

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.03.017

电弧增材制造技术的研究进展

马明亮¹,刘苏杭²,郭纯²,王树军¹,刘茵琪¹

(1. 洛阳双瑞精铸钛业有限公司,河南 洛阳 471000;2. 安徽科技学院 机械工程学院,安徽 凤阳 233100)

摘要:概述了电弧增材制造技术的基本原理,综述了电弧增材制造技术的发展历程、制造平台、熔化极气体保护焊、钨极氩弧焊等增材制造技术,以及成型过程监控技术等方面的研究进展;讨论了电弧增材制造技术的研究现状和发展方向。

关键词:电弧增材制造(WAAM);3D打印;熔化极气体保护焊;钨极氩弧焊;冷金属过渡成形技术(CMT)

中图分类号: TG249

文献标识码:A

文章编号:1000-8365(2021)03-0231-03

Research Progress of Arc Additive Manufacturing Technology

MA Mingliang¹, LIU Suhang², GUO Chun², WANG Shujun¹, LIU Yinqi¹

(1. Luoyang Shuang Rui Ti Precision Casting Co., Ltd., Luoyang 471000, China; 2. College of Mechanical Engineering, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, China)

Abstract: The basic principle of arc additive manufacturing technology was summarized. The development history of arc additive manufacturing technology, manufacturing platform, additive manufacturing technology such as MGW and TIG welding, and the research progress of forming process monitoring technology were reviewed. The research status and development direction of arc additive manufacturing technology were discussed.

Key words: wire+arc additive manufacturing; 3D printing; MIG/MAG; TIG; CMT

增材制造技术是基于离散-堆积成形原理,由实体零件的三维数据驱动,采用实体材料逐层堆积和累加的成形方法制造实体零件的成形制造技术。该方法最大的优势就是无需传统的刀具加工操作即可快速成形,在航空航天、生物医学、船舶装备制造、能源食品化工各个领域都具有广泛的应用和广阔的发展前景^[1]。按照加工材料的类型和方式分类,可以分为金属成形、非金属成形、生物材料成形等。对于金属成形,根据使用的热源不同,主要可以分为激光束固相增材制造技术、电子束固相增材制造技术和电弧增材制造技术。电弧增材制造技术(Wire and Arc Additive Manufacturing, WAAM)利用电弧作为瞬时点热源将丝材熔化后进行3D堆

积,这种技术具有成形效率高(成形速度最高可达80 kg/h)、材料稳定性好、材料利用率高、成形工件尺寸大、设备制造成本低等优势,可应用于多种金属材料的增材制造。针对热积累导致的环境变化,如何有效控制电弧制造过程稳定性,保证热电弧成形过程尺寸的高精度和稳定性,是现阶段电弧增材制造的重要技术和研究热点^[2-6]。

1 电弧增材制造的发展历程

美国的 Baker 等人早在 1925 年就使用电弧作为热源,将金属材质熔滴逐层进行沉积,设计制造出三维的金属装饰物品,这是电弧增材制造技术的雏形^[7]。20 世纪 70 年代,欧洲学者提出使用金属焊丝作为原材料,采用埋弧焊或熔化极气体保护焊的方法,“从无到有”直接制造出大型金属零部件的概念^[7]。20 世纪末,Spencer 等人将焊接技术和机器人技术结合,具体做法是将 GMAW(熔化极惰性气体保护焊)的焊枪固定在六轴机器人上,再直接进行零件的快速成形制造,这才加速了电弧增材制造技术的应用和发展^[8]。随着机器人焊接技术以及机器人数字化和自动控制等技术的引入和飞速发展,电弧增材制造技术在大型复杂结构件快速制造和成形上已经展现出巨大的优势,目前越来越多的研究机构 and 学者开展了电弧增材制造技术的应用和研究工作。

收稿日期:2020-10-13

基金项目:安徽省高校协同创新项目(GXXT-2019-022);安徽省自然科学基金项目(1908085QE174),安徽科技学院人才项目(RCYJ201905)

作者简介:马明亮(1985—),河南温县人,硕士,工程师。主要从事钛、锆合金成型工艺研究,难熔金属研制与应用,特种焊材研制方面的工作。电话:15137999143, Email:mml111111@126.com

通讯作者:郭纯(1984—),安徽宿州人,博士,副教授。研究方向:表面工程、增材制造、焊接。电话:16655287730,

Email:guochun@ahjstu.edu.cn

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

2 电弧增材制造涉及的主要技术

2.1 机器人平台和编程技术

自从 Spencer 等人将焊接技术和机器人技术结合后,焊接机器人就慢慢成为了应用范围最广的工业机器人之一,在制造业广泛应用。机器人平台成为了现代电弧增材制造技术无法或缺的一部分,解决了传统电弧增材制造中高精度加工困难的难题,通过对焊枪运动轨迹与机器人运动轨迹的精确控制,现代电弧增材制造已经能够精确地完成复杂零件的加工成形^[9]。由于传统示教机器人的编程效率低,仅适用于简单轮廓轨迹的编制,存在复杂轮廓轨迹难以实现,制造的焊接成形件加工精度低等问题。目前国内外研究机构 and 学者更多地选择使用与弧焊机器人配套的离线示教编程再现软件,进行复杂的增材制造工程结构设计的程序编写,以更好地实现弧焊机器人对焊枪运动轨迹与机器人运动轨迹的精确加工控制^[10]。

