DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.11.019

铝合金 CMT 技术增材制造研究进展

马明亮[1],蔡之勇[2],郭　纯[2],郑申清[1],刘茵琪[1],杨学东[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:铝合金作为一种加工性能优良、导热性好且质量轻的金属材料,在工业领域应用广泛。冷金属过渡焊接技术(CMT)作为一种低热量输入、无飞溅的焊接技术,非常适合铝合金的增材制造,铝合金 CMT 技术已成为增材制造技术的研究热点。通过综述近年来国内外学者在铝合金 CMT 技术焊道成形、组织性能、气孔缺陷方面的研究成果,展望了未来 CMT 技术的发展方向。

关键词:冷金属过渡焊接技术(CMT);铝合金;电弧增材制造

中图分类号: TG146　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)11-1088-03

Research Progress in Additive Manufacturing of Aluminum Alloy CMT Technology

MA Mingliang[1], CAI Zhiyong[2], GUO Chun[2], ZHENG Shenqing[1], LIU Yinqi[1], YANG Xuedong[1]

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

Abstract: As a kind of metal material with excellent machining performance, good thermal conductivity and light weight, aluminum alloy has been widely used in the industrial field. Cold metal transition welding technology (CMT), as a low heat input and no spatter welding technology, is very suitable for additive manufacturing of aluminum alloy. Aluminum alloy CMT technology has become a research hotspot in additive manufacturing technology. Based on the review of the research achievements of domestic and foreign scholars in recent years in the aspects of weld bead formation, microstructure and porosity defects of aluminum alloy CMT technology, the future development direction of CMT technology was prospected.

Key words: cold metal transfer welding technology (CMT); aluminum alloy; ARC additive manufacturing

增材制造是以数字模型文件为基础,通过软件与数控系统将专用的金属材料或非金属材料,按照挤压、烧结、熔融、光固化、喷射等方式逐层堆积,制造出实体物品的制造技术。根据使用的能源不同,增材制造技术可以分为激光增材制造、电子束增材制造、紫外光增材制造和电弧增材制造等。与传统的加工模式不同,增材制造是一种“自下而上”的制造方法。增材制造技术作为一种高效、低成本的堆积成形技术,其新颖的工件成形理念为现代制造技术提供了新的发展方向。

收稿日期:2020-07-29

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,E-mail: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,E-mail:guochun@ahstu.edu.cn.

由于冷金属过渡焊接技术(CMT)具有低热输入量、无飞溅等优点,使得可对电弧增材制造中的焊接过程进行更加精确的数字化把控。因此,CMT 技术是一种新兴的电弧增材制造技术,非常适合铝合金的增材制造。本文从国内外报道的铝合金 CMT 技术的研究成果入手进行分析,综述了铝合金 CMT 技术的焊接工艺参数对焊道成形、组织性能以及气孔缺陷影响的研究成果,为加快未来铝合金 CMT 技术相关研究工作的开展提供参考。

1　冷金属过渡焊接技术(CMT)

CMT 技术是 Fronius 公司在短路过渡原理基础上于 2004 年研制出来的新型焊接技术。CMT 冷金属过渡焊接技术是指数字控制方式下的短电弧和焊丝的换向送丝监控。其中的换向送丝系统由前、后两套协同工作的焊丝输送机构组成,从而使焊丝的输送过程呈间断性送丝。后送丝机构按照恒定的送丝速度向前送丝,前送丝机构则按照控制系统的指令以 70 Hz 的频率控制着脉冲式的焊丝输送[1]。CMT 技术的送丝运动在数字化焊接系统的监控下,短路

熔滴过程电流几乎为零，因此热输入量可以大幅度的降低，从而保证焊接过程的熔滴温度维持在较低的水平。焊丝的来回抽送，保证了熔滴材料的正常脱落，实现了焊接技术真正意义上的无飞溅[1]。因此，CMT 技术在焊接后的熔渣清理量较少。

