

143601

TM50/
2727

电接触和电接触材料

(基础、材料性能、工艺,
在电信及电工技术中的应用)

[德] A. 凯尔 W.A. 默尔 主编
E. 维纳里库
赵华人 陈昌图 陶国森 译

机械工业出版社

(京)新登字054号

本书由三位德国著名学者主编，并由35位专家分别撰写的。它全面、系统、深入地论述了电接触和电接触材料科学与技术。全书共分五章：第一章电触头的理化效应；第二章触头材料；第三章电触头制造工艺；第四章电触头应用实例；第五章附录。本书尤其对触头的理论和在各类高低压电器中的应用，作了详尽叙述。本书内容丰富，附有大量图表和参考文献，具有较高的理论和实用价值，全面反映了电接触领域80年代初期的国际先进水平。本书不仅是从事电接触和电接触材料的研究、制造和检测人员的必备参考书，而且对电工电子技术和电气工程用的各种电器产品的开发、设计制造和应用，也具有重要参考价值。

本书主要供从事电接触和电接触材料以及电器研究、设计与制造的科技人员阅读，也可供大专院校有关专业师生参考。

Elektrische Kontakte und ihre Werkstoffe

Herausgegeben von

A. Keil, W. A. Merl, E. Vinaricky

Springer Verlag 1984

电接触和电接触材料

(基础、材料性能、工艺、在通信及电工技术中的应用)

(德) A. 凯尔 W. A. 默尔 E. 维纳里库 主编

赵华人、陈昌图、陆国光 译

责任编辑：秦起佑、张沪光 责任校对：马志正

封面设计：肖晴 版式设计：王颖

责任印制：王国光

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街1号)

邮政编码：100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 850×1168¹/₃₂·印张 20·字数 519千字

1993年8月北京第1版·1993年8月北京第1次印刷

印数 0 001—2 100·定价 25.00元

ISBN 7-111-03425-2/TM·426

译者的话

现在呈献给读者的《电接触和电接触材料》一书，是由三位德国著名学者主编，35位专家分别撰写的。其内容之丰富，论述之精深，在电接触领域是绝无仅有的。它反映了80年代初期这一领域的国际先进水平，具有很高的学术性和实用性。该书对我国电接触和电接触材料的理论研究、产品开发和应用，以及电机、电器的设计和制造，有着重要参考价值。我们能为我国有关的研究人员和技术人员，提供这样一本高水平的参考书而感到高兴。

本书翻译工作由全国电触头材料行业归口单位机械电子工业部桂林电器科学研究所的邬雄飞高级工程师（研究员级）负责组织，并审阅全部译稿。本书第一章由陶国森、赵华人和陈昌图译，邬雄飞、陈国基高级工程师技术审校；第二章和第三章由赵华人译，林景兴高级工程师（研究员级）技术审校；第四章的4.1~4.3.1.3.4节由陈昌图译；4.3.1.3.5~4.4.2.2.3节由赵华人译，4.4.2.2.4~4.4.4.2节由陶国森和赵华人译，本章由陈国基和何振赢高级工程师（研究员级）技术审校；第五章由赵华人译，邬雄飞技术审校。全书译稿由陈昌图和赵华人统一校对。

本书根据德文原版（1984年）译出。由于译者水平有限，译文错误之处，恳请读者批评指正。

前 言

本书第一版《电接触材料》是根据E. h. W. Köster教授的提议，于1960年编入《纯金属学和应用金属学丛书》出版的。其内容均来源于实践，目的是补充R. Holm和E. Holm的重要著作《电接触》。该书第四版即最新版(1967年版)当时正在修订。

编撰本书新版时，作者面临的任务是，既要填补最近物理学基础方面至今尚存在的空白，又要考虑实践经验和解决技术难题方面极为丰富的材料。因此有必要更改书名，并邀请有关专家参加编写。这一计划的实现最终使本书以全新面貌出现，其篇幅也比原来扩大一倍。

