



# 金属导体文集

## 下 册

黄崇祺编著

上海电缆研究所

二〇一〇年八月

## 自 序

本人服务于电缆工业已 54 年，目睹和经历了新中国成立 60 年以来，电线电缆工业金属导体生产所发生的巨变。无论是我国电线电缆从无到有，从小到大，还是由弱转强，建立了比较完整的生产体系，或是 2008 年受国际金融危机影响，电缆工业铜、铝导体的用量仍达 412 万吨和 145 万吨，雄居世界第一，与 2007 年持平和有所增加，预计 2009 年仍将维持上升势头。

电线电缆工业是我国经济总量最大的配套工业。之所以如此快速发展，在改革开放前靠的是独立自主，自力更生，自主创新；从上世纪 80 年代开始，在坚持原有的方针下，又增加了引进消化吸收和再创新；随着国民经济的发展，带动了电缆工业的快速增长。现在，中国电线电缆制造业在生产规模上已超过日本、美国，成为世界的最大国，我们正致力于在求质量、求强而大和求稳中向前发展。

中国的铁路曾有六次提速，电气化铁路接触网用的接触导线已满足了提速要求，赶上世界先进水平，必将受到世界瞩目。预计将于 2012 年初或 2011 年末，时速为 350 公里以上北京—上海的高速电气化铁路上应用；由于历史的科技积累和不断的创新发展，国产的优质架空导线已在遍布中国的高压、超高压和特高压架空输电线路应用；国产优质的换位、组合等绕组线为高、超、特输电用变压器、电抗器等生产作出了贡献；铝连铸连轧和上引法无氧铜生产线与“康仿”连续挤压技术相结合，使它们各自的优势发挥到了极致，已成为上世纪 80 年代以来，有色金属加工业铜、铝导体型材（线）、连续挤压包覆生产的新工艺、新方法，技术经济效果显著；中国电缆工业低温绝缘（CD）高温超导电缆的产业化研发已进入实质性阶段，正在赶超国际先进水平的进程中加速前进，预计将在我国智能电网的建设中发

# 金属导体文集

## 目 录

(上册)

|                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. 中国电缆工业金属导体生产六十年巨变·····                                                             | 1   |
| 2. 论中国电缆工业的废杂铜直接再生制杆和以铝节铜·····                                                        | 10  |
| 3. 中国电缆工业的废杂铜直接再生利用和以铝节铜决非短期行为<br>必须从长计议·····                                         | 19  |
| 4. 废杂铜直接再生利用和以铝节铜是中国电缆工业可持续发展的必由之路·····                                               | 29  |
| 5. 废杂铜直接制杆利用的问题解析和措施·····                                                             | 38  |
| 6. 用通常的连续浇铸或半连续浇铸法获得高导电微合金化铜·····                                                     | 44  |
| 7. 用 100%废铜生产连铸连轧铜杆·····                                                              | 52  |
| 8. 100%废杂铜直接再生制造技术的进展·····                                                            | 71  |
| 9. 电工用铜线坯 (GB/T 3952-2008) ·····                                                      | 93  |
| 10. 电工用火法精炼高导电低氧光亮 (CU-FRHC) 铜线坯 (铜杆)<br>标准 (赣州江钨新型合金材料有限公司企业标准 Q/JWXC001-2009) ····· | 104 |
| 11. 国内外废杂铜低氧光亮杆生产技术及其装备的比较·····                                                       | 113 |
| 12. 中国电缆工业中的铜·····                                                                    | 123 |
| 13. 轮轨高速电气化铁路接触网用接触线 (电车线) 的发展、选型和国产化·····                                            | 133 |
| 14. 我国电力牵引用接触线的发展与展望·····                                                             | 139 |
| 15. 接触导线制造新工艺及有关问题探讨·····                                                             | 150 |
| 16. 电力牵引用接触线——第 1 部分: 铜及铜合金接触线<br>(国家标准, GB/T 12971.1-2008) ·····                     | 152 |

# 中国电工铝导体的研究、 开发和生产

上海电缆研究所 黄崇祺 丁关森 李文浩 沈建华 (上海 200093)

【摘 要】 用中国自主创新的《稀土优化综合处理技术》生产电工铝导体，对含硅 0.09—0.13% 的非电工级铝进行处理具有最佳的技术经济效益；这种处理技术也适用于和中国矿藏资源（铝矿含硅高）相类似或缺乏电工级铝锭制造电工铝导体的国家；铝中加入稀土，可降低铝固溶体中硅的含量，这是提高铝导电率的主要原因；耐热铝合金线在新建大容量输电、老线路增容改造和大跨越等线路上大有用武之地。

