DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.01.016

双金属复合环形构件制造技术研究进展

裴蒙蒙[1],齐会萍[1],秦芳诚[2],李永堂[1]
(1. 太原科技大学 金属材料成形理论与技术山西省重点实验室,山西 太原 030024;2. 桂林理工大学 材料科学与工程学院,广西 桂林 541004)

摘　要:环形构件作为关键连接、传动和回转支承基础件,品种多、用量大、用途广。在深空探测、石化和风电等极端严酷环境应用场合,对环件内层和外层性能均提出了不同要求,使得单一金属环件在性能上越来越难以满足实际使用性能的要求。双金属复合环形环件可以同时兼具两种单一金属材料的优点,最大限度地实现其性能的优势互补,从而提高环件的使役性能和可靠性。综述了现有双金属复合环形构件制造技术研究现状,根据复合环件界面结合机制的不同,着重阐述了滚压、胀接、拉拔复合等机械结合法和离心铸造复合等冶金结合法的结合规律与特点,指出了现有制造技术的局限性和存在的问题,在离心铸造复合法的基础上提出了基于离心铸坯的双金属复合环件短流程制造技术,总结了新技术的特点、研究内容和发展趋势。

关键词:双金属环件离心铸造;铸辗复合成形;机械结合;结合界面
中图分类号:TB331　　文献标识码:A　　文章编号:1000-8365(2021)01-0053-08

Research Progress on Manufacturing Technology of Bimetal Composite Ring

PEI Mengmeng[1], QI Huiping[1], QIN Fangcheng[2], LI Yongtang[1]
(1. Shanxi Key Laboratory of Metal Material Forming Theory and Technology, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: As the key connecting, driving and slewing supporting base parts, the rings had many varieties, large dosage and wide application. In extreme harsh environments such as deep space exploration, petrochemical and wind power, different requirements were put forward for the inner and outer performance of the ring, and it was increasingly difficult for the single metal ring to meet the actual performance requirements. Bimetallic composite ring can combine the advantages of two kinds of single metal materials at the same time, maximize the complementary advantages of their properties, and improve the service performance and reliability of the ring. The present situation of manufacturing technology of bimetallic composite ring members was reviewed, and according to the different interface bonding mechanisms of composite ring members, the bonding laws and characteristics of mechanical bonding methods such as rolling, expanding, drawing and drawing, and metallurgical bonding methods such as centrifugal casting, etc., were emphatically expounded. The limitations and existing problems of the existing manufacturing technology were pointed out. Based on the centrifugal casting complex method, the short process manufacturing technology of bimetal composite ring based on centrifugal casting billet was proposed. The characteristics, research content and development trend of the new technology were summarized.

Key words: bimetallic rings centrifugal casting; cast-rolling compound forming; mechanical bonding; bonding interface

金属环形零件是装备制造业和工业领域的典型传动,回转,连接基础零件。随着科学技术的突飞猛进及广泛应用,单金属环件在性能上越来越难以满足实际使用的性能要求,在特殊工况下不仅需考虑环件的力学性能,还需采用相应的合金材料来提高其服役性能和使用寿命。在极端或是服役要求极高的环境下,使用贵重的单金属环件,能满足工况下的使用性能要求,但是材料极其浪费,成本极高;若使用普通金属又不能达到工作环境的使用要求,故将不同性能的两金属材料复合在一起组成双金属复合环件,显著提高环件的综合力学性能日益得到重视并将成为重点。

双金属复合环件是将物理化学性能特征不同的两种金属材料通过一定的成型工艺,从而使得这两

收稿日期:2020-09-21
基金项目:国家自然科学基金项目(51875383,51575371)
作者简介:裴蒙蒙(1994-),山西运城人,硕士生.研究方向:材料成型及控制.电话:15513252983,
E-mail:1195257720@qq.com
通讯作者:齐会萍(1974-),女,山西忻州人,博士,教授.研究方向:环形零件铸辗复合成形新工艺.
电话:13333460462,E-mail:qhp9974@tyust.edu.cn

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

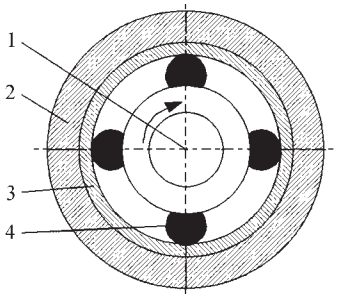
种金属结合形成新型复合环件。两种材料的选择及组合方式主要由它的服役要求和工作环境特征来决定，基本的设计原则是基层金属应具有高强度、高刚性，兼备一定的韧性和抗破裂能力，而且经济适用性，工艺性能好[1-2]。覆层金属则应满足特殊工况的需求，如提高相应的耐腐蚀能力、耐高温能力、抗磨损能力。生产双金属环件的方法很多，生产流程一般是先生产双金属复合管，再机加工沿轴向按所需尺寸切段。目前在国内外广泛应用的双金属复合环件制造技术主要有两种：机械结合技术和冶金结合技术。

1 双金属复合环件机械结合技术

双金属环件机械复合的制造工艺主要有滚压、胀接、拉拔3种[3-6]。利用材料的弹塑性，使得环件内外两层金属接触并紧密结合；通常需先制造两个单金属环坯，通过滚压、胀接、拉拔使得达到机械配合。以内层金属环件为例，它主要经过第一阶段，内层金属变形，以消除内外两层金属间的间隙；第二阶段，内外两层金属同时膨胀变形，直至复合；第三阶段，卸载外力，但两层金属仍处于接触状态[7-9]。

