

• 高等学校教学用书

压力加工过程的 摩擦与润滑

GADEN



冶金工业出版社

PDG

1101556

高等学校教学用书

压力加工过程的摩擦与润滑

武汉钢铁学院 李虎兴 主编

冶金工业出版社

(京)新登字036号

高等学校教学用书
压力加工过程的摩擦与润滑
武汉钢铁学院 李虎兴·主编

冶金工业出版社出版
(北京北礼坛大街莱佛士宾馆33号)

新华书店总店科技发行所发行
冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 10 字数 231 千字
1993年10月第一版 1993年10月第一次印刷
印数 1~2500册

ISBN7-5024-1219-0
TG·164(课)定价4.85元

前 言

摩擦、磨损和润滑理论在工业生产发展中占有十分重要的地位，自60年代中期三者作为一门新的学科——摩擦学被提出之后，发展非常迅速。时至今日，在金属压力加工生产及其技术发展中，有很多问题都和摩擦学密切相关。近年来，一些冶金高等院校的金属压力加工专业陆续开设了摩擦与润滑的课程，本教材就是为这门课程编写的，学时数为30。

本教材主要阐述必需的基础理论和应用技术，还编入了该领域一些具有代表性的最新发展的内容，除可供金属压力加工专业作教学用书外，还可供与金属压力加工生产有关的其它专业人员参考。

本教材共五章，由武汉钢铁学院李虎兴主编。其中绪论，第一章，第二章的第一、二和六节，第三章的第五节和第四章的第三节由李虎兴编写；第二章的第三、四和五节，第三章的第一至四节和第四章的第一、二节由鞍山钢铁学院耿申初编写；第五章由昆明工学院陆建生编写。

在初稿完成后，西安冶金建筑学院严崇年、北京科技大学余望和华东冶金学院林源茂等对该书进行了认真评审，并提出了很多宝贵的意见，编者在此表示衷心的感谢。

由于摩擦学是一门边缘学科，所以编者在层次的安排、内容的取舍和深广度掌握等方面，可能有不妥之处，对此，诚恳读者批评指正。

编 者

1991年10月

目 录

绪论	1
一、摩擦学概述	1
二、摩擦学在压力加工技术发展中的意义	2
第一章 金属摩擦学基础理论	3
第一节 金属表面的性质与接触	3
一、金属表面的性质	3
二、金属表面的接触	4
第二节 金属摩擦时的表面温度	7
一、滑动表面的温升模型	7
二、典型的试验结果	8
第三节 滑动表面的金属转移和磨损	9
一、滑动表面的金属转移	9
二、金属的磨损	10
第四节 金属的表面膜效应	12
一、表面膜的结构	12
二、表面膜效应	13
第五节 干摩擦理论	14
一、干摩擦的机理	14
二、滑动摩擦	16
第六节 液体摩擦理论	17
一、O. 雷诺(Reynolds)方程——粘性流体运动方程	17
二、动压油膜的承载能力	20
第七节 边界摩擦理论	23
一、边界摩擦机理	23
二、边界膜	24
三、边界膜的负荷、速度和温度效应	26
第二章 压力加工过程的摩擦	28
第一节 压力加工过程摩擦的特点	28
一、塑性变形过程中的摩擦	28
二、变形区内的相对滑动特性	28
三、摩擦条件对轧制过程影响的复杂性	30
四、变形区内摩擦状态(机构)的复杂性	31
五、温度的影响	31
第二节 摩擦对轧制过程特性的影响	31
一、有效摩擦和剩余摩擦	31
二、摩擦条件对轧制过程力能消耗的影响	33

三、摩擦条件对冷连轧过程特性的影响	38
第三节 润滑轧制时的摩擦机构与特点	44
一、变形区润滑层的形成	44
二、变形区润滑层厚度的确定	45
三、测定变形区润滑层厚度的方法	49
四、润滑层厚度对摩擦系数的影响	50
五、润滑轧制时的摩擦机理	51
六、从润滑效果分析润滑作用机理	53
七、润滑轧制的摩擦特性参数	54
第四节 影响摩擦系数的因素	56
一、轧辊和轧件表面状态的影响	56
二、轧制温度的影响	57
三、轧制速度的影响	58
四、轧件含碳量的影响	59
五、工艺润滑剂的影响	59
六、轧件压下量的影响	61
第五节 摩擦系数的测量法	61
一、直接测量法	62
二、间接测量法	64
第六节 冷轧摩擦系数及其数学模型的研制方法	67
一、冷轧摩擦系数	67
二、冷轧摩擦系数数学模型的研制方法	67
第三章 压力加工过程工艺润滑	71
第一节 工艺润滑的作用和意义	71
第二节 工艺润滑剂的类型和要求	71
一、工艺润滑剂的类型	71
二、对工艺润滑剂的基本要求	73
第三节 润滑剂的理化指标及工艺性能	74
一、润滑剂的理化性能指标	74
二、润滑剂的工艺性能及评定润滑剂效果的方法	77
第四节 各种润滑剂的润滑能力	79
一、矿物油的润滑能力	79
二、动、植物油的润滑能力	82
三、合成脂肪酸的润滑能力	85
四、乳化液的润滑能力	88
五、固体和熔体润滑剂的润滑能力	89
第五节 冷轧薄板润滑剂	91
一、坯料酸洗后涂油润滑剂	92
二、冷轧汽车钢板用润滑剂	93
三、冷轧镀锡板用润滑剂	96
四、国产冷轧薄板轧制油	96
第四章 弹性和塑性流体动力润滑理论	98