【关键词】 电工铝 导体 生产 稀土 处理

## 1 前言

2003 年中国电缆工业电工铝导体的总用量已达 90 万吨，名列世界前茅。现在，我国电缆工业已可按国际先进标准生产各种电压等级的架空导线，达到了国产化不需进口和内外销两旺的可喜局面。在举世瞩目的三峡工程中，以直流超高压（±500kV）、长距离（1000 公里级）和大截面（ACSR 720/50）为代表的技术要求高的钢芯铝绞线以及 AACSR/EST（450/200 和 640/290）特强钢芯高强度铝合金导线、光纤复合架空地线（OPGW）、铝包钢导线、耐热铝合金导线等是我国电工铝导体最新产品的集中展示<sup>[1]</sup>。

目前，中国已是铝的第一生产大国，但中国自己的铝矿资源含硅较高，在深脱硅技术没有解决的情况下，就严重影响电工铝导体的性能和生产，其主要问题是导电率低下，达不到国际公认的 61% IACS 的水平以及与其相矛盾的强度问题。回顾过去，中国电工铝导体的研究、开发和生产走出了具有中国特色的发展之路，他经历了两个阶段。第一阶段，在上世纪八十年代初以前，研究国产铝导体性能低下的

原因和设法提高它的性能。由此，试制了国产的电工用铝锭及其铝导体，使电工铝导体的系列基础标准全面提升，达到了国际同类通用标准的水平。在电工铝导体的装备上，开发出了适合中国国情的铝连铸连轧生产线，甩掉了采用铝线锭和回线轧机的生产方式。第二阶段，从八十年代初至今，这是中国电工铝导体发展道路上数量与质量，继承与创新的飞跃阶段，使在技术上由“必然王国”走向了“自由王国”。为我国电工铝导体和稀土电工铝导体提高导电率，解决量大面广的国产的材料来源和达到工业化的稳定生产实现了具有中国自主知识产权的技术创新，使我国的电工铝导体生产达到了国际先进的水平。在电工铝导体的生产装备上，适合中国国情的生产设备亦已基本配套。

当今，中国的电力需求十分迫切，大容量的输、配电线路，无论新建的大容量输电线路或老线路的增容改造都需耐热铝合金等的大容量导线。为适应市场需求，又开发了经改进的高导电（60% IACS，150℃）耐热铝合金线，以满足架空输、配电线路的需要。

## 2 电工铝导体的稀土优化综合处理技术<sup>[2]</sup>

中国稀土资源丰富，列世界第一，我们采用丰富的混合稀土金属优化处理非电工级铝，在铝连铸连轧生产线上生产出优质的电工圆铝杆，进而生产出“稀土铝导线”。“稀土铝导线”不是一种新的铝—稀土合金导线，而是用混合稀土金属对非电工级铝进行工艺处理而制成的电工铝导线，简称“稀土铝”或“稀土铝线”或“稀土铝导体”。今天，无论采用电工级铝还是非电工级铝经稀土优化综合处理均可生产出电工铝导体，并均已在各种电压等级的输、配线路上应用，产品已远销世界各地。

