

大森豊明 主编

电接触材料手册

机械工业出版社

电接触材料手册

大森豊明 主编

梁宇青 译
刘代琦

鲁学平 校



机械工业出版社

电接触材料是电力系统、自动控制系统和信息传递等领域中直接关系到系统运行可靠性的关键材料之一。本书系统介绍了电接触理论、各种接触材料的特性、制造方法、试验方法和电接触材料的选用，并提供了许多实用的数据、曲线和图表以及各国的电触头标准。

本书可供从事强、弱电接触材料研制的科技人员和从事开关、控制、保护设备与电机和微型电机、电子设备和电信设备设计制造的科技人员以及大专院校有关专业的师生查阅参考。

電気材料マニアル—電気接点材料

〔日〕大森豊明 主编

* * *

电接触材料手册

〔日〕大森豊明 主编

梁宇青 刘代琦 译 鲁学平 校

责任编辑 颜明志 李 尹

封面设计 夏小万

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

北京市振华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 850×1168¹/₃₂·印张10³/₄·字数 286 千字

1987年1月北京第一版·1987年1月北京第一次印刷

印数 0,001—3,060·定价3.15元

*

科技新书目： 135-128

统一书号：15033·5886

译者的话

本手册是根据日本新技术开发中心于1978年10月出版的由大森豊明主编的《電気材料マニュアル》的电接触材料篇译出。

电接触材料在电力系统、自动控制系统和信息传递系统等领域中的应用极为广泛，凡是与电有联系的各种设备和器械、各种系统和各种场合都离不开电接触材料。由于使用条件和场合的不同，对电接触材料的技术要求也各不相同。因此，电接触材料的品种、规格极为繁多。电接触材料的性能、质量和寿命直接关系到设备和系统运行的可靠性。近十几年来，随着电子技术的迅猛发展，电接触材料特别是用于轻、微负载的开闭触点和滑动触头材料也有日新月异的进展，电接触材料的研制和生产已出现了一个崭新的局面。

本手册所用的单位制和个别名词为了忠实原文起见，未按我国现行的标准转换，如接触压力的单位仍照原书用g，“比重”未改为相对密度。本书荟萃的资料较新较全，而且实用性较强，可供从事电接触材料研制、生产和使用的各类人员查阅参考。

由于译者水平有限，错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

目 录

1. 电触头(或触点)1
2. 对电触头基本特性的要求3
 - 2.1 接触电阻(3)
 - 2.2 熔焊与粘着(10)
 - 2.3 损耗与转移(16)
 - 2.4 电弧特性(27)
 - 2.5 电接触材料的性质(37)
- 参考文献44
3. 电触头的种类和主要用途48
 - 3.1 电触头材料的组成元素(48)
 - 3.2 电触头材料的分类(54)
 - 3.3 电触头材料的物理性质与用途(60)
 - 3.4 电触头材料的组成与特性(78)
4. 电触头的制造方法80
 - 4.1 普通的电触头材料的制造方法(80)
 - 4.2 银-金属氧化物系电触头材料的制造方法(85)
 - 4.3 烧结电触头材料的制造方法(90)
 - 4.4 复合电触头材料(90)
 - 4.5 电触头形状(96)
 - 4.6 电触头的安装(99)
5. 各种电触头材料的特性107
 - 5.1 银(107)
 - 5.2 银-铜合金(129)
 - 5.3 银-氧化镉(132)
 - 5.4 银-金属氧化物(148)
 - 5.5 烧结触头材料(158)
6. 轻负载用触头材料167
 - 6.1 概述(167)
 - 6.2 铂族和铂族合金(182)
 - 6.3 金和金合金(204)
 - 6.4 其他材料(207)
 - 6.5 贵金属覆层(210)
7. 滑动触头材料219
 - 7.1 滑动触头的概述(219)
 - 7.2 滑动触头的接触机构、用途和类别(225)
8. 电触头的试验方法237
 - 8.1 轻负载用触头(237)
 - 8.2 中、重负载用触头试验(243)
9. 触头材料选择和使用上的主要问题249
 - 9.1 选择触头材料的注意事项(249)
 - 9.2 电触头的标准(256)
10. 资料289

