

## 铜包钢线材及其生产工艺

贺飞,刘利梅,钟云,何永福,苏永庆

(云南师范大学化学化工学院,云南 昆明 650092)

**[摘要]** 介绍了铜包钢线材的类型、性能、应用领域以及生产方法。对国内外目前广泛使用的生产铜包钢线材的电镀法、包覆法、热浸镀法和水平连铸法作了详细阐述,并对各生产工艺的特性、生产成本、产品质量作了比较分析,指出了其中的关键问题,为我国的铜包钢线材的技术改进,提高产品质量,降低成本提供参考。

**[关键词]** 铜包钢线材;电镀;包覆;热浸镀;水平连铸

**[中图分类号]** TG174.44

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1001-3660(2007)05-0078-03

## Copper-clad Steel Wire and Its Producing Technology

HE Fei, LIU Li-mei, ZHONG Yun, HE Yong-fu, SU Yong-qing

(Faculty of Chemistry & Chemical Engineering, Yunnan Normal University, Kunming 650092, China)

**[Abstract]** The types, performance and applied field of copper-clad steel wires were introduced. The electroplating method, cladding method, hot-dip coating method and horizontal continuous casting method widely used for copper-clad steel in civil and abroad were expounded. The speciality of each technology, production cost and product quality were comparatively analyzed separately. The key problem of them was pointed out. It will give the reference for improvement of copper-clad steel wire technology, product, quality and for reducing production cost in our country.

**[Key words]** Copper-clad steel wire; Electroplating; Cladding; Hot-dip coating; Horizontal continuous cast

## 0 引言

在通讯、交通运输、冶金、输电、能源等领域中,我国长期以来都使用纯铜作导线。但随着这些领域的不断发展,它们对导线的综合性能有了更高的要求。此外,就生产成本而言,纯铜的成本较高,因此,复合材料的生产已日益受到人们的重视。

铜包钢线材是以钢丝作为芯体,通过冶金、机械或电化学等方法在其上包覆上铜层,是一种金属基芯的包铜复合材料,这种复合材料综合了铜和钢的优异性能<sup>[1]</sup>,它兼有钢的高强度,又有铜的优异导电性和抗腐蚀性<sup>[2]</sup>,其更高的使用价值还体现在它具有良好的可塑性、可焊接性和磁性<sup>[3]</sup>。近年来,铜包钢线材的生产发展非常迅速,使得铜包钢线材的生产工艺越来越简单化,生产成本逐渐降低,并且在实际中得到广泛的应用。

## 1 国内外铜包钢线材的应用进展

铜包钢线材最早只在运输和通信领域中应用,但随着铜包钢线材生产工艺的不断完善,现已用于制作电子元件引线、电镀用电极,并且在橡胶工业等<sup>[4]</sup>领域中也应用。

铜包钢接触线在性能上兼备了钢的高强度、耐高温软化的

机械性能和铜导电率高、接触电阻小的电性能,特别是铜中加入少量的锡或银后,其耐磨和耐热性能都得到加强。因此,在交通运输领域中,铜包钢线材取代铜、铜合金和铜包铝等材料取得了良好的效果。早在20世纪80年代,日本就开始试制把铜包钢接触线应用于电气列车上,1990年挂线试用,列车运行速度275km/h,1993年试验速度达425km/h<sup>[5]</sup>,现已在新干线上使用,满足了特快列车的需要。前苏联、瑞士、瑞典、比利时和德国等国已用它来安装链式移动装置,如纵向和横向架空缆绳、挂车、Y型辅助电缆、定向缆绳等,并且已经达到了规范化。我国也在尝试将铜包钢线材应用于电气化铁路。

通常,制作同轴电缆(CATV)导体的材料要求高频下抗阻小,有足够的机械强度,因此,铜包钢线材非常适合作分配线和用户线的内导体,尤其是用在线杆和用户间跨度大的场合,更具有其独特优点。在高频下,趋肤效应随频率增加而增加,而铜层比率比较小,一般仅为12%~24%,所以铜包钢线材可以直接取代纯铜线材,降低成本。国外Comnscope公司生产的用户引线,TFC公司生产的T6型、T10型分配电缆内导体都采用了铜包钢线材。我国已将铜包钢线材用于有线电视的传输上。全球的通讯技术每天都在发生着日新月异的变化,对导线材料的需求也与日俱增,生产CATV电缆的市场前景良好,继续扩大生产将会给我国带来更大的经济效益。