### 2.1 电工铝杆生产工艺流程

电工铝导线的基础是材料，生产的关键技术在于制杆。

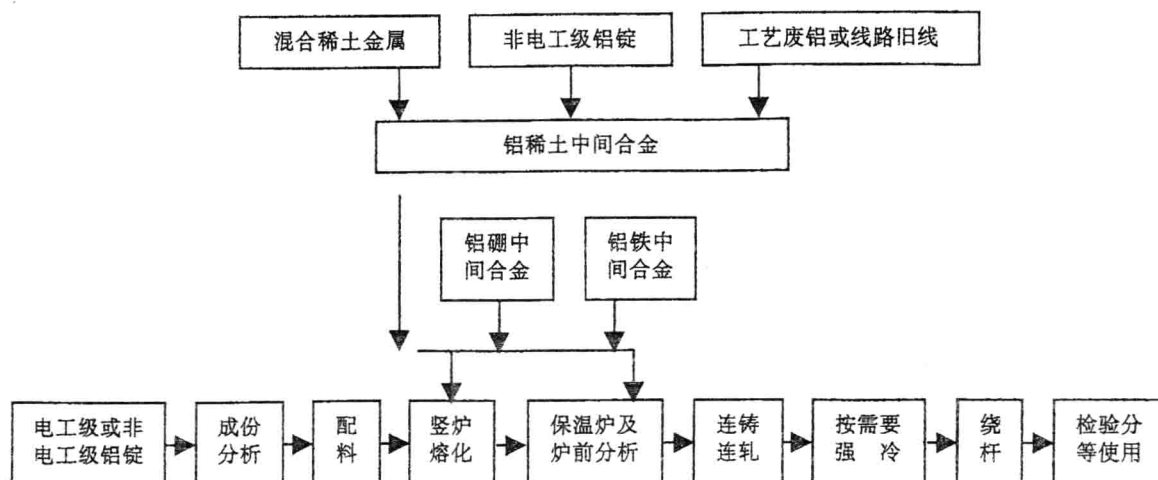


图 1 电工铝杆生产工艺流程

## 2.2 生产过程、处理和质量监控

### 2.2.1 生产过程

铝锭在竖炉中连续熔化，竖炉可用燃料油、城市煤气、天然气、热煤气和煤等能源，熔融的铝液经流槽进入两个交替使用的保温炉，每个炉子的容量为 8~10 吨，能源可选用电或与竖炉相同。在保温炉中完成必要的工艺处理、精炼、均匀化，实现连续指示控制铝液温度。铝液经流槽进入中间浇包，然后籍天秤装置和人工操作使流股稳定进入铸机。铸机结晶轮直径为 1.5m，铸条截面 2400mm<sup>2</sup>。铸条进入 15 机架的三辊“Y 型”连轧机，采用弧三角一圆孔型系统轧制成直径  $9.5 \pm 0.3\text{mm}$  的铝杆。铝杆最后在绕杆机上成圈，生产线小时产量为 4~5 吨。

### 2.2.2 处理工艺

铝锭的成份对导体的性能，特别是导电率具有决定性的作用。国外采用铝纯度为 99.81~99.66%、含硅量在 0.05% 左右的超高纯、高纯、中高纯和中低纯铝生产电工铝杆，我国电缆工业进料铝锭品位比较杂，当时只有少量电工级铝锭、大量的非电工级铝锭、硅量较低而有害微量元素较高的进口铝锭、还有用进口氧化铝生产的国产铝锭及线路上换下的废铝线等。为了稳定地工业化生产合格的产品，我们首先要分析铝的主要杂质元素硅、铁、铜、钛、钒、锰、铬七个元素的含量，通过配料，充分利用进厂原材料的适用性，取长补短，控制铝液的成份，提高产品的技术经济效果，为以后在最佳技术经济条件下进行工艺处理创造条件。兼顾原料成份、导线性能和导线的用途，对铝液的处理有三种方法，即稀土优化处理、硼化处理及控铁处理。稀土优化处理，其稀土加入量主要依铝中的含硅量而定，含硅量在 0.09~0.13% 之间加入适量稀土技术经济效益最

佳，由此，扩大了电缆工业所需原料铝的来源。采用稀土优化可缓和冷作硬化对增加电阻率的敏感性和提高铝的导电率，同时可细化晶粒，改善材料对热裂的敏感性，在铁硅比小于 1.3 甚至小于 1 的情况下不影响轧制和拉线的正常生产。硼化处理，硼在铝中可降低钛、钒、锰、铬微量杂质对导电率的有害影响，它是不能用稀土优化来替代的，进口铝锭或用进口氧化铝生产的国产铝锭，普遍含这四个元素较高而含硅较低，一般国产铝则相反，所以从技术、经济两方面考虑，合理搭配使用，可实施低硼处理。控铁处理，当原料铝中含铁量偏低时，在保证导电率合格的前提下，适量加铁以提高硬拉铝线的抗拉强度，特别在生产大直径线，如三峡工程用 ACSR 720/50 导线时尤为重要，但如加入过量的铁，不仅电阻率增加，而且也影响耐腐蚀性能。控制铝中的铁是不可忽视的，我们常以人体内、外御寒作比喻，我们认为控铁是强健基体，且可减少后续工序，减少强度波动。根据铝锭的成份、配料和导线性能的要求，在实际生产中可能不处理，用一种或二种或三种处理。对处理用的中间合金的选购和制作，直接影响处理的技术经济效益，铝稀土中间合金可利用电缆厂的工艺废铝自行制造。

### 2.2.3 质量监控

质量监控对稳定生产起着重要的作用。在电工铝导体生产中，应建立以铝杆为中心的全面质量控制体系。这个体系主要包括工艺监控、制品监测和质量分等三个部分。工艺监控的主要环节是成份、温度和冷却。为此我们发展了经济、实用的炉前快速分析。制品监测的主要内容是对铝杆的导电率、抗拉强度和伸长率，及时检测、统计和反馈，与工艺监控互相配合。铝杆质量分等管理，电线电缆厂里制造架空导线用的硬拉铝线质量要求最高，线芯用铝线质量要求次之，前者不同的直径对圆铝杆要求也不尽相同，因此通过分等使用可达到物尽其用，充分利用原材料的目的。

## 3 电工铝线与稀土铝线的性能比较和钢芯稀土铝绞线的型式试验

我们从三个电线电缆厂用电工级铝锭制造的铝杆、硬铝线和用非电工级铝锭经稀土优化综合处理制造的铝杆、硬铝线，进行机电性能、热强度损失、反复弯曲疲劳试验、电阻温度系数、低温机械性能、耐腐蚀性能的对照试验，还对由稀土铝线制造的钢芯铝绞线进行了综合拉断力和弹性模数试验、振动试验、蠕变试验、热膨胀试验，积累了 1 万多个试验数据，其中部分已在资料[3]中发表，这里不再展示，仅引述结论。

