金属导体文集

上册

黄崇祺 编著

上海电缆研究所

二〇一〇年八月

金属导体文集

上　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上应用；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）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（国家标准，GB/T 12971.1-2008）…… 152

中国电缆工业金属导体生产的六十年巨变

上海电缆研究所　黄崇祺

【提　要】本人为中国电缆工业已服务54年，目睹和经历了金属导体生产的六十年巨变，现以一孔之见回顾15项对行业乃至全国有影响的重大进步和技术创新，谨以此庆祝新中国六十周年华诞，文中排序不分先后，更绝无评选之意：[1]铝连铸连轧，[2]稀土优化综合处理与电工铝导体，[3]高强耐热铝合金导体，[4]铝包钢线与生产线，[5]高速铝拉线机，[6]铝、铝合金型线拉线机，[7]框式绞线机，[8]国产架空导线遍天下，[9]上引法光亮无氧铜杆，[10]废杂铜直接再生制杆利用，[11]以铝节铜与铜包铝制品，[12]康仿连续挤压技术与应用，[13]高速电气化铁路接触网导线已登国际先进水平，[14]换位导线与组合导线和[15]斜拉索、预制平行钢丝束主缆。

【关键词】电缆工业　金属导体　生产　六十年　巨变

1　前言

金属导体是电线电缆的基础材料和重要组成。电线电缆具有传输电能、传递信息和实现电磁能量转换的功能，被喻为人体的血管和神经，遍布全国乃至全球。2008 年中国电缆工业铜、铝导体的用量分别为412万吨（07年378万吨）和145万吨（07年135万吨），08年和07年相比，铜、铝导体的用量分别提高9%和7%。08年因受经济危机的影响，在此困难的情况下，08年全行业完成工业总产值约6904亿元，比07年增长了21.5%；完成销售产值约6695亿元，比07年增长了20%，产值仍保持高速增长。

解放初期，我国金属导体的生产技术落后，装备陈旧，即使是重大装备——迴线式铜杆轧机，亦来自经援助国转手的德国造的二手机。现在金属导体的生产面貌已经焕然一新，今非昔比了。然而与国外先进水平相比，特别在高技术和原始创新方面尚有相当的差距。外观技术指标的差距只是表象，而实质性的差距则在于缺乏技术装备。中国电缆工业金属导体生产的发展可分为两个

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

阶段，即改革开放前的以独立自主，自力更生为主的发展阶段和改革开放后的与国外接轨发展的阶段，但在两个阶段中自主创新始终是我们的魂和基石。回顾六十年，对中国电缆工业导体生产大致可勾划出 15 项重大进步和技术创新，这是值得我们引以为荣的。

2 十五项重大进步和技术创新

中国电工铝导体生产的快速发展，从材料、工艺、装备和产品几乎都体现着独立自主、自力更生、自主创新、引进消化吸收和再创新精神。诸如在举世瞩目的三峡发电工程、75 和 100 万伏超、特高压交流输电工程、±50 万伏和±80 万伏直流输电工程中用的都是国产的优质导线，这代表了我国的能力和水平。

解放初期，中国没有真正工业生产意义上的电工铝导体，用半连续式浇铸机制造方锭；经加热由迴线式轧机生产铝杆；用非滑动罐式拉线机拉制铝线；用速度很慢的笼式绞线机生产导线。总之，工艺技术和装备落后，环境污染严重。那时，铝导体的用量也很少，如表 1 所示。

表 1　上世纪八十年代以前电缆行业铜铝导体年用量

<table>
<tr><td>年份
导体（吨）</td><td>解放前</td><td>1953</td><td>1957</td><td>1972</td><td>1973</td><td>1983</td><td>1990</td></tr>
<tr><td>铝</td><td>/</td><td rowspan="2">28600</td><td>14600</td><td>266000</td><td rowspan="2">388000</td><td rowspan="2">330000</td><td>252000</td></tr>
<tr><td>铜</td><td>6500</td><td>41600</td><td>120000</td><td>342000</td></tr>
</table>

中国缺铜，铜又是战略物资，改革开放前进口困难，自 1957 年开始电缆行业的产品结构进行了改革，并提出了“以铝代铜”的方针。2006 年前后铜价暴涨，在以铝节铜、降低成本和减重节能的思维下，铝导体的应用又得到了相应的发展。随着我国电力事业的迅速发展，超、特高压输电工程和智能电网的建设，可以预计将会进一步扩大电工铝导体的应用。

2.1 中国电缆工业自主创新设计和生产的第一条铝连铸连轧生产线，彻底改变了我国铝杆生产的落后面貌，开创了新局面。

在上世纪七十年代开发完成的这条生产线，以熔、铸、轧一条龙的连续生产方式获得了欢迎，由此迅速推向全国，并有出口，直至现今，其意义在于：

(1) 它与“稀土优化综合处理方法”相结合，可用国产的非电工级高硅普铝锭生产出国外需用低硅电工级铝锭才能生产出的电工用铝杆，用此种铝杆可生产出达到任何国际先进标准水平的铝导线，并可大量出口。

