

电接触材料的研究和应用

刘先曙 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书讨论了电接触点的各种电接触现象和电接触点的各种实验研究及测试方法，并以航空、宇航产品为主要对象，详细的介绍了各种电接触材料的优缺点及其应用。

本书收集了国内外对电接触现象和接触材料的主要研究成果。可供从事仪表、电器、电子及自动化装置等方面的有关技术人员和工人参考。

电接触材料的研究和应用

刘先曙 编

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张 7³/₈ 154千字

1979年11月第一版 1979年11月第一次印刷 印数：0,001—7,800册

统一书号：15034·1876 定价：0.82元

（限国内发行）

前 言

在现代工业中，尤其在宇航技术和航空工业中，电接触元件是必不可少的电器元件。

航空和宇航用仪表系统、自动控制系统以及电机、电器及电路装置，大量使用各种电连接器、集电滑环、导电换向片、整流片、导电刷、电位器和继电器接点。这些固定的、滑动的和周期开闭的断开接触元件，担负传递电讯号和电能以及接通或切断各种电路的重要职能，它们的性能，直接影响仪表、电器、电机和电路的可靠性、稳定性、精度及使用寿命。

在国外，电接触元件和材料的研究，已有五十年以上的历史。

我国接触元件和材料的研究、生产，也有很大发展。

为了使接触材料的生产立足于国内，我国研究和开发了适合国内资源情况的金基接触材料系列。

但是，国内目前还缺少系统地介绍电接触材料的研究与应用方面的专业书籍，为了供有关专业科技人员参考，本书力求对国内外接触材料的基础理论和实验应用研究的成果进行介绍，同时也介绍一些尚在探索或有争论的理论问题。为了通俗易懂，编写中尽可能避免采用抽象的数学公式而用图表曲线进行解释。

全书分为三部分：

第一部分着重讨论电接触现象的基本理论，并力求以接触材料实际使用中出现的問題作为讨论的基础。如接触材料的接触电阻、接触材料的变晦及有机污染、接触材料的电侵蚀及摩擦磨损等。

第二部分介绍接触材料使用性能的实验研究和测试方法，这是电接触材料研究中很重要的部分，也是开展理论研究的实验依据。

第三部分讨论了常用的航空电接触材料，在这一部分中，除了按航空电接触材料的使用特点分章讨论了导电环、导电刷、电位器绕线材料和断开接点材料外，还以专门的章节介绍了电镀接触材料和宇航用长寿命接触材料，希望引起对这个新发展起来的很有前途的接触材料系统的重视。

本书在编写中，得到赵中、朱之琴、孙正道、何安莉、姚治平、陶正炎、厉姻芬等同志的热情支持和帮助，特此表示感谢。

由于水平所限，本书一定存在许多错误和缺点，希望读者批评指正。

编 者

目 录

第一部分 基本的电接触现象

第一章	接触电阻	1
第一节	接触电阻的一般概念	1
第二节	影响接触电阻的因素	2
第三节	收缩电阻	6
第四节	薄膜电阻	12
第二章	接触材料的化学腐蚀和防护措施	14
第一节	接触材料变晦暗的原因	14
第二节	几种主要金属元素的晦暗过程	16
第三节	防止接触材料晦暗的方法	25
第三章	接触材料的有机污染及防止方法	30
第一节	几种金属元素对有机污染的敏感性	30
第二节	金属有机污染的机理	32
第三节	防止有机污染的方法	39
第四章	接触材料的电侵蚀及金属转移	43
第一节	电侵蚀的类型	43
第二节	阳极侵蚀的原因	48
第三节	防止液桥侵蚀的方法	51
第四节	阴极侵蚀的原因	55
第五节	阴极侵蚀与电弧电流及电弧中电量的关系	57
第六节	金属的电弧特性和影响电弧特性的因素	58
第七节	材料侵蚀量和材料性能的关系	66

第八节	减少电弧侵蚀的方法	68
第五章	滑动接触元件的磨损和减小磨损的方法	72
第一节	磨损过程和磨损形式	73
第二节	磨损对接触电阻和摩擦力的影响	79
第三节	磨损产物的分析及硬度匹配对磨损的影响	81
第四节	滑动接触元件的润滑	85
第五节	润滑剂的种类和性能	87
第六节	固体润滑剂和液体润滑剂的优缺点及应用	91
第七节	表面光洁度对磨损和润滑的影响	94

