

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2020.265

# Ti-6Al-4V 合金电弧熔丝增材的组织性能研究进展

夏玉峰, 滕海灏, 张 雪, 郑德宇, 权国政

(重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** Ti-6Al-4V 钛合金具有密度低、高温下组织稳定、强度高的特点, 被广泛应用于机翼翼梁、起落架支撑肋等航空工业关键零部件的制造。电弧熔丝增材技术研究始于 20 世纪 80 年代, 该技术具有成型效率高、原材料利用率高、设备简单等优势。目前, 学界对 Ti-6Al-4V 合金电弧熔丝增材技术开展了广泛研究并已取得一定成果。笔者综述了电弧熔丝增材制造技术的发展历史及研究热点, 并整合了国内外 Ti-6Al-4V 合金电弧熔丝增材技术的最新研究及应用情况, 对电弧熔丝增材制造 Ti-6Al-4V 合金的组织性能特性及调控工艺进行了总结与展望。

**关键词:** Ti-6Al-4V 合金; 电弧熔丝增材; 力学性能; 调控工艺

**中图分类号:** TG146.23

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2022)04-087-13

## A review of the wire arc additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy: properties, defects and quality improvement

XIA Yufeng, TENG Haihao, ZHANG Xue, ZHENG Deyu, QUAN Guozheng

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** Ti-6Al-4V titanium alloy has the characteristics of low density, stable structure and high strength at high temperature. It is widely used in the manufacturing of key parts of aviation industry, such as wing beam, landing gear support rib. The wire arc additive manufacturing technology began in 1980s, which has the advantages of high forming efficiency, high utilization rate of raw materials and simple equipment. At present, the wire arc additive manufacturing technology of Ti-6Al-4V alloy has been widely studied and some progresses have been achieved. This paper reviews the development history and research hotspots of wire arc additive manufacturing technology, and summarizes its latest research and application at home and abroad. The microstructure, mechanical properties and control technology Ti-6Al-4V alloy produced by wire arc additive manufacturing are summarized and prospected.

**Keywords:** Ti-6Al-4V alloy; wire arc additive manufacturing; mechanical property; control technology

**收稿日期:** 2020-06-06 **网络出版日期:** 2020-10-27

**基金项目:** 国家重点研发计划项目课题(2018YFB1106502); 国家自然科学基金面上项目(51775068); 重庆市技术创新与应用示范专项产业类重点研发项目(cstc2018jszx-cydzX0121); 国家工业强基工程(TC180A3Y1/18); 重庆市技术创新与应用发展(重点项目(目标导向类))(cstc2019jszx-mbdx0080)。

Supported by National Key Research and Development Program of China(2018YFB1106502), National Natural Science Foundation of China(51775068), Key Industrial R & D Project of Technology Innovation and Application Demonstration in Chongqing(cstc2018jszx-cydzX0121), National Industrial Foundation Project(TC180A3Y1/18), and Key Project of Technological Innovation and Application Development in Chongqing(cstc2019jszx-mbdx0080).

**作者简介:** 夏玉峰(1972—), 博士生导师, 教授, 主要研究方向为塑性成型工艺、模具增材制造, (E-mail) 1501476512@qq.com。

Ti-6Al-4V 合金是 20 世纪 50 年代研发出的一种  $\alpha+\beta$  型钛合金, 由于其密度低、高温力学优良等优势, 被广泛应用于机翼翼梁、起落架支撑肋等飞机关键零部件的制造, 成为国产大飞机轻量化、大型化和长寿化发展历程中不可缺少的关键材料<sup>[1-2]</sup>。Ti-6Al-4V 合金存在锻造温度区间窄、高温组织性能对生产环境敏感、成型阻力大等工艺特性, 传统工艺生产大型航空钛合金结构件呈现制造周期长、生产成本高的特点, 设备损耗大, 钛合金产品一次成形合格率低<sup>[3-4]</sup>。近年来, 增材制造技术 (additive manufacturing, AM) 的发展为复杂钛合金构件成型瓶颈的突破提供了全新的思路。增材制造技术是将熔融金属按特定路径逐层沉积凝固, 获得近净成形零件的一种技术<sup>[5-6]</sup>。增材制造技术无需配套零件模具, 生产速度快, 设备通用性高, 材料利用率高, 目前已获得了国内外学者的广泛关注<sup>[7-10]</sup>。

