

第9篇 导电金属及电磁线

主编单位:

上海电缆研究所

编写单位:

上海电器科学研究所

天津市漆包线厂

编写人:

顾汉文 沈建华 余为豹

3K528/5103

常用符号表

d ——直径
 f ——频率
HB——布氏硬度
 l ——长度
 R ——电阻
 R_{ac} ——交流电阻
 R_{dc} ——直流电阻

S ——截面积
 α ——电阻温度系数
 δ ——延伸率
 ρ ——电阻率
 σ_b ——抗拉强度
 $\sigma_{0.2}$ ——屈服强度
 ψ ——断面收缩率

第1章 导电金属

1 概述

用作导电材料的金属,应具有高的导电性,足够的机械强度,不易氧化,不易腐蚀,容易加工和焊接

等特性,同时还要考虑资源情况。

铜、铝是最常用的导电金属。在某些特殊用途上,也采用其他金属作导电材料。导电金属的主要特性和用途见表9-1-1。

表9-1-1 导电金属的主要特性和用途

名称	符号	密度 g/cm ³	熔点 °C	抗拉强度 kgf/mm ²	电阻率 (20°C) 10 ⁻² Ω·mm ² /m	电阻温度系数 (20°C) 10 ⁻³ /°C	主要特性	主要用途
银	Ag	10.50	961.93	16~18	1.59	3.80	有最好的导电性和导热性,抗氧化性好,易压力加工,焊接性好	航空导线、耐高温导线、射频电缆导体和镀层,瓷电容器极板等
铜	Cu	8.90	1084.5	20~22	1.69	3.93	有良好的导电性和导热性,良好的耐腐蚀性和焊接性,易压力加工	各种电线、电缆用导体,母线和载流零件等
金	Au	19.30	1064.43	13~14	2.40	3.40	导电性仅次于银和铜,抗氧化性特好,易压力加工	电子材料等特殊用途
铝	Al	2.70	660.37	7~8	2.65	4.23	有良好的导电性、导热性,抗氧化性和耐蚀性,比重小,易压力加工	各种电线、电缆用导体,母线、载流零件和电缆保护层等
钠	Na	0.97	97.8		4.60	5.40	比重特小,延展性好,熔点低,活性大,易与水作用	有可能作实用的导体
钼	Mo	10.20	2620	70~100	4.77	3.30	有高的硬度和抗拉强度,耐磨,熔点高,性脆,高温易氧化,需特殊加工	超高温导体,电焊机电极,电子管栅极丝及支架等
钨	W	19.30	3387	100~120	5.48	4.50	抗拉强度和硬度很高,耐磨,熔点高,性脆,高温易氧化,需特殊加工	电光源灯丝,电子管灯丝及电极,超高温导体和电焊机电极等
锌	Zn	7.14	419.58	11~15	6.10	3.70	耐腐蚀性良好	导体保护层和干电池阴极等
镍	Ni	8.90	1455	40~50	6.90	6.0	抗氧化性好,高温强度高,耐辐照性好	高温导体保护层,高温特殊导体,电子管阳极和阴极等零件
铁	Fe	7.86	1541	25~33	9.78	5.0	机械强度高,易压力加工,电阻率比铜大6~7倍,交流损耗大,耐腐蚀性差	在输送功率不大的线路上作广播线,电话线和电缆线等
铂	Pt	21.45	1772	14~16	10.5	3.0	抗氧化性和抗化学剂性特好,易压力加工	精密电表及电子仪器的零件等
锡	Sn	7.30	231.96	1.5~2.7	11.4	4.20	塑性高,耐蚀性好,强度和熔点低	导体保护层,焊料和熔丝等
铅	Pb	11.37	327.5	1~3	21.9	3.90	塑性高,耐蚀性好,比重较大,熔点低	熔丝,蓄电池极板和电缆保护层等
汞	Hg	13.55	-38.87		95.8	0.89	液体,沸点为357°C,加热易氧化,蒸汽对人体有害	水银整流器,水银灯和水银开关等

铜是最早广泛应用的导电材料,它的导电性和机械性能均比铝好。铝的导电率 $\ominus$ 约为铜的62%,比重为铜的33%,比强度 $\ominus$ 比铜高约30%。在电阻相同情况下,铝线的截面比铜线大1.68倍,但重量仅为铜的54%。铝的资源丰富,选用铝线还可降低成本,因此,除对导体尺寸及机械性能等有特殊要求的场合外,应优先采用铝作导电材料。目前,由于提高了铝的纯度,其导电性、耐蚀性和加工性能得到进一步改善,同时,铝的焊接和连接方法也在不断改进,因此,铝导体的使用量已超过铜导体,在品种方面,铝细线和铝箔的应用也逐渐增长。

随着科学技术和工业的发展,某些电工产品的导电材料不但要求具有良好的导电性能,而且要求兼有高强度、高硬度、耐热、耐蚀和耐磨等特性。因此,适用于不同用途的导电铜合金、铝合金和复合金属导体也有迅速发展。

目前,导电铜合金按强度和导电率分为:

(1) 中强度、高导电铜合金,其抗拉强度为35~60 kgf/mm²,导电率为70~98% IACS;

(2) 高强度、中导电铜合金,其抗拉强度为60~90 kgf/mm²,导电率为30~70% IACS;

(3) 特高强度、低导电铜合金,其抗拉强度大于90 kgf/mm²,导电率为10~30% IACS。

导电铜合金和铝合金按强化方法一般分固溶强化合金、时效硬化合金和弥散硬化合金三类。

导电铜合金和铝合金的导电性能虽相应地比铜、铝稍低,但其强度和耐热等性能有显著提高。如利用固溶强化(非热处理型)和时效硬化(热处理型)方法制成的导电合金的抗拉强度分别比相应的铜、铝导体高1~4倍;导电铜合金的使用温度可达300~500°C,导电铝合金可达120~180°C。利用弥散硬化(或纤维强化)方法制成的导电合金能在接近金属熔点的高温下,保持很高的强度和导电率,适宜作高温导体材料。

用两种或两种以上的金属,通过一定的复合工艺制成的复合金属导体,除了有较高的导电率外,还可具有高的强度、硬度、弹性、耐磨性、耐热性、耐蚀性和导热性,以及特殊的磁性和热胀系数等各种不同的特性。如镀包铜线可作耐高温(400~650°C)导线;铁镍钴合金包铜线,不仅具有很好的导电和导热性,而且还能同玻璃密封,可作大功率真空管的引线;用铜包钢、铝包钢作电力和电信架空线等,可节

省大量的有色金属。复合金属导体有许多独特的优点,随着复合工艺与技术装备以及复合金属回收利用的进一步改进,它必将更广泛地被采用。

2 导电金属的电阻

电阻是衡量金属导电能力的重要指标和设计选用导电金属的主要参数。

2.1 电 阻

固体金属都是晶体,在晶体中原子按一定的几何形状呈规则的排列,构成晶格。晶格中原子分成正离子和自由电子,正离子位于晶格结点上作微弱的热振动,自由电子可在晶格中自由运动。金属导电的原因是由于自由电子的移动。当没有外电场作用时,自由电子处于混乱的运动状态,并不形成电流;当有外电场存在时,自由电子在外电场作用下,沿着与外电场相反的方向作有规则的运动,这样就形成了电流。