(2) 为导线新产品开发所需的基础铝杆，解决了重大的基础装备。

2.2 稀土优化综合处理生产电工铝导体的技术是中国自主创新的国际先进技术，是使我国电工铝导体实现大规模工业化稳定生产的里程碑，为输、配电用铝导体创造了物质基础。

稀土优化综合处理生产电工铝导体的技术是继铝连铸连轧生产线之后又一项重大基础性独树一帜的自主创新成果，经几十年大生产考验，它已成为我国电工铝导体生产的主导技术。它的意义在于：

(1) 中国铝矿资源含硅量高，不适于生产电工铝导体，自解放后30年来，中国电工铝导体的机、电性能一直不能完全达到国际标准的水平。这一成果，可用高硅普铝锭生产出性能优秀的电工铝导体，并达到了工业化的稳定生产，解决了我国生产量大面广电工铝导体的材料来源问题。

(2) 发挥中国的综合优势，取中国稀土多之长补中国矿源硅高之短，符合中国国情，解决中国自己的问题，满足了广大市场的需要。

(3) 这一技术既适用于电工用铝，也适用于电工用铝合金，这将为导体新品种开发所需的基础杆材创造了有利的条件。

2.3 自主创新开发导电用高强度、耐热铝合金，为我国架空输电线路的建设作出贡献。

在保证导电率的条件下，开发具有高强度、耐热和高强度/耐热型铝合金是高压、超高压、特高压、大跨越、大容量输电线路发展之必须。

自上世纪六十年代开始至今，我国先后已开发了高强度铝－镁－硅和铝－镁－硅－稀土合金，非热处理型高导电耐热铝合金和高强度耐热铝合金，满足了架空导线、大跨越导线、光纤复合架空地线、变电站用大电流母线的需求。为了适应对铝合金杆的大生产需要，在已有的铝连铸连轧生产线基础上进行改型，设计和生产了铝合金连铸连轧生产线。一般铝－锆型耐热铝合金均需热处理，这样耗电多、工时长，是大量生产的瓶颈之一，为此，自主创新开发了非热处理型的高导电耐热铝合金。国产的各种耐热铝合金导线，其质量和性能均可符合国际标准要求。

2.4 “园铝线一次成型压接法”生产的铝包钢线首次在南京长江 22 万伏，2000 米级大跨越输电工程中应用，揭开了我大跨越导线生产和应用的新篇章。

园铝线一次成型压接法生产铝包钢线及其生产线是在上世纪七十年代初完成的一项我国自主创新的新工艺和新生产线，它的特点是工艺简单，原材料铝比国外同类方法的利用率高，可达 70%，并在原材料铝线和镀锌钢线的管道化连续清洗，园铝线一次成型一压接上有独到的创新。线的性能可达到国外同类产品的水平。有 17 条大跨越输电线路采用了此种导线，30 多年来，线路一直运行正常。在 2008 年春节前后我国南方各地遭受 50 年不遇的特大雪灾，湖南全省很多 500kV 以下的输、配电线路停止正常运行，但架在湘江上的采用此种铝包钢导线的 220 和 110kV 大跨越输电线路（分别已运行 33 年和 15 年）导线和铁塔完好无损。

八十年代中期，随着康仿连续挤压机和双金属同步拉线机的引进，用以生产包复法铝包钢线，可获得更好的技术经济效果，而后通过消化吸收，现在此种技术和设备，已推向全国，为大跨越输电线路的建设和兼有避雷和通信功能的光纤复合架空地线的发展和扩大生产提供了物质保证。

2.5 高速铝拉线机的出现改变了我国铝线生产慢、脏，铝线性能和质量难保的落后面貌。

在技术引进消化吸收的基础上由我国自主创新设计和生产的直线式高速铝拉线机，具有速度快，生产率高，可获得抗拉强度高、表面质量好的铝和铝合金线，特别适于架空导线用硬铝线的生产，为超、特高压架空导线的开发和生产提供了必不可缺的装备。

2.6 我国自主创新设计和生产的铝、铝合金型线拉线机，可使铝和铝合金杆经一个工序直接拉出所需形状的型线，由此简化了工序，提高了劳动生产率，改变了历史上余留下来落后的型线生产方式，为型线绞、碳纤维加强芯绞、予应力钢芯绞的架空导线和型线绞缆芯电缆的生产，提供了很好的生产装备。

2.7 框式绞线机的出现改变了我国架空导线生产的落后面目，从总体上提升了导线的质量和生产效率，技术经济效果显著。

在技术引进消化吸收的基础上，由我国自主创新设计和生产的框式绞线机，与旧式的笼绞机、叉绞机相比不仅操作的自动化程度提高了，而且导线的质量和生产率有了明显的提高。此种设备已推向全国，成为架空导线生产的主导设备，而且已开发和生产了更大型的 710 四段框式绞线机，以满足大截面（1000mm^2 级）超、特高压架空输电线路用导线发展的需要。

2.8 中国超、特高压输电线路用的各种架空导线都使用的是自主创新国产的优质导线，世界最高电压等级的100万伏交流输电工程、±80万伏直流输电工程和长江三峡输电工程亦不例外，可以说是遍天下，这是值得我们引以为荣的。

综上所述，在这领域中我国之所以能如此的自力、自强，首先靠的是自主创新，其次靠的是实现了真正的消化吸收再创新，并且科研、设计成果有针对性的和不失时机的转化成生产力。在架空导线发展的进程中，我国也相应不断地建立和完善了我国的架空导线试验基地，为新导线的开发、产品质量评定提供了试验研究的物质条件。