IV

- 10.1 资料 -1电触头术语的解释(289)
- 10.2 资料 -2 通信设备用触头材料(JISC2509)(298)
- 10.3 资料 -3通信设备用触头材料(303)
- 10.4 资料 -4各种焊料的JIS 标准(308)
- 10.5 资料 -5触头材料用的主要相图(323)
- 10.6 资料 -6关于金、银、铂的行情(335)

参考文献 337

1. 电触头(或触点)

任何用电的器械必然与开关有联系,甚至常见的家用电器、电视机的高频头、恒温器等也装有各种开关。日常经验证明,各种设备与信号装置等的故障,往往是由于开关而引起的。随着机械、电气设备的不断改进和发展,在电力系统、自动控制和信息传递等领域中,开关的使用范围越来越广。随着设备的微型化和高精度化程度的不断提高,对开关的可靠性的要求也越来越高。

对开关来说,主要是要求它能可靠地开断和闭合电路,并力求结构简单。但是,它必须具有低而稳定的接触电阻,良好的抗熔焊性和耐磨性。开关的接触部位经使用后,电触头表面一旦形成氧化膜或硫化膜,这些表面膜具有较高的电阻,所以电触头之间便形成可观的接触电阻(contact resistance),从而导致导电不良。如果出现这种状态,即便开关能够从机械上闭合,也会发生电路上未接通的接触故障。

如上所述,在电触头表面必然存在氧化膜、硫化膜以及周围环境气体的吸附层所产生的所谓过渡电阻(transition resistance)。另一方面,电流流过电触头之间时,电触头的真实接触面远比名义接触面积小,结果使电流集中通过有限的载流点,形成所谓收缩电阻(constriction resistance)。因此,电触头的接触部位通电时便产生焦耳热。当焦耳热使接触部位温度接近电触头材料的软化温度时,由于范德瓦斯力或相互扩散而引起电触头粘着。如温度进一步提高接近电触头材料的熔化温度时,便会引起熔焊。如果电触头的粘着或熔焊力超过开关的机械分断力时,便会发生不能开断的现象。即使未出现这种不能开断现象,也会引起延缓开关的开断动作等故障。

开断和闭合电触头时，会发生火花或弧光放电。由于这种放电造成触头表面烧损，即使每次开断和闭合所引起的损耗很小，但经多次积累，也会导致电触头的接触面变形。这种损耗对开关的寿命有决定性的影响。而且电触头接触部位的受热，由于电流方向的不同而不平衡，在接触部位形成不断裂的桥路，从而产生材料转移。消除由于放电引起的电触头损耗的方法，也因电触头极性不同而异。在直流电路中，开闭电触头时所发生的材料转移是由电触头的一极向另一极局部集中而形成故障。尤其是如接触面形成针状的凹坑和凸丘，就可能由此引起啮合而呈类似熔焊的现象。此外，有时电触头间的间隙，也会由于针状凸丘而发生短路等故障。

当开关的使用条件超过电触头材料的电弧特性曲线起弧极限，则在开断和闭合电路时便发生电弧。这种开闭电弧对电触头的材料转移、侵蚀和熔焊特性有很大影响。电触头间隙也是开关设计的重要条件，在决定电触头间隙时必须了解电弧特性。这种瞬态电弧在电触头开断或闭合过程中都会发生。在开断过程中所发生的电弧为长电弧，它对材料的转移和侵蚀影响较大。而在开关闭合时，如不出现弹跳，则所产生的电弧甚短，与开断时的电弧相比，对材料转移和侵蚀的影响较小。

至于滑动触头，除应具有上述各种特性以外，还要求具有机械的耐磨性和接触部位不易发生振动（对数衰减率大）等性能。

因此，要求电触头具有电导率和热导率高，耐蚀性好，不易形成氧化膜和硫化膜等特性，一般采用以Ag、Pt、Pd和Au等材料作为电触头的主要成分。

2. 对电触头基本特性的要求

从使用和制造触头材料的实用观点出发,本章分(1)接触电阻,(2)熔焊和粘着,(3)损耗和转移,(4)电弧特性,(5)材料的性质等五部分。

2.1 接触电阻

如将电路闭合,有电流 I 通过触头,则在电触头接触部位附近便出现电压降。此时,通过电流 I 和触头间的电压降 E 可求得接触电阻 R ,用下式表示

$$R = \frac{E}{I} \quad (2-1)$$

两触头间的真实接触面积远比名义接触面积要小得多,由于电流束集流而形成的电阻,称为收缩电阻,以 R_c 表示。在电触头的表面往往还存在着氧化膜或硫化膜以及周围的气体吸附层。由此而产生的电阻称为过渡电阻,用 R_t 表示。在此所测定的接触电阻为

