

# 铝 软 钎 接 手 册

1971年八月第一版

美国焊接学会

专门审查委员会

W. G. Bader 等

铝协会焊接和

连接技术委员会

Howard E. 等

、

中国科学技术文献出版社重庆分社

# 目 录

|                           |      |
|---------------------------|------|
| 铝外导体单管中同轴电缆研制报告           | (1)  |
| 铝线电机变压器绕组的焊接方向            | (5)  |
| 捷国营布拉迪斯拉瓦电工厂生产铝线变压器二十年    | (10) |
| 冷压焊                       | (15) |
| 冷压对接焊在电气工程中的实际应用          | (22) |
| 温度、金属的组织 and 成分对其冷压焊性能的影响 | (28) |
| 长时间高温加热对铝-铜热压焊接头的影响       | (33) |
| 加热对铜铝焊接接头性能的影响            | (40) |
| 以喷镀层作媒介的异种金属摩擦焊           | (42) |
| 关于铝铜铝钢扩散焊的研究              | (47) |
| 快速固态连接                    | (53) |
| 固态焊接方法中的熔化现象              | (55) |
| 金属冷压对焊用的 MCXC 系列焊机        | (62) |
| 铝真空钎焊的冶金研究                | (64) |
| 铝热交换器的无焊剂钎焊               | (70) |
| 铝的真空钎焊及钎料的研制              | (79) |
| 铝钎焊新工艺                    | (88) |
| 铝组件的无钎剂钎焊方法               | (88) |
| 铝铸件的无钎剂扩散钎焊               | (88) |
| 铝结构钎焊用的 Al-Si 系钎料的性能      | (88) |
| 铝箔和铝棒的冷压焊                 | (88) |
| 苏联的冷压焊设备                  | (88) |
| 铝软钎接手册                    | (89) |

# 铝外导体单管中同轴电缆研制报告

河北省电缆厂

## 前 言

本研究课题旨在解决省内通信和解决从北京延伸下来的大通路在我省的分支、汇接等问题。根据我省电信发展规划,近年来要在省到专区间开通多路载波和采用脉码通信等先进技术,妥善地做好大通路的分支和汇接工作,开通长途拨号和传真业务,实现长途通信现代化。但目前省内敷设的电缆,多为三路载波平衡电缆,使用频率受到限制,很难增多电路数量,为此必须研制一种技术上可行,经济上合理的新型电缆。才能适应发展的需要。1975年末,受到邮电部五所研制300路中同轴电缆的启发,认识到这种电缆能满足省内发展的需要,但我厂来说,难度很大,故当时没有着手进行。后来在全国科学大会的推动和鼓舞下,省局也提出了要求,我们才下决心进行300路铝外导体中同轴电缆的研制工作。

这种电缆有三个特点:

- 1)它是由一个中同轴对组成,结构简单,便于省内生产和使用;
- 2)它的外导体是铝的,以铝代铜,可节约铜60%;
- 3)它的外导体兼做金属封闭护层用,可省掉其它金属护层,因此电缆的成本显著下降。

在研制300路中同轴电缆中,首先要解决的技术关键是铝外导体屏蔽管的连续焊接问题。通过调研,决定采用冷压焊接技术。在铝外导体制造工艺上采用冷压焊技术纯属初步尝试,国内外均没有先例,因此困难颇多。从1977年7月开始研制,到79年7月完成了压

管试制任务。进一步试制了三盘电缆,经邮电部一公司协助初步测试,电气性能基本符合要求( $\alpha$ 一项未测)。但工艺上还有不足之处,经改进于1979年12月又重新生产三盘电缆来,经委托邮电部传输所测试鉴定,电气性能达到了原设计要求,并已于1980年3月底顺利通过该课题的科研阶段性鉴定。得以初步定型,小批量试产。

本课题的主要任务有四个方面:

- 1.连续冷压焊技术;
  - 2.用冷压焊生产单管铝外导体中同轴电缆;
  - 3.对焊缝质量的探测;
  - 4.电缆的接续和低温补焊技术。
- 本文只对焊管技术进行综述。

## 连续冷压焊技术简介

冷压焊是以压力使被焊工件间相互接近到原子作用范围内,并产生定向的塑性变形,使表面杂质被挤出结合面外,形成了牢固结合的焊缝。铝的冷压焊接性能是最好的,因此对它采用冷压焊尤其适宜。

我们是采用2只 $\phi 200$ 毫米滚轮压接方式进行的,工艺和设备都很简单,只要达到设计要求,就可以保证生产的连续性和长度方向上截面形状的均匀性,所以焊接质量较稳定。但是由于压接是在裙边上进行的,焊成的铝管存在一条裙边,会造成铝管截面惯性矩的不均匀,引起扭曲,断裂等一系列问题,这些问题,我们已经初步解决了。

## 工 艺 要 求

为了简化电缆结构和工艺起见,单管铝外导体中同轴电缆的铝外导体身兼二职:既

是外导体，又是金属密封层。故对它的焊接工艺要求较高，既要得到满意的电气连接，又要保证密封性，还要有一定的机械性能。

我们的具体要求如下：

1) 使用原材料方面：

Al—48×0.9毫米软铝带（纯度为99.9%）；

2) 焊接后铝外导体规格：

内径9.7毫米，外径11.5毫米；

裙边高2.0毫米，宽0.5毫米；

段长250米。

3) 直流电阻不大于1.2欧/公里，+20℃；

4) 抗拉断负荷不小于240公斤；

5) 气密性试验：充入1.6公斤气压，经24小时不跑气；

6) 成缆后经收放三次（收线盘芯径为500毫米），再测其长度截面不均匀度不应大于5%。

### 铝外导体成型技术

在成型技术方面，基本上是学习五所的经验，采用三次成型的办法。但由于我们要成型的外导体，多两个纵立的裙边，带来了一系列的困难。所以先弯两边，用Ⅰ道模先把两个裙边辗出来，再用Ⅱ道模弯中间部分，最后通过喇叭模完成成型任务。参看图1。

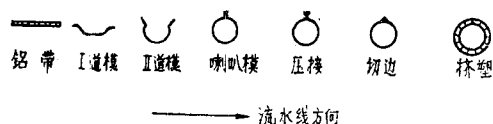


图 1

在设计和制造成型模时，首先要注意对称性的问题，几道模的中心线一定要调直，两个裙边的辗压间隙要相等，以防止铝带跑偏，成型后裙边高度不等，造成剪断铝带的现象发生。

在选用模具用料时，尽量避免用钢材，因为加工光洁度不够高及其本身的原因，时间长了会产生划铝、粘铝的现象，造成铝管表面刮伤增大摩擦阻力，而铝的屈服点不高，每平方米只有3—5公斤，所以容易造成拉

断现象。为此，将钢模一律改用尼龙棒模，并在背面加注润滑油，以减少摩擦，提高成型效果。

### 铝带的清洁

我们使用的铝带，除由于保存关系有些氧化膜外，在切带、成型的过程中，也难免要沾上一些油污、杂质等有机物，尤其是铝本身在空气中极易氧化，生成极薄的氧化层（ $Al_2O_3$ ）。它们都直接影响焊接质量，因此必须在压接前将铝带清洁，而且要连续清洁。我们曾采用铜丝轮两次清洁的办法，但由于铜丝轮本身很容易沾染油污，起不到清洁作用。现改用 $\phi 150$ 毫米的钢丝轮一次清洁，用0.4瓩电动机带动，以23米/秒的线速度进行清洁，效果较为满意。

