

电工金属和合金

下 册

导体、变阻和接触材料

烏索夫、扎伊莫符斯基著

机 械 工 业 出 版 社

73.17
129
=2

烏索夫、扎伊莫符斯基著

电 工 金 屬 和 合 金

下 册

导体、变阻和接触材料

李 介 谷 譯

31490/18

机械工业出版社

1959

出版者的話

本書叙述电工金屬与合金，全書分上下两册。

上册叙述磁性材料。書中分章叙述鉄磁物質的基本性能，工程純鉄、电工鋼片、坡莫合金、鋁硅鉄、热磁合金、高磁伸縮合金、非磁性鋼、永久磁鉄合金等。

下册叙述导体、变阻和接触材料。書中分章叙述鋁、銅、鋅、鋼、变阻合金、耐热的高电阻金屬和合金。在接触材料部分除詳細地叙述了用来制造各种类型触头的材料以外，还叙述有关各种触头的理論，对触头的腐蝕討論甚詳。

本書除以丰富的資料列举出各种有关金屬和合金的性能和工艺过程外，对理論和概念的叙述也是非常深入的。

本書讀者对象为电气工程技术人員、仪表工程技术人員以及高等学校师生和研究人員。

苏联B. B. Усов, A. C. Займовский 著 'Проводниковые реостатные
и контактные материалы' (Госэнергоиздат 1957年第一版)

* * *

著者：烏索夫、扎伊莫夫斯基 譯者：李介谷

NO. 2991

1959年6月第一版 1959年6月第一版第一次印刷

787×1092 1/16 字数 228千字 印張 9 1/8 0,001— 8,100册

机械工业出版社(北京阜成門外百万庄)出版

机械工业出版社印刷厂印刷 新华書店發行

北京市書刊出版业营业許可証出字第008号

定价(11) 1.45元

序 言

下册的内容包括有关导体合金、变阻合金和耐热合金以及电接触材料等部分。各章总的次序与第一、第二版相同。

在第一章中补充了关于低合金元合金的导电性的理论，并且比较详细地叙述了铝和铜的时效处理导体合金，这类合金的特点是在高温时具有高的蠕变极限。

讨论变阻合金的第三章经过了改写，并补充了一部分以贵重金属为基础的合金的数据。

在阐述熔接连接的第七章中对金属的冷焊作了介绍，并讲到无银磷焊料在电机制造中的应用。

在有关断开触头的第八章中，更详细地研究了液桥侵蚀现象和绝缘膜的形成，同时也比较充分地阐述了关于电解沉积的触头金属的问题。这一章的金属瓷质触头部分是完全重新改写过的，其中补充了很多资料。在所有各章中，凡是在本书第二版出版以后发表的有关资料都补充进去了。

第一章的第一节以及第二章和第四章是乌索夫和扎伊莫符斯基一起写的。其余各章都是乌索夫写的。

作者

目 录

序言.....	3
---------	---

第一篇 导体材料

第一章 导体铝、铜和锌.....	5
1-1 导体材料的基本特性.....	5
1-2 导体铝.....	7
1-3 导体铜.....	26
1-4 作为导体材料的锌.....	35
参考文献.....	37
第二章 导体钢.....	38
2-1 采用范围.....	38
2-2 导线、母线和电缆材料的选择.....	38
2-3 输电线路和配电网络用的实心钢导线.....	40
2-4 输电线路和配电网络用的钢绞线.....	42
2-5 钢母线.....	43
2-6 起重装置的钢质电缆.....	45
2-7 钢铜的双金属导线.....	47
2-8 钢铜双金属的母线.....	48
参考文献.....	49

第二篇 高电阻合金

第三章 电阻(变阻)合金.....	50
3-1 锰铜型合金.....	51
3-2 铜镍变阻合金.....	53
3-3 贵金属基的合金.....	54
参考文献.....	56
第四章 耐热的高电阻金属和合金.....	56
4-1 概述.....	56
4-2 用作发热元件的纯金属的耐热性和采用范围.....	57
4-3 发热元件用的耐热合金.....	59
参考文献.....	75

第三篇 触头材料

第五章 固定触头.....	76
5-1 概述.....	76
5-2 夹紧触头.....	76
5-3 影响夹紧触头性能的各种因素及其计算标准.....	85
参考文献.....	88
第六章 夹紧触头的腐蚀.....	89
6-1 概述.....	89
6-2 触头在正常大气中的腐蚀.....	89
6-3 触头在含化学活性混入物的大气中的腐蚀.....	91
6-4 触头的腐蚀保护.....	92
6-5 其他类型的触头的腐蚀.....	93
参考文献.....	94
第七章 全金属触头.....	94
7-1 铝导体的焊接.....	95
7-2 铜铝的中间触头.....	99
7-3 电机制造中的硬焊接.....	100
参考文献.....	102
第八章 断开触头.....	102
8-1 关于断开触头的工作与磨损的概念.....	102
8-2 触头上的电磨损(侵蚀)和金属转移.....	103
8-3 小容量断开触头的腐蚀.....	125
8-4 触头的熔焊.....	128
8-5 用来制造断开触头的材料.....	130
参考文献.....	142
第九章 可动触头.....	143
9-1 断路器的触头.....	143
9-2 滑动触头.....	144
参考文献.....	146

