

电弧熔丝增材制造技术研究进展

韩 智^{1,2} 陈 瑞^{1,2} 王 宇^{1,2} 张海军² 孙瑞敏² 何青松²
(1. 高端装备轻合金铸造技术国家重点实验室; 2. 沈阳铸造研究所有限公司)

摘 要 电弧熔丝增材制造技术是一种适用于复杂大型金属构件快速成形的技术, 具有设备成本低、材料利用率高和沉积效率高等特点。基于电弧熔丝增材制造的优势, 结合金属构件的成形精度、微观组织特征和力学性能等, 着重介绍了电弧熔丝增材制造设备、材料和工艺的研究现状。最后, 对电弧熔丝增材制造亟需解决的关键技术进行总结, 并对其发展方向进行展望。

关键词 电弧增材; 成形精度; 熔丝材料; 成形质量

中图分类号 TF132 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.11.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research Progress in Wire and Arc Additive Manufacturing

Han Zhi^{1,2}, Chen Rui^{1,2}, Wang Yu^{1,2}, Zhang Haijun², Sun Ruimin², He Qingsong²
(1.State Key Laboratory of Light Alloy Casting Technology for High-end Equipment;
2.Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd.)

Abstract: Wire and arc additive manufacturing(WAAM) is a technology for the rapid forming of large-scale metal components with complex structures, which has the advantages of low equipment cost, high material utilization and high deposition efficiency. On this basis, the current research status of WAAM equipment, materials and processes was highlighted combined with the hot topics of forming accuracy, microstructure characteristics and mechanical properties of metallic components. Finally, the key technologies that need to be solved for WAAM were summarized and the development direction of WAAM was prospected.

Key Words: WAAM, Forming Accuracy, Material of Wire, Forming Quality

电弧熔丝增材制造技术(WAAM)是一种采用电弧为热源,同步添加金属丝材,在程序的控制下焊接打印出金属零件的技术,按焊接工艺不同可分为熔化极气体保护焊(GMAW)、非熔化极气体保护焊(GTAW)和等离子弧焊(PAW),其相应的原理见图 1^[1~3]。电弧熔丝增材制造对环境 and 金属材质不敏感、沉积效率高、丝材利用率高、整体制造周期短、生产成本低,并且可以成形对激光反射率高的铝合金和铜合金。另外,电弧熔丝增材制造的零件由全焊缝金属组成,化学成分均匀、致密度高,力学性能优于铸造件,经适当调质手段可达到锻件水平,较整体锻造零件具有强度高、韧性好的特点^[4~7]。在电弧熔丝增材制造技术的发展过程中,设备、材

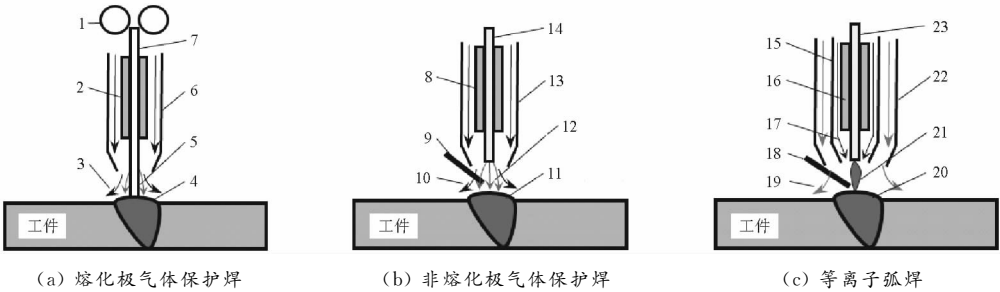


图 1 焊接工艺原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of principle of welding process

1.送丝轮 2.导电嘴 3、10、19.保护气 4、11、20.熔池 5、12.电弧 6、22.保护气嘴 7、9、18.焊丝
8、16.电极夹套和导电嘴 13.喷嘴 14、23.钨极 15.等离子气嘴 17.等离子气 21.等离子弧

收稿日期:2021-05-21;修改稿收到日期:2021-07-12
基金项目:辽宁省“兴辽英才计划”资助项目(XLYC2008036);沈阳市科技计划资助项目(20-202-1-11)
第一作者简介:韩智,男,1996 年出生,硕士研究生,沈阳(110022),E-mail:srifhz@163.com
通信作者:陈瑞,男,1961 年出生,研究员,沈阳(110022),E-mail:Chenrui320@sina.com
引用格式:韩智,陈瑞,王宇,等. 电弧熔丝增材制造技术研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(11):1 381-1 386.
HAN Z, CHEN R, WANG Y, et al. Research progress in wire and arc additive manufacturing[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(11):1 381-1 386.

