

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.03.014

冷金属过渡电弧增材制造技术研究进展*

胡 彪¹, 邓劲莲², 蔡高参^{1*}, 王瑞权²

(1. 浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江机电职业技术学院, 浙江 杭州 310051)

摘要:针对冷金属过渡(CMT)电弧增材制造技术存在的表面成形质量差、制件内部易形成孔隙等冶金缺陷、微观组织与性能调控困难等问题,从控形与控性两个方面出发,对 CMT 电弧增材制造技术研究进展进行了综述。首先,对 CMT 技术的原理及特点进行了分析与梳理;然后,对 CMT 电弧增材制造技术在“形”与“性”方面的调控方式进行了总结,具体阐述了制件的表面成形质量、内部冶金缺陷、微观组织与性能 3 个方面的调控方式;最后,通过对现有调控方式的局限性进行了分析,提出了 CMT 电弧增材制造技术的未来发展趋势。研究表明:未来 CMT 电弧增材制造技术的发展趋势包括:(1)“形”与“性”协同控制与优化;(2)CMT 电弧增材制造难焊材料及复合材料;(3)调控方式的理论机制规律。

关键词:冷金属过渡;电弧;增材制造;研究进展;表面成形质量;内部冶金缺陷;微观组织

中图分类号:TH16;TP391.7

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2022)03-0375-07

Research progress of CMT wire arc additive manufacturing technology

HU Biao¹, DENG Jin-lian², CAI Gao-shen¹, WANG Rui-quan²

(1. Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Hangzhou 310051, China)

Abstract: In view of the fact that the cold metal transfer(CMT)wire arc additive manufacturing technology existed some problems, such as poor surface forming quality, easy formation of internal pores and other metallurgical defects in the parts, and difficulty in controlling microstructure and properties, the research status of the CMT wire arc additive manufacturing technology was reviewed from the aspects of the shape and property control. Firstly, the principle and characteristics of the CMT technology were analyzed and sorted out. Secondly, the control methods of the CMT wire arc additive manufacturing technology in the field of “shape” and “property” were summarized, and the control methods in three aspects of the surface forming quality, internal metallurgical defects, microstructure and properties of parts were expounded in detail. Finally, the future development trend of the CMT wire arc additive manufacturing technology was proposed by analyzing the limitations of the existing control methods. The results show that the development and research trend of the CMT wire arc additive manufacturing technology in the future includes the coordinated control and optimization of “shape” and “property”, the CMT wire arc additive manufacturing of the refractory materials and composite materials, and the theoretical mechanism and regulation rules of the control methods.

Key words: cold metal transfer (CMT); wire arc; additive manufacturing (AM); research progress; surface forming quality; internal metallurgical defects; microstructure

0 引 言

增材制造(AM)技术是一种将材料逐层堆积成一个实体零件的制造技术^[1-3]。与传统的减材制造相比,

增材制造具有许多突出的优点,如直接制造结构复杂的零件、材料利用率高、制造周期短等^[4]。随着增材制造技术的不断发展,其应用范围已经扩展到航空航天、汽车、医药等多个领域。

收稿日期:2021-10-13

基金项目:浙江省基础公益研究计划项目(LGG18E050007);2021年度浙江省重点研发择优项目(2021C05006)

作者简介:胡彪(1998-),男,江苏宿迁人,硕士研究生,主要从事3D打印技术方面的研究。E-mail:hoobil@163.com

通信联系人:蔡高参,男,博士,特聘副教授。E-mail:caigaocan@zstu.edu.cn

目前,国内外的研究热点主要是关于金属材料的增材制造。根据热源方式的不同,金属增材制造技术主要分为:激光增材制造(laser additive manufacturing, LAM)^[5]、电子束增材制造(electron beam melting, EBM)^[6,7]和电弧增材制造(wire arc additive manufacturing, WAAM)^[8,9]。

电弧增材制造技术以电弧作为热源将丝材熔化,在软件和数控系统的控制下,自下而上逐层堆积成形零件^[10]。WAAM 具有成本低、丝材利用率高、生产效率高优点,已成为直接制造金属零件的重要技术手段。

WAAM 广泛采用的电弧有:熔化极气体保护焊(gas metal arc welding, GMAW)、非熔化极气体保护焊(gas tungsten arc welding, GTAW)、等离子弧焊(plasma arc welding, PAW)和冷金属过渡焊(cold metal transfer, CMT)^[11,12]。

