

高等学校试用教材

# 电接触理论及应用

华中工学院 程礼椿 编

GAODENG XUE  
XIAOXUE JIAO CHU

机械工业出版社

## IV

$\kappa_f$ ——膜电导率

$l$ ——分子平均自由行程

$\lambda$ ——热导率

$\lambda_f$ ——膜热导率

$\mu$ ——半椭圆等位面参数

$\nu$ ——泊松比

$\xi$ ——接触硬度因数

$\Pi$ ——帕尔帖效应系数

$\rho$ ——电阻率；密度

$\rho_f$ ——膜电阻率

$\sigma$ ——膜的隧道电阻率

$\sigma_t$ ——汤姆逊效应系数

$\tau$ ——阴极坑口形成时间

$\Phi$ ——电子发射功函数；热流

$\varphi$ ——电位

$\psi$ ——比摩擦力

$\omega$ ——气化率；交流电流角频率

## 前 言

本书是根据 1983 年 5 月高等工业学校电器编审小组制订的教学计划和教学大纲以及审定的〈电接触理论与应用〉编写大纲编写的。

本书系统地介绍电接触现象和理论。从电接触的基本概念开始，详细叙述电接触的几个主要问题，如接触电阻、热效应（包括稳态和暂态）、机械效应、电弧现象、触头磨损等。最后一章，专门述及应用中的问题。书中除了着重阐明电接触现象和过程外，还进行了必要的数学分析，特别是把近年发展起来的热过程数学模型专列一章进行介绍。附录中还介绍了与电接触有关的热接触和光接触。

由于电接触的应用领域非常广泛，本书除可作为高等工业学校电器专业教材外，还可供其他电类专业如通讯、无线电、计算机、仪器仪表等专业的师生和工程技术人员参考。

本书由华中工学院程礼椿教授编，西安交通大学王其平教授主审。王其平教授在百忙中详细审阅了本书原稿，并提出了许多宝贵的意见，编者在此深表谢意。

由于编者水平有限，书中错误和不当之处在所难免，希广大读者批评指正。

1985年10月

# 符 号 说 明

$A$ ——截面积	$R$ ——电阻
$A_s$ ——表面积	$R_c$ ——接触电阻
$A_{s0}$ ——视在接触面积	$R_{c0}$ ——一个接触元件的收缩电阻
$A_{s1}$ ——实际接触面积	$R_{c\sigma}$ ——总收缩电阻
$A_e$ ——导电面积	$R_f$ ——膜电阻
$a$ ——圆形导电斑点半径; 温度传导系数	$R_{\theta}$ ——热阻
$B$ ——触头截面半径	$r$ ——半径; 曲率半径; 单位体积熔化和汽化潜热
$b$ ——超导小球(导电斑点)半径	$r_{\theta}$ ——比热阻
$C$ ——电容; 热容	$s$ ——分开距离
$c$ ——比热容	$T$ ——热力学温度 $K$
$D$ ——压痕比深度; 电子透射系数; 重新沉积到自身触头的材料(体积或重量)	$t$ ——时间
$d$ ——圆形导电斑点直径; 距离	$U$ ——电压; 一个接触元件的电压降
$E$ ——电势; 电场; 能量; 材料的弹性模量	$U_{\Sigma}$ ——总接触压降
$\epsilon$ ——电子电量; 材料的弹性恢复系数	$U_f$ ——膜的熔解电压
$F$ ——力; 接触力	$V$ ——体积
$F_s$ ——冷焊剪切力	$v$ ——速度
$F_c$ ——咬合剪切力	$W$ ——触头气化的材料(体积或重量)
$F_p$ ——塑性变形力	$w$ ——柔量(接触面受压相互趋近的距离)
$F_e$ ——弹性变形力	$Y$ ——材料的屈服点; 热流流过接触面的等效电压
$F_r$ ——触头电动斥力	$Z$ ——温度增量
$f$ ——摩擦系数; 函数	$z$ ——凸丘的高; 滑动磨损的特征数; 时间 $t$ 的无因次量
$G$ ——触头转移的材料(体积或重量); 电导	$\alpha$ ——系数; 电阻率的温度系数; 夹角; 椭圆长半轴; 常数
$H$ ——材料的硬度	$\beta$ ——椭圆短半轴; 热导率的温度系数; 常数
$h$ ——深度; 高度	$\gamma$ ——材料转移系数; 导电斑点形状因数(椭圆度)
$I$ ——电流	$\delta$ ——膜厚
$J$ ——电流密度	$\epsilon$ ——介电常数; $\rho\lambda$ 的温度系数
$K$ ——弹簧刚度; 常数	$\epsilon_r$ ——相对介电常数
$L$ ——电感	$e$ ——物相分界面的位移
$l$ ——长度	$\zeta$ ——表面粗糙度系数
$m$ ——质量	$\eta$ ——视在接触面上微观凸丘的密度
$N$ ——导电粒子密度	$\theta$ ——导电斑点超温 $K$
$n$ ——个数; 折射率	$\theta'$ ——收缩区内任一等温面上的超温 $K$
$P$ ——功率	$\theta$ ——温度 $^{\circ}C$
$p$ ——压力; 几率; 比功率	
$Q$ ——热量	
$q$ ——电荷(电量); 热流密度	

