

# 中国金属导体“以铝节铜”前景

黄崇祺

(上海电缆研究所,上海 200093)

[摘要] “以铝节铜”是国际性趋势,进程各国有所不同,但只能是渐进式的。我国铝和铝合金在电力电缆上的应用与国外有较大差距,铝合金在架空线路上的应用尚有较大提升空间。铜包铝导体的应用有所发展,有关标准正在报批或制订之中,有待在使用中进一步考验,但回收时的铜、铝分离尚未找到具有技术经济效果的方法。铝包钢线近些年市场旺盛,生产日趋成熟,铝漆包线的生产近些年已有增长,通信领域的“光进铜退”将毫无悬念地继续推进。飞机上的“以铝节铜”已有实质性的进展。废杂铜和电工用废铝直接再生利用对节能环保具有重要意义。全国建立废旧铜、铝线的回收网络已势在必行。

[关键词] 导体;以铝节铜;前景

[中图分类号] TH142 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2012)10-0004-06

## 1 前言

纵观世界“以铝节铜”的历史,根据各国的国情、科技的进步,各国有所不同,走走停停甚至出现反复,但总体是渐进式向前发展的,因此“以铝节铜”的前景大体上是明朗的。

目前,中国电缆工业年产值已突破9 000亿元大关,成为机械行业中仅次于汽车制造业的第二大产业,同时也极大带动了铜、铝等重要原材料产业和上、下游相关产业的快速发展,在国民经济发展中具有十分重要的作用。电线电缆产业发展的成就令人瞩目,但存在的问题,特别是质量问题不容回避<sup>[1]</sup>。可以说,当前我国线缆产业集中体现了“中国制造”产业“大而不强”的突出特点。

中国电缆工业“以铝节铜”的驱动力来自以下几个方面。

1)行业年用铜量很大,2011年行业铜、铝用量分别已达484万t(约占全世界铜导体产量的1/3)和220万t,而且历来电工用铜都属高品位的99.95%和99.99%铜。但我国铜矿藏缺乏,且目前回收废杂铜亦不多,要依靠进口。

2)世界性铜价飞涨压缩了线缆产品利润空间。

3)经试用证明,确有取得良好技术经济效果的铝线缆产品。

导体“以铝节铜”的含义是指该用铜的线缆产品就用铜,对可用铜或铝作导体的产品,需经科学实验,实际试用成功的产品,才得以推广应用,反对盲目推行,致使产品质量下降,生产大起大落。电缆行业的节铜除用铝、铝合金、复合金属外,还涉及非金属的光导纤维代铜;用废杂铜直接再生代电解精铜制杆;用碳纤维复合高分子材料代加强材料——镀锌钢线制造的架空输电用特种导线已完成制标,产品已在试用之中。2011年中国金属导体“以铝节铜”进展的不完全统计见表1。

## 2 中国电线电缆大类产品“以铝节铜”现状和前景

### 2.1 电力电缆

2011年电力电缆用铜约为150万~160万t,占行业铜导体总用量的31%以上。我国20世纪60~70年代,在“以铝代铜”方针的指引下,一度铝芯电力电缆的使用比例达40%左右,当时为了推广

[收稿日期] 2012-05-25

[作者简介] 黄崇祺(1934—),男,江苏常熟市人,中国工程院院士,上海电缆研究所研究员级高级工程师,有色金属及其合金压力加工专家;  
E-mail:exc62932870@126.com

表1 2011年中国金属导体“以铝节铜”进展的不完全统计  
(按电线电缆产品类别分)

Table 1 Incomplete statistic of copper and aluminum  
as conductors in China in 2011  
(sorted by wire and cable product)

