

电渣复合法制备双金属复合轧辊的研究进展

曹玉龙^{1,2} 姜周华³ 董艳伍³ 李光强^{1,2} 赵峥嵘^{1,2}

(1 武汉科技大学省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室,武汉 430081;

2 武汉科技大学钢铁冶金新工艺湖北省重点实验室,武汉 430081;3 东北大学冶金学院,沈阳 110819)

摘要 复合轧辊是一种以高耐磨性及高强韧性材料分别作为工作外层及芯材的双金属复合材料。本文对国内外采用电渣冶金技术进行双金属复合以制备复合轧辊的堆焊复合法、液态金属表面复合法、自耗结晶器复合法等工艺方法进行了系统介绍,分析了自耗电极形式、导电回路方案、外层金属供给方式及设备结构等对双金属复合过程及复合轧辊综合性能的影响。同时,对不同工艺的基本特点及其控制关键技术进行了概括。对各电渣复合工艺技术发展历程及复合轧辊综合性能的稳定控制进行了分析,对电渣复合法制备双金属复合轧辊的未来发展前景进行了展望。

关键词 电渣冶金 复合轧辊 制造工艺 结合界面

Research Progress on the Preparation of Bimetallic Composite Roll by Electroslag Cladding Technology

Cao Yulong^{1,2}, Jiang Zhouhua³, Dong Yanwu³, Li Guangqiang^{1,2} and Zhao Zhengrong^{1,2}

(1 The State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081;

2 Hubei Provincial Key Laboratory for New Processes of Ironmaking and Steelmaking, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 3 School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819)

Abstract The composite roll is a kind of bimetallic composite material which consists of a high wear-resistance material as the working layer and a high strength, toughness material as the core respectively. In this paper, a systematical introduction is given for the preparation of bimetallic composite roll by electroslag metallurgy technology including ESR cladding method, electroslag surfacing by liquid metal and consumable mold cladding method at home and abroad. The influence of consumable electrode form, conductive circuit scheme, supply method of the outer metal and equipment structure on the bimetallic cladding process and the comprehensive performance of composite roll are analyzed. At the same time, the basic process characteristics and control keys technology of the different methods are summarised. Based on the analyses of the development history of electroslag cladding technology and the stability control of composite roll performance, the future prospect and development of the preparation of bimetallic composite roll by electroslag cladding method is prospected.

Material Index Electroslag Metallurgy, Composite Roll, Manufacturing Technology, Bonding Interface

轧辊是轧机轧制不可或缺的关键性部件,也是轧钢过程的主要消耗部件,其性能优劣直接关系到轧机的生产效率、轧材的表面质量和轧钢的生产成本^[1]。随着轧机生产线向着大型化、高速化和自动化发展,对轧辊性能提出了更高的要求。双金属复合轧辊因其芯部及复合外层可采用不同材质而能更好地满足轧制工况对轧辊内层高强韧性及外层高耐磨性的要求;与传统单一材质合金轧辊相比,既可解决其耐磨性与强韧性的矛盾又可节约大量贵重材料,降低了轧辊的生产成本,同时又具有更优的综合性能及更高的使用寿命^[2]。

复合轧辊是由辊芯、双金属结合层(界面)及复合外层组成。经过多年发展,其芯部材质逐渐由灰铸铁、球铁、铸钢向锻钢过渡,其强韧性得到了大幅提高,而其外层材质则逐渐由无限冷硬铸铁、高铬铸

铁、高铬铸钢向高速钢过渡。如何进一步提高其复合外层的凝固质量并实现双金属的良好结合是改善复合轧辊综合性能的关键。电渣冶金因具有去除夹杂、减轻偏析、改善凝固组织等一系列优势^[3]而受到轧辊制造业的广泛关注,当前,国内外已开发出一系列制备复合轧辊用的电渣复合工艺。

1 电渣熔铸堆焊复合法

电渣熔铸堆焊复合法(简称ESRC法)是利用高温渣池将自耗电极熔化并使形成的金属液与已被预热的辊芯表面发生作用、实现双金属复合的方法。其基本工艺过程为:将作为辊颈和辊芯的锻钢轴安装在水冷结晶器中并保持二者同轴,将其它熔炼炉所化渣液浇入结晶器和芯棒的间隙中形成渣池。将复合层用自耗电极插入渣池中并与结晶器及芯棒表面保持一定安全距离,高温渣池不仅可对辊芯进行

预热还可使自耗电极熔化并对熔滴进行清洗和精炼,所形成熔滴穿过渣池并在芯棒与结晶器间隙沉积,所形成的金属熔池与已被预热的芯棒表面发生作用并在水冷结晶器的强制冷却下而快速凝固,于双金属间形成牢固的冶金结合。随着双金属复合过程的不断进行,已完成的复合段被以一定的速度从结晶器中抽出,直至达到所需的复合层长度。

其自耗电极类型可为丝式、棒式及管式。丝式电极制造难度及成本较高,需专门的送料机构且仅能用于制造复合层较薄的复合轧辊,因而在实际生产中很少使用。随着轧辊外层向高合金材质发展,增加了棒状电极的制造难度及成本,此外,多根棒状电极的采用增加了各电极正对辊芯表面区及两电极间隙正对辊芯表面区温度分布的不均匀性,需考虑电极密排并减少其受热变形以提高复合轧辊周向结合的均匀性。管式电极则多由离心铸造或静态铸造法获得且对其材质具有广泛的适用性,有利于获得周向结合均匀的复合轧辊。

