

电弧增材制造研究现状及在航空制造中应用前景

Research Status of Wire and Arc Additive Manufacture and Its Application in Aeronautical Manufacturing

西北工业大学凝固技术国家重点实验室 熊江涛 耿海滨 林鑫
西北工业大学摩擦焊接陕西省重点实验室 黄丹 李京龙 张赋升



熊江涛

西北工业大学材料学院副教授, 博士, 主要研究方向为电弧增材制造技术、固相连接理论及技术、固-固界面演变热力学等, 相关研究成果发表于 *Acta Materialia*, *Scripta Materialia*, *Materials Science and Engineering A* 等国际著名期刊, 国际著名期刊 *Journal of Alloys and Compound* 审稿人。

增材制造 (Additive Manufacturing, AM) 技术是基于离散-堆积原理, 由零件三维数据驱动, 采用材料逐层累加的方法制造实体零件的快速成形技术。该成形方法最大优势是无需传统的刀具即可成形、降低工序、缩短产品制造周期,

电弧增材制造采用逐层堆焊的方式制造致密金属实体构件, 因以电弧为载能束, 热输入高, 成形速度快, 适用于大尺寸复杂构件低成本、高效快速近净成形。面对新一代飞行器制造成本及可靠性要求, 其结构件逐渐向大型化、整体化、智能化发展, 电弧增材制造技术在大尺寸航空结构件成形上具有其他增材技术不可比拟的效率与成本优势。本文综述了电弧增材制造技术研究现状, 并结合该技术特征及国内增材制造技术研究规划, 评述了我国在该技术领域的发展际遇与挑战, 指出其在航空制造领域的发展前景及意义。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.23/24.080

尤其适于低成本小批量产品制造, 而且越是结构复杂、原材料附加值高的产品, 其快速高效成形的优势越显著, 在航空航天、生物医学、能源化工、微纳制造等领域具有广阔应用前景^[1]。

面对新型飞行器低成本、高可靠性的要求, 其零部件逐渐向大型化、整体化发展^[2]。增材制造技术无需模具, 可直接低成本一体化制造复杂构件, 并有望基于增材制造技术在构型能力上的优势, 进一步优化现飞行器零部件结构, 提高结构效率, 实现

结构轻量化、高性能化。由于简化或省略了传统制造中的工艺准备、模具设计等环节, 产品数字化设计、制造、分析高度一体化, 能够显著缩短研发周期和研发成本。

金属增材制造技术按热源类型可分为 3 类: 激光、电子束和电弧。过去 20 年主要研究以激光、电子束为热源的粉基金属增材制造技术, 通过不断熔化或烧结金属粉末来连续逐层制备复杂结构零部件, 现已应用于航空航天、国防军工、能源动力等高精尖技术领域部分关键零部件, 但由

于其原材料、热源特点,金属粉基激光、电子束增材制造技术在成形某些特定结构或特定成分构件时受到一定限制而无法实现或即使可以成形,其原材料、时间成本很高,具有诸多不足之处:(1)对于激光热源,其成形速率慢、铝合金对激光的吸收率低等;(2)对于电子束热源,真空炉体尺寸对构件体积的限制;(3)粉基金属原材料制备成本较高、易受污染、利用率低等均增加了原料成本。

基于上述原因,现有的技术成形大尺寸复杂结构件时表现出一定的局限性,为了应对大型化、整体化航天结构件的增材制造需求,基于堆焊技术发展起来的低成本、高效率电弧增材制造技术受到部分学者关注。电弧增材制造技术(Wire and Arc Additive Manufacture, WAAM)以电弧为载能束,采用逐层堆焊的方式制造金属实体构件,该技术主要基于TIG、MIG、SAW等焊接技术发展而来,成形零件由全焊缝构成,化学成分均匀、致密度高^[3],开放的成形环境对成形件尺寸无限制,成形速率可达几kg/h,但电弧增材制造的零件表面波动较大,成形件表面质量较低,一般需要二次表面机加工,相比激光、电子束增材制造,电弧增材制造技术的主要应用目标是大尺寸复杂构件的低成本、高效快速近净成形。

