

常用符号表

A ——面积	T_1 ——电热元件的绝对温度
b ——宽度	T_2 ——炉内绝对温度
C_t ——电热材料在温度 $t^\circ\text{C}$ 时的电阻修正系数	t ——厚度、温度
c ——比热	t_a ——平均温度
D ——直径、硅碳棒冷端直径、硅碳管外径	t_m ——锰铜电阻对温度曲线的最高点温度
d ——密度、硅碳管内径	U ——电压
E ——热电动势、弹性模量	U_L ——硅钼棒冷端电压
E_a ——对铜平均热电动势	U_R ——硅钼棒热端电压
F ——接触电压、推力	U_1 ——每支硅钼棒电压
Δf ——挠度的变化值	u ——单位体积贮能
G ——切变模量	V ——体积
H_{10} ——弹性后效	V_0 ——最小起弧电压
I ——电流	w ——元件表面负荷
I_0 ——最小起弧电流	Z ——元件支数
I_c ——截止电流	Z_0 ——波阻抗
K ——应变灵敏系数、比弯曲	α ——电阻温度系数、一次电阻温度系数、线膨胀系数
$L(l)$ ——长度	α_a ——平均电阻温度系数
M ——转矩	α_m ——电阻温度系数的最大容许值
m ——带材宽厚比	β ——二次电阻温度系数、螺旋形元件偏转角度
P ——元件功率	β_e ——弹性模量温度系数
P_L ——每支硅钼元件冷端功率	β_f ——频率温度系数
P_R ——每支硅钼元件热端功率	γ ——切应变
P_T ——电炉总功率	δ ——电阻元件由温度变化引起的阻值误差、伸长率、内耗角、厚度
P_1 ——每支元件功率	$ \delta_a $ ——一定温度范围内的平均阻值误差绝对值
Q ——机械品质因数	$ \delta_m $ ——一定温度范围内最大阻值误差绝对值
R ——电阻	e ——应变
R_k ——接触电阻	θ ——温度
dR ——电阻 R 的变化值	ρ ——电阻率
R_t ——温度 t 时的电阻值	ρ_L ——硅钼棒冷端电阻率
R_1 ——温度 t_1 时的电阻值	ρ_R ——硅钼棒热端电阻率
R_2 ——温度 t_2 时的电阻值	ρ_t ——元件在温度 t 时的电阻率
R_{10} —— 10°C 时电阻值	ρ_{20} ——在 20°C 时的电阻率
R_{20} —— 20°C 时电阻值	σ ——应力
R_{40} —— 40°C 时电阻值	σ_b ——抗拉强度
r ——螺旋形元件半径	σ_{bc} ——弯曲弹性极限
r_L ——硅钼棒冷端电阻	σ_p ——比例极限
r_R ——硅钼棒热端电阻	τ ——剪应力
r_1 ——每支硅钼棒电阻、力臂长度	Φ ——条片元件偏转角度
S ——元件表面积	

第1章 电触头材料

1 概述

在电力和电信系统中,许多电气元件需要使用各种型式的电触头。电触头通常可划分为:开闭触头、固定触头和滑动触头三种类型。

开闭触头在开关电器中承担接通、载流、分断和隔离的任务。主要要求接触电阻低,操作可靠,和使用寿命长。

固定触头在线路系统中承担母线和导线的固定连接。主要要求能长期抵抗大气腐蚀,保持良好接触。

滑动触头用于电机车集电器和仪表电讯装置中电位器等的滑动连接处。主要要求摩擦系数小和使用寿命长。

本章所述范围仅限于其中的开闭触头一类。这类触头在不同条件和不同装置中的使用要求下,有很大差别。如它们所分断的电流可小至热电偶回路中的微安级,大至大型油断路器中的兆安级。它们的操作环境可从化工厂中的高度腐蚀性气氛直至高度清洁的真空环境。在备用照明系统中的触头长期不动作,而有的触头则要求在开闭几百万次内能可靠地动作。这样广泛的使用对象必然对电触头材料提出多种多样的性能要求。这些要求也与开闭触头在操作过程中所产生的各种物理现象有密切联系。

1.1 电触头在操作过程中的物理现象

(1) 接触电阻 接触电阻的产生原因有两个:一是当两触头相互接触时,仅有少数突出点真正接触,结果使电流线收缩至有限几个载流点。这种现象形成了所谓收缩电阻。二是由于表面膜影响,形成所谓表面膜电阻。

(2) 电磨损(电弧腐蚀) 开闭过程中的电弧作用能使触头表面的金属熔融、蒸发、飞溅而散失。这种现象称为电磨损。它决定触头的使用寿命。

(3) 机械磨损 触头在频繁的闭合过程中,承受着机械闭合力冲击。造成触头的变形、龟裂与剥落,统称为机械磨损。它将同样影响触头的使用

寿命。

(4) 熔焊 当触头在闭合状态下,由于通过很大的短路电流或过载电流,使触头发热而形成的熔焊称为静熔焊。当触头在闭合过程中,由于弹跳,产生电弧而形成的熔焊称为动熔焊。如触头熔焊后的焊接强度大于开关的机械分断力,触头就不能断开,会造成严重事故。

(5) 剩余电流 当触头分断一交流大电流时,电弧虽在电流自然过零点熄灭,但在触头间还流着一暂态微小剩余电流。它同触头材料的灭弧能力有关。如钨和石墨等在高温下发射电子,其剩余电流较大,其灭弧能力则较小。反之,如铜与银合金的剩余电流较小,其灭弧能力则较大。

(6) 电击穿 如触头间的开距较小,电压梯度较大,则触头虽在断开状态下,触头表层内较疏松颗粒易被电场拉出,吸引至对面触头,引起触头间的电击穿。这就失去了触头的隔离作用,同样会造成严重事故。

(7) 截止电流 当触头分断交流小电流时,往往发生过早灭弧,使电流在自然过零点P以前,突然下降至零,如图13.1-1所示。电流的这一突变值 I_c 称为截止电流。它同触头材料的材质有关。截止电流在电路中将引起一过电压。这过电压约等于 $I_c Z$ 。其中 Z 为电路的波阻抗。感性负荷如电动机等的波阻抗较大,其过电压也较高。如不设法降低,有击穿绝缘的危险。这种现象在真空接触器中较为明显。

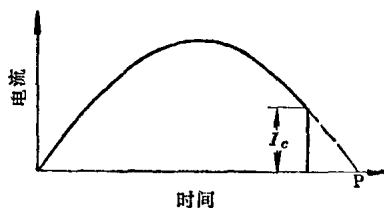


图 13.1-1 截止电流示意图

(8) 电弧特性曲线 各种触头材料具有不同的电弧特性曲线。以银为例,其电弧特性曲线如图13.1-2所示。如触头上的电压 V 与电流 I 位于图

中的曲线以下,则触头分断时不产生电弧。反之,如在曲线以上,则将产生电弧。曲线的左上端渐近于最小起弧电压 V_0 , 其右下端渐近于最小起弧电流 I_0 。故 V_0 与 I_0 愈高,触头愈不易起弧。

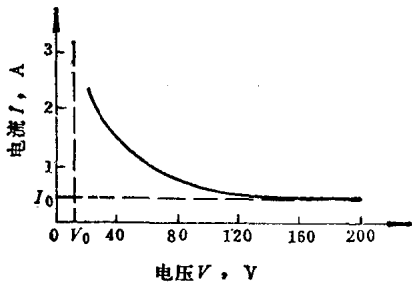


图 13-1-2 银的电弧特性曲线

(9) 材料转移 在直流下操作时,触头材料有从触头对的一方转移到对方的现象,称为材料转移。当触头间的电压与电流较小,处于图 13-1-2 中的曲线以下时,将不产生电弧。但由于触头分离时,阳极上的接点温度增高,阳极上面的熔融金属粘附在较冷的阴极上,造成材料从阳极向阴极的正向转移,使在阳极上留下一凹坑,阴极上出现一凸丘,破坏了触头的正常操作。