管式电极熔铸堆焊复合法^[4]是由日本于1986年开发,该工艺的技术关键是控制整个辊芯表面的熔透深度。实践发现,该工艺很难保证辊芯表面熔透深度的均匀性,为此,于1988年日本日立公司研究开发了一种旋转电渣熔铸复合法^[5],即在管式电极熔铸复合法的基础上,在自耗电极重熔的同时将芯棒和结晶器以相同的速度围绕轴线同步旋转,其结构示意图如图1所示。

实验结果表明^[5],芯棒和结晶器的旋转使得电极熔化过程芯棒附近经渣池流向金属熔池的电流均匀分布,产生均匀的温度场并最终获得了周向均匀的辊芯表面熔透深度及复合层厚度。所制备高速钢复合轧辊的双金属过渡区(结合层)宽度约为2 mm,

其结合处显微组织致密且无偏析、裂纹等缺陷,呈现出良好的冶金结合状态,其径向含结合层的拉伸试样的断裂位置发生在高速钢外层侧而非结合层处,充分说明了该工艺下的双金属具有足够的结合强度。其高速钢外层的洁净度及凝固质量与传统电渣重熔相当且其宏观组织致密,碳化物以MC型和M₆C型为主,细小的二次碳化物析出在马氏体基体上,辊面HS硬度达80~90,辊身直径可达200~600 mm,在热带钢连轧机F6上使用,表面磨耗量仅为冷硬铸铁轧辊的1/4^[6]。

然而,由于该工艺采用了结晶器和芯轴的同步旋转,导致其设备结构庞大、控制系统复杂且投资成本高昂,目前仅有日本在使用该工艺进行少量复合冷轧辊的生产。此外,自耗电极→渣池→辊芯导电方案的采用使得其渣池高温区位于自耗电极末端与辊芯表面之间,为保证外层有效成形,易造成辊芯表面熔透深度的增加及双金属结合层的变宽^[7]。

为了实现渣池高温区、辊芯表面温度及双金属结合层宽度的有效调控,东北大学姜周华团队^[8-9]开发了一种新型电渣熔铸复合法制备双金属复合轧辊工艺,如图2所示。

该工艺基于导电结晶器技术建立了区别于传统电渣熔铸堆焊复合过程的自耗电极→渣池→导电结晶器导电方案^[7],有效将渣池高温区控制在电极与导电结晶器之间,使得辊芯表面远离渣池高温区,通过对熔炼功率、渣池深度、电极与辊芯表面间距等参数的调节可实现对辊芯表面温度及结合层厚度的有效控制。导电结晶器技术的采用克服了传统电渣熔铸复合过程电极熔化与外层金属熔池形成之间的严格关系,为渣池及双金属界面的温度调控提供了更多空间。该方法中,T型结晶器(上部导电结晶器、

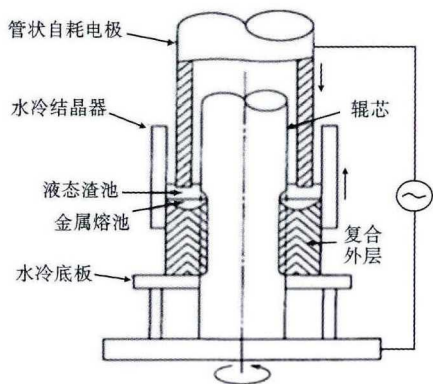


图1 旋转电渣熔铸复合法示意图

Fig.1 Scheme of rotational ESR bimetallic method

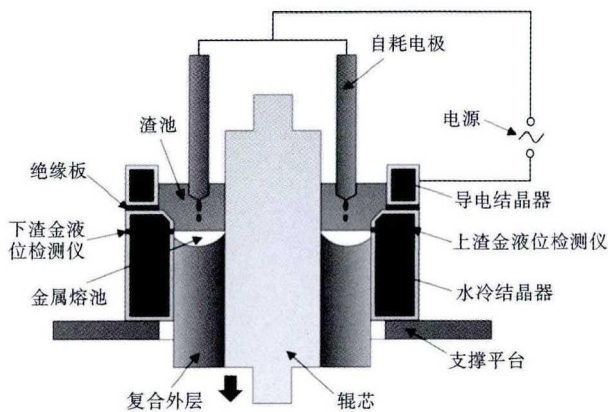


图2 新型电渣熔铸复合法示意图

Fig.2 Scheme of new ESR cladding process

下部水冷结晶器)的使用增加了复合层厚度调节的灵活性,相比于直筒型结晶器而言,其关键在于控制复合外层金属液位始终保持在近 T 型结晶器的变截面交界处,使自耗电极熔化形成的金属液在其下部凝固,以防止其在 T 型结晶器变截面上部凝固而导致抽锭受阻及复合试验中断。基于此,采用由乌克兰进口的 MLOC-2M 型渣金液位检测仪对双金属复合过程中的渣金液位进行实时检测,辅助实现抽锭速度与电极熔速的匹配。该工艺中,既可采用多根棒式组合电极又可采用管式电极。

该团队利用该工艺开展了 GCr15/45 钢、高速钢/球墨铸铁复合轧辊铸坯的制备研究并已制备出辊身直径 340 mm、复合层厚 50 mm 且具有不同复合高度的复合轧辊铸坯^[10-11]。尽管采用多根棒式组合电极进行熔炼,仍获得了图 3 所示的 GCr15/45 钢复合轧辊铸坯横剖面,可以看出,双金属的周向结合均匀性较好且在结合处无夹杂、裂纹等缺陷,这与对辊芯表面温度的有效控制密不可分。