1.1 滚压复合法

双金属环件滚压复合成型的原理如图1所示，滚压复合工艺首先使外层金属环坯2和内层金属环坯3两层环坯套装在一起，达到小间隙配合；再通过滚体元件4的滚压使得内外两层金属紧密配合，且周向分布的滚压元件能自动进行径向位移补偿，同时滚压力保持稳定。



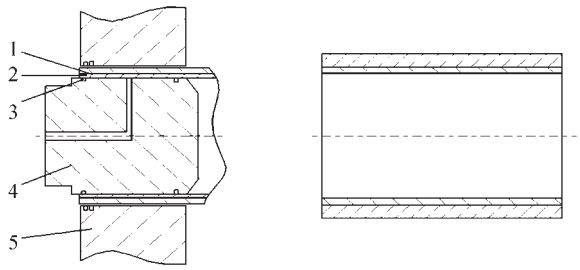
1- 芯轴；2- 外层金属环坯；3- 内层金属环坯；4- 滚珠

图 1 双金属滚压复合原理示意图
Fig.1 Schematic principle of rolling jointing of bimetal composite ring

在滚压复合方面，谷霞等[10]研究了双金属滚压复合工艺塑性成型的特点，并制备出质量符合国家行业标准要求的双金属复合管。曹志锡等[11]建立了碳素钢/不锈钢滚压复合成型的力学模型，分析了内外两层金属复合过程中的应变应力状态，通过协调条件，确定了双金属管的极限承载能力。JIANG等[12]通过有限元模拟与工艺试验结合的方法，得出Al/Cu复合管在球旋压过程中的界面相容性应满足以下要求：许用速度场的边界条件、复合管坯的几何条件、表面金属的稳定流动条件、复合管的塑性屈服条件。因此，滚压复合法是一种渐进、无屑加工的冷加工方法，可通过重复的滚压达到精确控制双金属环件的尺寸，无需精车、精镗、研磨、抛光等工序，节省至少50%的生产成本及费用；对环件表面滚压，冷作硬化提高位错密度及表面的硬度，获得的内、外表面质量较好，达到非常低的表面粗糙度（$R_Z<1$ μm/$R_a<0.1$ μm），硬度甚至可达到65 HRC；且内层金属发生较大塑性变形，覆层厚度小，工艺简单，单件生产或批量生产均适用，但需要专用的模具，成品尺寸规格比较单一。

1.2 胀接复合法

胀接复合法有机械胀接和液压胀接两种。机械胀接是利用滚胀心轴回转挤压，使内层金属发生塑性变形，外层金属发生弹性变形，从而使双金属环件的外层对内层产生残余应力，以达到复合环件内外壁的紧密贴合；液压胀接与机械胀接原理相同，只是用管内高压液体施压代替滚胀心轴回转挤压。液压胀接的原理示意图如图2所示，图3表示内外层金属平面应变模型分析[13,14]。液压胀接的工艺流程与滚压相似，首先将两个不同的金属环坯套（外层金属环坯1，内层金属环坯2）在一起，如图3（a）所示达到小间隙配合；然后液压胀头4开始对内层环坯施加压力，随着压力的增大，使得内层金属环坯发生塑性变形，如图3（b）所示内外层金属环坯接触；当胀头施加的压力达到最大值时，外层金属环坯会发生弹性变形，两层金属紧密结合，如图3（c）所示；保压一段时间后卸载，由于外层金属环坯的弹性恢复量大于内层金属环坯的弹性回复量，故结合面存在残余接触应力，使得两种金属紧密结合。



1- 外层金属环坯；2- 内层金属环坯；3- 密封件；4- 液压胀头；5- 外模

图 2 双金属液压胀接原理示意图
Fig.2 Schematic hydraulic expansion jointing of bimetal composite ring