作为一种新型的焊接工艺,CMT 具有超低的热输入量以及熔滴过渡无飞溅等优点,因而其非常适用于增材制造领域。

近几年来,CMT 电弧增材制造技术已成为国内外研究机构的研究热点。各研究人员已对其表面成形质量、内部冶金缺陷以及微观组织与性能等做了大量的研究。

例如,KAZANAS P 等人^[13]进行了铝合金 CMT 电弧增材制造零件几何成形能力的研究,并通过改变焊枪与基板相垂直的增材方式,实现了各角度薄壁件的成形。张习羽等人^[14]对 6061 铝合金 CMT 电弧增材

制造进行了六因素五水平的正交实验,发现了焊接参数电流对其制件的气孔率影响最大。郭一飞等人^[15]基于 CMT 电弧增材制造技术对层间温度进行了研究,发现了降低层间冷却温度可以减少重熔区奥氏体粗晶的数量,使组织晶粒变细,增强其抗拉强度。

随着现代工业的不断发展,为了促进 CMT 电弧增材制造技术在航空航天等重要技术领域的广泛应用,需不断提高其制件的精度、性能及可靠性。

基于上述原因,笔者对 CMT 电弧增材制造技术的研究现状进行分析,在控形与控性两个方面,对 CMT 电弧增材制造技术进行综述,为进一步研究 CMT 电弧增材制造技术提供参考。

1 CMT 概述

冷金属过渡(CMT)技术是 FRONIUS 公司基于短路过渡原理开发出来的新型焊接技术^[16]。与其他焊接技术相比,CMT 可以通过协调送丝控制及实时监控,实现焊接过程中的冷热循环交替,从而解决焊接过程中产生的飞溅或熔滴穿透母材等问题。

CMT 的基本工作原理是:在电弧引燃后,焊丝向熔池移动;当熔滴与熔池发生短路时,电弧熄灭,电流转变为很小的短路电流;过程控制系统实时将短路信号反馈给送丝机,送丝机停止送丝,并自动回抽焊丝,促进熔滴在无电流状态下过渡^[17]。

CMT 的基本原理示意图如图 1 所示^[18]。

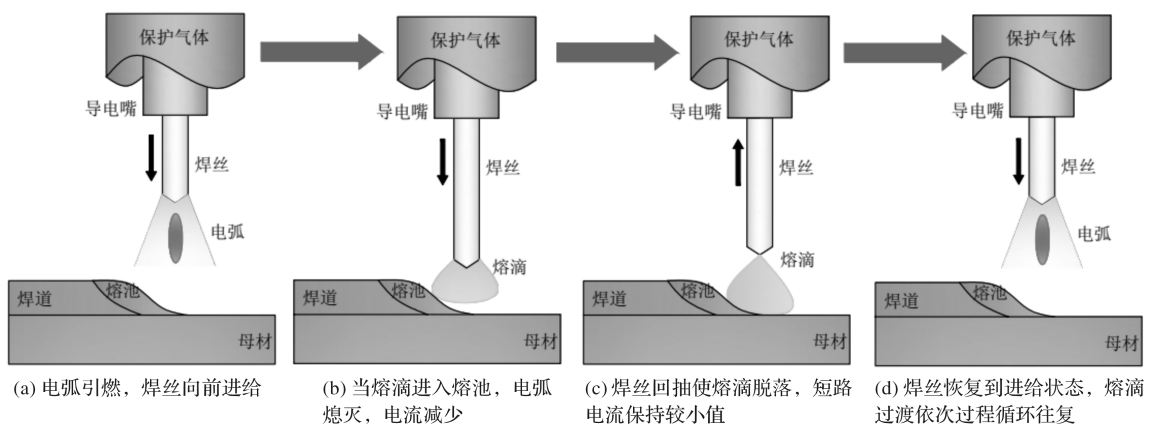


图 1 CMT 的基本原理示意图

CMT 的提出受到了国内外研究学者的极大关注,近几年来对其在增材制造方面应用的研究越来越多。WILLIAMS S W 等人^[19]将 CMT 与机器人焊接系统结合,制造了长度大于 2.5 m 的制件,促进了 CMT 电弧增材制造技术在大型零件上的应用。薛丁琪等人^[20]基于优化后的 CMT 电弧增材制造工艺参数,成形出了

