

金属压力加工中的 摩擦和润滑手册

A. П. 格鲁捷夫
(苏联) Ю. Б. 吉利贝格
B. T. 季里克

著

航空工业出版社

金属压力加工中的 摩擦和润滑手册

〔苏联〕 A.Π. 格鲁捷夫

IO.B. 吉利贝格 著

B.T. 季里克

焦明山 袁瑞琛 译

汪 志 良 校

航空工业出版社

1990

内 容 简 介

本书介绍了各种金属压力加工工艺过程中确定外摩擦力的资料、接触面上摩擦力的分布图以及各种具体加工条件下摩擦系数的数据,阐明了各种塑性变形过程中确定摩擦系数的方法,研究了润滑作用的理论问题,分析了一些行之有效的工艺润滑剂的品种及其生产方法以及各种润滑系统及其使用条件,说明了润滑材料的试验方法,并给出了各种润滑剂的技术经济指标。

本手册可供广大金属压力加工专业技术人员使用,也可作为高等和中等院校有关专业师生用的参考书。

金属压力加工中的 摩擦和润滑手册

焦明山 袁瑞琛 译
汪志良 校

航空工业出版社出版发行
(北京市和平里小关东里14号)
全国各地新华书店经售
— 邮政编码: 100029 —

北京市朝阳区同兴印刷厂印刷

1990年5月第1版	1990年5月第1次印刷
787×1092毫米1/32	印张: 16.5
印数: 1—3500	字数: 370千字

ISBN 7-80046-210-2/TG·004

定价: 7.30 元

前 言

在苏共第26次党代会的决议、党和政府的决定中提出了一项发展国民经济最重要的任务：在励行节约和最大限度地利用资源的条件下，提高生产效率和产品质量。

金属压力加工工艺是获取金属制品的一种高效而经济的方法。为进一步发展和完善这一工艺，要求建立最佳外摩擦（接触摩擦）条件。

本书试图概括地介绍有关金属压力加工中摩擦和润滑的资料，力求包括大多数问题的各个主要方面。

本书第一篇列出了确定锻造、冲压、轧制、拉拔和挤压加工中接触摩擦力大小的有关资料。这些资料对制订变形规范、计算设备强度及所需功率是不可缺少的。摩擦力大小通常是通过摩擦系数确定的。因此，为了解决工艺和设计任务，对变形区外摩擦系数平均值的选择要有足够的可靠性。此时，应该正确地考虑影响摩擦的主要因素，并将它们从许多次要的因素中分离出来。在很多情况下，金属压力加工过程理论分析要求知道的不仅是摩擦力的平均值，而且还有摩擦力在接触面上的分布。对这一复杂问题同样应给予极大的注意。

本书第二篇介绍了有关选择、生产和使用工艺润滑剂方面的资料。目前，可做工艺润滑剂使用的已有上百种不同的材料，为每个具体的加工过程选择最佳的润滑剂成分之所以很

困难，是因为这种润滑剂必须同时满足一系列要求，而其中有些要求又很难兼顾。此外，制造润滑剂的原料基地和生产基地的存在与否、运输和储存问题的解决程度、工程技术人员习惯和技术知识水平等其他情况也都起着重要的作用。所有这一切往往导致在不同的工厂、同样的工艺过程却使用不同的润滑剂。

由于对产品质量要求的提高、生产工艺的改进、原料基地的变化、对生态因素的考虑和其他一些原因，人们正在不断寻求用另外一些有效的、不甚稀缺的润滑剂取代某些润滑剂。作者认为，在评价品种众多的润滑剂时，有必要介绍有关过去用过而现在不用的润滑剂资料，这些资料对寻找新型润滑剂的工艺人员来说是十分有用的。

润滑剂的使用效果不仅取决于润滑材料的成分，而且还取决于在工具和变形金属上输送润滑剂的装置的型式。因此，在本手册中辟有相当篇幅评述润滑系统及其正常使用的条件。

最近几年，有一些润滑材料的名称有了更改，本手册在有关章节中同时列出了新（标准的）旧润滑剂的名称。

作者对德聂伯罗彼得罗夫斯克冶金学院金属压力加工教研室、全苏管材工业科学研究与工艺设计所管材化学工艺加工处以及查波罗什钢铁厂中央试验室的工作人员在本手册的准备和成稿工作中给予的帮助致以谢意。作者还对评论家技术科学硕士П.И.楚伊柯提出的宝贵意见表示特别感谢。