本文主要介绍电弧增材制造技术现状,分析现阶段该技术研究的不足之处,探讨其可能的发展方向,阐述该技术在大型化、整体化高端航空零部件制造中的应用。

WAAM 技术现状

1 WAAM 装备系统

1.1 基本硬件构成及特征

电弧增材制造是数字化连续堆焊成形过程,其基本成形硬件系统应包括成形热源、送丝系统及运动执行机构。电弧增材制造三维实体零件依赖于逐点控制的熔池在线、面、

体的重复再现,若从载能束的特征考虑,其电弧越稳定越有利于成形过程控制,即成形形貌的连续一致性。因此,电弧稳定、无飞溅的非熔化极气体保护焊(TIG)和基于熔化极惰性/活性气体保护焊(MIG/MAG)开发出冷金属过渡(Cold Metal Transfer, CMT)技术成为目前主要使用的热源提供方式。

作为由点向三维方向扩展的运动执行机构,其位移与速度、位置的重复定位精度、运动稳定性等对成形件尺寸精度的影响至关重要,目前使用较多的是数控机床和机器人。数控机床多作为形状简单、尺寸较大的大型构件成形,机器人具有更多的运动自由度,与数控变位机配合,在成形复杂结构及形状上更具优势,但基于TIG的侧向填丝电弧增材制造因丝与弧非同轴,如果不能保证送丝与运动方向的相位关系,高自由度的机器人可能并不适合,所以机器人多与MIG/MAG、CMT、TOP-TIG等丝弧同轴的焊接电源配合搭建电弧增材成形平台。在国内外电弧增材相关研究机构的报道中,所采用的成形系统如表1所示。相比TIG、MIG/MAG、PAW等,CMT具有低热输入、无飞溅等特点。此外,其送丝运动与熔滴过渡过程可进行数字化协调,在物质输入方面具有更高的可操控性,可能会成为将来电弧增材制造的主要热源方式。

总体而言,电弧增材制造载能束

具有热流密度低、加热半径大、热源强度高等特征,成形过程中往复移动的瞬时点热源与成形环境强烈相互作用,其热边界条件具有非线性时变特征,故成形过程稳定性控制是获得连续一致成形形貌的难点,尤其对大尺寸构件而言,热积累引起的环境变量变化更显著,达到定态熔池需要更长的过渡时间。针对热积累导致的环境变化,如何实现过程稳定性控制以保证成形尺寸精度是现阶段电弧增材制造的研究热点。基于视觉传感系统的焊接质量在线监测与控制技术首先被移植应用于该领域,并取得了一定成果。

1.2 成形过程稳定性硬件系统

电弧增材成形采用逐层累加的方式构建三维实体零件,保证形状、尺寸精度,需要单层成形尺寸与三维数字化模型建立的分层切片数据一致,但在实际成形过程中,热积累作用导致熔池体系热边界环境非线性时变,故实现自动化电弧增材制造系统除了以上的基本成形硬件条件外,还需要能够对每一沉积层的表面形貌、质量及尺寸精度进行在线监测和控制。

WAAM增材制造是以高温液态金属熔滴过渡的方法通过逐层累积的方式成形的,成形过程中随着堆焊层数的增加,成形件热积累严重、散热条件变差,以至于熔池凝固时间增加,熔池形状难于控制,尤其是在零件边缘,由于液态熔池的存在,边缘