第二部分 接触材料使用性能的实 验研究及测试方法

第六章	接触电阻的实验研究及测试方法	100
第一节	测试原理	100
第二节	测试设备和加接触压力的方法	101
第七章	接触材料的环境腐蚀及有机污染实验	104
第一节	腐蚀和污染实验的目的和方法	104
第二节	普通大气下的环境腐蚀实验	106
第三节	在实验室条件下的环境腐蚀试验	107
第四节	盐雾试验和潮湿试验	109
第五节	氧化试验	109
第六节	硫化腐蚀试验	110
第七节	有机污染试验	113
第八章	接触材料的电侵蚀试验	115
第一节	导电环等滑动接触材料的电火花实验	115
第二节	断开接点的液桥侵蚀试验	121
第三节	断开接点材料转移侵蚀实验	123
第四节	断开接点的熔焊实验	127
第五节	接点寿命试验设备	130

第九章	滑动接触材料的摩擦磨损及耐磨匹配试验	137
第一节	测量摩擦系数的设备及实验方法	137
第二节	游码—平板式滑动磨损试验	139
第十章	扫描电子显微镜在接触材料使用性能研究中的应用	143
第一节	研究电弧侵蚀	143
第二节	研究有液体润滑剂的接点表面	149

第三部分 接触材料

第十一章	航空和宇航用接触材料的分类和发展趋势	151
第一节	接触材料的分类	151
第二节	各种接触材料的优缺点及其发展趋势	154
第十二章	电镀接触材料	158
第一节	电镀接触材料的优点	158
第二节	影响电镀接触材料使用性能的因素	161
第三节	金合金及其他金属的电镀工艺	167
第十三章	宇航用长寿命导电环和导电刷材料——润滑接触材料	172
第一节	宇航用接触材料的要求和工作条件	172
第二节	长寿命滑动接触材料——自润滑材料	173
第三节	用液体金属液润滑的真空电接触元件——铍	183
第十四章	航空用电位器绕线材料及厚膜浆料	187
第一节	绕线电阻材料的要求和概况	187
第二节	金基合金绕线电阻材料	189
第三节	银基合金绕线电阻材料	194
第四节	铂基和钯基合金绕线电阻材料	196
第五节	铜基和镍铬基绕线电阻材料	198

第六节	非线绕式电位器用电阻材料——玻璃釉厚膜浆料·····	199
第十五章	航空用贵金属电刷材料和导电环材料·····	201
第一节	航空用电刷材料·····	201
第二节	航空用导电环材料·····	205
第十六章	航空用小功率接点材料·····	208
第一节	小功率接点的工作条件和对材料的要求·····	208
第二节	小功率接点材料的种类和特性·····	209
第三节	航空用点火线圈和磁电机上的接点材料·····	213
第四节	AgMgNi 合金接点材料·····	215
第十七章	航空用中、大功率接点材料·····	217
第一节	中、大功率接点的工作条件和对材料的要求·····	217
第二节	中、大功率接点材料的种类及特性·····	218
第三节	Ag-CdO 接点材料的性能和制造工艺·····	220
第四节	在 Ag-CdO 合金中添加微量元素对性能的影响·····	224
主要参考资料	·····	228

第一部分 基本的电接触现象

第一章 接触电阻

第一节 接触电阻的一般概念

接触电阻是指两个接触元件在接触部位产生的电阻，这一电阻的阻值可以用仪器测量出来。

接触电阻是接触材料最基本的性能参数，同时也是接触元件中最主要的电接触现象。接触元件的工作是否可靠，本质上就是其接触部位的电阻是否稳定。在实际使用中，电接触元件之间的接触电阻总是或多或少地变化。仪表中的滑动接触元件在产生相对滑动时，如果接触电阻不稳定，反应在仪表指示器上就是指针来回地摆动或不规则的跳动。如果指示器换成发声的喇叭，接触元件在滑动时接触电阻的不稳定就会使喇叭发出“咔吧咔吧”的噪声，就像有毛病的收音机音量电位器在调整音量时所发出的噪声一样。