本书评阅者：技术科学硕士 П.И.楚伊柯

目 录

前言	I
----------	---

第一篇 外摩擦（接触摩擦）

第一章 基本概念、名词术语和符号	1
第1节 概述	1
第2节 表面波纹度和粗糙度，接触面积	3
第3节 外摩擦的性质	9
第4节 金属压力加工时摩擦的特点	12
第二章 摩擦力公式（摩擦定律）	15
第三章 金属压力加工过程中的摩擦因素	21
第1节 变形金属的化学成分	21
第2节 金属表面氧化物的成分和性能	21
第3节 加工工具的化学成分和性能	24
第4节 工具的表面状态	28
第5节 变形温度	33
第6节 工艺润滑剂	35
第7节 变形程度（压缩量）	36
第8节 金属的机械性能	39
第9节 接触压力	44
第10节 滑动速度	50
第11节 滑动路径的长度	55
第四章 接触面上摩擦力的分布	61
第1节 摩擦力向量场	61
第2节 完全的和不完全的摩擦力区域	62
第3节 摩擦力的极限值	65
第4节 接触面摩擦力分布情况的实验研究方法	67

第5节	接触应力实验的可靠性准则	83
第6节	单位摩擦力分布的实验数据	86
第7节	摩擦力分布的分析描述	108
第五章	确定摩擦系数的实验方法	113
第1节	适用于压力加工过程的“摩擦系数”的准确概念	113
第2节	锻造和模锻时摩擦系数的确定方法	115
第3节	轧制时摩擦系数的确定方法	126
第4节	拉拔时摩擦系数的确定方法	137
第5节	挤压时摩擦系数的确定方法	141
第六章	摩擦系数与变形因素之间的关系	144
第1节	变形金属成分和性能的影响	144
第2节	工具材料的影响	146
第3节	工具和金属表面状态的影响	146
第4节	工艺润滑剂的影响	151
第5节	变形温度的影响	155
第6节	速度条件的影响	157
第7节	接触压力的影响	161
第8节	变形区的压缩量和几何参数的影响	164
第七章	摩擦特性的确定	169
第1节	金属压力加工过程中摩擦系数值的确定	169
第2节	摩擦力因子和单位平均摩擦力的确定	184

第二篇 工艺润滑剂

第八章	润滑剂的分类和物理化学性能	193
第1节	对工艺润滑剂的要求	193
第2节	工艺润滑剂的基本类型	194
第3节	润滑剂的物理化学性能指标及其确定方法	208
第4节	润滑材料及其物理化学性能	217

第九章	工艺润滑剂的制取方法	245
第1节	乳化润滑剂的制取	245
第2节	用氢化植物油的方法制取工艺润滑剂	247
第3节	用有机物的缩合(聚合)法制取润滑剂	250
第4节	以植物油的生产废料为基的润滑剂	254
第5节	合成脂肪酸基润滑剂的制取	259
第6节	皂粉的制取	261
第7节	带填料的润滑剂的制取	262
第8节	硅酸盐润滑剂的制取	262
第十章	润滑剂工艺性能的研究方法	265
第1节	润滑剂减摩效果的测定	265
第2节	润滑剂抗磨损和抗擦伤性能的研究	270
第3节	润滑剂的补充工艺试验	272
第4节	润滑剂引起的金属表面变形	273
第十一章	变形区润滑剂层厚度的测定	275
第1节	润滑剂层厚度的实验研究方法	275
第2节	接触面之间润滑剂层厚度的理论研究	276
第3节	影响润滑剂层厚度的因素	280
第十二章	工艺润滑剂的应用	285
第1节	黑色金属板材冷轧用润滑剂	285
第2节	黑色金属热轧用润滑剂	309
第3节	型材弯曲机和管材成形机用润滑剂	326
第4节	有色金属轧制用润滑剂	327
第5节	拉拔用润滑剂	333
第6节	管材轧制用润滑剂	359
第7节	自由锻造和模锻用润滑剂	361
第8节	板材冲压、挤压和墩锻用润滑剂	368
第9节	型材挤压用润滑剂	380