虽然半导体技术已进入包括开关技术在内的许多领域，但机械操动和电磁操动的开关无疑仍然具有重要意义，因而本书对其性能和应用也作了概括的介绍。

DODUCO贵金属公司对本书编写给予经济资助，谨在此表示感谢。

A. Keil[†]

本书第一版的主编Albert Keil教授作为编者和作者没能看到现在出版的修订新版。1981年7月16日，他因心脏病猝发而去世，其时离计划向出版社交稿的时间仅差几个星期。

本书的出版有赖于Keil教授的多年准备。他将本书看作是他的毕生事业，书中最成功的是实现了触头物理学与触头工艺学的结合。他以特有的顽强毅力，为本书的内容和整体风格的形成，整理并补充了由他撰写的各节，一直到他生命的最后一息。现在，这些章节仍保留了他的风格，未作修改；对于他提出粗略草稿的

几部分，仅由编者稍作文字加工，未作内容上的修订。他写的前言草稿基本未加改动，即交付出版。

在他逝世前的两年中，是他的意志胜过了他的体力，在此期间的编辑工作中，他得到了Vinaricky先生忘我帮助。因此，根据死者的遗愿，Vinaricky先生也作为编者。没有Vinaricky先生的积极参与，本书是不可能这么快完成的。

W. A. Merl

近20年来，研究工作取得的新成就使静止接触、转换接触和滑动接触各节的内容更为充实。烧结材料和电镀技术的发展则丰富了“触头材料”一章的内容。其中，新增加的材料有碳/石墨和导电聚合物、热双金属等。“触头制造工艺”部分补充了某些新方法和新产品，例如选择性电镀、焊接方法、精细型材等等。修改最多的是第四章“电触头的应用实例”，其中主要反映了电触头用户的意见。这一章篇幅较大，内容丰富，我们认为是合适的，它反映了电触头应用广泛，品种繁多，并对电触头提出了各种不同要求。其中也介绍了新型开关，例如真空开关。“附录”部分概述了电接触统计学，若没有这种统计学，就不能充分描述触头工作时的特性。

各章节反映各位作者对有关领域的见解。编者仅作些小的增删和提示，以便读者容易发现本书各章节之间的联系，并避免重复。在此，我们谨对各位作者的谅解表示感谢。

这里，还要特别感谢两位作者，他们全力支持本书的编写工作。维也纳的Werner Rieder教授和纽伦堡的Karl-Werner Jäger教授(当时在DODUCO公司工作)认真完成严格的审定工作后，还参与编写开关电弧、转换触头和开关装置结构型式等重要部分。

此外，我们还要感谢那些编写说明、图表和参考文献的默默无闻的助手，特别是Siegrun Vinaricky夫人和Ursula Remer-Thomasberger夫人，她们耐心细致地做了大量收集工作，并重抄了补

充的文字说明。

我们谨向DODUCO公司(Pforzheim)和 INOVAN-Stroebe公司 (Birkenfeld) 致谢, 感谢两公司对编写工作的巨大支持。除DODUCO公司对Keil教授多年给予的经济资助外, 两家公司都派出专家参加撰写工作; 在组织工作方面, 他们也给予多方面支持。他们的合作是本书得以出版的重要条件。

最后, 还要感谢Springer出版社的支持和该社工作人员在多年合作中给予的谅解, 感谢该社对本书极为细致的装帧。

W. A. Merl

E. Vinaricky

1983年10月

目 录

第一章 电触头的理化效应	1
1.1 静接触	1
1.1.1 基本定义	1
1.1.2 无表面膜的触头	3
1.1.2.1 引言	3
1.1.2.2 接触面	5
1.1.2.2.1 定性描述	5
1.1.2.2.2 模型理论与外形测量理论	8
1.1.2.3 接触电阻	13
1.1.2.3.1 微观面分布的收缩电阻	13
1.1.2.3.2 收缩电阻与接触力的关系	15
1.1.2.3.3 接触点的 $R-U$ 特性曲线	19
1.1.2.3.4 接触电压和收缩电阻与温度的关系	21
1.1.2.4 粘附与熔焊	24
1.1.2.4.1 无负载电流时的粘附与熔焊	24
1.1.2.4.2 电触头熔焊性的基本概念	25
1.1.2.4.3 有负载电流时静触头的熔焊性	27
1.1.3 有表面膜的触头	34
1.1.3.1 表面膜的形成	34
1.1.3.2 表面电阻	35
1.1.3.3 有表面膜触头的接触电阻与接触力	39
1.1.3.4 表面膜的熔化接触	41
1.1.3.5 快速形成表面膜的实验方法	45
1.2 转换接触	52
1.2.1 引言	52
1.2.2 直流电路中的转换过程	53
1.2.2.1 熔桥与电弧临界曲线	53