### 铝外导体的连续冷压滚焊设备

连续冷压滚焊设备是由主机机体、压轮、切刀三部分组成。主机机体是由箱体、齿轮、传动部分组成，起传递动力和安装压轮、切刀用。箱体尺寸为600×300×150毫米。两个压轮都是主动的，由变速电机带动，主轴转速每分钟4.8—19转，悬臂式，上装焊接压轮。

压轮是焊机的主要部件，它的直径，工作凸台，抱园尺寸必须严格要求，才能保证焊接质量。

压轮的直径设计要考虑以下原则：

a. 能保证咬入角 $\leq 7^\circ$ ；

b. 避免主机承受太大的压力。

当然变形程度对焊接质量有很大关系，我们实践结果是：变形程度大于60%时就可以焊住。具体情况如下表：

| 压轮直径<br>(毫米) | 凸台宽度<br>(毫米) | 变形程度<br>(%) | 焊缝宽度<br>(毫米) | 焊 缝 质 量    |
|--------------|--------------|-------------|--------------|------------|
| 200          | 1.6          | 55          | 0.70         | 用改锥可以撬开    |
| 200          | 1.6          | 60          | 1.25         | 从焊缝外撕开，不漏气 |
| 200          | 1.6          | 63          | 1.55         | 从焊缝外撕开，不漏气 |
| 200          | 2.3          | 70          | 2.30         | 从焊缝外撕开，不漏气 |

焊缝金相图见图2-5。



图2 变形程度60%  
时焊缝宽度,  
×30倍

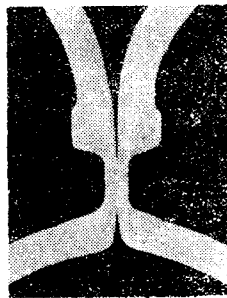


图3 变形程度70%  
时焊缝宽度,  
×30倍

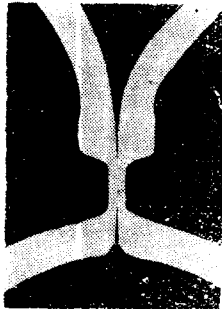


图4 变形量75%时  
焊缝宽度, ×  
30倍

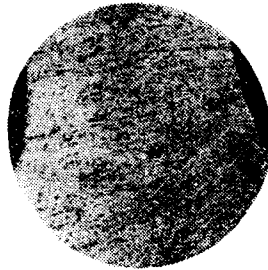


图5 变形程度70%  
时, 焊缝截面  
显微组织, ×  
210倍

我们假定焊缝变形量 $\varepsilon_0 = 70\%$ , 而焊接部位厚度 $H$ 为 $2 \times s = 2 \times 0.9 = 1.8$ 毫米时, 压接后的裙边厚度

$$h = H(1 - \varepsilon_0) = 1.8(1 - 0.7) = 0.54 \text{ 毫米} \quad (1)$$

在 $H$ 、 $\varepsilon_0$ 已定的条件下, 压轮直径越大, 咬入角越小, 对焊接越有利。故咬入角(图6)和主机压力两项必须综合考虑。另外与压轮和铝带间的摩擦系数 $f$ 有关, 压轮表面光洁度越高, 要求咬入角越小。实际上我们所用车削加工的压轮表面是粗糙的, 故取用经验公式:

$$\frac{H-h}{D} = \frac{1}{200} \sim \frac{1}{150} \quad (2)$$

式中 $D$ 为压轮直径。如系数取175时, 则 $D = 175(H-h) = 220$ 毫米, 为方便, 取整数, 我们取 $D = 200$ 毫米。验算咬入角用下列公式:

$$\alpha^\circ = \frac{180}{\pi} \sqrt{\frac{2(H-h)}{D}} = 57.3 \sqrt{\frac{2\Delta h}{D}} = 6^\circ 25' 48''$$

可以保证铝带正常压接。

如条件允许, 压轮直径取用 $D = 250$ 毫米, 可能还要好些。我们采用的压轮的焊接压力, 可按下列公式求得:

$$P_{\Sigma} = P \cdot B \cdot \sqrt{(H-h)} \frac{D}{2}, \quad (4)$$

式中 $P_{\Sigma}$ 为总的焊接压力,  $P$ 为焊接时的最大单位压力,  $B$ 为凸台宽度,  $H$ 为被焊部位厚度( $2S$ ),  $h$ 为剩余厚度,  $D$ 为压轮直径(毫米)。

单位压力 $P$ 在整个接触面上是不均匀的, 在临界面上的单位压力最大, 它与许多因素有关, 计算十分复杂, 一般情况, 在 $\varepsilon_0 = 75\%$ 时,  $P$ 取180公斤/毫米<sup>2</sup>。

$$P_{\Sigma} = 180 \times 2.5 \sqrt{(1.8 - 0.54)} \frac{200}{2}$$

$$= 450 \times 11.225 = 5051.23 \text{ 公斤}$$

两个压轮均为主动轮, 故各承受一半力, 即2526公斤的压力。

此外, 由于主机轴间的装配积累偏差值和工作时的弹性变形量, 都引起实际变形程度与理论设计值不相符合, 故设计时应考虑该因素。

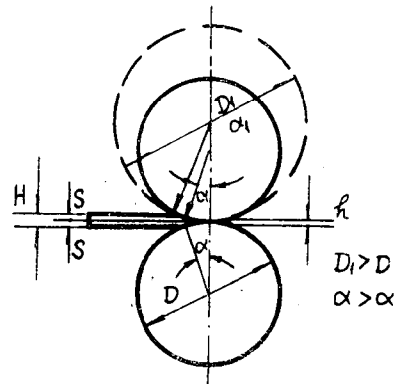


图6 轮径与压入角关系示意图

## 切 边 技 术

为了使压接后的裙边保留2毫米,多余的部分必须切除,我们采用了混合切刀来完成这一任务。即对切和剪切混合式的切刀。如单独使用一对剪刀时,刀片下压剩余的裙边,造成铝管畸变,出现象“苹果把”那样的缺陷。如单独使用对切刀时,容易崩刀,磨损刀刃,和由于轴的弹性变形关系,很难全部切除多余的废边。切刀上应设有抱圆限位装置,以保证铝管有正确的运动方向和均匀地切除废边。

## 铝外导体被复工艺

为解决由于焊接裙边带来的一系列弊病,经多次试验研究,最后在铝外导体表面紧紧的挤包二层高压聚乙烯护套的办法,取得了满意的结果,目前我们条件较差,试验场地上没有挤塑机,所以临时采取了纵包2.0毫米塑料管,缠以无碱玻璃丝带,然后加热,急骤冷却的办法,使塑料管熔化代替了挤塑机,然后再挤上一层外护套(2毫米厚)。这样生产出来的电缆样品,经过三次反复收放,再进行测试,其电气性能都能达到设计要求。将来正式生产时,应将压接出来的电缆立即进行挤塑。