当触头间电压与电流超过了图 13-1-2 中的曲线时,开始出现电弧,使阴极受到正离子轰击而发热蒸发,造成材料从阴极向较冷阳极的负向转移。

1.2 对电触头材料的性能要求

上述各种现象在不同用途的触头中,表现的程度不尽相同。故不同的使用条件将对触头材料提出不同的性能要求。现分述如下:

强电用触头材料首先要求具有低的接触电阻,保证长时间通过额定电流时不会过热。其次是电磨损和机械磨损率小,能达到较长使用寿命。第三是抗熔焊性能好,在故障情况下能顺利分断电路。第四是剩余电流小,即灭弧能力强。当触头分断大电流时,在开关灭弧装置的配合作用下,能迅速熄灭电弧,不会引起电弧重燃或持续电弧。

真空开关触头是一种特殊的强电用触头。故所用触头材料也须满足上述各项性能要求。由于真空中的触头表面特别洁净,比在空气中更易熔焊,故要求具有更高的抗熔焊性能。在高压真空断路器中,触头间的开距小,电压梯度大,容易引起电击穿。故要求触头材料具有坚固而致密的组织,在强电场

作用下仍保持光滑完整的表面,使具有足够高的耐电压强度。真空中触头的灭弧能力较强,在分断小电流时,易引起过早灭弧,故要求触头材料具有足够小的截止电流。真空开关触头材料的含气量必须很低,以保证在电弧作用下,从材料中释放出来的极微量气体不影响灭弧室中的真空度。

弱电用触头材料也须具有低而稳定的接触电阻和小的电磨损率,使能长期保持可靠的电接触和具有较长使用寿命。这种触头的闭合力小,故机械磨损不是重要问题。此外,这种触头材料还要求具有较大的最小起弧电压 V_0 和最小起弧电流 I_0 值,使触头尽可能在无电弧情况下操作,避免电弧腐蚀。在直流下,则还要求材料转移小。

1.3 电触头材料的品种分类

对于上述各种性能要求,没有一种触头材料能全面满足。故须根据各种材料的不同特点加以选用。常用电触头材料的品种分类见表 13-1-1。

表 13-1-1 常用电触头材料分类表

类 别		品 种
强电用	复合触头材料	银-氧化镉,银-钨,铜-钨,银-铁,银-镍,银-石墨,铜-石墨,银-碳化钨
	真空开关触头材料	铜铍钨,铜铍银,铜碲钨,钨-铜铍钨,铜铁镍钴铍
弱电用	铂族合金	铂铱,钯银,钯铜,钯铱
	金基合金	金银,金镍,金锆
	银及其合金	银,银铜
	钨及其合金	钨,钨钼

2 常用电触头材料的品种、性能和用途

2.1 强电用触头材料

2.1.1 复合触头材料

a. 银-氧化镉 这种触头材料具有耐电磨损、抗熔焊和接触电阻低而稳定的特点。广泛应用于接触器、继电器等中,特别是在大电流交流接触器中,其电寿命比纯银和银-镍有很大提高。银-氧化镉所以有上述特性,是由于弥散的氧化镉粒子,起着以下

作用:

(1) 在电弧作用下,氧化镉分解,发生剧烈的蒸发,吹散电弧,并扫清触头表面,因而减少了电磨损,并保持着低的接触电阻。

(2) 氧化镉分解时,吸收大量的热,有利于电弧的冷却、熄灭和减少基体金属的损耗。

(3) 弥散的氧化镉粒子能增加熔融材料的粘度,减少金属的飞溅损耗。

(4) 蒸发的镉中的一部分,重新与氧结合,形成固态氧化镉,落回触头表面,阻止了触头的熔焊。

银-氧化镉常用的制造方法是共沉析法和内氧化法。内氧化法制品的耐电磨损性能较好,而共沉析法制品则抗熔焊性能较好。如果把共沉析法制品,再经热锻、热轧、或挤压等方法加工,提高其致密度,则既可保持抗熔焊的优点,又能提高耐电磨损性能。

在银-氧化镉中添加一或几种微量元素,如硅、铝、钙等能进一步细化晶粒,提高耐电磨损性能。

b. 银-钨 这种触头材料既具有银的良导电性和易加工性,又具有钨的高熔点、高硬度、耐电弧腐蚀、抗熔焊、材料转移小等特性。随着钨含量增加,其耐电弧腐蚀性能和抗熔焊性能提高,但其导电性能降低。

银-钨常用的制造方法有机械混粉法、共沉析法和浸渍法。如低压开关用触头材料的含钨量为30~40%,一般采用共沉析法制造;高压断路器用触头材料的含钨量为60~80%,一般采用浸渍法制造。

银-钨的缺点是接触电阻不稳定。随着开闭次数的增加,接触电阻增大,严重的可达原始值的10倍以上。其原因是在分断过程中,银-钨触头表面上产生三氧化钨(WO_3),钨酸银(Ag_2WO_4)等接触电阻高的薄膜。

c. 铜-钨 这种触头材料与银-钨性能相似,但比银-钨更易氧化,形成钨酸铜($CuWO_4$)薄膜,使接触电阻迅速增大,因此不宜用于空气开关。

铜-钨在油中不氧化,热容量大,耐电弧腐蚀和抗熔焊性能好,可用作油开关触头。

铜-钨主要用于高压断路器,含钨量都在60%以上,一般采用浸渍法制造。在电弧作用下,铜在2000°C左右蒸发,吸收热量,把钨骨架冷却到熔点以下,从而减少了电弧腐蚀。又由于毛细管作用,把熔融的铜液保持在钨骨架中,使其蒸发损耗受到抑制。

d. 银-铁 这种触头材料具有良好的导电、导

热、耐电磨损及加工性能。用在中、小电流等级的交流接触器上,其电寿命比纯银触头成倍提高。其缺点是抗熔焊性能较差和易受大气侵蚀,形成锈斑,但在一般情况下,不影响使用。通常采用共沉析法制造。

e. 银-镍 这种触头的接触电阻低而稳定,导电、导热性好,电磨损小而均匀,在直流下开闭时,材料转移比纯银少。其缺点是在大电流下,抗熔焊性能差,通常和银-石墨配对使用。

银-镍触头常采用机械混粉法或共沉析法制造。采用上述制造工艺时,在压型与烧结以后,如果再用热、冷挤压法加工,或采用纤维强化工艺,则触头电寿命能显著提高。

f. 银-石墨 这种触头材料的导电性好,接触电阻低,抗熔焊,在短路电流下也不会熔焊。其缺点是电磨损大,灭弧能力较差,随着石墨含量增加,电磨损量增大。一般含石墨量不超过5%。常和银-镍配对使用。其制造方法和银-镍相同。烧结后再经热、冷挤压的银-石墨触头材料,其电寿命也可成倍提高。

g. 铜-石墨 这种触头材料的制造方法与银-石墨大致相同。其机械强度比银-石墨高,价格较低,但比银-石墨易氧化。

h. 银-碳化钨 这种触头材料的接触电阻比银-钨稳定,抗熔焊性能比银-钨好。但质硬,可加工性较差。可与银-镍配对使用。

以上常用复合触头材料的物理性能和用途见表13.1-2。

2.1.2 真空开关触头材料

a. 铜铋铈合金 这种合金以导电性良好的铜为基,添加0.5~1%具有低熔点、高蒸汽压的铋及少量稀土金属铈。其中铋在合金凝固时析出于铜的晶界上。铋性脆,且凝固时膨胀,产生高应力,使焊接面脆弱,易于拉断,故具有优越的抗熔焊性能。铈起着细化晶粒和改善合金机械性能的作用。因铋在铜中的固溶度很低,故合金的导电率接近于铜。其灭弧能力也较大。其缺点为电弧腐蚀较大。又由于铋的存在,组织不够致密,其中较疏松颗粒易被强电场拉出触头表面,影响其耐电压强度。它适用于真空断路器。物理性能见表13.1-2。