2.2 熔化极气体保护焊增材制造技术

熔化极气体保护焊(MIG/MAG),就是利用焊丝与工件间产生的电弧作为热源将金属熔化并进行堆积的焊接方法。焊接过程中,通入惰性气体或活性气体进行保护,使形成的熔池及焊接区域可以有效地阻止周围环境空气的有害作用。

在熔化极气体保护焊电弧增材制造三维零件时,需要根据三维零件的尺寸及变形量与焊道长度以及基材的尺寸参数的关系来设计焊枪的行走方向与路径^[11]。在对电弧增材制造零件的设计和制造的过程中,合理的电弧边缘夹紧和焊接形式的设计能有效降低及减少成形件的变形和气孔等结构问题^[12]。大部分的情况下,电弧增材制造的过程中,焊枪位置必须始终保持与焊缝垂直的方向,这就要求电弧增材制造所使用的控制系统和操作设备具有一定的辅助性功能,并且在焊接堆积的过程中,各个组成部分之间进行协同移动^[9]。

冷金属过渡成形技术(CMT)是一种先进的熔化极气体保护焊接方法,其利用短路过渡的原理,通过协调送丝监控和过程控制,实现了焊接过程中“冷”和“热”的交替。同传统的气体保护焊 MIG/MAG 相比,其具有低热输入量 and 无飞溅过渡等优点,将其应用于电弧增材制造可以有效的减少成形件变形量,改善表面质量,因此在它刚问世时就受到全世界专家学者的广泛关注,进而使得 CMT 电弧增材制造技术成为了近年来的研究热点^[13-15]。

2.3 钨极氩弧焊增材制造技术

钨极氩弧焊(TIG)电弧是在氩气中进行燃烧

的,具有以下特点:氩气具有极好的保护作用,能有效的隔绝空气并且不与熔化金属发生反应,容易获得高质量的焊缝。可分别控制热源和填充焊丝,因而热输入容易调整,这种焊接方法可进行全位置焊接。钨极电弧非常稳定,在电流小于 10 A 情况下仍可稳定燃烧。由于填充焊丝不通过电流,故飞溅较少,焊缝成型美观。交流氩弧焊在焊接过程中具有自动清除焊件表面氧化膜的作用,适合焊接化学活性强的有色金属^[16]。

由于钨极氩弧焊具有以上优点,有些学者也尝试使用这种方法开展了相关的电弧增材制造和工艺研究。对使用这种技术制造的成形件进行研究,研究人员对于成形件的微观结构和力学性能进行观察和测量。结果表明,使用这种技术的电弧增材成形件比传统加工方式制备的样品晶粒更细,力学性能更加优良。而使用脉冲电流对增材制造成形件的整体表面形貌和微观部件的结构力学性能有显著的改善作用^[17]。

2.4 WAAM 监控技术

WAAM 技术应用领域广泛,在涉及航空航天、国防工业、机械重工和装备制造等要求高精度的领域时,需要对成形件堆焊生产过程中每一层的焊道成形尺寸和质量情况进行实时监控,以确保成形件生产质量达到设计要求。在对 WAAM 成形件堆焊生产过程中,随着成形件堆焊层数不断地增多,热积累持续加大,散热的条件被逐渐削弱,进而可能导致层间熔池形状失去控制,造成成形件的质量稳定性较差^[18]。因此,如何准确监测 WAAM 堆焊生产过程,保证成形件的质量,提高检测精度是 WAAM 当前的热门研究方向。目前在焊道监测技术中应用较广、发展较快的是视觉传感技术。特别是随着计算机技术的发展,可以对采集的焊道图像匹配不同算法做进一步处理,从而解决焊缝跟踪困难的问题。综上所述,国内外学者围绕电弧增材制造质量控制搭建了相应的监测平台,利用红外、图像和温度等手段监测电弧增材制造过程,并分析这些信号特征所反映的焊接质量问题,并通过解读各信号特征,优化控制焊接过程,提高增材制造成形质量^[19]。

2.5 WAAM 质量控制技术

WAAM 成形件的质量与增材制造过程中的焊接参数,如焊接电流、焊接电压、焊枪移动速度、焊接送丝速度和保护气体的流量等,都有着非常密切的关系^[1]。因此,WAAM 的质量控制技术的核心内容就是对这些工艺参数进行确定与优化。有些学者采用二次回归方程模型或神经网络模型对电弧增材制造成形件进行预测,得出最优工艺参数,进而控制焊