外观质量良好的薄壁中空环形工件。相比于其他电弧焊,由于 CMT 具有电弧稳定、热输入量超低、熔滴过渡无飞溅等优点,更适用于增材制造技术。CMT 电弧增材制造技术不仅具有生产周期短、成本低、沉积效率高和丝材利用率高等优势,而且具有冷金属过渡的精确成形和低的热输入量优势^[21]。

2 WAAM 控形与控性研究现状

电弧增材制造(WAAM)的控形与控性是增材制造过程中的两个重要考察指标。控形需充分考虑制件表面成形质量,而控性需充分考虑制件内部冶金缺陷以及微观组织与性能调控。

针对上述问题,国内外研究学者开展了大量关于CMT电弧增材制造技术的控形与控性研究工作。

2.1 表面成形质量

表面成形质量是衡量增材制造制件质量的一个重要指标。为了获得良好的表面成形质量,研究人员通过优化工艺参数、优化搭接率以及规划路径,以此来提高制件的表面成形质量。

2.1.1 工艺参数优化

制件的表面成形质量在很大程度上受到了工艺参数的影响,尤其受到送丝速度与焊接速度的影响。AYARKWA K 等人^[22]通过研究工艺参数对成形形貌的影响,发现送丝速度与焊接速度的比值是影响成形形貌的主要因素,提高该比值可以增加熔覆层的高度

和宽度。王晓光等人^[23]以316 L奥氏体不锈钢薄壁件为研究对象,分析了工艺参数对成形宽度以及侧面成形误差的影响,发现焊接速度、送丝速度和热输入是影响成形精度的关键因素,侧面成形误差随着热输入的增加呈现先减小后增大的趋势。

除此之外,熔积电流、电弧长度和焊枪行走角也会对制件的成形形貌产生影响。倪加明等人^[24]发现熔积电流过大或者过小都会影响制件表面的粗糙度,当熔积电流为105 A时表面粗糙度最小。赵昀等人^[25]以单壁墙为研究对象,研究了电弧长度和焊枪行走角对成形形貌的影响,发现采用-15%的弧长修正值和10°的焊枪行走角可以改善成形质量。

2.1.2 搭接率优化

利用WAAM制造厚壁零件时,必然需要采用多层、多道结构,因此,搭接率的选择将直接影响零件的表面质量^{[26]98}。根据焊道形貌,控制相邻焊道之间的焊道间距 d ,会对零件表面的成形精度起关键作用。

4种常见的搭接情况实物图如图2所示。

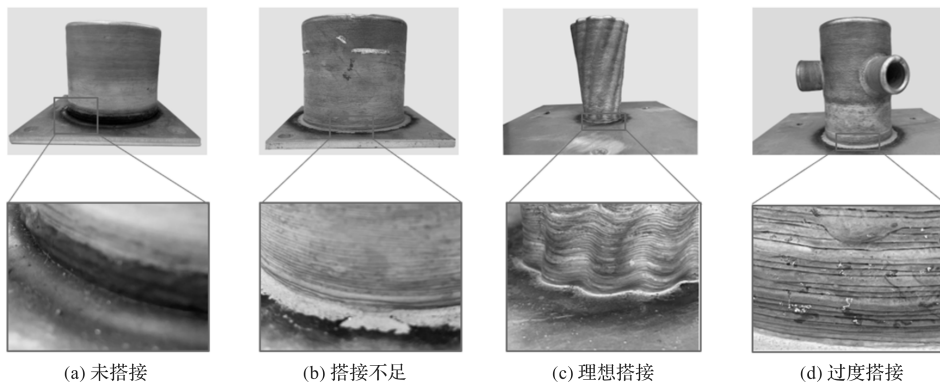


图2 4种搭接情况实物图

为了获得最优搭接率,国内外研究者进行了大量的实验研究。徐健宁^[27]基于TIG电弧增材制造试验,发现焊道间距为6/9焊道宽度时,零件表面平整度最好。方学伟等人^[28]将单层焊道轮廓分别拟合成抛物线、余弦和圆弧3种标准曲线进行了研究,发现圆弧曲线和抛物线的拟合效果较好;并基于抛物线建立搭接模型,得到最优搭接间距为0.715倍焊道宽度。CAO Yong 等人^[29]将焊道轮廓拟合成余弦函数,从而计算出焊道间距为0.6366焊道宽度时最好。

