

航空航天轻质金属材料电弧熔丝增材制造技术

李 权^{1,2}, 王福德¹, 王国庆³, 曾晓雁², 罗志伟¹, 马存强¹, 张 磊¹

- (1. 首都航天机械有限公司, 北京 100076;
2. 华中科技大学武汉光电国家研究中心, 武汉 430074;
3. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

[摘要] 航空航天轻质化、高性能整体结构日趋广泛的应用,对高效、低成本快速研制提出了迫切的要求。电弧熔丝增材制造与其他金属 3D 打印技术相比,具有制造成本低、成形效率高等特点,为解决这一问题提供了可能。综述了国内外铝合金、钛合金等轻质金属材料电弧熔丝增材制造技术的研究现状,指出了目前存在的主要问题及发展方向。最后,分析了电弧熔丝增材制造大型构件的应力与变形控制、路径规划软件、成形过程在线监控与反馈控制等共性关键技术的发展趋势。

关键词: 电弧熔丝增材制造; 铝合金; 钛合金; 缺陷控制; 近净成形

Wire and Arc Additive Manufacturing of Lightweight Metal Components in Aeronautics and Astronautics

LI Quan^{1,2}, WANG Fude¹, WANG Guoqing³, ZENG Xiaoyan², LUO Zhiwei¹, MA Cunqiang¹, ZHANG Lei¹

- (1. Capital Aerospace Machinery Corporation Limited, Beijing 100076, China;
2. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
3. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

[ABSTRACT] Light-weight integrated large components with high properties in aviation and aerospace industry are required to be manufactured efficiently and cheaply. Low cost and high deposition rate make wire and arc additive manufacturing (WAAM) a more suitable candidate for manufacturing the large scale and medium complexity parts, comparing with other 3D printing technologies. The development including the existing problems and feasible solution methods of aluminum and titanium WAAM technology is reviewed in this paper. The key technologies in the manufacturing large WAAM components, such as control of internal stress and strain, path planning and online monitoring, are also discussed.

Keywords: Wire and arc additive manufacturing; Aluminum alloy; Titanium alloy; Defects control; Near-net-shape forming

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.03.074

金属增材制造技术无需模具,可以根据零件三维模型直接成形,具备制造周期短、小批量零件生产成本低等特点,可以解决型号研制阶段快速响应的难题,在航空航天领域取得了快速发展^[1-3]。目前,金属增材制造技术所使用的热源有 3 类:激光、电子束和电弧。以激光作为热源的金属增材制造技术有基于铺粉的激光选区熔化(Selective Laser Melting, SLM)和基于送粉的激光熔化沉积(Laser Melting Deposition, LMD);以电子束作为热源的金属增材制造技术有基于铺粉的电子

束选区熔化(Electron Beam Selective Melting, EBSM)和基于送丝的电子束熔化沉积(Electron Beam Freeform Fabrication, EBF³)。

电弧熔丝增材制造技术(Wire and Arc Additive Manufacturing, WAAM)采用电弧或等离子弧作为热源,将金属丝材熔化逐层沉积成形,制造出接近产品形状和尺寸要求的三维金属坯件,再辅以少量机械加工最终达到产品的使用要求。同 LMD 和 EBF³ 一样,WAAM 是一种金属材料近净成形制造技术,所不同的是采用的热

源和材料送进方式。该技术被欧洲航天局称为一种低能耗、可持续的绿色环保制造技术,特别适用于难加工、贵金属零件的增材制造。20世纪90年代中期,英国著名航空发动机公司罗尔斯-罗伊斯(Rolls-Royce)与克兰菲尔德大学(Cranfield University)合作开展了高温合金的WAAM技术研究,并成功地将其应用于飞机发动机高温合金机匣的制造生产中。

但是,该技术在国内外一直未引起足够的重视,因此研发基础相对国外有不小的差距。近年来,随着增材制造技术向高效率、低成本的方向发展,WAAM越来越受到国内航空航天工业的重视,许多大学、研究机构、企业纷纷投入精力重点研究,力争在WAAM领域占据先机。

本文重点介绍国内外航空航天轻质金属材料WAAM技术的应用现状及存在的问题,通过对大型构件WAAM共性关键技术分析,为WAAM技术的发展指明方向。

1 航空航天大型金属构件的WAAM应用背景

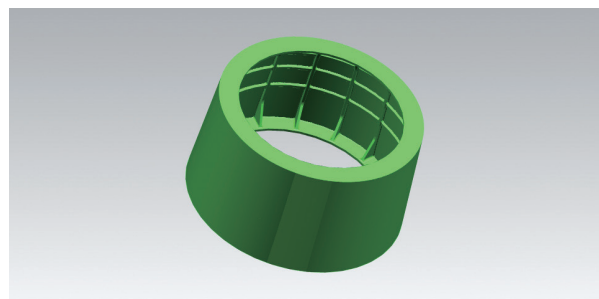
1.1 航空航天典型构件的结构特点

随着航空、航天武器装备的发展,越来越多的部件采用高性能、高可靠性、轻量化的整体结构,零件结构趋向复杂化、大型化,传统的铸造、锻造结合机加工的制造模式难以满足型号研制和生产过程高效、低成本的制造需求。

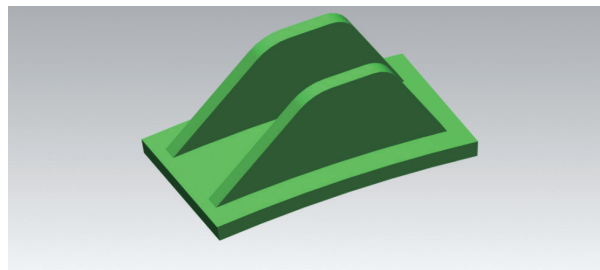
在航天领域,壳段是各类导弹武器装备的关键部件,是典型的薄壁复杂铝合金结构(见图1(a)),材料为ZL114A、ZL205A或2A14铝合金,一般呈圆筒形,直径为500~2000mm,壁厚为2~10mm。为保证结构的刚度,内壁通常有交叉分布的环筋和纵筋,筒端有向内的翻边法兰,局部有凸台、肋板等。钛合金接头是各类运载火箭的关键承力构件(见图1(b)),一般由底座和凸耳组成,尺寸接近1m。舵翼骨架是控制导弹飞行的关键部件(见图1(c)),材料为TC4或TA15钛合金,为了兼顾刚度和减重需求,多采用复杂交叉筋结构,长度为400~3000mm,筋厚4~20mm。