上述复合铸坯的双金属结合层宽度(Cr 元素过渡)约为 1 mm,其径向含结合层的拉伸试样的断裂位置是在辊芯 45 钢(热轧态)侧而非双金属结合处,表明该工艺下可获得较高的双金属结合强度。在利用该工艺制备高速钢/球墨铸铁复合轧辊铸坯时,因外层高速钢的熔化温度比芯轴球铁要高,在双金属复合过程中将造成辊芯表面的过度熔化及内外层金属的相混,导致其结合区及复合外层的性能恶化。上述结果表明,电渣熔铸复合法对所制备轧辊内外层材质的熔化温度具有一定的要求。

可见,电渣熔铸堆焊复合法制备双金属复合轧辊工艺技术发展主要是围绕如何控制辊芯表面温度、实现双金属结合的均匀稳定而进行的。芯棒和

结晶器的同步旋转、新型导电方案下的渣池温度调控、T 型结晶器配套渣金液位检测仪进行金属液位控制、同轴导电减轻磁场干扰、功率递减保持渣温稳定等一系列措施的发展、完善使得电渣熔铸堆焊复合工艺更具竞争力。

2 液态金属电渣表面复合法

为了提高复合轧辊的生产效率、减少自耗电电极的制备环节,一种采用液态金属直接浇注代替自耗电电极熔化而实现双金属复合的液态金属电渣表面复合法(简称 ESSLM 法)被开发。1996 年,由乌克兰基辅的 Elmet-Roll 公司、巴顿电焊研究所的 Meodvar 教授及其团队将导电结晶器技术应用于复合轧辊的制造,开发出了此工艺和设备^[12],如图 4 所示,并进行了高速钢复合轧辊的工业化生产。

该工艺是在连续浇注外层成形(简称 CPC)工艺的基础上与导电结晶器液态金属电渣连续浇注工艺相结合开发出的一种复合轧辊制造方法,其与 CPC 工艺的最大不同在于 CPC 法是利用相应的感应线圈对芯棒及外层钢液进行热量补给,而 ESSLM 法则是利用渣阻热进行芯棒预热及外层钢液补热,同时还可对外层钢液进行有效的渣洗、精炼,提高其复合外层的洁净度。此工艺中,外层金属液可连续浇入,也可按预先设定的程序浇入。其材质可以是铸铁、高速钢、工具钢、不锈钢、Ni 基高温合金以及其它金属,可制备各类型轧辊^[13]。

自 2003 年开始,乌克兰 NKMZ 厂通过从 Elmet-Roll 公司获得的技术转让,开始生产多种类型的复合轧辊,包括热连轧工作辊和大型支撑辊,其最大直径达 1 800 mm,其材质包括高铬铸铁、高铬铸钢和高速钢等。产品在乌克兰、俄罗斯及其他欧美和中东一些国家和地区的钢铁企业使用。在乌克兰 1 700 mm

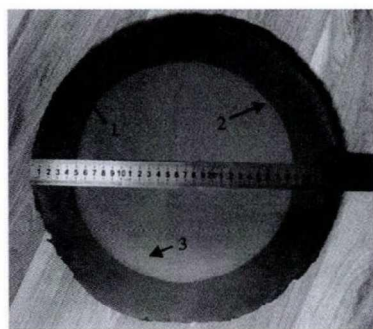


图 3 GCr15/45 钢复合轧辊铸坯横剖面:1- 复合外层;2- 双金属结合界面;3- 辊芯

Fig.3 Cross-section of GCr15/45 steel composite billet: 1- composite layer; 2- bimetallic bonding interface; 3- roll core

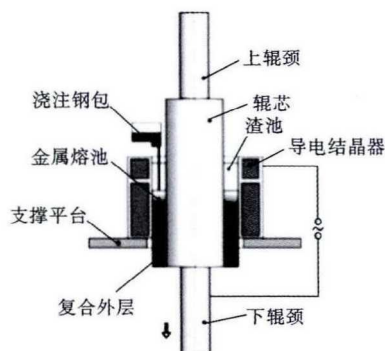


图 4 液态金属电渣表面复合法示意图

Fig.4 Scheme of cladding method of electroslag surfacing by liquid metal (ESSLM)

热连轧机2号机架上使用时,其轧制量可达到16 000 t/mm。所生产的辊身直径740 mm的高速钢复合轧辊(芯材为45钢),其寿命是合金铸铁轧辊的4~4.5倍^[14]。

与电渣熔铸复合法相比,该工艺消除了自耗电电极的制造成本且打破了电渣过程供电功率和温度参数之间的严格关系,导电结晶器和液态金属的使用使得将金属熔化和凝固过程分离开来成为了可能,改变了传统电渣工艺必须兼顾电极熔化和金属凝固的状况,有利于通过控制液态金属加入量、浇注温度及渣池输入功率等灵活调节金属熔池的温度和形状,使之保持浅平^[15-16]。浅平的金属熔池降低了金属液的局部凝固时间,可减轻元素偏析且更易于获得纵向的柱状晶组织,有利于改善复合外层的综合性能。此外,该工艺在复合层较薄的复合轧辊制备领域更具优势,可以根据客户要求制备出复合层厚由15~20 mm到100 mm,甚至更大的复合轧辊。该工艺所制备复合轧辊具有一定的双金属渗透层且无微孔、裂纹等缺陷,其复合外层的微观组织明显优于离心铸造条件所得^[17]。该工艺的另一个显著优点是效率高且能耗低,根据Elmet-Roll公司的数据,其复合速度能达到200~800 kg/h,甚至更高,其复合过程的能耗约为600~800 kW·h/t^[17]。然而,该工艺中因采用液态金属液直接浇注,其渣金接触面积远比传统电渣熔铸中电极熔化形成液滴及穿过渣池过程要小,因而在同等条件下其对复合外层的精炼提纯效果要稍差。此外,该工艺同样需要对外层待浇钢液进行实时加热保温及精确的小流量浇注控制,具有一定的设备复杂性及控制难度。