由于黄铜线材的高精度切割效果不理想,而高温下,铜包钢线材的钢芯耐高温,铜层导电性好,所以铜包钢线材可代替黄铜线材,用来制作圆角半角精密度高的产品和飞机零件等。

铜与硫化橡胶有优异的粘结力,钢丝具有足够的机械强度<sup>[6]</sup>,因而铜包钢线材可大量应用于橡胶工业,作为子午线轮

**[收稿日期]** 2007-07-02

**[基金项目]** 云南省自然科学基金面上项目(2005E0030M);云南省教育厅科学研究基金项目(6Z0002D)

**[作者简介]** 贺飞(1981-),男,辽宁鞍山人,硕士,研究方向为金属表面处理。

胎钢帘线、输送带及其它橡胶制品的加强钢丝,提高运行时的可靠性<sup>[7-8]</sup>。

高质量的铜包钢线适合作电子元件的引线,其表面纯铜保证了可焊性和镀锡性。目前,各国已尝试用它来制作电容器、二极管、集成电路等元件的引线。

除此之外,还可以用于其它场合,如防水土流失的河堤拉线、CO<sub>2</sub> 气体保护焊丝和埋弧焊丝、接地棒等。

## 2 铜包钢线材的生产工艺

铜包钢线材的生产方法虽然很多,但目前国内外的生产工艺主要有电镀法、包覆法、热浸镀法、水平连铸法,下面就这4种方法进行详细阐述。

### 2.1 电镀法生产铜包钢线材的生产工艺<sup>[9-11]</sup>

电镀法生产铜包钢线材的生产工艺是利用电沉积原理,在铜盐溶液中将钢丝表面镀上铜层。由于铜与钢的电极电位相差太大,需要解决它们的结合力问题,所以传统上采用预镀铜法,即首先在氰化铜液进行预镀,再进行其它铜液电镀。镀铜以后,还需进行镀后处理,镀后处理包括缓蚀清洗、热水清洗、烘干、涂覆保护膜等。

在传统的预镀铜液中含有剧毒的氰化物,存在较大的生产危险性,并对环境有污染,因此,现在一般不再采用氰化物预镀,而采用其它类型的替代预镀法,常见的预镀铜工艺特点如表1所示。

表1 常见的预镀铜工艺比较

Table 1 Comparison of common pre-plating copper technologies

工艺种类	优点	缺点
氰化预镀	结合力好,工艺简单	毒性大,污染严重,生产率低
酒石酸预镀	阴极极化高,结合力好	允许的电流密度小
乙二胺预镀	分散能力好,结合力好,结晶细	有毒和污染,维护困难
HEDP 预镀	镀层光亮,结合力较好	有毒,维护困难,阳极材料要求高
预镀镍	结合力好,操作方便	预镀铜槽液镀种不同,成本较高
焦磷酸盐预镀	镀层平滑,结合力好	正磷酸的除去困难,成本高

铜包钢线材的铜层为非修型镀层,只要求镀层均匀,厚度大,与钢芯间的结合力好,因此,电镀中通常使用高浓度、高温度的电镀液,并采用拉镀(动态)的生产方法。线材电镀的连续性,决定了电镀工艺控制的困难,所以必须严格执行工艺要求,保证每道工序的质量,才能够生产出合格的产品。

用电镀法生产铜包钢线材的工艺比较成熟,产品质量比较稳定,是目前国内普遍采用的一种生产方法。但用电镀法生产的铜包钢线材仍存在铜镀层比较薄、性能较脆、铜层中混有杂质、导电性差、生产过程中环境污染大等缺点,并且许多生产厂家还需从德国、美国等国引进先进的电镀设备。

### 2.2 包覆法生产铜包钢线材的生产工艺<sup>[12-14]</sup>

包覆法生产铜包钢线材的生产工艺是对钢丝和铜带分别进行预处理,再将铜带用焊接、压接的方法包覆在钢丝表面,并切除余量,然后通过拉拔压缩使铜与钢的表面能很好地结合,得到