在航空领域,飞机机翼肋板(见图2(a))是关键承力件,由壁板、加强筋等结构组合而成,尺寸达数米级,材料为2024铝合金。飞机机翼翼梁(见图2(b))、起落架支撑外翼肋(见图2(c))等关键承力零件,也主要为复杂交叉壁板结构,尺寸达1m级,材料为TC4钛合金。

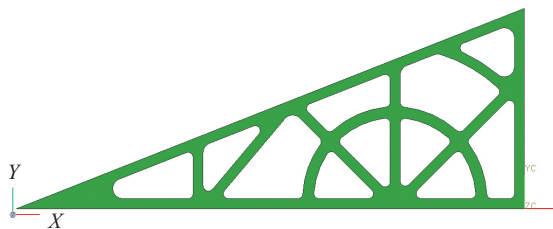
以上航空、航天领域的复杂铝合金、钛合金结构现阶段一般采用铸造或锻造+机加工的方式成形。对于强度要求较高的铝合金壳段,采用ZL114A、ZL205A高强铝合金铸造时,易出现偏析、裂纹、气孔等缺陷,成品率较低。对于钛合金舵翼、接头、翼梁等关键承力构件,



(a) 铝合金壳段



(b) 钛合金接头



(c) 钛合金舵翼骨架

图1 航天装备的典型结构

Fig.1 Typical aerospace structure

需采用力学性能较高的锻件,面临加工周期长、材料利用率低、制造成本高等问题。以图2(c)所示的钛合金起落架外翼肋为例,采用锻件机加工方案制造,材料利用率为15.6%。在航天、航空领域的型号研制阶段,传统的制造方法难以满足设计的快速响应需求,影响型号研制进度,制造方法和生产模式迫切需要变革。

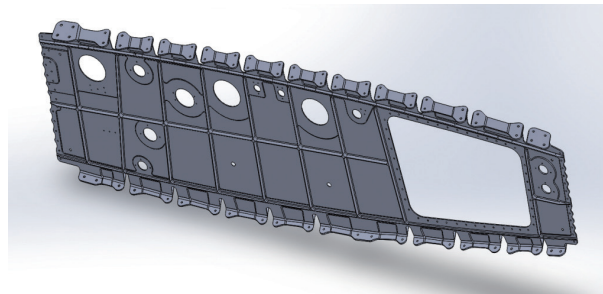
1.2 WAAM技术的特点

WAAM技术有两种形式,图3(a)所示为基于熔化极电弧的同轴送丝形式,采用工艺方法为常规的熔化极弧焊工艺(Melted Inert Gas Arc Welding, MIG)或冷金属过渡焊工艺(Cold Metal Transfer, CMT);图3(b)所示为基于等离子弧(Plasma Arc, PA)的旁轴送丝形式,其中等离子弧也可换作钨极氩弧(Tungsten Inert Gas Arc Welding, TIG)。

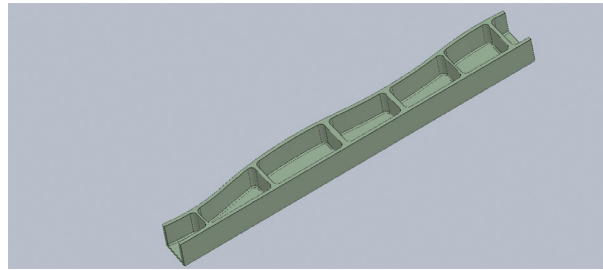
不同的增材制造技术因成形原理不同而具有显著特点和特定应用领域。基于铺粉的SLM、EBSM技术成形精度高,适用于小型复杂结构零件的近净成形,但沉积效率低(0.01kg/h左右)。WAAM、EBF³技术沉积效

率高(可达 5kg/h 以上),适用于大型结构的快速成形,但成形精度低^[4]。

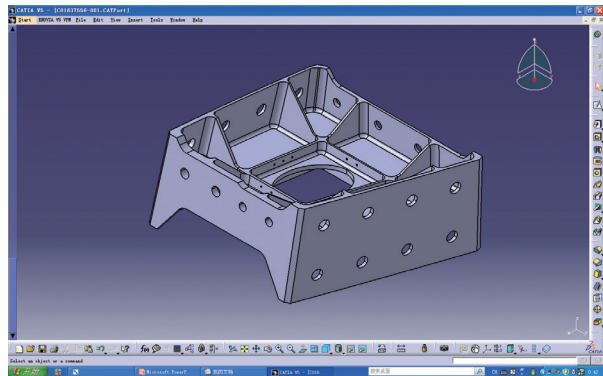
与其他增材制造技术相比,WAAM 具有设备投资少、运行成本低、沉积效率高、材料利用率高等特点,使大型金属构件的高效、低成本制造成为可能,越来越受



(a) 铝合金飞机机翼肋板



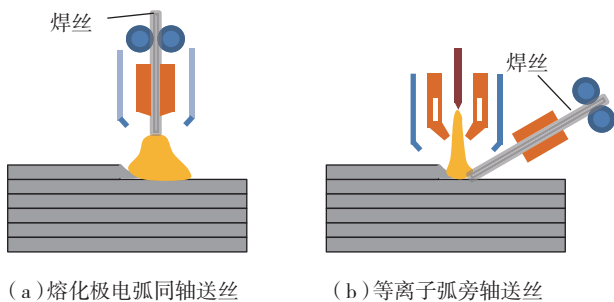
(b) 飞机机翼翼梁(钛合金)



(c) 飞机主起落架支撑外翼肋(钛合金)