架空导线生产的基础和保证在材料和装备、导线产品是上层建筑，目前我国已建立了比较完整的生产体系，开发了各种导线的系列产品，可满足当前电力发展的需要。

(1) 架空导线的最大截面已达 1000mm^2；变电站用大电流母线的截面已达 1600mm^2；导线品种比较齐全，碳纤维加强的型线绞架空导线和钢芯预应力型线绞防冰雪架空导线，亦在开发和国产化之中；光纤复合架空相导线（OPPC）亦曾引进使用，国内生产亦是可以。

(2) 不同材料构成的 1000、1500 和 2000m 级大跨越架空导线亦已在跨越江河的线路上应用。

(3) 良导体架空地线、光纤复合架空地线（OPGW），尤其是 OPGW 在老线路改造、新线路建设中获得了广泛的应用。

(4) 架空线路和变电站用的扩径导线，已在超、特高压输电工程中应用，它们的结构有 300mm^2 截面导线扩大到 400mm^2 截面导线直径的多层抽股式扩径导线、630mm^2 截面导线扩大到 900mm^2 截面直径的钢芯蘑菇头高密度聚乙烯支撑两层“Z”型线绞的扩径导线（外径Φ40mm）和连续焊接管轧纹支撑（直径 70mm）式的扩径大电流母线。

中国铜导体生产的特点是电工用光亮低氧铜杆生产的快速发展主要得益于引进消化吸收和自主再设计，但在再设计中简化了某些影响铜杆质量的关键技术，招致消化不良，尤其在而后的废杂铜直接制杆生产中加剧了铜杆的质量问题。现在先进的废杂铜直接制杆连铸连轧生产线已经引进，铜杆质量可以达到，个别技术指标可超过国家三级杆标准的水平，这将有利于促进我国废杂铜制杆生产的技术进步、质量和环境污染的改善。

解放后八十年代前，我国没有电工用光亮铜杆，生产的全是质差、圈重小的黑铜杆。生产方式是平炉熔炼－铸船形锭－加热－迴线式轧机生产黑杆－酸洗供货。

八十年代开始我国陆续引进了诸如浸涂法、上引法和连铸连轧法（美国式、德国式、意大利式和芬兰式）生产无氧和低氧铜杆，可以说全世界拥有的方法我国都有了。自那以后，我国电工

用光亮铜杆的数量和质量有了快速的增长和提高。由此我国自主设计铜连铸连轧生产线也开始了。

现在，电工用铜杆的生产不是数量问题，而是质量极需从速提高的问题。生产装机能力远富于需要，国产的生产线极需深入消化吸收和改造，电缆与冶金行业应加强合作，取长补短，加强铜杆质量认证、监督和管理。当前，铜杆的质量可分四个层次。第一层次，用合格的和高品位的电解铜，用先进或合适的装备生产的光亮铜杆除拉双零线的特殊质量要求外，在质量上是好的和基本好的；第二层次用合格的电解铜，用消化吸收的装备，杆的质量尚可，但性能稳定性较差；第三层次，用的是进炉品位符合要求的废杂铜，用引进先进的废杂铜直接生产电工用铜杆的装备，铜杆质量可以达到国家三级铜杆标准的水平，可符合某些线缆生产和应用的技术要求，第四层次，用品位太低的废杂铜、不合适的熔化精炼炉和精炼工艺以及连铸连轧装备，杆的质量不符合国标三级铜杆的要求。这种杆从生产到使用的全过程看，非但不节能，实际上是浪费了国家能源，且带来了使用中的安全稳患，使用时间越长，隐患暴发的机率越高。

2.9 我国光亮无氧铜杆生产线的研发、设计和生产是自主研发和引进消化改进相结合的产物，使我国光亮无氧铜杆的生产从无到有，质量和技术经济效果明显提高，现在的产量与连铸连轧低氧铜杆相比约各占半壁江山。

七十年代中，我国开始自主研发设计上引法无氧铜杆生产线，到八十年代初，通过消化吸收，作了进一步的改进和完善，从此中国制造的生产线迅速推向全国和国外，开创了我国光亮无氧铜杆生产的新篇章。

2.10 废杂铜直接再生制杆利用是阳光工业，尽管我国已有很大发展和快速增长，但尚处初级阶段，目前对使用者而言最突出的是质量问题。

中国缺铜，又是使用电工用铜杆的世界之最，因此优质的符合三级杆标准的电工用再生铜杆必定会推广应用。电缆工业呼喊铜杆质量危机、国家号召节约能源，尽管我国废杂铜直接再生制杆利用在废杂铜分类和分拣、预处理方法和装备、熔炼炉和精炼工艺技术、铜连铸连轧装备、环保、质检认证和管理上尚有许多不尽人意之处，但我们应从速组织起来打好这一质量仗。08 年我国首条国际先进的废杂铜连铸连轧生产线的引进，为我国在这一领域促进技术进步，提高质量，改进环保，加强引进消化吸收再创新打下了良好的基础。