# 目 录

<p><b>第一章 绪论</b> ..... 1</p> <p>§ 1-1 电接触的定义、现象和问题 ..... 1</p> <p>§ 1-2 电接触的几个基本概念 ..... 1</p> <p>§ 1-3 电接触学科的形成与发展 ..... 3</p> <p>§ 1-4 电接触在现代化建设中的地位和作用 ..... 4</p> <p><b>第二章 电接触内表面</b> ..... 5</p> <p>§ 2-1 概述 ..... 5</p> <p>§ 2-2 金属表面的微观形态 ..... 5</p> <p>§ 2-3 两清洁金属表面的接触 ..... 7</p> <p>§ 2-4 金属表面上膜的机械破坏 ..... 12</p> <p>§ 2-5 接触斑点和导电斑点的显示和实验研究方法 ..... 15</p> <p><b>第三章 接触电阻理论</b> ..... 18</p> <p>§ 3-1 概述 ..... 18</p> <p>§ 3-2 收缩电阻的物理模型和计算 ..... 18</p> <p>§ 3-3 导电斑点尺寸、形状和表面膜对收缩电阻的影响 ..... 22</p> <p>§ 3-4 多斑点收缩电阻问题 ..... 25</p> <p>§ 3-5 触头上的表面膜 ..... 28</p> <p>§ 3-6 薄膜导电——隧道效应 ..... 31</p> <p>§ 3-7 暗膜击穿——熔解现象 ..... 35</p> <p>§ 3-8 接触电阻公式和实验特性 ..... 40</p> <p><b>第四章 电接触稳态热效应</b> ..... 45</p> <p>§ 4-1 概述 ..... 45</p> <p>§ 4-2 对称收缩区中 <math>\varphi-\theta</math> 关系的证明 ..... 46</p> <p>§ 4-3 <math>\varphi-\theta</math> 关系的应用 ..... 47</p> <p>§ 4-4 非对称接触 <math>\varphi-\theta</math> 关系问题 ..... 49</p> <p>§ 4-5 薄膜对 <math>\varphi-\theta</math> 关系的影响——苛勒 (Kohler) 效应 ..... 51</p> <p>§ 4-6 焦尔热对收缩电阻的影响 ..... 53</p> <p>§ 4-7 考虑温度影响时收缩电阻的精确计算 ..... 54</p> <p>§ 4-8 对称收缩区中的温度分布 ..... 58</p> <p>§ 4-9 非对称接触材料收缩区中的温度分布 ..... 59</p>	<p>§ 4-10 清洁对称接触的 <math>R-U</math> 特性——软化与熔化电压 ..... 60</p> <p><b>第五章 电接触暂态热效应</b> ..... 63</p> <p>§ 5-1 概述 ..... 63</p> <p>§ 5-2 不同情况下收缩区内的暂态超温 ..... 65</p> <p>§ 5-3 实例 ..... 67</p> <p>§ 5-4 收缩区的热时间常数 ..... 68</p> <p><b>第六章 电接触的机械效应</b> ..... 71</p> <p>§ 6-1 概述 ..... 71</p> <p>§ 6-2 干触头的冷焊 ..... 71</p> <p>§ 6-3 滑动接触的摩擦和磨损 ..... 73</p> <p>§ 6-4 触头闭合时的撞击产生的机械磨损 ..... 80</p> <p>§ 6-5 触头闭合过程中的机械跳动 ..... 80</p> <p>§ 6-6 触头间的电动斥力和静电吸力 ..... 83</p> <p><b>第七章 触头间的电弧现象</b> ..... 85</p> <p>§ 7-1 概述 ..... 85</p> <p>§ 7-2 触头间电弧的引燃 ..... 85</p> <p>§ 7-3 触头间辉光放电和弧光放电的基本现象和机理 ..... 91</p> <p>§ 7-4 冷发射阴极现象的观察 ..... 92</p> <p>§ 7-5 阴极和阳极的能量平衡 ..... 95</p> <p>§ 7-6 磁驱动电弧的运动 ..... 97</p> <p>§ 7-7 磁驱动电弧运动机理 ..... 103</p> <p><b>第八章 触头电磨损</b> ..... 106</p> <p>§ 8-1 概述 ..... 106</p> <p>§ 8-2 桥转移现象和理论 ..... 107</p> <p>§ 8-3 电弧引起的转移现象和机理 ..... 114</p> <p>§ 8-4 阴极磨损的基础过程——阴极灼坑的研究 ..... 119</p> <p><b>第九章 电接触热过程数学模型</b> ..... 129</p> <p>§ 9-1 概述 ..... 129</p> <p>§ 9-2 简化条件下电接触热过程的分析解 ..... 130</p> <p>§ 9-3 固定接触连接或触头处于闭合状态下热过程的分析 ..... 133</p>
--	---

§ 9-4	电弧作用下触头热过程的分析	140	§ 10-7	电接触微振氧化效应	169
§ 9-5	电接触热过程有限元法分析	144	附录 I	由拉氏方程推导收缩电阻式 (3-15)	170
第十章	电接触应用中的问题	154	附录 II	用矢量分析推导 $\varphi-\theta$ 关系式 (4-8)	171
§ 10-1	概述	154	附录 III	触头材料性能参数	172
§ 10-2	触头材料和结构	154	附录 IV	热接触	175
§ 10-3	触头接触力和尺寸的估算	158	附录 V	光接触	177
§ 10-4	触头工艺和试验	161			
§ 10-5	电接触的可靠性问题	164			
§ 10-6	环境效应	165			

# 第一章 绪 论

## § 1-1 电接触的定义、现象和问题

“电接触”是研究固态导体与固态导体、固态导体与液态导体、固态或液态导体与等离子体接触过渡区中的机械现象、电现象、热现象、化学现象的一个专门学科。因此，“电接触”术语的含义是指导体接触过渡区产生的各种物理、化学现象而言。至于接触导体本身，称之为“接触元件”。根据电流流过接触元件的方向规定电流流入的一个接触元件为“阴极”，电流流出的另一个接触元件为“阳极”。即电子流出的元件为阴极，流入的元件为阳极。但是，在工程实际应用中，“电接触”常指的是接触导体的具体结构或接触导体本身，称为“电触头”，简称触头或触点。

工程应用中的电接触，其具体结构型式是各式各样的，但从接触工作的原理上讲只有三类，即：固定接触，滑动接触和可分合的接触。固定接触在强电中有母线的连接或铆接、输电线连接器、电缆头等，在弱电中有电子设备和仪器中的插接件、连接器、塞子和插头等。滑动接触有开关中的滑动触头、变阻器的滑动头、电机的电刷与滑环、电车的馈电弓与馈电线等。可分合接触有各种开关电器和继电器的触头。

固定接触在工作中出现的主要现象和问题是：接触电阻、接触温升和接触熔焊。滑动接触除上述问题外，还有接触元件之间的摩擦、润滑和磨损。可分合接触在工作期间常出现电弧，电弧的热等离子体与接触元件相互作用，会带来比固定接触和滑动接触严重得多的问题。因此，在三类型式的电接触中，接触电阻、温升和熔焊是电接触普遍存在的共同问题，摩擦、润滑与磨损是滑动接触的特殊问题，电弧放电引起的温升、熔焊和磨损在可分合接触工作中负担最重，因而也是最困难的问题。

