方法很多，如表面轮廓仪、干涉仪、光学显微镜、扫描电镜等。用轮廓仪不但可画出表面的轮廓图形、支承面积曲线，也可直接测量出粗糙度高度和形状等有关参数。若将轮廓仪与计算机相连，辅之于精密工作台，可绘制表面粗糙度三维形貌图。

当用光切显微镜和干涉显微镜测量 R_z 与 R_y 参数，其范围分别是0.8—80 μm 和0.05—0.8 μm ；用电动轮廓仪测量 R_a 参数值范围为0.2—5 μm 。

由于粗糙度的高度与其间距相比是比较小的，所以一般的轮廓图在垂直方向的放大倍数比水平方向大许多倍。因此轮廓图形的微凸体是比较尖峭的，而实际并不是如此。表征表面粗糙度的参数很多，主要有下列几种：

1. 与微观不平度高度有关的参数

(1) 轮廓算术平均偏差 (R_a 或CLA)。它是在取样长度 l 内，轮廓线上的点与中线(基准线)之间距离的绝对值的算术平均值。

中线是一条与轮廓走向一致的线；如图1—1，在取样长度 l 内，该线划分轮廓图为上(实体)、下(空体)两部分。这两部分的面积和相等。

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (1-1)$$

或近似为：

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (1-2)$$

(2) 轮廓均方根偏差 (R_q 或RMS)。它是在取样长度 l 内，轮廓线上的点与中线之间距离的均方根值。

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dx} \quad (1-3)$$

或近似为：

$$R_q = \sqrt{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i)^2 \right]} \quad (1-4)$$

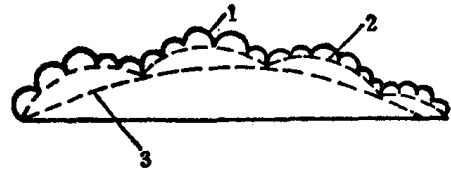


图1—2 表面几何形状组成
1.粗糙度 2.波度 3.形状误差

R_q 对于离开中线较远的 y_i , 给予较大的比重。与 R_a 相比, R_q 更好地反映了微观不平度高度的情况。

(3) 微观不平度+点高度 (R_z)。它是在取样长度内5个最大的轮廓峰高的平均值与5个最大的轮廓谷深的平均值之和。

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 y_{pi} + \sum_{i=1}^5 y_{vi}}{5} \quad (1-5)$$

式中: y_{pi} ——第*i*个最大的轮廓峰高;

y_{vi} ——第*i*个最大的轮廓谷深。

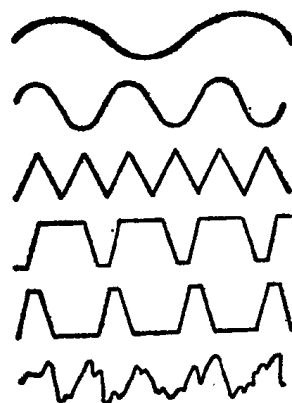
(4) 轮廓最大高度 (R_y 或 R_{max})。它是在取样长度内最高峰与最低谷之间的距离。

它们之间的关系随加工方法的不同稍有差别, 表1-1为其换算关系。

表 1-1 R_q, R_a, R_z, R_{max} 的关系

表面加工方法	R_q/R_a	R_z/R_a	R_{max}/R_a
车 削	1.1-1.5	4-5	4-5
磨 削	1.18-1.30	5-7	7-14
研 磨	1.30-1.5	-	7-14

上述参数描述了表面微观不平度在高度方向的情况, 但不能反映其间距特性和形状特性。图1-3为不同的表面轮廓图形, 它们具有相同的 R_a 值 (或 R_q, R_{max}, R_z 值), 但微凸体的间距、形状、尺寸等各不相同, 有凸弧形、三角形、梯形等。显然这些表面相互作用的性质, 对摩擦、磨损的影响也不同。因此, 还需要其它参数描述。



2. 与微观不平度间距特性有关的参数 这类参数很多, 如轮廓的单峰平均间距, 微观不平度平均间距, 轮廓峰的密度, 轮廓展开长度, 轮廓的均方根波长和轮廓的平均波长等。

图 1-3 具有相同粗糙度高度的不同轮廓图形

(1) 轮廓的单峰 (微凸体) 平均间距 (S)。它是在取样长度内, 轮廓中两相邻单峰 (微凸体) 最高点之间的距离在中线上投影长度的平均值。

(2) 轮廓峰的密度 (D)。单位长度内的轮廓峰 (微凸体) 数。

3. 与微观不平度形状特性有关的参数

(1) 微凸体顶峰曲率半径 (r)。它反映了微凸体尖峭或平缓的程度 (图1-4)。在承受载荷一定时, 曲率半径大的微凸体, 不易产生变形。r 可用轮廓仪直接测出显示, 也可