孙正明，李杰等[15]研究了液压胀形力、内外层金

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

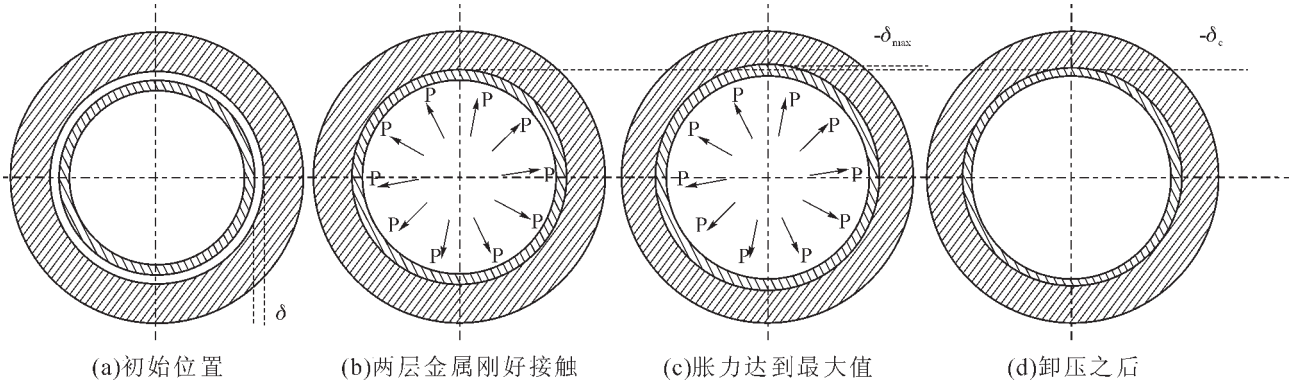


图 3　内外层金属环坯平面应变模型

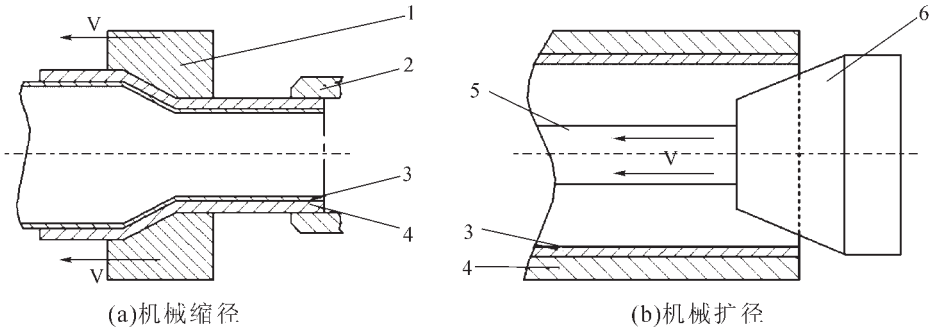
Fig.3　Plane strain model of inner and outer metal ring billet

属材料力学性能、环件截面尺寸形状对界面结合强度的影响规律，并通过ABAQUS模拟确定了材料的组合方式及尺寸对胀合性能的影响。李明亮等[16]研究了三层管液压胀接的工艺技术特点，自行设计出能够试验研究的金属复合管液压胀接成形装备及工艺。倪兴健、郭奶超等[17-19]基于弹塑性理论分析了液压胀接双金属复合内外层金属各自的应力应变关系，设计正交试验实现了工艺参数的优化，研究了热加载状态下复合管件的临界屈服温度、临界分层温度，推导出工作温度范围。其他研究者[20-24]对双金属液压胀接成形影响因素进行分析，使得液压胀接得到的复合环件更具有普适性。因此，液压胀接较机械胀接而言，胀接力大小均匀且容易进行计算，逐渐加压成型，不易出现欠胀或过胀及内衬破裂，形成的内表面质量比较高，没有擦伤、破坏等现象，且加工硬化现象不明显，工艺简单。但液压胀接两端口的密封要求极高，且成形的装置都比较复杂。同时二者形成的界面都是机械结合，结合强度不高。

1.3　拉拔复合法

拉拔过程中依据制品的截面形状分为实心材拉拔和空心材拉拔。双金属环件相当于是将空心材拉拔后按所需尺寸将其沿轴向切段，空心材拉拔主要包括管材、空心异型材拉拔。拉拔复合的主要工艺流程：复合管接触表面清洁处理→配管→某一端热缩头冷拔（或拉杆带动拉挤模拉拔）→表面抛光。机械拉拔复合主要有机械缩径和机械扩径，原理如图4所示，先将两个环坯装配好（内层金属环坯3，外层金属环坯4），通常是一个带有锥度（一般为1:25、1:50）的模具（成型模1，拉挤模6）沿轴向进给，通过模具挤压或者扩张的方式，使得两层金属均发生塑性变形，紧密贴合。

燕山大学王连东等[25, 26]通过推压-拉拔复合缩径的力学模型，定性分析了不同外径芯轴缩径时环坯的受力及变形差异，并利用ABAQUS分析基于传力区不失稳及管端不开裂给出了芯轴外径影响系数的设定范围，成功制备了试样；高亚男等[27-29]研究了模具参数对不锈钢/铜/碳钢三金属拉拔的影响规律，并通过有限元模拟与实验结果对比，分析温度、保温时间对界面微观组织、界面间的接触应力及接触状态的影响规律；马琳玲等[30]在传统拉拔复合基础上进行改进提高了成型质量，并建立了有限元模型，分析了双金属复合层间的残余接触应力。沈阳工业大学于宝义等[31]对拉拔装置进行了改进，制备出了铝铜双金属复合试样，研究了拉拔工艺、扩散退火工艺对界面组织影响规律。



1-成型模；2-固定夹具；3-内管；4-外管；5-拉杆；6-拉挤模

图 4　双金属环件拉拔复合原理示意图

Fig.4　Drawing and pulling jointing of bimetal composite tube

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

总之，拉拔复合工艺制备的样品尺寸精确，机加工余量少，节约材料。无论是选用哪种拉拔复合方式，模具表面总与双金属环件的内表面或是外表面是全接触的，故两表面间的摩擦阻力大，产生的热量使得加工硬化现象减弱。但也存在不可避免的缺点：①与上述两种复合方式相比，所需要的成型力大，能耗高；②加工截面尺寸受限，模具尺寸决定了加工环件的尺寸；③生产不同规格和品种环件，需要使用专门的模具，模具不具通用性。

1.4 旋压复合法

利用旋压工艺制造双金属复合环件主要有如图5所示的两种施力方式。图5(a)在复合过程中，组合好的双金属环坯在主轴带动下旋转，分布在外层金属环坯周向的3个呈锥形的旋轮，因与外环坯间存在摩擦，与主轴旋转方向相反并沿轴向推进，使外层金属均匀地贴内环坯上，形成静配合的螺纹连接。图5(b)在复合过程与滚压相似，滚柱刚开始旋入内层环坯时，因受到滚柱的挤压而产生弹性变形，随着轴向的进给运动，内层金属变形进入塑性阶段，并与外层金属环坯接触，进而产生接触压力，外层发生弹性变形，最终衬管和基管贴合在一起形成复合环件。