类别	导体种类	用量/万 t	铜、铝导体总用量中 各占的百分比/%
电力电缆类	铜	150.0 以上	31.0 以上
	铝	22	10
	铝合金	3.0	1.4
	铜包铝	少量	—
电气装备 线缆类	铜	140.0 以上	29.0 以上
	铝	少量	—
	铝合金	少量	—
	铜包铝	少量	—
绕组线类	铜	120.0	24.8
	铜合金	少量	—
	铜包铝	3.0 左右	0.62
	铝	5~6 (≤10)	2.7
通信线缆类	铜	20.0	4.1
	铜包铜	3.0 左右	—
	铜包铝	8.0 左右	—
	铝合金	10.0 左右	4.5 左右
	光纤	8 000 多万千米	—
裸导线类	铜(铜合金)	484.0	—
	铝(铝合金)	220.0	—
	复合双金属	25.3	—

注:2011年中国电缆工业铜、铝导体总用量分别为484万t和220万t

使用铝芯电力电缆,对电缆的连接也做了一些研究和推广应用工作。20世纪80年代改革开放以后,铝芯电力电缆的使用比例大幅下降,至目前可能10%都不到,其原因有以下几个方面。

1)铜储备足够。有进口铜,价格贵一些,但电力部门可以承受,换来的是安全可靠、施工方便。

2)从安全可靠的角度出发,使用铝芯力缆的关键点是接头技术及其使用的可靠性。目前,国内外铝芯力缆的连接有氩弧焊、冷压焊、螺钉(栓)压紧3种方法,且积累了一些经验。

3)在城市中,特别是大城市,由于地下敷设空间有限而不用铝力缆。国内有些省份设计供电系统曾发出指令,35 kV以下才可以使用铝力缆。

一度有的电缆厂,从经济利益出发自订企业标

准推行铜包铝(线)电力电缆。此种力缆目前既无国标,亦无行标,只有少数企业的企标产品,质量如何?答案是谁制造的,谁负责。归根结底在力缆上目前推广困难的原因有二:铜包铝线制造水平低,质量堪忧;铜包铝力缆和铝力缆是竞争对手,用户往往宁愿使用更价廉、一样适合使用的铝力缆而不用铜包铝力缆。

作铝力缆芯线用的导线,除铝线外,电工用退火和中间热处理的8000系铝合金线早已在北美洲应用,现在也在中国推广应用;具有高导电率、受控抗拉强度和伸长率的铝合金导线已在日本开发成功。

国外对铝力缆的应用已涉及低压、中压和高压各个等级,实芯铝电缆早已大量应用,铝电缆的连接和安装问题都已解决。要求很高的海底实芯铝电缆,其最大铝截面已达1 600 mm<sup>2</sup>。国外铝芯电缆的用量百分数已达两位,而国内目前最多在10%左右,因此我国铝芯力缆的扩大应用尚留有相当的空间。

## 2.2 电气装备线缆

飞机上的装备用线缆的“以铝节铜”已取得实质性的应用,正在推广之中,已走在我国的“以铝节铜”发展的前列。

每架飞机需用许多电气装备用线缆<sup>[7]</sup>,如一架波音或空中客车的长程飞机要用超过250 km的航空导线,或毛重为2.5 t的导体,为了连接要用超过1万个连接器;一架短程喷气机要用70 km的航空导线,而一架小型直升机需用30 km的航空导线。一架A380飞机需用超过500 km的各种电线电缆,如单根电话线、多芯电缆、高温电缆、同轴电缆、数据传输电缆和特殊结构的光纤电缆。它们都分布在飞机的不同部位,从机体、发动机和发动机舱,通过复杂的控制设备——内部的通信系统连接。为了减轻重量、节约能源和节省空间,已采用了铝芯电缆和薄壁电缆。由于对铝线的连接接触需要防水,不能敞开,且要便于识别、方便维护,已开发成功了与之相配套的用于铝线的激光预标志新方法<sup>[8]</sup>,并推广应用于各种飞机。这种技术和装备亦适用于汽车中对铝线连接的预标志。