噪声一般可分为动噪声和静噪声。

所谓动噪声，就是电刷在滑动时所测出的电噪声。

所谓静噪声，是指接触元件处于静止状态通过电流时产

生的噪声，这种噪声产生的原因大多是接触电阻不稳定而形成的。

电噪声是电接触元件在电器、仪表中使用时经常发生的故障和缺陷之一，电噪声超过一定限度时，常常引起电器和仪表的报废。

第二节 影响接触电阻的因素

为了弄清电接触元件之间的接触电阻为什么会发生变化，首先应该了解影响接触电阻的各种因素。

实验证明，电接触元件之间的接触电阻受许多因素的影响。归纳起来，有以下几方面：

(一) 物理性能

电接触元件之间的接触电阻和接触材料的电阻率有密切关系，在同样条件下，电阻率高的材料其接触电阻也高。

此外，接触电阻和材料的硬度有关，同一种材料，硬度高的元件比硬度低的元件之间的接触电阻要高，图1-1是PdIr18合金在不同硬度时测得的接触电阻数据，硬度为 215 公斤/毫米^2 (HV)的PdIr18合金在不同接触压力下测得的接触电阻数据由曲线1表示，硬度为 178 公斤/毫米^2 (HV)的PdIr18合金在不同接触压力下测得的接触电阻数据由曲线2表示，很明显，在接触压力相同时，硬度高的PdIr18合金，其接触电阻也高。

(二) 接触压力

图1-1的曲线也清楚的说明，接触电阻随接触压力的增加而减小。

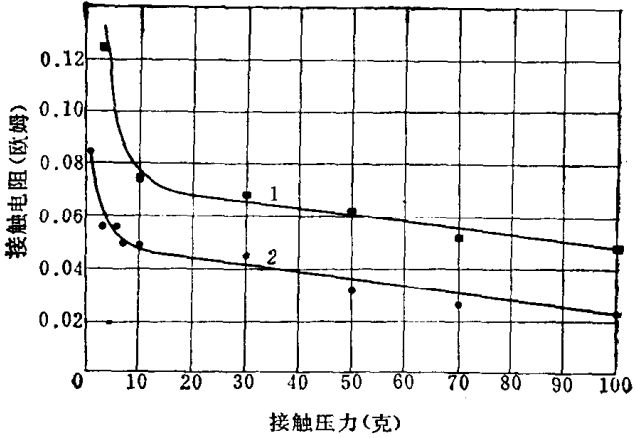


图1-1 接触电阻和接触压力及硬度的关系

材料: PdIr 18, 试样直径: $\phi 1.0$ 毫米

1—HV = 215公斤/毫米², 2—HV = 178公斤/毫米²。

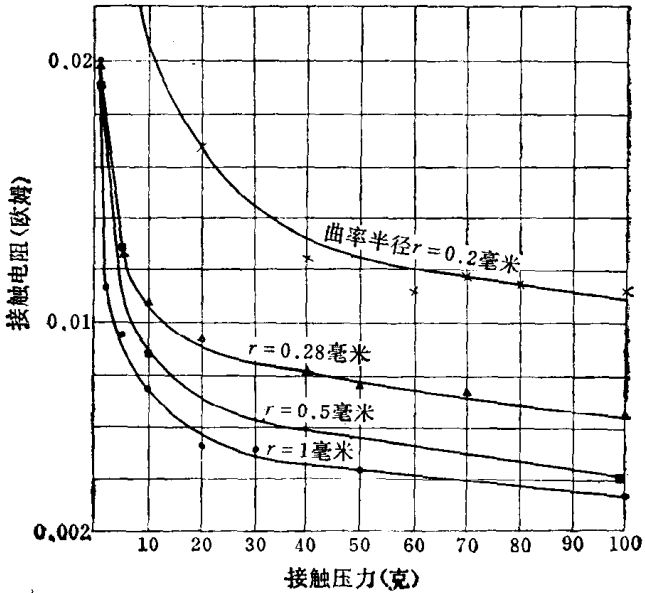


图1-2 接触电阻和接触压力及试样直径的关系

材料: AuAg40

(三) 几何形状

实验证明，接触元件的几何形状、尺寸大小和表面光洁度都影响接触电阻。图 1-2 是 AuAg40 合金在不同曲率半径下进行接触时，两接触元件之间的接触电阻数据。它说明，元件的曲率半径愈大，接触电阻愈小。