道形貌。有些学者则从工艺优化的角度对成形件的精度进行控制。此外,组织性能也是衡量 WAAM 成形件质量的一个重要指标^[18]。

3 WAAM 应用存在的问题及展望

WAAM 技术虽然应用广泛,但其也存在成形件精度难以很好地控制,组织结构和性能较差,难熔金属适应性差等技术问题。近年来国内外的学者对 WAAM 技术的研究,主要集中在以下几个方向:WAAM 成形件制造过程的焊接工艺参数监测与成形过程控制;搭载机器人平台的 WAAM 技术中机器人和焊枪运动轨迹规划;机器人 WAAM 成形件制造工艺参数优化与成形件成形过程控制;不同机器人平台的制造方法、工艺参数对成形件的直接影响及其工艺参数的优化^[20]。

根据对当前研究进展的分析,未来电弧增材制造技术的研究重点将主要集中在以下几个方面:

(1)对电弧增材制造技术成形过程中控制工艺、控制系统、成形材料之间的相互关系和相互作用进行更加深入的研究,优化焊接成形的工艺,实现快速焊接成形技术与各种数控成形技术之间有效的集成。

(2)开发性能更加稳定的焊接成形系统,这种系统应该能够进行自动实时监控成形焊枪在成形过程中的焊接质量和焊接位置,自动调整各种焊接成形工艺参数,能够实现对焊接过程中各个环节的质量控制并进行自适应调节。

(3)研发先进的焊接机器人成形件技术,从而进一步提高成形件的尺寸精度,进而扩大其应用范围;开发先进的金属材料电弧成形技术,如 CMT 技术等,可以扩大电弧增材技术的适应范围,并进一步提升成形件的产品质量。

4 结语

电弧增材制造技术相较于其他传统加工制造方式,能够有效地缩短各种金属材料零件的生产周期,提高金属材料的综合利用率。电弧增材制造技术的发展是对传统减材加工制造技术的重要技术补充。虽然电弧增材制造技术在机械零件的减重、汽车模型的成形、医疗器械的个性化制造中,有成本更低、生产效率更高等技术优势,但并不意味着电弧增材制造技术可以完全地取代其他传统的加工制造方式。未来要解决电弧增材成形件的产品精度问题,提高产品力学性能,改善表面质量,同时开发更先进的机器人平台和焊接成形控制系统,做到

实时监控焊接质量并自动调节工艺参数以得到精度高、质量优良、品质稳定的成形件,这样电弧增材制造技术才能获得更大的发展空间和应用范围。

参考文献:

- [1] 耿海滨,熊江涛,黄丹,等.丝材电弧增材制造技术研究现状与趋势[J].焊接,2015(11):17-21.
- [2] 卢秉恒,李涤尘.增材制造(3D打印)技术发展[J].机械制造与自动化,2013,42(4):1-4.
- [3] 申发明.不锈钢丝基激光增材制造成形工艺研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [4] 王栋,陈岁元,魏明炜,等.激光3D打印用TC21钛合金粉末制备及其成形性研究[J].热加工工艺,2016,45(22):1-2.
- [5] 余冬梅,方奥,张建斌.3D打印技术和应用[J].金属世界,2013(6):6-11.
- [6] 江洪,康学萍.3D打印技术的发展分析[J].新材料产业,2013(10):30-35.
- [7] 田彩兰,陈济轮,董鹏,等.国外电弧增材制造技术的研究现状及展望[J].航天制造技术,2015(2):57-60.
- [8] 王华明.高性能金属构件增材制造技术——开启国防制造新篇章[J].国防制造技术,2013(3):5-7.
- [9] 林泓延,姚屏,李道良,等.机器人电弧增材制造技术研究现状与趋势[J].自动化与信息工程,2019,40(6):8-12.
- [10] 王天琪,李天旭,李亮玉,等.复杂结构薄壁件电弧增材制造离线编程技术[J].焊接学报,2019,40(5):42-27.
- [11] DING J, COLEGROVE P, MEHNEN J, et al. A computationally efficient finite element model of wire and arc additive manufacture [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(1): 227-236.
- [12] WANG F, DING J, COLEGROVE P, et al. Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts[J]. Computational Materials Science, 2011, 50(12): 3315-3322.
- [13] 张满,李年莲,吕建强,等. CMT 焊接技术的发展现状[J].焊接,2010(12):25-27.
- [14] 柳军,郭小辉,何刚,等. CMT 焊接技术在钛合金方面的应用研究[J].材料开发与应用,2013,28(4):60-64.
- [15] 张博文,张来启.交流冷金属过渡(Advanced CMT)技术的研究进展及其在增材制造中的应用[J].新型工业化,2017,11(11):82-88.
- [16] 王秋雨,杨可,徐先宜,等.铝合金电弧增材制造成形工艺与性能研究[J].电焊机,2018,48(9):76-80.
- [17] 曲扬,杨可,郭博静,等.不锈钢电弧增材制造成形[J].电焊机,2018,48(1):15-18.
- [18] 王钰,王凯,丁东红,等.金属熔丝增材制造技术的研究现状与展望[J].电焊机,2019,49(1):69-77.
- [19] 方平,李如雄,刘泽民.信号采集及图像处理技术在焊接质量监控中的应用研究[J].焊接技术,2007,36(3):4-6.
- [20] BONACCORSO F, CANTELLI L, MUSCATO G. An arc welding robot control for a shaped metal deposition plant: Modular software interface and sensors [J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions, 2011, 58(8): 3126-3132.