第十三章	润滑剂和润滑冷却液的供给装置	395
第1节	钢板冷轧时润滑剂和润滑冷却液的供给系统	395
第2节	多辊式轧机上的工艺润滑剂系统	417
第3节	钢板涂油系统	422
第4节	型材弯曲机工艺润滑剂系统	426
第5节	钢材热轧机的工艺润滑剂系统	429
第6节	有色金属及合金轧制用润滑冷却液的供给系统	443
第7节	拉拔时润滑剂的供给	447
第8节	锻造和模锻时润滑剂的供给	456
第9节	挤压时润滑剂的供给	479
第10节	轧管时润滑剂的供给	484
第十四章	润滑系统的维护,润滑材料的消耗和成本	488
第1节	在使用过程中润滑剂的变化和 工艺润滑剂的净化方法	488
第2节	乳浊液的分解方法	494
第3节	废润滑脂的再生	499
第4节	润滑材料的消耗和成本	500
参考文献		504

第一章 基本概念、名词术语和符号

第1节 概述

一物体沿另一物体的表面移动时产生的阻力称为外摩擦或接触摩擦。与物体的切向位移相反方向的阻力称为摩擦力。摩擦力向量在物体的接触面上，并指向与移动力作用相反的方向。

根据物体相对位移的大小，摩擦力分为静摩擦力（静止摩擦）和动摩擦力（运动摩擦）。

假设摩擦发生在受法向力 N 作用的 A 和 B 两物体之间（图1），在物体 A 上施加一个很小的、不足以使物体产生滑动的移动力 Q ，这时，在物体的接触面上将作用着一个不完全的、与力 Q 平衡的静摩擦力 T 。当移动力 Q 增加时，摩擦力 T 相应地随着增加，直到它达到可能的极限值为止，此后物体 A 开始沿着物体 B 滑动。静摩擦力的极限值 T_s 称为完全静摩擦力。

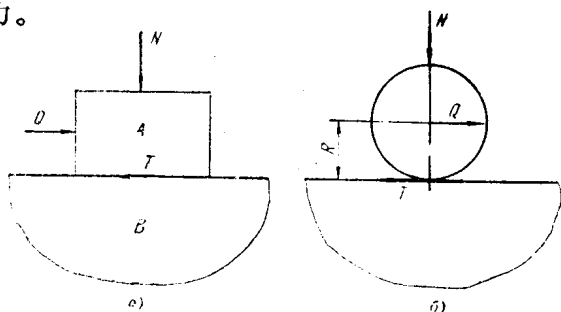


图 1 物体平移(a)和滚动(b)时的作用力

在任意一个移动力 Q 的作用下，即使它很小，物体 A 相对于物体 B 并非绝对静止不动，因为这两个物体已发生起始位移。在数值上起始位移非常小（以微米计），它与移动力成正比，局部有弹性。

当物体的相对位移较大时，在接触面上作用着动摩擦力，此力一般比完全静摩擦力略小一些。

按照运动学特征，摩擦分为滑动摩擦和滚动摩擦。滑动摩擦的特征是，一物体表面上的所有点沿另一物体表面作切向运动（图1,a）。旋转摩擦是滑动摩擦的特殊情况，此时，轴的端部在旋转，同时与一平面相接触。

滚动时，相互作用的物体表面上的各点逐渐接近，进入接触，然后分开。一物体沿另一物体的滚动是在力 Q 作用下实现的（图1,b）。力 Q 产生一个为克服滚动抗力所必需的力矩。在某些情况下，滚动伴随着滑动，即综合有两种摩擦。

为了评定摩擦力的大小，在工程上广泛使用所谓摩擦系数这个指标。按照摩擦形式，摩擦系数分为：

静摩擦系数 f_s ——完全静摩擦力 T_s 与法向力 N 之比

$$f_s = \frac{T_s}{N} \quad (1)$$

滑动摩擦系数 f ——运动（滑动）摩擦力 T 与法向力 N 之比

$$f = \frac{T}{N} \quad (2)$$

滚动摩擦系数 k ——抗滚动力矩 M_k 与法向力 N 之比

$$k = \frac{M_k}{N} = \frac{TR}{N} \quad (3)$$

式中 R 为滚轮半径。

静摩擦系数 f_s 和滑动摩擦系数 f 为无因次量,而滚动摩擦系数 k 具有线性因次。在有关金属压力加工的文献资料中,滑动摩擦系数有时用字母 μ 表示。

摩擦角的概念和摩擦系数密切相关。假设在某物体表面作用着法向力 N 和摩擦力 T (图2),此两力的几何相加等于合力 F 。法向力与合力 F 之间的夹角 β 称为摩擦角。