73.17
129
=2

烏索夫、扎伊莫符斯基著

电 工 金 屬 和 合 金

下 册

导体、变阻和接触材料

李 介 谷 譯

31490/18

机械工业出版社

出版者的話

本書叙述电工金屬与合金，全書分上下两册。

上册叙述磁性材料。書中分章叙述鉄磁物質的基本性能，工程純鉄、电工鋼片、坡莫合金、鋁硅鉄、热磁合金、高磁伸縮合金、非磁性鋼、永久磁鉄合金等。

下册叙述导体、变阻和接触材料。書中分章叙述鋁、銅、鋅、鋼、变阻合金、耐热的高电阻金屬和合金。在接触材料部分除詳細地叙述了用来制造各种类型触头的材料以外，还叙述有关各种触头的理論，对触头的腐蝕討論甚詳。

本書除以丰富的资料列举出各种有关金屬和合金的性能和工艺过程外，对理論和概念的叙述也是非常深入的。

本書讀者对象为电气工程技术人員、仪表工程技术人員以及高等学校师生和研究人員。

苏联B. В. Усов, А. С. Займовский 著 'Проводниковые реостатные
и контактные материалы' (Госэнергоиздат 1957年第一版)

* * *

著者：烏索夫、扎伊莫夫斯基 譯者：李介谷

NO. 2991

1959年6月第一版 1959年6月第一版第一次印刷

787×1092 1/16 字数 228千字 印張 9 1/8 0,001— 8,100册

机械工业出版社(北京阜成門外百万庄)出版

机械工业出版社印刷厂印刷 新华書店發行

北京市書刊出版业营业許可証出字第008号

定价(11) 1.45元

序 言

下册的内容包括有关导体合金、变阻合金和耐热合金以及电接触材料等部分。各章总的次序与第一、第二版相同。

在第一章中补充了关于低合金元合金的导电性的理论，并且比较详细地叙述了铝和铜的时效处理导体合金，这类合金的特点是在高温时具有高的蠕变极限。

讨论变阻合金的第三章经过了改写，并补充了一部分以贵重金属为基础的合金的数据。

在阐述熔接连接的第七章中对金属的冷焊作了介绍，并讲到无银磷焊料在电机制造中的应用。

在有关断开触头的第八章中，更详细地研究了液桥侵蚀现象和绝缘膜的形成，同时也比较充分地阐述了关于电解沉积的触头金属的问题。这一章的金属瓷质触头部分是完全重新改写过的，其中补充了很多资料。在所有各章中，凡是在本书第二版出版以后发表的有关资料都补充进去了。

第一章的第一节以及第二章和第四章是乌索夫和扎伊莫符斯基一起写的。其余各章都是乌索夫写的。

作者

目 录

序言.....	3
---------	---

第一篇 导体材料

第一章 导体铝、铜和锌.....	5
1-1 导体材料的基本特性.....	5
1-2 导体铝.....	7
1-3 导体铜.....	26
1-4 作为导体材料的锌.....	35
参考文献.....	37
第二章 导体钢.....	38
2-1 采用范围.....	38
2-2 导线、母线和摩电线路材料的选择.....	38
2-3 输电线路和配电网络用的实心钢导线.....	40
2-4 输电线路和配电网络用的钢绞线.....	42
2-5 钢母线.....	43
2-6 起重装置的钢质摩电线路.....	45
2-7 钢铜的双金属导线.....	47
2-8 钢铜双金属的母线.....	48
参考文献.....	49

第二篇 高电阻合金

第三章 电阻(变阻)合金.....	50
3-1 锰铜型合金.....	51
3-2 铜镍变阻合金.....	53
3-3 贵金属基的合金.....	54
参考文献.....	56
第四章 耐热的高电阻金属和合金.....	56
4-1 概述.....	56
4-2 用作发热元件的纯金属的耐热性和采用范围.....	57
4-3 发热元件用的耐热合金.....	59
参考文献.....	75

第三篇 触头材料

第五章 固定触头.....	76
5-1 概述.....	76
5-2 夹紧触头.....	76
5-3 影响夹紧触头性能的各种因素及其计算标准.....	85
参考文献.....	88
第六章 夹紧触头的腐蚀.....	89
6-1 概述.....	89
6-2 触头在正常大气中的腐蚀.....	89
6-3 触头在含化学活性混入物的大气中的腐蚀.....	91
6-4 触头的腐蚀保护.....	92
6-5 其他类型的触头的腐蚀.....	93
参考文献.....	94
第七章 全金属触头.....	94
7-1 铝导体的焊接.....	95
7-2 铜铝的中间触头.....	99
7-3 电机制造中的硬焊接.....	100
参考文献.....	102
第八章 断开触头.....	102
8-1 关于断开触头的工作与磨损的概念.....	102
8-2 触头上的电磨损(侵蚀)和金属转移.....	103
8-3 小容量断开触头的腐蚀.....	125
8-4 触头的熔焊.....	128
8-5 用来制造断开触头的材料.....	130
参考文献.....	142
第九章 可动触头.....	143
9-1 断路器的触头.....	143
9-2 滑动触头.....	144
参考文献.....	146