CMT 冷金属过渡技术是在短路过渡基础上开发的，同传统的气体保护焊 MIG/MAG 相比，金属溶滴过渡热输入量更小。CMT 技术同普通的 MIG/MAG 焊有三方面显著的差别。一是送丝运动与熔滴过渡过程进行数字化协调。当数字化的控制器监测到短路信号后，就会反馈给送丝机，送丝机做出回应，迅速回抽焊丝，从而使得焊丝与熔滴分离。二是低的热输入量。CMT 技术实现了无电流状态下的熔滴过渡。当短路电流产生时，CMT 焊接系统会自动监控短路过渡的过程；在熔滴过渡时，电源将电流降至非常低，几乎为零，因此热输入量也几乎为零，焊丝即停止前进并自动地回抽。在此过程中，电弧自身输入热量的过程很短，短路发生，电弧即熄灭，热输入量迅速地减少。整个焊接过程即在冷热交替中循环往复。三是无飞溅过渡。在短路状态下焊丝的回抽运动帮助焊丝与熔滴分离，通过对短路状态的控制，保证短路电流很小。焊丝的回抽运动保证了熔滴的正常脱落，同时避免了普通短路过渡方式极易引起的飞溅，从而使得熔滴过渡实现无飞溅。无飞溅过渡是 CMT 技术的关键所在。CMT 技术在本质上是一种先进的熔化及气体保护焊接技术。

作为一项创新的工艺技术，CMT 技术在铝合金焊接方面适用性极好，为铝合金焊接提供了一种良好的解决方案，拓宽了焊接技术的研究领域。目前 CMT 技术已经具有常规的 CMT、CMT-P、CMT-ADV 和 CMT-PAD 控制等多种模式[2]，取得了很多重要成果。

2　铝合金 CMT 技术焊道成形方面的研究

许华银等[3]将 CMT 技术的焊道与焊层作为研究对象，在焊接速度、电压电流、送丝速度等焊接工艺参数不变的情况下，焊接过程中引入适当焊接摆动；结果表明焊接摆动使得熔池流动性增强，铺展能力、焊接精度提高，焊道呈现出美观均匀的鱼鳞形状；其研究团队通过搭接焊道模型，计算出理想的搭接偏移量，用实验验证了最优偏移量。Kohei Oyama 等[4]对 Al-5Mg 与 Al-3Si 合金进行建模与实验研究，推导出一套采用 CMT 技术的热源管理方法，依据所做建模并通过对结果分析，指出铝合金采用短间隔与自适应热源对各层进行不断的修正是限制焊道计量偏差的有效方法。田银宝等[5]采用 VP-CMT 技术研究铝合金的平板堆焊，研究了焊接参数 EP/EN Balance 对焊道成形的影响，指出一个焊接周期内的 EP 阶段占比会影响热输入量，进而影响材料在基板表面的铺展；但研究团队的成果仅停留在焊道成形方面，工件的组织性能分析未见报道。

CMT 技术热输入量的大小影响焊道成形的均匀美观程度。如何在材料沉积过程中精确的控制热输入量将是焊道成形研究的主要方向。

3　铝合金 CMT 技术组织性能的研究

相较于其它工艺的铝合金电弧增材技术，使用铝合金 CMT 技术的电弧增材制备的材料组织晶粒细小均匀，力学性能各向异性较小。近年来，国内外发表了多篇有关铝合金 CMT 技术组织性能方面的研究论文。郭一飞等[6]基于 CMT 技术对层间温度进行了研究，结果表明通过降低层间冷却温度可以在一定程度上减少重熔区奥氏体粗晶的数量，使得层间结合强度提高，抗拉强度增强，组织晶粒变细。顾江龙[7]采用 CMT 技术制备了 2319 铝合金并研究了其组织与性能。蒋旗等[8]采用 CMT-P 工艺制备了 4043 铝合金薄壁件，工件组织均匀分布，力学性能无各向异性。Elrefaey[9]对 7075 铝合金 CMT 工艺效果进行分析发现，与惰性气体 MIG 焊相比，CMT 工艺制备的工件合金组织晶粒更细小、抗拉强度与延伸率更高。

目前，国内外的研究仅限于某一特定系列的铝合金 CMT 工艺，且从研究影响组织性能的主要因素入手，对比得到较为合适的工艺参数，以实现组织性能的优化处理。但是无法通过大量的实验数据进行理论推导，总结出其共性规律。由此可见，铝合金 CMT 技术的组织性能机理分析仍需大量的实验研究来提供数据支撑。

4　铝合金 CMT 技术气孔缺陷的研究

从铝合金 CMT 技术研究报道中可以发现，增材制造铝合金中的气孔普遍为氢气孔。氢在固态铝中的溶解度很低，由于 CMT 技术热输入较小，熔池凝固速度快，凝固时氢气来不及逸出而生成气孔。气孔缺陷对工件的致密性有很大的影响，会使焊缝的有效承载面积减少，造成应力集中，焊缝的强度、塑性以及韧性会大幅度降低，对动态负载强度和疲劳