### 3.1 电工铝线与稀土铝线的性能比较

表 1 电工铝线与稀土铝线的性能比较

| 项 目                     | 电工铝线                                                                                  | 稀土铝线 | 注                                                        |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------------------------------------------------|
| 1. 抗拉强度 (MPa)           | 机械、电气性能两者相当；稀土铝杆拉线时电阻率的增幅比电工铝杆小                                                       |      | /                                                        |
| 2. 导电率 (%IACS)          |                                                                                       |      | /                                                        |
| 3. 线表面质量                | 在相同条件下拉线，两者表面质量相当                                                                     |      | /                                                        |
| 4. 热强度损失 (%)            | 两者相当，抗拉强度下降率在 2% 以下，无明显区别                                                             |      | 经 70℃ 和 80℃ 加热，1000 小时后试验                                |
| 5. 反复弯曲疲劳性能             | 条件疲劳极限值两者无明显区别，其波动范围仅在 20—40MPa 之间                                                    |      | 在线材反复弯曲疲劳试验机上进行试验，疲劳循环数 10 <sup>7</sup> 次                |
| 6. 20℃ 时的电阻温度系数 (1 / ℃) | 0.00407 (R 型软线，铝杆)<br>0.00403 (硬线、半硬线)                                                |      | 在计算电阻率时仍可采用电工铝线的电阻温度系数                                   |
| 7. 低温机械性能               | 两者都不存在脆性，卷绕试验均无裂纹，抗拉强度均无明显变化                                                          |      | 在-38℃下试验                                                 |
| 8. 5% HCl 溶液喷雾腐蚀试验      | 稀土铝线优于电工铝线                                                                            |      | 在气溶胶试验箱中进行试验，时间 21 天                                     |
| 9. 恒定湿热试验               | 两者结果无明显差别                                                                             |      | 在 DL 302 调温调湿箱中进行，40℃±2℃，相对湿度 95±3%，7 天                  |
| 10. 盐酸浸渍试验              | 稀土铝线优于电工铝线                                                                            |      | 5.6% HCl 溶液，室温，浸渍 3 小时                                   |
| 11. 氢氧化钠浸渍试验            | 一般而言，稀土铝线比电工铝线好，但与铝中硅、铁、铜杂质，尤其是铁的含量有关，杂质含量特别低的电工铝线会出现相反的结果                            |      | 10% NaOH 溶液，室温，浸渍 1、3、5、7 和 9 小时                         |
| 12. 二氧化硫气体腐蚀试验          | 两者结果互有高低，主要与铝的纯度有关（一个试验周期 24 小时，第一阶段 40±3℃、相对湿度 100%、8 小时；第二阶段，18—28℃、相对湿度 75%、16 小时） |      | 在 HF-45A 化工气体腐蚀箱中进行，0.67% (V/V) 二氧化硫气氛，试验周期数 4、10 和 19 天 |

### 3.2 钢芯稀土铝绞线的型式试验

由稀土铝线制成的钢芯稀土铝绞线按架空导线型式试验的要求，进行综合拉断力、弹性模数、振动、蠕变和热膨胀试验。综合以上试验，稀土铝杆、稀土铝线和钢芯稀土铝绞线的性能均符合 GB/T 17048-1997、GB 3954-2001、GB 3955-83 和 GB 1179-1999 国家标准和国际先进标准 (ASTMB232M-1999、ASTMB802M-2002、IEC61089-1997) 以及送电线路设计的要求。

#### 4 稀土对提高铝导电率的作用机理

稀土元素在铝中的奇妙作用受到人们重视，为了解释稀土提高铝导电率的原因，不少研究者曾进行探讨，较为普遍的看法是稀土元素与原来固溶在铝中的杂质形成了某种金属间化合物在晶界析出，使晶内杂质贫化，从而提高了导电率。但究竟形成何种化合物？其分布如何？我们利用电子衍射和能谱分析相结合的方法，确定了铝导体中稀土的存在形式，即稀土相的类型，并用 X 光衍射方法测定了几种导电铝杆的点阵常数差，以比较其固溶体中硅的含量，给出了稀土加入铝中确使铝固溶体中杂质硅含量下降，从而使导电率提高的实验数据<sup>[4]</sup>。研究表明，纯铝锭和稀土铝锭的主要组成相都是  $\alpha$  固溶体（铝基体）、沿晶界分布的长条相和分布于树枝晶间隙的颗粒状相。长条相都为  $\text{FeAl}_3$  相，而颗粒相的成分、相结构却不尽相同，纯铝锭中颗粒相为体心立方结构（ $a=12.548\text{\AA}$ ）的  $\text{Fe}_3\text{SiAl}_{12}$  杂质相，加入稀土时，这种相溶入的铈量远高于材料中平均含量，其中硅的含量也明显增加，稀土铝锭的另一种颗粒相除了有  $\text{Fe}_3\text{SiAl}_{12}$ ，还包含简单正方结构的  $\text{CeSi}_2$  相，在此复合相中铈，硅含量比前一种颗粒相中的含量更高。此外，在稀土铝锭中还发现有  $\text{Fe}_3\text{SiAl}_{12}$  与  $\text{Ce}_5\text{Si}_3$  相混杂共存的情况。以上试验结果说明，以铈为主的混合稀土元素与硅有很强的亲和力，它们加入铝中，易与硅一起溶入  $\text{Fe}_3\text{SiAl}_{12}$  杂质相中，当某一局部的铈、硅含量到达一定浓度后，便生成（Ce、Si）类化合物。显然，铈与硅的这些存在形式都使铝固溶体中溶硅量下降，尤其当铝中硅在 0.08% 以上，而  $\text{Fe} / \text{Si}$  值又较低时，富铈混合稀土的加入对铝固溶体的减硅作用更为明显。