自由电子在金属内的运动以波动的形式进行,这种电子波沿金属的晶格传播时,不断与晶格结点上作热振动的正离子碰撞,引起电子波散射。自由电子将本身的部分能量传给了晶格,使金属发热。当金属温度趋向绝对零度(0K)时,位于晶格结点上的正离子近于静止状态,自由电子可通行无阻,金属的电阻接近于零。当金属温度升高时,正离子的热振动加强,自由电子与其碰撞的机会增多,造成电子波散射,金属的导电能力就降低,即产生了电阻。金属内的杂质及冷加工变形等会使晶格畸变,使电子运动增加障碍,也引起电子波散射,增加电阻。金属的电阻常以电阻率 ρ ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)表示:

$$\rho = R \frac{S}{l} \quad (9.1-1)$$

式中 S ——导体的截面积 mm^2

l ——长度 m

R ——电阻 Ω

在交流情况下,由于导体中产生交变磁场,电流不是均匀地分布在导体的整个截面上,越近导体表

$\ominus$ 1913年国际电工学会规定,退火工业纯铜在20°C时的电阻率等于 $0.017241 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$,为标准导电率,以100% IACS表示, IACS即指国际退火工业纯铜标准。

$\ominus$ 比强度用强度/密度表示。

面, 电流密度越大, 实际上等于减小截面, 使交流电阻大于直流电阻。针对这一趋肤效应现象, 目前在中、高频范畴, 已广泛应用铜包钢、铝包钢和镀银铜包钢等复合金属作为导线, 这种导线在传输中、高频电流时, 不仅具有高的导电性, 而且有高的强度。

电流透入圆线表面的深度(mm)可由下式算出:

$$Z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{10^7 \rho}{f}} \quad (9.1-2)$$

式中 ρ ——电阻率 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

f ——频率 Hz

导电金属的交流电阻和直流电阻的比值 (R_{ac}/R_{dc}) 为 $\pi d \sqrt{\frac{f}{500\rho}}$ 的函数 (式中 d 为导体直径, cm), 其关系见图 9.1-1。

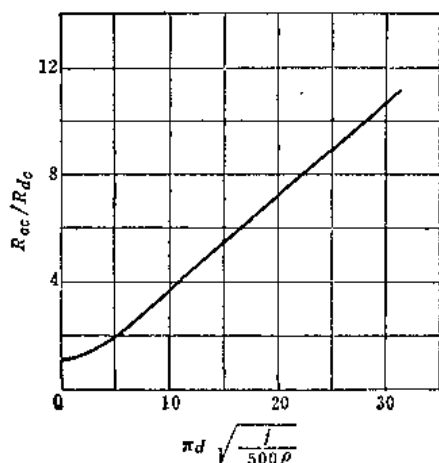


图 9.1-1 R_{ac}/R_{dc} 与 $\pi d \sqrt{\frac{f}{500\rho}}$ 的关系

为了减少趋肤效应的影响, 导体可用绞线结构, 减小每根单线的直径。

2.2 影响电阻的主要因素

2.2.1 温度对电阻的影响

金属的电阻随温度升高而增大, 当温度不是极高 (接近于熔点) 或极低 (接近 0K) 时, 电阻 (电阻率) 与温度呈下式所示的线性关系:

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (9.1-3)$$

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (9.1-4)$$

式中 R 和 ρ ——温度 T 时的电阻和电阻率

R_0 和 ρ_0 ——温度 T_0 时的电阻和电阻率

α ——电阻温度系数

α 可用下式表示:

$$\alpha = \frac{R - R_0}{R_0(T - T_0)} = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0(T - T_0)} \quad (9.1-5)$$

电阻温度系数随所选择的起始温度 T_0 而异。当电阻率与温度呈线性关系时, 在不同起始温度下的电阻温度系数可用下式换算:

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_1}{1 + \alpha_1(T_2 - T_1)} \quad (9.1-6)$$

式中 α_1 ——温度 T_1 时的电阻温度系数

α_2 ——温度 T_2 时的电阻温度系数

导电合金的电阻温度系数比组成该合金的纯金属低。

2.2.2 合金元素及杂质对电阻的影响

合金元素及杂质均导致金属的晶格发生畸变, 造成电子散射, 使电阻增加。

导电金属和合金的电阻率如下式所示:

$$\rho = \rho_0 + \rho(T) \quad (9.1-7)$$

式中 ρ_0 ——温度接近于 0K 时的剩余电阻率, 与所含合金元素或杂质有关, 即由晶格畸变产生的

$\rho(T)$ ——随温度而变的电阻率

合金元素及杂质对电阻的影响程度, 与以下三种情况有关:

(1) 合金元素或杂质对基础金属的影响, 与元素或杂质的浓度 (原子 %), 及其与基础金属的价电子的差数有关。铜合金的情况见图 9.1-2。

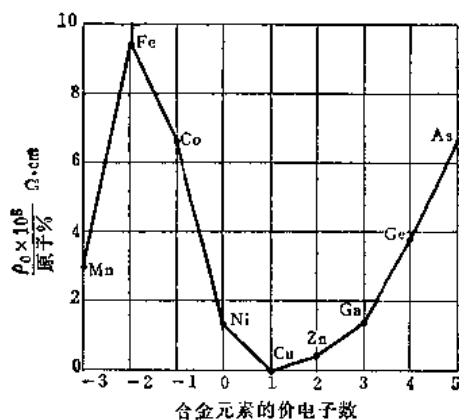


图 9.1-2 各种合金元素对铜合金电阻增长的影响

(2) 合金元素或杂质与基础金属的原子半径之差愈大, 则晶格畸变愈大, 电阻的增加就愈大。

(3) 合金元素或杂质在基础金属中所处的状

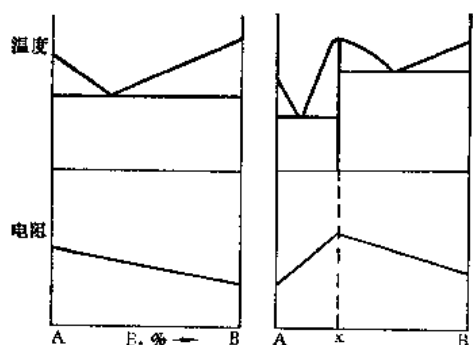


图 9-1-3 形成两相混合物的二元状态图及电阻变化示意图

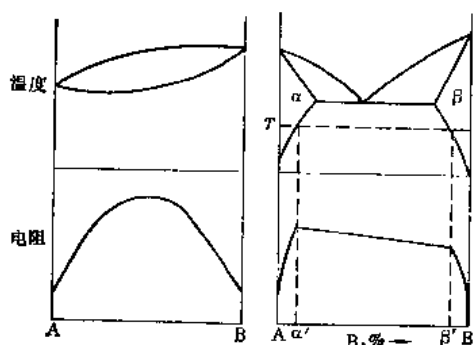


图 9-1-4 形成固溶体的二元状态图及电阻变化示意图

态: 形成两相混合物时, 电阻的变化为一直线, 见图 9-1-3; 形成固溶体时, 电阻显著增加, 见图 9-1-4。

2.2.3 冷变形对电阻的影响

弹性变形对电阻的影响极小。塑性变形引起晶格畸变, 晶体中出现空位、置换原子及位错, 引起晶面弯曲等现象, 造成电子波散射, 使电阻增加。但只有冷变形度超过 10% 时, 电阻才稍有增加。即使强烈冷变形, 电阻的增加也不会超过由添加 0.1% 合金元素增加的电阻。通常纯金属由于冷变形引起的电阻增加不超过 4%, 合金一般要高些。为此, 要提高导电金属的强度, 而不使电阻增加过大, 最早和最广泛采用的方法是冷加工变形, 即冷作硬化。