表1 国内外WAAM研究机构的基本硬件构成

研究机构	成形系统基本构成
Cranfield University ^[4] 、Southern Methodist University ^[5-7] 、University of Catania(卡塔尼亚大学) ^[8] 、University West(瑞典西部大学) ^[9-11] 、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/工作台
Cranfield University、Catholic University of Louvain ^[12-16] 、University of Sheffield、哈尔滨工业大学、南昌大学	TIG+ 机器人
Cranfield University、University of Kentucky ^[17]	CMT(MIG)+ 数控机床
Cranfield University ^[18] 、University of Nottingham、University of Wollongong、Universidade do Minho、Rolls-Royce PLC ^[19] 、华中科技大学 ^[20]	CMT(MIG/MAG)+ 机器人
Cranfield University ^[21] 、西安交通大学	PAW+ 数控机床(工作台)

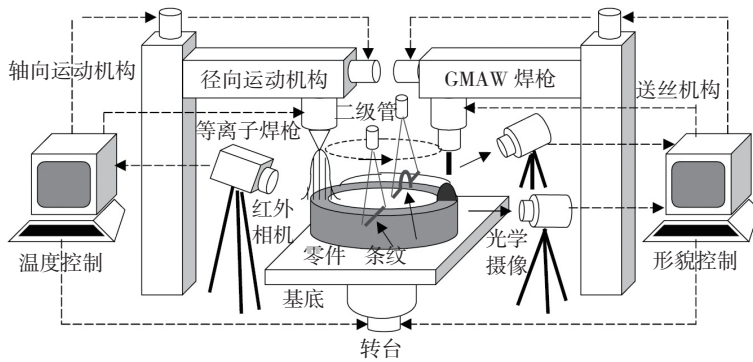
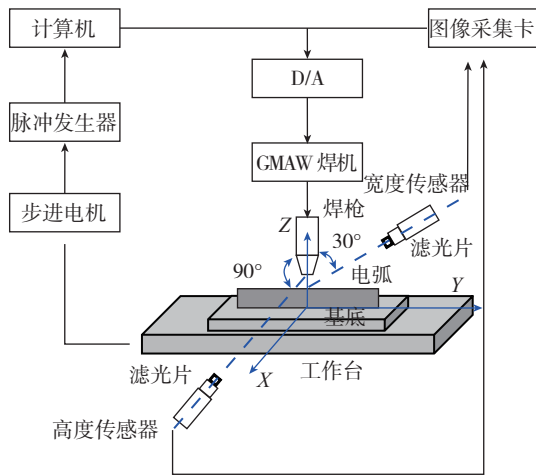


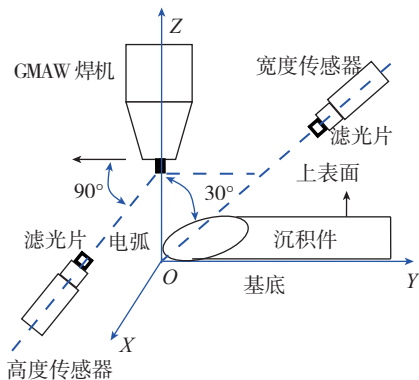
图1 基于MIG的WAAM成形与监测控制系统（美国塔夫茨大学）^[22]

形貌与成形尺寸的控制更加困难,即热积累作用导致熔池体系热边界环境非线性时变,故实现自动化电弧增材制造系统除了以上的基本成形硬件条件外,还需要能够对每一沉积层的表面形貌、质量及尺寸精度进行在线监测和控制。在焊枪处安装红外温度传感器的被动反馈式层间温度控制方式,强烈依赖于人为目标参

数的设置^[21],而直接以熔覆层的形貌尺寸特征作为信号源,通过实时在线监测尺寸信息,实现反馈调节可能更可取。如图1所示,美国 Tufts 大学 Kwak 等^[22-24]建立了利用 MIG 焊枪进行堆焊成形,等离子枪在线热处理,通过两套结构光传感器对熔覆层形貌特征进行监测,以及一套红外摄像机用于成形件表面温度在线监测



(a) 基于MIG的WAAM成形系统示意图



(b) 双被动视觉传感系统示意图

图2 构建基于双被动视觉传感系统控制的MIG增材制造成形系统示意图（哈尔滨工业大学）^[25]