料、工艺相互影响,相互促进。本课题对电弧熔丝增材制造技术研究进行总结,分析了其现存问题和难点,最后提出了一些电弧熔丝增材制造发展亟需解决的关键技术。

1 电弧熔丝增材制造设备

20 世纪 20 年代,BAKER R 申请的一项采用电弧热通过金属熔滴逐层堆积制造金属装饰品的专利^[8],这是最早的传统手工电弧熔丝增材制造设备。20 世纪 90 年代,RIBEIRO F 等^[9]详细描述了“基于金属材料快速成形技术”的工艺过程;SPENCER J D 等^[10]将 GMAW 的焊枪固定在六轴机器人上,再进行零件的快速制造,这两项研究为现代自动化电弧熔丝增材制造技术的发展奠定了基础。随着电弧熔丝增材制造技术应用产品的不断开发以及高能束技术、软件技术、材料科学和机械自动化等方面的发展,电弧熔丝增材设备从最开始的手工电弧焊设备为原型逐步升级成为如今的数字化大型电弧熔丝增材设备集成平台。国内外部分 WAAM 设备硬件情况见表 1^[11]。现在对于电弧熔丝增材制造设备的研究主要集中于硬件和软件的共同开发,以实现多功能、高效率的增材制造。

表 1 国内外 WAAM 设备硬件(部分)^[11]
Tab.1 Equipment systems of WAAM at home and abroad(part)^[11]

研究机构	硬件构成
克兰菲尔德大学、卡塔尼亚大学、哈尔滨工业大学、西北工业大学、天津大学、南昌大学	TIG+数控机床
克兰菲尔德大学、天主教鲁汶大学、谢菲尔德大学、哈尔滨工业大学、南昌大学	TIG+机器人
克兰菲尔德大学、肯塔基大学、北京工业大学	CMT(MIG)+数控机床
克兰菲尔德大学、诺丁汉大学、卧龙岗大学、米尼奥大学、罗尔斯·罗伊斯公司、华中科技大学	CMT(MIG/MAG)+机器人
克兰菲尔德大学、西安交通大学	PAW+数控机床

1.1 电弧熔丝增材制造设备硬件的开发

电弧熔丝增材制造设备硬件的研究主要集中在增材设备的稳定性和振动特性以及设备材料的强度校核上,解决设备进行多个自由度运动时成形精度受振动干扰影响较大的问题。KAZANAS P 等^[12]将 CMT 焊机与六轴机器人配合,组建 WAAM 系统平台,使用全位置焊成形倾斜薄壁件及几何封闭结构薄壁件,解决了成形困难和鼓包问题。JIA C B 等^[13]和 MENG G 等^[14]针对电弧热输入过高的问题提出强制约束电弧增材制造技术,建立了一台基于六轴机器人的电弧熔丝增材制造系统,通过采用陶瓷(石墨)喷嘴拘束间接电弧的方式,获得了低热输入兼稳定的熔滴过渡过程,并指出完善焊枪结构可解决多层堆积时成形性差的问题。张建

生等^[15]通过在龙门电弧熔丝增材制造系统上增加锤击和测量系统,利用有限元模拟软件对设备的结构受力情况进行分析校核,研究不同结构在受力时的变形情况,达到了精准控制工件结构和材料性能的效果。