Mohebbi等[32-34]初步开展了铝/铝、铜/铝、不锈钢/铝双金属管材旋压复合的变形机理及微观界面结构和界面强度的研究，制备出界面结合良好、强度较高的双金属复合管。近年来，国内南京航空航天大学陶杰教授等[35-37]以旋压复合工艺制备的304/Ti、20/304、Al/Cu双金属为研究对象，基于数值模拟和试验结合，建立了双金属旋压的平面力学分析模型，分析了双金属管在内旋压增量成形时应力、应变、剪切结合强度的分布情况，研究主要工艺参数对双金属管剪切结合强度的影响规律，确定了工艺参数范围，揭示了双金属环件应力的变化规律及界面结合性能影响因素。南京工业大学程可等[38-41]利用ABAQUS模拟双金属旋压复合过程，分析了内、外层金属环坯径向、切向、轴向应力及结合层的接触应力，并研究了旋压工艺参数对结合性能影响。

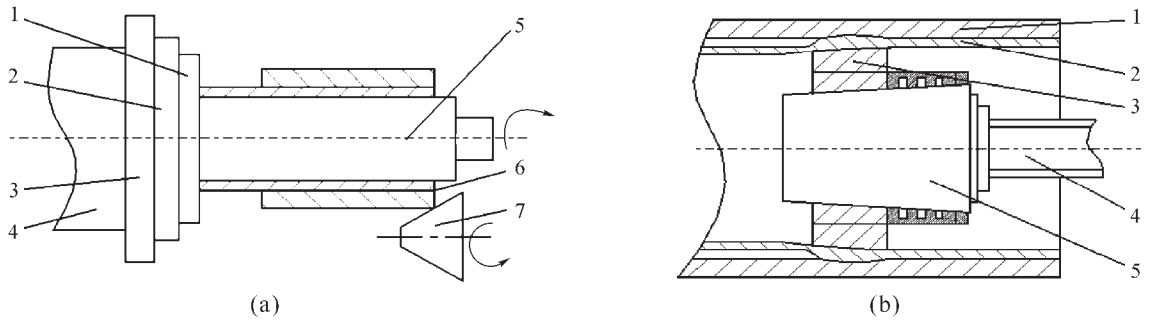
通过上述学者的研究可知，旋压复合技术是一种节能、省材、高效的先进塑性成型工艺，综合了滚压，拉拔、胀接等工艺的优点[42]。工艺简单，内外层金属之间紧密结合，结合强度较之前3种复合工艺高，各点受力均匀且都能结合[43]。但适用范围有限，因摩擦生热产生缺陷影响使用性能，低温下旋压复合界面结合强度较低。通过4种工艺方法的综述，目前机械结合的双金属环件工艺都具有各自的优越性。在耐腐蚀、耐磨极端环境下应用比较广泛，如在输送天然气、海洋石油管道、煤矿行业都受欢迎。但还存在一些不可避免的问题，使得它在一些精度及服役要求更高的工况下具有局限性：①内外两层金属界面复合层是机械结合，结合强度偏低，且易受温度的影响，温度过高，会导致结合层出现分层，进而导致失效；②工序繁多，费时耗力，质量较难保证；③模具的尺寸决定了所生产出环件的尺寸，不适宜生产大型双金属环件。

2 双金属复合环件冶金结合技术

目前双金属环件冶金复合制造工艺有热挤压复合、爆炸焊接复合、包覆焊接复合、粉末冶金复合、堆焊复合、热轧复合、离心铝热复合、离心铸造复合等工艺。研究离心铸造和离心铝热复合较多，其中离心铝热复合也是在离心场中引起铝热反应，中间会含一层氧化铝，影响焊接性能，目前应用于内层为非金属场合。本文主要分析双金属离心铸造工艺。

2.1 双金属离心铸造工艺研究

离心铸造双金属是在离心机的一个铸型上先浇注外层金属液，待冷却一段时间，再浇入内层金属液，两层金属在旋转离心力作用下，通过组分扩散或外层金属的重熔实现冶金结合、凝固成型，最终融合



1- 卸面料；2- 芯棒法兰；3- 主轴法兰；4- 主轴；5- 芯棒
6- 组合金属环坯；7- 旋轮

1- 外层环件；2- 内层环件；3- 滚柱；4- 芯轴；5- 旋压头

图 5 双金属环件的机械旋压复合原理示意图
Fig.5 Schematic principle of mechanical spin-jointing of bimetal composite ring

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

成一个铸件的过程。离心铸造因金属液的离心运动导致其充型能力有所提高；由于离心力及离心加速度的存在，利于排出金属液中的气体、杂质，从而使得成型的组织结晶更细密、产生的缺陷较少，机械物理性能都好。利用离心铸造环坯热辗扩成形双金属环件可根据实际需要方便地调节两种金属的厚度，最大限度地节约贵重金属和发挥各自的优势。

由于双金属离心铸造工艺性价比高、成本低等特别优异的性能，目前国内对双金属离心复合铸造技术的应用研究正在日益增多，对双金属复合轧辊，双金属耐磨材料及双金属复合管等机械件的成型工艺以及成型特点研究已经日趋成熟，并广泛的运用在其生产制备中[44-49]。中国科学院杨学民等[50]通过实验获得了一系列不同尺寸下双层金属浇注的时间间隔，分析界面组织及性能最终获得最优的制作工艺。符寒光等[51]提出通过计算机控制浇注过程精确控制两种金属浇注的间隔时间。鲍嘉宏等[52]研究了离心复合铸造厚壁辊筒的裂纹缺陷，分析了轴向冷裂、纵向热裂、横向热裂等3种裂纹形式，得出裂纹产生原因及影响因素，并提出具体的防止措施。吕学财等[53]基于大量试验，提出获得优质钢/铸铁双金属套筒类铸件的基本条件及内外层金属熔接的界条件。东北大学，西安交通大学，武汉理工大学，西安建筑科技大学等[54-63]研究者们采用双金属复合离心铸造技术，研制了双金属套筒类铸件，分析了离心转速、浇铸时间间隔、浇注温度等浇铸工艺参数对铸造品质的影响，并对界面复合层的厚度、成分组织性能、硬度、断裂韧性进行了研究，且得出在复合界面处添加适量的复合剂，可避免夹渣、裂纹等缺陷，提高界面的复合质量。其他学者[64,65]采用离心复合铸造生产双金属的工艺，通过实例介绍了离心工艺参数的确定方法以及内外层金属的整个铸造过程，并分析了产生裂纹、硬度低、结合不良、工作层厚度不足、夹杂等铸造缺陷的原因以及生产过程中经常出现的问题，同时提出了生产中应采取的预防措施。