1.2.2.2	在实际条件下通信技术中的转换过程	55
1.2.3	交流电路中的转换过程	55
1.2.3.1	合闸相角及上冲因数	55
1.2.3.2	动力工程中的转换过程	57
1.2.4	关于气体放电的基本概念	58
1.2.4.1	气隙中载流子的形成	58
1.2.4.2	自持无光放电 (Townsend-效应)	59
1.2.4.3	辉光放电	60
1.2.4.4	电晕放电	61
1.2.4.5	电弧的特征	61
1.2.4.6	金属电子逸出	62
1.2.4.6.1	热发射	62
1.2.4.6.2	场致发射	63
1.2.4.6.3	热场致发射 (T-F)	64
1.2.4.6.4	碰撞产生的电子发射	64
1.2.4.6.5	光子引起的电子发射 (光电效应)	64
1.2.4.7	电弧压降区	64
1.2.4.7.1	阳极机理	64
1.2.4.7.2	阴极机理	65
1.2.4.8	电弧特性曲线	65
1.2.4.9	不稳定状态	67
1.2.4.10	等离子束	67
1.2.4.10.1	形成与特性	67
1.2.4.10.2	电极材料的影响	70
1.2.4.10.3	等离子束对触头的作用	71
1.2.4.11	“短弧”	72
1.2.5	气体放电引起的触头表面应力	74
1.2.5.1	直流电流时的材料转移	75
1.2.5.1.1	从阳极向阴极的材料转移 (“细转移”)	75
1.2.5.1.2	从阴极向阳极的材料转移 (“粗转移”)	79
1.2.5.1.3	大电流范围内的材料转移	80
1.2.5.1.4	交流电时的材料转移	81
1.2.5.2	电弧烧损	81

1.2.5.2.1	评定烧损特性的试验方法	84
1.2.5.2.2	烧损量的试验判据	84
1.2.5.2.3	在不同应用领域触头材料的烧损	86
1.2.5.3	闭合触头的熔焊	97
1.2.5.3.1	弹跳	98
1.2.5.3.2	无弹跳闭合的触头	99
1.2.5.3.3	弹跳闭合的触头	100
1.2.5.3.4	评定熔焊特性的试验方法	102
1.2.5.3.5	静止的触头与闭合的触头熔焊特性的比较	108
1.2.5.4	电弧运动特性	108
1.2.5.4.1	电弧运动现象	109
1.2.5.4.2	描述电弧运动的模型	110
1.2.5.4.3	电弧滞留时间	111
1.2.5.4.4	影响电弧迁移的最重要因素	114
1.2.5.5	开关操作后触头接触电阻的变化	115
1.2.6	开关装置的寿命	123
1.2.6.1	触头保护(“消弧”)与灭弧	124
1.2.6.1.1	在电信技术中采取的措施	124
1.2.6.1.2	在动力工程中采取的措施	129
1.3	滑动接触	139
1.3.1	金属滑动接触	139
1.3.1.1	干摩擦	139
1.3.1.1.1	运动摩擦Amonton-Coulomb定律	139
1.3.1.1.2	静摩擦向动摩擦过渡的Amonton-Coulomb定律	141
1.3.1.1.3	摩擦磨损机理	143
1.3.1.1.4	接插件电镀层的性能	147
1.3.1.2	滑动触头的润滑	149
1.3.2	在碳刷和受电弓上效应	153
1.3.2.1	引言	153
1.3.2.2	铜绿	153
1.3.2.3	电流传输	154
1.3.2.4	摩擦系数	155

