

双金属复合材料铸造成形工艺综述

陈玉娥¹, 仲红刚², 张 申², 高 杰³

(1. 新兴铸管股份有限公司, 北京 100020; 2. 上海大学先进凝固技术中心, 上海 200444; 3. 邯郸新兴特种管材有限公司, 河北邯郸 056046)

摘要: 双金属复合材料可以同时发挥两种材料的特性, 满足复杂的应用性能需求。按照成形状态, 双金属复合材料成形工艺可分为液-液复合、液-固复合和固-固复合三大类。本文总结了液-液复合及液-固复合成形的多种工艺路线, 并着重介绍了应用前景良好的几种技术方案、发展水平及其适用范围。虽然双金属复合材料及制备方法已经取得长足进步, 但目前复合材料市场仍然存在产业集中度不高、推广程度低的问题, 后续仍然需要围绕理论研究、装备研究和应用研究开展相关工作。

关键词: 双金属复合材料; 成形工艺; 液-液复合; 液-固复合

作者简介:

陈玉娥(1984-), 女, 硕士, 主要从事金属凝固与成形研究, 以及科技创新、绿色环保、质量管理等研究工作。E-mail: chenyeandand@163.com

通讯作者:

仲红刚, 男, 副研究员, 博士生导师。电话: 021-66136529, E-mail: hgzhong@shu.edu.cn

中图分类号: TG249.9

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)06-0646-05

基金项目:

科技部“十三五”国家重点研发计划资助项目(2017YFB0701802)。

收稿日期:

2020-08-05 收到初稿,
2020-11-27 收到修订稿。

双金属复合材料具有优异的综合性能和经济效益, 在矿山、石油化工、海洋工程、核电、电力电子、机械制造、污染防治、建筑装饰等领域具有广泛应用前景。双金属复合依据材质可划分为镁-铝复合、铝-钢复合、普钢-不锈钢复合、钢-铸铁复合等等, 材料的多样性为不同用途提供了更宽的选择。

按照复合材料成形状态, 双金属复合方法可以分为液-液相结合、液-固相结合和固-固相结合三大类。其中, 固-固相结合是指不同金属之间以能量激发、热扩散、机械应力加载等情况在固态条件下形成的复合, 爆炸复合法、轧制法和挤压法是其中最常见的方式^[1-3], 这与另外两种复合机理和工艺差异较大, 本文重点阐述液-液复合和液-固复合系列技术。

1 液-液复合工艺

液-液相复合方法采用两种金属液制备复合材料。由于液体的混溶倾向, 给液-液复合工艺成形带来了较大难度。液-液复合相关技术有很多种形式^[4-5], 目前有应用报道的是双流半连续铸造工艺^[6-7]及消失模铸造双模双金属^[8]技术等。

双流半连续铸造工艺^[9]被用于生产梯度材料或允许有较厚过渡层的材料, 在有色和黑色金属复合中均有应用, 此项工艺生产对工艺水平、设备制造、操作技能和自动化控制(如浇注速度和温度)要求很高, 尤其是黑色金属, 以上条件的控制水平决定了金属结合效果和混合程度。双流浇注复合棒材的基本原理如图1a所示, 在连续铸造的基础上增加内中间包及其导流系统, 内、外中间包中分别为两种不同成分的熔体, 流经外中间包的金属熔体在通过坩埚后直接进入结晶器。冷却后, 首先固化成一定厚度的薄壳。当来自内中间包的熔体离开内管口时, 被外中间包产生的凝固薄壳以及富含籽晶及熔断枝晶的外部金属液所包围。内外中间包浇注的金属同时凝固, 得到所设计的产品^[6, 10]。图1b是复合板材的浇注方法, 其不同之处是两股金属液被隔板隔离开来, 在结晶器部形成有过渡层的双金属复合板材。双流半连续铸造工艺对于复合材料生产成本相对较低, 适于生产长型材或板材, 在铝合金和镁铝合金梯度复合铸锭、复合板坯等方面均有研究和应用^[11-15], 但在钢的生产中尚未发现应用报道。