第一篇 导体材料

第一章

导体铝、铜和锌

1-1 导体材料的基本特性

导体材料应该：1) 具有最高的导电率；2) 具有足够高的机械性能；3) 不易为大气所腐蚀；4) 能在热的和冷的状态中经受压力加工(轧制和拉延)。

电阻系数 ρ 和电阻温度系数 α 是表示导体材料(以及变阻材料)特性的二个主要常数。电阻系数以欧·公分表示，而在工程上则通常以欧·公厘²/公尺表示。电阻系数的倒数(电导系数)以欧⁻¹·公分⁻¹或公尺/欧·公厘²表示，或者通常也以与国际标准相比的百分率表示，所谓国际标准，就是电阻系数为 $1.7241 \text{ 欧} \cdot \text{公分} \times 10^{-6}$ (在20°C时)的退火铜的电导。

金属的电阻系数照例是随着温度并按照下面的规律而增高的：

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3 + \dots)$$

或者，在大部分计算中，也有按照下面的公式来计算的：

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha t)。$$

各种纯金属的电阻温度系数 α 几乎都是相同的，它近似地等于 $4 \times 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ 。

工程上常用的在一定温度范围内的平均温度系数为：

$$\alpha = \frac{\rho_t - \rho_0}{\rho_0 t}，$$

它的微分表示式为

$$\alpha_t = \frac{d\rho_t}{dt} \cdot \frac{1}{\rho_t}，$$

式中 ρ_0 和 ρ_t ——在温度 t 时电阻系数的初始值和最后值，而 t ——由 0° 到 $t^\circ\text{C}$ 的温度。

由公式可以看出，金属的电阻是线性地随温度而增高的。也只有在温度比绝对零度高很多时，方存在这种线性关系。在接近于绝对零度时，金属的电阻与 T^3 (T ——绝对温度)成

正比例下降。在绝对零度时，从理论方面来说，纯金属是没有电阻的。

对于电流呈现电阻和电阻随温度而增加的现象，都可用导电率的电子理论来加以解释，即：由于金属晶格中原子的热振动(其振幅是随温度而增加的)，就呈现了对电子流的阻力。各种超导体(Al, Zn, Sn, Pb)②组成特殊的一类；即使这些超导体并非完全纯净的，但它们在 $1 \sim 7^\circ\text{K}$ 时就已失掉其电阻。

纯金属的电导系数是金属原子序数的周期性函数，虽然这一关系并不像门德雷耶夫周期表中各元素的原子体积、游离电位和许多化学性能的变化那样具有显而易见的特性。

由于金属的电导系数与电子的自由行程长度成正比，而后者则与晶格中原子间的距离有关，因此不同金属的电导系数的比较不应在1公分³的金属上进行，而应该在以密度和原子量来表达的一个原子的体积上进行。还有，由于在 0°K 附近达到很大数值的电导系数会随温度的增高而剧烈地降低，因而应该在热等价温度，即金属的特性温度时对不同金属的电导系数进行比较。

这样一来，如果把每一金属在特性温度时的原子电导系数(一个原子的电导系数)与金属原子序数的关系展开来，则可得到一条周期性曲线，这曲线接近于游离电位的倒数曲线和原子体积的曲线；碱金属 Li, Na, K, Rb, Cs 和单价金属 Cu, Ag, Au 具有最高的电导系数的数值，在门德雷耶夫表的每一周期范围中，当过渡到二价和三价金属时，电导系数的数值降低。这一规律一方面反映出原子体积(电子自由行程长度)的周期性，而从另一方面，

② 还有另一些金属。

则反映出在每一周期范围内自由电子数随原子价的增高(游离电位增高)而减少。电导系数偏离精确的周期性则与被比较的金属晶格中的差别有关。

金属中的相变以及金属的弹性变形、塑性变形和纯度,都能影响到电阻系数的大小。

当熔化时,金属的电阻发生突变;例如,铜在熔化时,它的电阻要增高一倍。

当弹性压缩或拉长时,金属的电阻系数按下式变化:

$$\rho = \rho_0(1 + k\sigma),$$

式中 σ ——施以的应力, 公斤/公厘²;

k ——应力系数。

当压缩时 k 为负值, 而当拉长时 k 为正值。电阻压力计的应用就是以这种现象为根据的。

导电率在弹性变形时的改变是由于各晶格结点振幅的改变: 在压缩时是由于振幅缩小, 而在拉长时则是由于振幅加大。

塑性变形通常会使金属的电阻因晶格的变形而增加。当变形不大时, 电阻有时也会降低, 这应该是另一些附加的现象(如金属的加密, 晶粒间绝缘膜的损坏等)所造成的结果。

当用退火来进行再结晶时, 金属的导电率回复到原来的数值。

当具有碱金属的固溶体中所加入的混入物在1%(原子百分比)以下时, 它可使金属的电阻近似地与浓度(原子的)成正比地增高。当构成高浓度的合金时, 电阻系数的变化决定于合金平衡图的型式。

在金属中溶解少量其他金属(稀释的溶液)或补加入的金属为一原子百分比时, 金属电导降低(电阻增加)的情况与两种金属(溶剂和溶质)的基本化学参数和物理参数有密切的关系。