所需直径的线材。

铜包钢线材生产的基本工艺流程为:原料的前处理→包覆焊接→坯线拉拔→热处理→成品。钢丝通过矫直装置矫直后,用碱液对铜带和钢丝进行表面处理。铜带经过轮轴逐渐形成圆管状,包覆在钢芯周围,采用氩弧焊连续焊接包覆铜层的缝隙,形成复合线坯。经过多次拉拔和热处理得到所需力学和电学性质的线材。

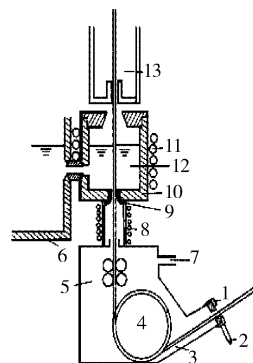
为了防止空气进入铜层和钢芯之间,所以要使用惰性气体保护包覆区。铜层较软而钢芯硬度较高,变能力相差大,为了防止变形不均匀,应尽量减少线材和模具间的摩擦。

采用包覆法生产铜包钢线材具有同心度好,产量高的优点。但这种方法采用无氧铜带生产,成本高,加工费用昂贵,而且铜与钢芯的结合力不强。

最近国内的生产厂家对此方法进行了改进,研制了连续挤压包覆法<sup>[5]</sup>,得到均匀厚度、无露点、无焊缝的铜包覆层,但工艺较复杂。

### 2.3 热浸镀法生产铜包钢线材的生产工艺<sup>[15-21]</sup>

热浸镀法生产铜包钢线材的生产工艺是由美国通用电气公司和日本藤仓电线公司对现有的热浸涂法生产无氧铜杆的技术和设备进行改进,而形成的一种制造铜包钢线材的新工艺模式。此方法亦可用来生产其它复合材料,是目前国际上通常采用的一种生产工艺。



1. 剥皮模 2. 冷却装置 3. 钢芯 4. 牵引轮 5. 夹送轮 6. 保温炉  
7. 惰性气体入口 8. 感应加热器 9. 插入嘴 10. 熔槽  
11. 感应加热器 12. 铜液 13. 包覆线

图1 热浸镀法生产示意图

Figure 1 Sketch chart of hot-dip coating

热浸镀法生产铜包钢线材的生产工艺是利用热浸镀原理,将金属线材浸入到熔融的铜液中,从而在金属表面获得铜镀层,如图1所示。芯线首先要通过扒皮模去除,主要是氧化皮外皮,随后进入保温炉进行升温保温,再通过真空室(这个真空地带一直延续到熔槽的底部),进入盛有熔融铜液的熔槽实施浸镀,浸镀后的坯线将进入熔槽上方的冷却塔冷却,最后进入热轧机组轧制成线。

在镀覆过程中存在2个步骤:一是在很短的接触时间内通过比较浅的熔体,可获得最大厚度的镀层,此阶段为凝固期;二是在其后较长的接触时间内通过比较深的熔体,镀层厚度减少,甚至完全重熔,此阶段称为重熔期。在凝固期间,由于母线的温度低,金属受到热渗透作用被加热到高温,界面处的温度梯度随之下降。当固/液界面的热流达到平衡时,便可获得最大厚度的

镀层。在重熔期间,热流平衡反向,固/液界面处的温度梯度接近于零。完全重熔的时间主要取决于界面传热系数。

铜的冷凝包覆率取决于铜液与钢线的热交换。通过控制钢丝预热温度、铜液温度和浸镀时间,可得到不同厚度的铜层。铜的附着比随钢丝预热温度的升高而降低如表2所示。这是由于经过预热芯体与熔融铜之间的温度差减小,凝固周期缩短,则镀层厚度减小。但钢芯经过预热,铜镀层与钢芯间将结合得更紧密。

表2 镀层最大理论厚度与钢丝初始温度的关系

Table 2 Relation between the most theoretic thickness of coating layer and primary temperature of steel wire

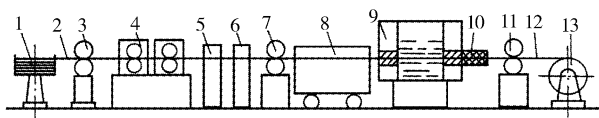
钢丝初始温度/℃	500	600	700	800
镀层厚度/mm	0.75	0.35	0.30	0.20