1.2 电弧熔丝增材制造设备软件的开发

电弧熔丝增材制造设备软件的研究主要集中在控制系统开发上,其中反馈调节直接影响电弧熔丝增材制造设备智能化水平和控制水平,激光视觉传感系统作为反馈调节的“眼睛”,在电弧熔丝增材制造过程中发挥着重要作用,是控制系统研究的热点。罗勇等^[16]通过分析激光视觉传感所得到的图像,获得了金属结构成形的效果及工件变形的情况,确定了金属结构高度及其变化范围。HERALIC A 等^[17]针对激光工程化净成形控制系统提出基于电荷耦合器件(CCD)视觉成像的传感系统,通过顶部摄像机和前部摄像机直接检测成形过程中的沉积物形貌,并通过前馈控制模型,可根据所获取的信息对熔覆高度与宽度进行实时控制。激光视觉传感系统的不断发展可实现全智能与数字化的监控与反馈,使得对整个电弧熔丝增材制造过程的控制更加稳定,材料成形的成功率更高,完整性更好。

对于电弧熔丝增材制造设备而言,在提高设备工作效率和增加设备功能的前提下,保证成形过程的稳定性和成形构件的质量是电弧熔丝增材制造设备进一步发展的关键。

2 电弧熔丝增材制造材料

目前,应用于电弧熔丝增材制造的金属丝材主要有钢、铝合金和钛合金等,各种材料在电弧熔丝增材制造中的微观结构和性能决定了成形零件品质的好坏,是电弧熔丝增材制造材料研究的热点。

2.1 钢的电弧熔丝增材制造技术

钢因其较低的价格和可靠的性能已被广泛应用于电弧熔丝增材制造,钢的电弧熔丝增材制造技术研究主要涉及构件微观组织、力学性能和成形制造工艺等方面。XU X 等^[18]通过分析马氏体钢电弧熔丝增材制造构件的微观结构和力学性能,指出其内部组织主要为垂直于电弧沉积方向生长的柱状晶组织,金属间化合物沿着沉积方向不均匀分布,提出构件需要后续热处理、冷加工来改善组织和性能。曹嘉明^[19]采用冷金属过渡(CMT)技术,以大西洋 CHW-95C 低合金高强钢焊丝为对象进行研究,建立了成形尺寸与行走速度、送丝速度的回归模型,指出热输入增加使得构件中粒状贝氏体增加,针状铁素体和无碳化物贝氏体减少,还指出在规划路径时减少内部起弧点和熄弧点是减少零件内部夹

杂的关键。钢的电弧熔丝增材制造技术解决了各类大型化、精密化、一体化产品传统成形工艺困难、成本高、材料利用率低、加工周期长等问题,利用电弧熔丝增材制造技术快速成形构件、制造和修复模具将成为未来的发展趋势。

2.2 铝合金的电弧熔丝增材制造技术

铝合金在电弧熔丝增材制造中的应用很广泛,相关研究主要涉及丝材种类、工艺参数和辅助设备等对构件成形性能和组织性能的影响。李权等^[20]基于 CMT 技术成形 2219 铝合金单壁墙试样,指出显微气孔、 θ -Al₂Cu 及富 Fe 脆性相在层间密集分布形成薄弱带是导致水平方向和垂直方向力学性能各向异性的原因。为提高电弧熔丝增材制造成形的 2219 铝合金垂直方向的力学性能,需尽可能降低丝材中的 Fe、Si 杂质含量。顾江龙^[21]采用脉冲变极性冷金属过渡(CMT-PA)工艺制备 2319 铝合金构件,发现丝材表面及内部质量对增材构件性能有显著影响,并指出通过层间轧制及热处理等工艺可改善构件的力学性能,消除气孔等缺陷。赵鹏康等^[22]通过建立 TIG 增材成形 5356 铝合金有限元模型,模拟不同层间冷却时间、增材方向和预热对温度场的影响,提出往复式增材成形可提升表面平整度,基板预热可使成形件温度分布均匀。铝合金的电弧熔丝增材制造技术面临的主要问题是气孔和热裂纹,高质量的焊丝、高品质的弧焊工艺、合理的成形策略和适用的热处理制度是铝合金电弧熔丝增材制造技术的发展方向。

