

文章编号:1673-9981(2015)04-0216-06

铜包钢双金属线的应用及其制备工艺研究进展

朱映玉, 陈剑明, 刘宏莹

江西理工大学材料科学与工程学院, 江西 赣州 341000

摘 要:介绍了铜包钢双金属线国内外的研究现状,阐述了铜包钢线在各个领域中的应用,并对目前制备铜包钢双金属线所使用的连续挤压法、熔铜浸渍法、包覆焊接法、电镀法等工艺及其优缺点作了详细阐述.最后展望了铜包钢双金属线的发展前景,并提出了水平连铸法制备铜包钢复合线的新型制备工艺.

关键词:铜包钢双金属线;应用;制备工艺;水平连铸
中图分类号:TB331 **文献标识码:**A

长期以来,在通讯、交通运输、接地线等领域中,我国都是使用纯铜作为导线,但伴随科技迅猛发展,对导线的性能有了更高的标准,双金属线的出现很好的解决了这一问题^[1-2].双金属线是集两种不同性能的金属于一体的新型材料,克服了单一金属的缺点,不仅综合利用了单一金属各自的性能,而且能降低生产成本.铜包钢双金属线是以钢丝作为芯部基体,通过机械、冶金或电化学等方法在其表面同心、均匀、连续地包覆一层铜层.铜包钢双金属线既具有铜优良的导电性和耐腐蚀性能,又兼具钢的高强度、可塑性好、可焊接等优良性能^[3].

铜包钢线最早起源于二十世纪三十年代的美 Copper weld 公司,目前世界上许多国家都在进行铜包钢线的研究及创新开发.二十世纪六十年代中期,美国 GE 公司及瑞士 Battelle 研究中心在浸入成形法(Dip Forming Process)工艺的基础上,进行了大量创新.而在国内铜包钢双金属线的研制起步晚,始于二十世纪七十年代,但是发展迅速.湘潭电缆厂是我国最早制备铜包钢双金属线的工厂,铜包钢双金属线是新型复合材料,其有良好的经济价值和市场需求,鉴于国外对铜包钢双金属线的部分制备工艺已经成熟,我国部分生产厂家纷纷从国外引

进技术,经过多年的工艺创新及改进,我国在多个制备工艺上已经有很大的突破,并申请了多项专利,这对我国的铜包钢双金属线在其各个应用领域中的发展起到不同程度的推动作用^[4].

1 铜包钢双金属线的应用

1.1 CATV 同轴电缆

CATV(Cable Television)是指利用电线、电缆或卫星、微波等设备进行信号的传输,并依靠同轴电缆对信号进行分配的公共有线电视网络^[5-6].这就要求同轴电缆线内导体机械强度要好,精度要高^[7].

同轴电缆的信号是通过频率很高的电流进行传输,高频电流传输中存在“趋肤效应”^[8],也就是在传输中高频电流主要集中在导体表面,高频电流在导体表面的趋肤深度 δ 与电流频率 f 有关,即 $\delta = 67/\sqrt{f}$.因此电流频率越高,电流越集中在表层传输.相对纯铜,中间的铜在导电方面未起到多大作用,而用铜包钢双金属线来进行电流传输时既保证了与纯铜一致的传输特性,也增强了机械强度、节省了成本.因此,CATV 同轴电缆在国内外的市场前景非常乐

收稿日期:2015-11-18

作者简介:朱映玉(1990-),男,江西吉安人,硕士研究生.