图2 航空装备的典型结构

Fig.2 Typical aviation structure



(a) 熔化极电弧同轴送丝

(b) 等离子弧旁轴送丝

图3 WAAM原理图

Fig.3 Principle sketch of WAAM process

到国内外航空航天制造业的重视。WAAM 一般采用商品化的 CMT、TIG、PA 等常用焊接电源,以及机器人或数控机床作为焊枪的运动执行机构,铝合金和钛合金沉积效率达 1kg/h 以上,不锈钢及高强钢沉积效率达 4kg/h 以上^[5]。但与 SLM、LMD 技术相比,WAAM 成形构件的晶粒一般要更为粗大,力学性能略低,表 1^[6-7]所示为 3 种不同增材制造技术成形的 TC4 钛合金对比,可见 WAAM 的强度最低,SLM 的强度最高。

目前,WAAM 成形材料主要是钛合金、高温合金、高强钢、不锈钢和高强铝合金。WAAM 高温合金技术已经被罗尔斯-罗伊斯公司成功地应用于飞机发动机高温机匣制造。WAAM 大型钛合金、铝合金结构尚未实现工程化应用,仍处于关键技术研发阶段。

2 铝合金材料的 WAAM 技术

2.1 铝合金WAAM技术研究现状

国外,英国克兰菲尔德大学 Williams Stewart 领导的课题组于 2010 年开始研究基于 CMT 工艺的铝合金 WAAM 技术,涉及铝合金牌号包括 2024、2219、5087、4043 等,系统研究了焊丝质量、熔滴过渡模式、保护气流量、层间碾压压力等因素对铝合金 WAAM 结构气孔及力学性能的影响。

该课题组通过对 5 种不同商品化的 4043 铝合金焊丝 WAAM 成形性的对比研究^[8],发现焊丝内、外部质量对成形性能有重要影响,WAAM 工艺对焊丝质量的要求甚至要高于焊接。焊丝表面刮削质量不佳或凹坑处附着油脂,成形过程中会产生飞溅,导致沉积层表面出现黑灰;焊丝显微硬度和成分不均匀,会导致送丝和电弧不稳、成形精度差;焊丝内部的显微气孔是氢的聚集点,会遗传至成形构件中,在构件内部产生大量气孔。

通过对比研究标准 CMT、脉冲 CMT (CMT-P)、变极性 CMT (CMT-ADV)、脉冲变极性 CMT (CMT-PADV) 4 种典型熔滴过渡模式(见图 4^[9])对 2219 铝合金 WAAM 成形质量的影响,发现 CMT-PADV 因具有热输入低、焊丝阴极清理效果好等优点,成形的单壁墙内部气孔最少^[9]。并且,CMT-PADV 对保护气流量的变化最不敏感,在 10~25L/min 的流量范围内成形时,气孔

表1 不同增材制造技术成形的TC4力学性能对比

参数	SLM (沉积态)		LMD (沉积态)		WAAM (沉积态)	
	X-Y	Z	X-Y	Z	X-Y	Z
屈服强度 / MPa	1111~1138	1118~1173	1060	920	950	803
抗拉强度 / MPa	1191~1227	1119~1201	1130	1050	1033	918
伸长率 / %	8.0~8.5	3.5~6.5	9.5	15.0	9~12	12~17

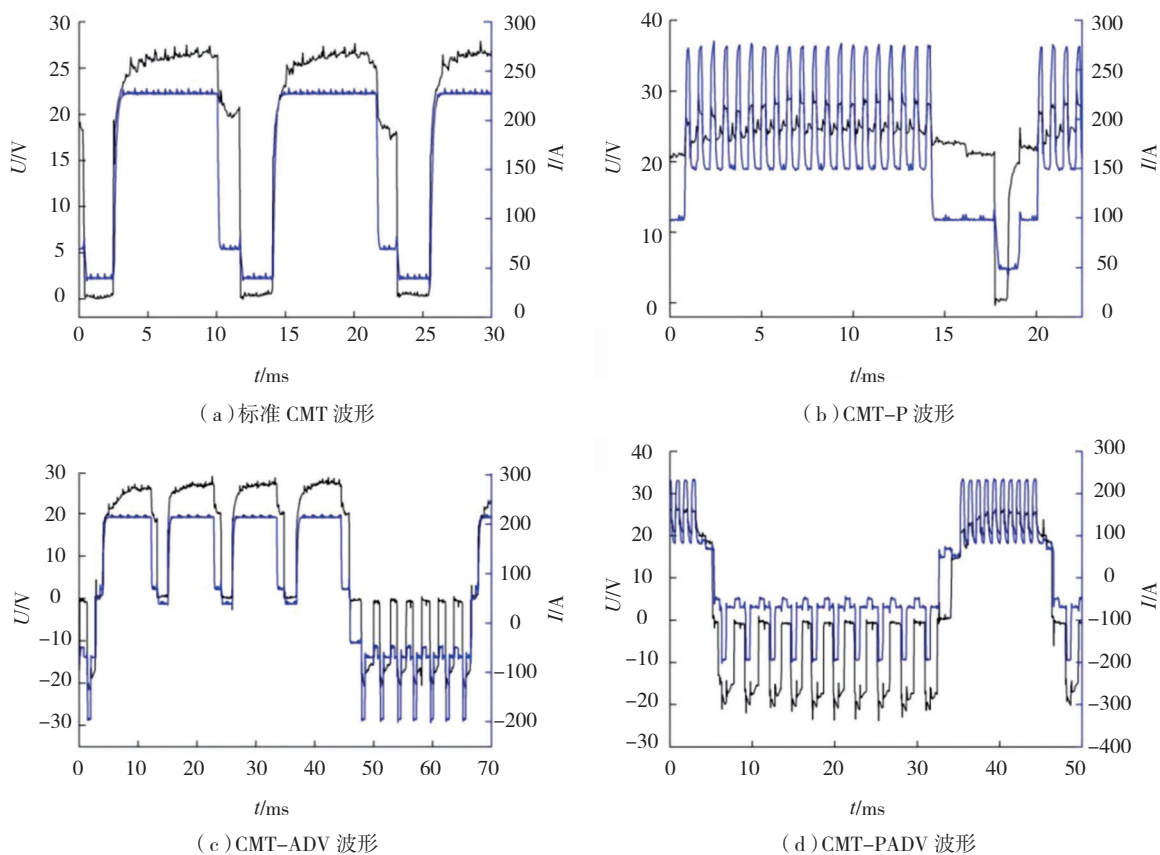


图4 4种CMT熔滴过渡模式的电流、电压波形

Fig.4 Arc current and voltage waveforms of four CMT droplet transition modes

率都较低,而其他3种模式需保护气流量超过25L/min才能有效避免气孔的产生。

克兰菲尔德大学研究人员采用轧辊对WAAM试件压缩变形(见图5^[10]),并研究了层间碾压压力对2219、5087铝合金WAAM单壁墙试件显微组织、气孔及力学性能的影响^[10-11]。研究表明:随着碾压压力的增加,沉积态试样因晶粒尺寸减小、位错密度增加,显微硬度和