b. 铜铋银合金 这种合金的特点是在含铋

表 13-1-2 常用强电用电触头材料的物理性能和用途

名 称	代表符号	密 度 g/cm ³ 不小于	电阻率 μΩ·cm 不大于	布 氏 硬 度 kgf/mm ²		抗弯强度 kgf/mm ² 不小于	用 途
				硬态② 不小于	软态② 不小于		
银-氧化镉	Ag-CdO12	9.75	2.30	55		33	低压接触器、自动 开关、继电器等
	Ag-CdO15	9.65	2.60	65		34	
	Ag-CdO12①	10.20		70			
	Ag-CdO15①	10.10		80			
银-钨	Ag-W30	11.90	2.30	80		38	低压自动开关、高 压断路器等
	Ag-W40	12.50	2.65	85		40	
	Ag-W70	14.80	3.40	180	120	65	
铜-钨	Cu-W50	12.00	3.00	130	105	57	高压断路器等
	Cu-W60	12.80	3.50	160	115	60	
	Cu-W70	14.00	4.10	200	160	65	
	Cu-W80	15.10	5.20	220	180	70	
银-铁	Ag-Fe7	10.00	2.00	60			低压中小电流等级 接触器、自动开关等
银-镍	Ag-Ni10	10.10	1.80	50			低压中小电流等级 接触器、自动开关、精 密仪表、继电器等。常 与 Ag-C5 配对使用
	Ag-Ni30	9.75	2.70	75			
银-石墨	Ag-C5	8.50	3.20	35	23	15	与 Ag-Ni30 配对， 用在自动开关、高压 磁吹开关、铁道信号 继电器等
铜-石墨	Cu-C5	7.00	3.40	40	30	20	自动开关
银-碳化钨	Ag-WC20	11.20	2.50	80			低压自动开关、高 压断路器等
	Ag-WC40	12.00	3.60	90			
	Ag-WC60	12.90	5.50	110			
铜铋铈	Cu-Bi-Ce	8.80	2.10	45	—		真空断路器
钨-铜铋锆	W-Cu-Bi-Zr	(13~14)		(260~278)	—		真空接触器
铜铁镍钴铋	Cu-Fe-Ni-Co-Bi	8.80	(10~11)	80	—		大容量真空接触器

① 用内氧化法制造。
② 软态是指烧结后,未经复压的产品。硬态是指烧结后再经复压的产品。

0.8~1.0 %的铜铋合金中添加2.3~2.7%银,使合金晶粒细化,以提高机械强度和耐磨损性能。其耐电压强度比铜铋铈更高。

c. 铜碲硒合金 这种合金含有弥散分布的Cu₂Te-Cu₂Se金属间化合物,机械强度较高,具有较高的耐电压强度。又因这些化合物在电弧下分解时吸收热量,有利于冷却和熄灭电弧,故其电弧腐蚀比铜铋铈小。碲、硒同铋一样,能提高抗熔焊性能。适

用于开断容量较大的真空断路器。

d. 钨-铜铋锆 这是用浸渍法制成的复合材料。在多孔性的钨骨架中渗入了铜铋锆合金。它们具有钨的耐电弧腐蚀和抗熔焊性能。适用于操作频繁真空接触器。铋的作用是减小截止电流,和提高抗熔焊性能。锆用来润湿钨粒,提高浸渍效果。由于钨的灭弧能力较小,这种触头材料的电流分断能力受到限制。其物理性能见表13-1-2。

e. **铜铁镍钴铋合金** 这种合金是以铜为基,添加铁、镍、钴等铁族元素,把截止电流降至铜的一半以下,但导电率较低。加铋可提高抗熔焊性能。因不含钨,灭弧能力较大。适用于开断容量较大的真空接触器和负荷开关。其物理性能见表 13-1-2。

2.2 弱电用触头材料

2.2.1 铂族合金

这类合金的熔点高,化学稳定性好,基本上不受各种酸碱等强腐蚀剂的侵蚀,在高温下不易氧化,故能保持稳定的电接触。但表面易产生暗黑色粉末(有机污染),使接触不良,且在直流下易产生材料转移,同时价格较贵。这类合金适用于强腐蚀条件下的精密触头,如航空电器、高灵敏继电器、电话继电器等。

a. **铂铱** 这种合金耐电磨损性能特别好,抗化学腐蚀性能比纯铂高,接触电阻稳定,硬度较高,能耐磨。含铱量在 30% 以下,容易加工。

b. **铱银** 这种合金比纯银有更好的耐变色和耐磨性。当含铱量在 50% 左右时,电磨损最小;大于 50% 时,形成硫化物薄膜的倾向性减少。含铱 40% 时,硬度与电阻率最高。其价格比铂与铱低。

c. **铱铜** 有良好的耐电磨损和耐机械磨损性能。含铜 40% 的合金,易从无序立方心结构变为有序结构,使导热系数显著增大。用它做阳极,可降低阳极温度,使材料转移显著减少。

d. **铱铌** 这种合金与铂铱相似,但密度与价格均比铂铱低。

2.2.2 金基合金

在弱电触头中,金基合金有逐步取代铂族合金的趋势。金基合金具有优良的导电、导热性,化学稳定性高,接触电阻低而稳定,而且抗硫化和抗有机污染的能力强。适用于各种继电器、自动化仪表和波段开关等。

a. **金银** 含银在 50% 左右时的电磨损最低,导电系数及导热系数最高,硬度最高。但抗熔焊性能较差。较适用于小电流。

b. **金镍** 在金中添加镍可减少熔焊现象。硬度与机械强度较高,接近于铂铱合金,可在部分产品上代替铂铱。金镍的材料转移小,适宜于无电弧电路中使用。缺点是易形成氧化膜。

c. **金锆** 金锆属于弥散硬化型合金,硬度较高,抗氧化性能较好。

2.2.3 银及其合金

这种合金广泛用于继电器和小功率接触器等。

a. **银** 银的导电率高,接触电阻低,加工性好,价格适中。银在放电作用下将被氧化,但在 200°C 时即分解,对接触电阻无影响。银触头易被硫化氢侵蚀,产生硫化物薄膜,使接触电阻增大,故不能同硫化橡胶等靠近使用。少量金属杂质,特别是铅、锡、锑、砷等将大大提高其电阻率,故银的纯度应不低于 99.99%,其材料转移的倾向较小。缺点是硬度较低,耐磨性较差。

b. **银铜** 银铜的机械强度、耐磨及抗熔焊性能比纯银好。但易变色,使接触电阻增大。

2.2.4 钨及其合金

这种材料适用于接触压力较大的振动器及信号继电器等。

a. **钨** 钨的硬度高、耐机械磨损、抗熔焊、最小起弧电压和最小起弧电流与铂接近,电磨损与材料转移比铂少,使用寿命长。缺点是易受大气侵蚀,形成氧化及硫化膜。特别在含酚蒸汽的潮湿大气中,将生成钨的有机化合物,使电流中断。

b. **钨钼** 这是一种连续固溶体,在含钼量为 34% 左右时,分断电弧下的阴极磨损最小,其余特性与钨同。

各种弱电触头材料的物理性能见表 13-1-3。

3 电触头材料应用中的有关问题

3.1 电触头材料的选用

3.1.1 强电用触头材料的选用原则

a. 线路保护开关和铁路信号继电器等为了保证安全,要求绝对不得熔焊,故须选用抗熔焊性能较好的触头材料,如烧结挤压法银-石墨,银-钨,银-碳化钨,银-氧化镉等。

b. 额定电流在 100A 以下的接触器可选用银-铁触头材料。如弹跳现象较严重可选用银-氧化镉。额定电流在 100A 以上的接触器大都选用银-氧化镉。因它具有良好的抗熔焊、耐电磨损和灭弧性能。