强度造成不利影响。

从保强等人[2]通过对不同 CMT 工艺条件下制备的 Al-Cu 铝合金气孔分布特征比对分析研究发现,纯氩气保护有助于减少电弧增材 Al-Cu 铝合金的气孔量。使用 CMT-PAD 技术，在保护气体流量为 25 L/min 时可实现无气孔缺陷的 Al-Cu 铝合金的电弧增材制造。李权等[10]使用 Advance CMT-P 熔滴过渡模式和不同的丝材,对 Al-6.3Cu 铝合金的气孔含量进行分析,发现在焊接成形过程使用低频摆弧并不能显著减少气孔量,不同丝材表面质量的差异是导致气孔含量不同的原因。蒋旗等 [8] 采用 CMT-P 技术制备 4043 铝合金薄壁件，结果表明相较于传统的 CMT 技术制备的薄壁件,CMT-P 技术制备的工件截面中气孔数量明显减少。张习羽等[11]通过对 6061 铝合金采用 CMT 技术进行六因素五水平正交实验,结果表明 CMT 技术中对 6061 铝合金的气孔率影响最大的焊接参数是电流,其次是保护气体流量与焊速。顾江龙等[12]研究了层间轧制和沉积后热处理对 CMT 技术制备的 2319 铝合金和 5087 铝合金中气孔率的影响,结果表明施加载荷为 45 kN 的轧制后,直径大于 5 μm 的气孔基本消除。

国内外对于气孔缺陷的研究大多集中于工艺参数对气孔缺陷的影响,总结出了一些通过控制相关焊接工艺参数达到减少气孔的具体措施,但对于完全消除气孔的措施目前报道较少,这将是未来铝合金 CMT 技术研究工作的热点。

5 结语与展望

CMT 技术自 Fronius 公司提出以来，相关研究工作从未停止，铝合金电弧增材制造研究成果颇多。研究工作者不断的优化 CMT 工艺并提出新的理论,未来铝合金 CMT 技术的研究重点主要为:

(1)控制焊接精度,使焊道形貌均匀美观,并成功制备复杂形状的工件;

(2)优化焊接工艺,增强工件质量的稳定性,实现大批量生产;

(3)解决 CMT 技术焊接气孔的问题,提出系统的研究理论,提高工件质量。

随着相关研究工作的不断深入，未来铝合金 CMT 技术将拥有广阔的应用前景,现代制造业也将向前跨越式的发展!

参考文献:

[1] 杨修荣. 超薄板的 CMT 冷金属过渡技术 [J]. 焊接,2005(12): 52-54.

[2] 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.

[3] 许华银,王克鸿,周琦,等. 基于 CMT 增材成形的焊接摆动及道间偏移研究[J]. 热加工工艺,2019,48(13):135-138.

[4] Kohei Oyama, Spyros Diplas, Mohammed M'hamdi, et al. Heat source management in wire-arc additive manufacturing process for Al-Mg and Al-Si alloys [J]. Additive Manufacturing, 2019, 26: 180-192.

[5] 田银宝,申俊琦,胡绳荪,等. EP/EN Balance 对铝合金 VP-CMT 焊熔滴过渡及焊道成形的影响 [J]. 吉林大学学报 (工学版) 2020,2: 23-28.

[6] 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.

[7] 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]. 东北大学,2016: 60-65.

[8] 蒋旗，张培磊，刘志强，等. 冷金属过渡加脉冲电弧增材制造 4043 铝合金薄壁件的组织与拉伸性能 [J]. 机械工程材料,2020,44(1):57-61.

[9] 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.

[10] 李权,罗志伟,冯晨,等. 熔滴过渡模式及丝材对电弧增材制造 Al-6.3Cu 合金气孔含量的影响 [J]. 固体火箭技术,2019,42(6): 801-807.

[11] 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.

[12] Jianglong Gu, Jialuo Ding, Stewart Williams, 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 & Engineering A, 2016, 651: 18-26.

杭州文特机电有限公司

热处理炉、加热炉、工业自动化工程、环保节能工程、机电设备的设计、制造、加工、安装、技术开发、技术咨询、技术服务。工业自动化设备、仪器仪表、工业炉窑配件、计算机等的生产、批发、零售。

地址:杭州市西湖区万塘路 262 号 6 号楼 5-65 室
厂址:长兴县林城镇午山岗开发区
联系人:丁为兵
电话:15088362822
传真:0572-6087688
邮箱:dwb150@163.com