2.2.4 热处理对电阻的影响

a. 退火的影响 导电金属经冷变形后, 强度和硬度增高, 导电性和塑性降低。退火可恢复冷加工前的性能。退火时随温度升高, 晶体变化经过下列三个阶段, 即回复、再结晶和晶粒长大。

在回复阶段晶体缺陷减少, 晶格畸变减轻, 内应力基本消除, 电阻降低, 但仍保持冷作硬化的机械性能, 这种处理称为消除内应力退火。

退火温度高于再结晶温度后, 组织和性能发生强烈的变化, 由冷加工变形产生的各种晶体缺陷基本消除, 各种性能恢复到变形以前的情况, 这称再结晶退火。

退火温度过高或加热时间过长时, 再结晶后的晶粒长大变粗, 使机械性能变坏, 电阻无显著影响。

b. 导电合金的时效硬化处理的影响 时效初期从过饱和固溶体中析出细小弥散的质点。当质点直径约为 $5 \sim 10 \text{ \AA}$ 接近传导电子波的波长时, 电子的散射增强, 使电阻升高。随后析出的质点逐渐聚集长大, 电子散射减弱, 电阻就下降, 可低于原来的固溶体电阻。

3 导电合金的强化

导电合金的强化, 要求在尽可能保持高的导电率的前提下, 提高其强度和耐热性。常用的强化方法有如下三种。

3.1 固溶强化

当合金元素(称为溶质)均匀地溶解在基础金属(称为溶剂, 如铜和铝)中形成置换固溶体 $\odot$ 时, 合金仍保持溶剂金属的晶格, 见图 9-1-5。在固溶体中, 由于溶质和溶剂的原子半径不同, 造成晶格的畸变

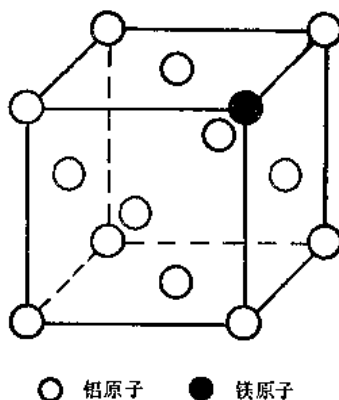


图 9-1-5 铝镁置换固溶体(面心立方晶格)

$\odot$ 固溶体分为置换固溶体(溶质原子部分占据了溶剂晶格结点的位置)和间隙固溶体(溶质原子部分侵入溶剂晶格的间隙)两种。

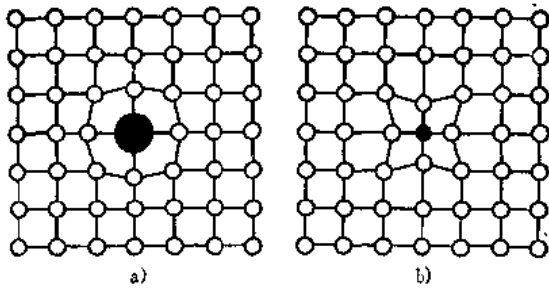


图 9-1-6 固体中置换原子引起晶格畸变的示意图

a—溶质原子半径大于溶剂原子半径时产生正畸变
b—溶质原子半径小于溶剂原子半径时产生负畸变

(见图 9-1-6), 它使金属的硬度、强度和电阻升高, 这种现象称为固溶强化。其强化程度随溶质原子的溶解量、溶质与溶剂原子的半径差以及原子价之差等的增大而增加, 但导电率随这些因素的增大而降低。固溶强化合金的成分、组织和加工工艺比较简单。为了保持高的导电率, 要选择合适的合金元素及其含量, 所以固溶强化的效果受一定的限制, 必须配合冷作硬化, 进一步提高强度。

3.2 时效硬化

利用淬火、时效操作来提高合金的强度, 称为时效硬化。例如, 图 9-1-7 中成分为 C 的合金在室温下具有 α 和 β 的两相组织, 加热到温度 T_1 时, β 相溶解到 α 相中去, 只存在单相 α 固溶体。再快速冷却至室温, 把高温 (T_1) 时的单相 α 固溶体在室温下保持下来, 使 β 相在冷却过程中来不及析出, 变为过饱和的 α 固溶体, 这种操作称为淬火。过饱和的 α 固溶体在热力学上是不稳定的, 在适当的条件下, 如从室温加热到温度 T_3 , 将发生过饱和 α 固溶体的分

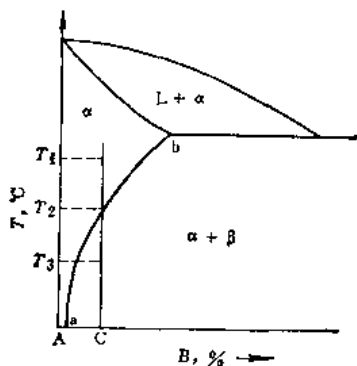


图 9-1-7 时效硬化的二元状态图

A、B—二合金元素 L—液相 α 、 β —固相

解, 从中析出弥散分布的强化相(固溶体或化合物)质点, 这种操作称为时效。时效过程中由于析出强化相, 能导致合金的硬度、强度显著升高, 电阻降低。

合金时效硬化的效果与时效过程中析出的强化相的性质、数量和分布状态有关, 即可用强化相提高塑性变形抗力的程度来表示。合金在外力作用下发生的变形, 是依靠位错移动来进行的。当时效过程中析出的强化相质点在合金中呈弥散分布时, 它们成为位错移动的障碍物。移动中的位错线通过弥散分布的强化相质点时的情况见图 9-1-8。位错线一般不能直接越过强化相质点, 但外力超过一定数值后, 位错线环绕强化相质点发生弯曲, 最后在强化相质点周围留下一个位错环而让位错线通过, 使随后的变形(即随后位移的移动)更为困难, 其结果使时效硬化合金具有高的强度。位错线弯曲的半径愈小, 所需要的外力就愈大。因此, 在强化相数量一定的条件下, 强化相质点的弥散度愈大, 即质点愈细小, 变形抗力就愈大, 合金的强化程度也就愈大。但当强化相质点太细小时, 质点间距离太小, 这时位错线不能弯曲, 可以切割通过这些极细小的强化相质点, 这样强化效果反而不大。强化相质点间距为 20~50 个原子间距时, 强化效果最大, 目前在许多实用合金中, 大大超过这个数值。因此, 设法使强化相质点细化是进一步强化合金的有效方法。一般在固溶处理后进行强烈的冷变形, 使晶粒内部出现大量的滑移线, 强化相质点就沿滑移线析出得更细小更均匀, 时效硬化的效果就更大。

此外, 强化相质点的性质对耐热性影响较大。当强化相是不含基础金属的化合物, 且在高温下化

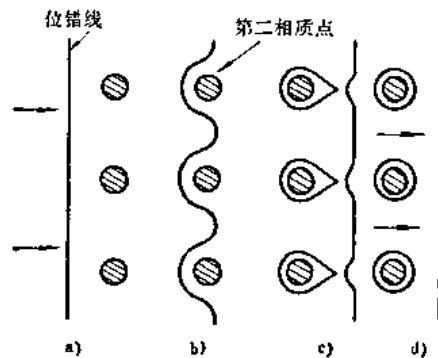


图 9-1-8 位错线通过第二相质点示意图

a—通过前 b—位错线弯曲
c—形成位错环 d—通过后

合物很少固溶到基础金属中时,则合金的耐热性很高。如铜中加入二个或二个以上的元素,其加入量按组成化合物的一定比例,使合金元素之间形成 Co_3Si , Ni_3Si , Cr_2Zr , NiBe , Ni_3Ti , Ni_3Al , Co_2Be , Co_2Zr_3 和 Cr_2Ti 等化合物。这类合金有很高的耐热性。