第一节 刚性接触润滑理论	98
一、有关几何参数和弹性参数	98
二、马丁(Martin)线接触润滑理论	99
第二节 弹性流体动压润滑理论	101
一、赫兹(Hertz)接触应力理论	101
二、格罗宾(Грубин)的近似解	101
三、线接触弹流的数值解	105
四、道森-希奇松(Dowson-Higginson)膜厚公式(线接触)	108
五、弹流润滑中压力分布与油膜形状特性	109
第三节 塑性流体动力润滑理论	111
一、轧制理论	112
二、润滑轧制理论	114
第五章 挤压、拉拔等压力加工过程的摩擦与润滑	121
第一节 挤压过程的摩擦	121
一、摩擦与挤压的金属流动	121
二、摩擦对挤压力的影响	122
三、摩擦与挤压制品的质量	123
四、挤压加工过程中的摩擦	124
五、摩擦在挤压加工中的有益作用	126
第二节 挤压过程的润滑	127
一、挤压润滑的作用及部位	127
二、挤压加工使用的润滑剂	127
三、热挤压的润滑	128
四、冷挤压的表面处理及润滑	132
五、温挤压中的润滑	136
第三节 拉拔加工过程的摩擦	137
一、拉拔的摩擦与不均匀变形	137
二、摩擦对拉拔力的影响	138
三、拉拔过程中的摩擦及主要影响因素	139
四、拉拔时的摩擦系数	139
五、摩擦在拉拔中的有益作用	139
第四节 拉拔加工过程的润滑	140
一、拉拔润滑剂	140
二、拉拔润滑方式	140
三、拉拔的表面处理和润滑处理	142
第五节 其他压力加工过程中的润滑	150
参考文献	151

绪 论

一、摩擦学概述

如果在相互接触的表面之间没有摩擦存在，人类是不可能生活的。

任何机器的运转都是通过其零、部件的相互运动来实现的，这些相对运动的表面必然伴随着产生摩擦与磨损。在某些情况下，它们是有益的，例如很多运输机械、磨损加工和球磨机械等的工作效能、生产率、可靠性和安全性等的提高，都取决于摩擦和磨损的增大。然而，在大多数情况下它们却是非常有害的，将对生产过程的力能消耗、机器的精度和使用寿命、产品质量和维修费用等产生严重影响。

润滑是减少摩擦和磨损的重要手段之一。

人类在长期的生活和生产实践中，早就觉察到摩擦、磨损和润滑的重要性，逐步认识、掌握了它们的某些现象和规律，创立、改进和发展了不少新的理论、技术、材料、工艺和设备，对推动人类社会的发展和科学技术的进步起了相当大的作用。

长期以来，由于对摩擦、磨损和润滑的研究都是孤立进行的，加之受科学技术和测试水平的限制，因而很难进一步深刻认识和掌握它们的本质和规律，也难以更有效地加以利用。例如，就摩擦的起因来说，以往大都从力学的观点加以解释，认为是由滑动表面凹凸不平的机械啮合引起的，然而现代研究的结果表明，问题绝非这样简单。又如润滑问题，以往虽然深刻体会到在滑动表面之间加入润滑剂（例如动、植物油脂）可以非常有效地减少摩擦和磨损，但其作用机理却长期弄不清楚，因此，很难研制和应用更有效的润滑剂，等等。

事实上，摩擦、磨损和润滑三者之间有非常紧密的联系，而且它们对人类社会的发展和科学技术的进步关系极大。因此，迫切需要对它们进行深入的综合研究，故在60年代中期一门新的学科——摩擦学便应运而生。

摩擦学是研究作相对运动的相互作用表面的科学技术及其有关的各种实际问题的科学。

近代的研究结果表明，摩擦学的内容非常复杂和广泛，它涉及到的问题与数学、物理、化学、材料学、机械学和工艺学等都有密切关系，因而它是一门边缘学科。

据统计，世界上的能源有 $1/3 \sim 1/2$ 以各种形式消耗于摩擦。磨损造成的损失，大约是摩擦损失的12倍。因此，有效地解决摩擦和磨损问题，对节约能源和社会财富的积累具有重要意义。

随着近代工业向大型化、连续化、高速化和自动化的方向发展，尤其是随着空间技术、原子能技术和海洋开发等尖端技术的发展，摩擦、磨损和润滑问题显得更为突出。因此，在设计、制造、运行和维修的各个环节中，都必须考虑摩擦、磨损和润滑等问题，并应用摩擦学的有关知识处理好这些问题。