通过上述研究者对双金属离心工艺的研究，可以得出双金属离心铸造将物理、化学性质不同的两种单一金属结合，通过掌握离心铸造双金属整个浇注过程的工艺流程，能够选择合理的离心工艺参数，包括铸型转速、浇注第二层金属的时间间隔、烘干工艺、浇注温度、脱模温度等，以得到高质量的双金属离心铸造环坯。

2.2　离心铸造双金属界面结合行为研究

双金属复合层的结合状态和组织直接影响双金属复合材料的性能，研究者多采用不同的微观表征方法对界面层的微观形貌和相结合方式进行研究。离心铸造工艺条件下双金属复合材料的界面过渡区的结构特征，形成过程及液固结合界面的复合机理，并对影响界面结合的因素进行了阐述。Xu等[66]采用热力模拟实验研究了离心双金属材料在不同温度和应变率下的显微组织特征、热变形行为，发现双金属界面是良好的冶金结合，结合层存在低碳钢区、界面区、完全珠光体区和先共析铁素体/珠光体区四种不同的组织区域，因其具有不同的力学性能，导致了双金属内部塑性变形的不均匀性。萧骆昭等[67,68]在杨学民等制备的双金属基础上，用金相法分析了热处理前后的显微组织变化，研究了双金属套筒界面金属学和物理特性，并通过研究热处理的物相变化趋势，给出了最佳热处理工艺。东北大学周利、何奖爱等[69,70]在离心铸造高碳高铬钢与含铬灰铸铁复合成功的基础上，对不同实验条件下的复合界面形貌进行了分析；得出热处理后过渡层靠近高碳高铬钢一侧的碳化物向含铬灰铸铁一侧扩散更充分，但复合界面宽度没有变化。那顺桑等[71]观察离心铸造双金属结合层热处理后界面晶粒、晶界、C及C化物、相的变化，得出界面结合层宽度、硬度、品质随温度的变化。西安交通大学和北京科技大学等[72，73]探索了钢/铁双金属复合材料的离心铸造工艺及界面控制，分析了热膨胀系数对界面结合的影响及主要原子的扩散情况，发现过渡层组织均匀且是牢固的冶金结合。武汉理工大学的研究者[74,75]在前述基础上分析讨论了内层耐磨层不同元素的偏析特征，得出离心力和粘度阻力共同导致了元素偏析，进而引起了金相组织变化和力学性能的梯度分布。已有报道都是针对离心铸造双金属复合机理进行理论研究，主要分析膨胀系数不同的两种金属如何进行热处理，及热处理工艺（包括热处理的温度、热处理的时间）对原子扩散、结合层厚度、界面微观组织、硬度等的影响，从而导致结合层品质发生变化；且都是经热处理后直接应用。因此，离心铸造双金属复合环件可充分发挥内外两种金属各自的最佳性能，同时节省贵重金属，降低生产成本；能有效解决现有生产工艺中存在的接触面结合强度低、环件性能质量差、材料浪费严重及生产效率低等问题。但在汽车新能源、航空航天领域等重要场合，对环件的尺寸，强度及疲劳寿命都比较大。针对这一问题本文提出一种新工艺来解决目前的大型双金属环件存在的缺陷[76]，通过对离心铸造工艺制备的双金属环坯进

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

行热辗扩，达到我们所需的尺寸要求。

3 基于离心铸坯的双金属环件短流程制造技术

目前制造大型双金属环件主要有两种方法，一种是将两个大型单金属环坯组合装配在一起，另一种是将两个单金属环坯套在一起进行轧制；这两种方式都费时费力，且质量较差。为此，我们课题组提出一种基于离心铸坯的双金属环件短流程制造技术，利用离心铸造将两种金属结合在一起，然后根据所需的尺寸将其热辗扩成型，其工艺流程为离心铸造双金属环坯–加热–热辗扩–机加工–热处理，如图6所示。

新工艺利用离心铸造双金属环坯进行热辗扩成形大型双金属环形零件，是一种先进的，短流程，节能环保的新技术。通过离心铸造将两种金属冶金结合在一起，再热辗扩成形大型环件；在热辗扩过程中，使用辗环机上的通用模具即可，不需单独的制作模具，辗扩成所需要的尺寸即可，而且内外两层金属间是冶金结合，很好地解决当前用两个单金属环件生产双金属环件的不足。对于大型环件制造而言，研究探明全厚度金属成份，组织，性能不均匀材料的双金属环坯辗扩时的协调变形机理尚属国内首次，虽然国内外研究者大多研究了热处理对双金属复合层界面微观组织变化、扩散行为的影响，进而讨论对环件性能的影响，也出了很多报告及论文，但是利用离心铸造双金属环坯进行热辗扩成形大型双金属环形零件确实少见。同时新工艺生产成本比较低，成品率高，工艺出品率也高。