上述ESSLM工艺是利用导电结晶器作为非自耗电电极以加热渣池并对辊芯及外层金属液进行供热,与此不同的是,南昌大学耿茂鹏团队^[18-19]开发了一种以石墨棒为非自耗电电极的双电渣轧辊复合技术,如图5所示。该试验装置共分为4个部分,即I-复合金属电渣熔化装置;II-辊芯表层电渣加热装置;III-复合金属联通器;IV-轧辊抽出装置。双电渣轧辊复合即是指复合金属电渣熔化装置和辊芯表层电渣加热装置共同完成双金属轧辊复合工艺。联通器起到了连接加热装置和熔化装置的作用,对其进行有效的预热或保温以防止金属液在浇道中冷却对整个复合过程顺利完成十分重要。

该工艺中,3支石墨电极互呈120°夹角均匀分布在辊芯表面附近,通过石墨电极-渣池-辊芯导电

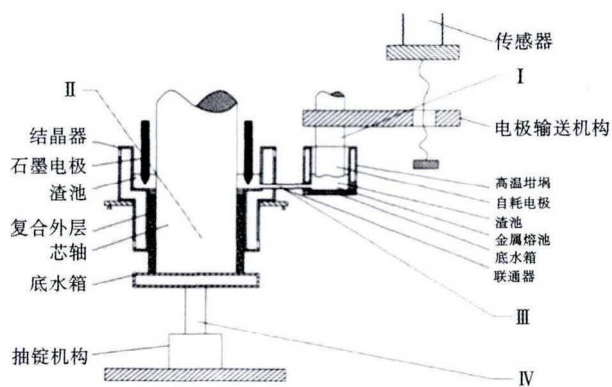


图5 双电渣轧辊复合技术装置示意图

Fig.5 Scheme of dual electroslag roll cladding method

方案实现对渣池的加热及对辊芯的预热。其热电耦合分析指出^[2],渣池高温区位于石墨电极与芯棒表面间的渣池区,这将造成石墨电极正对的辊芯表面区升温明显,而其它区域则升温较少,进而在辊芯表面周向上呈现出波纹状的温度分布,不利于形成周向结合均匀的复合轧辊铸坯。上述结果再次印证了电极密排分布(或管式电极)对提高辊芯表面温度分布均匀性的必要性。高温渣池向辊芯的热传导取决于二者温度梯度及接触时间,随着抽锭速度的增加,辊芯表面及其内部温度呈下降趋势变化,反之,其辊芯温度呈上升趋势变化,进而影响双金属过渡区的宽度及复合轧辊铸坯的综合性能。因此,控制抽锭速度位于合理区间对获得有利的双金属结合很有必要。该团队利用此工艺已制备出辊芯直径95 mm,复合外层厚约20 mm的GCr15/40Cr复合轧辊铸坯并获得了均匀的周向结合^[2]。值得注意的是,石墨电极的采用增加了向渣池及外层金属熔池渗碳的可能。此外,该工艺因复合金属电渣熔化过程和双金属电渣复合过程同时进行,增加了各参数控制及两过程有效匹配的难度。

20世纪80年代,北京钢铁研究总院杨国明教授结合电渣熔铸和连续浇注外层成形法制备复合轧辊的工艺特点,发明了如图6所示的实验装置^[20]。该方法是将辊芯垂直放在水冷铸型中,辊芯上方设有附加磁场,通过电磁感应预热辊芯,以减小辊芯被液态渣池急剧加热而产生的应力集中。以需要复合的轧辊外层材料为自耗电电极,该装置外结晶器的内径和连体双U型坩埚金属液出口的直径等于需复合轧辊的外径。当自耗电电极熔化的金属达到连体双U型坩埚内U型墙的高度时,金属液浸过内U型墙流入外结晶器中实施转铸并逐渐凝固。同时抽拉辊