由于强化相质点呈弥散分布,它几乎不影响基体组织的连续性,因此对合金的导电性和塑性影响较小。采用时效硬化方法可获得良好综合性能(高强度、耐热和高导电等)的导电合金。

3.3 弥散硬化

弥散硬化的强化原理与上述时效硬化基本相同,都是借助于弥散分布的质点来阻碍位错线的移动,提高对塑性变形的抗力,使合金强化。所不同的是,时效硬化的质点是从过饱和固溶体中析出的,随温度升高(高于图9-1-7中的 T_2 时),这种质点又会溶解到基础金属中去。而弥散硬化的质点是在制造过程中加入的金属氧化物(如氧化铝、氧化锆和氧化铍等),粒度0.01~0.1微米或极细的丝(如钨丝)和纤维(如碳和二氧化硅纤维等)。由于氧化物在高温下

很稳定,不会溶解于基础金属中,所以这类合金比时效硬化合金有更高的耐热性,甚至在接近金属的熔点时,还保持相当高的强度。由于这类合金的组织属于机械混合物,氧化物的含量不高,而且对晶格畸变的影响不大,所以这类合金具有高的导电性。弥散硬化铜要得到85% IACS以上的导电率是很容易的。

4 铜及铜合金

4.1 铜

铜具有高的导电性和导热性,足够的机械强度,良好的耐蚀性,无低温脆性,便于焊接,易于压力加工成各种型材,是最广泛应用的导电材料。

4.1.1 导电用铜的品种、成分和性能

导电用铜通常选用含铜量大于99.90%的工业纯铜,其化学成分参见GB466-64和YB145-71中一号铜、二号铜、一号无氧铜和二号无氧铜的规定。在特殊场合下还采用无磁性高纯铜。导电用铜的品种、成分和主要用途见表9-1-2,其性能和主要工艺参数见表9-1-3。

表9-1-2 导电用铜的品种、成分和主要用途

品 种	代 号	含铜量 % (不小于)	杂 质 % (不大于)											主要用途	
			Bi	Sb	As	Fe	Ni	Pb	Sn	S	P	Zn	O		总和
普通 纯铜	一号铜 T ₁	99.95	0.002	0.002	0.002	0.005	0.002	0.005	0.002	0.005	0.001	0.005	0.02	0.05	各种电线 电缆用导体
	二号铜 T ₂	99.90	0.002	0.002	0.002	0.005	0.002	0.005	0.002	0.005	0.001	0.005	0.06	0.10	开关和一 般导电零件
无 氧 铜	一号无氧铜 Tu ₁	99.97	0.002	0.002	0.002	0.005	0.002	0.005	0.002	0.005	0.003	0.003	0.003	0.03	电真空器 件, 电子管 和电子仪器 零件; 耐高 温导体, 超 导线的复合 基体和微细 丝等; 真空 开关触头
	二号无氧铜 Tu ₂	99.95	0.002	0.002	0.002	0.005	0.002	0.005	0.002	0.005	0.003	0.003	0.003	0.05	
无 磁 性 高 纯 铜	TW0	99.95	0.002	0.002	0.002	0.0002	0.002	0.005	0.002	0.005	0.001	0.005	0.02	0.05	作无磁性 漆包线的导 体, 用于制 造高精密电 器仪表的动 圈

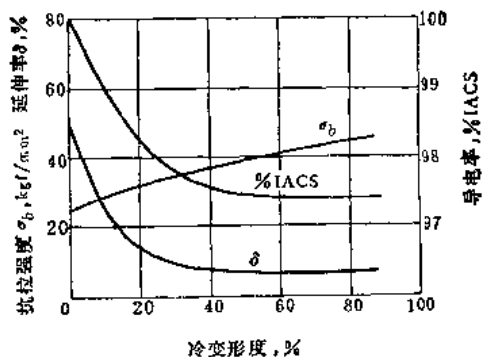


图 9-1-10 冷变形成度对导电率、抗拉强度和延伸率的影响

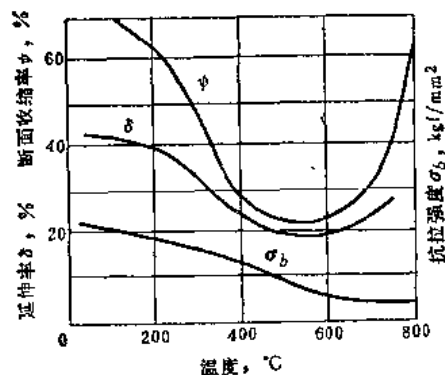


图 9-1-11 温度对铜的机械性能的影响

率的突增。导电用铜的电阻温度系数见表 9-1-3。

铜的机械性能与温度的关系见图 9-1-11。在图中 500~600°C 附近，延伸率和断面收缩率陡然降低，出现“低塑性区”，这一现象与铜中杂质（铋和铅的影响特别大）的分布、含量以及固溶度等因素有关。铜热加工时必须避开这个温度范围。

冷变形的铜材经退火后，导电率得到恢复。退火温度对导电率的影响见图 9-1-12，退火温度对机

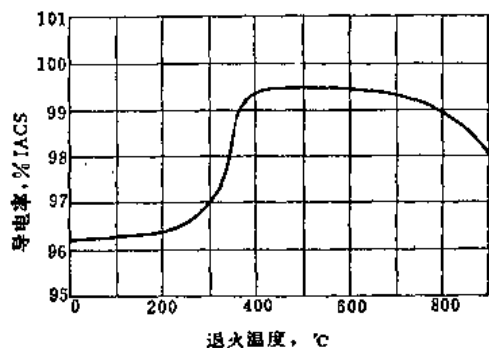


图 9-1-12 退火温度对硬铜线导电率的影响 (99.92% Cu, 冷变形成度 90%)

械性能的影响见图 9-1-13。退火温度与冷变形成度有关，当冷变形成度高时，可用退火温度范围的下限。

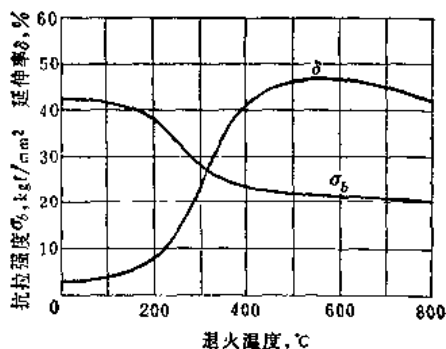


图 9-1-13 退火温度对铜的机械性能的影响

铜无低温脆性，温度降低，抗拉强度、延伸率和冲击值等增高，适于作低温导体以及与超导材料组成复合超导体。

由于铜的蠕变极限、抗拉强度和氧化速度均与温度有关，因此铜长期使用的工作温度不宜超过 110°C，短时使用的工作温度不宜超过 300°C。

4.1.3 铜的耐蚀性

铜在室温干燥空气中几乎不氧化。当温度达 100°C 时，表面生成黑色的氧化铜 (CuO) 膜。在 300°C 以下时氧化缓慢，温度再高，氧化速度增加，铜表面生成红色的氧化亚铜 (Cu₂O) 膜。高于 600°C 时，铜会强烈氧化，并使接触电阻增加，严重时将导致连接处局部烧熔。为防止氧化，必要时可在铜导体上镀一层锡或银、镍、铬等。