2.3 钛合金的电弧熔丝增材制造技术

钛合金具有密度小、耐高温、耐腐蚀等特点,现已广泛应用于航空航天和生物医学等领域,钛合金的电弧熔丝增材制造技术研究主要涉及材料微观组织、力学性能和成形规律。杨海欧等^[23]通过双椭球热源模型模拟了电弧熔丝增材制造 TC4 直壁墙的宏观组织演变,发现底部主要为等轴晶组织,上部为柱状晶组织,指出低焊接电流有助于等轴晶的形成,但等轴晶区的尺寸及等轴晶的大小与线能量密度无关。LIN J J 等^[24]通过研究电弧等离子沉积过程 TC4 钛合金的力学性能变化规律,指出增材过程中出现的垂直于沉积方向生长的粗大柱状晶导致了拉伸性能呈现明显的各向异性。钛合金在电弧熔丝增材制造成形时易获得与增材方向一致的粗大柱状晶,导致构件力学性能的各向异性,且钛合金的电弧熔丝增材制造沉积效率偏低,晶粒细化的机理和提高沉积效率的方法将成为钛合金电弧熔丝增材制造技术未来的研究方向。

对于电弧熔丝增材制造材料而言,目前所使用的填充丝大多是技术成熟的焊丝,但与传统焊接技术不同的

是填充丝不再为焊缝提供材料填充,而是为整个构件提供材料。填充丝中的缺陷会逐层积累在构件中,导致构件缺陷增多、成形稳定性差。因此,开发新配方的填充丝,拓宽当前电弧熔丝增材制造的材料种类是非常必要的。通过在填充丝中添加成核元素或其他元素等方法,细化晶粒、消除或减少堆积缺陷、提高成形稳定性以制备出高质量和高机械强度的构件将是研究热点。

3 电弧熔丝增材制造工艺

对于电弧熔丝增材制造产品中的部分缺陷,可通过辅助工艺和后处理来改善和解决。目前,已被研究应用于电弧熔丝增材制造的工艺主要包括冷金属过渡(CMT)技术、塑性变形复合电弧增材制造技术、增减材混合制造技术和热处理工艺等。

3.1 冷金属过渡(CMT)技术

CMT 技术是 Fronius 公司基于钢与铝异种材料焊接技术和无飞溅引弧技术开发出来的 GMAW 焊接熔滴过渡技术^[25],具有高熔敷效率、低热输入和无飞溅等特点,其原理是通过控制电弧和送丝机构的闭合、断开,降低熔滴温度,达到冷热循环交替的效果,最终解决电弧熔丝增材制造的熔池飞溅和成形件气孔的问题。CMT 技术的研究主要涉及控制增材路径轨迹、优化成形工艺和改善构件缺陷等方面。马明亮等^[26]采用 ABB 焊接机器人和 CMT 弗尼斯焊机,通过在焊接时增加摆动研究焊道偏移量对增材成形的影响,建立了焊道搭接模型,提出可以根据模型计算得出最优偏移量,获得成形稳定、组织均匀的焊道。王晓光等^[27]基于 CMT 技术,通过对 316L 奥氏体不锈钢构件成形稳定性和组织的分析,发现在由 γ -Fe 和 δ 铁素体组成的组织中, δ 铁素体生长方向沿着沉积方向有着明显的定向凝固特性,指出影响成形精度的主要原因是送丝速度、焊接速度和热输入。从保强等^[28]基于 CMT 技术,以 Al-Cu 合金为研究对象,指出纯氩气保护有助于降低气孔率,通过控制工艺可以消除气孔缺陷。CMT 技术已被应用于钢、铝合金、镁合金和钛合金等多种材料,只是研究方向略有不同。基于铁基材料广泛的应用背景,铁基材料 CMT 技术的研究应将重点放在提高构件性能和成形复杂结构上,体现出 CMT 技术较传统成形技术的优势。对于有色金属材料 CMT 增材制造的研究,应将重点放在控制成形精度、优化成形工艺和解决成形缺陷等方面。通过对 CMT 增材制造过程的数值模拟来分析热力学行为已经成为研究热点,这对了解构件的成形状态、微观组织、力学性能和各类缺陷的形成机理有着重要意义。

3.2 塑性变形复合电弧增材制造技术

塑性变形复合电弧增材制造技术解决了电弧沉积过程中电弧输入热量高、材料内部出现垂直于沉积方向的粗大柱状晶、形成不均匀的组织结构、引起材料各向异性、降低构件力学性能的问题,达到改善成形件微观组织、提高力学性能的目的。目前研究主要涉及轧制复合技术、超声/激光冲击复合技术和高频微锻复合技术等^[29]。