表 13-1-3 弱电用触头材料的物理性能

系列	名称	代表符号	熔 点 °C	密 度 g/cm ³	电阻率 μΩ·cm	导热系数 W/(cm·°C)	布氏硬度 kgf/mm ²	最 小 起 弧		材料转移 倾 向
								电压 V_0 V	电流 I_0 A	
铂族合金	铂铱	PtIr10	1780	21.6	24.5	0.30	94	20	1.0	中等
		PtIr15	1790	21.6	27.0		130			
		PtIr20	1815	21.7	30.0	0.175	183			
		PtIr25	1840	21.7	33.0		213			
		PtIr30	1890	21.8	35.0	0.156	244			
	钯银	PdAg40	1330	11.0	42.0	0.31	52		0.5	弱
		PdAg50	1290	10.9	31.0	0.35	42			
		PdAg80	1070	10.7	10.10	0.92	35			
		PdAg90	1000	10.6	5.90	1.42	30			
		PdAg95	975	10.5	3.80	2.20	26			
	钯铜	PdCu40	1200	10.4	35.0		86		0.6	弱
	钯铱	PdIr10	1580	12.6	27.0		120			弱到中等
		PdIr18	1610	13.0	33.0		198			
金基合金	金银	AuAg30	1025	16.6	10.4	0.67	32	14	0.4	强
		AuAg90	965	11.4	3.6	1.95	29	11	0.25	强
	金镍	AuNi5	1000	18.3	12.3		99	15	0.4	无
	金锆	AuZr3	1045	18.3	20.0		120			无
银及其合金	银	Ag100	961	10.5	1.6	4.16	25	12	0.45	中到强
	银铜	AgCu7.5	778	10.3	1.9	3.50	55			
		AgCu10	778	10.3	2.0	3.45	60			
		AgCu20	778	10.2	2.1	3.40	70			
		AgCu50	778	9.7	2.1	3.15	75			
钨及其合金	钨	W100	3370	19.3	5.5	1.70	350	15	1.4	无到弱
	钨钼	WMo5	3160		7.0		300			无到弱
		WMo34	2950		9.0		280			

在磁吹式开关中，磁场较弱时可选用耐磨损性能较好的内氧化法银-氧化镉。磁场较强时，可选用烧结挤压法银-氧化镉。如分断速度较快，可选用烧结法银-氧化镉。如分断速度较慢，则可选用内氧化法银-氧化镉。

c. 额定电流在 60A 以下，分断电流在 3000A 以下的空气开关可选用烧结挤压法银-氧化镉触头材料。在此电流以下它能保证有良好的抗动熔焊性能，接触电阻较低，电磨损较小。

d. 额定电流在 400A 以下，分断电流在 20000A 以下的空气开关可选用银-石墨对银-镍的非对称性

触头对。银-石墨在抗熔焊性能方面有高的可靠性，但灭弧性能较差。银-镍则有助于将电弧迅速引入灭弧室中。这里推荐选用烧结挤压法银-石墨，因其电磨损比一般烧结银-石墨显著降低，与银-镍相近。

e. 额定电流在 600A 以上，分断电流在 25000A 以上的空气开关，可考虑选用银-钨或银-炭化钨触头材料。它们都具有较高的耐磨损性能。其中以银-炭化钨的熔焊倾向更小，并能抑制绝缘性钨酸物的形成。

f. 额定电流在 250A 以上，分断电流在 15000A

表 13-1-4 额定电流与电触头尺寸

额定电流 A	交 流 接 触 器				自 动 开 关			
	厚 度 mm	面 积 cm ²	参 考 尺 寸		厚 度 mm	面 积 cm ²	参 考 尺 寸	
			圆形直径 mm	正方形边长 mm			圆形直径 mm	正方形边长 mm
10	1.0	0.15~0.20	4.5~5	4~4.5				
20	1.0~1.5	0.3~0.5	6~8	5.5~7	1.0~1.5	0.3	6	5.5
40	1.5~2.0	0.5~0.8	8~10	7~9				
50					1.5~2.0	0.35~0.5	6.5~8	6~7
60	1.5~2.0	0.8~1.2	10~12	9~11				
100	2.0~2.5	1.2~2.0	12~16	11~14	2.0~2.5	0.6~1.0	8.5~11	7.5~10
150	2.0~2.5	2.0~2.5	16~18	14~16				
200					3.0~4.0	2.0~2.6	16~18	14~16
250	2.5~3.0	2.5~3.2	18~20	16~18				
400					3.0~4.0	2.6~3.2	18~20	16~18
600	3.0~4.0	5.7~7.0	27~30	24~27	3.0~4.0	3.2~4.0	20~22.5	18~20

注：1. 表列尺寸适用于银基触头。
2. 触头形状如果是梯形或长方形时,可根据面积推算。
3. 动触头表面带弧形。

以上的空气开关也可采用主、弧两档触头的结构。主触头选用导电性好,接触电阻小的银,银-镍或银-氧化镉制造,以负载额定电流。分断时主触头首先断开,由弧触头承担电流的分断。弧触头可选用浸渍法银-钨或铜-钨制造。它们具有较高的抗熔焊和耐磨损性能。

g. 高压断路器的闭合力大,触头开距大,电弧强,触头材料将承受大的机械冲击力和强电弧的急热急冷作用,一般钨粒度细(1μ左右)的银-钨或铜-钨触头材料易产生龟裂与破损。可选用钨粒度较粗的高韧性材料,虽其电磨损稍大,但可消除触头碎裂故障。

h. 真空接触器操作频繁,且常在小电流下分断。故须选用电磨损与截止电流均较小的触头材料,如钨-铜铍锆和铜铁镍钴合金等。较大容量的真空接触器则宜选用不含钨的触头材料,因钨的剩余电流较大,限制了它的电流分断能力。

i. 真空断路器用来分断大的短路或过载电流,希望有较小的截止电流。主要要求具有足够大的抗熔焊和电流分断能力。当分断容量在100兆伏安左右时,一般选用铜铍钨合金。在分断容量更大的真空断路器中,则须选用灭弧能力更强的触头材料,如铜铍钨合金等。在高压真空断路器中,则须选用机械强度和耐电压强度更高的触头材料,如铜铍银和

铜碲硒合金等。

3-1-2 弱电用触头材料的选用原则

仪表、电信、自动化等方面使用的电触头,承受的电流小,电压低,电弧及火花小,因此材料选用时应着重考虑接触可靠,耐腐蚀,抗氧化,使用寿命长等几个方面。选用原则如下:

a. 直流下的材料转移比交流下严重,可选用导热系数不同的两种材料,分别制成阳极和阴极触头,而以导热系数高的作阳极,以防止材料从阳极向阴极的正向转移。

b. 在有电感的回路中,或触头运动速度快,则分断时将出现高的电压峰值。电压愈高,转移与电磨损愈大,应选用转移与电磨损小的触头材料。

c. 当条件不许可提高接触压力时,应选用贵金属合金作触头,但如果接触压力较高,则应选用硬度较高,能耐机械磨损的触头材料,以延长使用寿命。

d. 触头间隙不宜过小,避免产生持续电弧。但如触头最大间隙受到条件限制,不能增大时,则应选用灭弧能力较好的触头材料。

e. 在高湿度下使用的触头材料,应选用耐腐蚀性能好的铂基、钨基、金基、银基合金等。

f. 应根据具体环境气氛选用合适的触头材料,如在硫化气氛中,应选用耐腐蚀能力较强的铂基合

金或钯银合金。但在汽油及其他油料气氛中,如选用铂基合金将会在触头上堆积着黑色粉末,增大接触电阻。此时可考虑选用钨触头。

g. 小电流触头上的尘埃,影响良好接触。软质触头易粘附尘埃,且不易清除,因此应选用硬度较高的触头材料。

3.2 电触头的尺寸和形状

3.2.1 电触头的尺寸

表 13.1-4 表示额定电流与电触头尺寸的关系。在额定电流相等的情况下,选用时应考虑开关操作频率、触头运动速度、触头间隙、接触压力等因素。如操作频率高,应适当加大触头的尺寸。