由于摩擦学具有很大的实际意义,所以它一经提出,立即得到世界各国的高度重视,发展非常迅速。近年来,它的研究更是朝着由宏观到微观、由定性到定量、由单因素到多因素等综合性研究方向发展。

目前,世界各国已将摩擦学作为创造国家财富的手段之一,预计在不久的将来,摩擦学将会得到更大的发展。

二、摩擦学在压力加工技术发展中的意义

压力加工过程中的摩擦、磨损和润滑更趋复杂,具有一系列的特点,近年来世界各国都在大力进行研究,已形成了摩擦学的一个重要分支——塑性摩擦学。

众所周知,金属压力加工过程的力能消耗、变形特性和规律、工具磨损、产品质量、设备效能和生产效率等,无一不和摩擦条件密切相关,并受其严重影响。因此,几十年来,摩擦条件一直是压力加工工作者们研究的中心课题之一。

工具的不均匀磨损,直接影响产品的几何尺寸精度、表面质量和外形的规整性(如板形等)。同时,过快的磨损,还直接影响工具的服役周期、消耗量和设备作业率等。事实上,生产人员一直在为掌握工具磨损的规律和为降低磨损而奋斗。

润滑不仅早已成为某些压力加工过程不可缺少的工艺因素,而且应用愈来愈广泛,收效非常显著,从而也愈来愈引起人们的关注。润滑技术的应用,一方面大大促进了塑性加工生产技术的发展,同时也迫使人们对其进行深入的理论研究,从而大大丰富和完善了塑性加工理论。

由上述可知,在塑性加工理论和生产技术的形成和发展过程中,摩擦学的有关问题处于十分重要的地位。

我们以冷连轧过程自动化技术的进一步发展为例,来进一步阐明摩擦学在压力加工技术发展中的意义。

目前,就冷连轧过程而言,欲扩大和完善自动控制系统的功能和大幅度提高轧机的经济效益,关键问题是进一步解决板形控制和头、尾自动化操作问题。影响板形的主要因素为轧辊的弹性变形(弯曲和压扁)、热凸度和磨损,导致轧辊产生热凸度的主要热源为摩擦热。通过近年来的研究,除了与热凸度有关的问题以外,其它问题都已得到比较圆满的解决。因此,板形控制技术的发展,关键在于深入掌握热凸度的特性,以及对它进行精确的预报和控制。实现头、尾的自动化操作,在一定程度上取决于良好的头、尾的板形,这除了与板形控制有关外,还必须掌握摩擦条件的动态特性。

另外,现代高速冷连轧机的装备功率已普遍超过30000kW,轧制速度高达30~40m/s,热效应现象十分强烈,这就要求润滑剂不但要有良好的润滑性能,还必须具有足够的冷却能力。对这类轧机来说,使用高效润滑剂是至关重要的。

综上所述,为了适应和促进我国压力加工生产技术及其自动化技术发展的需要,必须重视塑性摩擦学的学习和研究。

第一章 金属摩擦学基础理论

第一节 金属表面的性质与接触

金属表面的性质和接触特性,与摩擦学的各种问题有密切关系,例如摩擦与磨损现象直接与接触表面间的实际接触面积有关,后者又与表面的形貌特性(凸峰的大小、形状和分布状态)、弹性和塑性变形、物理和化学性质等有关。

一、金属表面的性质

1. 表面形貌

金属表面的几何轮廓形状可用表面形貌、表面结构、表面不平度和表面粗糙度等来描述和表征。

目前,可用触针法、钝角截面法、光干涉法和电子显微镜等对金属表面的不平度及其轮廓形状进行测量。测量结果表明,在经过仔细抛光的表面上仍然存在着很多大于分子级尺寸的凸起和凹陷。目前,尽管抛光技术有了很大发展,但要制备平坦度为 $1\sim 10\mu\text{m}$ 以内的较大平面仍很困难。冷机械加工(车、磨、铣)的表面,从几何观点可分为宏观的几何表面(波形度)和微观的几何表面(粗糙度)。这样,可用波形曲线和粗糙度的频率曲线来表示其表面的几何形状。波形度在理想情况下接近于正弦曲线,粗糙度取决于加工时的进刀量、工件性质和材料,其高度在粗磨时约为 $8\sim 14\mu\text{m}$,在研磨和精磨时约为 $0.3\sim 1\mu\text{m}$ 。塑性加工的产品表面受工具表面的粗糙度、晶粒度、变形量和设备振动等因素的影响,在一般情况下,具有更大的波形度和粗糙度。因此,工程上应用的大多数表面,其粗糙度比抛光表面大得多。

因此,可以想像,当两个金属相互接触时,上端表面实际上是被许多凸凹不平的凸峰支撑着,而上、下两表面的大部分面积被一段比分子作用范围大得多的距离所隔开。

表示表面不平度最常用的参数是中线平均值 R_a ,如图1-1所示,假想一条轮廓平均线,将廓形分为上面实体和下面虚间面积相等的两部分, R_a 是距离廓形平均线的平均偏差,表达式为:

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

另一种常用的表示方法是平均均方根偏差 $R_{a,k}$,表达式为:

$$R_{a,k} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i)^2 \right]^{1/2} \quad (1-2)$$

式中 Z_i ——为以平均线为起点度量出的廓形偏差量;

n ——为在样品长度范围 L 内的度量数目。

上述一类表示方法,只能说明廓形在垂直方向上的高度偏差,而不能说明凸峰的形状、大小及分布状态等特性,也不能说明廓形波浪的稀密程度和是否有一定的规律性等问题。因此,为了严格地表示一个表面的形貌特性,除了用 R_a 和 $R_{a,k}$ 表示之外,还必须用其它的参数(如凸峰的形状、分布)来表示。

2. 表面性质

由金属学原理可知,金属原子主要是通过金属键结合的,且位于势能最低的平衡位置,呈有规则的排列。但是,表面的原子和晶体内部的原子不同,虽然它们和里层原子具有结合能,但外表面与空间接触,受力条件和结合能的对称性和平衡条件被破坏,位置必须调整,才能维持比较稳定的状态。由于表面层原子偏离了它们的结晶学平衡位置,势能将有所升高,这部分升高的能量叫做表面能。显然,由于表面层原子具有较高的能量,它们将处于亚稳定状态,而且由于存在着表面能,将呈现出表面现象,即表面易被腐蚀和由于具有残余的亲活力而易于吸附外来原子等。

再者,在表面层下面,存在着一层不断运动着的自由电子云。这种自由电子不断从金属中逸出,又重新回到金属中去。由于存在着这个过程,金属表面将被一种偶电层(负极是电子云,正极是逸出自由电子后的金属)覆盖着。因此,金属表面通常也将呈现出一定的极性。

金属多为多晶体,晶粒交界的地方叫做晶界。晶界的存在,是多晶体重要的结构特征之一。由于晶界上原子的排列是两个晶粒原子排列的折衷位置,和表面一样,也是一种结构缺陷,必然具有能量——界面能。晶界上的原子除了具有畸变能、激活能小和容易扩散等特点外,还容易吸附杂质,使其力学性质产生变化。一般情况下,晶界的强度和硬度高于晶内。另一方面,从变形过程来讲,晶界是位错运动(滑移)的障碍。因此,晶粒越细,晶体及其表面的强度和硬度越高。

在特殊情况下,例如在真空装置中,机械加工和塑性加工的表面可以保持为纯净表面。这些纯净表面的化学、物理性质,与理想的结晶学表面相比,有很大的差异。以冷加工为例,机械加工的表面除了产生严重的加工硬化现象以外,在表面以下还会因加工方式的不同而产生不同深度的变形层。在塑性变形过程中,形变渗透整个厚度,材料将产生严重的加工硬化现象。在变形层和变形体中,晶粒形状发生了变化,晶粒内部出现了滑移带、孪生组织、形变带和亚结构,增加了如位错、空位、间隙原子、层错和出现了新的亚晶等晶内缺陷,使它们的内能增大,从而导致化学活性、反应势和腐蚀速度的增大和其它性能的变化。特别应指出,冷变形可使位错密度显著增大,例如退火后的位错密度约为 10^6 根/ mm^2 ,冷加工后会增至约 10^{10} 根/ mm^2 。而且,在变形过程中,位错大都向表面迁移而集中,从而使表面和变形体内部的性能有较大的差别。

二、金属表面的接触

1. 接触力学

两个相对运动的表面接触时,界面的作用力和变形对摩擦和磨损有很大的影响。

随着金属性质和加工方式的不同,金属表面的形貌特性千差万别,凸峰的形状更为复杂。因此,为了便于对表面接触问题进行研究,必须对凸峰的形状理想化。常用的理想化凸峰模型有三种:球形、圆锥形和棱锥形。为了掌握接触力学的基本概念和特性,现以最简单的球形模型进行讨论。

假定球形凸峰完全光滑,静置于一软金属上,接触处软金属表面是平坦的,且在接触变形过程中不产生加工硬化现象。应该指出,不产生加工硬化现象的金属几乎是不存在的,但作为近似,可以认为某些在进一步变形中,弹性极限 σ_e 基本保持不变的高塑性金属为不产生加工硬化现象的金属。

若以 R 表示凸峰的半径, E_1 和 E_2 分别为凸峰和平面材料的杨氏模量, 当用负荷 P 将表面压紧时, 它们将首先按赫兹 (Hertz) 理论进行弹性变形, 接触区呈圆形, 半径 a_c 为:

$$a_c = 1.1 \left[\frac{PR}{2} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \right]^{1/3} \quad (1-3)$$