2.11 “以铝节铜”、“以光纤代铜”是电缆工业的方向，我国铜包铝制品，在铜价暴涨以来有了很快发展和快速增长，但尚需改进质量和选择论证恰当的应用场合。

铜包铝制品的质量优劣，其核心取决于铜、铝结合的牢固性和过渡层合金的厚度。现在还有许多制造厂用的是早已淘汰的水平牵引连铸铝（合金）杆、技术不完善的包覆设备和不相称的铜拉线与退火的装备。由此，现状是粗线和细线做不好、断头率高、表面针孔频出，这都明显影响生产和应用的效果。

一般而言，在弱电特别是高频和射频场合应用已有它的立足之地，但在强电中应用国内外尚有疑虑。应用中出现铜、铝分离、电化腐蚀加速、制品假接头影响信号传递、废料回收和应用困难。

08 年我国首条国际先进的铜包铝生产线的引进，预期将在产品质量、品种开发、装备改进上开创新的局面。

随着我国 3G 通信技术、智能电网和汽车减重节能的发展将会有新的应用。

2.12 “康仿”连续挤压装备及其应用技术的开发，青出于蓝胜于蓝，为型材生产的工艺改造、大长度连续挤压成形和包覆以及简化生产工序，技术经济效果显著。

“康仿”连续挤压技术自上世纪七十年代从英国引进以后，消化吸收和再创新，特别把上引法无氧铜连续生产技术与“康仿”连续挤压技术相结合形成的智能生产线更是各抒其长，将各自的优势发挥到极致。由此对“康仿”机组、挤压制品材料和产品种类的发展，产品质量的提高，简化工艺过程和改少工模具消耗，改善环保和节约能源均获得了明显的技术经济效果。

现在，“康仿”机的生产不仅满足国内需要，亦有相当数量向外出口。早先，“康仿”机以挤压铝材为主，现已发展到铜和铜合金，并且由于连续包覆技术和金属流动模具设计（坯杆尺寸小，挤出尺寸大，即所谓的“小变大技术”）及其模具材料的改进不仅使连续挤出长度长，而且可以向更大的宽度和直径方向发展，亦可生产铝包钢双金属线、钢铝接触线、高强度超细晶镁铜、锡铜、银铜接触线和磷铜球大直径坯棒。“康仿”机已形成 250、300、350、400（最大铜排 170×15mm、铝管Φ50mm）和 630 型机组的系列化生产。630 型机组的生产将为无氧铜宽带带坯（25×320mm）、高压电缆的皱纹铝护套（22 万伏电缆，截面 2500mm^2，铝护套直径 150mm）和超高压变电站大电流母线用大直径支撑铝管的生产获得良好的技术经济效果。长期以来，电缆和冶金行业对铜排生产一直不能解决脏、污染环境的落后面貌，由于应用“康仿”技术可改善环保、简化生产工序、提高铜排质量和节约能源（节能效果可达 40%）。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

2.13 电气化铁路接触网用接触线自主创新应用新的工艺技术，使生产水平和接触线性能一举登上国际先进水平，为我国电气化铁路、城市轨道交通、矿山电气化运输提供了价廉物美的国产接触网导线。

随着我国电气化铁路从低速向高速发展，速度等级不同的客运专线，到 2012 年初或 2011 年末即将通车的约 1300km 的京一沪高速电气化铁路，其运行速度在 350km/h 及以上。由此，对接触导线提出了很高的“高强度和高导电”的要求。

我国材料工作者，在既有技术积累的基础上集思广益，进行自主创新，特别是应用“康仿”新技术，形成了中国自主创新开发的上引法连续制杆一“康仿”连续挤压制坯一冷轧一冷拉制线的新工艺，实现了大规模的工业化生产。铜镁接触线的质量、性能明显提高，且高于国外同类产品的水平。现以在京一沪高速铁路上用的 150mm^2 铜镁（中镁）接触导线为例，其实测抗拉强度和导电率分别可达 520 和 68%IACS，而相应的欧洲联盟标准（EN501.49）值分别 470MPa 和 62%IACS，铜镁接触线的组织细密，其平均晶粒度 8μm。这种新工艺之所以能获得如此好的强度和导电率，主要得益于成份控制适当、晶粒细化和冷加工量控制得当。此种工艺不仅适用于加工铜镁合金，也适用于铜锡、铜银和纯铜等接触导线。

2.14 铜扁线生产面貌彻底改变，换位和组合绕组线生产登上新高，为 11~100 万伏超、特高压变压器等心脏部件提供了物质保证

金融危机影响全球，但我国输变电工业一枝独秀，08 年变压器产量已达 13 亿千伏安，同比增长 30%，09 年 1-3 月累计产量 3.11 亿千伏安，同比增长 19%。

铜扁线是电力变压器、电抗器、干式变压器和牵引变压器用绕组线的基础材料。换位导线具有减小变压器体积、降低由漏磁场引起的环流附加损耗和涡流损耗，可提高绕组线的机械强度和节省绕制时间。因此，在超、特高压变压器中获得了广泛应用。换位导线的品种也相应骤增，换位导线生产线已可打制 5-71 根不同绝缘的换位导线，并已掌握了制造高硬度、多根数、小节距、高辐向换位导线的技术。换位机已具有双推指换位装置，配置两组换位器的换位头，可确保差异较大的线规组成的换位导线的几何尺寸精度、导线组合的紧密性和换位间距的正确性。我国首条引进的换位导线生产线具有 9 段绞笼，每笼可装 6 盘扁线，换位根数最多可达 54 根，是目前国际上同类生产线中最先进之一。