轧制复合技术通过轧辊使金属表面产生塑性变形,破坏内部粗大的柱状晶,在材料内部积累大量变形能。同时,在下一层电弧沉积过程中,电弧的高热量诱导材料发生再结晶,细化晶粒,提升材料力学性能、改善各向异性。HÖNNIGE J R 等^[30]在铝合金电弧增材制造中通过复合辊压工艺对构件残余应力和变形进行控制,在电弧沉积单层材料后冷轧变形,其原理见图 2。ZHANG H O 等^[31]提出智能微铸锻复合制造技术,通过将热轧与电弧熔丝增材制造技术耦合,采用微型轧辊对电弧沉积层进行热轧,同步实现电弧增材与热轧变形,其原理见图 3。

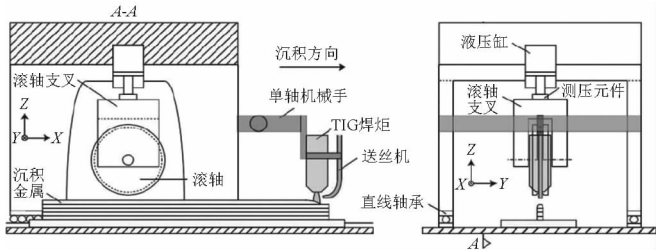


图 2 冷轧变形与电弧增材复合制造技术原理示意图^[30]

Fig.2 Schematic diagram of WAAM and hybrid cold rolling process^[30]

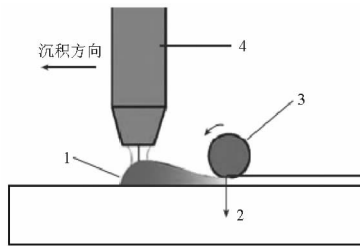


图 3 智能微铸锻复合制造技术原理示意图及试验装置图^[31]

Fig.3 Schematic diagram for principle and apparatus of intelligent micro casting and forging composite manufacture^[31]

1.金属溶池 2.滚压力 3.微型转轴 4.焊炬

超声/激光冲击复合技术是指利用超声波的高频振动或者激光束的冲击在材料表面产生塑性变形,通过改变内部粗大的柱状晶结构和抵消残余应力提升材料性能。何智等^[32]研究了超声冲击对电弧熔丝增材钛合金零件力学性能的影响,发现超声冲击可以改善材料的各向异性,其原理见图 4。SUN R J 等^[33]通过研究电弧熔丝增材复合激光冲击喷丸技术对 2319 铝合金材料的

微观结构、残余应力和拉伸性能的影响,发现该技术可显著细化晶粒尺寸并改善应力分布。

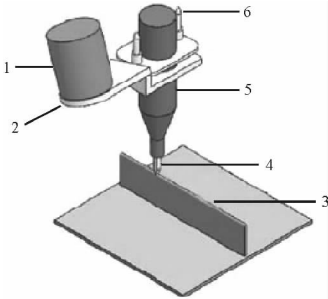
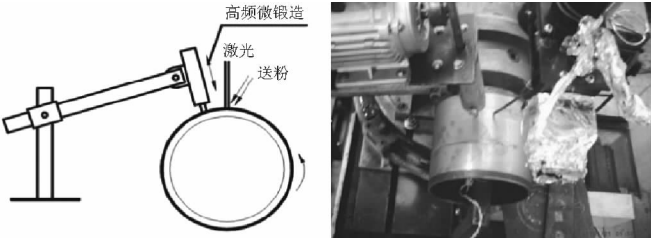


图 4 超声冲击复合技术原理示意图^[29]

Fig.4 Schematic diagram of hybrid ultrasonic peening^[29]

1.J6 轴 2.装夹 3.试样 4.冲击针 5.冲击枪 6.导柱

高频微锻复合技术是通过高频锻打机构对焊缝区域进行锻打强化,使其产生大幅塑性变形,达到细化晶粒和消除残余应力的目的^[34]。QIU C J 等^[35]将高频微锻造运用到激光增材制造中,高频锻造能将表面的铸造组织转变为锻造组织,同时能将增材过程形成的残余拉应力转变为压应力,激光熔覆层特有的明显而规则的枝状结晶组织被锻碎,激光熔覆层的开裂行为有明显好转,其原理见图 5。