$$R = R_c + R_t \quad (2-2)$$

2.1.1 收缩电阻

如图2-1所示,收缩电阻就是由于接触部位的电流束集所引起的现象。从理论上已有测算这种收缩电阻的许多方法^(1~5)。现在采用最多的是霍尔姆(Holm)所提出的研究成果,一般来说接触的截流面积远比触头的名义接触面积小。这时收缩电阻 R_c 由接触的载流面的直径 d 与触头的电阻率 ρ 决定,用式(2-3)表示^{(3)*}。

$$R_c = \frac{\rho}{d} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2d} \quad (2-3)$$

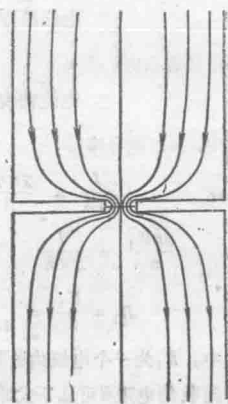


图2-1 接触部位的电流分布

式中, ρ_1, ρ_2 是两电极材质不同时的电阻率。

由收缩电阻引起的电压降 E_c 与接触面内的最高温度 T 之间的关系是

$$E_c^2 = 8 \int_{T_r}^T \rho \kappa dT \quad (2-4)$$

* 引自原著:《电触头和开关接触部件》⁽⁵⁾

从理论上人们提出了测算收缩电阻的许多方法,例如有人把接触部位作为圆锥体或球面进行计算等,此处是根据霍尔姆所提出的被认为是较正确的方法。在半径为 a 的两电极接触面上的电流的束集分布如图2-1所示,收缩电阻可以模拟在形状相同并带有电荷的圆板上的电力线分布的这一特征进行计算。圆板置于空间时,其静电容量为 $2a/\pi$ 。因此,如设距圆板无限远处一点的电位为 P , 电荷为 q , 则

$$q = \frac{2aP}{\pi} \quad (*-1)$$

此处如设单侧电极内部的电压降为 V_1 , 圆板单侧的电荷为 q_1 , 因此 $q_1 = q/2$,

$$V_1 = P = \frac{\pi q}{2a} = \frac{\pi q_1}{a} \quad (*-2)$$

设电力线数为 N_ϕ , 面积为 A 则

$$\text{电位梯度} = \frac{N_\phi}{A} = \frac{4\pi q_1}{A} = \frac{2\pi q}{A} \quad (*-3)$$

以电流表示时

$$\text{电流密度} = \frac{I}{A} = \lambda \times \text{电位梯度} \quad (*-4)$$

式中, λ : 电导率

$$\text{因此} \quad \frac{I}{A\lambda} = \frac{2\pi q}{A} \quad \therefore q = \frac{I}{2\pi\lambda} \quad (*-5)$$

$$\frac{2aV_1}{\pi} = \frac{I}{2\pi\lambda} \quad \therefore V_1 = \frac{I}{4a\lambda} \quad (*-6)$$

$$R_1 = \frac{V_1}{I} = \frac{I}{4a\lambda} \quad (*-7)$$

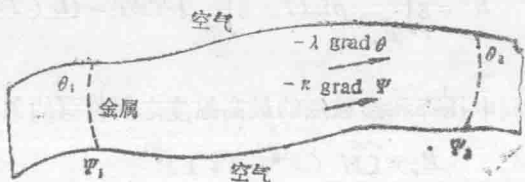
式中, R_1 为一个电极内的收缩电阻。

因此收缩电阻 R 可从下式求出

$$R = R_1 + R_2 = \frac{I}{4a\lambda_1} + \frac{I}{4a\lambda_2} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4a} \quad (*-8)$$