观,扩大生产将会给这行业带来更大的经济效益。

1.2 电子元器件用引线

铜线在电子工业领域中的应用很广泛,但其强度低,不能满足目前许多引线的需求。铜合金在强度上虽然能满足引线的要求,但在经过镀锡或其他处理后,极易产生缺陷,也降低了其焊接性能。铜包钢双金属线不仅拥有纯铜良好的导电性也同时具备铜的高强度,其抗拉强度和导电率可以根据不同的包覆比来控制。钢丝的快速对头焊性好,表面的纯铜又保证了其良好的焊接性和耐腐蚀性。铜包钢双金属线克服了铜及铜合金的不足,其性能很好地满足了引线的要求,广泛地作为电容器、二极管及集成电路等元器件的引线^[9]。

1.3 接触线

高速电气化铁路的发展可以改善交通运输状况,从而带动国民经济的快速发展。接触线^[10-12]作为电气化铁路弓网关系中最重要材料之一,其作用就是确保列车高速运行时能够持续不断地从牵引供电系统中得到电能,其性能对机车的受流稳定性及安全性影响至关重要。接触线正常工作时会受到温度及环境变化、波动等因素的影响,其工作环境相对其他供电类导线更恶劣。

根据国内外高速列车的运行情况可知,为使列车运行中能稳定受流,其运行速度必须小于波动传播速度的 70%。波动传播速度 $V_c = 3.6T/D$ 。其中: V_c 为接触线的波动传播速度,km/h; T 为接触线的架线张力,N; d 为接触线的线密度,kg/m。因此列车运行速度提高,必须增大接触线的架线张力(也就是接触线的抗拉强度)或者减小接触线的线密度,才能保证列车的安稳运行。铜包钢双金属线恰好满足了接触线的要求,它不仅具有铜优良的导电性能及耐腐蚀性能,从而保证了接触线的电流传输以及抗恶劣环境,同时又具有很高的抗拉强度,可提高架线张力^[13],从而保证列车运行稳定受流,并且铜包钢双金属复合线重量轻、安装及运输费用低、以钢代铜节省成本。

1.4 接地系统

随着我国对雷电灾害重视度越来越高,防雷接地材料的防腐性及安全可靠受到重视。传统使用的接地材料为镀锌钢或纯铜,镀锌钢寿命不如纯铜,但纯铜不如镀锌钢经济。我国长期使用镀锌钢丝作接地材料,实践证明钢材的接地效果不好,甚至出

现了多次接地事故^[14]。铜包钢双金属线作为防雷接地材料具有很大优势,主要有以下优点:优良的抗腐蚀性,使用寿命长,维修成本低;电气性能好^[15],具有铜优良的导电性;实用性广,可于不同温度、湿度及 pH 值的土壤环境中做接地材料;经济价值可观。

当然,铜包钢双金属线不仅仅在上述领域内广泛应用,也广泛应用于军用被复线,这类被复线不仅需要具备良好的导电性,其力学性能也不可忽视;同时铜包钢线由于具有重量轻等优点,还用于作为放电电极、气体保护焊丝和软管等材料^[16]。

2 铜包钢双金属线的制备工艺

铜包钢双金属线的制备工艺主要源于国外,随后国内的学者对其制备工艺的研究也越来越多,综合目前国内外铜包钢双金属线的研究与生产情况,铜包钢双金属线的制备主要有固-固复合、固-液复合、液-液复合三种方法。

2.1 固-液复合法

固-液复合法是将覆层金属液浇注到已预制好的基体金属上或将已表面处理好的基体金属沉没于覆层金属液中,通过两种金属间的扩散反应形成连续金属间扩散区,从而制成复合材料的工艺方法^[17]。

2.1.1 熔铜浸渍法

该方法源自 20 世纪 90 年代热浸镀法。热浸镀法的原理是芯体材料以一定的速度通过另一熔体材料,其中芯部材料的熔点高于覆层材料的熔点。瑞士的 Battelle 研究中心在热浸镀法基础上创新,研究出高速热浸镀法(HSHD),美国的通用电气公司和科普威(Copperweld)公司也在这基础上进行改进,形成一种新型的铜包钢制备工艺—熔铜浸渍法,又称 DFP(Dip Forming Process)法,该方法生产效率较高,在美国和日本使用较普遍^[18]。