(a) 机构原理 (b) 高频微锻造装置

图 5 高频微锻造作用下激光熔覆原理图^[35]

Fig.5 Laser cladding under high-frequency micro-forging^[35]

对于增材制造不同材料和成形工艺的构件,通过塑性变形实现了构件各项性能的提高。如何通过塑性变形来改善电弧熔丝增材制造成形精度差和粗大柱状晶显著降低力学性能的问题已经成为研究热点。从冷变形不能满足强度较高材料的变形要求,到热变形工艺稳定性差需要实现变形温度的精确控制,探索适合电弧增材循环热输入特点的控温方式,做到热变形加热工艺和增材成形工艺的协同调控将是塑性变形复合电弧增材制造技术的发展方向。

3.3 增减材混合制造技术

增减材混合制造技术主要是针对电弧熔丝增材制造表面质量较差、尺寸精度较低的缺点,其基本原理是进行下一层沉积前对上一层沉积金属进行精密铣削,如此往复制得高精度零部件。增减材混合制造技术通过合理的工艺规划可大大改善传统减材工艺的材料利用

率低、效率低和复杂结构加工难等问题。为保障构件的成形精度和组织性能,开发出适合增减材混合制造技术的工艺规划算法已经成为研究热点^[36]。

张海鸥等^[37]发明了智能微铸锻铣混合制造技术,即将电弧微铸增材成形与连续微锻等材成形、铣削减材成形方法混合,在沉积层半凝固微区对其进行同步连续微锻造来细化沉积层晶粒,并采用数控铣削方式去除后续难加工和缺陷部分,大大缩短了复合增材制造的工艺流程,其原理见图 6。KARUNAKURAN K P 等^[38]使用等间距平面切片识别分层计划和减材路径,近似来计算切片厚度和零件设计的分层,增材采用在每层沿 Z 字形或螺旋形沉积材料,随后对每个沉积层平面进行铣削,统一沉积层的高度并去除表面缺陷。

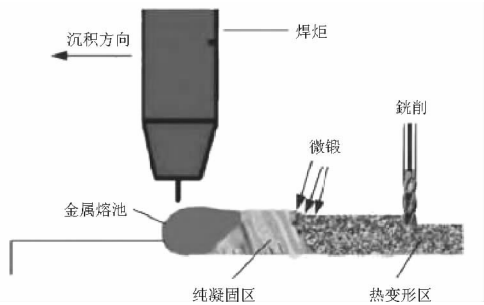


图 6 智能微铸锻铣混合制造原理图^[37]

Fig.6 Principle of combination of smart micro-casting, forging and milling^[37]

增减材混合制造技术目前普遍采用数控机床或机器人作为运动平台,通过搭载焊接设备进行增材制造,未来智能化机械加工设备的发展将进一步推动增减材混合制造技术的发展。未来在保证成形精度和表面质量的前提下,解决电弧熔丝增材设备与减材设备的适配问题和结构复杂构件的分层和工艺规划问题,以及做到增减材混合制造的智能化检测与实时反馈,将成为增减材混合制造技术的发展方向。

3.4 电弧熔丝增材制造热处理工艺

电弧熔丝增材制造的构件需经历循环加热和快速冷却,成形构件存在组织不均匀和残余应力大的缺陷,热处理能有效调整成形件组织,减少残余应力,提升构件材料性能。

MA Y 等^[39]研究了两种热处理温度对电弧熔丝增材制得的 γ -TiAl 金属间化合物组织和力学性能的影响,指出较低的热处理温度下的组织呈尺寸不一的层片状,较高热处理温度下的组织为等轴 γ 晶粒;较低热处理温度下的材料强度提高,而塑性降低,较高热处理温度下的材料塑性提高,力学性能的各向异性消失,但是强度下降。FANG X 等^[40]通过对比 A357 铝合金薄壁有无热处理的影响,发现热处理后,构件内的气孔数量

明显减少,强度和伸长率在各方向上近似同性,显著提升了显微硬度和强度,但会导致晶粒长大,气孔体积增加。

传统材料的热处理工艺在电弧增材制造材料上的适用性还需进一步研究验证,针对电弧熔丝增材制造材料的组织特点,研究热处理过程中材料的组织演变规律,开发出更为合理的热处理工艺将成为未来的研究方向。