(四) 接触电流和通电流的时间

图 1-3 是 PdIr18 合金在一定接触负荷下，通过不同的接触电流时，测得的接触电阻数据，它说明，通过接点的电流增加时，接触电阻逐渐下降并趋于稳定。

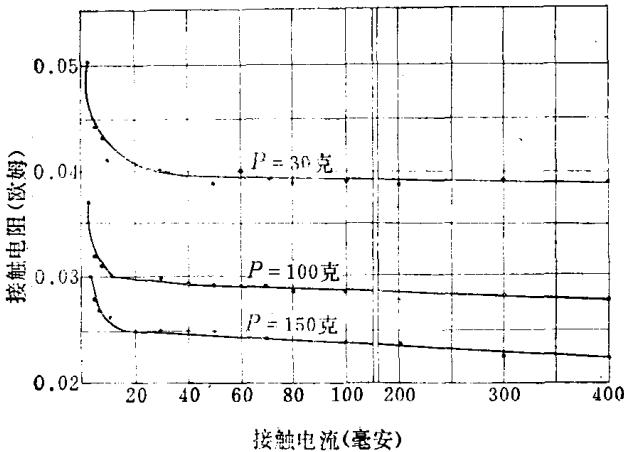


图1-3 接触电阻与通过接触处的电流大小的关系
材料：PdIr18

图 1-4 是 AuAg40 和 PdIr18 两种合金在一定接触负荷和接触电流下，随接触时间的延长，静态接触电阻的变化情况；随着接触时间的延长，接触电阻下降并趋于稳定。

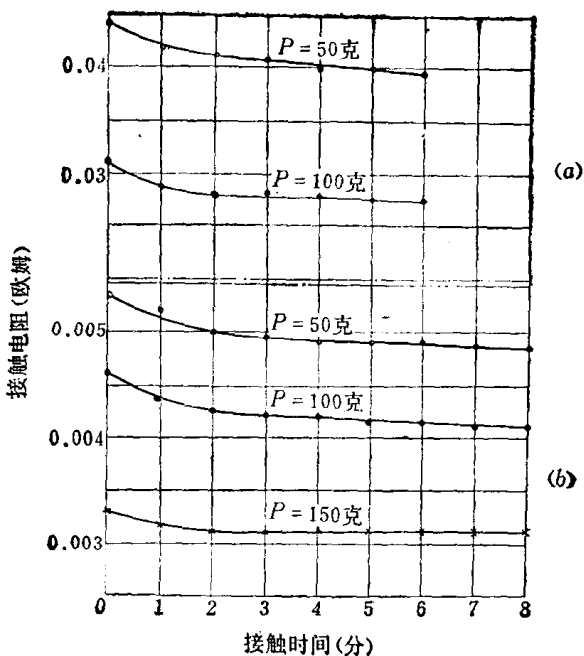


图1-4 材料的接触电阻与接触时间的关系
(a)—材料PdIr18, (b)—材料AuAg40。

(五) 其他

除了以上因素外, 接触材料的化学稳定性、抗电侵蚀性能和抗磨性能也影响接触电阻的大小和稳定性。

比如, 贱金属表面上生成的氧化物、硫化物; 银和银合金上的硫化物、氯化物; 贵金属如铂、钯及其合金表面上的有机污染膜以及各种尘埃的吸附和沉积, 都严重影响接触元件的接触电阻的稳定性。

接触元件在工作中因受电火花或电弧的高温作用, 可能产生金属液桥、材料转移或喷溅等电侵蚀现象, 因而破坏接

触元件的表面光洁度和几何形状。同时，电弧的高温作用也使材料和周围的气体产生化学反应，从而使接触电阻产生变化。此外，高温作用还影响材料的硬度和电阻率。

接触元件在相对运动和滑动时，因机械磨损而产生的磨损碎片及划痕也破坏元件的表面光洁度和几何形状，使接触电阻不稳定。

上述各种因素，从实用情况说，以接触压力对接触电阻的影响最大，当接触压力很小(在 5 克以下)时，接触压力微小的变化将使接触电阻值的大小产生很大的波动。

总起来说，接触元件在工作中的接触电阻是否稳定，和接触元件所处的工作条件及其本身的物理、化学性能及电学、力学性能有密切关系。但是，什么因素对接触电阻起主要影响，还有必要从理论上加以讨论，换句话说，有必要了解接触元件在相互接触时，是怎样产生电阻的？

经过实验和研究，人们发现，接触元件在接触过程中所产生的电阻，是由两种电阻造成的。一种电阻称为“收缩”电阻，又称为“束集”电阻，另一种电阻称为薄膜电阻。

下面，对收缩电阻和薄膜电阻产生的机理分别进行讨论。

第三节 收缩电阻

大家知道，一个接触元件，不管经过多么细致的研磨和抛光，从微观上看，其表面总是凹凸不平的，因此，当两个接触元件彼此接触时，其表面不可能完整地接触，也就是说，实际的接触面积要比“视在”的接触面积小。