诺尔彪里研究了大量以银、铜和金为基础的稀释的溶液的电导以后, 在1921年肯定了: 如合金元在元素周期表中离溶剂金属越远, 则

在一原子百分比的合金元上的电导就降低得越厉害。这就是说, 他肯定了金属(溶剂和溶质)的基本化学常数与溶液电导间的关系。

希巴尔德[1-1]综合了近百年来在电导方面的大量试验数据以后, 于1954年指出: 在铜、银、金和铝中加入一原子百分比的合金元时, 其电阻的增加可用下面的一般经验公式来表达:

$$\Delta\rho = \left(k_a \frac{\Delta a}{a} + k_z \frac{\Delta z}{z} - k_c \frac{\Delta x}{x}\right)^2,$$

式中 $\Delta\rho$ ——0°C时电阻的增量;

a ——溶剂的晶格周期;

Δa ——在加入一原子百分比的混入物时周期的变化;

z ——原子价或Д. И. 门德雷耶夫周期表中类别的序数;

Δz ——溶质和溶剂的原子价之差(0、1、2、3、4等——对铜、银、金来说);

x ——溶剂的压缩性;

Δx ——由于溶解一原子百分比的混入物而引起的压缩性的变化。

系数 k_a 、 k_z 和 k_c 与溶质金属有关。希巴尔德根据已发表的试验数据确定了金属(溶剂铜、银、金和铝中的溶质)的周期II、III、IV、V、VI和VII的这些系数。

上述规律不适用于过渡金属和原子序数小于12的金属, 因此, 这规律是有其局限性的。而这一类规律的重要性并不在于它的实用意义而是在于它阐明了电阻与固溶体中溶剂和溶质的金属的原子特性间的关系。

希巴尔德还指出, 对上述的溶剂金属来说, 在由200°C至熔点的广阔的温范围内, 稀释的固溶体的电阻温度系数可以下式来表示:

$$\rho = aT^\tau + b,$$

式中 ρ ——电阻;

a ——与温度无关的系数;

T ——绝对温度;

τ ——系数, 它与 ρ 的关系为 $\rho\tau = A =$

1. $2\rho_B$ (ρ_B ——在某一溫度时, 金屬溶剂的电阻);

b ——在 0°K 时剩余的固溶体的电阻。

这关系相当于馬济新定理, 馬济新定理指出: 电阻可分成与溫度有关和与溫度无关 (在 0°K 时余留下来的电阻, 参閱下文) 的两部分。

对共晶型的合金以及用金屬瓷質方法制造的合質而言, 其电阻是随容积成分的改变并按照加和規律来改变的。圖8-44所示的銀-銅的系統就可以作为一例。

当构成金屬化合物时, 导电率通常高于相邻的合金, 而且形成明显的最大值, 但比各純元要低很多。由于这种合金的脆性, 它們在导体技术方面没有什么意义。

形成連續的固溶体系列的合金是特別重要的。当50%原子百分比时, 这种合金具有最大的电阻, 其数值有时要比純金屬的电阻高若干倍。圖3-6和8-42上的 Cu—Ni 和 Ag—Au 等合金可以作为例子来说明这一点。

值得注意的是电阻溫度系数的最小值相应于电阻的最大值。这是由于合金的电阻是由两个分量所組成的: 第一个分量是溶剂的电阻, 它决定于溫度而且随溫度而增高; 第二个分量受限于溶剂晶格中使晶格变形的外来原子与溫度无关, 如以公式表示, 則可写成:

$$\rho = \rho_0 + \alpha p,$$

式中 ρ_0 ——溶剂的电阻;

p ——混入物的原子濃度;

α ——与溫度无关的常数。

因此, 在溫度不变时, 合金的溫度系数

$$\alpha = \frac{d\rho}{dt} \cdot \frac{1}{\rho}$$

所以 α 就决定于它的电阻系数 ρ (混入物的濃度越高, 合金的电阻系数也越高), 而这样就使溫度系数随合金元的含量而降低。

在采用固溶体来作为电阻合金时, 就是以固溶体型合金的这种特点为基础的。

合金的热处理使混入物由固溶体中析出, 热处理以后合金的导电率就会增高, 因而在生

产高导电率和高强度的合金(时效硬化的合金)时采用这种处理方法。

1-2 导体鋁

假使从导电率的观点来研究所有的工程金屬 (表1-1), 則銀 (它由于价格昂貴不宜用作导綫) 的导电率最高, 其次为銅, 再次为鋁。

表1-1 純金屬的导电率

金 屬	导电率 γ , 公尺/ 欧·公厘 ² (20°C)	电阻系数 ρ , 欧·公分 $\times 10^{-6}$ (20°C)
銀	62	1.6
銅	59	1.7
鋁	38	2.65
鎂	22	4.5
鋅	18	5.9
錳	13	7.6
鎳	14	6.8
鉄	10	10.0

用作导体的退火鋁的导电率約为标准銅的62%(体积的), 但由于鋁的比重低, 它的每一單位重量的导电率比銅高一倍。从这个关系中可以看出, 用鋁来作为导体材料在經濟上是比较經濟的。当导电率相同时, 同样長度的鋁导体的橫截面比銅大60%, 但其重量仅为銅的48%。