## 焊缝的金相组织和物理试验

### 1. 金相分析

焊接质量与变形程度有直接关系,变形程度超过60%的接头,焊接介面完全消失。焊缝的纵横剖面中,看不到氧化物及杂质的夹渣,参见图7.8。

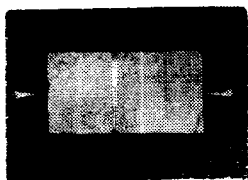


图7 焊缝的金相组织横向剖面,  
×400倍

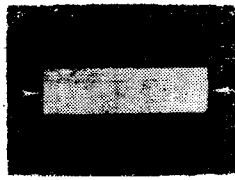


图8 焊缝的金相组织纵向剖面,  
×400倍

### 2. 气密性试验

铝外导体焊接后,立即经180℃2秒钟再结晶退火,在直径为管径40倍的收线盘上收、放拉直后(收线时裙边向上)取20米进行充气试验,经24小时无漏气(充气气压为1.6公斤/厘米<sup>2</sup>)。

充气试验后,再将气压增加到8公斤/厘米<sup>2</sup>,经30分钟铝管无漏气及破裂现象。

### 3. 抗拉强度试验:

光铝管的拉断力为285公斤。

4. 弯曲试验: 光铝管在R=250的收线盘上收、放时有断裂现象,但经紧包护层后,在收线盘上反复收放8次未发现破裂现象。

### 5. 扭曲试验:

铝管包上护套后经三次收、放,再测试,其长度断面不均匀度为2.2%,符合设计要求。

在电气性能方面,经鉴定,电缆样品的所有7项电气性能指标,均基本达到邮电部五所提出的技术标准。

## 经 济 效 果

这里仅以石家庄—藁城37公里开通120路为例,如用60路平衡电缆,则需要线路费用371200元(不包括载波端机设备费),而用单管中同轴,则只要253,400元就够了。这是指37公里而言,线路越长,差距越大。如开通300路时,用一条60路电缆是不行的,必须使用4×4×1.2平衡电缆,而且要用双绞开放四线制,这样费用就增多很多,需要1047,000元,而用单管中同轴电缆,做单绞二线制开放时则线路费用只要265,000元就足够了。可见单管中同轴电缆开放电路越多,优越性就越大。

## 初 步 结 论

本课题的工作重点是探索连续冷压接工艺生产单管铝外导体中同轴电缆的可能性,相应地做了一些探伤和补焊、接续方面的试验。整个研制小组,抓住这一中心环节,在

# 铝线电机变压器绕组的焊接方向

河北工学院

李致焕

## 一、国内外铝绕组焊接概况

铝线电机、变压器早在第一次世界大战时即已出现。二次世界大战时，欧洲的一些国家已成批生产，近几十年来东欧各国铝绕组所占比例不断上升<sup>[1]</sup>；五八年以来，我国为贯彻“以铝代铜”的技术政策做了大量工作，尤其是解决技术关键问题——焊接——方面已取得了显著的成绩。

大家知道，铝绕组的引线端部必须焊接一段铜线，这就存在铝与铝和铝与铜的焊接问题。同时，铝铜的焊接因冶金原因和物理性能的差别而十分困难，国内外的解决办法大体上是将铝铜在专门工厂或专机上制成予

制接头，在电机变压器的生产现场只进行铝铝的安装焊接。

制造铝铜予制接头的方法有三类：即铝镀铜法、轧制铜包铝和焊接法。铝表面镀铜的工艺比较简单，但镀层易于剥落，国内外都曾采用过。我国江山电工器材厂等单位曾用镀铜予制接头和碳模电阻熔焊解决小型铝线电机、变压器的焊接，直至电容储能焊机出现才停止使用。用轧制法生产铜包铝的方法有两种，园线是将镀银的铝棒套入铜套中轧细而成；扁母线是在铝板的两面轧入铜板，形成双金属板，切成所需尺寸的预制接头。轧制法的生产率很高，但设备投资大。我国轧制过细圆铜包铝线，但因铝无镀银层，

较差的条件下，初步证实了连续冷压焊工艺是可行的。并用以完成了单管中同轴电缆的试制任务，从而给铝外导体中同轴电缆的生产和发展提供了一条新途径。

然而，就我们的研制工作来讲，还只是刚刚迈出第一步，对冷压焊接铝外导体技术也仅仅是初步掌握。无论在工艺方面，还是设备上都有待进一步改进与提高。

根据前一段的研制工作，可作如下初步结论：

1) 用连续冷压焊接工艺，生产铝外导体中同轴电缆的技术是可行的，经济上是合理的；

2) 试制的三盘250米电缆的电气性能指标，均能达到设计要求；

3) 在制造工艺上，较为简单、稳妥，所用的设备，可自行加工制造，较为方便、经济；

4) 缺点是裙边还有点高，成型还不太理

想，今后应进一步改进；

5) 流水线的抄平问题尚未彻底解决，为确保产品质量，还必须进一步探索合理的解决办法。

总而言之，采用连续冷压焊生产铝外导体中同轴电缆是一项简单、易行、稳妥、廉价的新工艺，新途径，它对今后发展我国铝护套电缆的生产方面会起到巨大作用的。

同时也应看到，还有许多不足之处，有待今后进一步改进。我们将继续努力进行这一工作，相信这一新技术，一定会为祖国四个现代化做出贡献。

由于我们水平不高，本文一定有不妥之处欢迎批评指正。

参考文献11种（略）

〔编者按：本编辑部在编辑过程中对原报告有所删节〕

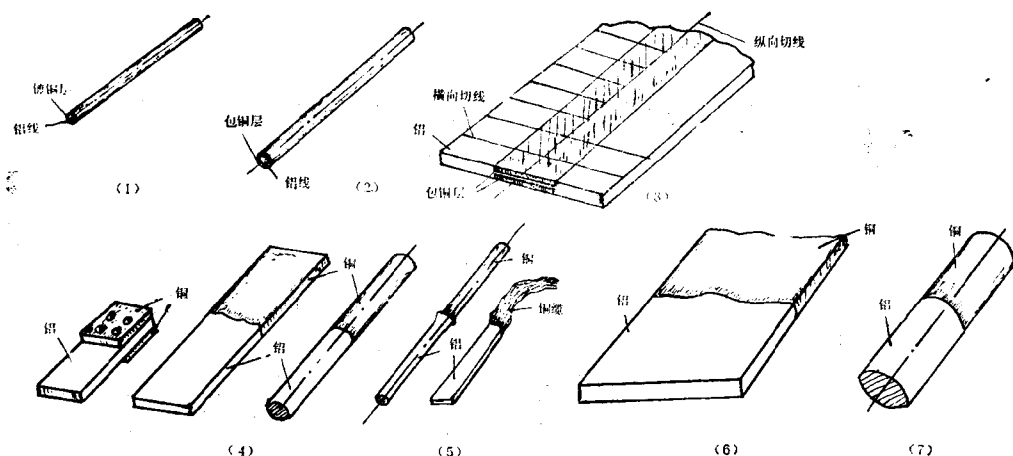


图1 各种铝铜预制接头示意图

(1) 铝镀铜；(2) 轧制铜包铝线；(3) 轧制双金属板；(4) 冷压焊接头；(5) 电容储能焊接头；(6) 闪光焊接头；(7) 低温摩擦焊接头

其电接触性能不良而未能在生产上应用。第三类方法就是焊接。可制造铝铜预制接头的焊接方法有：冷压焊，低温摩擦焊、闪光焊、电容储能焊等。其中冷压焊和闪光焊在国外应用较早，我国从五八年开始，发展了上述四种焊接设备，承担了绝大部分的铝铜预制接头的生产任务。轧制法和焊接法生产预制接头在国外同时应用。

