



姜尔康 编著

现代电缆工程

XIANDAI
DIANLAN
GONGCHENG

辽宁科学技术出版社

序

《现代电缆工程》是姜尔康同志就我国电缆工业现代化而写的一部专著。作者30年代留学英、德等国，学习高压工程及电缆制造技术，是我国电缆工业创始人之一，曾历任昆明电缆厂、上海电缆厂、沈阳电缆厂总工程师兼副厂长。在半个世纪的电缆生涯中，亲身奋战于电线电缆制造，特别是超高压电缆的科研、开发、生产第一线，积累了丰富的经验。所以该书既对我国50年来电缆生产经验作了全面总结，同时对电缆制造的现代化技术给予重点介绍。

全书分为两篇，共十四章。第一篇的三章，主要介绍铜、铝导体的冷、热加工和现代生产技术。第二篇详细地介绍聚合物电力电缆以及超高压电缆的生产工艺、设计、试验，电缆附件制造和电缆安装等。本书不是一般的综述，而是结合电缆现代化产品和现代技术，突出地介绍新工艺、新产品和新成果；许多地方有其独到的见解，尤其是对近年来我国引进电线电缆新技术的消化、吸收和国产化指出了方向，提出了方法。

本书通俗易懂，对电缆行业的新老人士来说，都不失为一本颇具参考价值的好书，既论述了许多切实可行的新方法，又提供了丰富的资料，对大专院校的师生来说，也是一本理论结合实际的最佳参考教材。这本书的出版应受到工程、教育界的热烈欢迎。

刘子玉

1988年11月

前 言

电线电缆是输送电力、传递信息和制造各种电机电器不可缺少的重要器材。传统的常用电线电缆结构较为简单,制造工艺也不复杂,对它的研究和改进往往不为人们重视。60年代以后,由于经济发展,电气化、自动化日益发达,信息传递日益频繁,特别是新兴尖端技术崛起,诸此,莫不需要多种多样的新型电线电缆。例如电力电缆的系统电压已升高到500及750千伏,甚至1000千伏。对中、低压电力电缆的用途更朝着多样化发展,例如大型电站和原子能电站,海上采油平台和新型船舰、飞机、地下建筑及煤矿采掘等都需要防火、阻燃、耐温、耐辐射的,可靠性得到保证的新型电缆。长长途电话及电视传送需要频谱极宽的光导电缆。电线电缆的绝缘和护套基本上都改用为合成材料或光纤材料。现代电缆的生产工艺基本上采用在线自动控制或自动监视的连续生产线,不但保证了工艺质量,工效也提高一二十倍。当今电线电缆生产不仅形成了一个庞大经济体系,其技术开发也成为一个大难度的综合性研究课题。

我国于30年代末期引进英国技术和装备,在昆明初建电线电缆生产基地,即现在的昆明电缆厂,开始制造裸铜线、橡皮绝缘线和电磁线等简单产品,并培养了许多技术骨干。抗日战争胜利后,在上海、天津等地建立电线分厂。全国解放后,50年代初期在上海及沈阳各建一厂开始大规模生产门类较齐全的电线电缆。上海电缆厂是由我国自行扩建的,沈阳电缆厂列属“一五”计划工程,由苏联帮助改建。两厂在当时都与世界先进水平差距不大,也基本上能够满足建设的需要。60至70年代的20年中,正是世界经济复苏,科学技术蓬勃发展时期,电线电缆技术也在突飞猛进。而我国电线电缆行业相形之下变得愈来愈落后了。电缆生产的品种、产量及工艺技术都难以满足现代建设的需要。“六五”计划期间估计我国进口电缆成品达十亿美元之巨!为国家造成重大的经济损失,也是我国电缆工作者的莫大耻辱。

自80年代起,从国外引进了大量电线电缆制造技术,为中国电缆工业的腾飞创造了条件。然而,如何消化、应用这套综合技术,逐步做到国产化并有所创新,尚需做大量的艰苦工作。有鉴于此,根据个人学习和探讨,在总结本国经验的基础上,写成《现代电缆工程》一书,对现代电缆生产技术作较为广泛的阐述和介绍,也提出了一些方向性的意见,希望对我国电缆工业的发展有所帮助,也希望对我国已有的先进技术,如500kV超高压电缆技术,能加以完善和提高。本书只是抛砖引玉,恳切希望全行业及学校、科研部门的广大同志团结起来,对新技术的各个环节能分工合作,有组织地开展科技研究工作,努力赶上和超过世界先进水平,为我国四个现代化做出贡献。

《现代电缆工程》计划分为三篇,第一篇介绍现代导体的热冷加工,第二篇介绍现代电力电缆及附件的结构、设计及制造工艺和试验设施,用11个章节介绍了聚合物绝缘电缆、特殊场合使用的电缆及500~750kV的超高压充油电缆三大类电缆的有关问题。