用于绕组线的铜扁线，一般厚 1-4.0mm，宽 3-20mm，现在采用先进的上引无氧铜与“康仿”连续挤压（必要时再加拉线和适当的冷作硬化）相结合的生产线，生产不同软、硬的铜扁线，彻

底改变了过去生产工序多、脏、乱和环保差的面目，建成了全封闭、全空调、恒温、恒湿、无尘净化的现代化电磁线制造厂房。

2.15 中国第一座大跨度斜拉桥（上海南浦大桥）和第一座大跨度悬索桥（广东汕头海湾大桥）所需的“斜拉索”和“预制平行钢丝束”主缆是由中国电缆工业自主创新设计、建立专业化生产厂制造的，随着我国大桥建设的高速发展，开创了中国桥梁建设的新局面。

“斜拉索”和“预制平行钢丝束”主缆，不是真正意义上的输电电缆，而是大跨度桥梁中主要的承力构件，它们的制造工艺技术与电缆制造有点相似，但又不全是。这些“索”和“束”可以向国外买，但贵得很。中国的电缆工作者主动请缨，以独立自主、自力更生、赶超国际先进水平的精神，自主创新研究设计和建立了我国历史上第一个专业化缆索厂，满足了桥梁高速发展的需求，开创了中国缆索生产的新篇章。

“斜拉索”与“预制平行钢丝束”主缆，有共同点，乃就是都属承力构件，都在工厂预制而成，因而，索和束的两端都要分别预制“冷铸锚头”和“热铸锚头”，根据缆索张力要求的不同，所用的钢材都为抗拉强度在 1770~1870MPa 左右的预应力六角形钢丝，松驰度=2.5%。但“索”与“束”又有差异，因而制造的工艺和设备又有不同，在结构上，“索”用六角形股线按正规方式绞制，螺旋升角在 2-4°，绞合后，在外层绕包带，然后挤高密度聚乙烯，定长切割，做环氧树脂和铁砂的冷铸锚头，最后加“索”工作张力 1.5 倍的力进行预拉。而“束”，六角形股线是不绞的，按正规平行排列方式形成一根“束”，在现场安装成桥的两根主缆。成“束”后，挤“束”成园，然后绕 3mm 钢丝，外涂防水层和刷漆，每“束”做锌-2%铜合金的热铸锚头，最后加“束”工作张力 1.5 倍的力进行预拉。因此预制平行钢丝“束”是裸线。

3 后语

展望未来的发展充满机遇和挑战，我深深感到：

(1) 中国的电缆工业虽然已是电缆生产的世界第一大国，但在高端产品与高科技方面与国外尚有差距，外观技术指标的差距，只是表象，而实质性的差距则在于缺乏技术储备；

(2) 从金属导体的年用量可以看出一个企业或整个电缆工业的经济规模。金属导体加工技术和品种的不断创新是中国电缆工业发展的发动机之一；

(3) 中国电缆工业应在求质量、求强而大和求稳中向前发展。

论中国电缆工业的废杂铜直接再生制杆和以铝节铜

黄崇祺

（上海电缆研究所，上海 200093）

［摘要］ 当前我国电缆工业“废杂铜的直接再生制杆”和“以铝节铜”已成为关注的“热点”。整个行业铜线的质量在下降，致使线缆产品的合格率大幅下降。铜包铝线和铜包钢线的用量正在逐步攀升，但“以铝节铜”的产品方向和在技术经济上的可行性在某些领域供、需双方还未取得共识和可行的结论。文章就废杂铜直接再生制杆、以铝节铜的现状、问题和建议进行论述，以期这两大热点向良性循环的方向发展。

［关键词］ 废杂铜；再生；铝；电缆工业

［中图分类号］ TG356.4+7 ［文献标识码］ A ［文章编号］ 1009－1742(2008)05－0010－09

1 铜、铝导体的生产和应用概况

在电缆工业的循环经济中，铜导体的生产和应用具有巨大的经济、节约资源和能源以及改善环境等重要意义，因为铜导体用量大、面积广，涉及国计民生和千家万户。2006 年我国铜导体的用量已达 354×10^4 t（见表 1、表 2），在产量达到世界第一的数年后又上新高，这是喜；但铜导体质量和在生产过程中引起的环保问题日趋严峻，决不可掉以轻心。由表 2 可以看出，电力电缆行业对铜导体的需求量最大，其次分别为电气装备用线缆和绕组线，其中绕组线用铜量上升最快。由表 3 可知，2006 年我国精铜产量为 300×10^4 t，而废杂铜包括进口和国内回收的已达 562×10^4 t（废杂铜金属量合计约 168×10^4 t）。电缆工业是使用精铜的大户，近些年来由废杂铜直接再生的铜杆，正在节节攀升，每年到底有多少用于直接再生铜杆，众说不一。有关电工用低氧铜杆、无氧铜杆的装机能力见表 4。近年来，由于废杂铜原料价格利润较高，所以国产的铜连铸连轧低氧铜生产线数量猛增（约 160 条），它们大多数用于废杂铜直接再生制杆。2006 年低氧铜杆的生产线已达 181 条，总产能约可达 660×10^4 t。至于上引法无氧铜杆生产线，据 2004 年数据就已达约 400×10^4 t，两种杆生产能力总和已达 $1\,000\times10^4$ t。