## § 1-2 电接触的几个基本概念

电接触的基本任务是传导电流。因此，对它的基本要求应该是：接触元件接触时为良好的导体，接触元件分离后为良好的绝缘体。

但是，我们知道，任何经过精细加工的名义平面，实际上都是粗糙不平的表面。当这种名义平面相互接触时，即使外加很大的接触力（如弹簧力、螺栓力）使两接触面相互压紧，但在接触内表中也只有少数的点（小面）实际发生了真正的接触，这些实际接触的小面承受着全部的外加接触力。由于金属表面一般都覆盖着不导电的氧化膜或其它种类的膜，因而在实际接触小面内，只有少部分膜被压破的地方才能形成金属与金属的直接接触，电流实际上只能从这些更小的金属接触点中通过。为了区别在实际接触的小面中有导电的和导电的部分，因此把那些实际发生机械接触的小面称为“机械接触斑点”，简称“接触斑点”，其中那些形成金属接触或准金属接触的更小面（实际传导电流的面）称为“导电斑点”，国际上通

用的术语称为“ $\alpha$ 斑点” $\ominus$ 。

因此，两个覆盖表面膜的接触元件相互接触时，其接触内表面的详细结构是：在视在接触面  $A_s$ （它等于两接触元件宏观重叠接触的面积）中，只有很少部分的实际接触面  $A_c$ （它等于机械接触斑点面积之和），而在实际接触面中又只有少部分导电面  $A_e$ （它等于导电斑点面积之和）。图 1-1 为接触内表面的结构示意图。

由此可知，当电流通过两接触元件的接触内表面时，电流将集中流过那些极小的导电斑点，因而在导电斑点附近，电流线必然发生收缩，如图 1-2 所示。由于电流线在导电斑点附近发生收缩，使电流流过的路径增长，有效导电面积减小，因而出现局部的附加电阻，称为“收缩电阻”。如果电流通过的导电斑点不是纯金属接触，而是准金属接触 $\ominus$ ，则电子因通过极薄的膜时还会遇到另一附加电阻，称为“膜电阻”。这两部分附加电阻在电路上是串联相加的，这个附加的总电阻称为接触电阻。

根据电流收缩区电位为椭球场的假定，可以证明收缩电阻与导电斑点尺寸之间有下列的简单关系（证明见 § 3-2）

$$R_c = \frac{\rho}{2a} = \frac{\rho}{d} \quad (1-1)$$

式中  $R_c$ ——收缩电阻；

$a$ 、 $d$ ——导电斑点的半径和直径；

$\rho$ ——接触元件材料的电阻率。

当电流通过导体与导体的接触处时，由于接触电阻的存在，在电流收缩区两端必然会出现一定的电压降，这个电压降称之为“接触压降”。同时，由于接触电阻产生焦耳热，使收缩区的温度升高，常超过收缩区外导体的温度。导电斑点上的温度超过收缩区外导体的温度的数值称之为斑点的“超温”。根据电位—温度理论（称  $\varphi-\theta$  理论），斑点的“超温”与“接触压降”成简单的函数关系（证明见 § 4-2）。

$$\theta = \frac{U^2}{8\lambda\rho} \quad (1-2)$$

式中  $\theta$ ——导电斑点的超温；

$U$ ——接触压降；

$\lambda\rho$ ——接触导体材料的热导率与电阻率乘积的平均值。

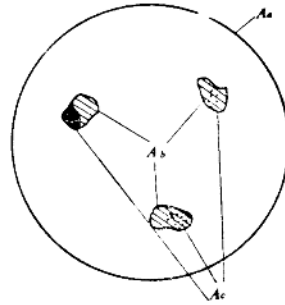


图1-1 两个具有表面膜的接触元件相互接触时其接触内表面的结构示意图（在实际接触面  $A_s$  中阴影线部分代表氧化膜覆盖的面，黑色点和面代表导电斑点和导电面）

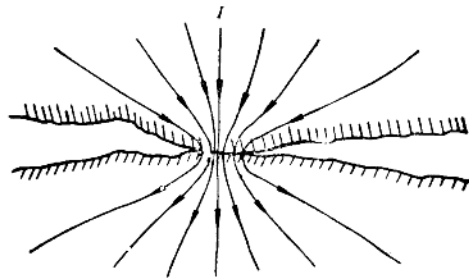


图1-2 导电斑点附近电流线发生收缩效应

$\ominus$  电接触学科奠基人霍尔姆 (R. Holm) 假定导电斑点的形状为圆，半径为  $a$ ，称为  $\alpha$  斑点。此名称国际上一直沿用到现在。

$\ominus$  导电斑点间含有极薄的膜称为准金属接触，电子能借“隧道效应”导电。



如果通过导体接触处的电流增大,或者接触电阻增高,则接触压降必然相应增大,按式(1-2)所示的关系,导电斑点和收缩区内的温度亦会相应增高,当温度达到接触导体材料的软化点和熔化点时,导电斑点及其附近的金属就会发生软化和熔化。一定的导体材料,有一定的软化和熔化温度,其对应的接触压降称为材料的“软化电压”和“熔化电压”。

### § 1-3 电接触学科的形成与发展

电接触现象虽然已有一百多年的研究历史,但形成一门独立的学科还是本世纪50年代以后的事。

在此以前,只是少数人在研究电现象和电能利用的同时遇到一些电接触问题,并作过一些粗浅的研究。由于当时研究它的技术手段简陋,研究的规模又小,在理论上很不成熟。可以说,这时电接触作为一门学科还是处在萌芽和孕育的时期。随着电的应用规模的发展,各种电机、电器、电工、电子、通讯设备大量涌现,这时电接触的问题便开始突出起来。德国最早重视电接触的研究,举世闻名的学者霍尔姆(R. Holm)在西门子公司研究电接触现象几十年,取得了卓越的成就,他系统地总结了自己及前人的研究成果,于1941年写成了电接触现象的第一部著作——电接触技术物理<sup>[1]</sup>,标志着电接触学科已经有了一个雏形。