1.3.2.5	换向	156
1.3.2.6	电气及机械干扰因素	157
1.3.2.7	磨损与寿命	159
1.4	触头上的特殊现象	161
1.4.1	金属须的形成	162
1.4.1.1	锡表面的金属须	162
1.4.1.2	银表面的金属须	163
1.4.1.3	电弧中金属须的生成	164
1.4.2	受电弧作用时的化学反应	165
1.4.2.1	电弧等离子体中的化学反应	165
1.4.2.2	气体放电后其接触面上的特殊化学反应	165
1.4.2.3	赋形	167
1.4.3	与塑料的化学反应	168
1.4.3.1	含钨有机金属化合物的形成	168
1.4.3.2	“褐色粉末”效应	168
1.4.3.2.1	摩擦聚合物	170
1.4.3.2.2	静态聚合物	171
1.4.3.3	有机物质的焦化	172
1.4.3.4	“活化”	173
1.4.4	开关电弧引起的机械形变	175
1.4.5	电弧、外壳壁与触头间的相互作用	176
1.4.5.1	外壳壁金属化	176
1.4.5.2	开关电弧对绝缘件的热作用	176
1.4.6	应力裂纹腐蚀	177
1.4.6.1	支承体材料上的应力裂纹腐蚀	177
1.4.6.2	塑料件上的应力裂纹腐蚀	178
1.4.7	手汗引起腐蚀的机理	178
1.4.8	硫化银的转移	178
1.4.9	“银迁移”	180
1.4.10	硅酮的作用	180
1.4.11	极端环境条件	181
1.4.11.1	低温	181
1.4.11.2	高压力	182

第1章参考文献	183
第二章 触头材料	196
2.1 熔炼法制造的触头材料	196
2.1.1 银 (Ag)	196
2.1.1.1 纯银	196
2.1.1.1.1 物理性能值和工艺特性值	196
2.1.1.1.2 化学性能	197
2.1.1.1.3 工艺性能	198
2.1.1.1.4 应用	198
2.1.1.2 银合金	199
2.1.1.2.1 添加少量金、钯或铂的影响	199
2.1.1.2.2 含非贵金属的银合金	200
2.1.1.2.3 钯含量较高的银-钯合金	202
2.1.1.2.4 发展趋势	203
2.1.1.2.5 银-铜合金	203
2.1.2 金 (Au)	204
2.1.2.1 纯金	204
2.1.2.1.1 物理性能值和工艺特性值	204
2.1.2.1.2 化学性能	205
2.1.2.1.3 工艺性能和应用	205
2.1.2.2 金的合金	205
2.1.2.2.1 含银和铜组分的二元合金和多元合金	205
2.1.2.2.2 抗氧化性好的低含金量合金	208
2.1.2.2.3 含镍和钴的金合金	208
2.1.3 钯 (Pd)	210
2.1.3.1 纯钯	210
2.1.3.1.1 物理性能值和工艺特性值	210
2.1.3.1.2 化学性能	211
2.1.3.1.3 工艺性能和应用	211
2.1.3.2 钯合金	212
2.1.3.2.1 PdAg ₄₀ 和钯多元合金	212
2.1.3.2.2 钯-铜合金	212
2.1.3.2.3 含镍、钨、钼和铱的钯合金	213

2.1.4	铂 (Pt)	214
2.1.4.1	纯铂	214
2.1.4.1.1	物理性能值和工艺特性值	214
2.1.4.1.2	化学性能	215
2.1.4.1.3	工艺性能和应用	215
2.1.4.2	铂合金	215
2.1.5	其它铂族金属	216
2.1.6	水银 (Hg)	216
2.1.6.1	物理性能	216
2.1.6.2	化学性能	217
2.1.6.3	应用	217
2.2	电镀法制造的触头材料	218
2.2.1	引论	218
2.2.2	金属电镀方法	218
2.2.2.1	镀银	218
2.2.2.2	镀金	219
2.2.2.3	铂族金属的电镀沉析	221
2.2.2.4	镀铜	221
2.2.2.5	镀镍	222
2.2.2.6	镀锡	222
2.2.3	无电流金属沉析法	222
2.2.3.1	离子交换法	223
2.2.3.2	还原法	223
2.2.3.2.1	无电流镀铜	224
2.2.3.2.2	无电流镀镍	224
2.2.4	电镀层的性能及其检验	224
2.2.4.1	镀层厚度	224
2.2.4.2	孔隙率	224
2.2.4.3	粘附强度	225
2.2.4.4	硬度	225
2.2.4.5	延展性	226
2.2.4.6	受摩擦应力作用的磨损现象	227
2.2.4.7	电导率	227