#### 5 三峡工程用电工铝导体的生产

从 2001 年起，世界最大的水电站——长江三峡电站直流超高压（ $\pm 500\text{kV}$ ）输电用架空导线开始招标。导线要求截面铝  $720\text{mm}^2$ （ $45 \times 4.53$ ）/ 钢  $50\text{mm}^2$ ，股线无接头的单根导线长度 2500 米，单根铝线直径 4.53mm，45 根铝线的平均抗拉强度和单根铝线的抗拉强度分别不低于 165MPa 和 160MPa，45 根铝单线抗拉强度的不均匀性不大于 20MPa。这些技术指标均属超国标和国际先进标准的苛刻要求，但我们采用具有中国自主知识产权的技术，制造出了此种高要求的导线。导线使用的杆和硬铝线的性能如表 2 所示。据统计，采用此种生产方法，99% 以上的直径 4.53mm 的硬铝单线均可适用于制造 720/50 导线。导线经严格的监制、检验、验收和施工，我国第一条 1000 公里级（由三峡电站——江苏省常州）直流 50 万伏大容量输电线路已于 2002 年 12 月顺利投入正常运行。接着，三峡——广东、贵州——广东采用

同样导线的直流 50 万伏线路也相继投入运行，这三条线路总长 2845 公里，使用导线总重约 5.4 万吨。中国在 2020 年以前计划再建 18 条直流 50 万伏及以上的长距离架空输电线路，这些线路的总长约 2 万公里，如使用导线以 720/50 为代表进行计算约需导线 40 万吨<sup>[5]</sup>。

表 2 720/50 导线使用的杆和硬铝线的性能<sup>[6]</sup>

| 名 称          | 抗拉强度 (MPa) | 导电率 (%IACS) |
|--------------|------------|-------------|
| 9.5mm 电工铝杆   | 130—135    | 61.90       |
| 4.53mm 电工硬铝线 | 180—190    | 61.58       |
| 注：原材料铝为标准铝锭  |            |             |

## 6 高导电 (60%IACS, 150℃) 耐热铝合金线的生产

### 6.1 大容量导线需要耐热铝合金线

大容量导线是在电力需求不断增长，新线路输电容量不断增大，老线路增容改造的推动下发展起来的。现在我国和世界经济发达国家的电力工业都对大容量导线给予非常的关注。因此，与大容量导线有关的国际电工委员会标准 (IEC 标准) 如型线同心绞架空导线 (IEC-62219) 已经公布，耐热铝合金线和钢芯软 (退火) 铝绞线 (ACSS) 已由 IEC/TC 7 作为项目建议提出。大容量导线主要用于新建大容量架空输电线路、变电站内部的大电流母线、老线路增容改造和特殊需要的大跨越工程等场合。导线要传输大的容量，从导线而言有三种思路：(1) 采用耐热铝合金，提高导线的运行温度；(2) 采用退火的软铝线，提高导线的运行温度；(3) 改变导线的结构，采用由成型铝线，在等直径下，提高填充系数，增加导线的载流面积。大容量导线的制造，关键在材料 (导体和加强材料)，通过不同材料的组合，各展材料之长，从而制造出具有不同特性的导线，故一般大容量导线均属组合导线 (Composite Conductor)。上世纪八十年代，上海电缆研究所曾开发过 58 和 60%IACS, 150℃ 的耐热铝合金线，但品种和使用少，所以线路的设计和运行经验也少；也曾开发过钢芯软 (退火) 铝绞线和型线同心绞架空导线，但仅作了技术储备。在 2020 年以前，我国的电力事业将是一个超常发展的时期，大容量输电需要大容量导线，大容量导线少不了耐热铝合金线。

## 6.2 我国最近制造的 NRLH (60%IACS, 150℃) GJ 400/35 钢芯耐热铝合金绞线

鉴于导电率 58% IACS, 耐热 150℃ 的耐热铝合金线在国外有的国家已经淘汰<sup>[7]</sup>, 所以 2002 年在原有 60% IACS, 150℃ 耐热铝合金的基础上进行了工艺、技术改进, 并试制了 NRLH (60% IACS, 150℃) GJ-120/20、GJ-185/30 和 GJ-400/35 三种规格的高导电 (60% IACS, 150℃) 耐热铝合金导线, GJ-400/35 导线经上海电缆研究所检测全部合格。该成果已于 2003 年 1 月由广东省机械行业协会和广东省广电集团有限公司受中国机械工业联合会和中国南方电网有限责任公司的委托, 组织产品技术鉴定, 并获得通过。NRLH (60% IACS, 150℃) GJ 400/35 导线的主要试验结果示出于表 3、4。