力学性能提高;施加层间碾压后,沉积态微气孔被压扁,随着碾压压力的增加,微气孔数量逐渐减少,当碾压压力为45kN时,微气孔消失;T6热处理后,经过45kN碾压和未经碾压的2219铝合金WAAM试件强度无差异,抗拉强度和屈服强度均达到450MPa和305MPa,但经过45kN层间碾压的试样延伸率要比未经层间碾压的高23%。

表2^[12]所示为目前克兰菲尔德大学电弧熔丝增材制造的2219、2024铝合金力学性能与2219、2024板材力学性能的对比如。可见,WAAM试件T6热处理后,力学性能均超过了同成分的锻件T6态水平。在此基础上,克兰菲尔德大学还开展了大量的铝合金WAAM技术应用研究,试制了诸多铝合金零件(见图6),处于国际领先水平。为保证原材料与零件质量比小于1.5,研究者建议铝合金沉积效率为1kg/h左右。

近年来,国内哈尔滨工业大学、华中科技大学、首都航天机械有限公司、北京航星机器制造公司等单位也陆续开展了不同牌号铝合金的WAAM技术研究。

首都航天机械有限公司于2013年开始研究基于变极性TIG工艺的ZL114A铝合金WAAM技术,成形的

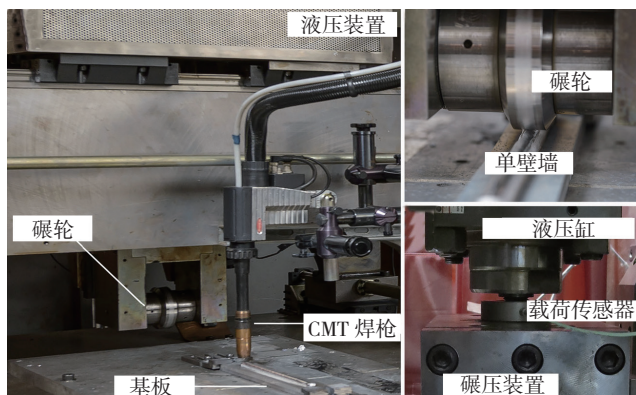


图5 克兰菲尔德大学WAAM同步碾压技术装置

Fig.5 Rolling and WAAM deposition equipment of Cranfield University

ZL114A 试件 T6 热处理后,力学性能基本无方向性,接近铸件 1 级水平(见表 3)。同时,也发现基于 TIG 工艺的 WAAM 技术成形效率低,小于 0.2kg/h,采用旁轴送丝很难成形复杂零件。随后,开展了基于 CMT 工艺的 WAAM 技术研究,成形的 ZL114A 试件 T6 热处理后,力学性能达到铸件 2 级水平,没有明显的方向性(见表 3)。

华中科技大学与首都航天机械有限公司于 2015 年合作开展了基于 CMT 工艺的 2219 铝合金 WAAM 技术研究。研究表明,基于 CMT 工艺的 WAAM 铝合金的成形效率可以达到 1.4kg/h。成形的 2219 铝合金 T6 热处理后,力学性能有一定的各向异性(见表 3),离锻件水平还有一定的距离。针对这一问题,哈尔滨工业大学 Bai 等^[13]研究了 WAAM 成形 2219 铝合金的力学行为,他们发现层间密集分布的气孔及较严重的共晶偏析是导致各向异性的原因。北京航空航天大学齐铂金课题组提出采用复合超高频脉冲方波的电弧,沉积态气孔减少,力学性能相比常规 TIG 电弧有一定提高^[14]。

针对航天领域的铝合金支座、舱段、框梁、网格等典型结构,首都航天机械有限公司、北京航星机器制造公司、华中科技大学等单位分别开展了应用试制(见图 7),目前均处在探索研究阶段。

2.2 铝合金WAAM存在的问题及发展方向

WAAM 技术本质是连续堆焊过程,因此焊接所遇到的问题在 WAAM 过程中同样存在。对于航空航天常用的可热处理强化 ZL114A、2219、2024 铝合金,其 WAAM 成形时所面临的主要问题是气孔和热裂纹。

(1) 气孔问题。

TIG、CMT 是目前普遍采用的两种用于铝合金 WAAM 的工艺方法。相比于 TIG, CMT 的气孔敏感性要高,这在 ZL114A 铝合金 WAAM 成形时体现得尤为明显。这是因为 CMT 有熔滴过渡过程,弧柱温度高,熔滴比表面积大,更容易吸氢。对于气孔问题,首先应从焊丝质量控制入手。WAAM 是一个由点到线再到面最后到体的长时间叠加过程,对焊丝的质量要求比焊接过

表2 2219和2024铝合金WAAM试件力学性能

材料		屈服强度 / MPa	抗拉强度 / MPa	延伸率 / %
WAAM2219 铝合金	沉积态	130	260	15.5
	T6 态	309	455	13.6
锻造 2219 铝合金	O 态	76	172	18
	T6 态	290	414	10
WAAM2024 铝合金	沉积态	185	287	11.4
	T6 态	407	499	8.3
锻造 2024 铝合金	O 态	70	185	20
	T6 态	393	476	10