熔铜浸渍法是将钢芯通过熔融的铜液,金属铜液在钢芯表面形成一定厚度的铜层,从而得到铜包钢双金属线。其原理如图 1 所示。钢芯首先要进行表面处理,去除表面的氧化层及油污,然后在保温炉中将钢芯预热到一定温度,再通入熔融的铜液中,最后进行冷却并进行后续加工得到铜包钢双金属线。该方法是比较先进的铜包钢双金属线制备方法,利用金属热渗透原理形成铜层,铜—钢界面结合好、铜层厚度范围大、可塑性高,可以生产大线径的铜包钢双

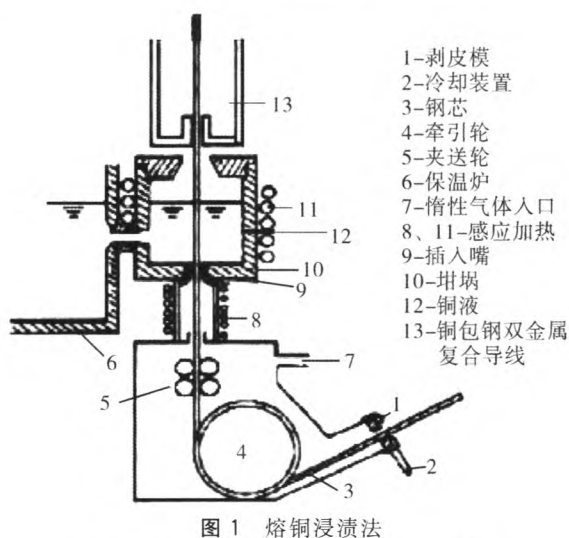


Fig. 1 Molten copper immersion method

金属线。但由于铜液流动、钢丝和铜液温度等的变化极易影响其铜层的均匀性,以至铜层厚度难以精确控制,铜与钢接触时间长,铜液对钢有侵蚀而导致铜液被污染,从而影响铜包钢线的导电率等性能。同时该方法工艺复杂,规格调换困难,其设备和技术主要集中在美国、日本和韩国手中,国内设备和工艺主要依赖进口,生产成本高。

2.1.2 电镀法

电镀法起步于上世纪90年代初,由于技术完全成熟,成为国内生产铜包钢线较为普遍的方法^[19-20]。电镀前首先要对钢丝进行表面处理,将钢芯置于酸、碱洗液中,施加电压,以除油及表面清洁。电镀法采用电沉积原理,将表面处理后的钢芯置于铜盐溶液中,电解铜为阳极,钢芯为阴极,阳离子被吸附至阴极,形成铜层。铜、钢两者电位差很大,一般通过预镀铜法来解决铜—钢界面结合的问题。该工艺过程为:钢芯放线—碱洗(去油)—清洗—酸洗(氧化物去除)—清洗—预镀—清洗—主镀(加厚镀铜)—清洗—干燥—收线成圈。

电镀法制备薄铜层的铜包钢线产品较为方便,其耗铜较少、成本低,但由于电镀铜层不均匀,影响界面结合而导致铜层开裂或脱落,从而影响产品质量及性能。该法对于制备厚铜层的铜包钢线比较困难,需循环镀,造成生产成本高,尤其电镀后废液污染环境严重。

2.2 固-固复合法

2.2.1 连续挤压法

随着社会的发展,对铜包钢线的需求与日俱增,

已有的制作的方法不能满足社会对铜包钢的需求,连续挤压法的出现为铜包钢线的制备打开了一条新思路。连续挤压法制备铜包钢双金属线的原理如图2所示^[21]。首先通过挤压轮与腔体间的过盈量将铜杆咬入,在压力机的挤压下充满挤压容室,在压力的作用下铜杆进入模腔后包覆在钢芯表面,从而形成铜包钢双金属复合线。