电弧熔丝增材制造技术 (wire arc additive manufacturing, WAAM) 通过电弧熔化丝材, 并根据产品三维模型将熔融金属按线-面-体逐层堆积、凝固成形出金属部件<sup>[11]</sup>。电弧熔丝增材制造技术原理图如图 1 所示。相较于其他增材制造技术, 电弧熔丝增材制造技术以丝材为沉积原材料, 材料利用率和沉积效率高; 生产时无需真空环境, 生产成本低, 设备通用性强, 在航空钛合金大型部件生产中具有广阔的研究、应用前景<sup>[12-14]</sup>。笔者综述了电弧熔丝增材制造技术的发展历史及研究热点, 并整合了国内外 Ti-6Al-4V 合金电弧熔丝增材技术的最新研究及应用情况, 对电弧熔丝增材制造 Ti-6Al-4V 合金的组织性能特性及调控工艺进行了总结与展望。

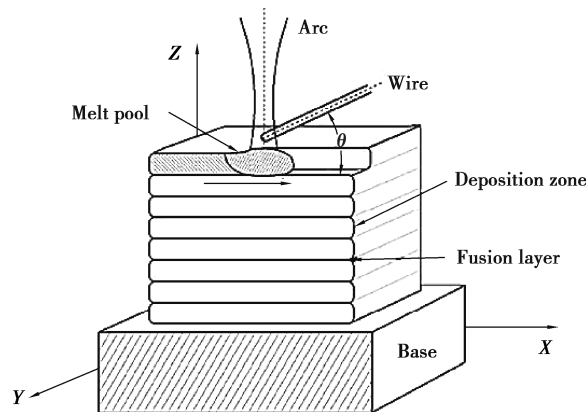


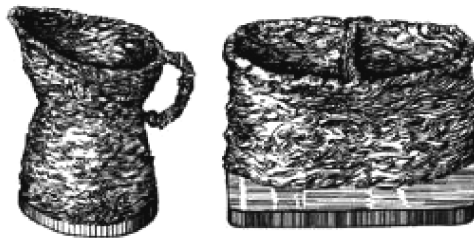
图 1 电弧熔丝增材制造技术原理图<sup>[11]</sup>

Fig. 1 Schematic illustration of wire arc additive manufacturing technology<sup>[11]</sup>

## 1 电弧熔丝增材制造发展历程

电弧熔丝增材制造工艺的研究始于 20 世纪 20 年代。1925 年美国的 Bake 申请了世界上第一个电弧熔丝增材制造工艺专利<sup>[15]</sup>。以电弧为热源, 在外加气体保护下堆积熔融金属, 制造出了第一个电弧熔丝增材制造的花托和装饰性收纳篮 (如图 2 所示)。20 世纪 70 年代初期, 德国 Krupp 公司等开始研制利用埋弧焊工艺制造大尺寸的全焊缝金属构成的大型规则零件, 标志着电弧熔丝增材制造工艺开始进入快速发展时期, 但由于制造设备精度的限制, 该阶段的电弧熔丝增材制造工艺只能制造形状简单、精度要求不高的大型金属零件。进入 20 世纪八九十年代后期, 计算机辅助设计与制造技术的快速发展, 使该工艺的发展进入全新时期。Ribeiro 等将 CAD 设计软件与电弧熔丝增材设备相结合, 设计出世界上首套电弧熔丝增材智能快速成型系统, 并基于该系统生产出一个形状完好、表面较为光滑的金属花瓶。该零件的成功生产也标志着电弧熔丝增材制造工艺发展进入自动化、智能化时代。进入新世纪, 随着电弧熔丝增材制造工艺与制造设备的不断改进优化, 该技术也开始被运用于航空复杂结构件的制造。目前, 罗尔斯罗伊斯公司成功地运用该工艺完成钛合金航空发动机高温机匣及铝合金飞机机翼肋板等复杂航空构件的制造。

但是, 零件的成功试制并不意味着电弧熔丝增材制造工艺已经实现大规模投入工业应用, 该工艺仍处于关键技术研发阶段。为实现电弧熔丝增材制造工艺的大规模应用, 降低航空大型钛合金、铝合金结构件的生

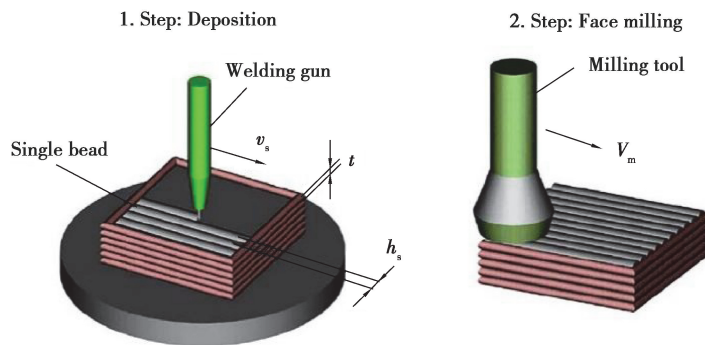
图2 电弧熔丝增材制造金属花托和装饰性收纳篮<sup>[15]</sup>Fig. 2 The first torches and decorative storage baskets formed by wire arc additive manufacturing<sup>[15]</sup>