此两篇的内容对当前电缆制造技术的更新改造有普遍参考价值，故先行付印出版。

第三篇将简要介绍现代通信电缆，重点是光缆，正在准备中，希能明年出版。

《现代电缆工程》在写作中受到工厂、学校和研究机构同行业的鼓励和支持。特别是西安交通大学的刘子玉教授为书稿提出了忠恳的修改意见，沈阳电缆厂的谢茂、汪谊凯、旷天申、周绍昌、平玉莹等同志收集和提供了很多资料。张景洋、苏立奎为书稿做了大量细致的审校和整理工作。作者在这里向他们表示衷心感谢。

限于作者经验不足，水平有限，无论在内容与编写上一定存在许多疏漏与差错，希望读者批评指正。

娄尔康

1988年11月

目 录

第一篇 电缆导体加工新工艺

第一章 铜导体热加工	1
1.1 传统铜杆生产工艺.....	1
1. 传统铜线锭生产工艺.....	1
2. 传统高导电无氧铜锭生产工艺.....	4
3. 传统铜杆轧制工艺.....	4
1.2 铜杆生产的工艺改革.....	4
1.3 现代ETP铜杆的连续生产.....	6
1. 电解铜竖炉熔化.....	10
2. 电解铜液从熔化炉到铸锭机的流转系统.....	11
3. 铜液在熔化及流转中的质量控制.....	12
4. 铜液的现代浇铸系统.....	13
5. 铜杆的轧制.....	17
6. 铜杆联轧机孔型设计程序.....	18
7. 铜杆清洗及收线打捆.....	24
8. 连铸连轧铜锭的凝固和结晶.....	24
9. 连铸连轧ETP铜杆的特性.....	29
10. 铜杆连铸连轧的经济效益.....	30
1.4 浸涂成型法生产无氧铜杆.....	32
1. 生产工艺原理.....	32
2. 浸涂成型法无氧铜杆生产工艺流程.....	33
3. 生产线运行质量控制.....	35
4. 浸涂成型法无氧铜杆的特性.....	35
第二章 铝导体热加工	38
2.1 传统铝杆生产.....	38
2.2 铝杆新标准.....	38
1. 铝杆强度.....	39
2. 铝杆的导电率.....	40
2.3 铝料的采用.....	44
2.4 铝料熔化和铝液处理.....	45
1. 铝料熔化.....	45

2. 铝液精炼	46
3. 铝液硼化处理	47
4. 铝液净化	47
2.5 铝锭连铸	49
2.6 连续热轧	50
1. 铸条的修整	50
2. 连续热轧	51
3. 轧辊的孔型设计	52
4. 铝杆的卷取	52
第三章 铜铝导线制造	55
3.1 传统铜铝线的拉伸	55
1. 基本原理	55
2. 实现拉伸过程的条件	55
3. 影响拉伸力和拉伸应力的主要因素	57
4. 确定拉伸力的方法	57
3.2 连续多次拉伸	59
1. 基本概念	59
2. 滑动式连续拉线	59
3. 连续拉线的配模	60
4. 积蓄式无滑动拉线机	64
3.3 当代铜铝导线制造工艺	65
1. 当代铝导线制造工艺	65
2. 当代铜导线制造工艺	67
3. 现代拉伸用线模	70
4. 线模加工	73
3.4 拉线的润滑	74
3.5 铜导线连续软化(退火)	75
3.6 铜线镀锡	78
1. 铜线热镀锡	78
2. 铜线电镀锡	81
3.7 现代束线绞线工艺	82
1. 多股束线	82
2. 高速绞线机	82