对于电弧熔丝增材制造工艺而言,随着数值模拟技术、塑性成形技术、机械自动化技术的发展,针对电弧熔丝增材制造成形过程输入热量高、热循环复杂的特点,研发适用性更强,工艺性更稳定,效果更好的新工艺将成为电弧熔丝增材制造工艺的发展方向。

4 未来展望

设备是将电弧熔丝增材制造技术转变为产品的载体,在满足市场对高效率、低成本和集成化的要求下,建立一体化的设备,需要继续研发成形过程稳定、成形精度高、成形质量好的硬件和软件系统。

材料是电弧熔丝增材制造产品性能的保障,在现有成形过程控制和成形工艺开发的基础上,制造高质量的构件,需要继续研究填充丝的新配方、成形过程微观组织的演变机理和内部传热传质过程。

工艺是电弧熔丝增材制造产品研发和生产的基础,在电弧熔丝增材成形机理的基础上,开发快速高效的工艺,需要继续研究数值模拟技术、塑性成形技术和机械自动化技术在电弧熔丝增材制造中的应用。

综合上述电弧熔丝增材制造技术的发展和研究,提高成形过程稳定性、解决成形缺陷以制备出高质量的构件是共同目标,高精度的设备、高性能的材料以及高效率的工艺是未来的研究重点。

参 考 文 献

[1] WU B, PAN Z, DING D, et al. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: Properties, defects and quality improvement[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 35(10): 127-139.

[2] 吴超群. 增材制造技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.

[3] CUNNINGHAM C R, FLYNN J M, SHOKRANI A, et al. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 672-686.

[4] RODRIGUES T A, DUARTE V, MIRANDA R M, et al. Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM)[J]. Materials, 2019, 12(7): 1 121-1 163.

[5] JIN W, ZHANG C, JIN S, et al. Wire arc additive manufacturing of stainless steels: a review[J]. Applied Sciences, 2020, 10(5): 1 563-1 591.