各种铝铜预制接头的示意图见图1。

在制造预制接头的焊接方法中，闪光焊适于制造截面积在  $1800\text{毫米}^2$  以下的母线，低温摩擦焊适于制造中等截面积的接头，冷压焊适于中小截面的接头，电容储能焊适于小线径的接头。

国内外对扁线绕组、汇流排母线的铝铜预制接头一般采用轧制铝铜双金属板、闪光焊、低温摩擦焊和冷压焊，而铝铝的现场安装焊接则普遍采用氩弧焊或气焊。

对于细圆线绕组，国外多数采用铜包铝线预制接头，我国采用储能焊预制接头。铝铝的焊接国外采用碳模电阻熔焊，我国也有少数厂采用。但是由于6~9\*机座铝线电机的铝引线股数较多，故多数厂采用气焊，少数厂采用碳弧焊。

近年来，对细圆线绕组不少厂甩掉铝铜

预制接头，在安装现场直接进行铝铜的焊接。少数厂采用储能焊在绕线后于绕组端部焊一段铜线，省掉铝铝接头。多数厂则采用气钎焊、无机盐焊剂钎焊、松香酒精钎焊，直接在铝引线端部焊一段铜线，同时也能焊接铝铝。但经过几年的运行考验，气钎焊的应用逐渐减少，而松香酒精钎焊则日益增多。

从上述情况看，我国的绕组焊接情况是多样化的。从五八年开始至七十年代初，我国的铝铜焊接经历了群众性的试验探索阶段，各厂都按自己的条件和习惯，各种焊接方法同时使用。目前，从稳定焊接质量入手，开始研讨确定较好的焊接方法。因此，讨论今后铝绕组焊接的方向就具有现实意义了。

## 二、几种有前途的焊接方法

### 1. 选择焊接方法的标准

衡量哪种焊接方法具有更大的优越性，只能从两方面来考核。首先是稳定可靠的接头质量；其次是有较高的生产率。只有先进的焊接方法才能同时具备这两项要求。十几年来实践表明，一味追求方便和快，忽视对

质量的要求，必然会出现问题。例如细线绕组的气钎焊曾造成成批电机因接头腐蚀脱落而报废的事故。从运行效果看，这种方法各厂都有不同程度的返修事例。接头质量是决定电机使用性能和寿命的重要因素，也是影响电机声誉的关键问题之一。

摆脱落后的生产水平，向机械化自动化进军是实现四个现代化向我们提出的迫切要求。选择先进的焊接方法就是刻不容缓的了。一些单凭操作者的熟练技巧来决定焊接质量的焊接方法，已由实践证明是不可靠的，生产率的提高也受到限制。有的焊接工艺烦琐，影响生产率的提高，也给机械化、自动化造成困难。

## 2. 常用焊接方法的分析

按可焊金属的范围，我们把焊接方法大体分为三类：只适于焊接铝与铜，如冷压

焊\* 闪光焊、低温摩擦焊和电容储能焊，称为第一类方法；只能焊接铝与铝，如氩弧焊、碳模电阻熔焊、电阻对焊、气焊和碳弧焊，称为第二类方法；既能焊铝铜、又能焊铝铝的，如气钎焊、无机盐钎剂钎焊、松香酒精钎焊、无钎剂有模熔钎焊等钎焊方法，称为第三类。各类方法的特点见下表。

第一类焊接方法主要用于铝铜预制接头的生产。它们都具有以下的特点：

1) 都属于压力焊，都可实现焊接过程的机械化自动化；

2) 焊接质量都是优等的，接头的电气性能、抗老化性能、抗腐蚀性能、使用寿命在各种铝铜接头中是最好的；

3) 接头的体积在各类接头中是最小的。因为它们都是对接接头（搭接冷压焊例外）；

4) 工序简单，既不用钎剂，也不用填料，焊后也不用清洗；

表 1 各种焊接方法的比较

| 焊接方法         | 焊接金属及截面形式             | 适于预制或安装        | 工艺规范参数 | 质量        | 机械化自动化     | 有无腐蚀性钎剂 | 设备情况              |
|--------------|-----------------------|----------------|--------|-----------|------------|---------|-------------------|
| 闪光焊          | 中、大截面铝铜<br>截面形式不限     | 预 制            | 较多     | 优         | 可          | 无       | 专用焊机可<br>定 购      |
| 低温摩擦焊        | 中等截面铝铜只<br>能焊回转头      | 预 制            | 较少     | 优         | 可          | 无       | 专用焊机自制            |
| 对接冷压焊        | 中、小截面对接铝<br>铜，截面形式不限  | 预制和安装都<br>可    | 最少     | 优         | 可          | 无       | 专用焊机可<br>定 购      |
| 搭接冷压焊        | 扁母线铝铜                 | 安装现场           | 最少     | 优         | 可          | 无       | 专用焊机自制            |
| 电容储能焊        | 线径 3 毫米以下铝<br>铜，扁线与铜缆 | 预制或安装<br>焊 皆 可 | 较少     | 优         | 可          | 无       | 专用焊机可<br>定购或自制    |
| 电阻对焊         | 小截面铝铝，截<br>面形式不限      | 安装现场施焊         | 较少     | 优<br>但不稳定 | 可          | 无       | 专用焊机可定<br>购 或 自制  |
| 氩弧焊          | 扁线或中大截面<br>手 工 焊      | 现场安装用          | 较少     | 优         | 手 工        | 无       | 成套设备可定<br>购 需 氩 气 |
| 碳模电阻熔焊       | 细圆铝线绞接                | 现场安装焊接         | 少      | 优         | 手 工<br>或自动 | 无       | 自制，有图纸            |
| 气 焊          | 各种截面铝铝                | 现场安装焊          | 少      | 可         | 手 工        | 有       | 易 得               |
| 松香酒精钎焊       | 细圆线铝铝、铝铜，<br>单股绞接皆可   | 现场安装焊          | 少      | 可         | 手 工<br>或自动 | 无       | 自制方便              |
| 成型密钎焊        | 多股细绞线铝铝或<br>铝 铜       | 现场安装焊          | 少      | 可         | 手 工<br>或自动 | 无       | 自制成型模加<br>热设备可定购  |
| 气 钎 焊        | 多股细铝绞线与铜缆             | 现场安装焊          | 少      | 可，不<br>稳定 | 手 工        | 有       | 易 得               |
| 碳 弧 焊        | 多股细铝线                 | 现场安装焊          | 少      | 可         | 手 工        | 有       | 自制方便              |
| 无机盐钎剂<br>钎 焊 | 多股细铝线与铜缆              | 现 场 安 装        | 少      | 可         | 手 工        | 有       | 自制方便              |

\* 冷压焊还可焊接铝铜、铜铜。

#### 5) 生产率取决于焊接设备的设计。

在这类焊接方法中,以冷压焊的优点最为突出。它不仅能焊接各种截面形式的铝铜接头,也能焊接铝铝,尤其是对扁线的焊接,可以减少钳口的调换。它既能对接,也能搭接。它不仅能专门生产铝铜预制接头,也适于安装现场施焊。同时工艺规范参数最少,设备也最简单,国外在铝绕组,尤其是扁铝线绕组,冷压焊应用较为广泛。我国的对接冷压焊机已经自动化,使用最方便。搭接冷压焊也一直在国内外大量应用于变压器和电机的汇流排及母线上的安装接头。