由式1-3可知, 接触面积 A (πa_c^2) 与 $P^{2/3}$ 成正比, 接触面上的平均单位压力 $\bar{p}$ ($P/\pi a_c^2$) 与 $P^{1/3}$ 成正比。在弹性变形范围内, A 与 $\bar{p}$ 随 P 变化的关系如图1-2所示。在这种情况下, 在接触区内所发生的变形是可逆的。

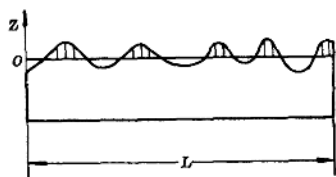


图 1-1 表面形貌特性示意图

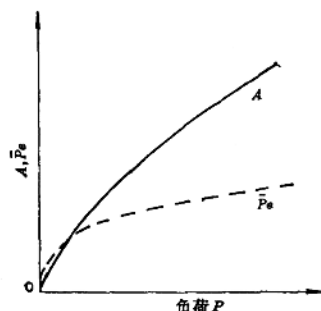


图 1-2 弹性变形时 A 、 $\bar{p}$ 与 P 的关系

当加大载荷时, 接触面上的平均单位压力 $\bar{p}$ 将随之增大, 一直到在软金属材料的某一临界点上其弹性极限 σ_e 刚被超过时为止。用赫兹公式分析可以证明, 临界点 Z 位于接触圆圆心以下约 $0.5a_c$ 的地方。在这种情况下, 虽然临界点 Z 周围的金属产生了不可逆的塑性变形, 但此范围以外的金属尚未达到塑性状态, 因此变形基本上仍是弹性的, 负荷去除后残余变形非常小。此时, $\bar{p}_e$ 为:

$$\bar{p}_e = 1.1 \sigma_e \quad (1-4)$$

若再继续增大负荷, 在 Z 点周围的塑性区将迅速扩大, 并使塑性区周围的全部材料进入塑性状态。为了加以区别, 这种状态下的平均单位 (屈服) 压力以 $\bar{p}$ 表示, 且近似为:

$$\bar{p} \approx 3 \sigma_e \quad (1-5)$$

在进入上述最后一种状态之后, 如再继续增大负荷, 尽管变形面积有所增加, 但仍服从式1-5的关系, 这已为很多试验所证实。这种现象说明, 把一个硬钢球压入高度加工的金属表面时, 平均单位 (屈服) 压力几乎与压痕的大小无关。而且, 对 $\bar{p} = 60 \sim 1900 \text{ MPa}$ 范围内的材料而言, $\bar{p}$ 与 σ_e 之比为某一常数。由于 σ_e 和 $\bar{p}$ 都是常数, 进而可以说明, 发生塑性变形的面积 A_s 与负荷 P 成正比, 与平均单位 (屈服) 压力 $\bar{p}$ 成反比, 即:

$$A_s = P / \bar{p} \quad (1-6)$$

材料在什么条件下才能开始发生塑性变形, 是人们关心的一个重要问题。

假定开始发生塑性变形时服从式1-4的关系, 接触圆的半径按式1-3计算, 若开始发生塑性变形的临界负荷为 P_L , 则有如下关系:

$$P_L = 1.1^2 \pi \left[\frac{P_L R}{2} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \right]^{2/3} \bar{p}_e$$

整理后得:

$$P_L = 13.1 \bar{p}_e^3 R^2 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)^2 \quad (1-7)$$

若假定硬球状凸峰的杨氏模量 E_1 为 2×10^5 MPa, 则各种金属开始发生塑性变形时的临界负荷 P_L 如表1-1所示。由表1-1可知, 使金属表面开始产生塑性变形的负荷是非常小的。也就是说, 当金属表面相互接触时, 即使是相当小的负荷, 就很容易引起凸峰及其周围材料发生塑性变形。

表 1-1 各种金属表面开始发生塑性变形的临界负荷

材 料	σ_e MPa	$\bar{p}_e$ MPa	E_2 MPa	$\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)^2$	P_L, N		
					$R = 10^{-3} \text{mm}$	$R = 10^{-1} \text{mm}$	$R = 10 \text{mm}$
纯 铝	20.6	22.6	0.16×10^5	45.5×10^{-10}	7×10^{-10}	7×10^{-6}	7×10^{-3}
商品铜	196.2	215.8	1.2×10^5	1.78×10^{-10}	2.5×10^{-8}	2.5×10^{-4}	2.5
软 钢	637.3	701.5	2×10^5	1×10^{-10}	4.7×10^{-7}	0.47×10^{-3}	47
合金钢	1962.0	2158.2	2×10^5	1×10^{-10}	1.4×10^{-5}	0.14	1400

接着, 要引入有关接触面积的几个重要概念, 并相应给出它们的比较严格的定义。首先是名义接触面积, 或叫做表观接触面积, 以 A_0 表示, 即两个宏观界面的边界所定的接触面积。其次是真实接触面积, 或叫做实际接触面积, 以 A_c 表示, 即两物体的界面直接传递界面力的各局部面积之和。最后是接触率, 以 R_c 表示, 即实际接触面积与表观接触面积之比。