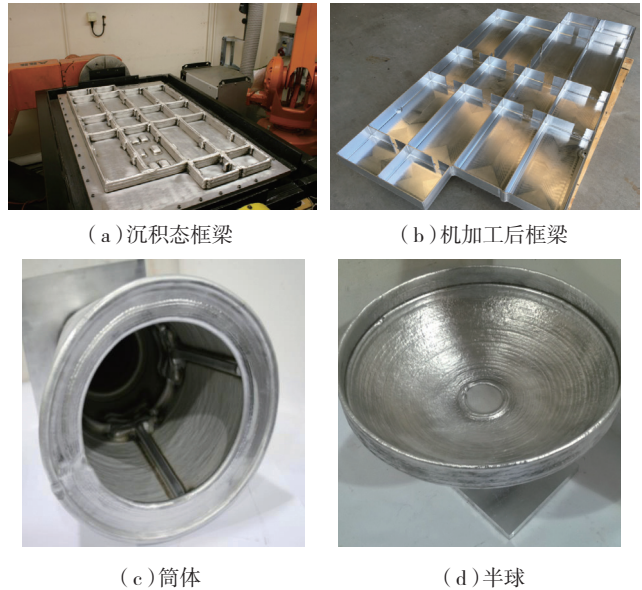


图6 克兰菲尔德大学的WAAM铝合金零件
Fig.6 WAAM aluminum parts of Cranfield University

表3 首都航天机械公司WAAM铝合金T6热处理后力学性能

材料		屈服强度 / MPa	抗拉强度 / MPa	延伸率 / %
WAAM(TIG) ZL114A 铝合金	X-Y	283	350	10.0
	Z	270	335	9.5
WAAM(CMT) ZL114A 铝合金	各向同性	225	320	9.0
WAAM (CMT) 2219 铝合金	X-Y	288	410	7.8
	Z	282	348	4.3

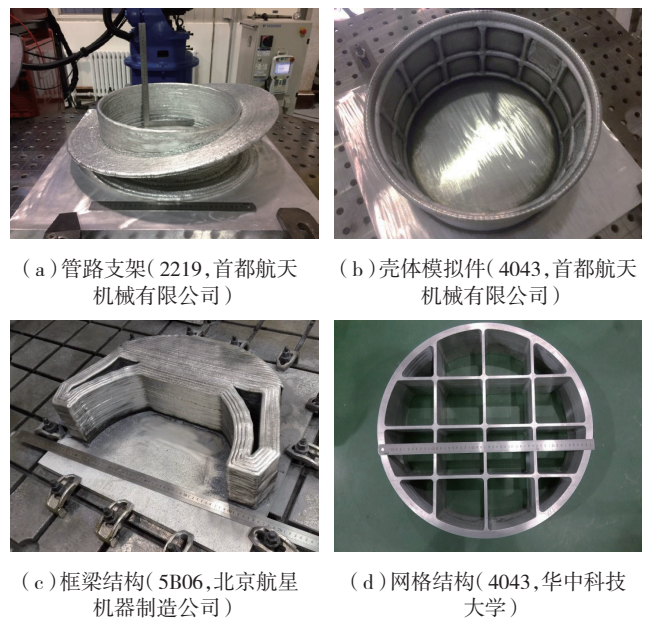


图7 WAAM成形的铝合金零件
Fig.7 Homemade WAAM aluminum parts

程更严格。因此,需要发展 WAAM 用丝材质量标准或规范,从源头上控制 WAAM 成形时的气孔。其次,应发展高品质的弧焊工艺,例如北京航空航天大学齐铂金团队正在研发的超高频脉冲 MIG,通过复合超高频脉冲电流,在熔池中引入强烈的搅拌作用,使气孔更容易逸出。

(2) 热裂纹问题。

2219、2024 高强铝合金 WAAM 成形时的热裂纹有两种,即沉积态热裂纹和热处理热裂纹。在成形交叉结构或多层多道复杂结构时,在熄弧位置由于冷速快、缺乏液态金属补充、热应力大等原因,往往容易出现沉积态热裂纹,需通过成形策略和熄弧控制来避免其产生。与铸件不同,WAAM 成形的构件内部残余应力大,如果热处理制度不当,残余应力未完全消除,会导致固溶、淬火过程中构件内部产生热处理热裂纹。因此,需要研究制定适用于 WAAM 成形构件的热处理制度。

3 钛合金材料的 WAAM 技术

3.1 钛合金 WAAM 技术的研究现状

相比铝合金,钛合金机械加工成形和铸造热成形性能都比较差,采用传统加工工艺生产周期长、成本高,对近净成形的需求更加迫切。因此,国内外研究机构对钛合金 WAAM 研究较多。比利时鲁汶大学和英国克兰菲尔德大学自 2010 年相继开展钛合金 WAAM 技术的研究,早期均以 TIG 作为熔化焊丝的热源。2012 年,克兰菲尔德大学开始研究基于等离子弧的钛合金 WAAM 技术,与 TIG 相比,等离子弧沉积效率更高^[15]、更方便控制。

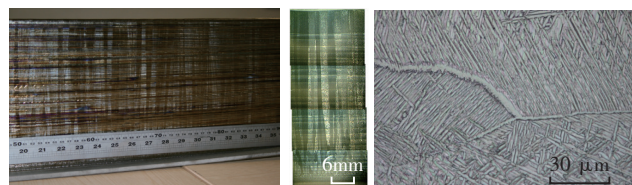
Wang 等^[7,16]和 Baufeld 等^[17-18]研究表明,WAAM 成形的 TC4 钛合金存在宏观粗大的初生 β 柱状晶组织,如图 8 (a)、(b) 所示。柱状晶从成形基板一直生长至单壁墙试样的顶部,生长方向与成形策略相关,沿单一方向沉积时,柱状晶与基板呈一定的斜角;往返式沉积时,柱状晶与基板近乎垂直。在初生 β 柱状晶内部是 $\alpha + \beta$ 的魏氏组织(见图 8 (c))。