表1-2中示出極純电解精煉鋁(99.996%)的物理性能。表1-3中示出导体鋁的性能。

鋁的缺点是它的机械强度較低。退火鋁的抗拉强度几乎只是銅的三分之一。因此采用以冷加工方法硬化过的(冷作的)鋁綫来作为架空綫。但是, 即使强度增高了(达25公斤/公厘²)还是經受不了由于風、冰等所引起的强烈的拉力, 而架空綫却是必然要受到这些拉力的。因此, 对架空綫而言, 应采用鋼心的导綫(鋼鋁綫)或是由特种导体合金(用热处理方法硬化过的)制成的导綫。

早在十九世紀末和廿世紀初就已在个别的情况中采用鋁导綫, 但那时用得極少。从第一次世界大战起, 鋁綫才代替产量不多的銅而得

表1-2 純鋁的物理性能 (99.996% Al)

特 性	測 量 單 位	指 标
密度		2.6989
20°C时的电阻系数	欧·公分 $\times 10^{-6}$	2.6548
与标准铜相比的导电率	%	64.94
長1公尺重1克的金属在20°C时的电阻	欧	0.07165
与标准铜相比的單位重量的导电率	%	213.92
电阻温度系数	1/°C	0.00429
熔点	°C	660.2
机械性能:		a) 冷轧(75%压缩量) b) 回火(200°C时 4小时)
抗拉强度	公斤/公厘 ²	11.5 4.83
屈服极限	公斤/公厘 ²	10.85 1.24
伸长率	%	5.5 48.8
布氏硬度	公斤/公厘 ²	27 17
线膨胀系数:		
在如下范圍中 20~100°C	1/°C	23.86×10^{-6}
20~500°C	1/°C	72.68×10^{-6}

表1-3 导体鋁 (99.5% Al, 冷拉的) 的性能

性 能	測 量 單 位	指 标
20°C时的密度		2.703
电阻系数	欧·公分 $\times 10^{-6}$	2.828
20°C时的电阻温度系数	1/°C	0.00403
20°C时的线膨胀系数	1/°C	$23 \cdot 10^{-6}$
导热率	卡/公分·秒°C	0.503
平均热容量(0~100°C)	卡/克°C	0.2259
熔化潜热	卡/克	93
熔点	°C	657
气化点	°C	2300—2500
鋁的机械性能(99.4%, 退火的)		
抗拉强度	公斤/公厘 ²	9
長50公厘时的伸长率	%	45
相对收缩	%	80
布氏硬度	公斤/公厘 ²	22

到極普遍的采用。

在鋁的使用上,有人認為鋁不能抵抗大气的腐蝕,但这种見解已为运用的經驗所駁倒了。經驗指出,在正常的大气之下,由于鋁的表面上盖复着一層薄氧化膜,所以它是極不易受到腐蝕的,因此从耐蝕性方面来看,現在已經沒有人認為采用鋁导綫是不妥当的了。但是采用鋁的另一个困难的問題,是在連接鋁导体时不易获得很好的电气接触。

氧化膜一方面使鋁不受腐蝕,另一方面却妨碍导体間的接触的形成并阻碍导体的熔接和焊接。为消除这些缺点,在連接鋁导綫时必须除去氧化膜。目前不易获得良好电接触的困难也已經消除,因而在裝置輸电綫和配电裝置时大量地采用鋁綫而且效果良好。

A. 鋁的导电率和影响导电率的各种因素

許多学者研究了鋁中混入物对其导电率的

影响。我們在这里所引述的数据是最近高梯(Ж. Готье)研究極純的鋁所得的結果[1-2]以及斯拉文斯基(Славинский)、卡尔梅柯夫(Калмыков)和伏尔(Вол)研究苏联出品导体鋁所得的結果[1-3]。

到目前为止,最純的鋁中含有99.997%的鋁,对这种鋁所作的研究指出:它在退火以后(320°C, 三小时)在20°C时的电阻系数为2.63 欧·公分 $\times 10^{-6}$,而它的导电率就等于38 欧 $^{-1}$ ·公尺/公厘 2 ,即为銅导电率的65.45%。

高梯对十三种可能在工业用导体鋁中見到的作为混入物存在的元素: Mg、Si、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、Ga、Ag和Au作过試驗。直徑8公厘的鋁絲样品在以下两种状态中受到試驗: 1) 370°C时退火3小时, 2) 500°C时在冷水中淬火。試驗的結果如图1-1, 1-2, 1-3所示。

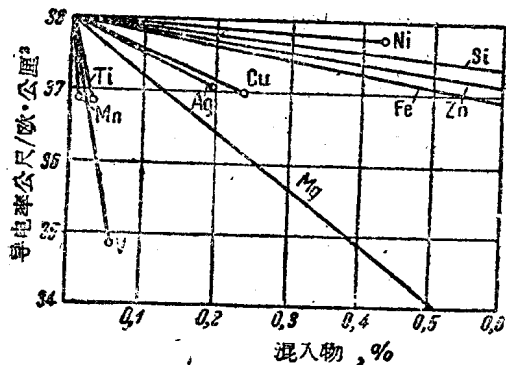


圖1-1 極純的鋁的导电率的降低与其中混入物含量的关系:

当含Si1%时为36.95; 含Zn1.2%时为36.5; 含Fe0.8%为36.7; 含Mg1.4%为28.7。

多次試驗的結果指出: 混入物 As、Sb、Cd、Fe、Ni、Co、Pb、Bi、Au、Ga、Si和Zn并不使退火鋁的导电率降低多少。混入物 Cu、Ag、Mg的影响较为显著, 而Ti、V、Cr和Mn则使鋁的导电率剧烈地降低。所以大体上可以認為不与鋁形成固溶体的混入物对鋁的导电率的影响较小, 而形成固溶体的混入物则或多或少会使导电率产生显著地降低。但也不能一概而論, 例如, 13.5%以下的鋅虽然与鋁

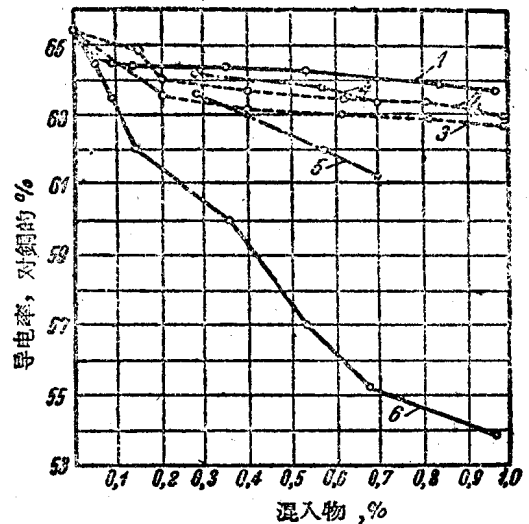


圖1-2 鐵和硅对鋁导电率的影响:

1—Si320°C退火3小时; 2—Fe320°C退火3小时; 3—Fe500°C退火3小时; 4—Fe+Si320°C退火3小时; 5—Fe+Si500°C退火3小时; 6—Si500°C退火3小时。

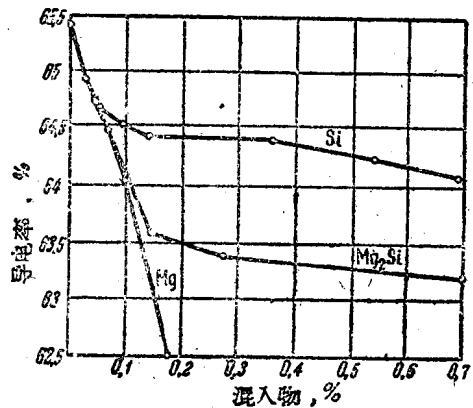


圖1-3 鋁內含鎂和硅对导电率的影响。

形成固溶体, 但它对鋁的导电率的影响还是很小的。如果鋁中有着那些在發热时其溶解度(溶于鋁中)会增高的混入物, 则淬火可使鋁的电阻增高。

只有硅和銅在淬火以后可使电阻有更显著的增高, 但后者必須在含量超过导体鋁的标准时才有这样的影响。

导体鋁通常含有千分之几的混入物(总数不超过0.5%), 其中以鉄和硅为主。

按照ГОСТ 3549-55, 对電纜和导电的制品

的要求, 采用标号为 A00、AO、A1 和 A2 的铝, 其含铝量相应地为 99.7、99.6、99.5 和 99%。而铁、硅和铜可作为混入物。例如, 在主要是用来制造铝线的标号 A1 中, 最多可以含铁 0.3%、硅 0.3%、铜 0.015%。铁和硅的总含量不应超过 0.45%, 而混入物的总含量不得高于 0.5%。

表 1-4 中示出极纯的铝和各种工业用铝品种的电阻系数。

表 1-4 极纯的铝和工业用铝的电阻系数

铝(退火的)	混入物%		电阻系数	温度系数
	Fe	Si	ρ_{20} , 欧·公分 $\times 10^{-6}$	α_{20} , $10^{-3}/^{\circ}\text{C}$
极纯的 Al	0.0005	0.0023	2.62	4.33
Al=99.5%	0.34	0.10	2.767	4.0
Al=99%	0.56	0.32	2.78	4.13
Al=98.5%	0.96	0.41	2.835	4.0

斯拉文斯基、卡尔梅柯夫和伏尔研究了混入物对苏联出品导体铝的性能的影响。原材料含 0.14% Si 和 0.26% Fe (其他混入物的含量没有确定), 在退火后其电阻系数为 2,965 欧·公分 $\times 10^{-6}$ 。直径 3 公厘的铝丝样品在退火 (325°C 时退火 3 小时) 以后试验其电阻, 并且在冷加工状态中和退火以后试验其抗拉强度。所得到的铝性能与 Cu、Zn、Mg、Si 和 Fe 含量的关系如图 1-4 所示。由图可见, 工程用铝的导电率的改变顺序与纯铝的相同。

但热处理就是把铝的线材在拉制以前在 320°C 时退火 1 1/2 小时, 这样就可以保证所得到的铝线的导电率在具有足够的机械强度时为标准退火铜的 61~62%。通常并不用热处理的方法来增高导体铝的导电率。但是可以利用硅在退火时会自石墨状态的固溶体中析出, 从而提高铝的导电率。