式中, ρ : 电阻率, κ : 热导率, T_r : 室温^{(4)**}。人们对式(2-4)提出了许多理论分析。但是式中的电阻率和热导率以及其温度系数是限于已知的材料。因此应用于实用材料时, 此式被认为是具有很高精

•• 引自F.L.Jones著: The Physics of Electrical Contacts⁽⁴⁾



如 j 为一导体中的电流密度向量, 电场可用 $-\text{grad } \Psi$ 表示, 则

$$j = -\kappa \text{ grad } \Psi \quad (\bullet \bullet -1)$$

式中, κ : 电导率, Ψ : 电位

单位面积的能流 (flow of energy) 向量 q 为

$$q = \Psi j - \lambda \text{ grad } \theta \quad (\bullet \bullet -2)$$

式中, λ : 热导率, θ : 温度。

能量守恒公式为 $\text{div } j = 0$

$$(\bullet \bullet -3)$$

$$\text{div } q = 0$$

$$(\bullet \bullet -4)$$

利用式(••-1)和(••-2), (••-4)可写成下式

$$\text{div} (-\kappa \Psi \text{ grad } \Psi - \lambda \text{ grad } \theta) = 0 \quad (\bullet \bullet -5)$$

如式(••-5)的括号内的数值经常为零, 即

$$\frac{\lambda}{\kappa} \text{ grad } \theta + \Psi \text{ grad } \Psi = 0 \quad (\bullet \bullet -6)$$

则式(••-4)显然能满足。

如导体内一点或导体表面的温度有一个最高温度值 θ_m 时, 令电位 Ψ 为零, 则 $\text{grad } \theta$ 当然亦为零, 便能满足式(••-6)。将式(••-6)的左侧由处于最高温度 θ_m 的点, 沿任意途径到另一点 (此点的温度为 θ , 电位为 Ψ) 积分, 则可得

$$-\int_{\theta_m}^{\theta} \frac{\lambda}{\kappa} d\theta = \frac{1}{2} \Psi^2 \quad (\bullet \bullet -7)$$

$$\text{即 } \Psi^2 = 2 \int_{\theta_m}^{\theta} \frac{\lambda}{\kappa} d\theta \quad (\bullet \bullet -8)$$

如从导体的最高温度点两侧考虑, 即 $E_s = 2\Psi$ 如换成本文的符号则可用式(2-4)表示。

度的近似式。如用魏德曼·弗朗兹(Wiedemann-Franz)定律, 则魏德曼·弗朗兹常数, 或称洛伦兹常数 L 为

$$L = \frac{\rho \kappa}{T} = 2.45 \times 10^{-8} \text{ (V/deg)}^2 \quad (2-5)$$

由此得
$$E_c^2 = 8 \int_{T_r}^T \rho \kappa dT = 8 \int_{T_r}^T LT dT = 4L (T^2 - T_r^2) \quad (2-6)$$

由接触点间电压降和接触点的最高温度之间得到的关系式为

$$E_c = [4L (T^2 - T_r^2)]^{\frac{1}{2}} \quad (2-7)$$

当过渡电阻很小, 可忽略不计时, 用式(2-7)可测出触头间电压降的近似值。

此处, 载流接触面内的温度分布, 大多如图2-2所示。如果考虑这个温度分布, 当在接触点最高温度时, 式(2-3)可用下式表示

$$R_c = \frac{[4L (T^2 - T_r^2)]^{\frac{1}{2}}}{I} = \frac{\rho_r [1 + \frac{2}{3} \alpha (T - T_r)]}{d} \quad (2-8)$$

式中, ρ_r : 室温下的电阻率, α : 电阻温度系数。

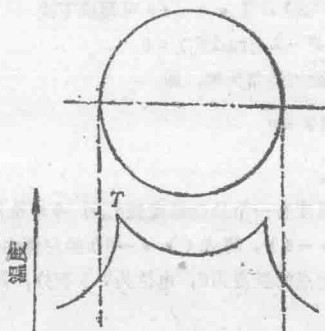


图2-2 接触面的温度分布

载流接触面积用下式表示

$$\frac{\pi d^2}{4} = \frac{P}{fH} \quad (2-9)$$

式中, P : 接触载荷, H : 硬度, f : 变形系数(接触面由于包含

弹性变形和塑性变形两部分，故接触面的变形随两者的比例而变化)。

因此，载流接触面的直径 d ，用下式表示

$$d = \left(\frac{4P}{\pi fH} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-10)$$