但新工艺仍存在一些关键性的科学问题：①选取内外层金属时应选取各种物性参数相近的两种金属(如热膨胀系数，金属固态、液态收缩率等)，以减小内外两层金属之间的差异，控制好两者在铸造过程中的温度梯度、收缩量，及在环件轧制过程中，因热处理工艺而导致环件裂开；②熟悉掌握离心铸造双金属环件在热辗扩过程中结合面组织细匀化演变机理、扩散机理及各层金属的变形行为；③因热处理和辗环而发生扩散行为，使得离心铸造双金属环件全厚度组织，化学成份都不均匀，要能够保证在热辗扩过程中的协调变形，实现复合环件内，外层金属完全的冶金紧密结合，生产出结合强度高的高性能双金属复合环件，构建离心铸造双金属环件短流程热辗扩成形工艺方法和质量控制方案，达到高性能双金属复合环件短流程控形控性一体化制造的目的。

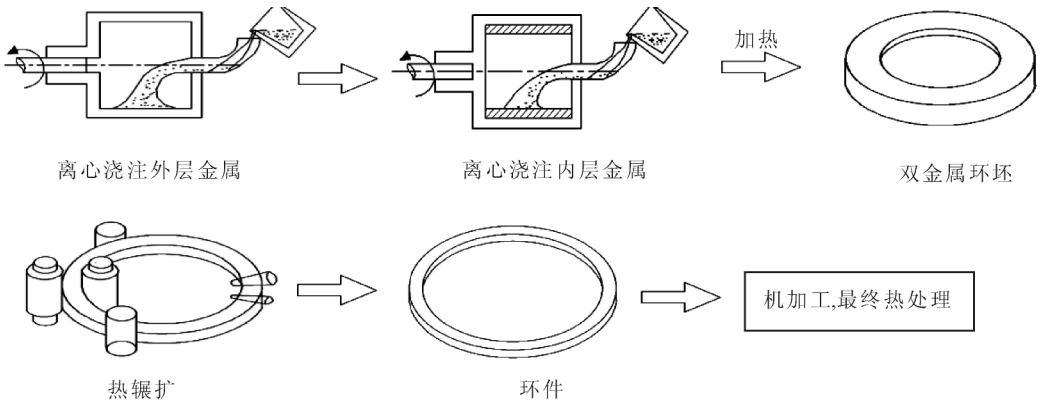


图 6 基于离心铸坯的双金属环件短流程制造技术

Fig.6 Short flow manufacturing process technology of bimetal composite ring based on centrifugal casting

4 结语

双金属复合环形环件可以同时兼具两种单一金属材料的优点，最大限度地实现其性能的优势互补，从而提高环件的使役性能和可靠性。现有滚压、胀接、拉拔和旋压等机械结合法导致双金属环件复合界面接触质量差、结合强度低，而离心铸造复合技术可以实现环件内外层界面原子尺度结合。基于离心铸坯的双金属复合环件短流程制造技术为生产大型双金属环件生产提供新的思路，与现有的大型双金属环件生产工艺比，新型的高性能双金属复合环件造新工艺流程短，质量高，成本低，能耗低，污染少。它能够为大型双金属环件(直径1 m以上)提供一种节能高效的生产方法，其基础理论的研究也为类似双金属零件成形制造的短流程研发提供理论基础，从而为国家节约大量材料和能源，提高企业生产效率和经济效益。双金属环件的应用越来越广泛，需求量越来越大。大型双金属环件工艺成为发展的必然趋势，但界面问题始终是任何双金属复合工艺的关键性问题，复合工艺不同，界面复合机理存在差异，而目前的研究大多是对复合现象的描述，在双金属复合的微观机理方面还有待深入探索。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献：

[1] 谷霞，张安义，毒建平. 双金属复合管塑性复合成形工艺及应用[J]. 精密成形工程，2011，3(3)：46-50.

[2] 郭明海，刘俊友，庞于思，等. 双金属管复合技术的研究进展[C]. //钢管学会六届二次年会论文集，2012：229-238.

[3] 顾建中. 国外复合钢管的用途及生产方法 [J]. 上海钢研，1994(4)：42-50.

[4] 晋军辉. 内覆不锈钢/碳钢双金属管内压扩散复合的研究[D]. 大连：大连交通大学硕. 2004.

[5] 聂海亮，马卫锋，赵新伟，等. 双金属复合管在油气管道的应用现状及分析[J]. 金属热处理，2019(44)：515-517.

[6] 陈海云，曹志锡. 双金属复合管塑性成形技术的应用及发展[J]. 化工设备与管道，2006. 43(5)：16-21.

[7] Flatley T，Thursfield T. Review of corrosion resistance co-extruded tube development for power boilers[C]. Conference on Coatings and Bimetallics for Energy Systems and Chemical Process Environments in South Carolina，1984，18-22.

[8] 王成威. 双金属复合材料轴承套圈冷辗扩成形技术研究 [D]. 宁波：宁波大学，2018.

[9] 李岗. 双金属复合管离心铸造凝固过程温度场数值模拟 [D]. 西安：西安建筑科技大学，2007.

[10] 谷霞，秦建平，张文慈. 双金属复合管滚压塑性成形工艺及试验研究[J]. 中国重型装备，2011(3)：41-43.

[11] 李文武，曹志锡. 双金属复合管滚压复合成形的力学计算[J]. 浙江工业大学学报，2011，39(3)：304-307.

[12] Jiang S, Zhang Y, Zhao Y, et al. Investigation of interface compatibility during ball spinning of composite tube of copper and aluminum[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2016(88)：683-690.

[13] 董国疆，陈孟杰，朱良金，等. Q235/AA5052复合凸环管颗粒介质胀形工艺研究[J]. 中国机械工程，2018，29(7)：870-878.