第二篇 聚合物绝缘电力电缆及超高压充油电缆

第一章 聚合物绝缘电力电缆发展概况	84
第二章 交链聚乙烯XLPE绝缘电力电缆	88
2.1 XLPE 电力电缆及其绝缘特性	88

1. XLPE 电力电缆的绝缘强度	88
2. 加速XLPE电缆绝缘电老化的各种因素	89
2.2 绝缘屏蔽层的电性光滑	89
2.3 绝缘混合料的净化和混合	92
1. 渗透法	93
2. 挤出混炼造粒法	93
3. 注射法	93
4. 半导体料混合工艺	94
2.4 绝缘中的空隙与微孔	94
2.5 绝缘的树枝老化	95
1. 电树枝	95
2. 水树枝	95
第三章 聚合物绝缘体的交链	100
3.1 聚合物绝缘的交链	100
3.2 聚合物绝缘的化学交链	100
3.3 交链聚乙烯的过氧化物直接交链工艺	103
3.4 热辐照交链 (RCP) 体系	104
1. 典型RCP的生产范围及主要技术参数	104
2. 主要设备及工艺布置	104
3.5 悬链线的设计	107
1. 上悬点处倾角的选定	107
2. 悬链形式的选择	108
3. 悬链线常数的确定	108
4. 悬链线的设计举例	108
3.6 RCP加热段的设计	110
1. 加热管、电缆表面及导体的温度分布	110
2. 加热方式与温度控制	111
3. 加热段各加热区的功率分配	111
3.7 RCP 的气体交链系统	112
1. 气体交链—气体冷却系统	112
2. 气体交链—水冷却系统	114
3.8 挤出层均匀厚度的获得	114
1. 计米牵引直流电动机的转速控制	116
2. 挤出机各部位的温度控制	116
3.9 悬垂线控制	118
3.10 CCV生产线的同步控制	118
3.11 加压熔盐连续硫化—PLCV体系	120
1. 加压熔盐连续硫化 (PLCV)	120

2. PLCV硫化的工艺过程.....	120
3. PLCV典型设计介绍.....	121
3.12 硅烷化学交链.....	123
第四章 用数理统计理论求取挤出电缆的电气参数.....	126
4.1 理论 基础.....	126
4.2 确定电缆的击穿分布参数	127
1. 模拟电缆.....	127
2. 短时试验.....	127
3. 长期试验.....	130
4.3 在运行中电缆可靠性的推算	132
4.4 用验算期望寿命值的方法确定电缆在运行中的可靠性	132
第五章 XLPE及其它聚合物绝缘挤出电力电缆结构设计.....	134
5.1 导电芯设计	135
5.2 绝缘结构设计	137
5.3 电缆半导体屏蔽层的设计	141
1. 挤出电缆屏蔽层用的半导体混合料.....	141
2. 半导体屏蔽层厚度.....	141
5.4 聚乙烯—碳黑混合物中电流传导的模式	143
5.5 金属屏蔽	144
5.6 XLPE 电缆的加固.....	146
第六章 XLPE电力电缆的载流量.....	151
6.1 XLPE电力电缆的允许载流量计算	151
1. 计算条件.....	152
2. 计算方法.....	152
3. 计算结果.....	153
6.2 影响电缆载流量的各种因素	166
1. 直接埋地电缆.....	166
2. 电缆在空气中敷设.....	168
3. 超负荷运行.....	168
4. 电缆的强制冷却.....	169
第七章 在导电芯及屏蔽层中的允许短路电流.....	171
7.1 短路电流的概念	171
7.2 电缆短路的热过程	171
7.3 短路电流温升计算	173
7.4 电缆短路时产生的机械应力	174
第八章 聚合物绝缘电力电缆的试验.....	177
8.1 例行 试验.....	177

1. 0.6/1kV电缆电压试验	177
2. 7/12kV(6/10)及以上电缆的电压试验	178
3. 局部放电PD试验	179
8.2 特种试验	185
1. 检测导电芯电阻	185
2. 对7/12(6/10)kV及以上电缆同芯屏蔽铜带的试验	186
3. 绝缘厚度的测试	186
4. 塑料护层厚度的测试	186
5. 电缆总外径测试	186
6. 绝缘交链度测试	186
7. 外半导体与绝缘间粘合性试验	186
8. 对XLPE护套的交链度试验	187
9. 4小时AC电压试验	187
8.3 形式试验	187
1. 工作电压0.6/1kV电缆的电压形式试验	187
2. 在室温下测量绝缘电阻	187
3. 在工作温度下测量绝缘电阻	188
4. 4小时AC电压试验	188
5. 工作电压7/12(6/10)kV电缆的形式试验	188
8.4 电缆安装后试验	191
1. DC电压试验	191
2. AC电压试验	192
8.5 其它研究性试验	192
第九章 特殊用途聚合物电缆	193
9.1 防火电缆及其分类命名	193
9.2 防火电缆的标准及防火特性的试验方法	194
1. 耐火(FS)电缆的标准和试验方法	194
2. 阻燃(FR)电缆的标准和试验方法	196
3. 低延阻燃电缆的标准和试验方法	196
4. 低烟无卤阻燃(FOH)电缆的规范和试验方法	196
9.3 耐燃阻燃聚合物材料	199
1. 材料试验	199
2. 耐燃阻燃聚合物材料的选择	201
3. 阻燃聚合物材料的配合——阻燃剂	202
4. PVC排炭限制配方	205
5. 无机阻燃填充料和低烟无卤阻燃电缆	206
9.4 聚合物防火电缆的设计和应用	207
1. 耐火电缆的选择和设计	208