WAAM 载能束热输入高、热源半径大、金属熔体短程流动等特征决定了成形尺寸对工艺参数具有较弱的响应灵敏度,而且温度越高越显著,与焊接过程焊缝质量的在线监测目的不同,WAAM 过程的监测与反馈控制目的在于控形,而其宽泛的工艺规范带使得这一反馈控制可能无法取得立竿见影的效果,故在提高成形精度上不能行之有效。WAAM 的应用是“近净成形”、“原型制造”,其追求的是低成本、高效率而非高精度,所以对成形精度要求并不苛刻(需要2次机加工)。此外,该系统需在焊枪周围辅助复杂的光路系统,光路干涉严重约束了焊枪的可达性,而从该技术自身特征出发,通过揭示成形机理,优化工艺,可能更适于简单、高效、低成本电弧增材制造。

2 成形过程稳定性的工艺控制

不同于激光及电子束,电弧增材制造的熔池体积较大,而且成形过程中因冷态原材料、电弧力等扰动因素的存在,使得熔池成为一个不稳定的体系,但WAAM能够成为增材制造的先决条件是成形过程必须使得熔池体系具备稳定的重复再现能力。在初期试验规律性研究阶段,主要基于电弧焊接技术,针对不同材料体系匹配不同的焊接方法及成形系统,甄选出关键影响因子,采用试验方法研究单层单道焊缝形状与最终成形零件表面质量的关系,建立起成形质量与焊接关键工艺参数的关系,如焊速(TS)、焊丝直径(WD)、送丝速度(WFS)、导电嘴端面与工件距离(CTWD)、层间温度、电流、电压等。

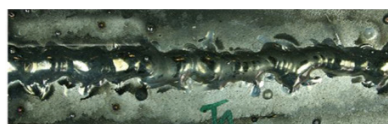
在基于TIG的堆焊成形过程中,熔滴向熔池过渡的稳定性对于成形质量至关重要,电弧挺度弱于激光、电子束等高能束,已堆焊沉积层形貌质量对下道次的堆焊表面影响较大,上一道次形貌特征在WAAM成形技术中表现出特定时、空非连续“遗传”特性,尤其是首道次成形,因

基板的表面质量、清洁度、加工状态等不尽相同,因此首道次成形时应采用“强工艺规范”来弱化基板对成形质量的影响。图3对比分析了在大电流、相对较高的送丝速度下首道次 TC4 合金成形形貌特征,送丝速度 $WFS=10\text{m}/\text{min}$ 时,首道次成形表面的“隆起”、“凹陷”缺陷较弱,成形宽度方向的波动性较低^[26]。基于“强工艺规范”的首道次成形时,因不必考虑熔池内熔融金属向两侧漫流,即重力对成形性的影响,向熔池内持续地高速率物质输入以弱化表面张力作用,使得成形体系成为以熔融态金属重力支配作用下的熔覆为主,可能会降低成形稳定性对基板特征的敏感程度而获得连续、稳定一致的成形形貌。

TIG 电弧增材制造因其弧、丝的非同轴性,在成形路径复杂多变时,送丝方向与堆焊方向的相位关系保持依赖于行走机构,往往增大了成形、控制系统的复杂性。基于 MIG 焊的 WAAM 虽然热输入较高,但成形速率更快,而且以焊丝作为电极,弧、丝具有同轴性,不存在如 TIG 电弧增材成形的送丝方向与焊接方向的相位关系,成形位置的可达性更高。Fronius 公司基于 MIG/MAG 开发出冷金属过渡 (Cold Metal Transfer, CMT) 技术,因其具有超低热输入、熔滴过渡无飞溅、电弧稳定等不同于 MIG/MAG 的特征,克服了 MIG 增材成形的诸多弊端而在 WAAM 成形领域展现出独特的优势。2012 年英国 Cranfield 大学研究人员系统地研究了工艺参数,如焊速、送丝速度、焊丝直径等对基于 CMT 方法的 WAAM 技术成形形貌(有效宽度、表面波动性等)的影响规律,以 WFS/TS 作为归一化变量,通过该比值协调调整焊速及送丝速度,使得在研究工艺与成形形貌的相互关系时,工艺参数的变化水平具有可表征性,以 $WFS/TS=30$ 时为例,不同