消失模铸造双模双金属技术主要通过泡沫模具的溶解速度或隔层材料的溶解速度控制浇注混层，一般两种金属通过不同的浇口杯和不同的浇道进入铸型，以保障产品的洁净度。K. Guler^[16]等利用该复合方法制备了铝镁复合材料；肖小峰等开发了碳钢-高铬铸铁的矿用球磨机的耐湿磨衬板^[8]。消失模铸造双模双金属技术较双流铸造半连续铸造的可操作性更高，但综合成本较高，适用于铸件生产，不适于生产长型材。

2 液-固复合

液-固相结合为液固复合铸造的方式，即将液态金属或合金铸造到其他固态金属或合金（基材）上^[17-19]。用于制备双金属复合材料的液-固结合方式是通过液态金属材料浇注时带来的巨大热量从而获得界面结合，浇注时液态金属对基材界面有再加热作用，可以通过调整浇注液体与复合基质的液固体积比来控制结合程度。基材预热温度和浇注材料与基材的液固体积比是重要的控制参数，该复合成形方式对工艺参数有较高要求，但控制难度低于液-液复合，比之固-固复合（焊接，轧制等）则大大缩减了工艺流程，且极大地减少了能量消耗。当前，通过液-固复合铸造工艺生产复合金属材料已得到广泛应用，越来越多新的液-固复合铸造工艺被开发使用。其中，镶铸法、包覆铸造法、离心铸造法、电渣熔铸和连续浇注复合铸造等都是常见的液-固复合方法。

2.1 镶铸法和包覆铸造法

镶铸法是在型腔某部位预先放入镶嵌块，之后向型腔内浇注母液形成复合金属铸件。由于浇注母液强烈的热效应，镶嵌块和母液之间相接触的界面在短时间内处于熔融状态，并且发生元素间的相互扩散，最后镶嵌块和浇注母液被牢固地焊接在一起。采用镶铸法制备复合金属材料，其复合界面处的表面质量相对容易控制，工艺简单，在普通铸造条件下就可以进行生产^[20-24]。包覆铸造与镶铸相比，液体和预制块的接触面积更大，芯材体积占比明显提高，但需通过后续轧制或锻造及热处理增强结合效果^[25]。这两种工艺在铸造中有较成熟的应用，如生产复合轧辊^[26]、抗磨易损件^[27]、复合锤头^[28-29]等。

2.2 离心铸造法

离心铸造复合法是采用离心铸造方式将两种或者两种以上的金属复合成管、套或辊等，通常有卧式和立式两种铸造方式（图2）。离心铸造复合法与整体铸造法相比，具有高金属液收得率，高表面质量的特点，需要严格控制转速、浇注温度和预热温度。该方法通常用于生产缸套、铸管、辊环、铜套和套辊等环状产品^[30-31]，在黑色金属中的典型应用是离心复合轧辊^[32-34]，在有色金属中目前比较热门的是自生梯度复合材料的离心铸造^[35-36]。