50年代以后,原子能、电子技术、空间技术得到了迅速的发展。在新的条件下,出现了许多新的电接触现象。在现代的电系统中,由于系统的规模和复杂程度愈来愈高,电接触与系统可靠性之间的矛盾也就尖锐地暴露出来。因此,世界各发达国家开始重视电接触现象的研究。例如美国在50年代初就成立了电接触现象研究会,并以电接触学科奠基人霍尔姆的名字来命名。霍尔姆会议每年召开一次国际性的学术讨论会,出版文集,并举办讲座。1958年,霍尔姆的第三部著作——电接触手册<sup>[2]</sup>——问世,标志着电接触作为一门独立的学科已初步形成。

由于世界各发达国家相继重视电接触现象的研究,纷纷成立学术机构,开展学术活动,到60年代初,便正式组织国际电接触现象会议,首届会议于1961年在美国的缅因州召开。从1964年起,每两年召开一次国际会议,出版文集。1967年,霍尔姆的第四部著作也是他最后的一部著作——电接触理论与应用<sup>[3]</sup>——出版,标志着电接触作为一门独立学科已经形成。

1970年,霍尔姆逝世。在他逝世后的十多年里,不仅发达国家电接触理论和应用蓬勃发展,而且一些发展中国家也相继重视电接触的研究。现在,除霍尔姆会议和国际会议在世界范围内集中进行学术交流外,许多国家在国内成立国家一级的学术机构,进行各种形式的活动。据估计,目前全世界每年出版的有关电接触的文献在1000篇以上。在最近的10年里,电接触在基础理论和应用的研究上又有了很大的发展。例如:接触电阻物理模型,提出了大收缩中的微收缩;表面膜已发展到电接触污染问题的综合研究;热计算提出了包括失重、日照条件下的计算公式;熔焊方面研究了多自由度的触头熔焊问题;电弧和磨损方面对弧根的运动、斑点、喷流和坑口等基本过程的研究更加深入;电子计算机的普遍应用推动了电接触热过程数学模型的研究;电接触新的诊断技术、新型触头材料不断涌现;热接触、光接触现象有使电接触领域扩大的趋势。

我国从50年代起,已开始进行电接触方面的研究工作,对触头间的电弧现象、热现象

和触头材料研制等方面都取得了一定的成果。1966~1975这十年间研究工作被迫停止。1976年以后,一些单位的研究工作开始恢复。1979年5月我国正式成立了中国电接触及电弧研究会。1981年,我国电接触方面的论文首次在霍尔姆会议上作报告〔4〕。1982年,我国学者首次参加了国际电接触现象会议,并宣读论文〔5〕。

## § 1-4 电接触在现代化建设中的地位和作用

任何电系统都必须将电的信号或能量从一个导体传向另一个导体,而导体与导体的连接处——电接触——常常是造成电信号或能量传递的主要障碍。

电路中,导体与导体的连接处在外形上不像一个看得见的电阻元件、电容元件或电感元件,因此往往容易被人们忽略。其实,导体与导体之间的电接触就是藏在导体连接处内部的一个看不见的“元件”。这个“元件”性能的变化将直接影响所在电路的工作。

再如高、低压开关电器,触头和灭弧系统是它的核心,开关性能的好坏决定于触头和灭弧的性能。其它含有电接触的电机、电工、设备、仪表、电子产品,其性能的好坏在很大程度上决定于电接触的性能。

现代化的大型复杂电气系统,例如大型电力系统,自动控制系统,通讯系统等,其中包含的电接触数目常在数十万以上,如果其中的一个或几个工作失效,则将导致整个系统工作紊乱,甚至全部瘫痪,它所造成的严重后果将是无法估量的。

今天,我国超高压输电系统所用的断路器,核聚变工程中的保护开关,人造卫星上的继电器,大型电子计算机中的连接器,现代化轧钢系统中的电器设备等等,都有电接触在工程中的应用的具体例子,它代表了我国电接触学科在应用方面取得的一些成就。

但是,就目前的情况来看,我国电接触研究的基础还比较薄弱,研究的水平有待提高,许多电器、电工和电子产品质量较差,技术力量和人才缺乏。因此,加强电接触基础和应用研究,培养专门人才,普及电接触基本知识,是我国电接触界当前的重要任务。

在一个高度电气化的国家里,重要的工业部门、军事部门对系统工作的可靠性要求极高,这就对电接触的性能和可靠性提出了愈来愈苛刻的要求,因此,电接触这个学科不仅是电工技术的重要环节,而且还直接关系到电子技术、通讯技术、自动化技术、空间技术等的发展,是一门具有边缘性特点的关系面很广的学科。此外,电接触在许多新条件下出现的新现象,是当前物理界研究的重要对象。电接触现象的深入研究,将促进物理有关领域的理论不断向前发展。

## 第二章 电接触内表面

### § 2-1 概 述

电器、电机以及其它电子和电工设备中的电接触元件，如：触头(触点)、端子、连接器、插接件、电刷、滑环等等，其接触部分的表面一般都要经过机械加工。经过精加工的金属表面虽然用肉眼看起来非常平坦，有的甚至象镜面一样光滑，然而，这些名义上光滑平坦的表面在显微镜里观察都是凹凸不平的。下面举两个实例：

一个是输电线的连接器。它是铸造后经喷砂清洗过的表面，在低倍显微镜中观察到的形态如图 2-1 a 所示（放大 100 倍）。图中明显可见喷砂造成的十分粗糙的表面结构。凸出的小丘高度大约为  $12.7\mu\text{m}$ 。

另一个是电机的滑环。它是经过抛光后的表面，虽然肉眼看来非常光滑，但在显微镜下观察仍清晰可见抛光的磨痕和凸丘，如图 2-1 b 所示（放大 300 倍）。凸丘高大约为  $1\mu\text{m}$ ，磨痕深约为  $2.54\mu\text{m}$ 。