按下式计算。

$$r_i = \frac{d_i^2}{8h_i} \quad (1-6)$$

式中： h_i ——距微凸体顶点 O 的距离，一般

$$h_i = 0.06R_{\max} \text{ 或 } h_i = 0.3R_a;$$

d_i ——距微凸体顶点为 h_i 处的水平截段 ac。

计算时至少要取五个最高微凸体，取其平均值。

$$r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i$$

若表面的横向与纵向轮廓图形不同时，则

$$r = \sqrt{r_1 r_2}$$

r_1 ——横向轮廓图形的微凸体曲率半径的平均值；

r_2 ——纵向轮廓图形的微凸体曲率半径的平均值。

微凸体曲率半径的大小与机械加工方法有关。表 1—2 为几种不同加工方法表面微凸体曲率半径值。

表 1—2 不同加工方法微凸体曲率半径

加工方法	R_a 值 (μm)	微凸体曲率半径 (μm)	
		横向半径 (r_1)	纵向半径 (r_2)
磨 削	$>0.63-2.5$	4—10	100—300
	$>0.16-0.63$	10—40	100—300
车 削	$>1.25-5$	20—40	400—500
	$>0.32-1.25$	40—120	—
铣 削	$>2.5-10$	30—60	400—500
	$>0.63-2.5$	60—80	—
抛 光	$>0.16-0.63$	300—700	300—700
	$>0.08-0.16$	500—1 000	500—1 000
研 磨	$>0.02-0.16$	20—70	—

(2) 幅度分布曲线。它是表面微观不平度高度的分布函数，可用下述方法得到：将轮廓在取样长度内分为等距离的 N 个纵坐标 y_1, y_2, \dots, y_N ，并在轮廓峰顶线至轮廓谷底线的区域内，作若干条平行于中线的等间距平行线，然后计算各相邻平行线在轮廓线上截取区域内，纵坐标个数 n ，也就是该区域内相等纵坐标频数，以 $n/N \times 100\%$ 值绘出直方图。由直方图拟合的曲线，就是幅度分布曲线，又称全纵坐标高度分布曲线，如图 1—5 所示。

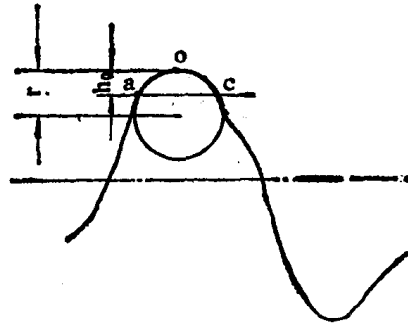


图 1—4 微凸体顶峰曲率半径示意图

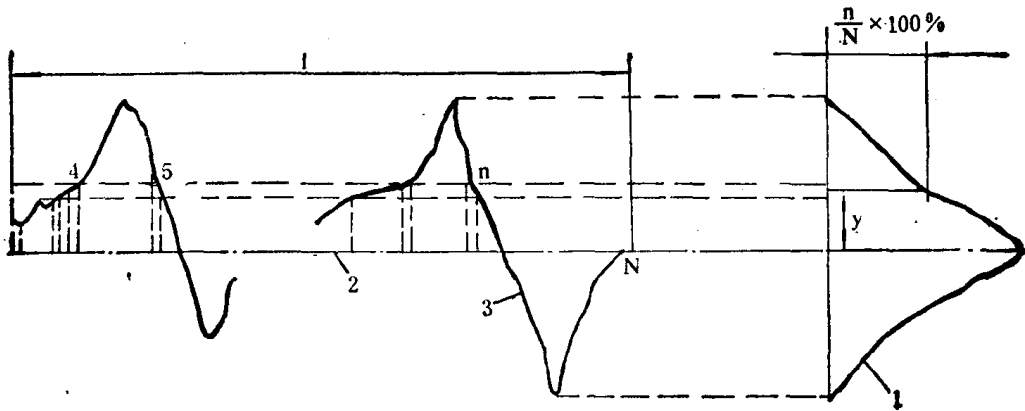


图 1—5 幅度分布曲线

1. 幅度分布曲线 2. 中线 3. 轮廓线

实际中有很多表面（如经过磨削加工的表面）的幅度分布曲线呈正态分布，其密度函数 $\psi(y)$ 为：

$$\psi(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-y^2/2\sigma^2}$$

但也有不少表面的分布曲线并不对称，向某一边偏斜。这种不对称的程度用轮廓的偏斜度（偏态） S_k 量度。

$$S_k = \frac{1}{R_q^3} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i)^3 \quad (1-7)$$