## 2.3 绕组线

绕组线主要用于电磁线圈、变压器和电动机等领域。2011年,绕组线用铜已达120万t,随着国产家电有50%出口美、欧、日等国,带出了相当数量的铜线。一般电动机设计寿命为20年,不考虑用铝

线;变压器行业是用铜大户,目前用铜已达40万t左右,特别10 kVA以上的变压器一般不用铝线。近些年来,绕组线用铝和铜包铝线有所增长,主要用于微波炉变压器、洗衣机电动机、电扇电动机、冰箱压缩机,特别是电子变压器有着广泛的使用领域,如中频、音频、脉冲、电源、片式等多种变压器。中国电子变压器生产量占世界总量的20%以上,其中60%用于供应国际市场。曾用铝漆包线生产微波炉用高温变压器获得成功和好评,给我国电子变压器生产指出了光明的前途。由此“铜改铝”已具不可逆性,深信在新技术、新材料、新工艺的推动下,电子变压器行业的“铜改铝”将迎来新的春天。

## 2.4 通信电缆

通信领域的电缆市场“光进铜退”和“以铝节铜”趋势凸显<sup>[2]</sup>。约用了15年的时间(1995—2010年),通信领域用铜量由占行业总用铜量的9%,降到了目前的4.5%(20万t),并将继续下降。“光进铜退”意味着光纤逐步向用户端延伸,最终实现光

纤到户和光纤到桌面;铜线缆逐步向用户端退缩,并最终退网。现在除核心网、城域网尚留有少量铜线缆外,接入网还有70%的铜线缆将被光纤代替(并且已开始进入个域网、片域网)。目前我国接入网用电缆有5亿线对公里(年降2.2%),而光缆只有0.5亿纤芯公里。个域网线缆组件(电子消费类产品)是个大市场(现全部用铜),2010年我国电子线缆市场为370.8亿元(其中一半为汽车线束),预计到2015年将达到750亿元。移动网用的射频铜电缆,用铝电缆代替不仅可以降低成本,而且在安装、重量、减少能耗等方面也有显著优势。事实上,从全球规模商业的情况看,铝电缆已成为一种可显著减少固定资产投资、可代替铜电缆的方案。

## 2.5 裸导线

### 2.5.1 电工用铝和铝合金

我国2011年电工用铝和铝合金的总用量已达220万t,使用比例如表2、表3所示。

表2 2011年中国金属裸导体总用量的不完全统计(按导体材料类别分)

Table 2 Incomplete statistic of metallic conductors in China in 2011 (sorted by conductor materials)

裸导体材料类别	用量/万t	使用场合
铜	481.0	各类电线电缆
铜合金	3.0	接触网导线、电磁线、电动机、开关、变压器、特种线缆等
铝	204	架空导线、电磁线、电力电缆、电气装备线缆、其他线缆线芯等
铝合金	16.0左右	架空导线、通信电缆、电力电缆、特种电线电缆
铜包铝线	11.0左右	通信电缆、电磁线、汽车用线等
铜包铝排	0.3左右	开关、绝缘母线槽等
铝包钢线	11.0	光纤复合架空地线、架空导线等
铜包钢线	3.0左右	共用天线电视(CTAT)线、广电线、芯片骨架线、汽车用线等

注:2011年中国电缆工业铜、铝导体总用量分别为484万t和220万t

表3 2011年电工用铝和铝合金使用比例

Table 3 Proportion of aluminum and aluminum alloy as electrical conductors in 2011

导体类别	使用场合	使用百分比/%
电工用铝	架空导线	92.7
	电力电缆	10
	绕组线	2.7
电工用铝合金	架空导线	1.4
	电力电缆	1.4
	通信线缆	4.5

由表2、表3可看出,电工用铝主要用于架空输电、配电网线路用的架空导线<sup>[3,4]</sup>;电工用铝合金在架空导线和电力电缆上的用量还很低,更不能和国外两位数的使用百分数相比。随着电力事业的发展,这两个领域的用量尚有较大的提升空间,特别是铝合金。