目前,最优搭接率大多是把焊道截面轮廓拟合成曲线来计算的。然而,所有的曲线模型都存在一定的拟合误差,这种误差在多层累计之后是不容忽视的问题^{[26]98}。

因此,基于何种曲线模型来计算焊道间距对优化

搭接率起着相当关键的作用。

2.1.3 路径规划

增材制造技术是一个通过逐点、逐道、逐层加工的制造技术。因此,国内外关于增材制造技术规划路径的研究主要集中在分层处理和优化路径两个方面^[30]。

对于加工制件,尤其是曲面制件来说,分层方式和分层算法优化对其成形精度有着至关重要的影响。EZ-AIR B 等人^[31]提出了一种曲面覆盖的分层方式来解决平面分层导致的表面光洁度问题。徐敬华等人^[32]提出了一种基于邻接拓扑的流形网络模型层切多连通域构建方法,提高了分层处理时截面轮廓生成的精度。此外,不同的扫描路径对WAAM的质量影响显著^[33,34]。

常见的扫描路径有平行扫描路径、环形扫描路径和分形扫描路径等^[35,36],如图3所示^[37]。

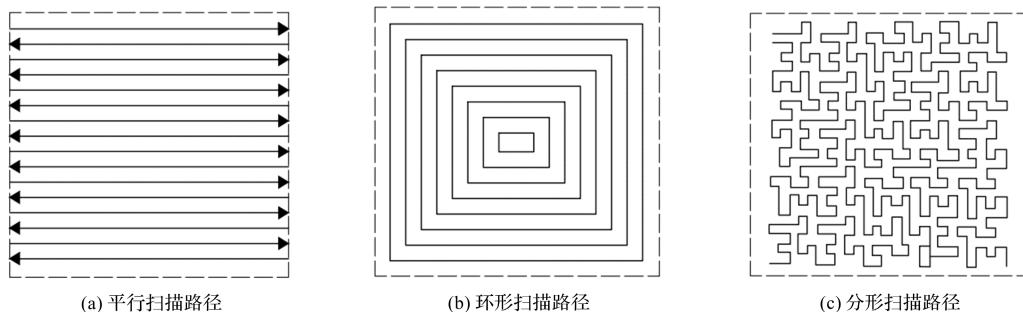


图 3 常见扫描方式

在此基础上,为了提高加工零件的表面质量和扫描效率,许多研究人员提出了不同的改进方式。刘海华等人^[38]提出了将轮廓偏置路径和 Z 字形路径相结合的复合路径规划方法,试验结果表明,该方法提高了制件轮廓的几何还原度,并且提高了制件的成形质量。孙清洁等人^[39]采用 CMT 电弧增材制造技术,研究了不同扫描路径对薄板焊后变形程度的影响,发现由边缘向截面内部延伸结合交替形式的扫描方式可以获得成形良好的加工制件。

由此可见,规划路径对提高制件的表面成形质量有着极大的帮助。

2.2 内部冶金缺陷

气孔是影响制件质量的主要内部冶金缺陷之一,其大大降低了制件的疲劳性能和强度^[40]。由于具有较高的热输入量,采用传统的电弧增材制造技术极易造成熔滴飞溅,导致气孔的产生。而因具有稳定的电弧和超低的热输入量,CMT 电弧增材制造技术避免了熔滴飞溅问题,降低了气孔率。但是,CMT 电弧增材制造技术仍然很难做到完全消除气孔。

因此,为进一步改善制件的质量,研究者做了大量的实验。目前,控制内部冶金缺陷的方法主要包括合理的参数优化和过程监控与过程质量检测。

2.2.1 合理的参数优化

在电弧增材制造过程中,通过优化工艺参数以改善加工过程中的传热与传质效果,可以有效控制制件内部缺陷的形成^[41]。闫保山^[42]研究了不同工艺参数对气孔的影响规律,研究发现了适当降低送丝速度和提高焊接速度可以减少宏观气孔的产生。从保强等人^[43,44]分析了不同纯氩保护气体流量对铝合金 WAAM 气孔的影响,研究发现了提高纯氩保护气体流量有助于减少气孔;此外,其还发现了相对于常规 CMT 工艺方法,变极性复合脉冲 CMT(CMT pulse advanced,CMT-PADV)工艺可以减少甚至消除气孔。