2.	低延阻燃电缆 (FR R 电缆)	210
3.	低烟无卤阻燃电缆	212
9.5	原子能电站用电缆	213
1.	原子能电站用电缆规范及其材料的选择	214
2.	原子能电站用电缆的技术条件及其形式试验	218
3.	环境试验	221
第十章	聚合物绝缘挤出电缆附件	230
10.1	概述	230
10.2	聚合物绝缘挤出电缆的终端头	230
1.	电缆终端头的电场分布	230
2.	电阻分阶 (FSD) 终端头	232
3.	预制应力锥终端头	233
4.	高压预制应力锥终端头的结构及装配	249
5.	SF ₆ 高压终端头	256
10.3	聚合物绝缘挤出电缆连接接头	257
1.	连接头电气设计原理	257
2.	电缆连接接头的常用结构及其安装工艺步骤	260
3.	新型及特殊 XLPE 电缆接头	262
4.	附录	264
第十一章	超高压充油电缆	267
11.1	超高压电缆	267
11.2	自容式充油电缆	268
11.3	超高压电缆在输变电系统中的绝缘配合	269
1.	系统中的工作电压和过电压	269
2.	超高压电缆绝缘配合参数	273
11.4	自容式超高压充油电缆的设计	274
1.	充油电缆的冲击场强	274
2.	充油电缆工频耐压强度	277
3.	超高压电缆绝缘结构设计举例	279
11.5	超高压自容式充油电缆的主要生产工艺	283
1.	导线线芯制造	283
2.	超高压电缆纸及纸包工艺	284
3.	超高压自容式充油电缆的干燥和充油工艺	293
4.	自容式充油电缆的铠装及外护层	299
11.6	500kV 自容式充油电缆电气试验实例	300
11.7	超高压自容式充油电缆附件	301
1.	500kV 充油电缆终端的设计	301
2.	中油压压力箱	308

第一篇

电缆导体加工新工艺

第一章 铜导体热加工

为了生产优质铜杆，世界各国基本上都已采用连铸连轧的热加工工艺以生产初点铜（ETP铜）杆，或用浸涂法和上引法等工艺以生产无氧铜（HCOF铜，简称OF铜）杆。这两大类新工艺所生产铜杆的质量基本相同。无氧铜杆工艺似乎简单一些，但耗电较多，并要用较高品位的电解铜。本章主要介绍连铸连轧及浸涂成形两种新工艺。唯有比较，才能突出新工艺的优越性，所以首先对传统铜杆生产工艺作以简单介绍。

1.1 传统铜杆生产工艺

传统制造电线电缆用的铜杆是由品位在99.95%左右的电解铜铸成初点铜线锭，再经热轧而成。对性能上有特殊要求的铜杆，如在还原气氛中工作等，需采用高导电无氧铜（HCOF COPPER）锭轧制而成。

1. 传统初点铜线锭生产工艺

初点铜线锭是一种横铸铜锭，其工艺过程一般是在反射炉中熔化、氧化扒渣、插木还原和铸锭等。炉料除电解铜外可掺加少量废铜线，熔炉装量从10t至200、300t不等。一般以煤气或燃油为燃料，熔炼及浇铸周期，如50t炉，约17小时。当装入的炉料在反射炉中熔化以后，便将压缩空气吹入铜液，进行氧化。通过吹气氧化，铜液中的硫及微量的砷和锑等杂质成为挥发性氧化气体，被炉气带走；其它杂质的氧化物和一定量的氧化亚铜（CuO）成为渣，浮在铜液表面而被扒出炉外。渣的形成和数量视杂质的特性和数量而定。在整个氧化过程中渣被陆续扒去，直至液池表面不再浮起稠渣而形成一层氧化亚铜液层为止。此时，可以认为氧化已经完毕，铜液中饱和了氧化亚铜，绝大部分硫和其它挥发性的杂质及可以氧化成渣的杂质已被消除。取铜样观察，不再有由析出二氧化硫而生成的小气泡，铜样呈脆性，击断面呈砖红色，结晶粗松无光泽。此时，溶解在铜液中的氧化亚铜可达6~10%。再一次把液池中的残渣扒净，用干木炭覆盖液面，在饱和了氧化亚铜的铜液中插入新砍的青木杆，开始插木还原。木杆在液池的高温下干馏，放出 H_2O 、 CO_2 、 H_2 及其它碳水化合物等气体，强烈搅动铜液。这种还原性气体逐步将 Cu_2O 还原成金属铜。在还原进行中，不断取样观察。当还原足够时，铜样很难击断，断口呈玫瑰红色，结晶细密，放射状晶体面上有丝质光泽。铜在此时达到了“初点”，称为初点铜（Tough-Pitch-Copper或简称TPC）约含300~500ppm的氧。