正如图 1-5 所示，真正接触的地方，只是个别的区域，

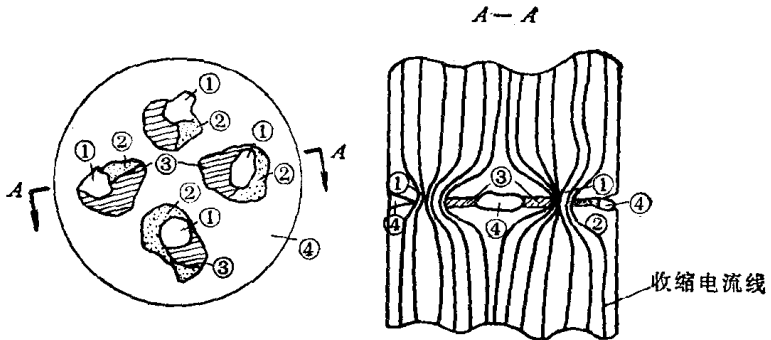


图1-5 接触表面模型图及收缩电流线示意图

即图中①、②、③所指的区域。而④所指的区域并没有真正接触。电流仅仅通过①、②、③所指的这些真正的接触面或点，而在这些点中，接触的情况也不完全相同，其中有些点是所谓的“金属”接触，即①所指的那些点。而有些点则是一些覆盖在接触处的单分子薄膜，即②所指的那些点。这些点只能依靠孔道效应和穿透薄膜的金属桥进行导电，属于“半金属”（或半导体）接触。还有一些接触的点，虽然也接触在一起，但由于覆盖着完全不导电的绝缘膜，如氧化膜及硫化膜（③所指的那些点）则不导电，至于视在接触表面的其他部份，由于表面的不平，实际上完全不相接触。即④所指的那些部份。

在①所指的那些金属接触区，当电流由一个接触元件流向另一接触元件时，电流线就受到收缩而产生阻力。好像水通过筛孔时受到收缩或者水由河道宽的地方流入河道狭窄的地方时受到收缩一样，其产生的阻力就称为收缩电阻。

根据图 1-5 的表面接触模型，假定在两个圆柱形接触元件相互接触时，仅存在一个真正是“金属”接触的点，即号

码①所示的接触点只有一个，那么，该“金属”接触处所具有的电阻应为：

$$R_c = \frac{\rho}{2} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{r} \right) \quad (1-1)$$

式中 ρ —— 接触材料的电阻系数；

r —— 圆柱体接触元件的半径；

a —— “金属”接触的点①的面积半径。

由于 r 远远大于 a ，所以 $\frac{\rho}{2r}$ 可以略去不计，

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

如果两接触元件是电阻率不同的两种材料，且电阻率分别为 ρ_1 和 ρ_2 ，那么，

$$R_c = \frac{(\rho_1 + \rho_2)}{2} \cdot \frac{1}{2a} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4a} \quad (1-3)$$

当“金属”接触的点①的数目 $n > 1$ 时，真正的接触面积之总和 $A = n\pi a^2$ ，此时，

$$R_c = \frac{\rho}{2na} = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi}{nA}} \quad (1-4)$$

这就是说， R_c 的大小取决于接触的点的数目 n 和总接触面积 A 的大小。

如果在两个接触元件之间加上接触压力，接触处将因此而产生塑性变形并增加实际的接触面积，根据接触材料的硬度和接触压力之间的关系

$$H = \frac{P_K}{A} \quad (1-5)$$

可得出

$$R_c = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi H}{n P_K}} \quad (1-6)$$

式中 P_K ——接触压力，
 H ——接触材料的硬度。

从方程式(1-6)可以看出，接触元件之间的收缩电阻与材料的电阻率成正比，与材料硬度的平方根成正比，与接触压力和接触面积点的数目 n 的平方根成反比。从这一理论推导，再回头看前面所列的图 1-1 到图 1-4 的实验结果就可一目了然。

方程式(1-6)中虽然没有表示出接触电阻和通过的电流大小和通电流的时间的关系，但是，通电电流的大小和时间长短将影响材料的硬度和电阻率。如果接触电流增加，接触时间延长，那么接触部位的温度将升高，材料的电阻率 ρ 也将按 $1 + \frac{2}{3} \alpha \theta$ 这一系数增加(α 是电阻温度系数， θ 是温度)，那么接触电阻也将随电阻率的增加而增加。但是，在另一方面，因温度的增加，会使材料软化，硬度降低，从而增加接触面积。在图 1-3 和图 1-4 的实验中，由于接触压力较大，后一因素起主导作用。这样，两种因素综合抵消的结果，就出现了接触电阻随通电电流的增加和时间的延长而降低的趋向。

关于接触电阻受温度的影响，可以从理论上进行推导。

根据焦耳定律，接触元件在接触部位的温度 θ 在理论上等于

$$\theta = \frac{U^2}{8\rho\lambda} \quad (1-7)$$

式中 U ——接触部位的电压降，伏特；