电容储能对焊也具有独特的优点,它特别适于焊接直径3毫米以下的铝铜线,而且预制接头或现场安装焊接都适宜。

在第二类焊接方法中,除电阻对焊为压力焊外,都属于熔化焊。它们的共同特点是灵活、适应性强,大多为手工操作。其中以氩弧焊的焊接质量最好,工序最简单,生产率最高,是偏线铝铝熔焊的最好方法。相比之下,气焊质量最差,需使用腐蚀性焊剂和填料,而且焊后清洗要求严格,工序十分繁琐。碳模电阻熔焊是一种不使用焊剂的成型熔焊,焊接细圆线具有独特的优点。而扁铝线的焊接则以电阻对焊较好,但质量的稳定性尚不及冷压对焊好。

第三类焊接方法基本上都是钎焊。它们的共同特点是:既能焊铝铜,又能焊铝铝,设备轻便简单,适于现场安装的施焊。这类接头都因存在与铝不同的电极电位的焊料金属,所以都具有日后电化腐蚀和老化的可能性。其中气钎焊和无机盐钎焊都使用腐蚀性钎剂,焊后应彻底清洗,否则接头的寿命很短。松香酒精钎焊虽使用钎剂,但无腐蚀性,焊后不必清洗。有模熔钎焊与气钎焊相比,前者不使用钎剂,而且有模成型,抗腐蚀性能好,且易于自动化,对多股绞线的焊接较有前途。

按标准试验方法对上述接头进行电气、抗老化和抗腐蚀性能的试验结果看,上述三

类焊接接头,它们的电阻变化率始终都不超过5%。就抗大电流冲击而言,除了焊料熔点低于380℃的钎焊接头外,其余的接头都能承受8~25倍额定电流的冲击。说明第三类方法中,钎焊的焊料不应低于380℃。

从二十年的运行实践表明,接头的使用寿命主要由接头的抗腐蚀性能所决定。对多股细线绕组,接头残留的腐蚀性物质是造成接头寿命短的关键因素。由于第一类焊接方法不存在焊剂,它们的接头寿命是最长的。第二类焊接接头除了气焊使用焊剂外,其他方法都不使用焊剂,因而接头的寿命至少与铝线相同。在第三类焊接方法中,即如前述,由于焊料的存在,接头存在腐蚀性焊剂,其腐蚀的速度是最大的,有可能在几个月中即使接头脱落。我们知道,所有的无机盐铝焊剂,都具有强烈的吸潮性能,它们中的氯离子( $\text{Cl}^-$ )和反应产物中的氢氧根离子( $\text{OH}^-$ )都是使铝形成电化腐蚀和化学腐蚀的物质,只要存在于接头上,日后就不间断地加速腐蚀。当然,如果不存在这类离子,吸潮性不存在,造成接头的腐蚀条件也就不存在(相当于清洗彻底或不使用腐蚀性焊剂的接头),那么腐蚀的速度也就缓慢得多或不进行。

曾对气钎焊和气焊接头进行清洗试验,经测定未经清洗的接头,氯离子含量在4.6毫克以上,经清洗、烘干的绞接接头,氯离子含量在0.3~3毫克之间。有人认为,为使接头具有必要的抗腐蚀性能,氯离子的含量不应高于0.1毫克。

国内外的大量资料都表明,多股绞线的清洗是永远也不能彻底的。这就是为什么国外不少资料强调和明文规定<sup>(2)</sup>,对多股铝线不允许使用带有腐蚀性焊剂的焊接方法的原因。

从运行效果考查,也可以说明这一观点。气焊或气钎焊的绞接接头,除焊后用沸腾开水(并不断更换新水)的清洗很少出现返修事故外,多数厂都有返修的事例。其原因

就是腐蚀造成的。使用刚玉坩埚和纯度高的铝铝钎焊,十多年来未曾因接头而出现返修事例。使用碳模电阻熔焊的接头,十多年来也未曾有返修的事例。使用电容储能焊直接进行安装焊接的接头同样无返修的事例。

总之,上述分析雄辩地证明,使用不带腐蚀性焊剂的焊接方法是我们首先要努力的方向。

顺便说一下,为了避免在潮湿环境中工作的接头少受腐蚀,所有铝铜接头进行漆封闭是必要的。

### 三、铝绕组的焊接方向

#### 1. 扁线绕组的焊接方向

扁线的铝铜预制接头在我国已经解决,氩弧焊在安装时使用也是比较理想的。这一解决方案是否是最好的?

我认为,最理想的焊接方案是使用冷压焊。在绕线工序中安装自动重复挤压对接冷压焊机,焊接铝线要比电阻对焊质量稳定。在安装引线前,各个绕组末端都用冷压焊机焊一段扁铜线。以后的工序按铜绕组处理。氩弧焊只做为辅助设备即可。

#### 2. 细圆线绕组的焊接方向

细圆线绕组的焊接,使用储能焊预制接头和碳模电阻熔焊既然可以保证质量,有模熔钎焊直接焊接铝铜和松香酒精钎焊简便简单,都能满足使用要求,这是否是最理想的方案呢?

我认为,电容储能焊机在绕组末端焊一段铜线,并绕入绕组1~2匝,这种接头具有接头最少、质量最好的优点。碳模电阻熔焊可做辅助设备。

### 3. 近期的设想

目前,中型以上电机、变压器的焊接半数以上是铝铝用气焊,铝铜采用预制接头。氩弧焊因防护和劳保问题未能彻底解决,用户较少,在电机行业使用氩弧焊的比例尚不到5%。自动重复顶锻对接冷压焊机尚未大量投产,因此近期只能使用铝铜预制接头,但在氩弧焊尚难推开的条件下,加强气焊的清洗工作,并不是不允许的。

对多股细线绕组松香酒精钎焊适应性强;自动或半自动储能焊机的生产目前也存在问題,因此无条件自制储能焊机的工厂,采用松香酒精钎焊是比较现实的,有条件的厂做储能焊的预制接头,铝铝采用碳模电阻熔焊也能保证质量。

值得提出的是6~9\*机座铝线电机的绕组引线股数多,可暂以松香酒精钎焊解决,具体的办法有二:其一是在引线合股之前,在引线的定子另一端,一根一根的接线。使用天津第二电机厂设计的刚玉坩埚焊接,其二是按照传统合股后进行钎焊,但要使用容量大的坩埚。采用铝铜预制接头时,可用上面的第一办法在定子另一端一根一根地用碳模电阻熔焊焊接。熔钎焊较适于多股引线直接焊上铜线,但工艺设备还需进一步完善。

当前应用带有腐蚀性焊剂的焊接方法,只能加强清洗,但不认为是有方向性的方法。尤其是线径1毫米左右的绕组线,对腐蚀十分敏感,应该尽快淘汰。

#### 参考文献

1. A Symposium on Aluminium and its Alloys in Electrical Engineering, London, May, 1957.

2. 铝及铝合金的焊接—B. Л. 罗沙: 陈德儒译,

上海科学技术出版社, 1960年。

# 捷国营布拉迪斯拉瓦电工厂 生产铝线变压器二十年

F. Šimkovic 等

## 前 言

近年来, 在一些刊物的专业文献中, 诸如各公司的产品样本中出现了一些在变压器生产中采用铝的报导。同时认为铝线变压器的性能是良好的, 和铜线圈变压器一样好。主要由于世界工业的迅速发展, 铜供不应求, 才期望采用铝。