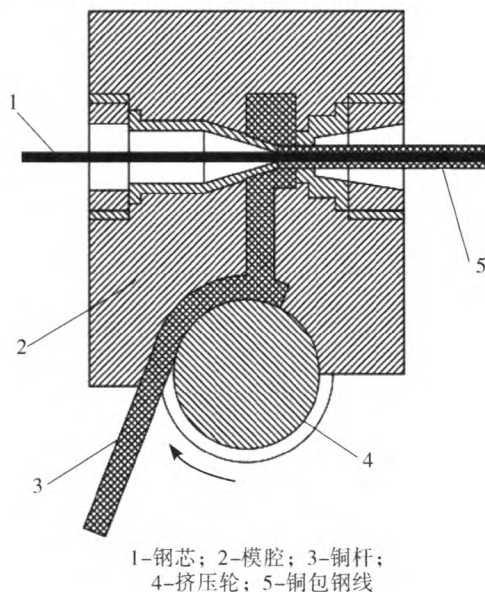


图2 连续挤压法

Fig. 2 Continuous extrusion method

该方法可以实现铜包钢线的连续制备,铜杆不需要预热,效率高,铜层包覆均匀,可大范围任意调节。但依靠模具成形,对坯料的表面质量要求高,模具使用寿命短,需经常更换模具使成本增加。因此,该方法不适合铜包钢线大批量生产。

2.2.2 包覆焊接法

包覆焊接法^[5,22]原理如图3所示。该工艺可概括为原料预处理、包覆焊接、坯线拉拔。包覆之前首先对铜带和钢丝进行矫直,再进行酸碱洗,以除去表面氧化皮及油脂,增强铜与钢之间的结合。然后在气体保护下将经表面处理后的铜带和钢线送入包覆焊接装置中,在辊轮的作用下铜带形成圆管将钢线包覆,进行焊接形成铜包钢线坯。最后将线坯进行多道次拉拔、热处理,以加强铜—钢界面的结合。

用该方法制备的铜包钢线质量较好、同轴度高,可保证覆层均匀包覆。由于该方法原材料为无氧铜,铜带加工贵,铜与钢界面结合不牢固,要保证钢与铜界面结合的好,需后续进行多道次拉拔。

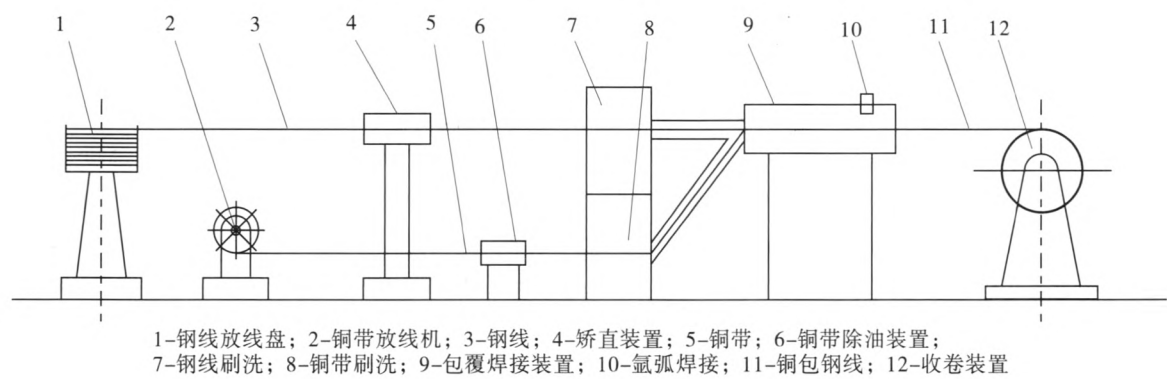


图 3 包覆焊接法
Fig.3 Clad-welding method

2.2.3 双铜带压接法

双铜带压接法是将经矫直的钢线表面处理后进行预热,同时对二条铜带进行表面处理、预热,随后将铜带和钢芯线送入成对的轧辊中,使它们受压

力而结合形成坯线,随后将坯线水冷,水冷后将坯线两侧毛边切掉,从而制备出铜包钢线坯. 双铜带压接法的制备工艺如图 4 所示^[22].