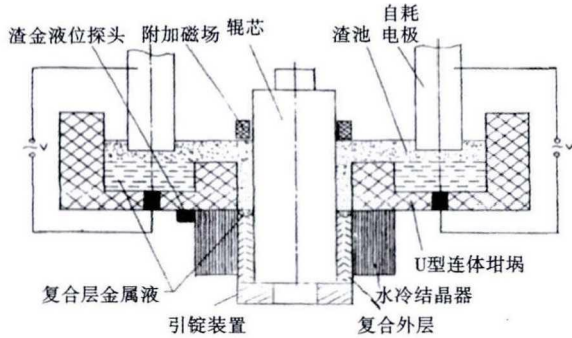


图 6 电渣熔铸复合轧辊装置示意图
Fig. 6 Scheme of manufacturing composite roll by ESR

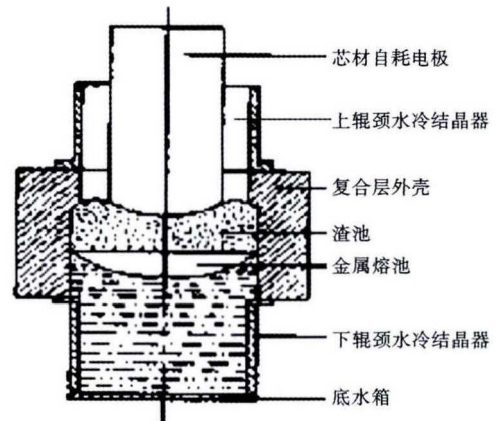


图 7 利用自耗结晶器熔铸复合轧辊
Fig. 7 Casting composite roll by consumable mold

芯下头部和包覆环,使之随着外套层的不断凝固,辊芯不断向下移动,直至辊芯上头部与外结晶器的上口相平,即完成复合轧辊的制造过程。该方法的关键在于控制电磁预热设备发热量、电极熔速、抽锭速度及水冷铸型的高度等。

该工艺中复合外层的熔炼与凝固结晶是分开的,而且其金属液是处于水冷结晶器的上方,与辊芯接触的高度较长,可更好地预热辊芯,以便获得良好的复合界面;同时,复合外层的厚度调整也更加灵活。其自耗电极的熔化速率可以控制在较宽的范围,这样可以根据辊芯材料和复合外层材料两者熔化温度的差异来选择最佳的熔铸温度,可获得较窄的过渡层和良好的复合性能。

该工艺在对复合轧辊进行制备之前先用一套电磁预热设备对辊芯进行预热试图达到一定均匀的温度场分布。但其预热装置和加热装置形成的两个温度场相隔太近,容易互相影响,因此对实验的控制要求较高。此工艺中,虽然可有效将外层金属熔炼和结晶过程分开,但有限的电极根数易造成 U 型坩埚中外层金属液温度的不均匀性,不利于制备出周向结合均匀的复合轧辊铸坯。同时,电渣过程用含氟渣对高温坩埚的侵蚀,试验结束后高温金属液在坩埚底部的凝固、沉积及与辊芯表面接触的熔渣的持续补热等均需考虑并采取相应措施。

3 自耗结晶器复合法

采用离心铸造或静态铸造的方法将复合轧辊外层金属铸造造成空心圆柱,其外径和壁厚按复合轧辊尺寸预先确定。将上述空心圆柱放置在形成上、下辊颈的圆柱形铜质水冷结晶器之间,并将三者轴线重合。下辊颈结晶器放在水冷底水箱上以封闭下型底部。按照芯材的成分和重量预先铸成相应的自耗电极并在上述组合型腔内进行起弧造渣(或液渣起

弧),随着自耗电极的不断熔化,芯材金属熔池逐渐形成并自下而上逐渐凝固,直到将下辊颈结晶器、复合层外壳及上辊颈结晶器完全充满。在复合层外壳内部,电极熔化而形成的熔融金属与外壳的内壁形成紧密结合^[21],其装置示意图如图 7 所示。

该工艺的关键是要控制好芯材自耗电极的熔化速度和熔铸后的冷却工艺。其优点是复合工艺简单、易于控制且生产效率高,适合于制造小规格的复合轧辊;其缺点是由于内外层材料的膨胀系数差,易在双金属结合层处产生裂纹,若熔铸工艺不当,还会在结合层处产生夹杂或夹渣,影响双金属结合质量,且无法保证芯棒与复合外壳的同轴度。

为了有效克服复合层外壳熔透深度不均匀的问题,Kodama 等人^[22]开发了一种可进行外壳旋转的工艺,如图 8 所示。Kondo 等人^[23]对上述外壳旋转的自耗结晶器复合工艺开展了外壳旋转速度及有无电磁搅拌对外壳熔透深度的影响研究。其结果表明,在相同的熔炼条件下,采用外壳旋转或电磁搅拌均能使外壳熔透深度减小及自耗电极熔速增加,基于其对电极熔速的影响,在适宜的外壳旋转速度下可获得周向和轴向较为均匀的熔透深度。

上述装置中,碳刷安装在水冷底板的侧面且不与底板同步旋转,轴具有双壁管的结构,冷却水通过进水管及轴流入水冷底板并在循环后经轴及出水管流出,轴通过法兰固定支撑,复合层外壳和水冷底板通过固定装置进行刚性固定,可进行液渣起弧或固渣起弧。

针对上述电渣熔铸复合法(ESRC 法)、液态金属电渣表面复合法(ESSLM 法)及自耗结晶器复合法(CMC 法)的工艺特点及应用现状进行了对比分析,如表 1 所示。

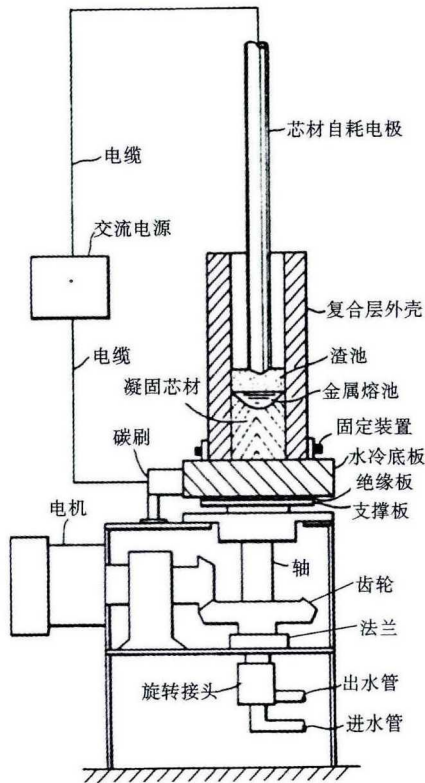


图 8 外壳旋转自耗结晶器法的复合轧辊装置示意图
Fig. 8 Schematic diagram of casting composite roll by consumable mold with shell rotation