[14] 季策，黄华贵. 双金属复合管复合机理及制备工艺研究进展[J]. 特种铸造及有色合金，2018，38(12)：1300-1306.

[15] 王珍珠. 双金属复合管界面结合与强化数值模拟[D]. 南京：东南大学，2019.

[16] 李明亮. 多层复合管液压胀接原理与工艺研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2010.

[17] 倪兴健. 双金属复合管液压胀接成型工艺研究 [D]. 重庆：重庆大学. 2016.

[18] 唐越，倪兴健，王勇勤. 316L/X70双金属复合管液压胀接成形机理[J]. 锻压技术，2018，43(1)：90-96.

[19] 郭奶超. 双金属复合管液压胀接原理与工艺参数优化研究[D]. 西安：西安理工大学，2019.

[20] 杨鹏，刘邯涛，刘杰，等. 双金属复合管液压胀形机控制系统[J]. 重型机械，2020(2)：9-13.

[21] 吴娜，王连东，王晓迪，等. 基于均匀增容的大变径比管件液压胀形加载路径研究[J]. 锻压技术，2019，44(5)：86-92.

[22] 刘建伟，姚馨淇，李玉寒，等. 液压胀形环境下管材的力学行为[J]. 锻压技术，2019，44(2)：6-11，41.

[23] 孙昌迎. 双金属薄壁管冲击液压胀形规律的研究 [D]. 桂林：桂林电子科技大学，2019.

[24] 张阁. 双金属复合管液压成形弹塑性力学分析及有限元模拟研究[D]. 西安：西安石油大学，2019.

[25] 王连东，刘超，刘恒，等. 芯轴外径对大变形推压-拉拔复合缩径的影响[J]. 中国机械工程，2018，29(17)：2131-2136.

[26] 刘超，王连东，刘恒，等. 带壁厚偏差的无缝钢管推压-拉拔复合缩径[J]. 中国机械工程，2018，29(11)：1375-1379.

[27] 高亚男. 中间铜层厚度对不锈钢/碳钢复合管拉拔钎焊的影响[J]. 工程技术研究，2017(10)：5-6.

[28] 高亚男. 模具参数对不锈钢/铜/碳钢复合管拉拔的影响[J]. 中国金属通报，2017(10)：45-46.

[29] 高亚男. 不锈钢/碳钢拉拔钎焊复合管的实验研究 [J]. 中国金属通报，2017(11)：96-97.

[30] 马琳玲，雷君相. 内外复合三通管辊模拉拔机械复合数值模拟[J]. 有色金属材料与工程，2019，40(3)：27-30.

[31] 杨继伟. 铝铜双金属拉拔复合工艺的研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2008.

[32] Mohebbi M S, Akbarzadeh A. A Novel Spin-bonding Process for Manufacturing Multilayered Clad Tubes [J]. Journal of Materials Processing Technology，2010，210(3)：510-517.

[33] Mohebbi M S, Akbarzadeh A. Accumulative Spin-bonding (ASB) as a Novel SPD Process for Fabrication of Nanostructured Tubes [J]. Materials Science & Engineering A, 2010, 528(1)：180-188.

[34] Mohebbi M S, Akbarzadeh A. Fabrication of Copper/Aluminum Composite Tubes by Spin-bonding Process: Experiments and Modeling [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 54(9/10/11/12)：1043-1055.

[35] 袁其炜. 不锈钢基双金属管旋压复合成形工艺及性能研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2019.

[36] 余耀晖，王成，程旋，等. Al/Cu双金属管内旋压增量成形有限元数值模拟与分析[J]. 精密成形工程，2018，10(4)：41-47.

[37] 袁其炜，王建华，靳凯，等. Cu/Al双金属复合管旋压复合成形规律研究[J]. 精密成形工程，2018，10(4)：48-54.

[38] 程可，徐文斌，陆晓峰. 20/316L双金属复合管旋压成形数值模拟与分析[J]. 塑性工程学报，2015，22(1)：119-125.

[39] 徐文斌. 双金属复合管旋压成形分析与工艺参数优化[D]. 南京：南京工业大学，2013.

[40] 徐文斌，陆晓峰. 双金属复合管旋压成形力学原理及有限元分析[J]. 机械强度，2014，36(1)：86-91.

[41] 伊蒙生. 基于ABAQUS6. 9的20/316L复合管旋压成形有限元数值模拟[J]. 轻工机械，2012，30(6)：36-39.

[42] 李飞. 基于弯曲量的曲母线件多道次轨迹规划及变进给旋压方法研究[D]. 杭州：浙江大学，2016.

[43] 郝宗斌，李晓泉，申赛刚. 不锈钢/管线钢旋压复合管道焊接工艺研究[J]. 焊接技术，2016，45(8)：86-89.

[44] WANG Xuesheng, LI Peining, WANG Ruzhu. Study on Hydro-forming Hechnology of Manufacturing Bimetallic CRA-lined pipe [J]. International Journal of Machines Tools & Manufacture，2005(45)：373-378.

[45] Wang B, Lei B B, Wang L, et al. Analysis on Fracture Toughness of the L415MS/N08825 Bimetallic Composite Pipe Welded Joint [J]. Materials Science Forum，2016, 850：1010-1015.

[46] Chen Z, Ikeda K, Murakami T, et al. Fabrication of composite pipes by multi-billet extrusion technique [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 137(1)：10-16.