2.2.4.8	可钎焊性	227
2.2.4.9	镀层的扩散特性	229
2.3	烧结法制造的触头材料	230
2.3.1	引论	230
2.3.2	烧结法制造的金属	231
2.3.2.1	钨 (W)	231
2.3.2.2	钼 (Mo)	234
2.3.2.3	铼 (Re)	235
2.3.3	烧结法制造的复合材料	236
2.3.3.1	烧结法	236
2.3.3.2	金属-金属氧化物复合材料	238
2.3.3.2.1	用粉末冶金法制造银氧化锡	238
2.3.3.2.2	其它银-金属氧化物材料	240
2.3.3.3	金属-金属复合材料	242
2.3.3.3.1	银-镍	242
2.3.3.3.2	银-钨, 银-钼	245
2.3.3.3.3	铜-钨, 铜-钼	247
2.3.3.4	金属-石墨复合材料	247
2.3.3.4.1	银-石墨	247
2.3.3.4.2	铜-石墨	250
2.3.3.5	金属-金属碳化物	250
2.3.3.5.1	银-碳化钨、银-碳化钼、铜-碳化钨、铜-碳化钼	250
2.3.3.6	三组分或多组分复合材料	251
2.3.3.6.1	银-镍-石墨	252
2.3.3.6.2	银-氧化铜-石墨	252
2.3.3.6.3	钨-铜-镍	252
2.3.4	其它方法制造的复合材料	253
2.3.4.1	内氧化法	253
2.3.4.2	内氧化法制造的银-氧化锡	254
2.3.4.2.1	具有特殊金相组织形态的银氧化锡	256
2.3.4.3	银-氧化物、银-氧化钨等	255
2.3.4.4	银-氧化镁-氧化镍	259

2.4	少气触头材料	260
2.4.1	少气铜	260
2.4.2	含高熔点组分的复合材料	261
2.5	碳和石墨 (C)	262
2.5.1	引论	262
2.5.2	晶格和滑动性能	262
2.5.3	制造方法和材料种类	263
2.5.3.1	硬碳、天然石墨和碳石墨	265
2.5.3.2	人造石墨	265
2.5.3.3	特种石墨	265
2.5.3.4	金属石墨	266
2.5.3.5	制造时性能的变化	266
2.6	接通用导电聚合物材料	266
2.6.1	引论	266
2.6.2	硅橡胶用作电接触材料的支承体材料	268
2.6.3	使用形态	269
2.6.3.1	各向导电薄膜	269
2.6.3.2	垂直表面导电的薄膜	270
2.7	支承体材料和导体材料	272
2.7.1	铝和铝合金	272
2.7.1.1	纯铝 (Al)	272
2.7.1.2	铝合金	273
2.7.2	铜和铜合金	274
2.7.2.1	工业纯铜 (Cu)	274
2.7.2.1.1	制造和性能	274
2.7.2.1.2	应用	277
2.7.2.2	自淬硬的铜合金	278
2.7.2.2.1	低合金化铜合金	279
2.7.2.2.2	铜-锌合金 (黄铜)	282
2.7.2.2.3	铜-锡合金 (锡青铜)	285
2.7.2.2.4	铜-镍-锌合金 (德银)	287
2.7.2.2.5	铜-银-(镉)合金 (银青铜)	287
2.7.2.2.6	其它自淬硬的铜合金	290