名义平面表面微观起伏分布的形态和起伏的程度除可用高倍显微镜（例如扫描电子显微镜）观察以外，还可用表面轮廓仪直接绘出被测表面微观起伏的轮廓波形图。根据表面轮廓图可以得出不同材料、不同加工工艺下金属表面的微观几何形态和相应的粗糙度参数。这对于进一步从理论上分析接触内表面的物理状态和性质是极其重要的。

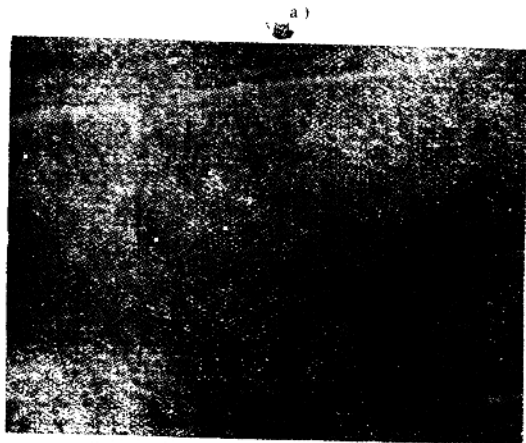
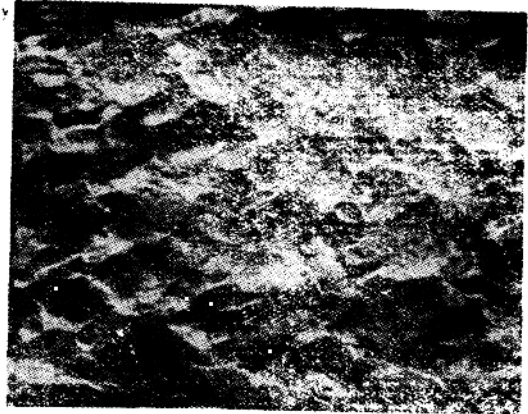


图2-1 显微镜下的名义平面表面  
a) 铸造喷砂后的连接器表面 ( $\times 100$ ) b) 抛光的滑环表面 ( $\times 300$ )

### § 2-2 金属表面的微观形态

实测表明，同种材料用一种不同的加工方法或两种重叠的加工方法所得的名义平面表

面,其表面轮廓波形图都是不相同的。例如软钢用一种不同的加工方法——抛光、磨光或车光——所得的表面,其轮廓图如图 2-2 所示,并把它们与玻璃表面相比较。由图可以看出,抛光的钢表面起伏较小,接近于玻璃表面,磨光或车光的表面则起伏较大。在磨光的表面轮廓中,大起伏中含有密集的小起伏,类似基波中含有明显的高次谐波。而在车光的表面轮廓中,大起伏中很少有密集的小起伏,类似的高次谐波轻微。图 2-3 为两种重叠的加工方法——先磨光然后轻轻抛光或先磨光然后用细砂纸轻擦——所得的钢表面轮廓图,并与单一磨光后的表面比较。由图可以看出,单一磨光的表面轮廓波形的特点是大起伏中含有大量的微小起伏,且波形上下分布对称,波的陡度很大。对于先磨光然后轻轻抛光的表面轮廓波形微小起伏较小,波形上下不太对称,上半波陡度较小,下半波陡度较大。而对于先磨光然后再用细砂纸轻擦后的表面轮廓波形大起伏中又含大量的微小起伏,波形上下极不对称,上半波和下半波的陡度差别特别明显。

必须指出,图 2-2 和图 2-3 所示的表面轮廓只是表示了沿表面一个坐标的二维起伏图象。在一定加工方法所得的同一表面上,沿两个垂直坐标所得的轮廓图不一定是完全相同的,这决定于加工工艺情况。例如,铸造喷砂后的表面(参看图 2-1 a),沿表面不同方向所得的轮廓图相同,而抛光后的表面(参看图 2-1 b),沿磨削方向和垂直于磨削方向所得的轮廓图完全不同。因此,要完全了解一个名义平面表面的微观起伏形态,必须