图2-3表示钯触头在接触载荷为10克时的收缩电阻 R_c 与流过的电流 I 的关系。

图中由A点到 E_s 的接触电阻，由于接触点的温度低于软化温度，所以载流接触面的直径 d 在接触载荷恒定的条件下不会发生变化，但由于 ρ 随温度变化，从而使接触电阻增加。假定超过 E_s 点， d 仍不变化时，则 R_c 与 I 的关系如由 E_s 到 E_m 的点线段所示。但如超过

E_s 点，触头的载流接触面由于软化而变化，并受通电时间的影响，而使 d 增加。因此由 E_s 到 E_m 的实线（即从软化温度到熔化温度之间的接触电阻）的变化开始减少。这种情况对多数的金属和合金触头来说，可由 E_s 到 E_m 的实线和从式(2-9)中看出 P 与 d 的增加比例大致相等。如果达到相应的熔化温度 E_m ，接触电阻可用 $R = E_m/I$ 表示，在 E_m 到B点之间，触头电流与接触电阻成反比关系。在B点到C点之间， d 不变化，则接触点上的电阻率 ρ 随温度变化而减少。

由A点到 E_m 范围的接触电阻，随接触载荷而变化，A点和 E_s 点的变化呈点划线的轨迹。另一方面由 E_m 到C点范围的接 触

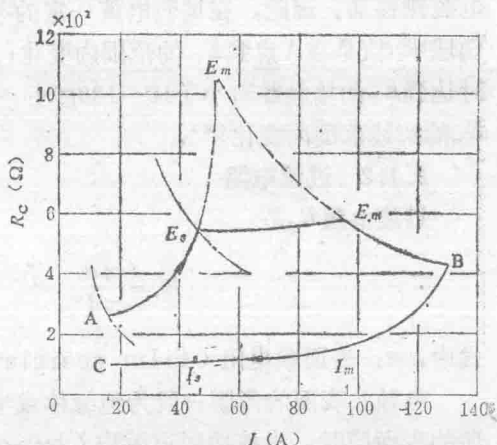


图2-3 Pd触头在接触载荷10克时，收缩电阻 R_c 和通过的电流 I 的关系

电阻，不受接触载荷的影响。

由于有这些现象，测定接触电阻时，应考虑选定适当范围的试验条件。如以 $R \propto P^{-n}$ 表示接触电阻和接触载荷的关系时，对 W 和 A_g-W 触头而言，当接触载荷为 $10 \sim 100g$ 左右时， n 的值有变化。凡是接触载荷不高时，一般均有过渡电阻的影响，这就是导致 n 值变化的原因。但是，在图2-3中如接触载荷增加时，则 E_s 点沿点划线转向高电流侧移动；而接触载荷点减少时，则向低电流侧移动。因此，在试验电流一定的条件下，在大的接触载荷领域中 n 值是在 A 点到 E_s 的范围内变化；当接触载荷为 $10 \sim 100g$ 时达到 E_s 如接触载荷小于 $10 \sim 100g$ 时，也可认为 n 值是在 E_s 到 E_m 的实线范围内变化⁽⁶⁾。