通过上述讨论可知, 两个相互接触的金属是支撑在其表面上凸凹不平处的最高顶尖之上, 实际接触面积很小, 一般只有表观接触面积的 (0.001~0.1)%。而且, 实际接触面积与表观接触面积无关, 只与承受的负荷有关。当两个物体接触时, 在很小的负荷作用下, 其表面的微细凸峰就会发生塑性变形, 直到实际接触面积扩大到足以支撑负荷时为止, 从而使实际接触面积增大。以后将会知道, 在这些紧密接触点上形成了熔焊的金属结点, 这些结点在摩擦与磨损产生的机理上将起主要作用。

2. 接触物理学和接触化学

在金属接触过程中, 界面分子间的作用力对摩擦的各种问题也有重要影响。因为这类分子力可以形成界面约束, 并产生粘结点, 从而对摩擦过程产生影响。

金属相互接触时, 界面之间的吸引力包括短程力和长程力, 并分别产生化学吸附和物理吸附, 也称作化学约束和瓦尔斯约束。

化学约束依赖于金属的共价键及离子键约束。当两个表面的距离在 1nm (10^{-9}m) 以下时, 各种形式的短程力就会起作用。纯净表面之间的粘着, 就是短程力作用的结果。

瓦尔斯约束依赖于相互作用物体的原子结构, 是由两个物体表面的分子和原子内电荷分布的波动引起的。因为, 电荷分布的波动会诱导出偶极。任何类型的分子及原子之间, 都存在长程力。两个物体相互接触时, 只要靠近到几个纳米 (nm), 就会产生这种吸引

力。

实验和生产业已证明, 由于界面间吸引力的作用, 当两个表面相互接近到原子作用力半径以内时, 就会形成金属键, 使界面消失, 结合的牢固程度同金属内部一样。而且, 当理想的光滑、纯质和相互平行的两个表面接近时, 不需要消耗能量, 就能够自行产生足以形成连接的金属键, 牢牢地结合起来。这种现象, 叫做冷熔焊。

可想而知, 当两个纯净的金属粗糙表面相互接触时, 在支撑的凸峰顶尖上很容易形成冷熔焊, 形成粘结点。在施加负荷的情况下, 表面的微细凸峰很容易发生弹性和塑性变形, 从而使粘结点的个数和紧密接触的面积增加。

显然, 接触物理学和接触化学在摩擦与磨损产生的机理上将起同样重要的作用。

第二节 金属摩擦时的表面温度

“摩擦生热”早为人们所共知。当两个相互接触的金属发生相对运动时, 表面的温升不仅影响表面的力学性能而对接触性能产生影响, 而且还对摩擦学的其它方面产生重要影响。

一、滑动表面的温升模型

如图1-3所示, 一半径为 R 的圆柱体端面以速度 v 在另一表面上滑动, 施加的负荷为 P 。

假定动摩擦系数为 μ , 而且所有的摩擦功率都转变成热, 则单位时间内转变的热量 Q 为:

$$Q = \mu P v / J \quad (1-8)$$

式中 J ——为热功当量。

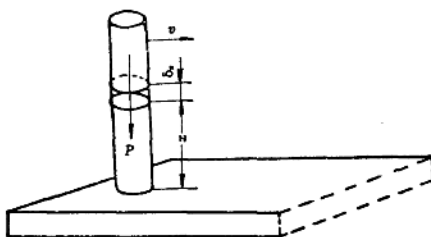


图 1-3 圆柱体在平面上的滑动模型

假定整个摩擦界面的温度均匀一致, 沿圆柱体长度方向上温度梯度恒定, 导热系数 β_t 与温度无关, 则由通过离表面 x 处的任一段圆柱体因热传导所得到的热量为:

$$\beta_t \pi R^2 \times \frac{d^2 T}{dx^2} \delta x$$

由于辐射的热损失为:

$$2\alpha_t \pi R (T - T_0) \delta x$$

式中 α_t ——为冷却(换热)系数;

T ——为辐射表面温度;

T_0 ——为环境温度。

在稳定状态下, 以上二式必相等, 即:

$$\beta_t \pi R^2 \times \frac{d^2 T}{dx^2} \delta x = 2\alpha_t \pi R (T - T_0) \delta x$$

所以

$$T - T_0 = A e^{-\sqrt{(2\alpha_t/\beta_t R)}x} \quad (1-9)$$

式中 A ——为未定的常数。

摩擦热必然要散发到上、下两个物体上，到目前为止，还很难确定其间的分配关系。为此，假定有 α 部分的热量流入上面的圆柱体。这部分热量必然要辐射掉，如圆柱体很长，以致它的上端仍然为室温，则可得下式：

$$\alpha Q = 2\pi R \alpha_t \int_0^\infty (T - T_0) dx \quad (1-10)$$

合并式1-9和式1-10，得：

$$T - T_0 = \frac{\alpha Q}{\pi R} \times \frac{1}{\sqrt{2\alpha_t \beta_t R}} e^{-\sqrt{(2\alpha_t/\beta_t R)}x} \quad (1-11)$$