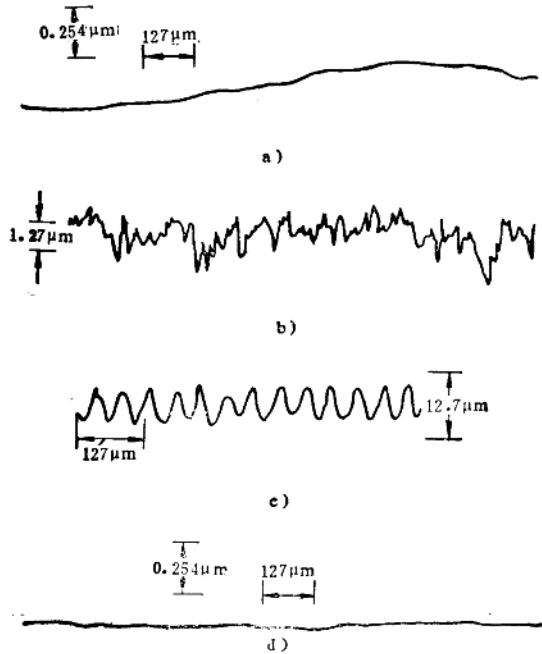


图 2-2 一种方法加工后的钢表面轮廓图

a) 抛光后的表面 b) 磨光后的表面 c) 车光后的表面 d) 玻璃表面

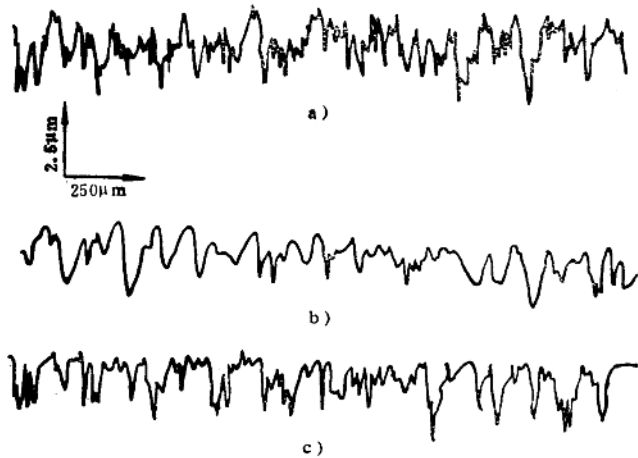


图 2-3 两种方法重叠加工后的钢表面轮廓图

a) 仅仅磨光 b) 先磨光然后轻轻抛光 c) 先磨光再用细砂纸轻擦

完全了解一个名义平面表面的微观起伏形态,必须

用三维表面轮廓图来表示。简单时至少也要用沿表面两个垂直方向的两个二维轮廓图来表示。

根据表面轮廓波形图，可以用微观凸丘的高  $z$  和其顶峰曲率半径  $r$  的统计平均值来定义加工表面的粗糙度，或简单地也可只用凸丘的高来定义粗糙度。格林渥 (Greenwood) 和威廉逊 (Williamson)<sup>[6]</sup> 等人对不同加工方法的钢表面测得的微观凸丘高  $z$  的平均值列入表 2-1,  $z$  的标准偏差约为 25%。凸丘的斜度约在 5 度以内，即凸丘顶峰的平均曲率半径为凸丘高的几倍到一百倍。

表 2-1 不同方法加工的钢表面微观凸丘高  $z$  的平均值

加工方法	用布轮抛光	刮 净	磨 光	车	冲
$z/\text{mm}$	0.1	1	6	10	100

### § 2-3 两清洁金属表面的接触

设两实际的粗糙金属表面，在真空中经清洁处理，去掉了表面膜。当此两金属面接触时，如果材料的硬度为无限大（为理想刚体），则不论外加的接触力有多大，材料都不会产生任何变形。在此条件下，对于两平面接触，实际的接触点最多只有三个。对于两圆柱面轴向平行接触，实际接触点最多是两个。而对于两圆柱面交叉接触，实际接触点就只有一个。

但是，材料的实际硬度都不是无限大，在外力作用下，材料都会产生变形。当外加接触力较小时，材料产生弹性变形，如果接触力超过一定限度，材料将产生塑性变形。因此，在外加接触力作用下，两实际金属面的接触过程可描述如下：两表面开始接触时只有很少的实际接触点，如图 2-4 a。由于此时实际接触面积非常小，单位实际接触面积受到的力非常大，起始接触点首先产生弹性变形，然后向塑性变形过渡。由于起始接触点变形，使实际接触面积扩大，同时两金属表面的空隙部分相互靠近，继续产生新的实际接触点，如图 2-4 b，图中箭头所指为新产生的接触点。最后，当总的实际接触面积扩大到支持力与外力相平衡时，接触过程结束。

分析外加接触力与实际接触面积之间的关系常借用理想光滑球体受压变形的赫芝 (Hertz) 公式或刚性球对平面作压痕试验定义的材料硬度关系。

具有半径  $r_1$  和  $r_2$  的两理想光滑弹性球相互接触，如图 2-5，在接触力  $F$  的作用下产生弹性变形，其实际接触面  $A_0$  的半径  $a$  与接触力  $F$  之间的关系由赫芝导出<sup>[7]</sup>：

$$a = \sqrt[3]{\frac{3}{4} F \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)^{-1}} \quad (2-1)$$

式中  $E_1$  和  $E_2$ ——两球材料的弹性模量；

$\nu_1$  和  $\nu_2$ ——两球材料的泊松比。

对于相同材料的球对无限大平面接触： $r_1 = r$ ,  $r_2 = \infty$ ,  $E_1 = E_2 = E$ ,  $\nu_1 = \nu_2 = \nu$  ( $\nu$  的实际值是：Fe = 0.28, Cu = 0.36, Ag = 0.39, 近似地平均取 0.3)。式 (2-1) 变成

$$a = \sqrt[3]{\frac{F}{E}} r \quad (2-2)$$

在实际接触面  $A_0$  中，距  $A_0$  中心  $x$  处的压力为

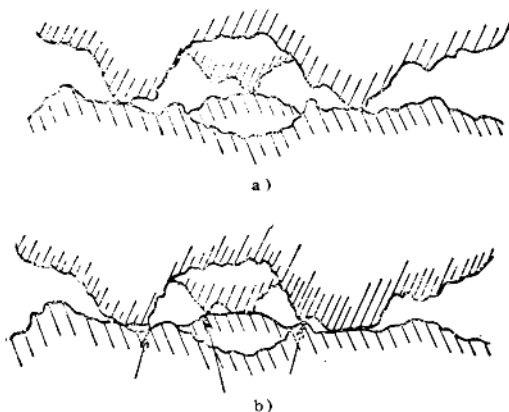


图2-4 两实际金属面的接触过程

- a) 起始接触只有少数的接触点 b) 进一步原接触点面积扩大并产生新的接触点 (图中用箭头标注)

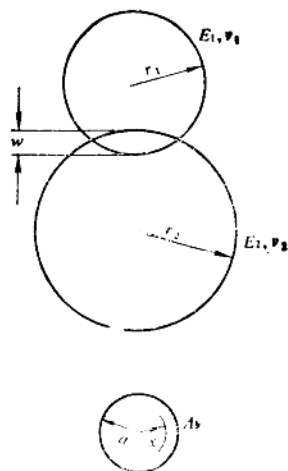


图2-5 两个理想光滑弹性球相互接触

$$p = \frac{1.5F}{\pi a^3} \sqrt{a^2 - x^2} \quad (2-3)$$

在  $A_0$  的中心点, 压力为最大

$$p_{\max} = \frac{1.5F}{\pi a^2} \quad (2-4)$$

产生弹性变形的实际接触面积  $A_0 = \pi a^2$ , 两球中心相互趋近的距离为

$$w = a^2 \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (2-5)$$

这个距离  $w$  又称之为“柔量”。

以上关系, 也适用于两个相同材料、相同半径的圆柱形元件交叉接触的情况。对于不同半径、不同材料的圆柱交叉接触, 实际接触面不是圆而是椭圆, 对于这种情况, 罗尔克(Roark)导出了更加复杂的公式〔7〕。