预热温度和钢芯速度不变时,可以有2种方法改变镀层的厚度。1种方式是调节熔槽水平面以获得所需厚度。第2种方式是定时补充熔槽,让熔槽本身调节其水平面、液态金属的消耗率与供给率相一致。在这种情况下,必须在第1阶段(凝固阶段)的稳定平衡点进行操作。

热浸镀法可生产高质量的无氧铜镀层钢线材及铜合金镀层钢线材,铜层和钢芯间的结合力好,可塑性良好,生产的铜包钢线材的铜附着比范围较大。另外,此工艺无污染,无公害,成本低,有利于大规模生产。因此,目前成为铜包钢线材制造中比较先进和具有良好发展前景的工艺。此方法生产的铜包钢线材已被广泛应用于接触线(电车线)、电极引线、接地棒、电气装备用电缆等。我国使用热浸镀法生产铜包钢线材的工艺还不成熟,生产厂家较少,有待于进一步地开发和推广。

## 2.4 水平连铸法生产铜包钢线材的生产工艺

近年来上海电线电缆研究所研制开发了铜包钢线材的水平连铸工艺<sup>[22-23]</sup>。它是把热浸镀工艺和连续铸造工艺相结合的一种工艺。水平连铸法的生产工艺由钢芯处理,连铸系统,拉拔和退火系统组成,如图2所示。



1. 放线盘 2. 钢丝 3. 剥皮轮 4. 矫直机 5. 酸洗槽 6. 水洗槽 7. 夹送轮  
8. 干燥炉 9. 感应电炉 10. 结晶器 11. 牵引装置 12. 铜包钢坏线  
13. 收线盘

图2 水平连铸法生产铜包钢线材的生产工艺图

Figure 2 Process chart of horizontal continuous casting method for copper-clad steel wire

水平连铸法生产铜包钢线材的生产工艺与热浸镀法生产铜包钢线材的生产工艺的原理和生产工艺十分相似,但区别是它为卧式连铸,它把熔炼、铸造建成连续作业线。连铸系统是工艺的核心,关键是要选取合适的连铸速度和凝固温度,而得到满意的结晶组织和良好的镀层厚度。

用水平连铸法生产铜包钢线材具有节省人力,自动化程度高,生产效率高优点。但保温、凝固和牵引的工艺参数必须相匹配,还有待于进一步的研究和开发。

## 3 结 语

铜包钢复合材料是一种近年来发展起来的新材料,因其具有良好的性能而应用于许多领域。我国铜矿资源贫乏,目前大多数铜矿已开采了三十几年,近几年来我国除从国际市场进口昂贵的电解铜外,还增加了废铜的进口,而使用铜包钢线材可以大量地节省铜材,达到合理利用铜资源的目的,解决了铜材短缺的问题,将会产生巨大的经济效益。

传统的电镀法易造成环境污染,包覆法成本高、质量低,而热浸镀法可用来生产高质量的无氧铜层钢线材,此方法无污染、成本低,目前国外现在多采用此法。虽然我国热浸镀法的生产技术还不成熟,但其具有良好的发展前景,进一步地研究和开发此工艺对我国铜包钢线材生产技术的提高具有十分重要的意义。