表 1 不同电渣复合工艺制备复合轧辊的对比和特点分析
Table 1 Comparison and characteristic analyses of different electroslag cladding methods for producing composite roll

对比项目	ESRC	ESSLM	CMC
能否修复旧轧辊	能	能	否
复合基体	柱状辊芯	柱状辊芯	筒状外壳
复合方式	自耗电极熔化	液态金属浇注	自耗电极熔化
内外层结合强度	1~3	1~3	3~5
内外层结合均匀性	2~4	1~3	3~5
工艺复杂程度	3~5	1~3	2~4
生产率	2~4	1~2	3~5
生产成本	3~5	1~3	2~3
技术使用状况	1~3	2~4	4~5
未来应用前景	2~4	1~3	5

注:1-最好;5-最差。

4 其它电渣复合法

丁刚等人^[24]开发了一种感应电渣复合铸造制备复合轧辊工艺,该工艺是将电磁感应铸造技术、液态金属电渣浇注技术、ESSLM 技术、连续浇注外层成形(CPC)技术及电磁搅拌铸造技术相互结合研制而成的。其工艺过程即是采用电磁感应对辊芯进行预热,达到预定的温度后,电渣冶金设备将水冷结晶器内的固态渣料加热熔化并使液渣保持在高温状态,将需复合的外层金属液以一定的方式快速浇注

并在其穿过渣层时得以渣洗、精炼。外层金属液与已经被电磁感应加热器预热的辊芯表面熔合并因水冷结晶器的冷却而凝固,金属液浇注完毕后,感应加热器继续对所浇入的液态金属和芯棒进行加热,使两种金属间形成冶金结合层。待保温一定时间后停止加热,通过升降装置将所复合好的双金属轧辊等产品以一定的速度从结晶器内抽出或直接打开结晶器将产品取出。

与传统镶铸复合工艺相比,该工艺因采用电磁感应及渣阻热等方式对辊芯及已浇注外层进行加热及补热而克服了严格的液固体积比限制,使得复合轧辊的制备过程更加灵活。与 CPC 及 ESSLM 工艺相比,该工艺中的外层金属液是一次浇注完成的,在双金属复合后进行一定的加热和保温,并最终抽锭或直接取出,因此,该工艺具有生产成本低及效率高、设备及工艺简单、可控参数少、易于工业化生产等优点。但因外层金属液浇注时间短,渣金接触面积小,高温渣池对其渣洗、精炼效果有限;此外,浇注速度的增加势必会引起外层金属熔池深度的增加,随之而来的是降低了复合外层的凝固质量。

目前,国内外制造硬质合金或钢结硬质合金复合轧辊的生产工艺多为二步法,即先用粉末冶金工艺制造出硬质合金或钢结硬质合金辊环,然后再与铸铁(钢)熔铸成一体。其工艺流程复杂且生产周期长,因二者润湿性差而易导致成品率低。为克服此不足,一种复合电渣冶金法制造钢结硬质合金复合轧辊的工艺被开发^[25]。它是将电渣冶金与粉末冶金、金属铸造、喷射冶金及电磁搅拌铸造等工艺相结合而形成的一种性能优越、制备成本低廉的新型复合轧辊制造工艺和设备。是在电渣冶金过程中将金属芯棒固定在结晶器中心,将轧辊复合外层基体金属与增强颗粒通过特殊方式混合后连续、均匀地加入结晶器内,在电磁场的搅拌下所浇入的钢结硬质合金与已被液态电渣加热的芯棒复合,在水冷结晶器的作用下快速结晶并形成顺序凝固,制备成外层为能满足各种冷轧和热轧性能需要的含有30%~50%的 WC 硬质合金颗粒的钢结硬质合金,而芯部为高强度合金工具钢、球墨铸铁或碳钢的大尺寸复合轧辊。采用该工艺制造钢结硬质合金复合轧辊,实现了在制造钢结硬质合金轧辊工作层材料的同时,与芯棒材料直接复合成一体的一步法制造工艺,且制造成本比粉末冶金工艺降低 50% 以上。所生产的工作层实现了硬质相与基体界面的完全冶金结合,且硬质相在基体中分布均匀、组织致密性高,无

碳化物桥接相存在和碳化钨偏析现象,其产品内部组织纯净度高,具有高硬度、高耐磨性及良好的韧性相配合等优点,其耐磨性比粉末冶金工艺的产品提高 1.5 ~ 2 倍^[25]。

该工艺克服了粉末冶金法所存在的弊端,具有制造周期短、效率高、成品率高、工艺灵活性好及所生产产品范围广等特点。该工艺和设备除用于制造各种规格的冷轧和热轧电冶钢结硬质合金复合轧辊外,还可用于生产各种高速钢、高合金钢复合轧辊和各种整体材质合金铸铁轧辊,可以用于各种材料废旧轧辊的工作层的二次电渣覆层修复,因而具有一机多用之特点。该工艺的开发促进了钢结硬质合金轧辊在板带材轧制中的应用。