在氧化过程中铜液溶解 Cu_2O 的数量与温度有关，温度越高则溶解越多，如图1—1所示，故氧化时温度不宜太高。在插木还原时也要保持适当的低温度，以缩短还原时间。

50t炉插木时约120分钟，用杆（如电杆木粗细）4~6根。韧点铜约含300~500ppm的氧，它与铜结成 $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$ 共晶体一起析出于铜晶粒的晶界面周围，也可与其它微量杂质结合成氧化物和共晶体 $\text{Cu-R}_2\text{O}$ 析出。韧点铜性韧，延性好，铸成线锭时表面轻微凸起，有微细皱纹，易于热轧成杆而后冷拉成线。韧点铜的导电率可达101% IACS。这主要由于微量杂质已与氧结合变成浮渣被扒出，或与铜结成共晶体析出于晶体之间。否则，此种杂质与铜结合成固融体将降低导电率。

同样品位的电解铜制成无氧铜时，其导电率有时比制成韧点铜为低。插木还原不能将铜液中的氧全部去除使韧点铜成为无氧铜。当插木还原过头时，浇出的线锭除导电率有所下降，性质变脆外，还含大量气孔，甚至锭的表面会变成“开花馒头”一样，难以使用。这主要由于铜液中溶解了过量还原性气体 H_2 及 CO ，在凝固时大量析出所致。

当正常还原的韧点铜金属液体在铸模中冷却时，从液体中存在的结晶核心、晶芽开始凝固。模子和铜液的冷却速度快，一般有利于多晶核结晶，生成较精细的晶体。冷却速度慢时，结晶环绕少数晶核发展，而形成粗大晶体。结晶体生成的速度沿着晶体轴线方向最快，这就形成了树枝状结晶。当结晶沿主轴方向发展并与相邻晶体接触时，结晶

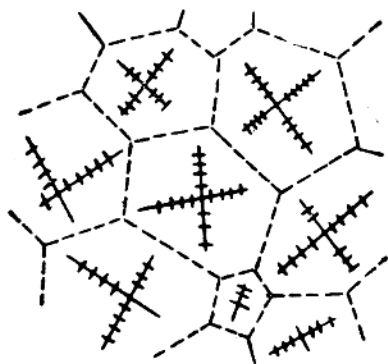


图1—2 树枝状结晶示意图

由填满于相邻晶体间空隙而完成。图1—2表示晶体在溶液中结晶的历程。实线条表示结晶轴的截面，当结晶继续发展时，最终将形成以虚线表示的多边形晶粒。虚线也表示晶粒的边界，界面上的三角线条也表示析出的共晶体。

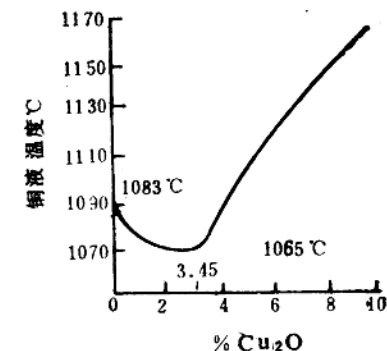


图1—1 在铜液中 Cu_2O 平衡图

熔化铜液中的氧分作为氧化物而存在。当凝固时，这种氧化物将与铜结成共晶体而析出。铜与氧化亚铜($\text{Cu-Cu}_2\text{O}$)或与氧化杂质共晶体的凝固点低于纯铜的凝固点。 $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$ 共晶体的凝固点 1065°C ，比纯铜的凝固点 1083°C 低 18°C 。当铜液凝

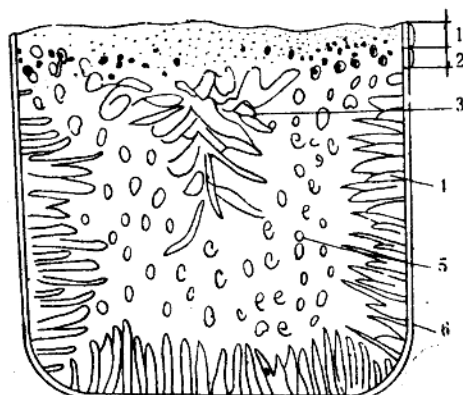
子下、左、右三个方向被推向最后凝固的上表面，此处散热最慢，而聚集为富氧层。一般铜线锭富氧层约厚7~8mm。此富氧层极脆，它与铜锭其余部分约含同样多的氧。

熔融的铜液中能溶解很多种气体，特别是氢、一氧化碳等在铜液中溶解度最大。氢气的溶解度随温度升高而升高。当溶液降温时，逐步放出气体。在凝固温度时，溶解度锐减，所溶绝大部分气体将同时析出。