鉴于缺铜是一个世界范畴的现象, 这就使市场上铜的价格不断上涨, 因此在电气工程中才把注意力转到与铜最相似的另一种金属——铝上。

## 国营布拉迪斯拉瓦 电工厂以铝代铜

国营布拉迪斯拉瓦电工厂从铜过渡到铝很迅速。早在1952年就在配电变压器上以铝代铜。从铝-铝和铝-铜的连接角度创造了必要的, 然而总的来说是严格的工艺准备工作。

该厂以铝代铜的过渡方式如下: 将以前生产的铜线圈变压器绕成铝线圈的。

在采用铝时从结构角度出发首先应意识到铝的导电率比铜差, 在20℃时, 铝的导电率 $\gamma = 34$ 米/Ω毫米<sup>2</sup>, 铜的导电率为 $\gamma = 57$ 米/Ω毫米<sup>2</sup>。

这种直接以铝代铜在导线和线圈的尺寸保持不变时, 为使线圈的温升不至超过容许温升, 要降低变压器的容量。当时生产的1.25系列的变压器容量降低一个功率级。相

对于同等容量的铜线圈变压器来说, 这一容量降低意味着空载损失和短路损失增加了, 空载电流增加和短路电压降低。

很快就设计出新的系列, 以代替过渡时期生产的变压器系列, 这种新系列是根据铝的特性设计的, 也即从在不断增长的电网中的短路强度安全的角度进行设计, 在由220千伏线路供电时其短路容量增加得很多。短路强度已在别霍维茨短路试验室证明是合乎要求的。

为铝线变压器研制了硅钢片, 生产了标号2的系列变压器。图1和图2根据所用硅钢片的质量列出该系列变压器的一些数据。标号4的最新系列有很低的损失。从损失的角度和短路强度的角度来看, 该系列变压器与现在生产的铜线圈变压器相同。

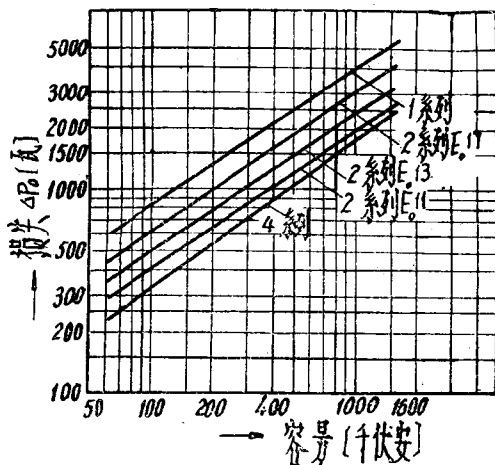


图1 布拉迪斯拉瓦电工厂生产的各系列油浸变压器的空载损失与容量的关系

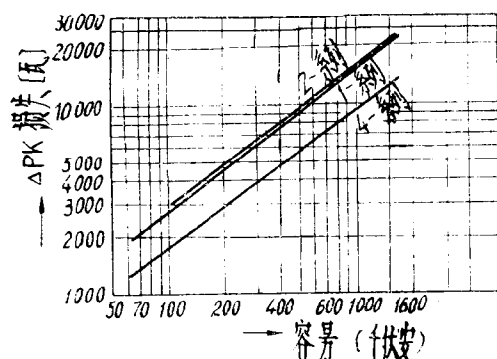


图2 布拉迪斯拉瓦电工厂生产的各系列油浸变压器的短路损失与容量的关系

开始采用铝并不是没有困难的。首先从结构上应该注意的是变压器的短路强度问题。在20℃温度下对铝和铜的机械性能的分析对照表明，铝的抗拉强度只有铜的抗拉强度值的一半（参看表1）。在这方面机械性能差要求铝线圈构造要结实些。开始时采用浸渍线圈有助于这个问题的解决。

## 铝线

在开始生产铝线变压器时曾采用纸绝缘导线生产油浸变压器。鉴于延性值较低，所用直径的下限起初为1毫米。根据参考文献

表1 E Al 99.5、Jare-Al、VUK-33E和E-Cu 若干性能的比较

| 材 料      | 最小屈服点 $\sigma_{0.2}$<br>公斤/毫米 <sup>2</sup> | 最小抗拉强度 $\sigma_{pt}$<br>公斤/毫米 <sup>2</sup> | 最小延性 $\delta_{200}$<br>对于 $L_0 = 200$ 而言 % | 最大电阻率 $\rho$<br>Ω毫米 <sup>2</sup> /米 |
|----------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------|
| EAl 99.5 | 2.0                                        | 10                                         | 22                                         | 0.0286                              |
| VUK-33E  | 4                                          | 11                                         | 15                                         | 0.0310                              |
| Jare-Al  | 20                                         | 26                                         | 6                                          | 0.0333                              |
| E-Cu     | —                                          | 30                                         | 3                                          | 0.01769                             |

[1]，这一界限目前也适用，然而在0.6至1毫米的直径范围内可以用铜和铝，然而目前优先用铝。延性低在绕线时会使导线的截面积缩小，因此曾力求研制一些机械性能较好的铝合金，然而这样的合金却又使导电率大大恶化。在捷克国内市场上有两种这样的合金，标号为Jare-Al和VUK-33E。这两种合金性能的比较示于表1中。这些合金虽然有较好的机械性能，然而其电阻率却要高8至16%，因此会使变压器的短路损失增加，使其效率降低。加之其价格也较高，因此由这些合金制成的导线未能得到推广应用。目前又采用 $\phi 0.85$ 毫米的铝线。直径更小的导线用铜制造。有时高压线圈用铜线圈而低压线圈用铝线圈。

后来生产玻璃纤维绝缘的异形铝导线，当时用这些导线生产B级绝缘空气冷却变压器，目前则用于生产F级绝缘的变压器。这些导线的生产使得有可能设计生产一系列一

次电压10千伏以内，容量1600千伏安的空气冷却配电变压器。近年来这种导线用于生产注射绝缘变压器，即用玻璃纤维和合成材料织物绝缘的铝线绕成线圈再用环氧树脂浇注。

玻璃纤维绝缘铝线生产已有很大发展并对国民经济有重大的经济意义，然而现在可以预言，在不久的将来这些导线将被异型铝漆线和铝漆箔和铝漆扁线所代替。在这一领域已作了相应研究和研制工作，并已用这些导线生产了一些变压器。从击穿电压值和绝缘增长值方面可看出这些漆线的优点。在绝缘增长值约降低到十分之一时，击穿电压却增加了三倍。