长期以来,我国电工用铝合金的用量没有增长有两个原因:需方的需求迟后;供方的质量不稳定,导致成品率低、价格高。产品质量不稳定直接与装备、工艺、监控、管理落后有关,这是今后应该努力的方向。

## 2.5.2 复合双金属

复合双金属是另一类“以铝节铜”的导体,我国2011年复合双金属的总用量已达25.3万t。它们的使用比例如表4所示。

表4 2011年复合双金属使用比例

Table 4 Proportion of composite metallic conductors in 2011

复合双金属	使用比例/%
铜包铝线	43.5
铜包铝排	1.2
铜包钢线	11.9
铝包钢线	43.5

1) 铜包铝线。铜包铝线主要在通信线缆(弱电)上使用,2011年和前些年相比已有所增加,在漆包线上应用也略有小增,但在电力类(强电)线缆上的应用看不到有多少突破。国外铜包铝线的开发比我国早很多,设备也先进,但实际应用情况同样也没有突显佳绩,也多半在弱电上应用。铜包铝线的质量优劣,从根本上取决于铜、铝冶金结合的优劣。我国铜包铝线生产的质量问题,主要在于包覆生产线和原材料铝合金杆生产的落后,此外,后续拉线工艺和装备也没有及时跟进。由此拉出的铜包铝线断头率高、表面露铝(脱皮),在使用中产生加速的电化腐蚀而断线,致使线缆产品使用寿命大减。这种不求技术改进、只求低价竞争的局面必须尽快结束。

为了规范市场,对主要用于屏蔽、通信电缆的音频和视频线的“铜包铝镁合金线”的行业标准正在制订之中。

2) 铜包铝排(母线)。铜包铝排在国外用流体静力挤压法早在几十年前就已开发,其目的是在开关和绝缘母线槽中推广应用,但没有获得突破性的应用。近些年来,我国对铜包铝排的开发有3种方法,包括铜管铸铝成锭—热轧成型法,铜、铝冷配合成锭—热轧成型法,铜铝冷配合—冷压—拉制法。铜包铝排质量的优劣和产品成品率、成本、利润和铜包铝线一样取决于铜、铝的冶金结合。因此,这些方法在工艺、装备的完善,生产效率、成材率和利润率上尚有提升的空间。上述3种方法2011年的产量约0.3万t。为了规范市场,有关“电工用铜包铝母线”的行业标准已经制订和上报完毕,待审批发布,主要技术指标如表5所示。

表5 铜包铝母线主要技术要求

Table 5 Main requirement of copper clad aluminum bus bars

材料参数	具体标准
铜	Cu - CATH - 2 标准阴极铜
铝	Al99.7E 重熔用铝锭
铜层体积比/%	≥18
铜层厚度	窄边最薄处的铜层厚度应不小于宽边平均铜层厚度;宽边最薄处的铜层厚度不应小于宽边平均铜层厚度的70%
抗拉强度/MPa	≥90
伸长率/%	≥8
弯曲	宽边弯曲90°后,铜层不开裂,铜层铝芯不分离
电性能	20℃时的直流电阻率应不大于0.02534Ω·mm <sup>2</sup> /m,即导电率相当于68% IACS(International annealed copper standard, 国际退火铜标准)
界面结合强度/MPa	不小于30
交货长度	6m,或经协商后以任何长度交货

铜包铝排的主要应用之一是绝缘母线槽,在此它的竞争者是铝母排(线)。绝缘铝母线槽在国外早已应用,在国内由国外进口的绝缘铝母线槽在大宾馆中亦有应用,但目前反而不使用国产的绝缘铝母线槽。

铜包铝排和铜包铝线还有一个同样的问题需要解决,就是废旧铜包铝制品的铜、铝分离回收问题,至今还没有找到具有技术经济和环保效果的方法,如果铜包铝大量应用,为了节材,不影响材料再利用,这个问题是必须解决的。