- [6] DEREKARK S. A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium[J]. *Materials Science and Technology*, 2018, 34(8): 1-22.
- [7] URIONDO A, ESPERON-MIGUEZ M, PERINPANAYAGAM S. The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: A review of important aspects[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2015, G229(11): 2 132-2 147.
- [8] BAKER R. Method of making decorative articles: US 1533300[P]. 1925-04-14.
- [9] RIBEIRO F, NORRISH J, MCMASTER R S. Practical case of rapid prototyping using gas metal arc welding[J]. *Welding Institute*, 1994(6): 15-16.
- [10] SPENCER J D, DICKENS P M, WVKES C M. Rapid prototyping of metal parts by three-dimensional welding[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1998, B212(3): 175-182.
- [11] 李岩, 苏辰, 张冀翔. 电弧熔丝增材制造综述:物理过程、研究现状、应用情况及发展趋势[J]. *焊接*, 2020(9): 31-37,63.
- [12] KAZANAS P, DEHERKAR P, ALMEIDA P, et al. Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2012, B226(6): 1 042-1 051.
- [13] JIA C B, LIU W Q, CHEN M A, et al. Investigation on arc plasma, droplet, and molten pool behaviours in compulsively constricted WAAM[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 34(6): 1 235-1 247.
- [14] MENG G, JIA C B, ZHOU J H, et al. Investigating the generation process of molten droplets and arc plasma in the confined space during compulsively constricted WAAM[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 275: 355-365.
- [15] 张建生, 董旭刚, 张普, 等. 大型电弧熔丝增材装备研究进展及现状[J]. *锻压装备与制造技术*, 2020, 55(1): 7-10.
- [16] 罗勇, 张华, 李月华, 等. TIG 焊快速制造激光视觉检测系统的研究[J]. *激光技术*, 2007(4): 367-369.
- [17] HERALIC A, CHRISTIANSSON A K, OTTOSSON M, et al. Increased stability in laser metal wire deposition through feedback from optical measurements[J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2010, 48(4): 478.
- [18] XU X, GANGULY S, DING J, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of maraging steel produced by wire + arc additive manufacture process[J]. *Materials Characterization*, 2018, 143: 152-162.
- [19] 曹嘉明. 电弧熔丝增材制造高强钢零件工艺基础研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [20] 李权, 王国庆, 罗志伟, 等. 2219 铝合金电弧增材制造组织及力学性能的非均匀性[J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49(11): 3 969-3 976.
- [21] 顾江龙. CMT 工艺增材制造 Al-Cu-(Mg) 合金的组织与性能的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2016.
- [22] 赵鹏康, 唐成, 杨明顺, 等. TIG 增材成形 5356 铝合金温度场数值模拟分析[J]. *兵器材料科学与工程*, 2021(2): 71-77.
- [23] 杨海欧, 王健, 王冲, 等. 电弧增材制造 TC4 钛合金宏观晶粒演化规律[J]. *材料导报*, 2018, 32(12): 2 028-2 031.
- [24] LIN J J, LV Y H, LIU Y X, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of Ti-6Al-4V wall deposited by pulsed plasma arc additive manufacturing[J]. *Mate. Design*, 2016, 102: 30-40.
- [25] YANG S L, ZHANG J, LEI Y P. Welding of aluminum alloy to zinc coated steel by cold metal transfer[J]. *Mater. Design*, 2013, 49: 602-612.
- [26] 马明亮, 蔡之勇, 郭纯, 等. 铝合金 CMT 技术增材制造研究进展[J]. *铸造技术*, 2020, 41(11): 1 088-1 090.
- [27] 王晓光, 刘奋成, 方平, 等. CMT 电弧增材制造 316L 不锈钢成形精度与组织性能分析[J]. *焊接学报*, 2019, 40(5): 100-106.
- [28] 从保强, 丁佳洛. CMT 工艺对 Al-Cu 合金电弧增材制造气孔的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2014, 43(12): 3 149-3 153.
- [29] 李明祥, 张涛, 于飞, 等. 金属电弧熔丝增材制造及其复合制造技术研究进展[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(17): 14-21.
- [30] HÖNNIGE J R, COLEGROVE P A, GANGULY S, et al. Control of residual stress and distortion in aluminium wire + arc additive manufacture with rolling[J]. *Addit. Manuf.*, 2018, 22: 775-783.
- [31] ZHANG H O, WANG X, WANG G, et al. Hybrid direct manufacturing method of metallic parts using deposition and micro continuous rolling[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2013, 19(6): 387-394.
- [32] 何智, 胡洋, 曲宏韬, 等. 超声冲击电弧增材制造钛合金零件的各向异性研究[J]. *航天制造技术*, 2016(6): 11-16.
- [33] SUN R J, LI L H, ZHU Y, et al. Microstructure, residual stress and tensile properties control of wire-arc additive manufactured 2319 aluminum alloy with laser shock peening [J]. *J. Alloys Compd.*, 2018, 747: 255-265.
- [34] 吕彦明, 赵鹏. 电弧增材限行程高频微锻冲击强化锻造头、装置及方法: 中国, CN110744172B[P]. 2021-04-09.
- [35] QIU C J, ZHOU J, FAN X F, et al. Influence of high-frequency micro-forging on the surface microstructure and cracking behavior of laser cladding[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 154-155(1): 1 614-1 617.
- [36] LE V T, PARIS H, MANDIL G. Process planning for combined additive and subtractive manufacturing technologies in a remanufacturing context[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2017, 44(1): 243-254.
- [37] 张海鸥, 黄丞, 李润声, 等. 高端金属零件微铸锻铣复合超短流程绿色制造方法及其能耗分析[J]. *中国机械工程*, 2018, 29(21): 2 553-2 558.
- [38] KARUNAKARAN K P, SURYAKUMAR S, PUSHPA V, et al. Retrofitment of a CNC machine for hybrid layered manufacturing [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 45(7-8): 690-703.
- [39] MA Y, CUIURI D. The effect of postproduction heat treatment on γ -TiAl alloys produced by the GTAW-based additive manufacturing process[J]. *Materials Science & Engineering*, 2016, A675: 86-95.
- [40] FANG X, LI H, LI X, et al. Effect of post heat treatment on the microstructure and mechanical properties of wire-arc additively manufactured A357 alloy components [J]. *Materials Letters*, 2020, 269(15): 674-678.

(编辑:刘卫)