铜在大气中的耐蚀性很好，可与大气中的硫化物（主要是硫化氢和二氧化硫）作用，表面生成一层由 CuSO₄·3Cu(OH)₂ 组成的深绿色保护膜，降低腐蚀速度。但在含有大量二氧化硫、硫化氢、硝酸、氨和氯等气体的场合，会引起强烈腐蚀，其中氯最严重。在沿海地区，由于大气中存在盐雾，经多年使用后，铜线表面会出现一层细微的溃伤斑点，它的强度也有所降低。

铜的标准电极电位很高（约 +0.34 伏），故在许多介质、如淡水、海水、有机酸和非氧化性盐类溶液中是比较稳定的。而在各种含氧或氧化性的酸、盐溶液以及氨盐中极易腐蚀。

4.2 铜合金

常用导电铜合金的品种、化学成分、加工特性、性能和主要用途,见表 9.1-4。

4.2.1 银铜

铜中加入少量银可显著提高软化温度和蠕变抗力,而导电率下降很少。含银量对铜的耐热性影响见图 9.1-14 (300°C加热,60%冷变形度)。

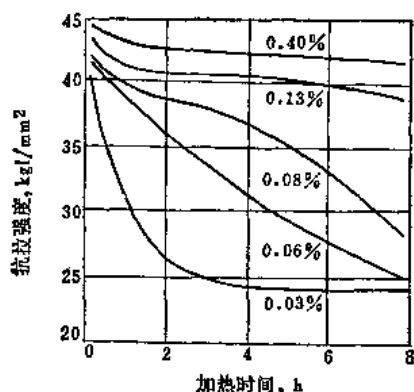


图 9.1-14 含银量对银铜的抗软化性能的影响

实用的银铜通常含 0.1~0.2% Ag, 其时效硬化的效果不显著,一般采用冷作硬化来提高强度。它具有很好的耐磨性、电接触性和耐蚀性,如制成电车线时,寿命比硬铜高 2~4 倍,其性能和用途见表 9.1-4。

含银量增加,银铜的强度增高,而导电率下降不大。如含银 3.5~4.0% 的银铜经冷作硬化后,抗拉强度可达 85 kgf/mm² 以上,导电率大于 80% IACS。

在银铜中加入少量铬、钴、镁和镉可进一步提高强度和耐热性。

含有铈、镧或混合稀土的稀土铜,其性能不亚于银铜(0.1~0.2% Ag),可代替银铜作整流子片,是一种有前途的高导电铜合金。铜中加稀土元素,不仅细化晶粒,改善加工性能,还可提高铜的耐热性,同时具有很高的导电率。

4.2.2 镉铜

铜中加 1% Cd, 经冷作硬化后,具有高的抗拉强度、导电率和耐磨性。镉铜的时效硬化效果不显著,一般采用冷作硬化来提高强度。

镉铜中加铬能增加时效硬化的效果,显著提高耐热性。少量添加铬、银、镁、锌和铁可进一步提高强度。

镉铜的性能和用途见表 9.1-4。

4.2.3 铬铜

铜中加铬可显著提高再结晶温度和高温机械性能。铬铜是时效硬化合金,时效硬化效果较大。实用的铬铜通常含 0.5~0.8% Cr, 再加入少量硅(约 0.1%), 它具有高的抗拉强度、导电率和高温性能。铬铜的缺点是对缺口的敏感性较强,在缺口和尖角处造成应力集中,容易引起机械损坏,因此,不宜用铬铜做整流子片。

铬铜中加入少量镁和铝,不仅能进一步提高耐热性,而且可改善缺口敏感性。

铬铜的性能和用途见表 9.1-4。

4.2.4 锆铜

铜中加锆可显著提高软化温度。锆铜是时效硬化合金,时效效果比铬铜小,淬火和时效处理并不能获得高的室温强度,必须在淬火后进行较大的冷变形,再时效处理,才能获得高的强度和导电率。它的主要特点是在很高的温度下(比其他任何高导电合金都高)还能保持冷作硬化的强化效果,并且在淬火状态下具有普通纯铜那样的塑性。

锆铜中加铬可增加时效硬化的效果,提高室温和高温强度,但稍降低导电性。

锆铜中加铈能提高共晶温度,减少铈在低温时的溶解度,阻止固溶处理时的晶粒长大。铈与锆反应生成弥散分布的细粒,能提高合金的强度、硬度和耐热性。

锆铜中加钨可显著提高软化温度,这些合金的性能和用途见表 9.1-4。

4.2.5 铍铜

铍铜是时效硬化效果极大的一种铜合金。它具有高的强度、硬度和弹性极限,并且弹性滞后小,弹性稳定性好,同时还具有良好的耐蚀、耐磨、耐疲劳、导电和导热性,无磁性以及受冲击时不生火花等特性。铍铜在淬火状态下有极高的塑性,易加工成各种型材和复杂形状的元素。

铍铜的相变进行很快。如淬火冷却速度不够快

表 9.1-4 导电铜合金的品种、

类 别	名 称	成 分 %	强化方式	加 工 特 性
中强度、高导电铜合金(抗拉强度为 35~60 kgf/mm ² , 导电率为 70~98% IACS)	硬 铜 (作比较)	99.9Cu	冷作硬化	500~700°C 退火 1 小时后, 冷加工
	银 铜	Cu-0.2Ag	同 上	800°C 退火 1 小时后, 冷加工
	银 铬 铜	Cu-0.5Cr-0.1Ag	时效硬化	1000°C 保温 1 小时淬火, 475°C 时效 4 小时
	稀 土 铜	Cu-0.1 (Ce、La 或混合稀土)	冷作硬化	800°C 退火 1 小时后, 冷加工
	镉 铜	Cu-10Cd	同 上	同 上
	铬 镉 铜	Cu-0.3Cr-0.3Cd	时效硬化	950°C 保温 1 小时淬火, 480°C 时效 4 小时
	铬 铜	Cu-0.5Cr	同 上	1000°C 保温 1 小时淬火, 480°C 时效 4 小时
	铬 铝 镁 铜	Cu-0.5Cr-0.2Al-0.1Mg	同 上	1000°C 保温 1 小时淬火, 冷加工, 480°C 时效 4 小时
	锆 铜	Cu-0.2Zr	同 上	950°C 保温 1 小时淬火, 冷加工, 450°C 时效 1 小时
	锆 铜	Cu-0.4Zr	同 上	同 上
	铪 铜	Cu-1Zr	同 上	同 上
	铬 锆 铜	Cu-0.5Cr-0.3Zr	同 上	同 上
	锆 砷 铜	Cu-0.4Zr-0.2As	同 上	900°C 保温半小时淬火, 冷加工, 400°C 时效 1 小时
	锆 铟 铜	Cu-0.1Zr-0.6In	同 上	950°C 保温 1 小时淬火, 冷加工, 400°C 时效 1 小时
	铜-氧化铝	Cu-3.5Al ₂ O ₃ (体积)	弥散硬化	用 30~95% 冷变形度挤压成产品
	铜-氧化铍	Cu-0.8BeO (体积)	同 上	同 上
	铅 铜	Cu-1Pb	冷作硬化	冷拉成棒材
高强度、中导电铜合金(抗拉强度为 60~90 kgf/mm ² , 导电率为 30~70% IACS)	铍 钴 铜	Cu-0.3Be-1.5Co-1Ag	时效硬化	920°C 保温 1 小时淬火, 冷加工, 480°C 时效 2 小时
	铍 铍 铜	Cu-1Ni-0.2Be	同 上	920°C 保温 1 小时淬火, 冷加工, 480°C 时效 2 小时
	铬 铍 铜	Cu-0.5Cr-0.1Be	同 上	同 上
	钴 硅 铜	Cu-1.8Co-0.4Si	同 上	1000°C 保温 1 小时淬火, 冷加工, 480°C 时效 5 小时
	镍 硅 铜	Cu-1.9Ni-0.5Si	同 上	900°C 保温 1 小时淬火, 冷加工, 480°C 时效 1 小时
	镍 钛 铜	Cu-2Ni-0.6Ti	同 上	950°C 保温 1 小时淬火, 580°C 时效 1 小时
	镍 磷 铜	Cu-1.25Ni-0.25P	同 上	780~800°C 保温 1 小时淬火, 冷加工, 450°C 时效 1 小时
	铬 钛 锡 铜	Cu-0.5Cr-1.5Ti-2.5Sn	同 上	875°C 保温 1 小时淬火, 冷加工, 450°C 时效 6 小时
	铁 铜	Cu-1~2Fe-0.02P	冷作硬化	800°C 退火 1 小时后冷加工
特高强度、低导电铜合金(抗拉强度大于 90 kgf/mm ² , 导电率为 10~30% IACS)	铍 铜	Cu-2Be-0.3Co	时效硬化	780°C 保温 1 小时淬火, 冷加工, 320°C 时效 2 小时
	钛 铜	Cu-4.5Ti	同 上	875°C 保温 1 小时淬火, 冷加工, 400°C 时效 5 小时
	钛 铜	Cu-3.0Ti	同 上	同 上
	铝 铜	Cu-12Al		
	锡磷青铜	Cu-7Sn-0.2P		