因此，摩擦界面上 ($x=0$) 的温升可写成：

$$T - T_0 = \frac{\alpha \mu P v}{J \pi R e} \sqrt{\frac{1}{2\alpha_t \beta_t R}} \quad (1-12)$$

若一直径为1mm的康铜圆柱体在软钢表面上以2m/s的速度滑动，施加的负荷为0.981N，假定 μ 和 α 分别为0.3和0.5，代入式1-12进行计算，得康铜表面的温升为200℃左右。

应当指出，上述公式的假设条件与实际状况有很大差别，它只能作为近似计算公式。尽管如此，由计算结果仍可看出，摩擦界面的温升是非常显著的，界面层可以达到很高的温度。可想而知，在很小的实际摩擦界面上，其温度要高得多。

二、典型的试验结果

用镓 (熔点32℃)、伍德合金 (熔点72℃)、铅 (熔点327℃) 和康铜 (熔点1290℃) 制作的圆柱体在钢表面上滑动，所施加的负荷为0.981N，测得的摩擦界面温升如图1-4所示。由图1-4可以看出，对每一种金属来说，其结果都是相似的，温度随着速度的增大而升高，并达到一个不可逾越的最大值。此最大值在数值上相当于该金属的熔点。康铜的曲线没有变平，是因为在所用的负荷和速度条件下，还没有达到其熔点温度。

图1-5为抛光的康铜圆柱体端面在施加润滑剂的条件下，在钢盘上滑动时表面温升的

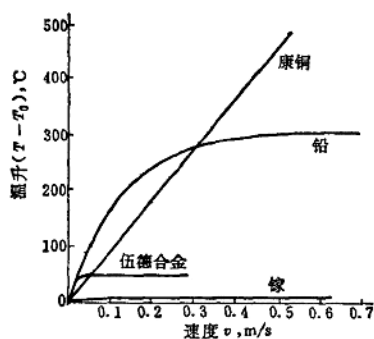


图 1-4 各种金属在钢表面上滑动所达到的最高温度

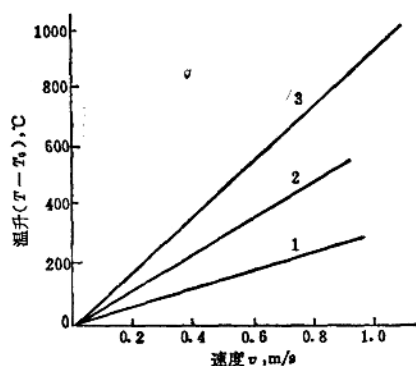


图 1-5 康铜针在钢盘上滑动时的温升
1—油酸润滑，2—商品润滑剂润滑，3—无润滑剂润滑

实验结果。润滑条件属边界润滑状态，即摩擦界面被一层分子大小的润滑剂薄膜分开。由图1-5可以看出，即使在润滑的条件下，表面温度也可以达到很高的数值。而且，在较低或中等的负荷和速度条件下，表面温度也可以达到几百度。

特别应当指出的是，上述试验有一个共同的现象，即金属主体是相当冷的，基本上仍保持为室温。可见，剧烈的温升只是发生在摩擦区域中的薄层内。再者，测得的温度是表面的平均温度。可想而知，实际接触面积上的温度要高得多。

上述现象，尤其是在良好润滑条件下，摩擦界面也能达到相当高的温度这一事实，对以后将要讨论的边界润滑和液体润滑的理论和实践都有重要意义。

第三节 滑动表面的金属转移和磨损

本节讨论运动金属表面间的类型及它们在滑动过程中所发生的物理变化，这些在摩擦学的研究和发展过程中具有很重要的意义。

一、滑动表面的金属转移

1. 摩擦热在金属表面流动上的效应

关于这个问题的一个典型例证，就是对于金属抛光机理的认识发展过程。

开始，N.赫谢尔（Herschel）等人认为，抛光纯粹是机械打磨过程。之后，G.贝比（Beilby）通过试验认为，抛光是一种表面张力效应，即抛光剂撕去表面层原子，下面一层由于摩擦热而处于软化和熔融状态，在瞬时内保持着流动性，并在凝固前由于表面张力作用而变平。并通过电子衍射发现，抛光后的金属表面层的结构与底材的结构不同，已失去明显的晶性，而且表面上明显地发生了金属转移现象，凹穴好象架了桥一样而被填平，这样的表面层，不是由极微小的结晶所组成，就是由无定形层所组成。对大多数金属来说，不论其抛光层的结构如何，都是一堆氧化物和金属的混杂物。为了加以区别，将抛光层称做贝比层，这一现象，足以说明摩擦热在抛光过程中起着相当重要的作用。因此，近代的抛光机理认为：在抛光介质与试件之间的接触点上出现热点，引起表面层的局部软化或熔融，这种熔融物在抛光本身的作用下，通过金属转移散布在表面上，并凝固或结晶，从而形成抛光层。显然，摩擦产生高温所导致的表面局部软化或熔融以及发生表面的金属转移对抛光过程起着支配作用。