为了改善粗大的柱状晶组织,学者们探索了不同的工艺方法。Wang 等^[16]采用脉冲 TIG 熔丝增材制造 TC4 钛合金,在研究中发现:调整脉冲电流峰值与基值比值、脉冲频率、焊枪移动速度等均不能抑制柱状晶生长;而通过增大送丝速度增加凝固前沿的过冷度,可以一定程度抑制柱状晶的生长,但工艺窗口较窄。克兰菲尔德大学 Williams Stewart 课题组研究发现层间碾压可以抑制 WAAM 成形 TC4 钛合金柱状晶的生长,使其发生等轴晶转变,随着层间碾压压力的提高,晶粒逐渐细化,如图 9 所示。与未碾压的相比,经过碾压后的沉积态抗拉强度达到 1075MPa,各向异性基本消除,力学性能大幅超过锻件水平(见表 4)。此外,他们还发现层间

碾压可降低残余应力并减少基板变形^[19]。

国内,王福德研究团队提出在等离子弧熔丝增材制造 TC4 钛合金过程中引入超声冲击,同样也实现了柱状晶向等轴晶的转变^[20]。如图 10 所示,未经超声处理的试样中存在粗大的柱状晶组织;而经过超声冲击处理后的试样,宏观组织中未发现柱状晶的存在,取而代之的是等轴晶组织,冲击 4 次后,晶粒尺寸明显减小。超声冲击后,水平方向抗拉强度略有降低,垂直方向抗拉强度显著提高,各向异性也基本消除。

在钛合金 WAAM 技术应用研究方面,英国克兰菲尔德大学走在国际前列,与欧洲航天局、洛克希德·马丁



(a) 沉积态表面 (b) 沉积态的光镜组织 (c) 放大后的沉积态显微组织

图8 典型WAAM成形的TC4钛合金组织

Fig.8 Typical structure of the WAAM TC4 alloy as deposited

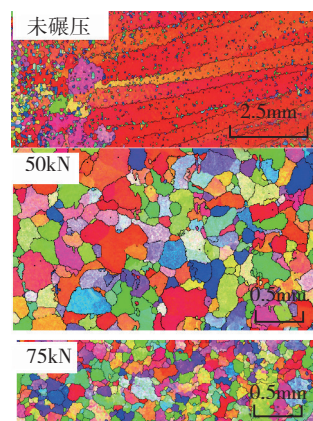


图9 不同碾压压力的WAAM钛合金EBSD显微组织

Fig.9 EBSD grain of WAAM titanium alloy with different interpass rolling pressure

表4 TC4钛合金WAAM试件力学性能

状态	方向	屈服强度 / MPa	抗拉强度 / MPa	延伸率 / %	文献
沉积态	X-Y	850	980	9.0	[7]
	Z	803	918	14.0	
沉积态	X-Y	881	963	7.9	[21]
	Z	860	938	16.5	
沉积态 + 层间碾压	X-Y	1020	1075	13.0	[22]
	Z	995	1075	13.0	
沉积态 + 超声冲击	X-Y	—	980	7.1	[20]
	Z	—	1004	8.4	
锻件	—	825	895	10	—

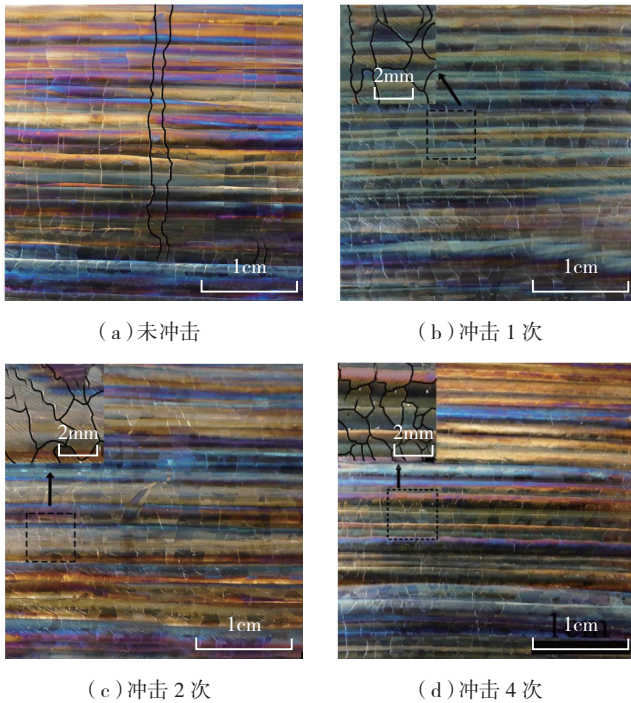


图10 不同超声冲击次数的WAAM钛合金宏观组织
Fig.10 Macrostructure of WAAM titanium alloy with different ultrasound impact times

公司和庞巴迪公司开展了广泛合作,成功制造出了飞机机翼翼梁和起落架支撑外翼肋,并能成形高复杂度的零件,如图 11 所示。目前,其钛合金沉积效率达到 1~2kg/h,构件力学性能达到锻件水平,钛合金零件最大单方向成形尺寸达到 1.5m。

挪威 Norsk Titanium 是国际上较早(2010年)从事 WAAM 装备商业化开发的公司,其开发的第 4 代 WAAM 装备(见图 12 (a))最大成形尺寸接近 1m,因采用双等离子弧工艺,钛合金最大沉积效率达到 10kg/h,但牺牲了成形精度。WAAM 成形钛合金构件(见图 12 (b))力学性能达到了锻件水平。2016 年该公司 WAAM 钛合金技术获得了美国联邦航空管理局(FAA)的 TRL 8 级认证。

3.2 钛合金WAAM技术的发展方向

钛合金 WAAM 成形缺陷问题没有铝合金的严重,相对容易控制。主要问题在于成形时极易获得与增材制造方向一致的宏观粗大的柱状晶组织,造成成形试件静态力学性能具有明显的方向性,而且沿增材制造方向的强度通常也只能达到锻件标准的下限。克兰菲尔德大学 Williams Stewart 团队提出层间碾压可以抑制柱状晶的生长,但目前仅限于简单结构,对于复杂结构 WAAM 成形时的层间碾压还有许多关键技术问题需要解决。王福德研究团队提出的超声冲击方法也可使 WAAM 成形时的柱状晶向等轴晶转变,所受成形结构