在铝线配电变压器的制造中最大的贡献是采用适用于热变压器油中的铝漆线。曾利用这种漆线生产数千台配电用的油浸变压器。与纸绝缘导线相比，没发现废品率有所增长。

表 2

油浸变压器用的铝漆线性能一览表

| 性              | 能  | 按ČSN*  | 测量单位或量具   | 数 值       |      |      |      |
|----------------|----|--------|-----------|-----------|------|------|------|
| 线心额定直径         | 从至 | 347150 | 毫 米       | 0.9       | 1.25 | 1.6  | 2.24 |
|                |    |        |           | 1.18      | 1.5  | 2.0  | 3.15 |
| 耐撕裂强度          | 最小 | 347153 | 针的移动次数    | 40        | 40   | 40   | 40   |
| 供货状态绝缘的延性      | 最大 | 347154 | 导线额定直径的倍数 | 3         | 4    | 4    | 4    |
| 耐久性 (140℃)     | 最大 | 347158 | 导线额定直径的倍数 | 4         | 5    | 5    | 5    |
| 热冲击 (140℃)     | 最大 | 347159 | 导线额定直径的倍数 | 4         | 5    | 5    | 5    |
| 冲击电压           | 最小 | 347156 | 伏         | 2000      | 2500 | 2500 | 2500 |
| 热 塑 性          |    | 347160 | ℃         | 250       |      |      |      |
| 可 燃 性          | 最小 | 347162 | 火焰不扩大     | 不燃烧       |      |      |      |
| 耐二甲苯和调漆用重汽油的性能 |    | 347163 | 铅笔硬度      | 3H        |      |      |      |
| S1921浸渍漆性能     |    | 347165 | 伏         | 2000      | 2500 | 2500 | 2500 |
| 耐变压器油性能        |    | 按技术规格  | 肉眼鉴定      | 没有看到损坏的迹象 |      |      |      |

• ČSN——捷克斯洛伐克国家标准。

铝漆线的主要优点在于：

- 能提高线圈的填充系数；
- 能改善线圈的散热状况；
- 能提高耐冲击应力的强度；
- 降低导线的生产难度。

这些导线的性能列于表2中。

正如从图4中看到的一样，这些漆线除了价格比纸绝缘导线低廉外，其冲击强度也较高。

与导线的研制和生产发展有密切联系的是其连接工艺。

在开始采用铝的头几年采用气焊连接（即采用气焊在凹槽中熔铝线的方法来连接）。采用这种焊接方法能获得良好的接头，尽管在熔化时发现接头内的氧化物还没有被彻底清除。但没有发现由此而引起的接头电阻增加，同时也没有发现接头部位有任何损坏。因此目前在绕线作业中还采用这种焊接方法。

到目前为止，用得最广泛的连接方法是钨极氩弧焊。采用纯度99.95%的氩。电源为焊接变压器，借助离子化高频成分引弧。图

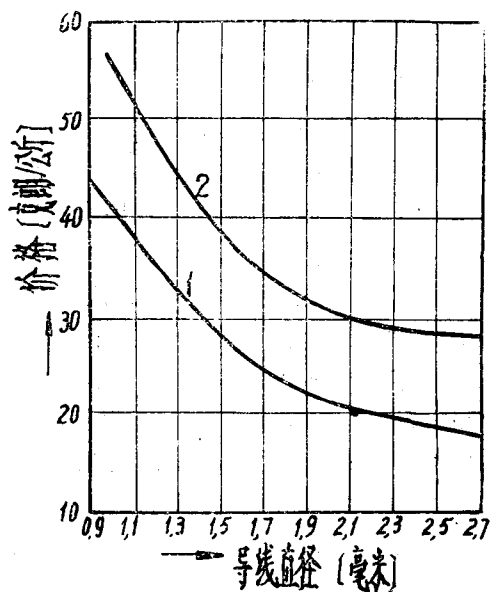


图3 价格与铝线直径的关系；

1—漆线，  
2—低绝缘导线。

5所示为引出线与线圈的氩弧焊。

在数年期间这种方法也作了一些改进。这些改进主要涉及线圈的铝引出线与作为过渡元件和转换开关结构元件的铜零件或黄铜

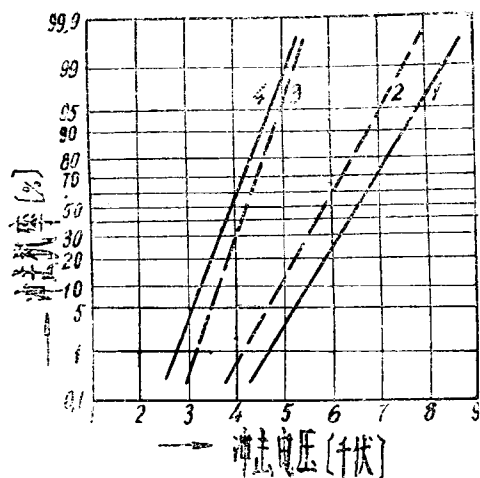


图4 漆线和低绝缘导线的冲击机率：  
1—直径1.9毫米的漆线，  
2—直径1.18毫米的漆线，  
3—直径1.18毫米的低绝缘导线，  
4—直径1.9毫米的低绝缘导线

零件的连接。起初采用由冷压焊或电阻对焊焊成的铜铝过渡棒。这种方法比较慢，很费力而且各接头的质量无法检验。

鉴于存在着上述缺点，这种方法已由采用Sn 70 Zn 30 刮擦钎料和专用的 PHF I 及 PHF I 有机溶剂的钎接所代替。

连接铝引出线和黄铜电缆接头的这种连接方法也在空心变压器中用于代替采用铜铝衬件的连接方法。

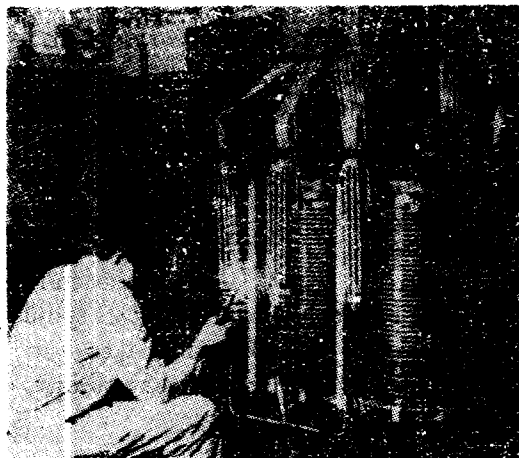


图5 变压器引出线的氩弧焊

## 铝的应用现状

目前BEZ国营企业生产下列类型的铝线圈配电变压器：

1. 容量10兆伏安以内，电压35千伏的油浸变压器，这些变压器的空载损失和短路损失列于图1和2中。

2. 容量1600千伏安以内，电压10千伏的浸漆线圈的空心变压器和容量1600千伏安以内，电压22千伏有环氧树脂浇注线圈的空心变压器。其空载损失和短路损失列于表3中。

除了配电变压器以外也生产其它一些有铝线圈的专用变压器，如供半导体整流器用的变压器(图6)，各种抗流线圈和若干种供电电阻炉用的变压器等。

生产铜线圈的矿山用变压器，供有化学腐蚀介质用的空心变压器，供发送机用的变压器和抗流线圈，供电电阻炉用的大部分变压器。

## 结 论

寻找用铝代铜的先进方法仍在继续中。

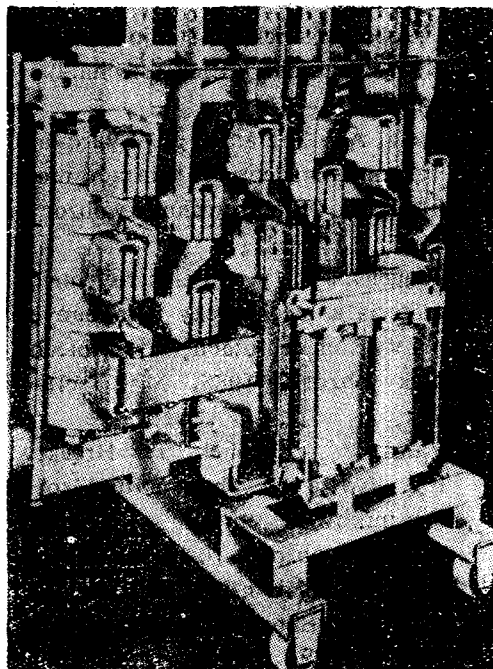


图6 带铝线圈的零抗流圈的接地变压器

最近的实践表明,在变器中采用铝箔有一系列的优点,这主要是从冲击试验角度,在低压线圈则主要是从有利于减少绕线难度的角度出发。

可以这样作出结论:捷克斯洛伐克从五十年代初期就开始在变压器的生产中使用

铝,然而目前世界各国都普遍采用铝生产变压器。上述情况证明,BEZ国营企业历二十年以上的发展方向是由于羡慕生产铝线变压器而闯出来的,这不仅是从捷克的角度而且是从整个世界范围的角度由于解决缺铜问题而作的努力的结果。