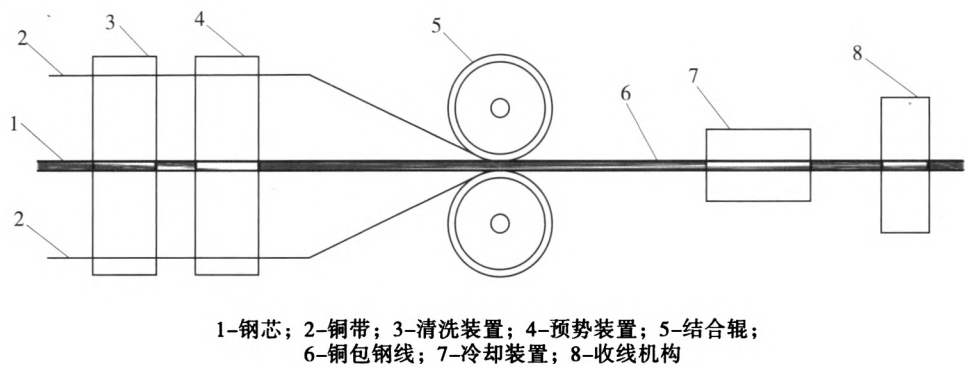


图 4 双铜带压接法
Fig.4 Double copper strip pressure welding method

该方法铜层厚度可控,实现了自动化,提高了生产效率,产品质优,制备过程环保. 但设备昂贵,采用无氧铜带为原料,使成本提高. 目前国内仅大连傅氏国际引进了该设备,相信在不久该方法将会填补国内空白,并将占据一份市场^[31].

2.3 液-液复合法

液-液相复合法制备铜包钢复合材料,目前只有谢建新等人^[24]开发的双结晶器连铸法. 该方法适用于芯部金属熔点高于外层金属的情况,解决了芯部和包覆层预处理繁琐和界面不稳定等现象. 其工艺原理如图 5 所示. 首先上坩埚中的芯部金属液流入导流管内凝固形成铸坯,在牵引力作用下芯部金属下拉至下结晶器中,同时在下坩埚中浇铸外层金属液,通过外层金属液的热传递,芯部金属铸坯表面

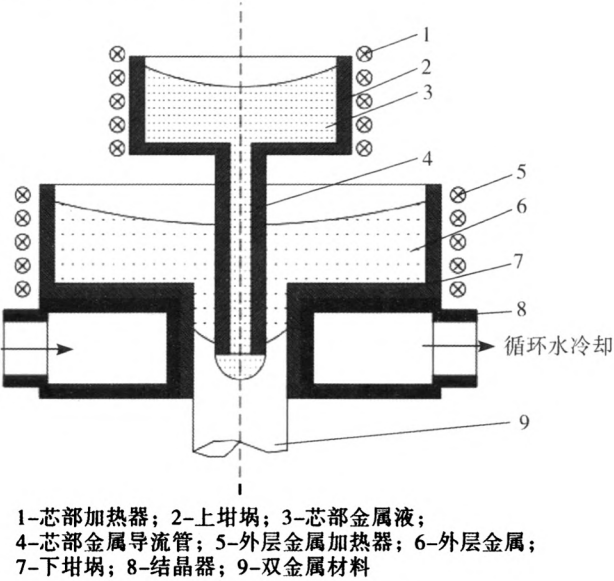


图 5 双结晶器连铸法
Fig.5 Continuous core-filling casting forming method

发生部分熔化使得界面原子发生扩散,产生一定厚度的扩散层,包覆层金属与芯部金属界面结合为冶金结合。

采用该法生产铜包钢双金属线可大大简化工艺,降低成本,内、外层金属实现冶金结合。但在生产过程中芯部钢坯的保护及温度控制很困难,因此还需进一步对该方法进行改进。

通过结合熔铜浸渍法、水平连铸法,本文提出一种新型的铜包钢制备方法—水平连铸工艺,原理如图6所示。首先是钢丝预处理过程,将成卷的钢线放线后,经过剥皮轮去除钢线表面的氧化层,在矫直装置的作于下对其进行矫直,以保证钢丝后续平稳进入加热铸造炉中,然后经酸洗以除去之前消除的氧化物和油污等,再进行水洗以及干燥处理,保证铜液中氢氧含量的平衡。其次是连铸过程,钢