## [参 考 文 献]

- [1] Fei Baojun, Fei Mingbing, Chen Zhenghong. High electric conduction property of composite copper-clad steel wire [J]. IEEE, 2001, 15(6): 15-20
- [2] Shin-ichi Katayama Brian, Tadashi Kohida, Yasukazu Fujii. Analytical evaluation of material on contact wire of copper clad steel after long durability test [J]. 铁道科研报告, 2001, 15(6): 15-20
- [3] McDonald D B, Krauss P D. Corrosion-resistant reinf or cing steel [A]. Second International Conference on Concrete Under Severe Conditions [C]. Norway: E & FN Spon, 1998. 382-391
- [4] Brian Suwarow, Alan Gibson. Automotive applications of bimetallic wire [A]. 51st International Wire and Cable Symposium [C]. USA: Cablinmg Systems Magazine, 2002. 117-123
- [5] 运新兵, 宋宝韞, 刘元文, 等. 电气化铁路用铜包钢接触线制造技术 [J]. 有色金属, 2002, 54(3): 22-24
- [6] 汪秉庸, 张北斗, 王森林, 等. 铜包钢承力索和吊弦的研制 [J]. 电气化铁道, 2001, (1): 33-36
- [7] Wim J Ooij. Brasx clated steel wire for tires wiyh superior adhesion to rubber [J]. Wire Journal, 1987, (8): 40-45
- [8] Kawautsu kosen, Kogyo K, Kawasaki K. Steel corp brass plated steel wire with superior drawability and adhesion to rubber [P]. JP Pat: 5 884992, 1983-05-02
- [9] 何慧兰. 铜包钢线的研制与应用 [J]. Electroplating & Pullotion Control, 2002, 22(6): 32-33
- [10] 宣天鹏, 卑多慧. 铜包钢线的生产工艺及其应用 [J]. Electroplating & Finishing, 1998, 17(3): 26-28
- [11] 明冰, 陈正宏, 张绍先. 铜包钢电话用户通信线的研制 [J]. 电镀与精饰, 1998, 20(2): 13-14
- [12] 高飞, 宋宝韞, 张新宇, 等. 连续挤压包覆技术在铝包钢丝生产上的应用 [J]. 金属制品, 1999, 25(1): 20
- [13] 宋强, 戴雅康, 刘世程. 包覆焊接发铜包钢线的结构设计和生产 [J]. 光纤电缆与应用技术, 2003, 3(3): 44-46
- [14] 吴运忠, 戴雅康, 刘世程. 用包覆焊接法铜包钢线更新 CATV 用户电缆内导体 [J]. 有线电视与网络, 2001, (4): 50-51
- [15] 傅晓, 于九明. 包铜钢线热浸镀过程的简化模型 [J]. 金属学报, (下转第 90 页)

副作用。

## 4 结 语

虽然金刚石薄膜硬质合金研究的热潮时期已经过去,但是目前为止在增强膜/基附着上仍没有取得实质性的突破。已问世的商业化金刚石涂层工具均未采用过渡层,只是对某些特定牌号的硬质合金进行特殊的表面处理后得到了较为理想的结合力,但它们表现出的问题是稳定性不好,在对同一厂商、同一批产品的试验中也发现这个问题。目前大量应用的许多其它牌号的硬质合金工具由于其钴(镍)含量高的缘故,表面几乎不能制作金刚石涂层。鉴于 CVD 金刚石涂层巨大的价值和广阔的市场前景,很多国家(特别是发达国家)仍然在不断投入研究。

国内不少单位,如北京科技大学、上海交大、北京天地金刚石公司等都在进行金刚石膜涂层硬质合金工具的研发。其中北京科技大学采用渗硼预处理工艺大大提高了金刚石膜的结合力,所研制的金刚石膜涂层硬质合金车刀和铣刀在加工 Si-12% Al 合金时寿命可稳定提高 20 倍以上<sup>[22]</sup>。虽然其中还存在不少问题,但它已经展示出了可喜的前景。

含过渡层的金刚石涂层工具理论上应该有比无过渡层更为优越的性能和适用范围。解决了过渡层的问题,CVD 金刚石薄膜质量以及金刚石薄膜同硬质合金的结合力应该还有较大的提高空间。因此,对于 CVD 金刚石/过渡层/基体间匹配理论和实践技术还值得更加深入地研究。