TS 水平下成形形貌如图 3 所示。作者并未探讨不同的 WFS/TS 水平下成形件有效宽度的变化规律,该参量或许可作为有效宽度定量表征的参考量,因该系数直接联系于单位时间内熔池物质输入效率,而成形的“隆起”、“凹陷”缺陷应与焊速或送丝速度水平相关,正如图 3 中的成形形貌变化特征,其调整的参考量应为焊接热输入,其成形形貌的变化特征与基于 TIG 的 WAAM 技术类似,增大焊速、降低送丝速度、减小焊丝直径均可降低成形件的有效宽度。

近几年,我国西北工业大学、哈尔滨工业大学、南昌大学、天津大学等部分高校科研机构也相继开展了 WAAM 成形技术的工艺与控制研究工作,但均处于试验规律性描述和成形形貌、表面质量控制方法研究阶段。增材制造以个性化、复杂化需求为导向,WAAM 独特的载能束特征及其强烈的载能束与热边界相互作用,决定了针对不同的材料体系、结构特征、尺寸、热沉条件等,WAAM 成形工艺也不一而同,可能无法如其他材料加工技术那样制定加工图或工艺规范带,这意味着以试验为基础的经验方法难以面面俱到,更需要通过探讨 WAAM 成形物理过程,深入认识其成形基础理论,在材料、结构、形状、路径改变时,成形工艺参数设计有“据”可依,以适于自由多变灵活的 WAAM 成形过程。目前,国内外公开发表的探讨 WAAM 成形基础理论问题的文章较少,仅涉及到成形



(a) $WFS=5\text{m}/\text{min}$



(b) $WFS=10\text{m}/\text{min}$

图3 不同送丝速度下首道次 TC4合金成形形貌^[26]

过程温度场的演变及应力分布规律研究^[27],从温度场演变规律出发,析出熔池热边界一致性的控制方法,可能对于工艺控形更具意义,并进一步从电弧参数和材料送进对成形过程的影响、熔池动力学、成形表面形貌演化动力学等相关科学问题出发,揭示电弧增材成形的物理过程,应成为该领域研究工作的核心。

3 WAAM 成形件性能

相比激光、电子束增材制造技术而言,电弧的热输入较高,WAAM 成形过程中熔池和热影响区的尺寸较大,较长时间内已成形构件将受到移动的电弧热源往复后热作用,而且随着成形高度增大,基体热沉作用减弱,热耗散条件也发生变化,每一层的热历程不尽相同,因此,基于连续成形过程中温度场演变规律,研究凝固组织的晶体学特征及周期性,表征不同热历程条件下成形件的力学性能,成为控性的基础。

电弧增材成形的本质是微铸自由熔积成形,逐点控制熔池的凝固组织可减少或避免成分偏析、缩孔、凝固裂纹等缺陷的形成。在图 4 TC4 钛合金成形件组织形貌中,可明显观察到贯穿于整个成形件的粗大柱状初生 β 晶粒。初生 β 晶粒由底层熔池底部外延生长直至距离顶部 1~2mm 的位置,粗大柱状晶的颜色差异源于不同晶粒的晶体取向差别,晶粒长大方向几乎垂直于基体,这种组织的形成可能是源于首道次堆焊时,因采用 TC4 基体,熔合线附近的基板组织发生 α 相向 β 转变,在熔合线附近形成完全的 β 相组织,然后 β 相作为形核点经外延生长而快速长大,下道次成形时,在熔合线附近 β 晶粒继续外延长大,而在热影响区内,发生粗化,周而复始最终形成图 4 左侧所示的宏观粗大柱状 β 晶粒^[28]。