化学成分、加工特性、性能和主要用途

室 温 性 能				高 温 性 能		主 要 用 途
抗拉强度 kgf/mm ²	延伸率 %	硬 度 HB	导电率 %IACS	软化温度 °C	高温强度 kgf/mm ²	
35~45	2~6	80~110	98	150	20~24 (200°C)	整流子片、架空导线、电车线
35~45	2~4	95~110	96	280	25~27 (290°C)	整流子片、点焊电极、发电机转子绕组、通信线、引线、导线、电子管材料
40~42	24	130	82	500		点焊电极和缝焊轮
35~45	2~4	95~110	96	280		整流子片、导线
60	2~6	100~115	85	280		点焊电极、缝焊轮、焊机零件、大跨距架空导线、高强度绝缘导线、通信线、滑接导线
60	6~9	100~120	85	380		点焊电极、架空导线、电车线、野战通信电缆、飞机用电缆
45~50	15	110~130	80~85	500	31 (400°C)	点焊电极、缝焊轮、电极支承座、开关零件、电子管零件
40~45	18	110~130	70~75	510		点焊电极和缝焊轮
40~45	10	120~130	90	500	35 (400°C)	整流子片、开关零件、导线、点焊电极
45~50	10	130~140	85	500	37 (400°C)	同 上
50~55	9	135~160	80	500		点焊电极、缝焊轮、铜线连续退火的电极轮
50~55	10	140~160	80~85	520		整流子片、点焊电极、缝焊轮、开关零件、导线
50~55	10	150~170	90	520		整流子片、点焊电极和缝焊轮
52~55	13	150~180	70~80	550	43 (400°C)	同 上
48~54	12~18	130~140	85	900	20 (800°C)	点焊电极、导电弹簧、电子管结构零件、高温导电零件
50~56	10~12	125~135	85	900	20 (800°C)	同 上
30~35	12	80~85	97~99	150		易切削导电连接件
75~95	5~10	210~240	50~55	400	35 (425°C)	不锈钢和耐热合金的焊接电极、导电滑环
55~60	15	160~180	55~60	400		同 上
50~60		140~160	60~70	400		同 上
75~80	6	240	45~55	550		同 上
60~70	6	150~180	40~45	540		电焊机和架空线路的导电部件、导电弹簧、导电滑环、高强度通信线、架空导线和电车线
60	10	150~180	50~60	600	40 (500°C)	电焊机电极、对焊板
60	13		50~60	450		弹电弹簧、接线夹、接线柱、高强度导电零件
65~80	7~12	210~250	42~50	450	39 (425°C)	电焊机电极、高强度导电零件
50~60	2~4	110~130	60~70	350		电真空器件的结构材料
150~147	1~2	350~420	22~25			开关零件、熔断器和导电元件的接线夹、在周围介质温度150°C下使用的电刷弹簧、通信线(湿气大的地方)、架空线(煤烟多的地方)
90~110	2	300~350	10			同上, 可代用铍铜
70~90	5~15	250~300	10~15			同 上
55~65	3~7	310~420	21~25			对焊机电极、自动电焊机焊嘴、各种耐磨耐蚀零件
70~90	大于7	200~250	10~25			电信设备等的导电弹簧、联接器

或零件体积尺寸较大, 传热较慢时, 会降低时效效果, 也容易产生过时效, 使合金软化。可在铍铜中加入钴、镍和钛等元素, 延缓铍铜的相变过程, 阻止过时效和固溶处理时晶粒长大。

含铍量大于1%的为高强度铍铜, 用作高弹性、高强度、耐蚀和耐磨等零件。含铍量小于1%的为高导电铍铜, 用作高硬度导电材料。高强度铍铜和高导电铍铜的热处理工艺完全不同, 见表9.1-4。固溶和时效处理一般在还原性保护气氛(如分解氨)中进行, 以防止高温氧化。铍铜的性能和用途见表9.1-4。

钛铜是一种新型的高强度铜合金, 性能接近高强度铍铜, 可作为铍铜的代用品。钛铜的导电性虽较差, 耐热性则更好, 生产工艺比铍铜简单。

此外, 镍钛铜、镍硅铜和铬钛锡铜的导电率和强度接近高导电铍铜, 其耐热性比铍铜高, 可代替高导电铍铜作焊接电极、开关零件和导电弹簧等。这些合金的性能和用途见表9.1-4。

4.2.6 铁 铜

铜中加铁可细化晶粒, 提高硬度和强度, 但显著降低导电率。由于铜和铁熔点相差较大, 引起显著偏析, 需加入磷、镁和锡等元素来减少偏析现象。在含1~2% Fe的铁铜中, 加磷与铁形成 Fe_3P , 可增加时效硬化效果, 采用冷作硬化可进一步提高强度。铁铜具有较高的导电率和强度, 特别是高温退火后的屈服强度。铁铜的性能和用途见表9.1-4。

4.2.7 易切削铜合金

铜中加1% Pb或0.6% Se, 可显著提高切削性, 导电率下降极少, 对机械性能也影响不大。再加入少量的硫和碲可进一步提高切削性。铅铜的性能和用途见表9.1-4。

4.2.8 弥散硬化铜

弥散硬化铜具有很高的耐热性, 它与时效硬化铜(铬锆铜)的退火特性比较见图9.1-15。工作温度高于500℃时, 弥散硬化铜就显示出优良的性能。同时它具有高的导电率, 一般均达80% IACS以上。这是由于弥散氧化物降低铜导电率的程度远远小于相等量的可溶合金元素。