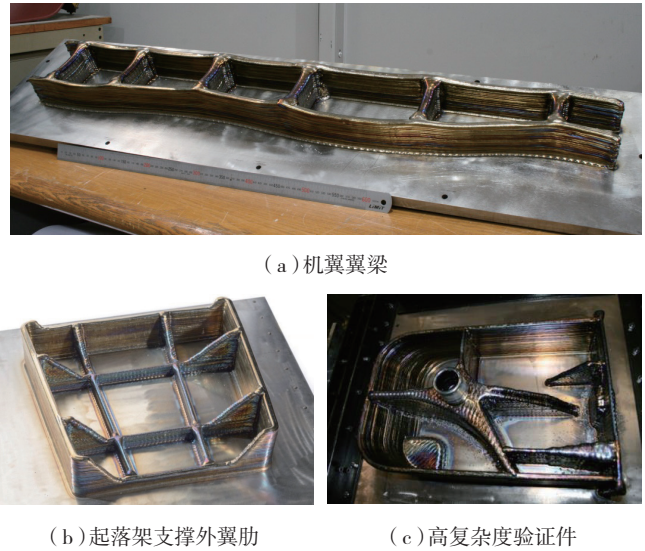


图11 英国克兰菲尔德大学WAAM的钛合金零件
Fig.11 Titanium WAMM parts of Cranfield University



(a) 等离子弧熔丝增材制造装备



(b) 成形的钛合金零件

图12 Norsk Titanium公司等离子弧熔丝增材制造装备及成形零件
Fig.12 WAAM equipment and manufactured titanium parts of Norsk Titanium Company

的限制较少,易于工程化应用,但晶粒细化的机理尚需进一步的深入研究。

此外,基于 TIG 或 PA 的钛合金 WAAM 工艺因采用旁轴送丝,沉积效率仍然偏低(一般为 1~2kg/h)。为提高沉积效率,目前普遍采用多电弧复合或多路沉积的方法。多电弧复合可以显著提高沉积效率,但还需解决成形精度下降以及热输入增加所导致的晶粒粗大问题。多路沉积的方法,可使沉积效率成倍增加,但需要解决多路沉积的任务分区与拼接、沉积头的协调运动等问题。

4 航空航天构件 WAAM 共性关键技术

4.1 WAAM 大型构件的应力与变形控制

WAAM 过程由于具有非均匀(温度不均匀、组织不均匀、变形不均匀)、多尺度(熔池-构件多尺度、溶质扩散-热扩散-动量扩散-应力传递多尺度)、快速(温度快速变化、非平衡快速凝固)、热-组织-应力应变多重耦合的特点,导致熔敷过程应力大、容易开裂、构件残余应力和变形大。对轻合金 WAAM 增材制造温度场和应力应变场进行科学描述,从而进行精确工艺调控,是解决其变形开裂的有效途径。然而,电弧逐点沉积的高度复杂性使得成形件内应力来源极其复杂,典型应力包括:电弧周期性、长时间剧烈热循环作用下形成的热应力;超高温梯度加热和冷却过程中合金短时非平衡相变形成的组织应力;移动熔池在强约束下的快速凝固形成的凝固收缩应力。如何描述热应力、组织应力及凝固收缩应力的形成机理、演化规律以及三者之间非稳态耦合行为,如何量化电弧成形件内部残余应力水平并揭示其对零件变形开裂及力学性能的影响规律,是关键科学挑战。

除以上关键科学问题外,针对不同结构特点大型构件,一方面需研究分块制造、对称制造、最小投影面成形策略、阶段去应力退火等变形控制方法,形成成套的 WAAM 变形控制技术;另一方面,需要研究适应增材制造特点的大型构件 WAAM 过程应力与变形高效数值模拟方法,实现在成形前预测变形,优化成形策略,并针对性地制定变形控制措施。

4.2 适应 WAAM 特点的路径规划软件技术

现有的增材制造模型分层切片方法主要采用沿 Z 轴的单方向分层。该方法对于悬空结构需要增加支撑,而对于具有空间曲面连接特征的结构,如内壁带网格的壳体、基面为曲面的接头等,则无法沿曲面进行分层切片。

多方向的模型切片分层方法已经被很多国外学者提出,以解决零件悬空结构的支撑问题。美国密歇根

大学(University of Michigan)的 Singh 等^[23]提出将零件模型分解为若干子部分,对各个部分分别确定切层方向,进而达到减少支撑结构的目标。同样为解决支撑结构问题,美国密苏里科技大学(Missouri University of Science and Technology)的 Ruan 等^[24]提出了自适应的切层方法,可根据零件特征生成不同方向的非均匀切片。美国南卫理公会大学(Southern Methodist University)的 Dwivedi 等^[25]将人工智能概念引入增材制造的路径规划中,开发了一套专家系统以决定增材制造的切片方向。澳大利亚卧龙岗大学(University of Wollongong)的 Ding 等^[26]提出了基于曲率的模型分解与重组方法,并提取相关特征以简化模型,该方法对于含有孔形特征的模型很有效。其他相关机构的研究思路和以上方法类似,基本上是采取模型分解和子模型分析,进而决定分层切片的方向。这些方法虽然具有一定的多方向分层能力,但主要是局限于平面分层切片方法,基于该方法生成的路径仍然是 3 坐标的平面路径,而对于含有空间曲面连接的模型则不能进行很好的处理。北京航空航天大学赵罡课题组提出的基于零件几何特征的曲面分层切片方法能够同时适应增材制造 3 坐标与 5 坐标轨迹生成需求,能够实现基底面为空间自由曲面的局部特征增材制造,是基于工业机器人 WAAM 成形的路径规划软件发展方向。

4.3 成形过程在线监控与反馈控制技术

研究表明,影响 WAAM 内部质量和成形精度的关键过程因素包括电流、电压、送丝速度、焊枪距沉积层高度、焊枪移动速度、层间温度和成形腔气氛等。对 WAAM 成形时的过程参数的监测与反馈控制是保证成形构件质量稳定的关键。