3.2.2 电触头的形状和接触形式

通常电触头有三种接触形式。如球面对平面的接触是点接触,圆柱形对平面的接触是线接触,两平面间的接触是面接触。在小接触压力范围内,以点接触的接触电阻较小,但随着接触压力 F 的增大,接触电阻 R_k 下降不是很快。而在线接触情况下,随着压力 F 的增大,不仅增大了接触面积,还增多了接触点数,故接触电阻 R_k 下降较快,如图 13.1-3 所示。在大接触压力范围内,以面接触的接触电阻较

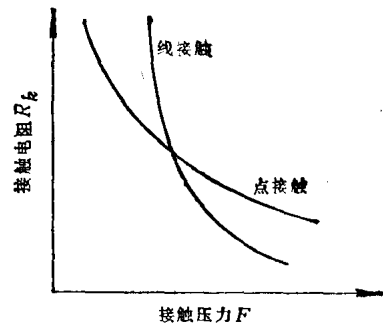


图 13.1-3 不同接触压力 F 与接触电阻 R_k 的关系

小。故为了得到最小接触电阻,如继电器等小功率电器多数选用点接触。对于大功率电器,如断路器等,则多数选用接近于面或线接触的触头。

3.3 电触头的焊接

电触头的焊接是开关生产中一项比较重要的工艺。如果焊接不当,既会影响触头材料的使用性能,也会影响开关的正常工作。不同的触头材料,应选用不同的焊料和焊剂。为了提高焊接质量,可在真空或其他保护气体中进行焊接。电触头的焊接方法、特点及适用范围见表 13.1-5; 几种常用焊料及其应用范围见表 13.1-6; 几种常用焊剂与应用举例见表 13.1-7。

表 13.1-5 电触头的焊接方法、特点及适用范围

焊接方法	简要工艺过程	特点	适用范围
火焰钎焊(或称银焊)	用氧-乙炔,煤气-空气,酒精-空气,甲苯-空气等作加热热源,加热工件上的焊料与焊剂;熔化后,加上另一工件,使互相结合	工艺过程简单,不需特殊设备,费用低。其缺点是劳动条件差,生产率低,焊接质量不稳定,被焊工件受到退火作用,硬度下降的区域较大	不宜采用其他焊接方法的异形工件
电阻焊(或称点焊)	把被焊工件叠放在两个铜电极之间,施加一定压力,并通入大电流。由于工件间接触电阻所产生的热量,使接触面熔化而焊接	操作过程简单,生产效率高,可进行自动或半自动操作。但对工件表面要求高,要求设备的电压和电极压力稳定,设备投资较大	薄片或厚薄相差较大的小型工件
电阻钎焊	同电阻焊相似,但在被焊工件之间,加上焊料和焊剂,用石墨电极加压通电,使焊料熔化而焊接	焊接质量好,劳动强度和操作条件比火焰钎焊大为改善,生产效率高	有规则工件
高频钎焊	把高频电流通入感应线圈,利用被焊工件的涡流损耗与磁滞损耗所产生的热量,使焊料迅速熔化而焊接	加热快,焊接质量好,劳动生产率高,但设备投资大,使用和维护要求高	同上
氢气保护钎焊	把焊料放在被焊工件之间,放入氢气炉加热,使焊料熔化,把工件焊接。冷却后,推出炉外	焊接质量和劳动条件比火焰钎焊好,劳动生产率高	任何形状的大工件

表 13.1-6 几种常用焊料及其适用范围

型 号	名 称	化 学 成 分, %					熔化温度 °C	适 用 范 围
		Ag	Cu	Zn	P	Sb		
LAgP-1	银磷焊料 1 号	14~16	余量		4~6		640~750	铜-钨
LCuP-3	铜磷铋焊料	—	余量		5~7	1.5~2.5	650~700	铜-钨
LAg25	25% 银焊料	24.7~25.3	39~41	余量	—	—	745~775	铜
LAg35	35% 银焊料	32~38	29~31	余量	—	—	600~725	铜-钨
LAg45	45% 银焊料	44.5~45.5	29~31	余量	—	—	600~725	银、银-镍、银-铁、 银-钨
LAg50	50% 银焊料	49.5~50.5	33~35	余量	—	—	690~775	同上
LAg65	65% 银焊料	64.5~65.5	19~21	余量	—	—	685~720	银-钨、银-氧化镉
LAg70	70% 银焊料	69.5~70.5	25~27	余量	—	—	730~755	铜铋铈
LAg72	72% 银焊料	71~73	27~29	余量	—	—	779	钨、钨-铜铋铈、铜 铋铈、铜碲碲等
—	银铜磷焊料	25	余量		5	—		银-石墨、铜-钨
—	金镍焊料	Au82.5	Ni11.5		—	—	950	纯钨

表 13.1-7 几种常用焊剂及应用举例

序 号	焊 剂	应 用 举 例
1	XH-442 银焊焊剂	银、铜及其合金、银-钨、铜-钨 等
2	氟硼酸钾 62%，剂 101 银焊粉 38%	银、钨
3	四硼酸钠 70%，XH-442 银焊熔剂 30%	银-氧化镉、其他银基触头
4	硼酸水溶液(硼酸:水=1:10)，微量磷酸三钠	银、银-氧化镉、其他银基触头
5	氟硼酸钾 24.4%，三氧化二硼 58.8%，四硼酸钠 16.5%，磷酸氢钠 0.3%	银-钨
6	氟硼酸钾 21~25%，氟化钾 40~44%，三氧化二硼 33~37%	银-镍、银-石墨
7	XH-421 铜焊粉	铜和铜基触头
8	氟硼酸钾 70~75%，四硼酸钠 25~30%	铜、铜-钨
9	氟硼酸钾 42%，氟化钾 40%，硼酸 18%	铜-钨

第2章 电阻合金

电阻合金是制造电阻元件的重要材料之一，广泛用于电机、电器、仪器及电子等工业。它具有温度系数小，稳定性好，机械强度高等特点，并可制成粉、线、箔、片、带、棒、管等形状。表面还可被覆各种绝缘材料。

1 品种分类与性能特点

电阻合金按其主要用途可分为：调节元件用电阻合金，精密元件用电阻合金，电位器用电阻合金和传感元件用电阻合金。

1.1 调节元件用电阻合金

主要用于电流(电压)调节与控制元件的绕组。具有机械强度高，抗氧化和耐腐蚀性能好，工作温度较高等特点。其性能见表13-2-1。

康铜线可在空气中加热氧化，使表面形成一种附着力强的氧化膜绝缘层。

1.2 精密元件用电阻合金

主要用于仪器仪表中的电阻元件。具有电阻温

度系数小，稳定性好，对铜热电动势小等特点。这类合金线一般制成聚酯高强度漆包线。可按其使用对象分为如下三种类型。

1.2.1 电工仪器用锰铜合金

主要用于电工仪器，如电桥、电位差计、标准电阻中的电阻元件。它们是锰铜基合金，其电阻 R 对温度 t 的关系曲线接近于抛物线。曲线的最高点温度 t_m 在 20°C 附近，如图13-2-1所示。由于该点附近的曲线平坦，电阻随温度变化的误差很小。倘在恒温室内使用，仪器的准确度和稳定度将更高。其性能特点见表13-2-2。