## [参 考 文 献]

- [1] 闻时立. 固体材料界面研究的物理基础[M]. 北京: 科学出版社, 1989. 13-44
- [2] Raghuvver M S, Yoganand S N, Jagannadham K, et al. Improved CVD diamond coatings on WC-Co tool substrates [J]. Wear, 2002, 253: 1194-1206
- [3] Konyashin I Y, BGuseva M. Thin films comparable with WC-Co cemented carbide as underlayer for hand and superhand coating: the state of the art[J]. Diamond and Related Materials, 1996, 5: 575-579
- [4] Konyashin I Y, BGuseva M, Babaev V G, et al. Diamond films deposited on WC-Co substrates by use of barrier interlayers and nano-grained diamond seeds[J]. Thin Solid Films, 1997, 300: 18-24
- [5] 黄杨风, 马志斌, 汪建华, 等. Cu 和 Cu/Ti 过渡层对金刚石薄膜附着力的影响[J]. 材料保护, 2003, 36(11): 16-18
- [6] 吕反修, 唐伟忠, 宋建华, 等. 金刚石膜涂层硬质合金工具研究进展(上)[J]. 热处理, 2004, (5): 62-64
- [7] 苗晋琦, 宋建华, 薛润东, 等. 硬质合金金刚石涂层工具基体真空渗硼预处理技术研究[J]. 人工晶体学报, 2003, 32(4): 371-376
- [8] 张玉英, 来清民, 苗晋琦, 等. YG6 金刚石涂层刀片衬底真空渗硼预处理新技术研究[J]. 金刚石与磨料模具工程, 2005, 147(3): 54-58
- [9] Tang W, Wang Q, Wang S, et al. A comparison in performance of diamond coated cemented carbide cutting tools with and without a boride interlayer[J]. Surface & Coating Technology, 2002, 153: 298-303
- [10] 王四根, 唐伟忠, 吕反修, 等. 硬质合金表面渗硼处理对 CVD 金刚石涂层形成的影响[J]. 金属热处理, 1998, 10: 1-2
- [11] Hanbner R, Köpf A, Lux B. Diamond deposition on handmetal substrates after pretreatment with boron or sulfur compounds[J]. Diamond and Related Materials, 2002, 11: 555-561
- [12] 王传新, 汪建华, 满卫东, 等. W 过渡层结合界面对金刚石薄膜在 WC-6% Co 上的附着力的影响[J]. 高压物理学报, 2004, (3): 83-89
- [13] 王传新, 汪建华, 满卫东, 等. 采用 WC 过渡层增加金刚石薄膜附着力的研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2003, 143(6): 46-48
- [14] 卢文壮, 左敦稳, 王珉, 等. Cr 过渡层沉积粘附型 CVD 金刚石膜的机理研究[J]. 中国机械工程, 2004, 18(15): 1676-1680
- [15] 卢文壮, 左敦稳, 王珉, 等. 基于 Cr 过渡层沉积 CVD 金刚石涂层的试验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(4): 462-465
- [16] 吴健, 匡同春. 硬质合金表面化学镀 Ni-P-金刚石粉沉积金刚石膜的研究[J]. 工具技术, 2005, 39(9): 21-23
- [17] 杨仕娥, 姚宁. Mo 离子注入对金刚石涂层附着性能的影响[J]. 物理学报, 2002, 51(2): 347-350
- [18] 陈靖, 王小平, 李运钧, 等. 硬质合金表面 Mo 离子注入对 CVD 金刚石涂层形成的影响[J]. 材料导报, 2000, 14(5): 57-59
- [19] Cremer R, mertens R. Formation of inter-metallic cobalt phases in the near surface region of cemented carbides for improved diamond layer deposition[J]. Thin Solid Films, 1999, 355/356: 127-133
- [20] 樊凤玲, 唐伟忠, 黑立富, 等. 化学气相沉积过程中 Si 的引入对硬质合金金刚石涂层附着力的影响[J]. 金刚石与磨料模具工程, 2005, 145(1): 31-35
- [21] 孙亦宁. 中间层对薄膜附着强度的改进[J]. 真空与低温, 1999, 5(2): 70-76
- [22] 吕反修. 金刚石膜涂层硬质合金工具研究进展(下)[J]. 热处理, 2004, (6): 18-20
- [23] SaKamoto, Mutsuo, Yamazaki, et al. Apparatus for manufacture of copper or copper alloy coated steel wire[P]. JP Pat: 07232260, 1994-06-22
- [24] Takayama, Teruyokj, Tominaga, et al. Hot-dip coating of steel wire with copper and apparatus used[P]. JP Pat: 61106759, 1986-03-13
- [25] 洪伟. 有色金属连铸设备[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987. 22-30
- [26] 王庆娟, 杜忠泽, 王海波. 铜包钢线生产工艺的特点及现状[J]. 电线电缆, 2002, (4): 17

(上接第 80 页)

2000, 36(8): 828-831

- [16] 谢青青, 龙子敏. 用高速热浸镀法对钢丝进行镀铜和铜合金[J]. 湘钢译丛, 1991, (3): 49-56
- [17] 王洪仁, 冯法伦, 魏绪钧, 等. 包铜钢丝及其热浸镀生产方法[J]. 表面技术, 1998, 27(3): 29-32
- [18] Tominage, Hanco, Takayama, et al. Dip forming of steel wire [P]. JP Pat: 02258157, 1990-05-28
- [19] SaKamoto, Mutsuo, Yamazaki, et al. Method for manufacture of copper alloy coated steel wire[P]. JP Pat: 07144265, 1995-06-06