3) 铝包钢线。近些年来,随着超高压架空线路,特别是光纤复合架空地线和高强度大跨越导线的发展,铝包钢线的市场旺盛,前景看好。目前铝包钢生产线已有41条,2011年产量达11万t,单机生产线年产量已达4000~4800t,说明其生产操作已日趋成熟。

4) 铜包钢线。2011年全国总产量在3.0万t左右,目前主要应用于弱电场合,如CATV线、广电线、芯片骨架线、汽车用线等。今后随着电站接地网、线路避雷线等的改造和应用,在其领域也有它的应用前景。

5) 钢铝复合导电轨。在轨道交通中用钢铝复合导电轨代替普通钢轨对电力机车第三轨移动供电。导电轨由工字形导电铝合金本体和槽形不锈钢接触带复合而成。它的优点在于导电性好,可节省

运行用电 30%，不用额外沿线敷设馈电电缆，并将牵引供电站的设置距离提高 2.5 倍以上，总投资可降低 20% 左右；重量轻；以不锈钢作滑动接触面磨损低，寿命可达 60 年；可靠性比柔性悬挂接触网高两个数量级，故障率低，保养简单，维修方便。

6) 膜包矩形绞和组合膜包矩形绞铝绕组线。它的特点是可节铜、重量轻、价廉、绕组线中的股线电阻均匀、涡流损耗低，可在超高压和特高压直流输电的干式平波电抗器中应用。近些年来，我国通过自主研究设计和试制已成功开发出了用该种铝绕组线制造的线圈和电抗器。经验证，该种铝绕组线已达到了设计和试验的要求。目前这种电抗器已进入在线路上实际试用的阶段。以正在开始实施的溪洛渡和糯扎渡两条线路为例，需 44 台这种干式平波电抗器，每台电抗器需用 40 多吨铝绕组线，总计需 1 760 ~ 2 000 t。随着我国输电事业的发展，这种绕组线将展现出美好的前景。

### 3 城市矿产废物资源——废杂铜和电工用废铝的直接再生利用

电缆工业历来使用 99.95% 和 99.99% 品位的电解精铜以及 99.7E 或 99.7 (经稀土优化综合处理的达电工级别的) 重熔用铝。废杂铜和废电工用铝保级再生利用，是与“以铝节铜”相应的重要方面，它们对节能、环保、城市矿产废物资源化起着重要的作用。

#### 3.1 废杂铜的直接再生制杆利用

要解决废杂铜直接再生制杆利用严重的全国性质量问题，加快淘汰落后国外 20 ~ 30 年的旧装备、旧工艺乃是必经之路。任务艰巨，任重而道远，但前途光明灿烂。优质再生铜杆可“名正言顺”地进入电缆市场。

为了规范市场，“电工用火法精炼再生铜线坯”的有色金属行业标准已经报批，并即将由中华人民共和国工业和信息化部发布。这种优质再生铜杆的主要技术指标如表 6、表 7 所示。

表 6 TH1、TH2、TH3 牌号铜线坯的化学成分

Table 6 Chemical composition of TH1, TH2 and TH3 copper drawing stock

元素组	元素	元素组总质量分数/%
主要成分, 不小于	Cu + Ag	99.90
其他杂质元素总量, 不大于	杂质元素	0.100
氧含量, 不大于	O	0.040

注：杂质元素总量是指包含 As、Bi、Cd、Cr、Fe、Mg、Ni、Pb、S、Sb、Se、Si、Sn、Te、Zn 的总和

表 7 TH1、TH2、TH3 牌号铜线坯的机电性能

Table 7 Mechanical and electrical properties of TH1, TH2 and TH3 copper drawing stock

牌号性能		TH1	TH2	TH3
伸长率, 不小于/%		40	37	35
扭转性能	正转转数	25	25	25
	反转至断裂的转数, 不小于	30	25	20
电阻率	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ,	0.017 07	0.017 24	0.017 24
	不大于 (% IACS, 不小于)	(100.0)	(100.0)	(100.0)