[47] Hao C, Ma H, Chen X, et al. Failure Analysis of Butt Weld of

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Bimetal Composite Pipes [J]. Journal of Failure Analysis & Prevention, 2015, 15(4):563-570.
[48] Lu S L, Xiao F R, Zhang S J, et al. Simulation study on the centrifugal casting wet-type cylinder liner based on ProCAST[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73(1):512-521.
[49] 刘国平,王渠东,蒋海燕. 铜/铝双金属复合材料研究新进展[J]. 材料导报, 2020, 34(4):7115-7122.
[50] 杨学民,孙月海,于宪薄,等. 双金属耐磨套筒的离心铸造研究[J]. 铸造技术, 1993(6):9-11.
[51] 符寒光,肖强. 离心铸造复合冶金轧辊金属的发展[J]. 特种铸造及有色合金, 1997(3):51-54.
[52] 鲍嘉宏. 离心复合铸造厚壁辊筒的裂纹缺陷 [J]. 铸造,2001(8):502-503.
[53] 吕学财, 王英. 离心铸造双金属复合辊筒技术 [J]. 铸造技术,2005(9):795-797.
[54] 何奖爱,王玉玮,佟铭铎,等. 碳钢—含硼高铬铸铁双金属离心复合铸造[J]. 铸造, 1999(4):34-35
[55] 郭明海,蔡玉丽,孙红波,等. 离心铸造碳钢-高铬铸铁双金属复合管工艺初探[J]. 钢管,2008(1):38-41.
[56] 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.
[57] 姚三九. 双金属滚筒离心铸造 [J]. 特种铸造及有色合金,2002(2):44-45.
[58] 徐畅. 工艺参数对双金属离心管铸造过程影响规律研究 [D]. 武汉:武汉理工大学, 2016.
[59] 张勃. 离心铸造双金属复合管数值模拟与工艺优化[D]. 武汉:武汉理工大学, 2018.
[60] 张伟,许云华,刘伟涛. 双头离心浇铸双金属复合管工艺研究[J]. 热加工工艺,2007,36(21):41-45.
[61] 张伟. 离心铸造双金属复合管凝固模拟前后处理研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2007.
[62] 李岗. 双金属复合管离心铸造凝固过程温度场数值模拟[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2007.
[63] 武宏. 双金属管离心复合设备及其自动化[D]. 西安:西安建筑科技学,2008.
[64] 隋贤栋, 陈生隘, 杜隆有. 双管式离心铸管工艺与技术研究[J]. 华南理工大学(自然科学版), 1995(23):19-25.
[65] 武宏,原思聪,许云华. 双金属复合管离心机的改进设计[J]. 热加工工艺,2008(13):26-27.
[66] Jianzhong Xu, Xingjian Gao, Zhengyi Jiang, et al. Microstructure and hot deformation behaviour of high-carbon steel/low-carbon steel bimetal prepared by centrifugal composite casting[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2016, 86:817-827.
[67] 萧骅昭, 付玉珍. 双金属离心铸造耐磨套筒的金属学和物理特性研究[J]. 铸造技术,1994(1):39-43.
[68] 杨学民,萧骅昭,孙月海,等. 双金属离心铸造碾辊的复合机理研究[J]. 特种铸造及有色合金,1994(3):13-15.
[69] 何奖爱,王玉伟,刘云秋. 65Mn/Q235离心铸造复合钢板力学性能及微观组织的研究[J]. 材料科学与工艺,2000(4):51-53.
[70] 周利,何奖爱,辛启斌,等. 高碳高铬钢/含铬灰铸铁离心复合界面的研究[J]. 东北大学学报,2004(5):424-426.
[71] 胡冰,那顺桑,陶进长,等. 离心铸造双金属结合层的研究[J]. 热处理,2008,23(6):51-54.
[72] 刘建彬,韩静涛,解国良,等. 离心浇铸挤压复合钢管界面组织与性能[J]. 北京科技大学学报,2008(11):1255-1259.
[73] 吴轩,胡建华,高歌. 离心铸造双金属管复合界面的研究[J]. 热加工工艺,2015,44(23):95-97, 100.
[74] 顾剑峰,杜学铭,张勃,等. 离心铸造双金属复合管内层组织及力学性能[J]. 特种铸造及有色合金,2018,38(3):291-294.
[75] 陈聪, 汪选国. 热处理对离心铸造高铬铸铁-不锈钢双金属管界面组织及性能的影响[J]. 热加工工艺,2019,48(4):222-224, 229.
[76] 秦芳诚,齐会萍,李永堂,等. 一种离心铸造双金属环件热辗扩毛坯尺寸的确定方法:CN109332561A[P]. 2019-02-15.

(上接第 42 页)

加工尺寸精度影响。

参考文献:

[1] 黄汉云,宋万军,袁志祁,等. 消除铸件内应力应注意的几个问题[J]. 热处理工艺. 2006, 35(9):99-100.
[2] 黄微, 陈艳丽, 张丽娟. 机加工后铸件应力与变形的试验研究. 铸造技术,2002, 23(2):89-91.

(上接第 47 页)

印过程中保证了负压的稳定。从而使打印机生产的砂型质量更好,砂芯废品率更低,回收打磨砂芯成本更低,更加符合高端制造特点。

参考文献:

[1] 孙灿飞,蔡元友,龙海军,等. 电子式氧气调节器中步进电机模糊控制技术研究[J]. 测控技术,2013(4):78-81.
[2] 丁凡,姚健娣,笪靖,等. 高速开关阀的研究现状[J].中国工程机械学报, 2011(3): 351-358.
[3] 穆世民,杜志军,苏攀,等. Redon 高负压引流系统在跟骨骨折术后的应用[J]. 中外健康文摘, 2013(6):90-91.
[4] 李锦云,杜经民,李宝仁. 基于模糊控制的正负压连续控制系统研究 [C]// 第四届全国流体传动与控制学术会议论文集. 2006: 72-74.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net