式中： y_i ——轮廓线上的点到中线的距离。

S_k 可为正值，也可以为负值。正态分布的偏态 $S_k = 0$ 。 S_k 为负时表示在距轮廓顶点相同距离时，支承面积的比率大。发动机气缸表面轮廓图的 S_k 为负值。

（3）支承面积曲线，也称支承长度率曲线。它表示两表面接触时实际接触面积的大小，反映了轮廓图形上微凸体沿高度分布的情况。也可说明摩擦表面磨损到一定程度时，实际接触面积占名义接触面积的比率。

理想的支承面积曲线如图 1—6 所示。其作图法是：在取样长度 l 的轮廓曲线上，作与中线平行的一系列直线，如距顶点 x, y, z 的直线。以峰顶线为零位线，将各条平行线截取的轮廓图中微凸体的长度相加，画在轮廓图的右边。如距顶点为 x, y, z 的直线截取微凸体的长度之和分别为 $a_1 + c_1, a_2 + b_2 + c_2,$

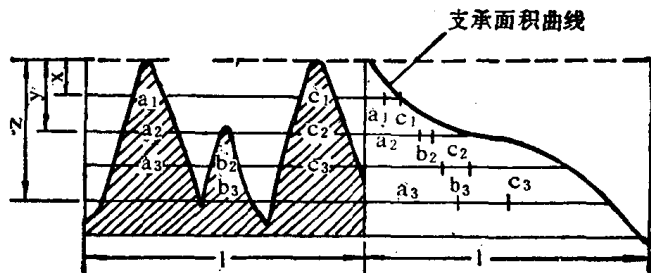


图 1—6 支承面积曲线

$a_3 + b_3 + c_3$, 称为支承长度 n_p 。这样可得到三个点, 以此法继续画下去, 直到轮廓图的谷底线为止。接连图上各点的线即为支承面积曲线。可以看出轮廓支承面积曲线是用支承长度 n_p 与取样长度 l 之比得到的。则

$$t_p = \frac{a + b + c \dots \dots}{l} = \frac{n_p}{l} \times 100\%$$

从统计学的观点来看, 支承面积曲线就是幅度分布曲线的累积分布函数 $F(y)$ 。

$$F(y) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi(y) dy$$

式中: y ——轮廓线上的点与中线之间的距离;

$\phi(y)$ ——幅度分布概率密度函数;

$F(y)$ ——幅度分布累积分布函数。

不同加工方法都有各自的表面轮廓图形, 其微凸体的高度、形状、密度、尺寸等均不相同, 因而支承面积曲线也不同。图1—7为经过抛光(曲线1)、磨削(曲线2)和车削(曲线3)加工的支承面积曲线。图中纵坐标为 $1 - x$, $x = \frac{R}{R_{max}}$, R 为从峰顶线(0线)

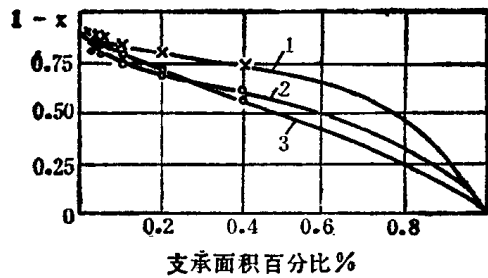


图1—7 不同加工方法的支承面积曲线
1.表面抛光 2.表面磨削 3.表面车削

到给定截线的距离, R_{max} 为轮廓最大高度。由图可以看出, 经过抛光的表面距峰顶任一深度处的支承面积都大于磨削和车削的表面。

为减少摩擦和磨损, 应根据摩擦副的工作条件对表面形貌提出合适的要求。如过去曾要求内燃发动机的气缸内表面为“镜面”, 事实证明这是不全面的。为使油膜易于形成和保持, 要求气缸内表面具有良好的贮油性能, 因此, 内表面应具有一定的粗糙度; 但从保证活塞环、活塞运动的灵活性和优良的滑动性能方面, 则要求气缸表面光滑, 粗糙度尽量小。用平台珩磨工艺形成的叠加形貌结构, 较好地满足了上述要求。它的主要特征是光滑的承载结构即平台被一定深度的沟槽所分割, 平台粗糙度小, 利于活塞、活塞环的运动;