因此,合理的优化工艺参数有助于进一步抑制制件内部缺陷的形成,从而获得性能良好的制件。

2.2.2 过程监控和过程质量检测

鉴于增材制造技术的特点,对制件内部质量进行后续工序检测,需采用破坏性检测方式。因此,建立可靠的过程监控和过程质量检测相当重要。良好的实时监测可以及时发现内部缺陷并进行补救,可以大幅度提高制件的成形质量。例如,袁久鑫等人^[45]开展了激光超声对 WAAM 试块内部缺陷检测的研究,研究结果表明:对于直径 1 mm 的孔缺陷直径,检测深度可以达到 10 mm,并且当缺陷尺寸减小时,需降低检测深度。刘磊^[46]利用永磁扰动检测方法,成功检测到了直径为 0.8 mm 的内部气孔缺陷、宽度为 0.3 mm 的裂纹,以及深度为 3 mm、直径为 1 mm 的内部缺陷。

随着过程监控和过程质量检测的不断提高,可做到及时发现并解决制件的内部缺陷,这无疑对控制内部冶金缺陷起到了积极的作用。

2.3 微观组织与性能调控

与其他工艺的电弧增材制造技术相比,CMT 电弧增材制造技术制备的制件组织晶粒细小、均匀,力学性能优异^[47]。

近年来,国内外学者针对进一步提高 CMT 电弧增材制造技术组织性能等方面展开了大量的研究,采用的主要方法有:优化工艺参数、工艺改进、采用外部辅助手段实现晶粒细化及均匀化组织等^{[12]11}。

2.3.1 工艺参数优化与工艺改进

不同的送丝速度与焊接速度将影响打印件的微观组织结构,进而影响制件的力学性能。研究者着手于优化工艺参数,以改善制件的微观组织结构,提高其力学性能。

王立伟等人^[48]研究了不同的工艺参数对铝合金 CMT 电弧增材制造微观组织和力学性能的影响,发现晶粒随着送丝速度的增大而增大,随着增材速度的增大而减小,并得出较优的工艺参数:增材速度为 50 cm · min⁻¹,送丝速度为 4 m · min⁻¹。WANG Jian 等人^[49]发现通过优化送丝速度来改变沉积层的温度梯度,可以抑制柱状晶的生长,获得各向异性较低的制

件。

另外,电弧特性对增材制造制件的组织和性能也有影响。姚云飞等人^[50]采用 CMT, CMT-ADV(交流), CMT-P(脉冲), CMT-PADV(交流脉冲)4种电弧形式分别对 2219 铝合金进行增材制造研究,发现 CMT-PADV 电弧形式下打印的制件晶粒更加均匀、细密,其力学性能明显高于其他 3 种电弧形式。王会霞等人^[51]研究发现, CMT-VP 电弧拥有较低的热输入量,使得打印试件的晶粒尺寸较小,组织分布均匀,力学性能良好。

由此可见,适当增加送丝速度、减小焊接速度以及改进电弧特性可以使增材制造制件的晶粒更加细密、均匀,力学性能更加优异。

2.3.2 外部辅助手段

除了优化工艺参数、工艺改进,通过外部辅助手段也可实现微观组织与性能调控,其主要方法包括:热处理、元素合金化、超声冲击处理和轧制等。

现有的研究表明:热输入量会影响增材制造制件的微观组织,对增材制造制件进行适当的热处理,可以细化晶粒,优化组织结构^[52]。针对合金元素中杂质形核点较少,难以形成等轴晶的钛合金等问题,可以通过添加微量元素来调控制件的微观组织。GOU Jian 等人^[53]通过在 Ti-6Al-4V 增材制造过程中添加微量元素 Nb,阻止了定向柱状晶的外延生长,细化了柱状晶晶粒,获得了柱状晶与近等轴晶相混合的组织结构。