表 3 空心变压器空载损失和短路损失的保证值

| 功率千伏安 | 用合成漆浸渍的线圈      |                  | 环氧树脂浇注线圈         |      |                  |       |
|-------|----------------|------------------|------------------|------|------------------|-------|
|       | $\Delta P$ [瓦] | $\Delta P_k$ [瓦] | $\Delta P_o$ [瓦] |      | $\Delta P_k$ [瓦] |       |
|       | 6千伏和10千伏       | 6千伏和10千伏         | 10千伏             | 22千伏 | 10千伏             | 22千伏  |
| 100   | 470            | 1850             | 380              | 540  | 1900             | 1800  |
| 160   | 700            | 2700             | 600              | 750  | 2600             | 2650  |
| 250   | 900            | 3800             | 800              | 1000 | 3400             | 3600  |
| 400   | 1200           | 5500             | 1150             | 1400 | 4900             | 5200  |
| 630   | 1500           | 8500             | 1600             | 1900 | 6500             | 7500  |
| 1000  | 2200           | 13000            | 2200             | 2600 | 9000             | 10000 |
| 1600  | 2900           | 21000            | 3200             | 3600 | 12000            | 14600 |

### 参 考 文 献

- [1] ČSN 34 0290 Předpisy pro používání hliníku v elektrotechnice.
- [2] Šimkovic, F., Králík, K., Polyak, Š.: 10 rokov používania hliníka pri výrobe elektrických strojov v n. p. BEZ Bratislava. «Elektrotechnik», 1962, 187—191.
- [3] Tietz, A., Zemánek, J.: Svařování tlakem za studena při nahradě mědi hliníkem. «Elektrotechnický obzor», 1963, 181—187.
- [4] Sequens, J.: Využití elektrovodných materiálů mechanicky namáhaných při vyšších teplotách. «Elektrotechnický obzor», 1965, №12, 591—594.
- [5] Valeš, J., Kopeček, J., Hrbek, B.: Vývoj velkých transformátorů s hliníkovým vinutím. «Elektrotechnický obzor», 1960, №1, 3—9.
- [6] Náhrada mědi hliníkem v elektrotechnice. Sborník Práce, Praha 1958.
- [7] Novotný, J.: Problematika zvarovania hliníka veľkých hrúbok v elektrotechnike. «Elektrotechnický obzor», 1964, №2, 87—89.
- [8] Nussberger, J.: Pájení hliníku a hliníkových slitin. «Elektrotechnický obzor», 1964, №2, 85—86.
- [9] Tietz, A.: Vlastnosti hliníkových spojů a jejich zkoušení. «Elektrotechnický obzor», 1964, №2, 43—44.
- [10] Uher, V.: Metódy metalurgického spojovania hliníkových vodičov. «Elektrotechnický obzor», 1964, №3, 143—145.
- [11] Dobrovodský, V.: Pripojovania hliníka v elektrotechnike. «Elektrotechnický obzor», 1964, №3, 145—146.
- [12] Dubský, J., Křižanovský, L., Voráček, L.: Vliv tepelného stárnutí na mechanické vlastnosti spojů Cu—Al, svařovaných tlakem za studena. «Elektrotechnický obzor», 1965, №7, 317—321.

[张裕庆译自《Elektrotechnický obzor》, 1975, 64, №9, 513—517]

# 冷 压 焊

Harry Udin

## 1. 金属性质

两片金属接触时会怎样呢?要回答这个问题,我们就要对压力焊进行了解。

首先考虑金属的结构。冶金学者公认有两类普通合金,即只包含一相的和包含两相或多相的。第一类包括纯金属及像蒙乃尔和 $\alpha$ -黄铜这类的合金。虽然我们在下面的讨论是建立在单相合金的基础上,但只要稍微变化一下就可应用于多相合金。

金属是由晶粒组成,由晶界分开。在均质单相合金中,所有晶粒的成分都完全相同,不同点仅是其大小、形状和方位而已。停一下,让我们想想“方位”的意义吧!单个晶粒是结晶体。我们画一假想的适当间隔开的三度空间格子,晶粒空间内几乎所有的晶粒原子都处于或十分接近于格子的各结点上。几乎每个结点都由一个原子所占据。空间格子定名为“点阵”,结点就是点阵点。因为点阵是有规律的、周期重复排列的几何构造,所以确定其三维空间线的间隔,整个点阵就予固定。以此间距等同的格子的方位,即定为一给定晶粒的方位。在细晶型金属中,单个晶粒的直径约为0.003厘米。典型金属原子的直径约为 $3 \times 10^{-8}$ 厘米。由此,每立方厘米的金属中约有3000万个晶粒,每个晶粒约有 $10^{16}$ 个原子。

其次考虑晶界。当两个点阵相同而方位不同的点阵相交,就必然存在位错区。最少有一层原子处于两个格子交点的中间位置。一个或几个原子厚度的位错层就是我们所说的晶界。值得注意和极其重要的是在这些位原子和与之相邻原子间的吸引力比起晶粒内

部在正常位置上的原子之间的吸引力至少要大一些。这个事实是易于证明的。将一块多晶体的金属在室温下劈开——断开的方法应不使之产生塑性变形——研究断裂面的走向就会发现裂开的断面穿过各个的晶粒。表明并无沿着晶界断裂的倾向。

完全清洁的金属表面可设想为一个晶界的一半。点阵全都处于或接近于自由表面。表面的原子只是大体上处在适当的点阵位置上。但它们不会像内部的任一原子那样被周围的原子完全包围。正因为如此,它们才能与另一块金属相结合,也就是与另外的原子集团相结合。这些不饱和键的能量就是金属具有表面张力的根源,随后在下节中讨论之。这就十分明显,如果我们将两块十分清洁、具有原子级平滑度的金属表面相接触,结合的效果就会像晶界那样牢固,就是说,还要强过金属晶粒本身。

## 2. 真实表面的性质

固体金属表面极少是完全清洁的。而且它们离一个原子级的平滑度相差太远。关于金属表面的物理化学性质,只是近几十年才被大量地认识。为了测量平滑度,采用一种称为表面分析仪的探测手段。该仪器有一个像留声机唱针那样的、可遍行被测表面的探针,探针的起伏由压电晶体形成电压(像晶体唱机的拾音器一样)。电压经过放大并记录在录波器的图表上。经过极为细致加工(超级精度)的表面采用这一方法,能将峰、谷这类不规则的表面的垂直距离测定其平均值约为 $5 \times 10^{-9}$ 厘米。由此就能算出峰与谷的间距大约是200个原子层厚度。若为一般