表 3 NRLH (60% IACS, 150℃) GJ 400/35 导线结构和材料性能<sup>[8]</sup>

| 耐热铝合金线                              | 性 能  | 镀 锌 钢 线                      | 性 能    |
|-------------------------------------|------|------------------------------|--------|
| 抗拉强度 (N/mm <sup>2</sup> )           | 179  | 抗拉强度 (N/mm <sup>2</sup> )    | 1567   |
| 导电率 (% IACS)                        | 60.4 | 1%伸长时应力 (N/mm <sup>2</sup> ) | 1302   |
| 伸长率 (%)                             | 2.0  | 伸长率 (%)                      | 5.1    |
| 自身卷绕试验                              | 未断裂  | 100d 扭转 (次)                  | 33     |
|                                     |      | 1d 卷绕                        | 未断裂    |
| 导线结构: 合金线 48×3.22mm;<br>钢线 7×2.50mm |      | 镀层重量 ((g/m <sup>2</sup> )    | 247    |
|                                     |      | 4d 卷绕                        | 无开裂和起皮 |

表 4 NRLH (60% IACS,150℃) GJ 400/35 导线主要特性试验结果<sup>[8]</sup>

| 项 目             | 结 果                                                                                                                                       | 条 件                                          | 项 目          | 结 果                                                                                      |         | 条 件                                                                                                                                        |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1) 常温综合拉断力      | 109.5、109.8 和 109.6kN, 平均 109.6kN                                                                                                         | 试样长 12 米, 环氧树脂端头, 500kN 卧式拉力机                | 6) 载流量       | 导体温度 (℃)                                                                                 | 载流量 (A) | 无风、无日照自然对流, 试样张力 25.98(25% RTS), 加热区长 13 米, 热电偶测温, 环境温度 10.5—10.8℃                                                                         |
| 2) 高温综合拉断力      | 150℃×3hr; 109.5、108.9、109.3kN                                                                                                             | 加热区长 10 米, 热电偶测温, 其它同上                       |              | 45.4                                                                                     | 560     |                                                                                                                                            |
|                 |                                                                                                                                           |                                              |              | 61.0                                                                                     | 660     |                                                                                                                                            |
|                 |                                                                                                                                           |                                              |              | 83.1                                                                                     | 800     |                                                                                                                                            |
|                 |                                                                                                                                           |                                              |              | 104.4                                                                                    | 940     |                                                                                                                                            |
|                 |                                                                                                                                           |                                              |              | 126.1                                                                                    | 1060    |                                                                                                                                            |
|                 |                                                                                                                                           |                                              |              | 147.9                                                                                    | 1160    |                                                                                                                                            |
|                 |                                                                                                                                           |                                              |              | 157.7                                                                                    | 1190    |                                                                                                                                            |
|                 |                                                                                                                                           |                                              |              | 168.6                                                                                    | 1238    |                                                                                                                                            |
| 3) 弹性模数及应力—应变曲线 | 最终弹性模数 66.4Gpa                                                                                                                            | 标距长 2 米, 测试精度应力为 ±1%, 应变为 ±0.01mm/2m, 其它同上   | 7) 20℃时的直流电阻 | 理论值:<br>$R_{20} \leq 0.07514 \Omega / \text{km}$<br>实测值:<br>$0.07425 \Omega / \text{km}$ |         | 试样长 12 米, 测试有效长 10 米                                                                                                                       |
| 4) 振动疲劳性能       | $3.01 \times 10^7$ 、 $3.02 \times 10^7$ 、 $3.01 \times 10^7$ 次振动后未见有任何开裂断股现象                                                              | 振动角: 25~30 分, 张力 25% 计算拉断力, 试样塔距 56 米        |              |                                                                                          |         |                                                                                                                                            |
| 5) 热膨胀性能        | 热膨胀系数:<br>1) 室温~100℃<br>$\alpha = 21.2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$<br>2) 100—160℃<br>$\alpha = 21.1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ | 加热区长 13.5 米, 张力 25.98kN (25% RTS), 测试有效长 3 米 | 8) 蠕变性能      | 蠕变量: 在 15%、25% 和 35% RTS 张力下的蠕变方程可推算出 10 年 (87600 小时) 后的蠕变量分别为 207、491 和 908mm/km        |         | 100kN 卧式拉力试验机, 试样端间长 14 米, 试样标距长 5 米, 环氧树脂端头:<br>试验温度: $20 \pm 1^\circ\text{C}$<br>张力: 15% (RTS)<br>25% (RTS)<br>35% (RTS)<br>试验时间 1000 小时 |