超声冲击利用振动波来加强金属的流动性,从而实现细化晶粒,许明方等人^[54]利用超声冲击来处理钛合金 CMT 电弧增材制造制件,研究表明:超声冲击可以使粗大的柱状晶破碎,使其在后续的沉积层热作用下形成细密的等轴晶。

除此之外,也有一些学者通过轧制的方式来处理制件^[55,56],因为金属材料在经过压力加工之后,表现出了良好的组织结构和力学性能。

3 结束语

CMT 技术自 FRONIUS 公司提出以来,已被广泛应用于增材制造方面的研究,目前 CMT 电弧增材制造的研究主要集中在控形与控性两个方面。

针对提高 CMT 电弧增材制造制件表面成形质量问题,笔者提出了多种调控手段,主要包括优化工艺参数、优化搭接率以及规划路径 3 个方面。

针对制件内部冶金缺陷问题,笔者提出了通过合理的参数优化和过程监控与过程质量检测来进行控制;并提出通过优化工艺参数与工艺改进,采用外部辅

助手段,以此来实现对其微观组织与性能的调控。

在 CMT 电弧增材制造控形与控性的研究方面,目前国内外已经取得了长足的进步,但这些调控手段仍然存在各自的局限性,需要进一步对其进行优化。

为实现 CMT 电弧增材制造技术在多领域的广泛应用,未来的 CMT 电弧增材制造技术的研究方向可以从以下几个角度进行考虑:

(1)“形”与“性”协同控制与优化。目前针对 CMT 电弧增材制造技术的控形与控性研究大都分开进行,很少将表面成形质量、内部冶金缺陷以及微观组织与性能等关联起来。因此,实现“形”与“性”协同控制将是未来发展趋势之一;

(2)CMT 电弧增材制造难焊材料以及复合材料。当前应用的加工材料主要集中在易成形金属及其合金方面,很少有研究难焊材料以及复合材料。为扩大 CMT 电弧增材制造应用领域,研究难焊材料与复合材料将是未来发展的重要趋势;

(3)调控方式的理论机制规律。目前提出的调控方式已经取得了很大的进步,但是对于调控方式的理论机制规律尚不成熟,无法实现其工程化应用。因此,对于调控方式的理论机制规律,还有待做进一步的深入研究。

参考文献(References):

- [1] CHEN Lian, HE Yong, YANG Ying-xin, et al. The research status and development trend of additive manufacturing technology [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 89 (9-23): 3651-3660.
- [2] 刘佳奇. 铝合金冷金属过渡焊接及增材制造过程研究 [D]. 青岛:青岛科技大学材料科学与工程学院,2019.
- [3] 辛艳喜,蔡高参,胡彪,等. 3D 打印主要成型工艺及其应用进展 [J/OL]. *精密成形工程*:1-13. [2021-10-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1199.TB.20210803.1046.002.html>.
- [4] ABDULHAMEED O, AL-AHMARI A, AMEEN W, et al. Additive manufacturing: challenges, trends, and applications [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, 11 (2):1-27.
- [5] ZHANG Dong-zhe, LI Yun-ze, CONG Wei-long. Multi-scale pseudoelasticity of NiTi alloys fabricated By laser additive manufacturing [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021(821):1-11.
- [6] 李绍伟,郜庆伟,赵健,等. 电子束熔丝增材制造研究进展及展望 [J]. *中国材料进展*, 2021, 40(2):130-138.
- [7] 田文琦,杨冬野,李九霄. 高能束增材制造钛铝合金的研