2. 滑动表面的金属转移

通过对摩擦的大量研究和仔细观察证明，在摩擦过程中，一般情况下几乎同时发生摩擦表面损坏和金属转移现象，它们之间有不可分割的联系。

为方便起见，下面分三种类型或情况进行讨论，即：硬金属在软金属上的滑动；软金属在硬金属上的滑动；同类金属之间的滑动。

首先讨论表面未经润滑的试验结果。当较硬的软钢（维氏硬度为120）曲面滑块在较软的铜（维氏硬度为60）平面上滑过时，发现在铜表面上刨出一条浅沟，测得的摩擦系数为0.9。当较软的铜曲面滑块在较硬的钢平面上滑过时，发现铜表面损坏较轻，有铜熔焊在它上面，且还粘附着铜的碎块。大量试验结果表明，不同类金属的摩擦系数为0.7的数量级。当同类金属相互滑过时，如镍在镍上滑过时，摩擦系数高达1.2~1.5，表面损坏更为严重。

通过对上述三种情况的摩擦轨道截面进行观察，结果表明，在第一种情况下，铜的表

面被刨出一条深约 $1\sim 2\mu\text{m}$ 的沟槽,被刨出的铜堆在沟槽边沿,其堆积高度与沟深差不多,在轨道表皮下铜的变形十分严重,变形和加工硬化可扩展到表面深处约 $15\mu\text{m}$ 以下。对于第二种情况,则看不到这种刨削的痕迹,而是发现有铜的碎片熔焊在钢表面上。显然,对这些金属结点来说,剪切发生在铜本身。同时还可看出,剪切铜的力也会引起钢底材的一些变形,并把一部分钢扯到其表面上来。然而,在表面上的大部分地方,断裂发生在铜与钢之间,故表面无明显变化。对第三种情况,例如铜在铜上滑过所形成的摩擦轨道截面表明,在它的很大一块面积上,刨削和撕伤非常明显,表面下深达 $20\mu\text{m}$ 处的金属也被扯出,变形和加工硬化可深达 $50\mu\text{m}$ 以上。这是因为当同类金属相互接触时,局部高压引起两表面有同样的行为,它们对形成熔焊结点起同等作用。再者,表面金属产生加工硬化,结点的强度比底材金属的强度大,破裂将在金属主体中发生。因此,其表面损坏的程度要比前两种情况严重得多。

其次,来讨论表面经润滑的试验结果。例如当铜滑块在抛光过的钢表面上滑过一次时,对比洁净表面和用含月桂酸1%的石蜡润滑时的情况,结果表明,尽管后一种情况的摩擦系数大大减小,表面损坏和金属转移显著减轻,然而在润滑的钢表面上,铜粘着现象仍相当严重,滑块的摩擦轨道宽约 1mm 。这种情况表明,即使在最佳的边界润滑条件下,仍然会发生润滑剂膜的局部破裂和金属的粘着。

由上述讨论可知,在相对滑动过程中,摩擦力的大小与同时产生的表面损坏程度和类型有密切联系。而且,它们主要取决于两滑动表面的相对物理性质和两表面的相对硬度。当滑动速度相当高时,两滑动表面的相对软化点和熔点将是主要的影响因素。

二、金属的磨损

1. 磨损的定义和机理

任一工作表面的物质,由于相对运动而不断损失的现象叫做磨损。

由磨损的定义可知,它是和摩擦同时发生的。在某些情况下,它是有益的,例如机器在跑合阶段的磨损和利用磨损原理来进行加工(如研磨、抛光和磨削等)都是为生产服务的。然而,在其它大多数情况下,磨损却是非常有害的,必须千方百计地减小它所造成的危害和损失。

磨损可按不同的方式进行分类。按其产生的机理可分为四种类型:粘着磨损、磨料磨损、疲劳磨损和腐蚀磨损,简述如下。

当摩擦表面作相对运动时,由于表面金属的焊合使其从一个表面转移到另一表面的现象叫做粘着磨损。在相对运动过程中,硬的颗粒或硬的凸起物所引起界面材料脱落的现象,叫做磨料磨损。在相对运动过程中,由于交变应力的作用,使表面疲劳而产生的物质转移现象,叫做疲劳磨损。在相对运动过程中,表面与周围介质的化学或电化学反应而引起的磨损,叫做腐蚀磨损。

2. 磨损计算

磨损率是计算磨损量的一个重要参数和依据,它可按下面任一种方式来定义:单位滑动长度上材料的磨损量;单位时间内材料的磨损量,旋转一周或摆动一次时材料的磨损量等。

材料的磨损量可用质量、体积或厚度等表示。

如果以厚度表示磨损量,采用磨损率的第一种定义方式,假设总的磨损厚度为 h_t ,滑