用刚性球对被试材料平面作压痕试验, 其压痕面所受的压力被定义为材料的硬度。如图2-6, 设刚性球的硬度为无限大,  $r$  为凹痕面的曲率半径, 相应的凹陷曲面的面积为  $A_0$ , 凹痕口的半径为  $a$ , 相应的面积为  $A$ 。在  $A_0$  和  $A$  面上取元面积  $dA_0$  和  $dA$ ,  $dA_0$  法线和接触力  $F$  之间的夹角为  $\alpha$ 。如果垂直于  $dA_0$  的压力为  $p dA_0$ , 则在  $F$  方向的分量为

$$p dA_0 \cos \alpha = p dA \quad (2-6)$$

积分得

$$F = \int p dA = \bar{p} A \quad (2-7)$$

式中  $\bar{p}$ ——对凹痕壁的平均压力。

因  $A = \pi a^2$ , 故近似地可认为

$$\bar{p} \approx \frac{F}{\pi a^2} \quad (2-8)$$

现今凹痕的深度为  $h$ , 可以导出下列近似关系

$$\frac{h}{r} \approx \frac{1}{2} \left( \frac{a}{r} \right)^2 \quad (2-9)$$

令  $\frac{h}{r} = D$ , 称为压痕的“比深度”。由上式可知, 只要已知  $r$  和  $a$ , 不用测量  $h$ ,  $D$  就能计算出来。实际上刚性球的硬度并不是无限大, 所以上式应作一定的修正。

平均压力  $\bar{p}$  和比深度  $D$  之间的典型测量结果如图 2-7 所示。曲线上所有的点都对应于可见的压痕口, 因此, 至少在压痕的边缘都产生了塑性变形。由图可以看出,  $\bar{p}$  随  $D$  单调增长, 不出现最大值, 当  $D$  大约到达 0.03 以后,  $\bar{p}$  的增长很小。因此, 考虑金属元件接触问题的计算时, 可以把  $D > 0.03$  时的  $\bar{p}$  定义为材料的硬度。考虑到材料蠕变需要一定的时间, 故凹痕加压时间应持续约 20 s。

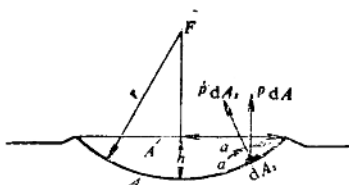


图2-6 刚性球对试件平面所作的压痕

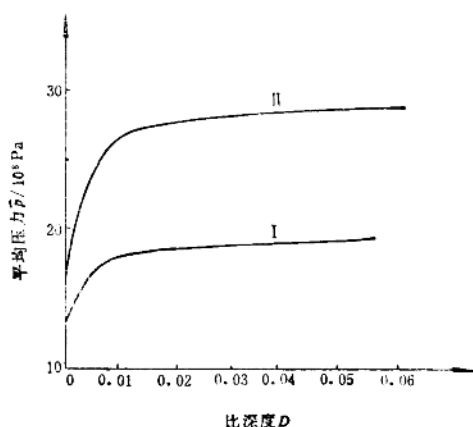


图2-7 锻压硬化了的钢平均压力  $\bar{p}$  与比深度  $D$  之间的关系

I—轻退火 II—未退火

在考虑材料的硬度定义时, 为了应用于接触问题的方便起见, 不用压痕凹陷曲面的面积来定义硬度, 而用压痕口的面积来定义硬度:

$$H = \bar{p} = \frac{F}{\pi a^2} \quad (2-10)$$

这个硬度称为“接触硬度”。它不必满足加压 20 s 和  $D > 0.03$  等条件。

压痕口的面积  $\pi a^2$  实际上等效于接触力承受面(实际接触面)  $A_s$ , 因此, 如果假定整个  $A_s$  都达到了塑性变形, 则对于任何形状的  $A_s$ , 都可以写:

$$F = H A_s \quad (2-11)$$

式(2-1)~式(2-5)和式(2-6)~式(2-9)是理想弹性球接触产生弹性变形和理想刚性球与平面接触产生塑性变形的一些主要关系。这些关系可以借用来分析接触元件之间微观接触的问题。

已经指出, 名义平面表面之间的接触, 实际上是表面微观凸丘之间的接触, 这种微观接触有两种典型的形态: 一是凸丘与凸丘相遇接触, 二是凸丘与凹谷交错接触。见图 2-8 中的示意。



图2-8 名义平面接触面内两种典型的微观凸丘接触

a) 凸丘与凸丘相遇接触 b) 凸丘与凹谷交错接触

在这些微观凸丘的接触中, 有的凸丘受压产生很大的塑性变形(又称压皱变形), 此情况对应于  $D > 0.03$ , 有的凸丘塑性变形很小, 甚至没有产生塑性变形, 此情况对应于  $D < 0.03$ 。这就是说, 从微观上看, 接触面内各微观凸丘的变形有的已达塑性, 有的还是弹性, 有的两者兼而有之。见图 2-9 所示的示意。接触面内这种微观凸

丘变形的复杂情况往往是无法详知的，这就提出了如何处理这个困难的问题。

工程应用中，材料的硬度是一个最普通的特性参数。从有利于应用出发，最好是用硬度定义关系式(2-10)及式(2-11)。

考虑到接触面内各微观凸丘有的  $D > 0.03$ ，对应的  $\bar{p}$  等于材料的硬度  $H$ ，有的  $D < 0.03$ ，对应的  $\bar{p}$  小于材料的硬度  $H$ 。因此，从宏观上说，名义平面之间的接触，其等效的接触硬度比材料的定义硬度要小，可以用一个小于 1 的因数乘上材料的定义硬度来考虑这种综合效应，于是式(2-11)就要改写成：

$$F = \xi H A_s \quad (2-12)$$

或 
$$\frac{\bar{p}}{H} = \xi \quad (2-13)$$

$\xi$  为小于 1 的因数，它是  $D$  的函数。从理论上说， $\xi$  为 0 ~ 1 之间的任何数，都是可能的。对于绝对光滑的理想表面， $\xi = 1$ 。但是，根据实际测量，在视