- 究进展[J]. 机械工程材料, 2021, 45(6): 1-7.
- [8] XIA Chun-yang, PAN Zeng-xi, POLDEN J, et al. A review on wire arc additive manufacturing: monitoring, control and a framework of automated system[J]. **Journal of Manufacturing Systems**, 2020(57): 31-45.
- [9] 刘 勇, 任香会, 常云龙, 等. 金属增材制造技术的研究现状[J]. 热加工工艺, 2018, 47(19): 15-19, 24.
- [10] 江宏亮, 姚巨坤, 殷凤良. 丝材电弧增材制造技术的研究现状与应用[J]. 热加工工艺, 2018, 47(18): 25-29.
- [11] 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, 7(11): 82-88.
- [12] 伊 浩, 黄如峰, 曹华军, 等. 基于 CMT 的钛合金电弧增材制造技术研究现状与展望[J]. 中国表面工程, 2021, 34(3): 1-15.
- [13] KAZANAS P, DEHERKAR P, ALMEIDA P, et al. Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture[J]. **Journal of Engineering Manufacture**, 2012, 226(6): 1042-1051.
- [14] 张习羽, 王晓帅, 叶 昕, 等. 6061 铝合金 CMT 焊接气孔影响因素研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(19): 43-47.
- [15] 郭一飞, 王克鸿. CMT 增材制造层间温度影响规律试验研究[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(4): 54-57.
- [16] 杨修荣. 超薄板的 CMT 冷金属过渡技术[J]. 焊接, 2005, (12): 52-54.
- [17] BEYTULLAH G, ERDINC K, EMEL T, et al. Mechanical and microstructural properties of robotic cold metal transfer (cmt) welded 5083-H111 and 6082-T651 aluminum alloys [J]. **Materials and Design**, 2014(54): 207-211.
- [18] 郝 轩, 黄永德, 陈 伟, 等. 基于 CMT 技术的铝合金电弧增材制造研究现状[J]. 精密成形工程, 2018, 10(5): 88-94.
- [19] WILLIAMS S W, MARTINA F, ADDISON A C, et al. Wire + arc additive manufacturing[J]. **Materials Science and Technology**, 2016, 32(7): 641-647.
- [20] 薛丁琪, 阮鹏祥, 程诗文, 等. 薄壁中空环形件的电弧增材制造工艺分析[J]. 焊接学报, 2021, 42(4): 42-48, 98-99.
- [21] 任香会, 王磊磊, 董春林, 等. 304 不锈钢冷金属过渡电弧增材制造组织及力学性能[J]. 焊接, 2019, (9): 44-48, 67.
- [22] AYARKWA K, WILLIAMS S, DING J. Investigation of pulse advance cold metal transfer on aluminium wire arc additive manufacturing[J]. **International Journal of Rapid Manufacturing**, 2015, 5(1): 44-57.
- [23] 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, 165-166.
- [24] 倪加明, 刘思余, 陈梦凡, 等. 熔积电流对镁合金 CMT 熔丝增材成形特征的影响[J]. 电焊机, 2021, 51(8): 128-133 + 181.
- [25] 赵 昀, 卢振洋, 陈树君, 等. 薄壁结构冷金属过渡增材制造工艺优化[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(8): 82-89.
- [26] 柏久阳, 王计辉, 林三宝, 等. 电弧增材制造厚壁结构焊道间距计算策略[J]. 机械工程学报, 2016, 52(10): 97-102.
- [27] 徐健宁. 智能金属结构熔焊成型技术研究[D]. 南昌: 南昌大学机电工程学院, 2009.
- [28] 方学伟, 白 浩, 姚云飞, 等. 冷金属过渡电弧增材制造多道搭接工艺研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(1): 141-147.
- [29] CAO Yong, ZHU Sheng, LIANG Xiu-bing, et al. Overlapping model of beads and curve fitting of bead section for rapid manufacturing by robotic mag welding process[J]. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, 2010, 27(3): 641-645.
- [30] 朱 晗. 高强复合链轮 CMT 增材制造工艺及路径规划研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 2020.
- [31] EZAIR B, FUHRMANN S, ELBER G. Volumetric covering print-paths for additive manufacturing of 3d models[J]. **Computer-Aided Design**, 2018(100): 1-13.
- [32] 徐敬华, 盛红升, 张树有, 等. 基于邻接拓扑的流形网格模型层切多连通域构建方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(1): 180-190.
- [33] 卞宏友, 杨 光, 李 英, 等. 金属激光沉积成形分组平行扫描路径生成方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(11): 171-176.
- [34] 陈云霞, 王小京, 陈善本, 等. 基于电子束快速成形金属粉末扫描路径试验[J]. 焊接学报, 2014, 35(10): 81-84, 117.
- [35] ASIABANPOUR B, KHOSHNEVIS B. Machine path generation for the SIS process[J]. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, 2003, 20(3): 167-175.
- [36] 王军杰, 李占利, 卢秉恒. 激光快速成型加工中扫描路径的研究[J]. 机械科学与技术, 1997(2): 86, 119-121.
- [37] 赵吉宾, 赵宇辉, 杨 光. 激光沉积成形增材制造技术[M]. 1 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2020.
- [38] 刘海华, 高文强, 赵 淘, 等. 基于电弧熔丝增材制造的复合路径规划方法[J/OL]. 材料科学与工艺: 1-9. [2021-10-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1345.TB.20210913.2010.002.html>.
- [39] 孙清洁, 桑海波, 刘一搏, 等. 基于电弧增材制造的截面扫描轨迹规划[J]. 焊接学报, 2017, 38(10): 21-24.
- [40] 任学磊, 袁 涛. 丝材电弧增材制造常用材料及其缺陷