张国庆等人^[26-27]提出了一种离心电渣熔铸双基复合轧辊的生产方法,即利用电渣重熔法熔化自耗电极并将形成的金属液浇入离心机中,在离心力的作用下凝固形成辊身壳体,随后进行填芯处理,并最终获得离心电渣熔铸双基复合轧辊。该方法充分利用电渣重熔可对所熔炼金属中的夹杂物、有害气体及有害元素充分去除的优势,有效提高了离心铸造辊身壳体的性能。离心电渣熔铸双基复合轧辊与同材质的常规辊和其他工艺生产的复合铸铁轧辊相比较,其轧制能力一般提高 30% ~ 50%^[28]。

常立忠等人^[29-30]提出了一种采用空心轧辊生产复合轧辊的装置及方法。该方法中,采用复合轧辊外层材料的空心轧辊作为结晶器,内层材料的金属电极在其中进行重熔,实现了内外层金属的有效复合。其工艺思想与上述自耗结晶器复合法制备双金属复合轧辊一致。此外,还提出了一种基于电渣重熔双金属复合轧辊的生产方法^[31],该方法采用偏心式结晶器进行外层金属自耗电极的熔化与双金属的复合。所述的偏心式结晶器包括上结晶器和下结晶器且二者轴心不在同一条直线上,复合外层用自耗电极设置于上结晶器的上部,所述底水箱设置于下结晶器的下部,金属自耗电极和底水箱分别与电源的两极相连。

中钢邢机提出了一种锻造电渣复合高速钢轧辊及其制造方法^[32]。首先将外层钢水熔化、精炼并在离心机的离心力作用下以及气体保护条件下将钢水铸成管式电极,以低合金钢或辊身工作层已使用报废的锻钢工作辊为芯棒,采用电渣重熔复合方法制

成复合电渣钢锭。后经加热、保温、模锻成辊坯→预备热处理→粗加工→超声波探伤检测→对辊身表层进行感应淬火及回火处理→精加工→超声波检测、硬度检测及金相检验→轧辊成品。五二研究所采用电渣球墨铸铁和 30 号钢进行电渣熔铸复合轧辊,采用双臂交替抽锭式电渣炉制造了 750 mm × 1 430 mm 的辊身为球墨铸铁,辊颈和接头为 30 号钢的双金属复合轧辊^[33]。

5 展望

随着轧制技术的快速发展及对轧材质量的高标准要求,有效提高轧辊性能已成为轧辊制造业亟待研究的课题。电渣复合法充分发挥了电渣冶金的技术优势,可有效提高复合外层的洁净度及其凝固质量,对获得高品质复合轧辊大有裨益。电渣复合法的本质为一种液固复合法,即通过自耗电极熔化或直接液态浇注完成外层液态金属与固态芯材的复合过程,因此,要求外层金属的熔化温度须低于芯材的熔化温度。当前,高速钢复合轧辊因综合性能优异而受到广泛关注和应用,电渣复合法在进行高速钢复合轧辊的制备方面具有突出的优势,此时,芯材可选用强韧性更好的合金锻钢或铸钢。

在辊芯材质选定的条件下,进一步提高复合轧辊工作外层的凝固质量及双金属界面的结合性能是高品质复合轧辊制备的关键。因此,未来的电渣复合法制备双金属复合轧辊研究可考虑围绕如下 3 个方面展开:(1)加强电渣复合过程的数值模拟、在线测温及界面控制研究,系统揭示不同电渣复合工艺的基本特征并阐明工艺参数/导电方案、界面结合温度/时间、界面结合状态/微观结构、界面结合性能的内在影响机理,有效提高复合轧辊制备过程外层凝固及界面结合控制的准确性;(2)开展电渣复合过程各环节(渣料添加/熔化、液渣浇注/起弧、辊芯预热、自耗电极熔化与双金属复合、抽锭等)的智能化及自动化控制研究,减少人为因素的不利影响,提高所制备复合轧辊产品的质量稳定性;(3)深化电渣冶金与其他学科的交叉融合研究,不断研发工艺及设备简单、生产效率高、产品质量优的新型复合轧辊制备工艺技术和装备,有效提高电渣复合法制备双金属复合轧辊的工艺灵活性及经济性。

中国博士后科学基金资助(2019M652720)