用来使铝的强度增加的冷加工并不使它的导电率降低多少。当压缩量达 95~98% 时, 铝的导电率的降低量不超过标准铜的 1.2%。

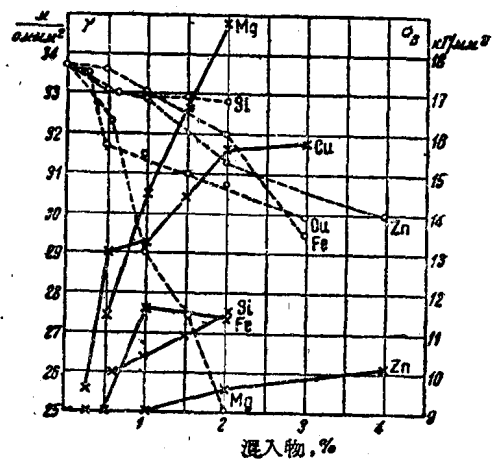


图 1-4 工程用退火铝的导电率 (——) 和抗拉强度 (---) 与混入物含量的关系。

B. 导体铝的机械性能

a) 铝纯度的影响。纯度的 (99.97%) 处理和退火过的铝在拉伸时的强度极限约为 5 公斤/公厘²。铝中所含的混入物使铝的抗拉强度增高。当混入物的含量像纯铝的工业用铝时, 各混入物的影响可总和起来研究。

含 0.5% 混入物的导体铝在退火以后其拉伸时的强度极限为 8~9 公斤/公厘², 对架空线来说, 这样的强度是绝对不够的。因此需用在冷拉时得到的加工硬化来提高导体铝的强度。

6) 冷变形 (加工硬化) 对导体铝的强度的影响。加工硬化对铝导电率的影响不大, 但却使它的机械强度增高很多。

变形程度有时可按下面的格拉尔公式来确定:

$$K_r = \frac{S - s}{s} \cdot 100,$$

式中 S 和 s ——被轧前材料的截面和轧后截面; 如为导线则可按照下面公式确定:

$$K = \frac{D^2 - d^2}{d^2} \cdot 100,$$

式中 D ——线材的直径;

d ——导线的直径。

变形程度也是截面的缩小量与线材初始截面的百分比。可简单地以下式来表示:

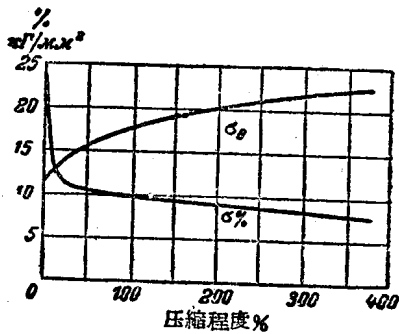


圖1-5 鋁綫(99.4%)的抗拉強度 σ_B 和伸長率 δ 與壓縮程度 K_2 的關係。

$$K = \frac{s - s_0}{s_0} 100\%$$

假使沒有特殊的要求，以後我們還要使用這樣的公式來表示變形程度。

鋁綫的機械性能與壓縮量的關係如圖1-5所示。當鋁的冷變形大約為 $K_2 = 40 \sim 50\%$ 以下時，強度極限和屈服極限劇烈地增高，而伸長率則相應地降低，在這以後抗拉強度增高得很慢而在某些情況中達到最大值，然後機械強度就開始降低。

當鋁冷變形時屈服極限的數值很快地達到抗拉強度的80~85%，此後，這比例幾乎保持不變。用加工硬化的方法可使鋁的抗拉強度極限達到25公斤/公厘²，甚至還可到達更大的數值。

B) 加熱對加工硬化的鋁的機械性能的影響。如所周知，加工硬化過的金屬在達到再結晶溫度時，會完全喪失其因加工硬化而增高的機械強度。對極純淨而強烈地加工硬化過的鋁來說，再結晶溫度是接近於150°C。

金屬的再結晶溫度決定於加工硬化的程度、金屬的純淨度和加熱時間，而且，如加工硬化越微弱，金屬中的雜質越多和加熱時間越短，則再結晶溫度就越高。

由表1-5和圖1-6可見，普通處理的導體鋁在250~300°C時發生完全的再結晶[1-4]。

當極大的電流流過導綫而使它在短暫時間內發熱時，它的機械性能會遭到損失，這一影響在運用中是應引起特別重視的。

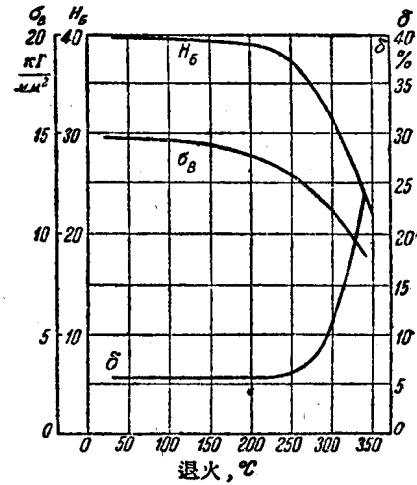


圖1-6 鋁母綫(40×4公厘²)在退火後的機械性能。

根據直徑2公厘的鋁綫(0.32%Si, 0.4%Fe, 強度極限21公斤/公厘²)，在鹽浴中的短時加熱情況，肯定了在260°C時經過60秒鐘可達到

表1-5 鋁母綫(40×4公厘²)在以不同溫度加熱後(保溫15分鐘)的機械性能

性 能	溫 度 °C							
	20	50	100	150	200	250	300	350
抗拉強度, 公斤/公厘 ²	14.9	14.8	14.5	14.3	13.8	13.3	11.3	8.6
伸長率, %	5.75	6.0	5.0	6.0	5.0	6.0	10	35
布氏硬度	42	42	40	40	39.6	38	28.5	21.5