- 研究进展[J]. 金属加工(热加工),2020(7):6-10.
- [41] 张 岩,闫婉迪,国旭明,等. 基于熔化极电弧增材制造的控“形”与控“性”技术研究现状与展望[J]. 有色金属工程,2021,11(6):17-23.
- [42] 闫保山. 2319 铝合金电弧增材制造尺寸预测与气孔控制[D]. 沈阳:沈阳大学材料科学与工程学院,2020.
- [43] 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):3149-3153.
- [44] CONG Bao-qiang, DING Jia-luo, WILLIAMS S. Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3% Cu alloy[J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**,2015,76(9):1593-1606.
- [45] 袁久鑫,秦训鹏,张进朋,等. 基于激光超声的电弧增材制件内部缺陷深度检测[J]. 中国机械工程,2021,32(1):65-73.
- [46] 刘 磊. 电弧熔积增材制造过程中在线检测的研究与实现[D]. 武汉:华中科技大学机械科学与工程学院,2016.
- [47] ELREFAEY. Effectiveness of cold metal transfer process for welding 7075 aluminium alloys[J]. **Science and Technology of Welding and Joining**,2015,20(4):280-285.
- [48] 王立伟,武子琴,胡虎安,等. 工艺参数对 Al-Si 合金 CMT 增材制造组织和力学性能的影响[J]. 沈阳大学学报:自然科学版,2021,33(1):1-9.
- [49] WANG Jian, LIN Xin, LI Jia-qiang, et al. A study on obtaining equiaxed prior- β grains of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V[J]. **Materials Science and Engineering: A**,2020(772):138703.
- [50] 姚云飞,王缪乾,方学伟,等. 冷金属过渡(CMT)增材制造 2219 铝合金性能[J]. 焊接,2019,(6):53-60,68.
- [51] 王会霞,王松涛,王天顺,等. CMT 电弧特性对 5A56 铝合金增材制造构件组织与性能的影响[J]. 电焊机,2021,51(8):55-63,177-178.
- [52] GOU Jian, SHEN Jun-qi, HU Sheng-sun, et al. Microstructure and mechanical properties of as-built and heat-treated Ti-6Al-4V alloy prepared by cold metal transfer additive manufacturing [J]. **Journal of Manufacturing Processes**,2019(42):41-50.
- [53] GOU Jian, WANG Zhi-jiang, HU Sheng-sun, et al. Effects of trace Nb addition on microstructure and properties of Ti-6Al-4V thin-wall structure prepared via cold metal transfer additive manufacturing[J]. **Journal of Alloys and Compounds**,2020,(829):154481.
- [54] 许明方,陈玉华,邓怀波,等. 超声辅助 CMT 电弧增材制造 TC4 钛合金微观组织和力学性能研究[J]. 精密成形工程,2019,11(5):142-148.
- [55] GU Jiang-long, DING Jia-luo, WILLIAMS S W, et al. The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al-6.3Cu alloy[J]. **Materials Science and Engineering: A**,2016(651):18-26.
- [56] GU Jiang-long, WANG Xiao-shu, BAI Jing, et al. Deformation microstructures and strengthening mechanisms for the wire + arc additively manufactured Al-Mg4.5Mn alloy with inter-layer rolling[J]. **Materials Science and Engineering: A**,2018(712):292-301.

[编辑:雷 敏]

本文引用格式:

胡 彪,邓劲莲,蔡高参,等. 冷金属过渡电弧增材制造技术研究进展[J]. 机电工程,2022,39(3):375-381.

HU Biao, DENG Jin-lian, CAI Gao-shen, et al. Research progress of CMT wire arc additive manufacturing technology[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2022,39(3):375-381.《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>