参考文献

- [1] 王战芹. 轧辊业 转方式 调结构 任重道远[J]. 装备制造, 2011, 5(6): 58-60.
- [2] Rao L, Wang S J and Zhao J H, et al. Experimental and Simulation Studies on Fabricating GCr15/40Cr Bimetallic Compound Rollers Using Electroslag Surfacing with Liquid Metal Method [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2014, 21(9): 869-877.
- [3] 姜周华. 电渣重熔的物理化学及传输现象[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2000: 1-7.
- [4] 李正邦. 电渣熔铸理论与实践[M]. 北京: 高新技术应用出版社, 1996.
- [5] Shimizu M, Shitamura O and Matsuo S, et al. Development of High Performance New Composite Roll [J]. ISIJ International, 1992, 32(11): 1244-1249.
- [6] 符寒光, 刘金海, 殷作虎. 国外高速钢复合轧辊研究的进展[J]. 铸造, 1999, 48(2): 44-47.
- [7] Cao Y L, Jiang Z H and Dong Y W, et al. Research on the Bimetallic Composite Roll Produced by an Improved Electroslag Cladding Method; Mathematical Simulation of the Power Supply Circuits [J]. ISIJ International, 2018, 58(6): 1052-1060.
- [8] 姜周华, 董艳伍, 曹玉龙, 等. 一种电渣重熔法制备双金属复合轧辊的装置及方法: 中国, 201810269903. 8[P]. 2018-08-07.
- [9] 曹玉龙. 电渣重熔法制备双金属复合轧辊研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.
- [10] Cao Y L, Jiang Z H and Dong Y W, et al. Research on the Bimetallic Composite Roll Produced by a New Electroslag Cladding Method; Microstructure and Property of the Bonding Interface [J]. Ironmaking & Steelmaking, (Online: <https://doi.org/10.1080/03019233.2019.1575038>)
- [11] Cao Y L, Dong Y W and Jiang Z H, et al. Research on the Bonding Interface of High Speed Steel-Ductile Cast Iron Composite Roll Manufactured by an Improved Electroslag Cladding Method [J]. Metals, 2018, 8(6): 390.
- [12] Medovar B I, Medovar L B and Chernets A V, et al. Electroslag Surfacing by Liquid Metal - a New Way for HSS-Rolls Manufacturing [A]. 38th Mechanical Working and Steel Processing Conference proceeding [C]. Iron and Steel Society, Cleveland, Ohio, 1997: 83-87.
- [13] 董艳伍, 姜周华, 李正邦, 等. 高速钢复合轧辊的生产技术及其应用现状[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, 27(S2): 23-27.
- [14] 李正邦. 21世纪电渣冶金的新进展[J]. 特殊钢, 2004, 25(5): 1-5.
- [15] 李万明, 姜周华, 耿鑫, 等. 电渣液态浇注新工艺制备高质量低成本复合轧辊[J]. 特殊钢, 2012, 33(6): 12-15.
- [16] Jiang Z H, Cao Y L and Dong Y W, et al. Numerical Simulation of the Electroslag Casting with Liquid Metal for Producing Composite Roll [J]. Steel Research International, 2016, 87(6): 699-711.
- [17] 姜周华, Medovar L, Stovpchenko G, et al. 第二代液态电渣冶金技术的发展[J]. 钢铁研究学报, 2013, 25(3): 1-7.
- [18] 徐万里. 轧辊表面电渣加热与复合技术的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2008.
- [19] 赵准. 双电渣轧辊复合技术的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2008.
- [20] 杨国明, 宋毓珮, 付殿霞, 等. 一种复合轧辊的制造方法: 中国, 95117832. 6[P]. 1996-08-28.
- [21] Dugan J M. Method of and Apparatus for Making Compound Rolls; United States, 3972366[P]. 1976-08-03.
- [22] Kodama H, Kondo Y and Akahori K. Method and Apparatus for Manufacturing Composite Steel Ingot; United States, 4544019[P]. 1985-10-01.
- [23] 近藤保夫, 児玉英世, 赤堀公彦, 等. ESR内孔肉盛法における中空鋼塊のとけ込みに及ぼす回転及び電磁攪拌の影響[J]. 鉄と鋼, 1988, 74(10): 58-65.
- [24] 丁家伟, 丁刚, 强颖怀. 高速钢复合轧辊制造新工艺-感应电渣复合铸造工艺及设备简介[C]//第四届冶金轧辊年会论文集. 中国钢铁工业协会冶金设备配件供应服务中心, 2006, 78-85.
- [25] 丁刚, 强颖怀. 复合电渣冶金法制造钢结硬质合金复合轧辊新工艺[C]//全国轧辊技术研讨会论文集. 中国金属学会, 2005, 46-50.
- [26] 张国庆, 章晨希. 一种离心电渣熔铸双基复合轧辊的生产方法: 中国, 200910185677. 6[P]. 2011-05-25.
- [27] 张翌, 章成希, 张国庆. 一种基于离心电渣熔铸的双基复合轧辊制备工艺: 中国, 201910063486. 6[P]. 2019-04-09.
- [28] 张红云, 章成希, 王泾文. 离心电渣熔铸双基复合轧辊的研究与应用[J]. 铸造技术, 2018, 39(7): 1498-1500.
- [29] 常立忠, 施晓芳. 一种采用空心轧辊生产复合轧辊的装置: 中国, 201810297544. 7[P]. 2018-07-06.
- [30] 常立忠, 施晓芳. 一种复合轧辊的生产方法: 中国, 201810294769. 7[P]. 2018-07-06.
- [31] 常立忠, 施晓芳. 一种基于电渣重熔双金属复合轧辊的生产方法: 中国, 201810297498. 0[P]. 2018-09-07.
- [32] 杨显东, 刘娣, 朱学刚, 等. 锻造电渣复合高速钢轧辊及其制造方法: 中国, 201611244447. 9[P]. 2017-06-23.
- [33] 丁家伟, 丁刚, 强颖怀. 电渣冶金法制造轧辊技术研究进展[J]. 材料与冶金学报, 2011, 10(S1): 43-52.
- 曹玉龙(1990-), 男, 博士后在读(武汉大学), 博士(2018年东北大学毕业), 电渣冶金, 双金属复合材料研究。E-mail: caoyulong@wust.edu.cn
- 姜周华(1963-), 男, 东北大学教授, 博士生导师。E-mail: jiangzh@smm.neu.edu.cn
- 李光强(1963-), 男, 武汉大学教授, 博士生导师。E-mail: liguangqiang@wust.edu.cn

收稿日期: 2020-05-28