2.1.2 过渡电阻

过渡电阻 R_f 是

$$R_f = \frac{4\alpha}{\pi d^2} \quad (2-11)$$

式中， α ：表面膜电阻 (film resistance)⁽²⁾

电触头表面的薄膜一般为绝缘体或半导体，当电触头上存在薄的表面膜时，电流按隧道效应 (tunnel effect) 或粉末检波器效应 (coherer effect) 的规律流动，因此过渡电阻增加，从而使接触电阻变大。这种表面膜多数是由于接触材料的载流部位达到了软化温度而被破坏。表面膜的破坏温度高于电触头材料的软化温度和熔化温度时，由于表面膜比电气击穿更易使接触点的温度上升而引起母材软化，从而导致接触面的塑性变形扩大，使表面膜上产生龟裂而破坏。这种表面膜破坏后的电触头比无表面膜的电触头的接触电阻高。一般认为这是由于载流接触面扩大，使四周的表面膜和破坏了的表面膜受到影响。表面膜的破坏所引起的接触电阻变化，还随电触头表面膜的厚度和种类不同而有所差别。高熔点金属 Mo 和 W 的氧化物的情况则相反，它们的熔化温度低而蒸气压高，尤其当 Mo 存在少量氧化物时，在 $800^\circ C$ 左右时便出现液相，在 $795^\circ C$ 时显著升华^(7,8)。因此，当 Mo 和 W 存

在氧化物时，其表面薄膜在接触点达到软化温度以前便被破坏。

图 2-4 所示为在电触头接触面处流过不同的电流值时，在接触面上存在表面膜时所测得的接触电阻值的实例。在不同的电流值下，流过的电流增大时，接触电阻有降低的趋势。这可以被理解为在过渡电阻相等时，随着流过电流增大，接触部位的温度上升，如果超过母材的软化温度，表面膜就被破坏。因此，测定含有过渡电阻的接触电阻时，要充分考虑流过电触头的电流的大小。

图 2-5 表示钼触头的接触电阻与接触载荷的关系⁽²⁾。由式(2-10)可知，收缩电阻大致按接触载荷的 $1/2$ 次方变化。另一方面也由式(2-10)、(2-11)可知，过渡电阻大致按接触载荷的 -1 次方变化。

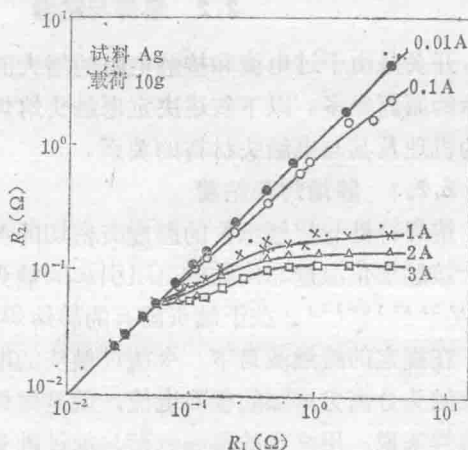


图2-4 在微伏级电压 ($25\mu\text{V}$) 下测定的接触电阻 R_1 和在大电流 (3A 以下) 测定的接触电阻 R_2 的关系^[9]
Ag 触头试料是在室温下经 $1000\text{ppmH}_2\text{S}$ 气氛硫化

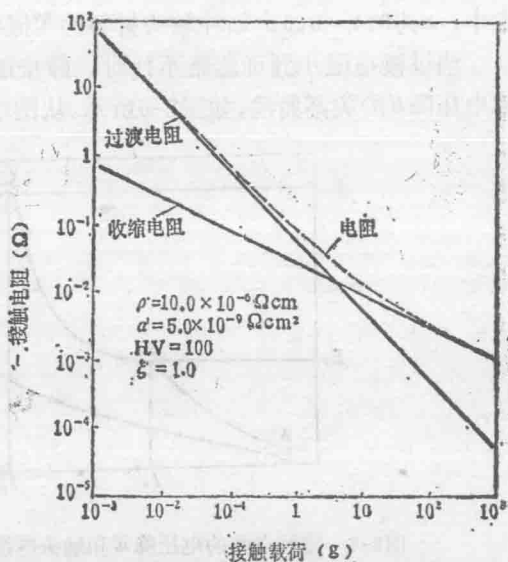


图2-5 Pd触头接触电阻的理论曲线⁽²⁾

2.2 熔焊与粘着

开关是由于过电流和接触电阻的增大而引起熔焊，造成这种故障的原因很多。以下叙述决定电触头熔焊特性的主要因素和相应的机理及其与电触头材料的关系。

2.2.1 静熔焊与粘着

熔焊特性与接触部位的温度有密切的关系，如式(2-7)所示，接触部位温度与由收缩电阻引起的触头间电压降成函数关系^(1, 3, 4, 10~13)。关于触头固有的静熔焊特性对微弱的熔焊来说，在规定的接触载荷下，令流过触头的电流变化，可以认为具有使触头分离力增加的极限电流，就是熔焊电流^(3, 14)。对坚固的熔焊来说，用规定的接触载荷与流过触头的电流进行试验，根据测定触头分离力的大小等方法来判断熔焊电流⁽¹⁵⁾。这种熔焊电流 I_M ，根据接触载荷 P 和电触头材料决定，由常数 K 、 n 表示的经验公式如下