Wang 等^[28]沿不同方向在 TC4 单壁成形件不同位置取样,并与锻件

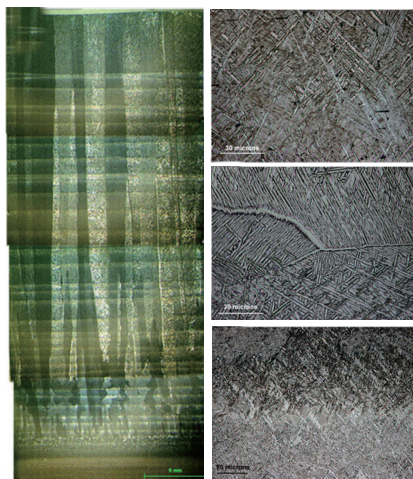


图4 GTAW堆焊成形TC4单壁零件宏观及微观组织特征^[28]

对比,评价沿成形方向及垂直于成形方向上成形件力学性能。在优化工艺参数下,虽然沿成形方向和垂直于成形方向抗拉强度存在一定差异,但强度差异并不显著。垂直于成形方向的塑性(沿柱状初生 β 晶粒方向)显著优于沿成形方向,比锻件高30%左右。在本课题组有关5A06铝合金电弧增材成形的性能研究中,获得了类似结论,成形件抗拉强度与锻件基本持平,但塑性显著提高。铝合金组织中并未出现图4中贯穿整个构件的宏观柱状组织,织构择优取向特征可能并非导致塑性提高的诱因,或许与成形过程中各层熔接特征相关,这一猜想有待进一步验证。增材制造最大的优势在于其复杂形状的构型能力,现阶段的研究工作主要聚焦于控形,而性能的研究仅限于表征其性能水平。成形过程受往复移动瞬时热源的前热、后热作用,凝固织构的取向、分布、晶粒度等必然与成形的热物理过程相关,因此以温度场演变特征为契机,实现形性一体化控制是增材制造有别于传统减材、等材加工方法的技术优势。

WAAM 在航空制造中应用前景

随轻量化、高机动性先进航空飞行器的发展,飞机结构件也向着轻量化、大型化、整体化改进,低成本高效

地制造高可靠性、功能结构一体化的大型航空结构件成为航空制造技术发展的新挑战。电弧增材制造以连续“线”作为基本构型单元,适于机体内部框架、加强肋及壁板结构的快速成形。目前,大型整体钛、铝合金结构在飞行器上的应用越来越多,虽然大型一体化结构件可显著减轻结构重量,但这种结构给传统减材、等材加工制造带来巨大困难。如美国F35的主承力构件仍需几万吨级水压机压制成形,后期需要大量繁琐的铣削、打磨等工序,制造周期长。大型框架、整体筋板加强筋和加强肋的增材制造等强烈依赖于机加工设备的结构件采用增材制造,可逾越国外对我国大吨位、高自由度机加工设备的技术封锁,推进我国先进航空飞行器研发进度。

此外,受限于传统加工技术,现代飞机零部件可能在结构、重量、形状等诸多方面有所妥协,以便于加工制造。基于增材制造技术在构型能力上的优势,面向电弧增材制造的结构优化设计,具有更大的设计自由度,可显著降低结构重量。EADS公司为空客激光增材制造了结构优化的机翼支架,比使用铸造的支架减重约40%,践行了面向增材制造的结构设计新思路,尤其面对大型结构件,结构优化设计可能会在减重方面具有更显著的效果。

2015年11月,纽约州已与Norsk Titanium达成“公、私合作协议”,纽约州将投资1.25亿美元建工业规模的3D打印工厂,厂址设在纽约州Plattsburgh市。其主要成形技术为电弧填丝增材制造,预计2016年竣工,该增材制造工厂首要目标是改变目前航空结构件大余量的钛金属去除状况,实现高效、低成本、高材料利用率地制造航空零部件。Norsk Titanium公司制造的某电弧增材成形零件成本可降低50%~70%,可缩短75%的产品上市时间。