图1—3为不同温度时氢气在铜液中溶解度的曲线。在铜液凝固进程中，析放出之气体也将成长中的晶粒推向上方，故在富氧层中及其下面存在着几个毫米厚的气泡集中层。浇铸温度愈高气泡层愈厚。在实际生产中，浇铸口铜液温度最好控制在1110~1120℃左右。在气泡层外，也会有小部分气体陷在晶粒边界，甚至进入晶粒内，形成微小气泡。无论在铜锭上表层形成大块疏松气泡层，或是在锭体中形成多量小气泡，都是铸件质量不良的表现。

在横铸切点铜线锭生产中，产生10~12mm厚的富氧层和气泡层是不易避免的。当锭轧成杆后，这层脆弱疏松的富氧——气泡层被轧薄包在铜杆表面，甚至小部分夹入铜杆里面。用这种铜杆拉出的线，表面不光，易起皮、脆断，很难拉出细线。这就是用传统工艺生产铜杆所受的局限性。此外，在 $\alpha\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}$ 共晶体的界面上有较大 Cu_2O 共晶体颗粒存在（约100 μm ）。对拉细线也极为不利。这种颗粒通过铜锭刨面、铜杆剥皮等措施也难以去除。

另一影响铸件质量的因素是结晶的热流方向。一般情况晶体总是沿热流方向而发展的。



1. 富氧层 2. 气泡层 3. 晶花 4. 柱状结晶 5. 等轴小晶粒 6. 激冷细晶粒

图1—4 横铸铜锭断面宏观图

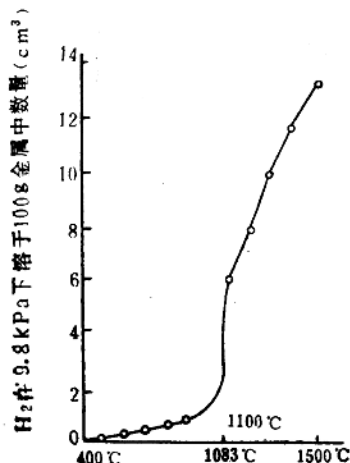


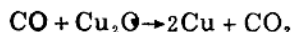
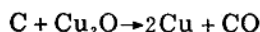
图1—3 氢气在铜液中溶解度曲线

从图1—4可看到，模子底部和两侧散热最快，首先在紧靠模子边上，结成一层激冷的细晶粒，而后长成了一圆柱状晶体，铸件中上部散热较慢，结了一个大“晶花”。此时热流向上下左右扩散。当温度逐渐下降而趋于均匀时，中间有等轴小晶体开始结集，直至有效地阻止柱状晶粒向内部发展。浇铸温度愈低，锭模的导热愈快，中心花愈小，而细晶粒区愈大。相反，如浇铸温度太高（1160℃以上），等轴结晶区狭小，甚至没有，晶花和柱状晶粒几乎连在一起，而且整个截面上布满了气泡。这种高温浇铸铸件，在热轧第一、二道时，易于产生裂缝。为了防止铸

件疏松和晶粒粗大，传统工艺中一般限制铜线锭浇铸温度为1136~1160℃，能做到的最佳浇铸温度是1110℃左右。

2. 传统高导电无氧铜锭生产工艺

含氧量300~500ppm，含铜量99.95%以上的铜液，也可以进一步制成高导电无氧铜。把铜液在1150℃温度时，通过木炭覆盖的流槽，连续流过“去氧器”而脱氧。“去氧器”是一个由耐火材料填衬、装满高质木炭的特殊闭合容器。铜水注入器内的木炭表面，除去所含残余氧分：



铜水从容器流出时，氧可以完全脱除。脱氧铜液通过一流槽送入密闭的保温炉。流槽及保温炉都为特制木炭发生炉气所充满（也可用其它适宜的保护气体），气体成分约为CO27%、CO₂0.5%，其余为N₂。气体不应含H₂及H₂O或其它碳水化合物。保温炉是一个长形的圆柱炉体，炉内经常保持着大量铜水（10~20t），它的作用是调整温度和控制浇铸时的流量。此炉有两组工频感应加热圈，用以保持铜水温度差异在10℃以内。浇铸炉有机械连锁装置，以控制浇速。铜水通过有保护气体罩的浇嘴流入模内。保护气体也为木炭发生炉气。在保温炉内的铜液面上也可覆盖一层干木炭。去氧的铜液在空气中从炉子流到模子，最多可吸入100ppm的氧气。无氧铜浇铸线锭都采用竖浇，浇口要割去。

3. 传统铜杆轧制工艺

传统工艺中，其铜线锭截面约为1dm²。在轧制铜杆前，先要经再热炉把锭加热至约900℃，而后喂入回线式轧机，经粗、中、精三段热轧和十四个孔型，轧成φ7.2mm黑铜杆，再经酸洗后进入拉线车间冷拉成铜线。