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{T}{N} \quad (4)$$

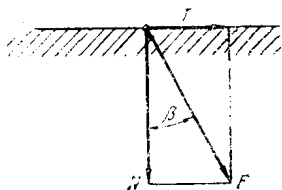


图 2 “摩擦角”概念的确定

比较(4)式和(2)式可知,摩擦系数等于摩擦角的正切。

$$f = \operatorname{tg} \beta \quad (5)$$

摩擦角有时用 ρ 、 φ 或其他字母表示。

在某些情况下,滑动摩擦力的大小取决于滑动的方向。其原因可能是由于表面有定向加工刀痕(车削、磨削)、在不同方向上的不同磨损等。如果摩擦力和摩擦系数的大小取决于滑动方向,那么,这种摩擦称为各向异性摩擦。在许多著作中证明,当存在各向异性摩擦时,滑动方向和移动力作用方向不相重合^[1]。

第2节 表面波纹度和粗糙度,接触面积

所有固体的实际表面都是波纹状的和粗糙的。物体表面的不平度形成了一定的微观起伏。波纹度应理解为周期性重复的不平度的总称，波纹间的距离（波距 S_B ）比其高度 H_B 要大得多（图3）。波纹度的特征是 $S_B/H_B > 40^{[2]}$ 。波纹度的定量参数暂时还没有标准化。

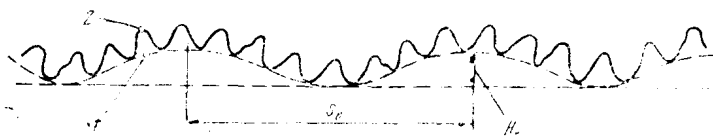


图 3 表面的微观起伏

1—波纹度；2—粗糙度

粗糙度可以理解为具有较小距离（ $0.002 \sim 12.5\text{mm}$ ）和高度（ $0.025 \sim 1600\mu\text{m}$ ）的不平度的总称。粗糙度的参数已由ГОСТ2789-73规定。

表面粗糙度可以用表面光度仪、轮廓曲线测定仪、显微镜和其他仪器进行测量。在苏联普遍使用卡利勃尔工厂生产的201型轮廓曲线-表面光度测定仪。图4所示为断面图——在轮廓曲线测定仪纸带上记录下来的表面断面（浮雕）的图形。表面粗糙度是在选定的一段表面的基准长度 l 上测量的。随着基准长度增加，表面粗糙度参数确定准确性提高。基准长度的最小值规定在ГОСТ2789-73中。

在加工时，要确定断面的中线 $m-m$ 、凸峰线和凹坑线的位置（参见图4）。断面的中线是一条表示表面名义形状的线，它把被测量的断面分开，使之在基准长度范围内断面距

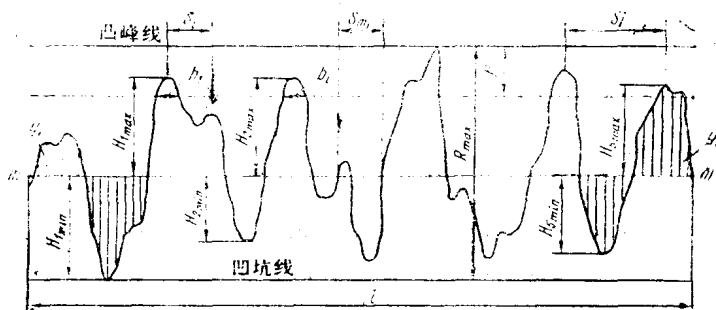


图 4 表面断面图和粗糙度的基本参数

该线的均方根差最小。还可以这样近似地确定中线，即在基准长度范围内，在该线两侧的面积偏差之和应该相等。

凸峰线通过基准长度范围内断面的最高点并与中线平行，相似地，凹坑线则通过断面的最低点。

为定量地评定表面的微观起伏(粗糙度)，ГОСТ 2789-73 规定了下列参数的确定方法： R_a ——断面的算术平均偏差； R_z ——沿 10 个点的断面不平度高度； R_{max} ——断面不平度的最大高度； S ——各波峰的不平度的平均间距； S_m ——不平度的平均间距； t_p ——断面的相对支承长度。