张国赏等人^[37]使用复合离心铸造工艺制备了碳钢

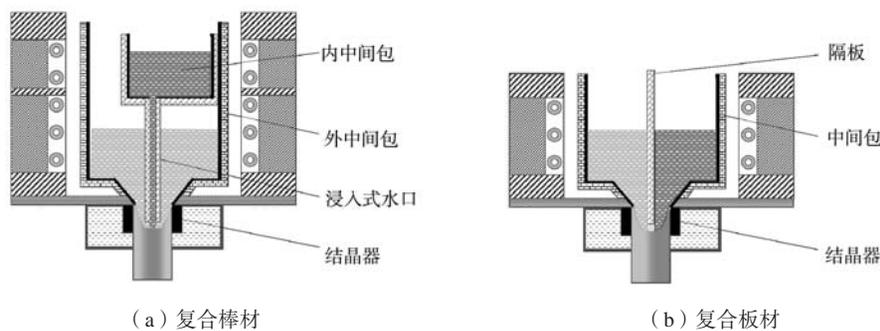


图1 双流半连续铸造示意图

Fig. 1 Double melt semi-continuous casting process

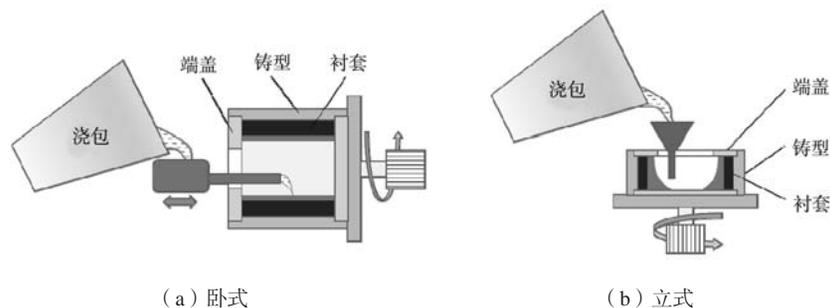


图2 离心铸造双金属复合材料示意图

Fig. 2 Centrifugal casting process for bimetal composite

与高铬铸铁双金属复合钻井泵缸套，确定了复合离心铸造的温度、转速、浇注量及间隔时间等工艺参数，得到过渡层均匀、牢固冶金结合的产品。新兴铸管股份有限公司王黎辉等^[38]利用离心浇注得到10#/GH600、304L/20G、16Mn/316和1Cr13/9Cr18MoV/1Cr13复合管坯，通过后续挤压加工得到性能优良的双/三金属复合钢管，应用到化工、石油、锅炉行业。符寒光^[32]详细探讨了高速钢轧辊离心复合铸造技术，认为改善高速钢轧辊复合层质量仍需要深入地研究。B.Saleh^[39-40]综述了离心复合铸造铝基和铜基原位自生功能梯度复合材料的开发和工艺参数对成形及耐磨性的影响规律。

2.3 连续浇注复合铸造法

连续浇注复合铸造法^[41-42]是使预先固定于模具中的芯棒与注入模具中的熔融金属相接触，并以一定的速度将芯棒向下拉，下拉过程用电磁感应加热金属液体和芯棒，外层金属与芯棒在结晶器中完成复合（图3）。在后续凝固中，芯棒和外层金属成为一体，最后取出复合产品。日本新日铁公司较早开始研发连续铸造法制备双金属复合轧辊，复合部件的高温性能和力学性能都较好，具有良好的金相组织，可以代替锻件。这种方法不仅可以生产新轧辊，而且可以修复旧的轧辊，因此备受关注。

邵抗振等^[43]运用连续铸造法成功地制备出了以5CrMo为芯轴，以高铬铸铁为耐磨层的复合冷轧辊，复

合界面实现了良好的冶金结合，金属液填充层组织致密，轧辊表面耐磨层的均匀性良好，使用寿命是常用普通轧辊的三倍以上。冯杰明等^[44]研究了电磁连续铸造法制备高速钢复合轧辊，采用水冷铜结晶器结合电磁搅拌技术制备出表面和内部质量均比较高的辊坯。连续（半连续）铸造法工艺流程更加适合冶金大规模生产，因此极具应用前景。但是，由于连铸需要更加稳定的工艺参数控制，因此黑色金属中应用该技术仍有很多问题需要研究，如加热温度、过热度、氧化层、界面层等问题，尤其是芯棒预热的表面氧化层对复合界面结合强度的影响。