用这种传统工艺在电线电缆工业中大量生产铜杆已经有一个世纪以上。以后虽然有所改进，如放大熔炉容量，加快轧机速度，采用半连轧工艺等，但仍不能消除铜杆质量上若干严重缺陷，特别是模铸锭有富氧层及气泡层，回线式轧制杆难免有边翘、卷包及氧化皮夹入等等。有时为保证拉制铜线的高质量，必须采取铜锭刨面、铜杆剥皮等工艺措施，但这会造成严重浪费。

上面粗略介绍了铜线锭及铜杆轧制传统工艺，目的在于“温故知新”。

1.2 铜杆生产的工艺改革

从本世纪50年代起，人们为了消除上节所述的铜杆产品质量不佳和生产严重浪费等缺陷，已在酝酿铜杆生产工艺的彻底改革，至80年代，改革已经基本完成。改革向两个方向进行，一个方向仍生产铜（含氧量250~500ppm），但用竖炉连续熔铜，严格控制炉气气氛以调整铜液含氧量；用铜铸轮或钢履带等垂直或倾斜式连续铸锭，以防止铜锭中产生富氧层及气泡层；用轧件无扭转的三角孔型或圆—椭圆孔型系将1300~

6000mm（或更大）的连铸铜锭连轧成 $\phi 8$ mm铜杆；最后，经用酒精连续还原表面氧化层或其它连续酸洗方法制成光亮铜杆。这种类型的初点铜杆生产线小时产量6—36t。

第二个方向是用较高品位的电解铜（如含铜量99.97%以上），在保护气氛下进行连续熔化、铸杆（锭）、轧杆而制成 $\phi 8$ mm的无氧铜杆，含氧量20ppm以下，每条生产线小时生产能力1—10t。

至80年代初，铜杆连续生产工艺改革已经完成且日臻完善。当时，国外已建成连续生产线100余条，小时生产能力共约1700t，如以年生产4000小时，开工率75%估算，则可年产铜杆510万t。从国际上看，质量差、成本高的传统铜杆生产工艺已经被淘汰，我国也应急起直追，迅速完成铜杆新工艺的改造。

在详细介绍各种铜杆连续生产工艺以前，先对铜杆含氧量及其特性的认识予以统一。

（1）近年在引进铜杆生产新工艺中，受到外商种种不科学推销宣传的影响，有人把铜杆分成初点铜（ETP）、低氧铜和无氧铜三类如表1—1。

表1—1 初点铜、低氧铜和无氧铜的划分

品 类	含 氧 量 (ppm)	含 铜 量 (%)	生 产 方 法	用 途
(1) 初点铜ETP(旧法)	200~600	99.9~99.95	铜线锭再热轧杆	普通导线用
(2) 低氧铜(新法)	100~250	99.95以上	连熔连铸连轧	大量用于电线电缆
(3) 无氧铜	4~20	99.96~99.99	上引法、浸渍成型法	供微细线用于电子工业

旧法（传统方法：横铸锭、再热、回线式轧杆）铜杆的含氧量一般在300~500ppm之间，且这部分氧只分布在90%的铸锭截面内；其它的10%富氧层，厚度在10~12mm左右，其中还吸收着同样多的氧分。当我们规定（传统规定）铜锭底部的含氧量为300~500ppm时，实际上包括富氧层在内的平均含氧量是0.06~0.10%。富氧层的危害性尽人皆知，用这类传统锭除非刨面才能轧成含氧量300~500ppm的初点铜（ETP）杆，要做ETP杆用立浇切头的无富氧层锭或半连续浇铸的锭固然可以，但浇铸速度慢，生产率低而且消耗也大。从半连续铸造这个实践基础上又发展了有转动或移动铸模的连续浇铸，给ETP铜杆生产全部连续化创造了条件。ETP铜锭连续浇铸当前主要有三种形式：Properzi的双轮式，SCR的五轮式及克虏伯Hazelett双钢带式。它们的共同特点是连续地倾斜或垂直浇铸，铸锭不会产生富氧层和集结的气泡层。锭的质量好，生产率也高。这种连续生产出来的含氧250~500ppm的铜杆仍应当是初点铜杆（Electrical Tough Pitch Rod），它们不是含氧100~250ppm的低氧铜杆。国际上不论采用

新法或旧法，都不制作此种所谓“低氧铜杆”，更没有“大量用于电线电缆生产”。因为，即使用99.95%的一号电解铜原料，还原到100~200ppm含氧量时，如不在保护气氛下，将吸收大量氢气造成气泡严重、导电率下降的铸锭。