发展际遇与挑战

不论是替代传统加工制造的部分环节,还是基于灵活的构型能力进行结构设计以优化结构,电弧增材制造技术付诸实践还需经过一定时期的发展完善过程。2012年3月,美国白宫宣布振兴美国制造的新举措,投资10亿美金帮助美国制造进行体系改革,增材制造作为实现该项计划的三大背景技术之一,旨在通过改善增材制造材料、装备及标准,实现创新设计的小批量、低成本数字化制造。英、德、法等国家也相继推出相关措施,推动本国增材制造技术的发展。英国在电弧增材制造研究领域处于国际前沿,以Cranfield大学为代表的一批研究机构在政府立项、企业出资参与下,针对电弧增材自动化控制、成形件力学性能研究、残余应力及变形控制、复杂形状构件成形路径规划和工业化应用准则等方面开展了系统研究,并逐步建立起政府、企业、科研机构的多层次研发团队梯队,与Airbus、Rolls-Royce、BAE System、Bombardier Aerospace、Astrium、EADS等一大批航空航天企业建立并开展广泛研究合作,研究目标对接工业化应用。增材制造的优势就在于工序简单,能够实现直接面对客户的制造,可省略其中环节而极大缩短研发周期。对增材制造而言,建立多层次多结构的研发体系,客户直接参与到制造中才能尽其所能地发挥其优势。

我国正处于推进“中国制造”向“中国创造”的战略转变时期,增材制造技术对增强我国产品自主创新能力,实现从“中国制造”向“中国创造”迈进有重要意义。增材制造技术及产品已经在航空航天、汽车、生物医药、文化创意等领域得到了初步应用,涌现出一批具有一定竞争力的骨干企业。但我国电弧增材制造产业化仍处于起步阶段,与先进国家

相比还存在较大差距,尚未形成完整的产业体系,离实现大规模产业化、工程化应用还有一定距离。关键技术有待突破,装备及核心器件、成形材料、工艺及软件等产业基础薄弱,政策与标准体系有待建立,缺乏有效的协调推进机制。尤其对我国电弧增材制造技术而言,其系统的研究工作起步相对较晚,较英国有一定的差距,应该在加快提升电弧增材制造技术水平的同时,加速发展其必备的核心器件,并就建立和完善产业标准体系等方面加快推进计划,以政府及国家规划为导向,鼓励更多的直接面向客户的企业参与其中,力争在短期内初步建立较为完善的产业体系,整体技术水平保持与国际同步,在航空航天等制造领域达到国际先进水平。