3 结论与展望

复合金属材料可以兼具两种（或多种）金属的性能优势，在很多应用场合具有显著的优势。金属材料复合成形工艺主要可分为液-液复合、液-固复合和固-固复合三类。其中，液-固和固-固金属复合成形技术类型较多、发展较成熟，在材料行业中已有一定应用。本文重点介绍并比较液-液复合和液-固复合技术。

（1）液-液复合的优势是成本低，无需考虑界面氧化和结合强度问题，适于稳定的大规模连续化生产或者对复合界面形态及尺寸要求不高的铸件。缺点是复合界面存在明显的混溶层，对钢铁等高熔点金属来说，操作难度高、工艺控制难度大，甚至有可能出现大面积混溶的问题。在冶金领域，应用双流浇注法生产复合连铸坯是具有较高市场价值的方向，但需要解决液体混溶、温度控制、耐材磨损等技术难题。

（2）液-固复合的优点是成本较低、操作难度不太高，适于镶铸、包覆铸造及离心铸造铸件，也有望用于半连续或连续铸造等领域。缺点是需要预热并控制芯材金属温度、液固体积比受一定限制，且需要考虑界面氧化和结合程度问题。在冶金领域，液固复合制备冶金结合良好的型材、管材等复合材料，其工艺难度低于液-液复合，成本低于轧制和挤压复合，具有较大的市场潜力，但也需要克服界面氧化、工艺参数控制等问题。

综上，金属复合工艺各有优缺点，需要根据技术和市场需要进行工艺选择和技术开发。另外，目前复合材料市场仍然存在产业集中度不高、推广程度低的问题，复合材料产业化仍然缺乏理论支撑、人才支撑、装备支撑，后续仍需材料领域的专家学者在理论和技术方面进行更加深入和广泛的探索研究。

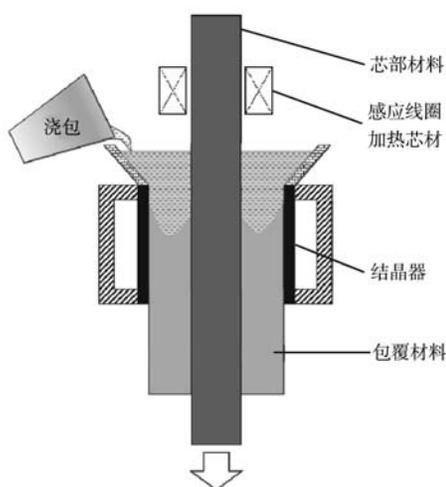


图3 连续浇注复合铸造法示意图

Fig. 3 Compound casting process with continuous casting

参考文献:

- [1] 陈瑞. 爆炸复合的研究进展 [J]. 煤矿爆破, 2015 (4): 31-34.
- [2] 杨牧南, 左孝青, 赵明伟, 等. 不锈钢复合板制备技术研究进展 [J]. 热加工工艺, 2012 (20): 93-96.
- [3] 许祖熙, 段卫东, 金沐, 等. 爆炸焊接复合管工艺及参数研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2018 (4): 67-71.
- [4] 郭睿, 何汉军, 曾大新, 等. 液-液复合制备灰铸铁-球墨铸铁双材料铸件的工艺研究 [J]. 铸造, 2017, 66 (1): 25-28.
- [5] 朱永长, 刘力, 荣守范, 等. 液/半固态双金属铸造复合耐磨薄板组织与性能研究 [J]. 铸造, 2018, 67 (10): 890-893.
- [6] 张卫文, 邹敢峰, 邓长宁, 等. 以连续铸造方法制备梯度材料的实验研究 [J]. 金属学报, 1998 (6): 609-614.
- [7] 刘鼎. 半连续铸造制备3003/4004板坯复层材料 [J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30 (5): 446-449.
- [8] 肖小峰, 周晓光, 叶升平, 等. 高铬铸铁/碳钢双液双金属耐湿磨衬板的消失模复合铸造 [J]. 铸造, 2011, 60 (7): 632-634.
- [9] TAKEUCHI E, ZEZE M, TANAKA H, et al. Novel continuous casting process for clad steel slabs with level dc magnetic field [J]. Ironmaking & Steelmaking, 1997, 24 (3): 257-263.
- [10] 郑小平, 张卫文, 邵明. 双流浇注连续铸造工艺参数对凝固液穴的影响 [C]//2011中国材料研讨会, 中国北京, 2011.
- [11] 王高松, 赵志浩, 崔建忠, 等. 不同磁场条件对双流铸造7075铝合金组织的影响 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2011, 32 (5): 679-682.
- [12] 罗爱华, SACHDEV Anil k., POWELL Bob r. 汽车轻量化先进铸造技术 [J]. 铸造, 2011, 60 (2): 113-119.
- [13] 郑小平, 张卫文, 罗宗强, 等. 铸造参数对7075/6009铝合金铸锭外层厚度的影响 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2009, 37 (8): 29-34.
- [14] 郑小平, 张卫文, 黄强, 等. 半连续铸造制备7075/6009铝合金梯度复合材料 [J]. 特种铸造及有色合金, 2008 (4): 257-260.
- [15] 许峰, 张卫文, 罗宗强, 等. 连续铸造制备Mg-Al梯度复合材料的试验研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2007 (8): 624-626.
- [16] GULER KA, KISASOZ A, KARAASLAN A. Fabrication of Al/Mg bimetal compound casting by lost foam technique and liquid-solid process [J]. Materials Testing, 2014, 56 (9): 700-702.
- [17] 于杨, 马幼平, 杨蕾, 等. 不锈钢/高铬铸铁固-液复合铸造的研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2013 (2): 65-68.
- [18] YAO S J, LIU W H. Research on liquid-solid composite casting of white cast iron /carbon steel [J]. Foundry, 2001.
- [19] JAVAHERI V, RASTEGARI H, NASERI M. Fabrication of plain carbon steel/high chromium white cast iron bimetal by a liquid-solid composite casting process [J]. International Journal of Minerals Metallurgy & Materials, 2015, 22 (9): 950-955.
- [20] 李亚敏, 路王珂, 赵彬, 等. 多元低合金耐磨钢镶嵌硬质合金工艺的研究 [J]. 铸造, 2017, 66 (2): 145-149.
- [21] 乐庸志, 钱国钢, 曾明. 提高铸铁轧辊心部强度的工艺研究 [J]. 铸造, 2011, 60 (1): 80-82.
- [22] 纪朝辉. 采煤机镶铸硬质合金截齿的试验研究 [J]. 铸造, 2004 (1): 46-48.
- [23] 冯朝跃. 双金属锤头的生产及应用 [J]. 铸造, 2000 (9): 561-562.
- [24] 范应光. 镶铸硬质合金块的高锰钢锤头 [J]. 铸造, 1997 (10): 51.
- [25] 解国良, 刘靖, 韩静涛, 等. 包覆浇铸和热轧工艺制备Q235/CrWmN刀具材料 [J]. 工程科学学报, 2010, 32 (3): 340-344.
- [26] 尧登灿, 章跃军. 钢结硬质合金——球铁镶铸工艺 [J]. 铸造, 1995 (12): 27-30.
- [27] 朴东学, 平献忠. 白口铸铁—铸钢双金属复合铸造材料及工艺的研究 [J]. 水利电力机械, 1988 (3): 33-39.
- [28] 金旭多. 一种锤头的双金属复合铸造方法 [J]. 铸造, 1997 (3): 48-49.
- [29] 张军, 吴振卿, 熊博文. 双金属复合锤头的研制及生产 [J]. 热加工工艺 (铸锻版), 2006 (3): 33-34.
- [30] 秦孝华, 韩维新, 范存淦, 等. 离心铸造法制备陶瓷颗粒增强Al合金基功能梯度复合管 [J]. 金属学报, 2001 (10).
- [31] 张泽磊, 杨刚, 杨屹. 离心铸造研究现状 [J]. 铸造技术, 2010, 31 (11): 1517-1521.
- [32] 符寒光. 高速钢轧辊制造技术研究进展 [J]. 铸造, 2009, 58 (7): 690-697.
- [33] 高玉章, 盛强, 曹瑞荣. 高速钢轧辊铸造工艺的优化 [J]. 铸造, 2015, 64 (9): 905-906.
- [34] 周利, 何奖爱, 王玉玮. 轧辊制造技术与发展趋势 [J]. 铸造, 2002 (11): 666-670.
- [35] 林雪冬, 黄笑宇, 孙建. 离心铸造原位TiAlSi/Al-Si复合材料的组织与性能研究 [J]. 铸造, 2018, 67 (4): 334-338.
- [36] 李健, 陈体军, 郝远, 等. 离心铸造法制备Al₃Ti/Al原位自生功能梯度复合材料 [J]. 热加工工艺, 2007, 36 (5): 31-34.
- [37] 张国赏, 高义民, 邢建东, 等. 钢/铁双金属复合材料的离心铸造工艺及界面控制 [J]. 西安交通大学学报, 2006 (7): 815-818.
- [38] 王黎辉, 武贤, 杨玉学. 离心浇铸复合钢管生产技术开发 [C]//2008双(多)金属复合管/板材生产技术开发与应用学术研讨会, 北京, 2008.
- [39] SALEH B, JIANG J, MA A, et al. Review on the influence of different reinforcements on the microstructure and wear behavior of functionally graded aluminum matrix composites by centrifugal casting [J]. Metals and Materials International, 2020, 26 (7): 933-960.
- [40] SALEH B, JIANG J, MA A, et al. Effect of main parameters on the mechanical and wear behaviour of functionally graded materials by centrifugal casting: a review [J]. Metals and Materials International, 2019, 25 (6): 1395-1409.