丝在预热后进入装有铜液的中频感应炉内,铜液与钢丝复合在一起,形成具有一定厚度的铜层,经结晶器冷却后在牵引装置的作用下牵引出来,制备出铜包钢线。在该过程中,合适的铜液温度、冷却强度以及牵引速度的选择,会使得到的铜包钢线的组织性能及质量更好。最后是铜包钢线后续处理过程,包括拉拔以及热处理,以满足对产品的不同需求。该法工艺简化为:钢芯放卷—剥皮(除氧化物)—钢芯矫直—钢芯酸碱洗—水洗—干燥—钢芯预热—气体保护—铸造包覆—牵引—收卷。水平连铸工艺中铜与钢的接触时间短,避免了钢被长时间侵蚀造成的铜液污染;可通过改变结晶器尺寸生产不同包覆比的铜包钢线;铜层均匀,组织良好;铜—钢界面的结合达到冶金结合,流水线作业,可实现自动控制,成本低、效率高。

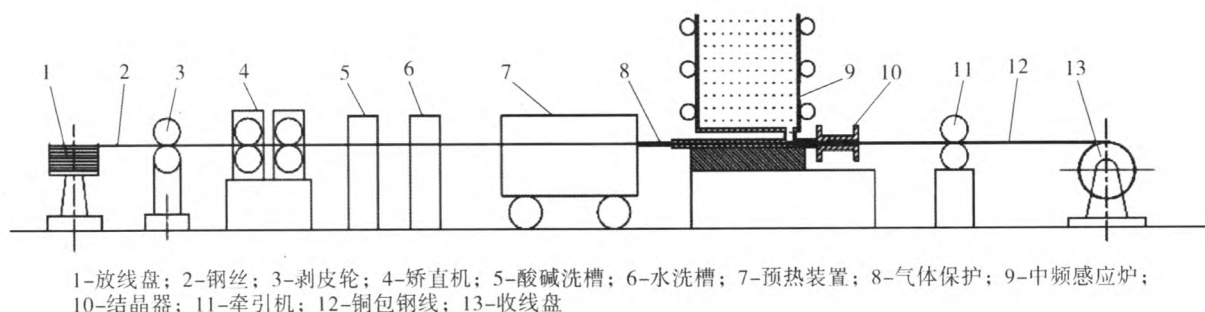


图6 水平连铸工艺

Fig.6 Horizontal continuous casting method

3 结 语

铜包钢双金属线是近些年来发展迅速的新型复合材料,其性能的优越性决定了其应用的广泛,尤其是在高铁接触线以及接地系统中的应用。随着铜原料的不断浪费及匮乏,我国也开始向国外市场进口铜原料。而铜包钢双金属线以钢代铜,使得铜的用量减少,铜原料得到合理利用,在某种程度上带来了不可忽视的经济价值。鉴于其优异性能及经济价值,相信在不久以后铜包钢双金属线会代替纯铜导线,在国内外的应用市场上占据主导地位。

目前在国内外铜包钢双金属线的这几种制备工艺勉强能满足一些领域的需求,但随着社会不断发展,科技不断进步,各行各业对材料的综合性能

也要求更高,这些制备工艺也无法达到其要求,需对其制备工艺进行改进和创新。

参考文献:

- [1] BUCCA G, COLLINA A. A procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph-catenary system[J]. Wear, 2009, 266(1): 46-59.
- [2] 吴永平, 庄秀发, 张少宗. 铜包钢复合材料发展现状[J]. 机电元件, 2015, 35(4): 55-60.
- [3] CHO H, KIM B M, JO H H. Optimization of pass schedule for copper-clad steel wire [J]. Wire Journal International, 2001, 40(7): 88-93.
- [4] 李宝绵, 李兴刚, 许光明. 铜/钢复合材料的研究及应用[J]. 材料导报, 2002, 162: 22-24.
- [5] 吴云忠. 包覆拉拔法铜包铝、铜包钢双金属导线的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2007.