7 结论

(1) 稀土优化综合处理技术是一项中国自主创新的先进技术, 用于制造电工铝导体可采用非电工级铝锭, 降低成本, 提高电工铝导体的导电、耐腐蚀和工艺性能, 达到国际先进标准的水平, 导线适于在各种电压等级的输电线路上和电线电缆的制品中应用, 技术经济效果很大。

(2) 本技术从我国的国情出发, 可充分利用国产铝资源; 也适用于和我国矿藏资源 (铝矿资源含硅高) 相类似或缺乏电工级铝锭制造电工铝导体的国家。

(3) 稀土之所以能提高铝的导电率，其作用机理是：稀土的加入，降低了铝固溶体中硅的含量，这是提高铝导电率的主要原因。

(4) 耐热铝合金线在新建大容量架空输电线路、老线路增容改造、变电站内部用大电流母线和特殊需要的大跨越线路等场合大有用武之地。

## 参考文献

- [1] 《三峡送电工程用导、地线技术研讨会论文集》，2003 年 11 月武汉武昌。
- [2] 黄崇祺、丁关森、沈建华，《电工铝导体稀土优化综合处理技术》，中国科学技术文库，编号 TG2648。
- [3] 《电线电缆》杂志，1992 年，№5，2—11 页。
- [4] 《电线电缆》杂志，1995 年，№1—2，29—33 页。
- [5] 毛庆传、季世泽、徐睿，《三峡输电工程建设极大促进我国架空导线技术进步》，三峡送电工程用导线、地线技术研讨会论文集，2003 年 11 月，P74。
- [6] 黄崇祺，《电缆金属文集》，19 页，上海电缆研究所。
- [7] 《Thermal resistant aluminium alloy wire for overhead line Conductor》Draft, Japanese National Committee of IEC/TC 7。
- [8] 黄崇祺、李文浩、丁关森、黄国飞，《架空电力线路用大容量导线》，第四届全国现代电力技术学术研讨会论文集，2004 年 7 月。

附后：1、中国电工铝导体的研究、开发和生产（报告提纲）  
2、中国电工铝导体的发展道路

本文发表于：2004 年中国电缆行业会议暨国际线缆展览会论文报告会论文集，上海电缆研究所出版。

# 中国电工铝导体的研究、开发和生产

## 《报告提纲》

上海电缆研究所 黄崇祺、丁关森、李文浩、沈建华

## 1. 前言

### 1.1 中国电工铝导体生产的现状—形势大好

- (1) 2003 年中国电缆工业铝导体的总用量已达 90 万吨，名列世界前茅。
- (2) 有独立的自主知识产权，可按国际先进标准生产各种电压等级的架空导线，产品内、外销两旺。
- (3) 在举世瞩目的三峡工程中，以 $\pm 500\text{kV}$  直流超高压、长距离(1000km 级)和大截面( $720\text{mm}^2$ ) 为代表的技术高要求的 ACSR 720/50 以及 AACSR/EST (450/200 和 640/290) 特强钢芯高强度铝合金导线、OPGW 光纤复合架空地线、铝包钢导线、耐热铝合金导线等的相继开发和应用。

### 1.2 中国电工铝导体的研究、开发和生产走出了具有中国特色的发展之路—他经历了两个阶段

#### 1.2.1. 第一阶段

- (1) 研究国产铝导体性能低下的原因和设法提高它的性能
- (2) 全面提升中国电工铝导体的系列基础标准，达到国际同类通用标准的水平
- (3) 开发出了适合中国国情的铝连铸连轧生产线

#### 1.2.2. 第二阶段

- (1) 数量与质量，继承与创新的飞越阶段，使在技术上由“必然王国”走向了“自由王国”。
- (2) 为我国电工铝导体和稀土电工铝导体提高导电率，解决量大面广的国产的材料来源和达到工业化的稳定生产实现了具有中国自主知识产权的技术创新，使我国的电工铝导体生产达到了国际先进的水平。
- (3) 在生产装备上，适合中国国情的生产设备亦已基本配套。

## 2. 影响国产电工铝导体性能，特别是导电率的主因是原材料铝的成分—但其他因素可起到相辅相成的作用

### 2.1 铝液的精炼、过滤及其效果

#### 2.1.1 电解原铝液的精炼及其效果

表 1 原铝液的含氢水平及精炼效果

| 测氢<br>原铝液 | 原铝液温度 (°C) | 原铝液含氢<br>(CC/100g) | 精炼效果<br>(%) | 精炼方式及熔剂               |
|-----------|------------|--------------------|-------------|-----------------------|
| 精炼前       | 840        | 1.29               | 42%         | 在抬包内进行, 用 3‰<br>1 号熔剂 |
|           | 805        | 1.08               |             |                       |
|           | 775        | 0.90               |             |                       |
| 精炼后       | 730        | 0.52               |             |                       |
|           | 718        | 0.48               |             |                       |