注：如有铜粉量和退火性能要求，由供需双方另议

#### 3.2 电工用废铝的保级再生利用<sup>[5]</sup>

随着老的架空线路和农网的改造<sup>[6]</sup>以及废旧铝芯电线电缆的替换，就会产生大量电工用废铝。生产再生铝的能耗仅为原生铝的 5%，是一项获得低污染资源、大幅节能的重要措施。符合质量要求的再生电工铝杆与用原生铝生产的电工铝杆相比，在使用中几乎具有同样的效果，这点与再生电工用铜杆是不同的。

电工用废铝是比较好的铝，应该保级利用才能收到较好的技术经济效果。所谓保级指的是铝的纯度(99.7% 铝)和质量(达电工铝杆的技术指标，符合可轧性、可拉性、可退火性和表面质量的要求)。为此，废电工用铝原料必须经预处理，再熔过程亦必须仔细处理。废铝表面往往有油污，从而精炼除气必须加强，否则影响可轧性和可拉性。为了保证导电率，杂质元素必须要有针对性分别处理。导电率和抗拉强度是互相矛盾的，因此也必须要有针对性地处理。

### 4 结语

1) “以铝节铜”是国际性的趋向，势不可当，其进程据各国的实际情况有所不同，但只能随着科技的发展、人们习惯势力的改变而渐进式地发展。

2) “以铝节铜”和“光进铜退”还会继续推进。

3) 全国应尽快建立废旧铜、铝的回收网络，以解决或缓解铜、铝再生工业的无米之炊。

#### 参考文献

- [1] 中国电器工业协会电线电缆分会, 上海电缆研究所. 全国电线电缆产品质量提升工作会议[C]. 上海: 电缆行业通讯, 2011.
- [2] 黄崇祺. 中国电缆工业铜导体加工的发展、问题和新趋势[J]. 光电缆, 2011(12): 1-8.

- [3] 佚名. 2012年我国将进入大规模电网建设阶段[J]. 中国线缆, 2012(2):16.
- [4] 佚名. 新疆建世界级特高压线路, 利好铝线缆企业[J]. 中国线缆, 2012(3):19.
- [5] 黄崇祺. 废铜、废铝在电缆工业中的优化再生制杆利用[C]. 宁波: 第十届再生金属国际论坛, 2010.
- [6] 黄崇祺. 中国线缆工业铜导体加工的发展、问题和新趋势[J]. 光电线缆, 2012(12):1-8.
- [7] Aerospace cable: a look at market and trends[J]. Wire and Cable Technology International, 2010(5):34.
- [8] Marc Ruddy-Thimon. New making process for use on aluminum wire[J]. Wire and Cable Technology International 2011, 5:46-47.

## The prospect of saving copper conductor by using aluminum in China

Huang Chongqi

(Shanghai Electric Cable Research Institute, Shanghai 200093, China)

[**Abstract**] Saving copper by using aluminum is the international trend now, but the development is progress step by step and every country has a different processes. There is an obvious difference among China and other countries on the application of aluminum and aluminum alloy in electric cables. There is a wide development space for the aluminum alloy conductors using for overhead line. There is a little development for application of copper-clad-aluminum conductors and the related standards are being approved as well as written; we expect progressive test in use. Now we also expect to find good technic-economic efficient means to separate the copper and aluminum during recycling processing. The market of aluminum-clad-steel wires is also expanding in recent years, with the maturity of manufacturing technology. The amount of aluminum enameled wire is also rising recently. It is no doubt that there is more fiber and less copper in the communication field continuously. There is a substantial progress of saving copper by using aluminum on airplanes. It is very important for saving energy and protecting environment through recycling copper and aluminum scrap directly. It is imperative under the situation to set up the recoverable networks of scrap wires of copper and aluminum.

[**Key words**] conductor; using aluminum to save copper; prospect