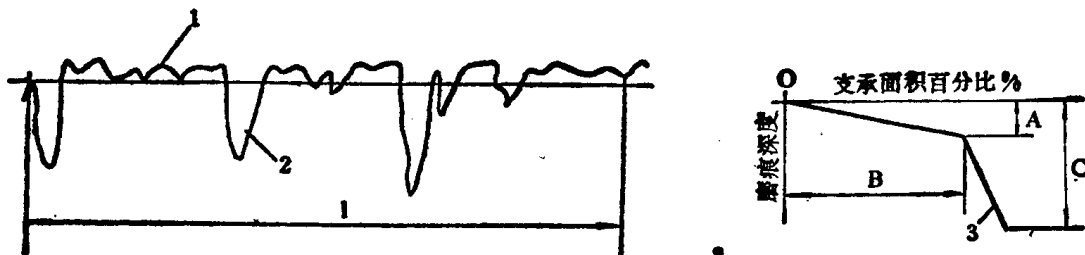


图1—8 平台珩磨的轮廓图和支承面积曲线示意图

沟槽则有一定的贮油能力。其理想轮廓图和支承面积曲线如图1—8。图中1为平台结构，2为贮油沟。支承面积曲线3呈折线型。A为承载平台的粗糙度深度。距轮廓图形最高点的深度为A时，支承面积为B。C为贮油沟的深度。要求A = 1—4μm, B = 50—90%, C = 6—10μm。这时贮油沟的贮油量V₀至少为每平方厘米0.02mm³。

$$V_0 = \frac{(100 - B)(C - A)}{2000} \text{ (mm}^3/\text{cm}^2)$$

试验表明，在其它条件相同时，这种结构的表面耐磨性、摩擦系数和润滑油消耗量都好于老式加工方法。现在我国一些型号的柴油发动机气缸已按此原则制定了试用标准。

4. 微凸体模型 实际表面微凸体的形状各式各样，极为复杂，为了研究的方便，常将微凸体的形状理想化。理想化的微凸体常用模型有三种：球形、柱形和锥形（图1—9）。图上曲线为法向压力分布曲线。

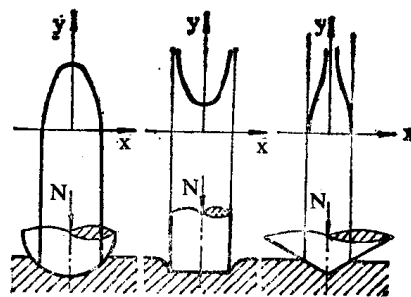


图1—9 微凸体模型

球形模型容易用数学方法分析，其压力分布可用赫兹接触理论求解，比较常用。柱形模型简单，受载以后，其接触面积保持常数，这与实际不符合；锥形模型比较接近实际。在柱形和锥形模型的接触区的周边或中心处，其压力出现不定值。在计算摩擦和磨损时，常用这些模型作为理论分析的基础。

实际表面的微凸体各自大小和形状以及在接触过程中，接触状态和变形情况都不一样，所以按理想化的微凸体模型所得的结果，还要进行修正。

二、固体表面的组成

在大气条件下，不可能得到纯净的表面，其上总是覆盖着各种性质的薄膜。根据不同，金属表面可能有三层或四层不同的物质。图1—10表示金属表面的一般组成。普通的污染膜包括油污和灰尘等，吸附膜是大气中的液体或气体分子的吸附层，金属氧化膜是表面金属与空气中的氧化合而形成的，加工变形层是在机械加工中材料变形的结果，其顶部可能因加工过程中表面材料熔化和塑性流动形成非晶或微晶结构，称为毕氏层。根据变形程度不同加工变形层又分为强烈变形层、严重变形层和轻微变形层。例如，在空气中经过磨削和抛光后的表面，除了有约10Å厚的吸附层和200Å左右的氧化层外，其加工变形层包括约1μm厚的强烈变形层，约

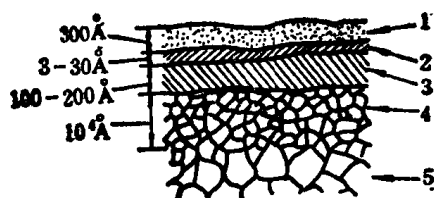


图1—10 固体表面的组成

1. 污染物 2. 吸附层 3. 氧化层 4. 变形层
5. 基体