在接触力不太小的情况下，比如说  $P$  ( $P = \text{接触力 } F / \text{视在接触面积 } A_s$ ) 大于  $10^3 \text{ N/m}^2$ ， $\xi$  的值常在 0.1~0.3 之间。在某些极光滑的接触元件之间的接触，如抛光的炭-炭接触， $\xi$  值可小到 0.02。有人在曲率半径为 50~100 m，接触力约 1000 N 的极光滑的不锈钢清洁接触元件之间得到比 0.02 更小的  $\xi$  值。

根据式(2-12)，如果  $\xi$  等于常数，就意味着  $A_s$  正比于  $F$ 。式(2-12)的含义是把微观凸丘的变形看成是塑性的，或者确切地说看成是等效塑性的。实际上，在接触的过程中，凸丘顶部开始可能产生塑性流动，但最后凸丘变形必定达到一个稳定状态，其中支持接触力的面仍是弹性的。因此，名义平面之间的接触，既可用塑性定义，也可用弹性定义。

格林渥和威灵逊研究了一个满足  $A_s \propto F$  的一般形式的数学模型<sup>[6]</sup>。他们把名义平面表面的微观起伏用各个凸丘的高  $z$  和顶部的曲率半径  $r$  来表示，如果已知  $z$  和  $r$  的分布函数，即可用统计方法求出  $A_s$  和  $F$  之间的关系。

设具有大量微观凸丘的名义平面表面与一理想的光滑平面接触，如图2-10所示。各凸丘顶端具有相同的曲率半径  $r$ ，但凸丘的高度  $z$  是随机变化的。因此，某一特定凸丘超过某一参考平面的高，在  $z$  和  $z + dz$  之间的概率为  $\phi(z) dz$ 。

假定发生接触的各凸丘之间的距离足够远，以致各凸丘的变形并不相互干扰。因此，就可以忽略凸丘与凸丘之间的这种影响，而按单个孤立凸丘变形来考虑。单个凸丘受压变形的特性根据赫芝公式是知道的。凸丘的接触半径  $a_1$ ，接触面积  $A_1$ ，接触力  $F_1$  可以用“柔量”  $w$  来表示，

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= r^{\frac{1}{2}} w^{\frac{1}{2}} \\ A_1 &= \pi r w \\ F_1 &= \frac{4}{3} E' r^{\frac{1}{2}} w^{\frac{3}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (2-14)$$

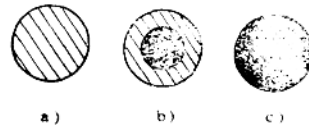


图2-9 接触面内微观凸丘变形的三种情况示意 (图中黑色部分代表塑性变形，阴影线部分代表弹性变形)  
a) 仅有弹性 b) 周围弹性，中心塑性 c) 全部塑性

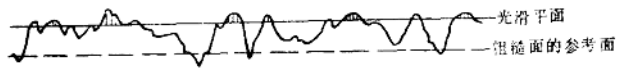


图2-10 粗糙表面的接触 (接触力由那些阴影线部分的凸丘所支持)



式中  $E'$  可从  $\frac{1}{E'} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}$  中得到。

如果一个接触面比另一个面更富有弹性, 则  $E'$  只是那个材料的平面应力模量  $E/(1 - \nu^2)$ 。如果两接触面的材料相同, 则  $E'$  为此值的一半。

若两个表面压到和参考平面距离为  $d$  时停止, 则原来高度大于  $d$  的凸丘都会发生接触。因此, 具有高度  $z$  的任意给定凸丘, 其发生接触的概率为

$$\text{概率}(z > d) = \int_d^{\infty} \phi(z) dz \quad (2-15)$$

如果整个接触面有  $N$  个凸丘, 则预计的接触点数目将为

$$n = N \int_d^{\infty} \phi(z) dz \quad (2-16)$$

又因  $w = z - d$ ,  $A_1 = \pi r w$ , 则单个凸丘平均的接触面积为

$$\int_d^{\infty} \pi r (z - d) \phi(z) dz$$

故预计的接触总面积由下式给定:

$$A_0 = \pi N r \int_d^{\infty} (z - d) \phi(z) dz \quad (2-17)$$

同样方法, 可以找到预计的接触力为

$$F = \frac{4}{3} N E' r^{\frac{1}{2}} \int_d^{\infty} (z - d)^{\frac{3}{2}} \phi(z) dz \quad (2-18)$$

为方便起见, 引入归一化变量, 并用高度的标准偏差  $\sigma$  来描述凸丘的高度。设视在接触面上凸丘的密度为  $\eta$ , 则其接触面上总的凸丘数为  $N = \eta A_s$ ,  $A_s$  为视在接触面面积。于是得:

$$\left. \begin{aligned} \text{接触点数目 } n &= \eta A_s f_0(h) \\ \text{总接触面积 } A_0 &= \pi \eta A_s r \sigma f_1(h) \\ \text{接触力 } F &= \frac{4}{3} \eta A_s E' r^{\frac{1}{2}} \sigma^{\frac{3}{2}} f_{\frac{3}{2}}(h) \end{aligned} \right\} \quad (2-19)$$

式中  $h$  —— 归一化间距, 它等于  $d/\sigma$ ;

$$f_n(h) = \int_h^{\infty} (S - h)^n \phi^*(S) dS \quad (2-20)$$

其中  $\phi^*(S)$  —— 归一化的高度分布。

因此, 只要凸丘高的分布规律  $\phi^*(S)$  已知, 则式(2-19)即可求解。

格林渥和威灵逊假定, 粗糙表面微观凸丘的高度分布可能是指数分布或是高斯分布的。实验结果表明, 对于多数表面, 高斯分布更接近于实际情况。

将已知的凸丘高度分布函数  $\phi^*(S)$  代入以上的关系式中, 即可最后求出视在接触面中实际接触点数目、实际接触总面积与外加接触力之间的关系。此关系表明, 实际接触面积与接触力成正比, 即  $F \propto A_0$ , 它和式(2-12)有相同的结论。

在下列条件下:

$$\eta = 300 \text{ 个/mm}^2 \quad r \sigma = 10^{-4} \text{ mm}^2 \quad E'(\sigma/r)^{1/2} = 250 \text{ N/mm}^2$$

对于一定的名义接触面积, 计算得出的实际接触面积几乎与接触力成正比, 见图2-11所示的