表 1 中国铜、铝导体年消耗量的变化

Table 1 Variation in the yearly consumption of Cu/Al conductors in China

导体	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
铜/10^4 t	70	78	84	95	114	123	130	143	150	172	200	210	240	285	312	354
铝/10^4 t	22	22	24	25	27	28	32	35	43	58	76	85	93	98	102	107

［作者简介］ 黄崇祺（1934－），男，江苏省常熟市人，中国工程院院士，长期从事电工导电材料及其裸电线的研究、开发和应用工作

表2　2006中国铜、铜合金、双金属导体用铜总量及产品份额

Table 2　Total Cu consumption by Cu, Cu alloy and bimetallic conductors and shares of the individual wire and cable products in China in 2006

导体用铜总量/10^4 t	电线电缆产品大类份额和所占比例(10^4 t/%)				
	裸线	电气装备用线缆	电力电缆	通信线缆	绕组线
354	20/5.65	104/29.4	115/32.5	16/4.52	99/28.0

表3　2006年中国铜导体、精铜和废杂铜概况

Table 3　A survey of Cu conductors, refined Cu and scrap Cu in China in 2006

种类	项目	数量或百分比	备注
导体铜	导体用铜总量	354×10^4 t	
	导体用铜占精铜消费量、废杂铜之和的百分比	72 %	$\frac{354}{380+98.8+12}\times100$
精铜	精铜产量	300×10^4 t	
	精铜进口量	82×10^4 t	
	精铜出口量	24×10^4 t	
	精铜表观供应量	358×10^4 t	比2005年下降约5 %
	精铜消耗量	380×10^4 t	
废杂铜	进口含铜废料	494×10^4 t(折铜98.8×10^4 t)	1. 废杂铜金属量合计约168×10^4 t 2. 中国废杂铜回收高峰预计在2010年以后
	国内回收进入流通领域的废杂铜	68×10^4 t	
	再生铜产量	80×10^4 t	比2005年增长29 %
	再生铜产量占精铜消耗量的百分比	21.0 %	

注:2007年废杂铜产量预测:因目前拟建的再生铜产能约为30×10^4 t,故2007年再生铜的产量将以不低于30 %的速度增长,预计再生铜产量将达100×10^4 t以上。

表4　中国电工用低氧铜杆、无氧铜杆和铝杆装机能力粗略统计(到2006年止)

Table 4　A rough estimation of the installed capacity for low oxygen Cu rods, OF Cu rods and Al rods for the electrical application in China (up to 2006)

低氧铜杆	进口生产线	21条:约150×10^4 t
	国产生产线	160条:约510×10^4 t
	总计	660×10^4 t
无氧铜杆	约400×10^4 t(2004年数据)	
电工铝杆	约240×10^4 t(约200条生产线,2004年数据)	

目前,由于中国铜矿资源仍然短缺,原生矿资源对国外依赖性大,废杂铜资源供应紧张,国内废杂铜回收还未到高峰,据国内外预测铜价仍有可能超过2006年的最高价。我国现在对废杂铜没有制订限制性准入条件,没有政策限制,大力支持再生金属行业的发展,对再生金属企业和园区给予政策支持。"十一五"期间,再生铜消费占目前铜消耗的比重要从21 %提高到35 %,提高其集约化的经营程度,推动园区发展,提高装备技术工业水平,改善环境。

2006年我国电工用铝导体用量已达107×10^4 t(见表5),主要用于架空电力输、配电线路,而其他电线电缆的用铝量约占铝导体总量的20 %,其中以铝电力电缆代铜电力电缆的数量不多,还未见明显的取代趋势。有关电工用铝杆装机能力的粗略统计,据2004年数据,约有200条生产线,产能约240×10^4 t。近年来由于对铝锭出口政策的改变,引发铝杆生产扩能,所以新的铝连铸连轧生产线又有增加。我国的铝资源和生产形势要比铜好得多。2006年我国电解铝的产量已达935×10^4 t,连续5年居世界第一;铝材产量已达815×10^4 t,连续4年居世界第二。2006年、2007年国内铝工业从氧化铝、电解铝到铝加工市场都供过于求。我国铝工业发展的基本政策方向为"定位是以满足国内需求为主,将不断加大抑制氧化铝、电解铝、铝合金和其他初级产品出口的力度;鼓励支持铝资源和铝工业的海外开发;大力节能降耗、减少污染物排放;大力支持循环经济,要求2010年再生铝在铝的总消耗中达到25 %,并提高利用水平。"

表5　2006年中国铝及铝合金导体用铝总量及产品份额

Table 5　Total Al consumption by Al and Al alloy conductors and shares ofthe individual wire and cable products in China in 2006

导体用铝总量/10^4 t	产品份额和所占比例		
	架空导、地线(10^4 t/%)	架空绝缘电缆(10^4 t/%)	扁线、母线、编织线、电线电缆、线芯、漆包线、双金属线及其他(10^4 t/%)
107.0	85/79.5 %	10.0/9.3 %	12.0/11.2 %