- [41] YAMAMOTO A, ISHII Y, KANG H, et al. Reproduction of hot rolling mill roll with high-speed tool steel type shell material manufactured by continuous pouring process for cladding [J]. *Materials Transactions*, 2019, 60 (5) : 770-776.
- [42] HASHIMOTO M, TANAKA T, INOUE T, et al. Development of cold rolling mill rolls of high speed steel type by using continuous pouring process for cladding [J]. *ISIJ International*, 2002, 42 (9) : 982-989.
- [43] 邵抗振. 电磁半连续复合铸造轧辊工艺研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2006.
- [44] 冯明杰, 王恩刚, 张兴武, 等. 电磁连续铸造法制备高速钢复合轧辊 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2012, 41 (8) : 1487-1490.

Review on Casting Technologies of Bimetallic Composites

CHEN Yu-e¹, ZHONG Hong-gang², ZHANG Shen², GAO Jie³

(1.Xinxing Ductile Iron Pipes Co.,Ltd., Beijing 100020, China; 2.Center for Advanced Solidification Technology, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 3. Handan Xinxing Special Steel Pipes Co.,Ltd., Handan056046, Hebei, China)

Abstract:

The bimetal composite materials possess unique combinations of properties from two different metals, so they can meet the complex performance requirements in the application of materials. According to the forming state, the forming process of bimetal composite materials can be divided into three categories: liquid-liquid composite, liquid-solid composite and solid-solid composite. In this paper, various technological routes of liquid-liquid composite and liquid-solid composite are summarized, in which several forming process methods with good application prospects are introduced in detail, including the development level and application scope. Although great progress has been made in the bimetallic composite materials and preparation methods, such problems as low industrial concentration and low degree of promotion still exist in the composite material market, and the follow-up work still needs to be carried out focusing on theoretical research, equipment research and application research.

Key words:

bimetallic composites; casting technology; liquid-liquid composite; liquid-solid composite