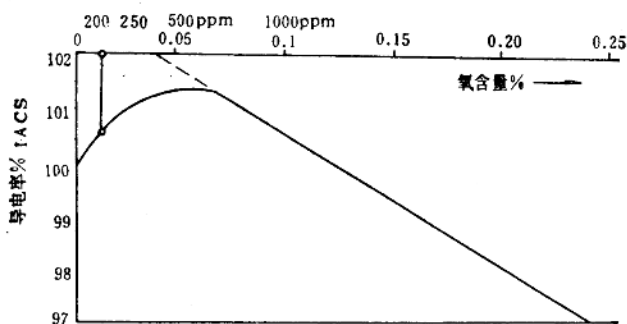


图1—5 氧对铜的导电率的影响

根据以上分析，我们必须改正所谓“连铸连轧低氧铜”的错误概念和叫法，而代之以连铸连轧初点铜或简称初点铜（ETP铜），其含氧量应为250~500ppm，其电气和机械物理特性几乎和无氧铜（HCOF铜）不相上下。传统工艺的初点铜杆已经或正在被迅速淘汰，故初点铜（ETP）杆的名称由现代工艺连续生产的初点铜杆来承继是合乎道理及合乎国际习惯的。

（2）无氧铜杆一般含氧量在20ppm以下，要用较高品位的电解铜为原料（含铜量99.97%或99.98%）才能得到与ETP铜杆相同或略高的导电率，如101.5%或102.0% IACS。无氧铜杆生产工艺有浸涂法和上引法二种，主要是以前者为代表，后者在国际范围内并没有得到大量推广，其总生产能力仅占无氧铜杆生产总能力的16%，占连铸连轧铜杆总生产能力的1.35%。

电气用无氧铜一般叫做高导电无氧铜，即 HCOF 铜（也有用磷脱氧的无氧铜，导电率很低，不能做电铜杆用），简称无氧铜。

1.3 现代ETP初点铜杆的连续生产

当前国际间采用的ETP初点铜杆连续生产的新工艺主要有：意大利的Properzi系统，简称CCR系统，美国的Southwire系统，简称SCR系统，以及联邦德国的Krupp/Hazelett系统，简称Contirod系统。此三者原理上基本相同，工艺上也大同小异。其差异主要是在铸机和轧机的形式和结构上。

CCR 系统沿用铝连铸连轧的双轮铸机和三角轧机形式连铸连轧铜杆。最初铜铸条截面1300mm²，现在最大可达2300mm²以上，理论能力18t/h，轧制孔型系“三角—圆”系统。当锭子截面太大时，原轧机前面加两平—立辊机架，采用箱式孔型开坯，箱孔型道次减缩率在40%左右。

SCR 系统是在CCR的基础上改进而成的（见图1—6）。铸机由双轮改为五轮

(一大、四小), 轧机则改为平—立辊式连轧机, 孔型改为箱—橢—圆系统。头上两道箱式孔型同样起开坯作用。SCR五轮铸机可铸铜锭截面 6845mm^2 , 理论小时能力 25t 。

Contirod 系统工艺和生产规模基本上和SCR一样, 只是铸机改用了“无轮双钢带式”即Hazelett式。

以上三个系统的特性对比分别列于1—2表、1—3表中, 并以 SCR 系统流程为代表逐一加以介绍。

表1—2

Southwire/Morgan, SCR系统表

标准系统		1300	1300M	2000	2300	3600	5700	6800
铸锭截面(mm^2)		1355	1355	2080	2333	3650	5700	6845
铸锭生产率	标称(t/h)	5		11.5	19	27.5	41	45
	最大(t/h)	5.5		13.5	21	30	48	55
竖炉	标称(t/h)	5		15	20	30	45	60
保温炉	(t)	3		9	13.5	13.5	25	25
铸轮直径	(mm)	1676.4	1676	1676	2438.4	2438.4	3048	3048
轧机架	架数 $\times$ 辊径(mm)	9×203.2	9×203.2	1×254 9×203.2	1×304.8 10×203.2	2×304.8 10×203.2	1×457.2 2×304.5 10×203.2	1×457.2 4×304.8 8×203.2
生产能力	(t)							
两班制 (效率80%)	Δ	16000	$\star\star$ 26000	37000	60000	88000	131000	144000
三班制 (效率75%)	$\Delta\Delta$	22000	$\star$ 36500	52000	85000	124000	184000	202000

Δ 4000小时—2班/天; 8小时/班; 5天/周; 50周/年—80%效率

$\Delta\Delta$ 6000小时—3班/天; 8小时/班; 5天/周; 50周/年—75%效率

$\star$ $4064\text{小时} \times 8\text{t/h} \times 80\% \text{效率} = 26000\text{t/a}$

$\star\star$ $6096\text{小时} \times 8\text{t/h} \times 75\% \text{效率} = 36500\text{t/a}$