鉴于上述电工用铜导体的生产和应用情况,提醒铜导体生产的投资者要慎重行事,不要盲目投资,尤其是对废杂铜直接制杆。其原因是:由于线缆产品技术要求的不同,电缆工业不会100 %地使用由

废杂铜生产的杆，毕竟由废杂铜直接生产的杆，在质量上要低于由电解铜生产的杆。为了提高线缆产品的质量和生产的技术经济效益，选购铜杆首要考虑的还应是质量；如果还是按现有落后的生产方式，不加速技术改造，生产出低质的、达标率很低的废杂铜杆，电缆工业将会很快失去对此种铜杆的信赖，而这种铜杆也必然被线缆产品标准和市场所不接受。结果浪费了废杂铜，增加了国家的能耗，在使用中增加了安全隐患，后果将不堪设想，同时又增加了污染物的排放。废杂铜资源是有限的，国内外都如此，尤其国内废杂铜的回收高峰尚未到来。今年废杂铜的供货已趋紧张，如果盲目扩张生产线，很可能造成经济的损失。目前低氧铜杆和无氧铜杆的产能已远远超过需要。

2 废杂铜直接制造电工用铜杆

2007 年再生铜仍会以较快的速度增加，这为再生铜工业的发展带来了机遇。再生铜工业是一个利国利民的光荣行业，适应国家的需要，理应得到国家政策和有关方技术的协同支持。对废杂铜直接制造电工用铜杆是现实的需要，关键问题是如何做好它，提高铜杆质量，以满足用户和标准的要求，并尽量在生产中减少污染物的排放。

2.1 废杂铜直接制杆在电缆工业中的市场份额

废杂铜直接制造的杆，只要质量、性能稳定性和成品率提高了，在电缆工业中应用是有相当市场份额的（见表 6），但不是全部，这样供需双方都会有利可图。

表 6 废杂铜直接制杆在电缆工业中可能的市场份额

Table 6 The possible market share of the Cu rods made directly from scrap Cu in the cable industry

序号	用途	线的规格/mm	份额/%
1	电力电缆、建筑线、电磁线	> 1.10	45.0
2	通信线缆和电磁线	0.4 ~ 1.10	20.0
3	软线（绳）和电磁线	0.12 ~ 0.4	20.0
4	电磁线、电子用线、通信线缆	< 0.12	15.0

注：①废杂铜直接制杆的可拉性一般以线径 0.3 mm 衡量，在电线电缆产品中应用尚有相当的市场份额。

②导体用的铜杆包括：用电解铜的连铸连轧低氧铜杆、上引法无氧铜杆和浸涂法的无氧铜杆；用废杂铜直接制的杆，主要是指连铸连轧低氧铜杆（即火法精炼的高导电铜杆，简称 FRHC 杆）。

废杂铜直接制造的杆，其市场主要在质量要求稍低或较粗的线或型材上，如电力电缆、建筑用线、铜排和铜带等，但在电磁线、电子用线、通信用线等方面，如果质量不是上佳就难以进入这些领域。

我国废杂铜直接利用率与发达国家相比还有相当的差距（见表 7）。我国废杂铜直接利用尚在初级阶段。通过各方的共同努力，我国废杂铜的直接利用率还会不断上升，当然废杂铜直接制杆也不例外。

表 7 中国与发达国家废杂铜直接利用对照表

Table 7 Comparison between China and developed countries in terms of direct use of scrap Cu

国别	废杂铜直接利用量为再生铜量的倍数
世界平均	2.0
中国	1 ~ 1.5
美国	20
意大利	14
日本	5.5

2.2 废杂铜直接制杆与电解铜制杆的差异

废杂铜直接制造电工用铜杆，其方法是由回收的废杂铜经分类、分级、预处理后直接进入冶金炉内进行冶炼，并与连铸连轧或连铸工序组成铜杆生产线。它的优点是节能、简化工序、生产成本较低，但缺点是难于控制铜杆质量，其矛盾比电解铜制杆更突出。因为这种杆用于制造电工产品，铜的纯度要求大于 99.9 %，导电性能是第一指标要求；同时还有可轧性、可拉性、可退火性和表面质量的要求，这就对废杂铜的分类、分级、再生预处理、冶炼工艺和质量跟踪监控提出了更高的要求。成品杆的质量和环保能否达标及满足要求，主要取决于废杂铜的预处理、投料品位、冶炼与三废处理装备、工艺及其过程的监控水平。对电线电缆产品用的原材料铜，其标准纯度为含铜不小于 99.95 %（2 号铜）和 99.99 %［1 号铜，杂质总含量不大于 65 ppm（ppm 为 10^{-6}）］，这个要求是国际公认的使用电工用原材料的要求。

用废杂铜直接制造无氧铜杆（其中包括全用废杂铜和废杂铜与电解铜混用），其技术难度主要在于含氧量的控制，用电解铜上引法制杆含氧量一般都可控制在 10 ppm 及以下，但用废杂铜直接制杆要达到上列指标非常困难，这就要控制废杂铜的氧化，增加铜液的还原时间，这是一；另外，线缆产品的生产厂家及其用户要关注氢脆及其检验问题，这是二；上引制杆的工艺性能，杆裂开和内部缺陷的增加，将直接影响线的可拉性，这是三；石墨模具损耗、辅助