弥散硬化铜的制造可采用粉末冶金法和内氧化

法^①, 它的塑性较差, 但还可用热或冷加工成型。弥散硬化铜的性能和用途见表9.1-4。

4.2.9 导电铜合金的选用

电工产品对导电铜合金的性能要求和选用, 以及应用中须注意的事项, 见表9.1-5。

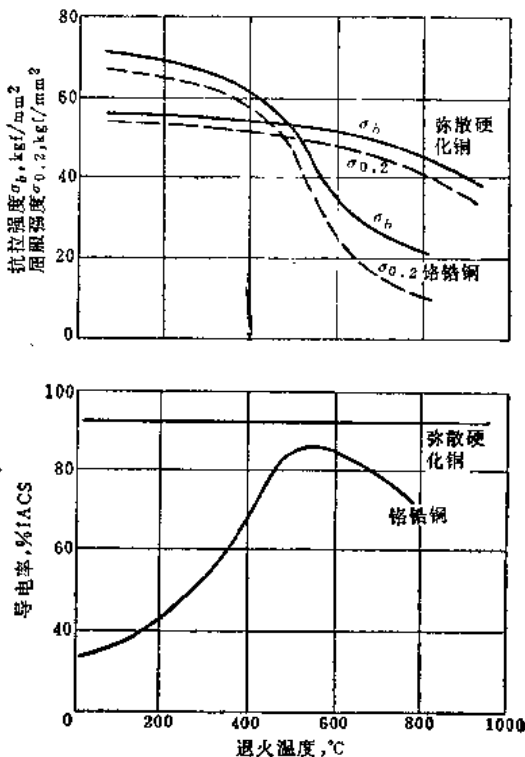


图9.1-15 弥散硬化铜与铬锆铜的退火特性比较 (退火1小时)

5 铝及铝合金

5.1 铝

铝具有良好的导电性、导热性和耐蚀性, 比重小, 易于压力加工成各种型材, 无低温脆性, 对光和热的反射率大, 其机械强度比铜低, 但比强度高, 且资源丰富, 是广泛推广使用的导电材料。

5.1.1 导电用铝的品种、成分和性能

导电用铝通常选用含铝量在99.5%以上的工

① 内氧化法是先溶炼法制成合金, 如铝铜、铍铜或铬铜, 再将该合金在高温氧化气氛下长期加热, 使铜中的铝、铍或铬被氧化。

表 9-1-5 电工产品对导电铜合金的性能要求、选用及应用中注意事项

电 工 产 品	性 能 要 求	选 用 的 铜 合 金	应 用 中 注 意 事 项
电动机、发电机的整流子片和滑环	导电率 大于 85% IACS 抗拉强度 大于 30 kgf/mm ² 延伸率 大于 2% 硬度 大于 80 HB 软化温度超过工作温度, 接触性好, 耐磨性高	银铜、稀土铜、镉铜、钴铜和铬钴铜等	硬铜虽导电性很好, 但强度和耐热性低, 通常用到 80°C, 高于 150°C 就开始软化。稀土铜、银铜和镉铜适于作 250°C 以下的电机整流子片。钴铜 (0.2~0.4% 2r) 适于作 350°C 以下的电机整流子片。铬钴铜 (或钴砷铜, 钴钨铜) 在 500°C 以下有足够高的强度、高的耐磨性、高的导电率, 适于作 350~500°C 的高功率电机的整流子片
电焊机电极、电极支承座、电极臂和导电滑环	电极的作用是传导必要的焊接电流和传递必要的焊接压力。因被焊接的材料是多种多样的, 要求材料性能也在很大范围内变化 要求的主要特性为: (1) 具有比焊接材料更高的导电性和导热性, 否则将发生电极和被焊接材料的熔焊现象, 或电极表面合金化 (2) 要求强度高, 特别是高温硬度高, 以保持电极形状的持久性 (3) 与被焊材料不发生合金化和粘着 (4) 抗氧化性好, 使用中不生成氧化皮 电极支承座和电极臂要求有较高的导电率 (以减少焊接回路阻抗) 和强度 导电滑环要求有高的导电率和耐磨性	根据被焊接材料的不同, 使用电极可分四类: (1) 铝、镁轻合金和铜合金的焊接, 电极可用银铜、镉铜、钴铜和弥散硬化铜 (2) 低碳钢、镍合金和低合金钢的焊接, 电极可用钴铜、银铬铜、铬铜、铬镉铜、铬铝镁铜和铬钴铜等 (3) 不锈钢和耐热合金的焊接, 电极可用高导电钨铜、钽钨铜、镍钨铜、镍钛铜和铬钛钨铜等 (4) 铂 (箔、带)、金饰和灯丝等的特殊焊接以及工件表面不允许有铜迹时 (如银钨触头焊接于支座), 电极可用钨、钼、铜钨合金、弥散硬化铜和复合电极 (铬铜镶钨或弥散硬化铜)	选择电极材料时, 在保证形成良好焊接的情况下, 应着重提高使用寿命 (1) 铝、镁轻合金的焊接, 其特点是散热快, 要求输入更大热量, 即短时间通入大电流。同时, 由于铝、镁熔点低, 容易发生粘着现象, 所以要求电极材料的导电率大于 85% IACS 和抗软化温度高 (2) 低碳钢等的焊接, 电极材料的导电率要求大于 75% IACS (3) 耐热合金等的焊接, 其特点是焊接温度高, 时间长, 焊接时所加压力大。要求电极材料具有高的强度、硬度和耐热性, 导电率大于 40% IACS
特殊电缆、架空导线、通信线和电车线等	对材料除要求有高的导电率和强度外, 根据不同用途, 还有不同要求, 如对电缆要求可挠性好和容易连接等。架空导线须考虑耐振动、耐疲劳和耐蚀性。电车线须考虑耐磨性等	银铜、稀土铜、镉铜、钴铜、铬镉铜和复合金属导体等	使用时最高允许温升不应超过选用材料的软化温度
各种电器、通信设备和电子管等用换向开关、弹簧和连接器等	极高的强度、硬度和弹性极限, 且耐磨、耐蚀和耐疲劳等	铍铜、钛铜和锡磷青铜等	

业纯铝,其化学成分参见GB 1196-75中一号铝和特二号铝的规定(见表9-1-6)。在特殊场合下才采用特一号铝。导电用铝的性能和主要工艺参数见表9-1-7。

表9-1-6 导电用铝的化学成分

铝牌号	代号	杂质含量% (不大于)					含铝量% (不小于)
		铁	硅	铁+硅	铜	总和	
特一号铝	Al-00	0.14	0.13	0.26	0.010	0.30	99.7
特二号铝	Al-0	0.25	0.18	0.36	0.010	0.40	99.6
一号铝	Al-1	0.30	0.22	0.45	0.015	0.50	99.5

表9-1-7 导电用铝的性能和主要工艺参数

熔点	°C	658
密度(20°C)	g/cm ³	2.7
比热(20°C)	cal/(g·°C)	0.22
比潜热	cal/g	93
导热系数(20°C)	cal/(cm·s·°C)	0.52
线胀系数(20~100°C)	10 ⁻⁶ /°C	23
电阻率(20°C)	10 ⁻² Ω·mm ² /m	软态
		和半硬态
		硬态
电阻温度系数(20°C)	10 ⁻³ /°C	软态和半硬态
		硬态
		硬态
弹性模量(20°C)	kgf/mm ²	硬态 6700
屈服强度	kgf/mm ²	软态 3~4
抗拉强度	kgf/mm ²	软态 7~9.5
		半硬态 9.5~14
		硬态 15~18
疲劳极限	kgf/mm ²	硬态 6.0②
蠕变极限	kgf/mm ²	20°C 5③
		150°C 2.4③
		250°C 1③
延伸率	%	软态 20~40
		硬态 大于0.5
硬度 HB	kgf/mm ²	硬态 35~45
浇注温度	°C	670~730
热加工:		
热轧温度	°C	440~490
热挤温度	°C	400~480
锻造温度	°C	350~450
退火温度	°C	达到软态 300~350
		达到半硬态 240~260
再结晶温度	°C	150~250④