全退火(再結晶)，在350°C時經過10秒鐘，在400°C時經過4秒鐘，而在500°C時則經過1秒鐘。

表1-6 金屬綫和合金綫($d = 1$ 公厘)的短路電流加熱試驗

金 屬	化學成分, %	抗拉強度, 公斤/公厘 ²	20°C時的導電率, 公厘/歐·公厘 ²
鋁	{ Fe 0.17 Si 0.14 }	22.3	35.0
阿爾德列伊	{ Fe 0.33 Si 0.49 Mg 0.51 }	34.5	30.9
銅	Cu 99.85	42.5	56.8
青銅	Sn 1~2 Mg 0.8~1	76.0	38.2

由不同导体金属和合金制成的加工硬化过的导线为电流密度 25.5 至 255 安/公厘² 的短路电流短时地加热后（加热时间为 0.08~60 秒），其抗拉强度和电阻变化的情况如表 1-6 所示。

由此可见，当电流负载足够高时（因而在发热也很高时），加工硬化程度很高的线很快就达到完全的再结晶。压下量 99% 的铝线在 0.6 秒的时间中完全再结晶（发热到 441°C）。根据得到的曲线（图 1-7）可以看出，冷变形的铝线甚至在为时极短暂的短路电流的作用之下，当温度为 160~180°C 时就已开始再结晶，而且其强度也就已开始降低。如所周知，在长时期的发热时铝在更低的温度之下就可能再结晶。研究这个问题有着很大的价值，因为南方地区中的架空线在阳光和本身热量的作用下温度是可能达到 70~80°C 的。

这样，铝线在为电流发热 1000 小时（温度为 70~90°C）以后，在很大的程度上就好像退过火一样，其抗拉强度极限由 20 降低到 15 公斤/公厘² [1-5]。

铝线（直径 2.5 公厘）在发热到 77°C 以后的机械强度如图 1-8 所示，这是近年来（1933 年）一些学者研究的結果。这些试验指出，过了 270 天以后铝线的强度还在继续降低。

表 1-7 中示出铝线、阿尔德列伊线和铜线

在不同温度之下发热一年以后强度降低的情况。

r) 当温度高于和低于室温时导体铝的机械性能。当材料的温度高于或低于它通常受到试验时的温度（20°C）时，能知道它的机械性能在导线的設計和运用上是很重要的。在发热以后，假使导线的材料没有发生再结晶，则冷却了的导线还保持其在加工硬化后所具有的强度。但是，热的金属的强度通常要比冷的金属低。

表 1-7 不同材料制成的线发热一年对其机械强度的影响（在 20°C 时试验）

材 料	直径 公厘	初始抗 拉强度 公斤/ 公厘 ²	在不同发热温度(°C)时强 度的损耗率, %			
			50	75	100	160
铝(99.5)	2.4	16.4	2	5	9	32
阿尔德列伊	2.4	32.9	2	8	18	62
铜	2.0	45.9	4	25	37	44

表 1-8 中示出研究纯铝的机械性能所得的结果 [1-6]。另一方面也对纯度为 99.5% 和直径为 5 公厘的冷变形和退火的铝线进行了试验。试验时样品的加热是在油池中进行的。振动疲劳试验是在转速为 3000 转/分的旋转样品上做的，垂直于样品的轴还施加负载。振动疲劳强度（疲劳极限）以样品能耐受 10⁷ 弯折时的最大负载来确定。样品的弹性模在静弯折和动（交变的）弯折时都要进行测量。

铝母线（40×4 公厘²）在高温时的抗拉强度试验和硬度试验的结果 [1-4] 如图 1-9 所示。实行抗拉强度试验时样品是在电炉中加热的（保温 10 分钟），而在实行硬度试验时——这时铝母线段是通电流使它发热和受到冷却。硬拉的铝的强度在温度为 50°C 左右时即已开始降低，而抗拉强度的剧烈降低则大约自 150°C 开始，但从这温度直至 300°C（即到铝完全退火为止），铝的伸长率几乎是不增加的。根据许多研究数据可知，不管铝的初始强度是多少，它在 400°C 时的抗拉强度差不多总等于 1.5 公斤/

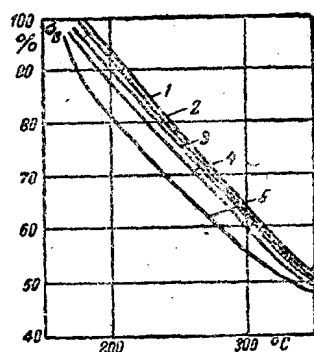


图 1-7 铝线在为电流短时发热后的抗拉强度极限：

1—0.1秒；2—0.3秒；3—1秒；4—3秒；5—10秒。

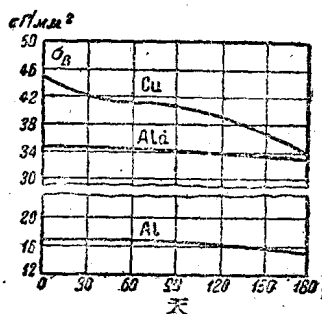


图 1-8 在 77°C 时长时间发热对不同金属线的抗拉强度的影响（在 20°C 时试验）。