时间和成本增加，这是四。鉴于此，用废杂铜直接制造无氧铜杆的工艺方法，国外至今也还未大规模推广应用。

2.3 我国废杂铜直接制杆的现状与问题

在我国铜资源严重短缺的市场背景下，合理规范利用废杂铜直接再生制造电工用铜杆，将是中国铜导体市场竞争与发展的必然趋势，也符合国家提出的循环经济的发展战略。但是，由于我国废杂铜来源不同，如浙江台州、宁波，广东南海、清远，天津静海等以进口废杂铜为主；山东临沂、湖南汨罗、河南长葛、辽宁大石桥、四川新津等都是国内回收废杂金属的集散地，故成分极为复杂。据不完全了解，国内利用废杂铜直接生产电工用铜杆的企业众多，产量巨大，据不完整的初略估计（有待进一步的调研统计）大约为 180×10^4 t，约占电工用铜杆产量的 50 %。由于原材料千差万别，采用的工艺技术和设备不同，直接再生铜杆的质量也有很大差异。据对几个省数家工厂的调研与实物检测，在铜的成分上，大多数厂家没有或只有不健全的化学分析手段，更无快速炉前分析；有的甚至没有一台对产品质量检测的设备，产品质量处于失控的状态。铜杆的含铜总量仅为 99.3 % ~99.8 % 不等，只有极少数厂的铜品位能勉强达到 99.9 % 或稍高一点，且每批杆的化学成分千变万化，最突出的是导电率严重不合格，杆的可退火性也变化无常。此种低质杆又给铜杆市场造成混乱和冲击，使采用高纯阴极铜和标准阴极铜生产杆的厂家处于微利或甚至亏损的局面，这是不公平的竞争。这样的制造厂必然是生产粗放、材料浪费、环境污染严重，低氧光亮铜杆既不低氧又不光亮。但也有一些企业采用先进的技术和设备，采用合格的废杂铜生产电工用铜杆，产品质量可达到国家相关的标准。在废杂铜直接制杆中的环保问题，现在依然相当严峻，是中国再生铜企业面临的一大问题，也是今后制约我国再生铜工业发展的瓶颈。环境问题主要是烟气的治理。根据相关的规定，烟气的污染主要有颗粒状污染物和气体污染物。目前我国规范的再生铜企业建设了收尘设备，对颗粒状污染物进行有效的治理，但由于再生铜原料比较混杂，一些企业的收尘效果不好，且还有相当一部分企业没有任何环境治理设备，这也是行业落后的一种现象。

中国再生铜企业对气体污染物还没有进行治理，这是应该引起注意的。由于再生铜企业的原料复杂，在熔炼过程中，有机物燃烧产生的气体污染物污染很严重，其中以持久性有机污染物的污染最甚，对其治理尤为重要，这种污染已经引起了国际社会的重视。2006 年我国有关单位已对再生铜企业气体污染物进行测试，其中包括对二恶英的测试。

电工用铜杆是电缆工业的基础材料之一，铜杆质量的下降，可立即在电线电缆的成品率中反映出来。目前，由于废杂铜直接制杆的质量不佳，导致线缆产品的合格率大幅下降。据广东、湖南和浙江三省商检质量部门报告，“电线电缆产品近八成不合格，其中因使用不合格废杂铜杆导致 49.6 % 的电线电缆的电阻指标不合格”、“线缆产品的不合格率为 34.6 %，在抽样的 35 个不合格线缆产品中，有 25 个产品因电阻值超标而不合格，占不合格总数的 71 %”、“电线电缆不合格率超过六成，原因是偷工减料，使用不合格的原料”。长此下去，必然影响到千家万户，好在这些问题已得到了废杂铜制杆、制线企业的重视和电线电缆企业的密切关注，有望获得解决。

造成废杂铜直接制造电工用铜杆质量不佳的原因有多种，如原料、设备、生产技术、政策、法规、管理和标准等。但就技术层面而言，影响铜杆质量和造成环境污染的主要原因有以下两点。

1）废杂铜的前处理。首先涉及废杂铜的分类、分级，然后是前处理的方法和装备。如废电线电缆比较集中的处理场，没有机械化的电缆再生装备，以致有些废电线电缆与其他低品位的废杂铜混在一起降级使用，造成浪费；线缆用导体有的镀有 Sn 或 Pb－Sn 合金或 Ni 或 Ag 或漆，有的包有钢、铝。这些金属、合金和有机漆都会直接影响铜杆的质量并造成环境污染。如这些镀层、涂层、被包复的金属和有机物，都进入了冶金炉，致使精炼提纯难度增加，势必危及铜杆的内在质量和环境。为此必须关注到底在什么阶段脱（炉外或炉内）、用什么方法（化学法或火法）和装备脱。

2）废杂铜的熔炼技术、三废处理技术和它们的装备。前处理、熔炼技术和它们的装备是废杂铜制杆提高质量之本；前处理和熔炼炉是污染之源。

以上这些在废杂铜循环利用初级阶段产生的技术问题，在发展中需要各方在技术上大力协同支持，研究再生技术，设计再生设备。

2.4 废杂铜直接制造的杆可以达标

废杂铜直接制造的杆可以达到国标或国际通用

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com