① 根据JB 468-76规定。

② 10⁷次循环反复弯曲应力。

③ 1000小时的断裂强度,99.5% Al 软线。

④ 与纯度和冷变形度有关。

5.1.2 影响铝性能的主要因素

a. 杂质的影响 铝的物理和机械等性能随纯度而异,如99.5%铝的导电率为61% IACS,99.996%高纯铝的导电率达65% IACS。杂质对导电率的影响见图9-1-16。应严格控制导电用铝中锰、钒、铬和铁等杂质的含量。

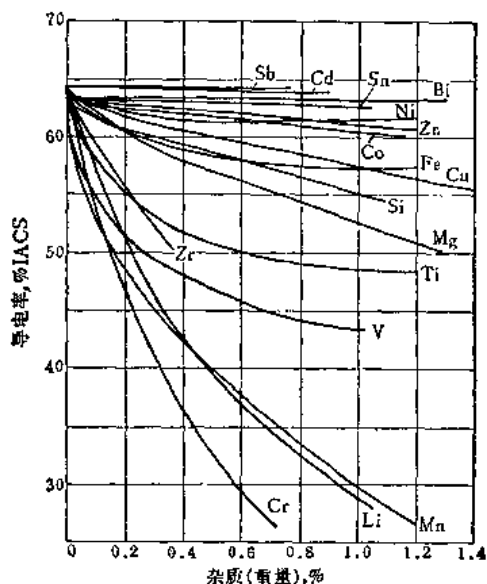


图9-1-16 杂质对铝导电率的影响

铁和硅是导电用铝中的主要杂质,其含量与相对比例对铝的物理、机械和工艺性能等有显著的影响。室温时,铁和硅在铝中的溶解度均很小,铁和铝形成硬而脆的针状化合物 Al_3Fe ,而硅以纯硅的形态存在于铝中。铁和硅可稍提高铝的抗拉强度,但降低其塑性。铁和硅在铝中,除 Al_3Fe 和Si存在外,还形成硬而脆的三元化合物 $\alpha(Fe \cdot Si \cdot Al)$ 相、 $\beta(Fe \cdot Si \cdot Al)$ 相。 α 相对铝的塑性影响比 β 相小。在铁、硅含量之和为0.2~0.5%的导电用铝中,为改善加工性能,防止热轧时开裂,铁的含量应大于硅,使铝中杂质主要形成 α 相。铁除了能细化晶粒外,还可缩小凝固时的结晶温度范围,减少铸造时产生裂纹的倾向。

b. 冷变形的影响 铝经冷变形后,引起冷作硬化。冷变形度达90%以上时,抗拉强度可提高到18 kgf/mm²,导电率只降低约1.5% IACS。冷变形度对铝的机械性能的影响见图9-1-17。控制冷变形度或退火工艺可获得硬、半硬和软等不同机械性能的制品。

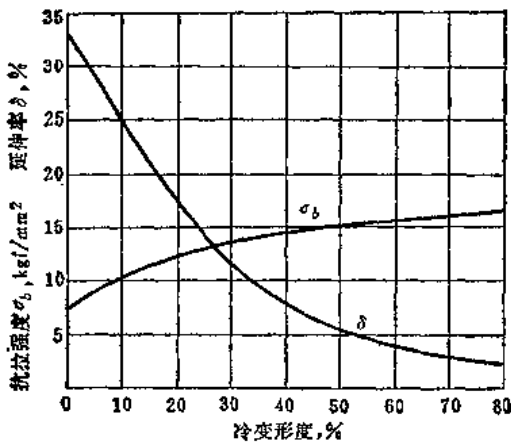


图 9-1-17 冷变形度对铝的机械性能的影响

c. 温度的影响 铝在熔点以下, 电阻和温度基本上呈线性关系。导电用铝的电阻温度系数见表 9-1-7。铝的电阻温度系数与纯度、加工状态和起始温度等有关。

冷变形的铝材经退火后, 导电率得到恢复, 退火温度对铝的机械性能的影响见图 9-1-18。退火温度过高会引起晶粒粗大, 塑性变坏。

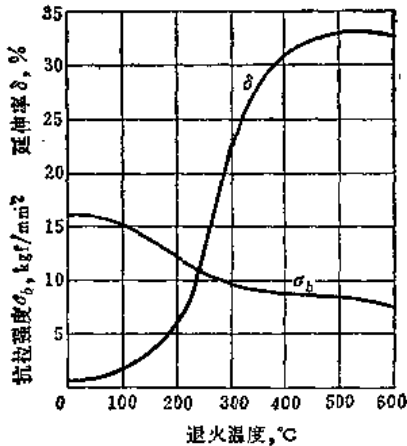


图 9-1-18 退火温度对铝的机械性能的影响

铝在低温时, 抗拉强度、疲劳强度、硬度和弹性模量增高, 延伸率和冲击值也增高, 无低温脆性, 适于作低温导体。

由于铝的蠕变极限和抗拉强度与温度有关, 铝的长期使用工作温度不宜超过 90°C, 短时使用工作温度不宜超过 120°C。

5.1.3 铝的耐蚀性

铝在室温下极易生成一层极薄的致密而坚固的

氧化膜, 它能阻止铝的进一步氧化, 并可阻止其他因素对铝的腐蚀。氧化膜的连续性与铝中的杂质及铝表面的粗糙程度有关, 如连续性不好, 就会降低铝的耐蚀性。使用环境对铝的耐蚀性也影响很大。

a. 杂质对耐蚀性的影响 铝的纯度对耐蚀性有显著影响, 如纯度 99% 的铝在稀盐酸中的溶解度比 99.95% 的铝要大 50 倍。导电用铝中的杂质除铁、硅外, 还含有少量的铜, 铜对铝的耐蚀性影响较大。杂质对铝的耐蚀性影响见表 9-1-8。

表 9-1-8 在电解液中杂质对铝的耐蚀性影响程度

杂质	海水	HCl (10%)	H ₂ SO ₄ (20%)	HNO ₃ (25%)	NaOH (稀)
Cu	2	4	3	3	3
Fe	2	4	2	2	3
Si	2	2	1	1	1
Zn	2	3	1	1	1
Mg	1	1	1	1	1
Mn	2	2	2	1	1

注: 1—耐蚀性好; 2—稍有腐蚀;
3—明显腐蚀; 4—严重腐蚀。

铝的含铁量大于 0.1% 时, 其腐蚀速度比 99.998% 高纯度铝大 160 倍。硅对铝的耐蚀性影响与铝中含铁量有关, 当铝中不含铁时, 影响不大; 当铁、硅同时存在时, 形成 $\alpha(\text{Fe} \cdot \text{Si} \cdot \text{Al})$ 相, 则显著降低铝的耐蚀性。铜对铝的耐蚀性影响比铁和硅严重, 铝中含 0.1% 铜的腐蚀速度比含 0.1% 铁的大 10 倍。

b. 使用环境条件对铝的腐蚀作用 铝在通常的大气中有良好的耐蚀性。但如大气中含有大量的二氧化硫或硫化氢、酸、碱等气体时, 在潮湿的气候条件下, 铝表面形成电解液, 引起电化学腐蚀。大气中如有大量尘埃及非金属夹杂物沉积在铝表面, 也易引起腐蚀。例如, 在工业地区使用的钢芯铝绞线, 带电导线上的腐蚀比地线上的腐蚀强烈, 这是因为前者更易吸附大气中的水分和尘埃污物。一般可涂油脂来减少腐蚀。

在沿海地区大气中盐雾所含的氯离子凝集在铝的表面, 易在表面的杂质和缺陷周围引起局部腐蚀, 形成孔洞和沟注。因此, 需要采用较高纯度的铝, 或采取特殊防腐措施, 如钢芯铝绞线, 在钢芯上包涂防腐涂料。