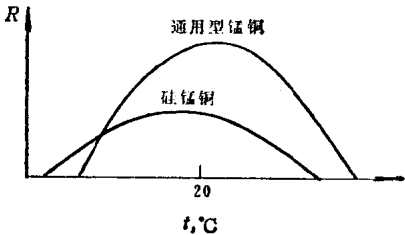


图13-2-1 通用型锰铜和硅锰铜的电阻对温度的关系

表13-2-1 调节元件用电阻合金的性能和特点

名称	主要成分 %	电阻率 ρ (20°C) $\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$	电阻温度系数 α $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	对铜热电动势 E_a $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$	密度 d g/cm^3	抗拉强度 σ_b kgf/mm^2	伸长率 δ %	最高工作温度 $^{\circ}\text{C}$	特点
康铜	Ni39~41, Mn1~2, Cu余量	0.48	≈ 50	-43	8.9	40~60	15~30	500	抗氧化性能良好
新康铜	Mn10.8~12.5, Al2.5~4.5, Fe1.0~1.6, Cu余量	0.48	≈ 50	0.3~0.5	8.0	40~55	15~30	500	抗氧化性能比康铜差, 价较廉
镍铬	Cr20~23, Ni余量	1.09	≈ 70	3.5~4.0	8.4	65~80	10~30	500	焊接性能较差
镍铬铁	Cr15~18, Ni55~61, Fe余量	1.12	≈ 150	<1	8.2	65~80	20~35	500	焊接性能较差
铁铬铝	Cr12~15, Al3.5~5.5, Fe余量	1.26	≈ 120	3.5~4.5	7.4	60~75	10~30	500	焊接性能较差

表 13.2-2 电工仪器用电阻合金的性能和特点

名 称	主要成分 %	电 阻 率 ρ (20°C) $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	电阻温度系数		对铜热 电动势 E_a $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	密 度 d g/cm^3	抗拉强度 σ_b kgf/mm^2	伸长率 δ %	工作 温度 $^\circ\text{C}$	特 点
			α $10^{-6}/^\circ\text{C}$	$-\beta$ $10^{-6}/^\circ\text{C}^2$						
通用型 锰铜	0级①	Mn11~13,	-2~2	0~0.7	≤ 1	8.4	40~55	10~30	5~45	电阻稳定性高, 焊接性能较好, 抗氧化性能较差。
	1级	Ni2~3,	-3~5							
	2级	Cu 余量	-5~10							
硅 锰 铜	Mn8~10, Si1~2, Cu 余量	0.35	-3~5	0~0.25	≤ 1	8.4	40~55	10~30	5~45	电阻对温度曲线较平坦, 宽温度范围内的阻值误差比通用型锰铜小

① 0级适用于准确度高的电阻元件。

表 13.2-3 分流器用锰铜合金的性能和特点

名 称	主要成分 %	电 阻 率 ρ (20°C) $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	电阻温度系数		对铜热 电动势 E_a $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	密 度 d g/cm^3	抗拉强度 σ_b kgf/mm^2	伸长率 δ %	工作 温度 $^\circ\text{C}$	特 点
			α $10^{-6}/^\circ\text{C}$	$-\beta$ $10^{-6}/^\circ\text{C}^2$						
F1级①	Mn8~10, Si1~2, Cu 余量	0.35	0~10	0~0.25	≤ 2	8.4	40~55	10~30	20~80	电阻对温度曲线较平坦, 在宽温度范围内的阻值误差比F2级小
F2级	Mn11~13, Ni 2~5, Cu 余量	0.44	0~40	0~0.7	≤ 2	8.4	40~55	10~30	20~80	电阻最高点温度比通用型锰铜高

① F1级分流器锰铜的主要成分与硅锰铜(见表 13.2-2)相同, 但它们的电阻温度系数 α 的范围不相同。F1级适用于准确度较高的分流器。

1.2.2 分流器用锰铜合金

这种锰铜基合金的电阻最高点温度(t_m)在30~50°C 范围内, 如图 13.2-2 所示。可在温升较高, 温度变化范围较宽的分流器或分压器上使用。其性能见表 13.2-3。

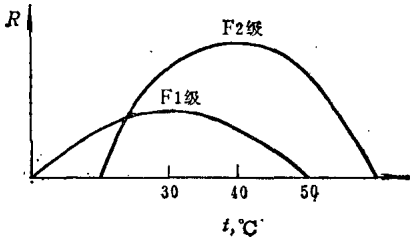


图 13.2-2 F1 和 F2 级分流器锰铜的电阻对温度的关系

1.2.3 高阻值、小型化元件用电阻合金

主要用于高阻值元件、高阻值标准电阻器、高阻值电阻箱、小型化元件等。有如下四种类型:

(1) 高电阻率合金 主要特点是电阻率较高, 并能加工成细线($\phi 0.01\text{mm}$), 或轧制成薄膜($<0.01\text{mm}$)。它们也可用于电位器(见本章 1.3 节)。性能特点见表 13.2-4。

(2) 玻璃绝缘微细线 将锰铜或镍铬锰硅等合金碎粒放在有底的玻璃管中, 用高频感应加热, 使合金粒熔化, 玻璃管软化, 并拉成微细线, 其芯线直径可小至 2~8 微米, 外包玻璃绝缘膜, 绝缘性能良好, 但较脆。锰铜微细线阻值可达 10 兆欧以上, 镍铬锰硅微细线可达 50 兆欧以上。

表 13·2-4 高电阻率合金的性能和特点

名 称	主要成分 %	电 阻 率 ρ (20°C) $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	平均电阻温 度系数 α_a (0~100°C) $10^{-6}/^\circ\text{C}$	对铜热 电动势 E_a $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	密 度 d g/cm^3	抗拉强度 σ_b kgf/mm^2	伸长率 δ %	工作温度 $^\circ\text{C}$	特 点
镍铬铝铁	Cr18~20, Al1~3, Fe1~3, Ni 余量	1.33	-20~20	≤ 2	8.1	80~100	10~25	-65~125	机械强度 高, 耐磨性 好, 焊接性 能较差
镍铬铝铜	Cr18~20, Al2~4, Cu1~3, Ni 余量	1.33	-20~20	≤ 2	8.1	80~100	10~25	-65~125	焊接性能 比镍铬铝铁 略好, 余同 上
镍铬锰硅	Cr17~19, Mn2~4, Si1~4, Al, Ni 余量	1.35	-20~20	≤ 2	8.1	80~100	10~25	-65~125	焊接性能 比镍铬铝铜 略好, 余同 上
镍铬铝钼	Cr17~19, Al3~5, V3~5, Mn, Ni 余量	1.70	-30~30	≤ 5	8.1	≈ 160	≈ 15	-65~125	焊接性能 较差
镍锰铬钼	Mn34~37, Cr7~10, Mo, Ni 余量	1.90	-50~50	≤ 7		≈ 160	6~10	-65~125	焊接性能 较好

注: 上表所列合金也可用于电位器。

(3) 金属膜电阻元件 将镍铬、铬-氧化硅等材料采用一定的工艺如真空蒸发、阴极溅射和化学沉淀等方法, 使其在绝缘基体上形成金属薄膜, 然后刻出条纹, 提高阻值。倘在镍铬系合金中添加少量铍、铝、锑、硅以及稀土等元素, 可将其电阻温度系数控制在 $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 以下。这种电阻元件的体积小, 分布电容和电感量比线绕电阻元件小, 即时间常数小, 适用于高频和脉冲电路, 可获得较快的电流反应速度。