2.7.2.3	可时效硬化的铜合金	296
2.7.2.3.1	铜-铍合金(铍青铜)	297
2.7.2.3.2	其它可时效硬化的铜合金	303
2.7.3	镍和镍合金	310
2.7.3.1	工业纯镍 (Ni)	310
2.7.3.2	镍合金	312
2.7.3.2.1	镍-铜合金	312
2.7.3.2.2	镍-铍	312
2.7.4	其它支承体材料	314
2.7.4.1	铁基材料 (Fe)	314
2.7.4.1.1	钢	314
2.7.4.1.2	铬-镍钢	314
2.7.4.1.3	磁性材料	315
2.7.4.2	钴基材料 (Co)	315
2.8	热双金属	315
2.8.1	引论	315
2.8.2	历史	316
2.8.3	概念	316
2.8.4	热挠度	317
2.8.5	内应力	319
2.8.6	成型体	320
2.8.7	元件的选择	324
2.8.8	电阻	326
2.8.9	腐蚀	327
2.9	钎料	327
2.9.1	引论	327
2.9.2	硬钎料	329
2.9.2.1	合金	329
2.9.2.2	用焊剂和不用焊剂的钎焊	330
2.9.3	软钎料	331
2.9.3.1	合金体系概述	331
2.9.3.2	含铅、镉、锡、锌成分的合金	332
2.9.3.3	含铋的合金	334

2.9.3.4	含钢的合金	334
2.9.3.5	机械性能	334
2.9.3.6	软钎焊用的焊剂	335
2.10	导电胶粘剂和漆	336
2.10.1	导电胶粘剂	336
2.10.2	导电漆	337
	第2章参考文献	338
第三章	触头制造工艺	343
3.1	单个触头的制造	344
3.1.1	整体触头铆钉	344
3.1.2	双金属触头铆钉	344
3.1.3	硬钎焊覆层触头铆钉	346
3.1.4	球形触头	347
3.1.5	触头薄片	347
3.1.5.1	整体触头薄片	347
3.1.5.2	焊接触头	349
3.2	半成品的制造	349
3.2.1	整体半成品	350
3.2.2	贵金属覆层的半成品(触头双金属)	350
3.2.2.1	热压焊接	350
3.2.2.2	辊轧覆层	352
3.2.2.3	带材钎焊	353
3.2.2.4	滚焊法	354
3.2.2.5	气相覆层法	354
3.2.2.5.1	高真空蒸镀法	355
3.2.2.5.2	阴极溅射法	355
3.2.2.5.3	化学蒸镀覆层法(CVD)	356
3.2.2.5.4	覆层性能	356
3.2.2.6	电镀	357
3.2.2.6.1	大批量生产零件的电镀	357
3.2.2.6.2	带材和线材的电镀	358
3.2.2.6.3	选择性电镀	358
3.2.2.6.4	脉冲镀覆	361

3.2.2.7	对薄金覆层使用的一般说明	361
3.2.2.8	覆贵金属层的特殊方法	362
3.2.2.9	精细型材	362
3.2.2.10	条状镀锡带材	363
3.2.2.11	铣削梯形带材	363
3.3	单个触头的组装方法	364
3.3.1	机械紧固	364
3.3.2	硬钎焊	365
3.3.2.1	火焰钎焊	366
3.3.2.2	电阻钎焊	366
3.3.2.3	高频钎焊	367
3.3.2.4	炉中钎焊	367
3.3.2.5	钎焊接头的检验	368
3.3.3	焊接	369
3.3.3.1	金属线材对焊	369
3.3.3.2	线段和型材段的焊接	370
3.3.3.3	薄片的焊接	371
3.3.3.3.1	凸焊	371
3.3.3.3.2	直接焊接	371
3.3.3.4	球的焊接	372
3.3.3.5	闪光对焊	372
3.3.3.6	电子束焊接	373
3.3.3.7	激光焊接	373
3.3.3.8	超声波焊接	374
3.3.3.9	焊接接头的检验	374
3.4	触头设计说明	375
3.4.1	接插件	375
3.4.2	继电器	375
3.4.3	辅助电流开关	378
3.4.4	电动机接触器	379
3.5	电刷	380
3.5.1	换向器和滑环的电流传输	380
3.5.2	电车受电器	382