参 考 文 献

- [1] 卢秉恒,李涤尘.增材制造(3D打印)技术发展.机械制造与自动化,2013(4):1-4.
- [2] 刘大响,金捷,彭友梅,等.大型飞机发动机的发展现状和关键技术分析,航空动力学报,2008,23(6):976-980.
- [3] 李涤尘,贺健康,田小永,等.增材制造:实现宏微结构一体化制造.机械工程学报,2013,49(6):129-135.
- [4] WANG F, WILLIAMS S, RUSH M. Morphology investigation on direct current pulsed gas tungsten arc welded additive layer manufactured Ti-6Al-4V alloy. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011;57(5):597-603.
- [5] WANG H, KOVACEVIC R. Variable polarity GTAW in rapid prototyping of aluminum parts//Proceedings of the 11th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 2000: 369-376.
- [6] OUYANG J H, WANG H, KOVACEVIC R. Rapid prototyping of 5356-aluminum alloy based on variable polarity gas tungsten arc welding: process control and microstructure. Materials and Manufacturing Processes, 2002, 17(1): 103-124.
- [7] WANG H, KOVACEVIC R. Rapid prototyping based on variable polarity gas tungsten arc welding for a 5356 aluminium alloy. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2001,215: 1519-1527.
- [8] MUSCATO G, SPAMPINATO G, CANTELLI L. A closed loop welding controller for a rapid manufacturing process. IEEE, 2008:1080-1083.
- [9] CHARLES C, JÄRVSTRÅT N. Modelling Ti-6Al-4V microstructure by evolution laws implemented as finite element subroutines: Application to TIG metal deposition. 2009:477-485.
- [10] CHARLES C, JÄRVSTRÅT N. Finite element modelling of microstructure on GTAW metal deposition of Ti-6Al-4V alloy//Proceedings of 16th International Conference & Mathematical Modelling and Information Technologies in Welding and Related Processes, 2006.
- [11] CHARLES C, JÄRVSTRÅT N. Development of a microstructure model for metal deposition of titanium alloy Ti-6Al-4V. 2007:1201-1205.
- [12] BAUFELD B, BIEST O, GAULT R. Microstructure of Ti-6Al-4V specimens produced by shaped metal deposition. International Journal of Materials Research, 2009, 100(11): 1536-1542.
- [13] BAUFELD B, BIEST O. Mechanical properties of Ti-6Al-4V specimens produced by shaped metal deposition. Science and Technology of Advanced Materials, 2009, 10(1):1-10.
- [14] BAUFELD B, BIEST O, GAULT R, et al. Manufacturing Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: microstructure and mechanical properties//Proceedings of Trends in Aerospace Manufacturing 2009 International Conference, 2009.
- [15] BAUFELD B, BRANDL E, BIEST O. Wire based additive layer manufacturing: comparison of microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V components fabricated by laser-beam deposition and shaped metal deposition. Journal of Materials Processing Technology, 2011,211(6): 1146 - 1158.
- [16] BAUFELD B, BIEST O, Gault R. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: microstructure and mechanical properties. Materials & Design, 2010,31: 106-111.
- [17] KAZANAS P, DEHERKAR P, ALMEIDA P, et al. Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2012, 226(6): 1042-1051.
- [18] CLARK D, BACHE M R, WHITTAKER M T. Shaped metal deposition of a nickel alloy for aero engine applications. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 203(1-3):439-448.
- [19] 彭善德,刘顺洪,丁冬平,等.机器人堆焊快速成型的实验研究.电焊机,2006,36(3):33-36.
- [20] MARTINA F, MEHNEN J, WILLIAMS S W, et al. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti - 6Al - 4V. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(6):1377-1386.
- [21] SPENCER J D, DICKENS P M, WYKES C M. Rapid prototyping of metal parts by three-dimensional welding. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 1998, 212(3): 175-182.
- [22] KWAK Y M, DOUMANIDIS C. Geometry regulation of material deposition in near net shape manufacturing by thermally scanned welding. Journal of Manufacturing Processes, 2002, 4(1):28-41.
- [23] DOUMANIDIS C, KWAK Y M. Geometry modeling and control by infrared and laser sensing in thermal manufacturing science and engineering. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001, 123: 45-52.
- [24] DOUMANIDIS C, KWAK Y M. Multivariable adaptive control of the bead profile geometry in gas metal arc welding with thermal scanning. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2002, 79: 251-262.
- [25] 熊俊.多层单道GMA增材制造成形特性及熔敷尺寸精确控制[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [26] ALMEIDA P M S, WILLIAMS S. Innovative process model of Ti-6Al-4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT)// Solid Freeform Fabrication Symposium, 2010.
- [27] DING J, COLEGROVE P, MEHNEN J, et al. Thermo-mechanical analysis of wire and arc additive layer manufacturing process on large multi-layer parts. Computational Materials Science, 2011,50: 3315 - 3322.
- [28] WANG F, WILLIAMS S, COLEGROVE P. Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013,44A: 968-977.

(责编 台系)