断面的平均算术偏差乃是在基准长度范围内所测断面各点到中线的距离(纵坐标) $y_1, y_2, \dots, y_n$ 的平均值。沿纵坐标上的距离是按绝对值相加的，亦即不考虑正负号。确定这一参数的准确公式为

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (6)$$

• 原文为Продольная координата (纵坐标)，似有误——校者注。

式中 x ——横坐标。

该式可近似地写为

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (7)$$

式中 n ——测量次数。

很多表面光度仪配有连续判读参数 R_a 的度标。

断面不平度高度 R_z 可按在基准长度范围内断面的 5 个最高点与 5 个最低点的平均距离来确定

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 |H_{i\max}| + \sum_{i=1}^5 |H_{i\min}| \right) \quad (8)$$

式中 $H_{i\max}$ 和 $H_{i\min}$ ——从 中线计算的断面的最大和最小偏差 (纵坐标)。

断面不平度的最大高度 R_{max} 是基准长度范围内凸峰线和凹坑线间的距离。

从图4上可以清楚地看出不平度间距 S_m 和按凸峰计算的不平度间距 S_i 这两个概念的含意。

在某一高度 p 上, 穿过断面各凸峰引一条与中线平行的切割线, 其所切的各部分的总和称为断面的支承长度或承载长度。断面的相对支承长度 t_p 可按下式确定:

$$t_p = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n b_i \quad (9)$$

式中 b_i ——在单个凸峰上被切小段的长度。

显然, t_p 的大小取决于为引割线而选取的高度 p 。表示相对支承长度 t_p 与高度 p 值之间相互关系的图称为支承面曲

线或承载面曲线，或简称支承曲线（图5）。

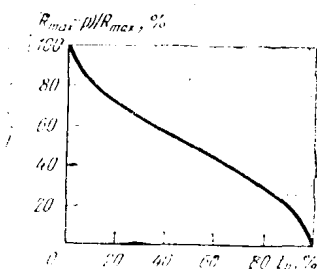


图 5 支承面曲线

表面粗糙度标准（ГОСТ2789-73）包括14级粗糙度（光洁度）等级，而且，对于1~5级和13~14级，以参数 R_z 作为基本指标，而对于6~12级，则以参数 R_a 作为基本指标。从6级开始，每一级又进一步分为三个次级（表1）。

参数 R_z 和 R_a 之间有一定的数量关系，这种关系与表面的加工方法有关。近似地考虑的话，对于1~6级表面，可取 $R_z/R_a=4$ ；对于7~14级表面，则取 $R_z/R_a=5$ 。

为了表示表面的微观几何形状，除列入ГОСТ2789-73中的参数外，还可采用其他一些指标^[2, 3]。其中用得相当广泛的是断面均方差 R_q 。该指标可按下式计算：

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l [y(x)]^2 dx} \quad (10)$$

近似地可写成：

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (11)$$

R_a 值比 R_z 值约高 6 ~ 30% (随断面的形状而异)。

图纸上和其他技术文件中表示表面粗糙度和加工方法的符号均载于ГОСТ2309-73。由于所有固体的表面都是粗糙的和波纹状的,当它们互相接触时,并不是沿整个名义面积接触,而只是在一个个小面积上发生接触,也就是说,表面间的接触是不连续的。考虑到这种情况,接触面积可分为名义的、轮廓的和实际的三种(图6)。

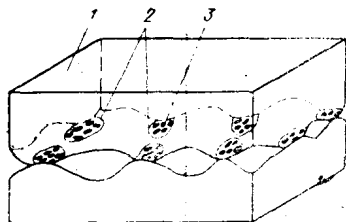


图 6 两表面间接触的空间示意图

1 — 名义接触面积; 2 — 轮廓接触面积; 3 — 实接触点

名义(几何)接触面积是指在接触面外边界范围内的面积。轮廓接触面积是波纹型不平度受压后形成的那些斑点的面积,实际接触的那些点就分布在这些斑点范围内。实际(物理)接触面积是指真正接触的许多小块(点)的总面积。

机器零件接触时,轮廓接触面积一般为名义接触面积的 5 ~ 15%。如果名义接触面积很小,波纹度可以忽略不计,则轮廓接触面积接近于名义接触面积。实际接触面积一般不超过名义接触面积的 0.01 ~ 0.1%。由于个别断面凸峰变形