## 2.1.2 在保温炉内 99.70 铝液在一个熔铸周期中含氢量的变化 (表 2、图 1)

表 2 试验条件、生产操作、精炼和测氢

| 试验条件                   | 竖炉熔化→保温炉→半连续浇铸 (100×100mm) 铝线锭       |
|------------------------|--------------------------------------|
| 一个熔铸周期中 99.70 铝液含氢量的变化 | 1. 7:00 保温炉装满 4 吨铝液                  |
|                        | 2. 9:30 铝液 752°C, 测氢                 |
|                        | 3. 10:57 铝液 738°C, 测氢                |
|                        | 4. 11:12 铝液 720°C, 测氢, 然后用 1 号精炼剂块精炼 |
|                        | 5. 11:17 精炼完、闭炉门                     |
|                        | 6. 11:25 铝液 716°C, 测氢                |
|                        | 7. 11:35 纯氮精炼                        |
|                        | 8. 11:50 吹完氮, 扒渣                     |
|                        | 9. 11:55 铝液 696°C, 测氢; 然后喷油提温        |
|                        | 10. 12:15 停止提温, 出炉浇铸                 |
|                        | 11. 12:53 铝液 715°C, 测氢               |
|                        | 12. 12:57 喷油提温                       |
|                        | 13. 13:15 停止提温, 铝液 706°C, 测氢         |
|                        | 14. 13:40 浇铸完毕                       |

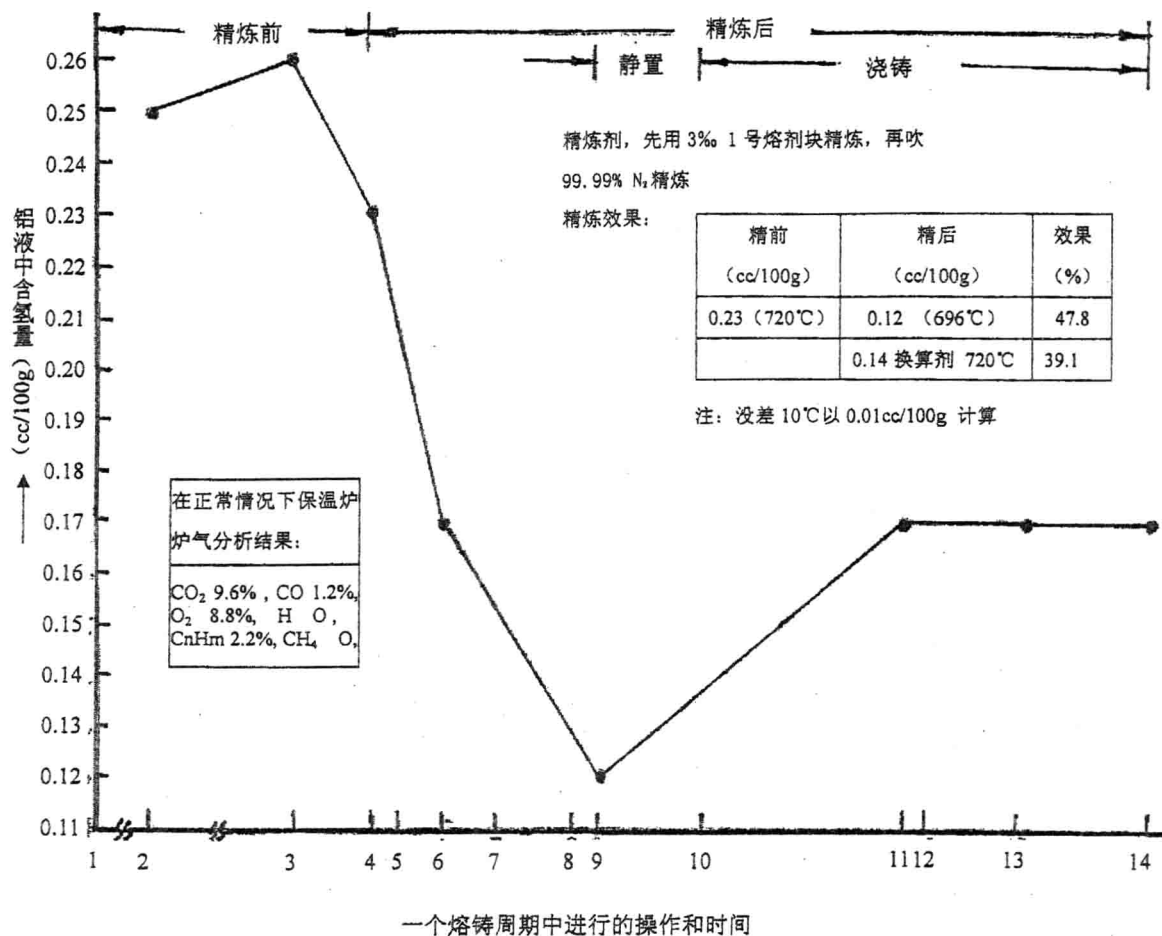


图 1 在工业生产条件下保温炉内一个熔铸周期中在 99.70 铝液内含氢量的变化