美国南卫理公会大学的 Ouyang 等^[27]设计了基于 TIG 增材制造的弧长控制系统,该系统采用 CCD 视觉传感对弧长进行检测,通过调整 Z 轴的高度实现弧长控制。美国塔夫茨大学(Tufts University)的 Kwak 等^[28]使用结构光传感器对 MIG 增材制造沉积层形貌进行了监测,并采用红外摄像机对温度进行监测。意大利卡塔尼亚大学的 Bonaccorso 等^[29]在 TIG 增材制造系统中实现了对电弧形态、温度场、电弧声音以及电参数的传感,开发了基于 Labview 的人机交互界面,并通过弧长的实时调节,实现了对沉积层高度尺寸的控制。国内,西安交通大学的胡晓东^[30]设计了基于传感器的等离子弧增材制造过程监控系统,采用双摄像头传感系统对熔池形貌进行采集,通过对图像进行二值化处理,并采用模糊 PID 控制方法,使成形质量得到了有效改善。南昌大学的徐建宁^[31]设计了基于电压反馈的熔焊快速成形尺寸模糊控制系统,该系统通过采集焊接电压来间接测量弧

长,以焊接电压作为反馈量,通过模糊控制器来实时调整焊接参数以达到控制成形尺寸的目的。哈尔滨工业大学的熊俊^[32]设计了双被动视觉传感系统,实现了对熔敷层宽度和喷嘴到熔敷层上表面距离的实时检测,设计的PSD控制器对熔宽和层高尺寸进行精确控制,其精度可达0.4mm。然而这些系统尚不能满足工程化应用要求,为保证WAAM零件质量,迫切需要实现对以上多因素进行实时监控和反馈处理。

5 结论

WAAM本质是一种基于电弧熔丝的堆焊技术,通过与计算机控制技术、机器人技术相结合而焕发出了新的生命力。作为对目前发展较快的激光、电子束增材制造技术的有益补充,WAAM将大大推进金属增材制造技术在航空航天装备制造业的全面发展,推动制造技术的深度变革,产生显著的社会和经济效益。

但是,WAAM技术所面临的问题也不容小觑,需要不同学科背景的团队共同研究,突破WAAM大型铝合金、钛合金构件的内部质量与性能控制、应力与变形控制、路径规划软件、成形过程在线监控与反馈控制等关键技术,这样才能稳步推进该技术在航空、航天领域的逐步应用。

参考文献

[1] 刘业胜, 韩品连, 胡寿丰, 等. 金属材料激光增材制造技术及在航空发动机上的应用[J]. 航空制造技术, 2014, 57(10): 62-67.

LIU Yesheng, HAN Pinlian, HU Shoufeng, et al. Development of laser additive manufacturing with metallic materials and its application in aviation engines[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(10): 62-67.

[2] 巩水利, 锁红波, 李怀学. 金属增材制造技术在航空领域的发展与应用[J]. 航空制造技术, 2013, 56(13): 66-71.

GONG Shuili, SUO Hongbo, LI Huaixue, et al. Development and application of metal additive manufacturing technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(13): 66-71.

[3] 田宗军, 顾冬冬, 沈理达, 等. 激光增材制造技术在航空航天领域的应用与发展[J]. 航空制造技术, 2015, 58(11): 38-42.

TIAN Zongjun, GU Dongdong, SHEN Lida, et al. Application and development of laser additive manufacturing technology in aeronautics and astronautics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(11): 38-42.

[4] FRAZIER W E. Metal additive manufacturing: a review[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(6): 1917-1928.

[5] WILLIAMS S W, MARTINA F, ADDISON A C, et al. Wire + arc additive manufacturing[J]. Materials Science and Technology, 2016, 32(7): 641-647.

[6] 陈静, 张霜银, 薛蕾, 等. 激光快速成形Ti-6Al-4V合金力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2007(3): 475-479.

CHEN Jing, ZHANG Shuangyin, XUE Lei, et al. Mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy by laser rapid forming[J]. Rare Metals and Engineering, 2007(3): 475-479.

[7] WANG F D, WILLIAMS S, COLEGROVE P, et al. Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V[J]. Metallurgical and Materials Transactions Part A, 2013, 44(2): 968-977.

[8] GU J L, DING J L, CONG B Q, et al. The influence of wire properties on the quality and performance of wire+arc additive manufactured aluminium parts[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1081: 210-214.

[9] CONG B Q, DING J L, 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(9-12): 1593-1606.

[10] GU J L, DING J L, WILLIAMS S W, et al. The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 230(4): 26-34.

[11] GU J L, DING J L, 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.

[12] GU J L, DING J L, WILLIAMS S W, et al. High performance aluminium properties for space applications using wire+arc additive manufacturing[C]//Proceedings of the 1st Metallic Materials and Processes: Industrial Challenges. Deauville, 2015.

[13] BAI J Y, FAN C L, LIN S, et al. Mechanical properties and fracture behaviors of GTA-additive manufactured 2219-Al after an especial heat treatment[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26(4): 1808-1816.

[14] 孙红叶, 从保强, 苏勇, 等. Al-6.3Cu 铝合金电弧填丝增材制造成形与组织性能[J]. 航空制造技术, 2017, 60(14): 72-76.

SUN Hongye, CONG Baoqiang, SU Yong, et al. Geometry, microstructure and properties of wire+arc additive manufacturing Al-6.3Cu alloy deposits[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(14): 72-76.

[15] 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[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(6): 1377-1386.

[16] WANG F D, WILLIAMS S, RUSH M. Morphology investigation on direct current pulsed gas tungsten arc welded additive layer manufactured Ti6Al4V alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 57(5-8): 597-603.

[17] BAUFELD B, BIEST O V D. Mechanical properties of Ti-6Al-4V specimens produced by shaped metal deposition[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2009, 10(1): 1536-1542.

[18] BAUFELD B, BIEST O V D, GAULT R. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: microstructure and mechanical properties[J]. Materials & Design, 2010, 31: S106-S111.

[19] MARTINA F, ROY M J, SZOST B A, et al. Residual stress of as-deposited and rolled wire+arc additive manufacturing Ti-6Al-4V components[J]. Materials Science and Technology, 2016, 32(14): 1439-1448.

[20] 何智. 超声冲击电弧增材制造钛合金零件的组织性能研究

(下转第89页)