- [6] 张建富. 铜包铝、铜包钢型同轴电缆的应用思考[J]. 现代运输, 2006(4):24-25.
- [7] 王洪丽. 铜包铝线和铜包钢线新品种的特性及应用[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2013(4):6-9.
- [8] 谢世坤,陈京平,万建新,等. 双金属铜包铝线的制备工艺及性能[J]. 材料导报, 2008, 22(5):83-84.
- [9] 李鸿娟,高扬,丁志敏,等. 铜包钢双金属复合导线的制备方法及应用前景[J]. 材料导报, 2013, 27(21):211-214.
- [10] 倪世展,江静华,马爱斌. 高速电气化铁路用接触导线的研究现状及发展趋势[J]. 热加工工艺, 2013, 42(24):18-21.
- [11] 王永鹏,宋克兴,国秀花,等. 高速电气化铁路接触导线的应用现状及研究进展[J]. 热加工工艺, 2009, 38(14):32-36.
- [12] 黄崇祺. 我国电力牵引用接触线的发展与展望[J]. 电线电缆, 2003(2):3-8.
- [13] 张国光. 铜包钢线和铜包铝的新用途[J]. 技术应用, 2009(3):36-37.
- [14] LI F Z, CUI Q. Research on the properties of copper-clad steel in substation grounding project [J]. Advanced Materials Research, 2012, 354-355: 1105-1110.
- [15] 张恺颢. 浅谈铜包钢接地施工工艺及技术要求[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2014(2):234.
- [16] 张强. 高性能铜合金接触线制造工艺的研究与创新[J]. 轨道交通, 2013(8):60-63.
- [17] 田雅琴,秦建平,李小红,等. 金属复合板的工艺研究现状与发展[J]. 材料开发与应用, 2006, 21(1):40-43.
- [18] CHEN X H, TANG X, WANG Z D, et al. Manufacturing process and microstructure of copper-coated aluminum wires [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2015(2):190-196.
- [19] 肖秋雷,刘素霞,甘露. 电镀法生产铜包钢线的制造工艺及常见的质量问题的探讨[J]. 电线电缆, 2008(3):14-16.
- [20] 贺飞,刘利梅,钟云,等. 铜包钢线材及其生产工艺[J]. 表面技术, 2014, 36(5):78-80.
- [21] 赵鸿金,胡玉军,彭孜. 铜/铝复合接触线连续挤压成形工艺参数[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(7):211-217.
- [22] WU Q M, WANG D Q, GAO Y. Preparation methods of copper-steel composite wire[J]. Advanced Materials Research, 2012, 569:223-228.
- [23] FEI B J, FEI M B, CHEN Z H. High electrical conduction property of composite copper clad steel wire [J]. IEEE, 1999, 41(3):196-201.
- [24] LIANG H, XUE Z Y, WU C J, et al. Research on continuous core-filling casting forming process of copper-clad aluminum bimetal composite material[J]. Acta Metallurgica Sinica-English letters, 2013, 23(3):206-214.

Research progress of copper clad steel bimetallic wire and preparation methods

ZHU Yingyu, CHEN Jianming, LIU Hongxuan

College of Materials Science and Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, 341000, China

Abstract: This paper introduces the domestic and foreign present research situation of copper clad steel bimetallic wire, expounds the various application fields of copper clad steel bimetallic wire. The present preparation processes of copper clad steel bimetallic wire such as continuous extrusion method, molten copper immersion method, clad-welding method, electroplating method and so on are introduced in detail, the advantages and disadvantages of each preparation process is also described in detail. Finally, prospects the development of copper clad steel bimetallic wire line and put forward a new type of copper clad steel composite preparation process—the horizontal continuous casting method.

Key words: copper clad steel bimetallic wire; application; preparation process; horizontal continuous casting method