(4) 贴膜平面电阻元件 将电阻合金轧成箔材, 用环氧树脂等粘结剂贴在小型基板上, 用光刻法腐蚀成迂回曲折的微细条纹。因合金与基板的热膨

胀系数有差异, 当温度变化时, 合金将受到应力, 使其电阻随着变化。此变化与合金本身电阻温度系数所引起的变化在方向上相反, 可相互抵消, 使实际的电阻温度系数减至很小, 可达 $1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 左右。稳定性比金属膜电阻高。同样具有体积小, 电流反应速度快等优点。

1.3 电位器用电阻合金

主要用于各种电位器和滑线电阻。在一般情况下, 可采用表13·2-1中的康铜和表13·2-4中的镍铬基合金以及滑线锰铜。滑线锰铜的性能特点见下表:

主要成分 %	电阻率 ρ (20°C) $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	电阻温度系数		对铜热 电动势 E_a $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	密 度 d g/cm^3	抗拉强度 σ_b kgf/mm^2	伸长率 δ %	工 作 温 度 $^\circ\text{C}$	特 点
		α $10^{-6}/^\circ\text{C}$	$-\beta$ $10^{-6}/^\circ\text{C}^2$						
Mn12~13, Ni1~3, Al, Cu 余量	0.45	0~40	≤ 0.5	≤ 2	8.4	40~55	10~30	20~80	抗氧化性比通用型 锰铜好, 焊接性能好, 电阻对温度曲线较平 坦, 电阻最高温度 较高

表 13-2-5 电位器用贵金属电阻合金的性能和特点

类型	名 称	主 要 成 分 %	电 阻 率 ρ (20°C) $\Omega \text{mm}^2/\text{m}$	平均电阻温 度系数 α_a (0~100°C) $10^{-6}/^\circ\text{C}$	抗 拉 强 度 σ_b , kgf/mm ²		特 点
					硬	软	
铂	铂铑	Rh10, Pt 余量	0.19	1700	≈ 120	≈ 50	1. 具有较好化学稳定性, 但对有机物质的抗侵蚀性能差 2. 接触电阻较低 3. 耐磨性好
	铂铱	Ir10, Pt 余量	0.25	1330	≈ 125	≈ 55	
	铂钌	Ru10, Pt 余量	0.42	470	≈ 140	≈ 80	
	铂铜 8.5	Cu8.5, Pt 余量	0.50	330	≈ 150	≈ 80	
基	铂钨	W8, Pt 余量	0.62	280	≈ 150	≈ 100	
	铂铜 20	Cu20, Pt 余量	0.90	100	≈ 140	≈ 60	
金	金银铜	Ag20, Cu30, Au 余量	0.12		≈ 96	≈ 65	1. 化学性能较稳定, 特别能抗有机物质的侵蚀 2. 具有较稳定的接触电阻 3. 磨擦系数较大 4. 接触压力大时, 耐磨性能不够高
	金镍铜	Ni7.5, Cu1.5Au 余量	0.19				
	金镍	Ni5, Au 余量	0.14	71		≥ 50	
	金镍铬	Ni5, Cr1, Au 余量	0.24	35	76	39	
基	金钯铁	Pd40.5, Fe10, Au 余量	1.9	20~75			
	金钯铁铝	Pd50, Fe11, Al1, Au 余量	0.75~2.30	≈ 0			
钯	钯银	Ag40, Pd 余量	0.42	30	≈ 110	≈ 40	1. 机械性能及耐磨性能好 2. 抗腐蚀性性能好, 但抗有机物质的侵蚀性能差
	钯银铜	Ag36, Cu4, Pd 余量	0.45	30	≈ 90	≈ 50	
基	钯钼	Mo10, Pd 余量	0.90		≈ 140	≈ 60	
银	银锰锡 1	Mn6~8, Sn0.5~1.5, Ag 余量	0.28	0~5			1. 能抗有机酸、含氮化合物、稀 NaCl, HNO ₃ , NaOH 溶液和 CO ₂ 等气氛, 适合于海洋性及潮湿环境, 但易硫化 2. 具有良好的电接触性能 3. 硬度低
基	银锰锡 7.5	Mn7~8, Sn7~8, Ag 余量	0.53	10~20			

表 13-2-6 应变元件用电阻合金的性能和特点

类 型	名 称	主 要 成 分 %	电 阻 率 ρ (20°C) $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	平均电 阻温 度系 数 α_a $10^{-6}/^\circ\text{C}$	电阻对温 度关系线 性 范 围 $^\circ\text{C}$	应 变 灵 敏 系 数 K	抗 拉 强 度 σ_b kgf/mm^2	对铜热 电动势 E_a $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	特 点
铁 基	铁镍铬铝	Ni32~37, Cr6~9, Mo, Fe 余量	1.13	100~470	20~230	2.1~3.6	~120	~3.5	1. 高温下抗氧化 性能比镍基好, 工作温度较高 2. 高温下蠕变大 3. 冷加工性能较 差 4. 原料丰富,成本 低
	铁 铬 铝	Cr20~23, Al3~7, V, Mo, Fe 余量	1.45	-40~40	—	2.7	~80		
		Cr20~23, Al8~12, Fe 余量	1.78	~-120	20~1000	2.0			
镍 基	镍 铜	Ni40~45, Mn1~4, Cu 余量	0.48	-20~20	20~300	2.0	40~70	-43	1. 冷加工性能较 好,易拉制成细 线 2. 电阻对温度关 系的直线性较 好 3. 工作温度一般 不高于400°C
	镍 铬	Cr20~23, Ni 余量	1.10	~70	20~400	2.2	70~140	~4	
	镍铬铝铁	Cr18~23, Al1~3, Fe1~3, Ni 余量	1.33	-10~10	20~400	2.1	90~130	~3	
	镍 铬 铝	Cr18~23, Al1~3, Ni 余量	1.45	-30~30	20~450	2.0	~120		
	镍 钼 铝	Mo20~25, Al1~3, Ni 余量	1.55	-30~30	-200~20 20~520	2.1	~140	~8	
贵 金 属 基	铂 钨	W8, Pt 余量	0.66	~230	0~700	3.5~4	~90	6.1	1. 高温下抗氧化 性能好,稳定性 好 2. 除金钯铁外,电 阻对温度关系 的直线性较好 3. 原材料贵重 4. 随温度升高,应 变灵敏系数下 降较大
		W8.5, Pt 余量	0.68	~200	0~700	3.5~4	~100	6.4	
		W9.5, Pt 余量	0.75	~170	0~700	3.0~3.5	~120	6.5	
	铂 钯 钼	Pd45, Mo10, Pt 余量	0.86	~130	0~450	2.5	~84	6.8	
	铂 钨 铱	W7.5, Re5.5, Pt 余量	0.84	~88	0~800	2.8	~140	3.6	
	金 钯 铁	Pd48, Fe10, Au 余量	1.60~1.78	-20~20	非线性	~2.0	~130	1	

电位器用电阻合金具有耐腐蚀性能好，表面光洁，接触电阻小而恒定等特点。

康铜对铜的热电动势较大(约 $-43\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)，只能用于不受直流热电动势干扰的交流电路。在要求高的情况下，须采用表13·2-5中的贵金属电阻合金。

1.4 传感元件用电阻合金

主要用于制造应变、温度、磁场和压力等参数的传感元件，把这些参数的变化转变为相应的电阻变化，便于对它们进行测量、控制或补偿。它们具有传感灵敏度高，复现性和互换性好，反应快，漂移小及稳定性好等特点。一般可按所传感的参数和作用分为如下几种：