$$I_M = KP^n \quad (2-12)$$

式中， n 为0.4~0.5，每种触头材料的 K 值可根据测定求得。

当过渡电阻小到可忽略不计时，静接触的触头电流 I 与触头间电压降 E 的关系曲线，如图2-6所示。从图中可知，如超过B点，

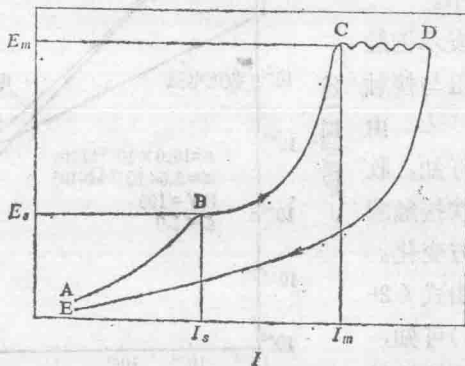


图2-6 接触点间的电压降 E 和触头电流 I 的关系曲线

E_m : 熔化电压 I_m : 熔化电流 E_s : 软化电压 I_s : 软化电流

便成为不可逆。在B点接触部位温度达到触头材料的软化温度时，由于接触部位的应力集中，产生塑性变形而引起触头硬化和弹性变形的释放，并且在接触部位由于软化和扩散而导致微弱的熔焊和粘着⁽¹⁶⁾。把这个接触点的触头电压降，称为软化电压；把流过接触部位的电流，称为软化电流。另外，在C点接触部位的温度达到电触头材料的熔化温度时，则引起触头坚固的熔焊。把这个接触点的电压降，称为熔化电压。

熔化电压 E_m 和接触部位的熔化温度 T_m 的关系可通过式(2-7)推导求得为：

$$E_m = [4L(T_m^2 - T_r^2)]^{\frac{1}{2}} \quad (2-13)$$

如图2-7所示，为由测定求得的熔化电压值与由式(2-13)求得的相对应之值的关系。此处合金触头材料的成分比为50at%（原子百分数）。金属与单相合金触头的测定值和由式(2-13)计算的实线完全吻合。但不是固溶体合金的Cu-Co、Ag-Cu、Ag-Zn和Ag-Cd触头中，测定的Ag-Zn、Ag-Cd触头的熔化电压值比计算值低。这种现象可以认为是由于在液相线以下出现固、液二相共存的范围所造成的。

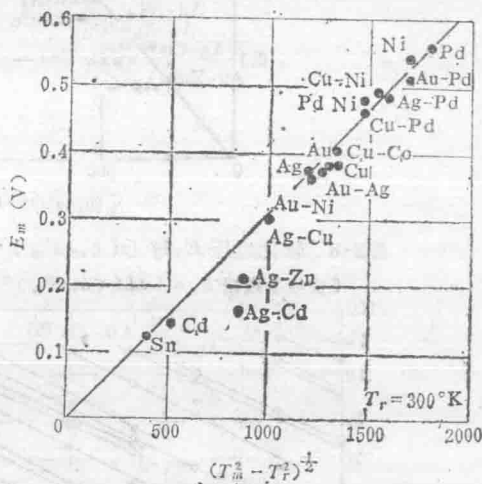


图2-7 熔化电压 E_m 与 $(T_m^2 - T_r^2)^{\frac{1}{2}}$ 的关系

实线是根据 $E_m = [4L(T_m^2 - T_r^2)]^{\frac{1}{2}}$ 计算
 T_m : 触头材料的熔化温度, T_r : 室温300°K
 L : 魏德曼·弗朗兹常数: 2.45×10^{-8} (V/deg)

其次，多数金属和合金，一般认为其软化温度约为熔化温度的40%。因此假定软化温度为 $0.4T_m$ ，由式(2-7)可知软化电压