1.4.1 应变元件用电阻合金

主要用于测定应变、伸长率和应力等。应变元件用电阻合金具有灵敏系数 K 值大，能加工成细线，电阻温度系数小，对铜热电动势小等特点。不同类型应变元件用材料的性能和特点见表 13·2-6。设 K 是已知值，则在测得电阻变化率 $\frac{dR}{R}$ 后，可按下式求得应变量 $\frac{dl}{l}$ ：

$$\frac{dl}{l} = \frac{1}{K} \frac{dR}{R}$$

式中 l ——电阻线长度

dl —— l 的变化值

R ——线的电阻值

dR —— R 的变化值

因阻值愈高，测量准确度愈高，故线径都很小，一般为 $\phi 0.02\text{mm}$ 。

1.4.2 温度补偿用电阻合金

它具有负值电阻温度系数。其阻值随温度的升高而降低。适用于电表中间作线路温度补偿。如电压表中的铜线电阻因温度升高而阻值增大，可用它起抵消作用。温度补偿用电阻合金的性能和特点见下表：

1.4.3 测温用电阻材料

它具有高的正值电阻温度系数。其电阻值随温度上升而显著增大。可利用此电阻变化来测量温度。典型材料为铂、铜、镍等纯金属线。

2 电阻合金主要性能的测量

电阻率、对铜热电动势和电阻温度系数，为电阻合金的三项主要性能。它们的测量方法分述于下：

2.1 电阻率

对于一断面均匀的试样，其电阻率 ρ 如下式规定：

$$\rho = \frac{RA}{L}$$

式中 R ——试样电阻值 Ω

A ——试样断面积 mm^2

L ——试样长度 m

测量时，一般规定试样长度 L 在 0.5m 以上，电阻值 R 在 0.01Ω 以上。电阻测量用 0.2% 以上准确度的电桥或电位差计在室温下进行。电阻值在 1Ω 以上的试样用单电桥测量。 1Ω 以下的试样用双电桥测量。这时须配备电流与电位两副接线端。电流端与相邻电位端之间的距离应不小于试样线径或带宽的 3 倍。为了验证所用试验电流是否会由于自身温升而使电阻变化率超过 0.2% ，可将试验电流增大 1.4 倍，测量其电阻值。倘同未增大电流时的电阻值相差在 0.2% 以下，表明原用电流可以适用，否则须适当降低。断面积 A 的测量准确度应不低于 1% 。因一般千分卡可测读至 0.005mm ，故带材试样的厚度须大于 0.5mm ，以保证厚度的测量准确度不低于 1% ；线材试样的直径须大于 1mm ，使线材直径的测量准确度不低于 0.5% ，以保证 1% 以上的截面积准确度。（可参见 JB1779-76《金属电阻

名 称	主 要 成 分 %	电 阻 率, ρ (20°C) $\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$	平均电阻温度系数 α_a $10^{-6}/^\circ\text{C}$	对铜热电动势 E_a $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	工作温度 $^\circ\text{C}$	特 点
铁锰铝	Mn32~37, Al5~7, Fe 余量	1.25~1.35	-200~-300	<2	-50~60	焊接性能较差

材料电阻率试验方法》。

2.2 对铜热电动势

在一电阻回路中往往有微小温差存在。这时，电阻合金与铜线之间将形成一热电偶，在回路中产生微小热电动势，起着干扰作用。故要求电阻合金具有尽可能低的对铜平均热电动势 E_a ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)。

$$E_a = \frac{E}{100}$$

式中 E ——当合金试样与铜线组成一热电偶，其低温接点在 0°C ，高温接点在 100°C 时所产生的热电动势。

测量热电动势一般使用电位差计。测量前应验证测量回路中不应存在寄生电动势。可将两接点都放在同一温度下，这时不允许测出有电动势存在。测量时，高、低温接点均应分别浸在相应的恒温油槽内，浸入深度不小于试样线径(或带厚)的10倍，以及铜线直径的100倍，而且最小深度应在50mm以上，以保证两接点温度不受沿着试样及铜线导热作用的影响。

所用铜线线径应在1mm以下。它同标准铂线组成的热电偶，当低温接点在 0°C ，高温接点在 100°C 时的热电动势应为 $76 \pm 0.01 \text{ mV}$ 。这种标准铂线在 100°C 时的电阻值 R_{100} 对 0°C 时的电阻值 R_0 之比应在1.391以上。

试样的热电动势极性如下：凡试样中的电流是从高温接点流向低温接点为正，反之为负。热电动势的测试方法可参阅 JB1780-76《精密金属电阻材料的平均热电动势测试方法》。

2.3 电阻温度系数

电阻元件的温度变化将引起电阻值误差。这种误差主要取决于电阻合金的电阻温度系数。各种合

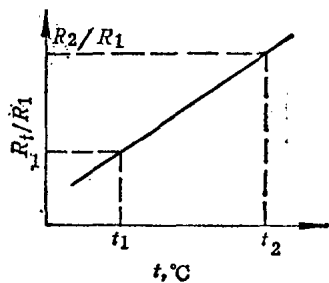


图 13-2-3 电阻随温度变化的直线特性

金在其工作温度范围内电阻随温度变化特性大体可分为两种类型：

一种是基本上呈线性关系(简称直线特性)，见图 13-2-3(图中 R_2 为温度 t_2 时的电阻值)。如康铜合金等，是属于这种类型，其公式如下：

$$\frac{R_t}{R_1} = 1 + \alpha_a(t - t_1) \quad (13.2-1)$$

或

$$\alpha_a = \frac{R_t - R_1}{R_1(t - t_1)} \quad (13.2-2)$$

式中 R_t ——温度 t 时的电阻值 Ω

R_1 ——温度 t_1 时的电阻值 Ω

α_a ——平均电阻温度系数。它等于每变化 1°C 时对 R_1 的相对电阻变化率，其单位为 $1/^\circ\text{C}$ 。

另一种是非线性的，可近似地用一条抛物线表示，如图 13-2-4(简称抛物线特性)。如各种锰铜合

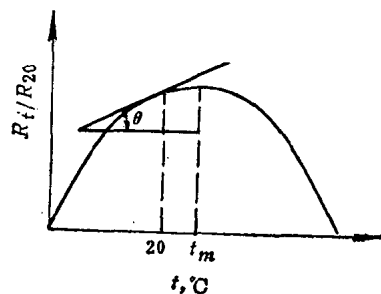


图 13-2-4 电阻随温度变化的抛物线特性

金是属于这一种类型。其相应的公式如下：

$$\frac{R_t}{R_{20}} = 1 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2 \quad (13.2-3)$$

式中 α ——一次温度系数 $1/^\circ\text{C}$

β ——二次温度系数 $1/^\circ\text{C}^2$

R_{20} ——参考温度 20°C 时的电阻值 Ω

在图 13-2-4 的抛物线上， $t=20^\circ\text{C}$ 处的切线斜率($\text{tg}\theta$)，即式(13-2-3)中的一次温度系数 α 。抛物线上最高点温度 t_m 可用式(13-2-4)算出：

$$t_m = 20 - \frac{\alpha}{2\beta} \quad (13.2-4)$$

式中，二次温度系数 β 总是负值。 $|\beta|$ 绝对值与抛物线的弯曲度有关， $|\beta|$ 值愈小，曲线愈平直。表 13-2-2 中的硅锰铜和表 13-2-3 中的 F1 级分流器锰铜的 $|\beta|$ 值均较小。它们在较宽温度范围内的电阻变化率较小。

当测量直线特性电阻合金的平均电阻温度系数 α_a 时，可分别在 t_1 与 t 温度时测量合金的电阻值 R_1