产周期与制造成本,还应解决以下共性问题:

1)大型构件的焊接过程应力、变形控制。电弧熔丝增材制造按一定顺序对熔融金属进行逐层堆积,凝固过程具有金属层间温度及组织非均匀性高,金属过冷度高、温度变化大,温度-组织-应力应变耦合复杂的特点,导致焊接过程残余应力大,常出现焊后变形、开裂等缺陷<sup>[16]</sup>。提高轻合金电弧熔丝增材制造过程温度场和应力应变场预测精度,深化对焊接过程热应力、组织应力及凝固收缩应力的形成机理、晶粒演化规律的研究,形成电弧熔丝增材制造零件残余应力水平及焊接裂纹成形量化规律,成为电弧熔丝增材制造大规模应用的关键科学挑战<sup>[17]</sup>。

2)制造过程实时监控与反馈控制技术研发。焊接电流电压、送丝速度、焊枪角度、保护气体种类及浓度等的多个因素均可能对电弧熔丝增材制造构件内部质量和成形精度造成显著影响。因此,制造过程实时监控与反馈控制技术的研发对增材制件质量与精度的提高有重要意义。Ouyang等<sup>[18]</sup>将CCD视觉传感引入增材制造过程,实现了对MIG电弧熔丝增材过程电弧长度的控制。Kwak等<sup>[19]</sup>使用结构光传感器与红外摄像机实现了对增材制造过程沉积层形貌与温度的监测。胡晓东<sup>[20]</sup>在离子弧增材制造过程中使用双摄像头传感系统实现了对焊接熔池的实时监控。熊俊<sup>[21]</sup>则利用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。然而,现有实时监控与反馈系统仍无法实现对焊接过程的全程监控与参数实时调控。提高电弧增材制造构件质量需在此方面加大研发力度。

3)增减材复合制造技术的创新研发。为提高增材制造试样的成型精度,国内外研究机构将不同的增、减材制造工艺进行集成,开发出了多种类型的复合制造系统<sup>[22]</sup>。目前,主要有2种方式,一种是将焊接设备与数控机床复合;另一种是将焊接设备与多自由度机器人复合。张海鸥等<sup>[23]</sup>将离子电弧增材成形与铣削光整减材工艺相结合,突破了电弧增材制件表面粗糙度大的这一关键瓶颈问题。Song等<sup>[24]</sup>将数控铣削加工设备与熔化极气体保护电弧增材制造设备相结合,其原理如图3所示,并成功运用该技术制造注塑模具,证实了电弧熔丝增减材复合技术的可行性与发展前景性。

图3 电弧增材成形铣削光整减材复合工艺原理<sup>[24]</sup>Fig. 3 Process principle of wire arc additive manufacturing and milling<sup>[24]</sup>

## 2 电弧增材钛合金组织及性能特征

Ti-6Al-4V合金是目前航空工业领域应用最为广泛的钛合金,但该合金的机械加工成形性能和锻造成型

性能都比较差,采用传统加工工艺生产周期长、成本高,使用电弧熔丝增材制造 Ti-6Al-4V 钛合金复杂构件的研究需求更加迫切。国内外诸多学者对 Ti-6Al-4V 合金电弧熔丝增材后的微观组织特点进行了深入研究,应用元胞自动机技术建立了钛合金加工过程晶粒演化、组织演变模型,并基于实验结果及建立的晶粒演化模型不断优化焊接工艺参数,实现了对焊后试样组织的调控。Baufeld 团队研究了焊接顺序及温度分布对 Ti-6Al-4V 合金电弧熔丝增材制造后显微组织的影响<sup>[25-27]</sup>。研究发现使用 TIG 热源电弧熔丝增材制造后 Ti-6Al-4V 合金组织为粗大的外延生长  $\beta$  柱状晶, $\beta$  柱状晶的指向随焊接方向的改变而改变(如图 4(a)所示),焊接熔池内的最大温度梯度则决定  $\beta$  柱状晶生长方向。沉积顺序则影响 Ti-6Al-4V 合金带状组织生成。沉积底层钛合金过冷度较低,且经历了多次的加热-冷却热处理循环,最终组织为相对粗大的网状  $\alpha$  结构,宏观上体现为平行的周期性等轴晶组织,如图 4(b)(d)所示;上层钛合金冷却速度较快,最终组织为细小的  $\alpha$  集束,无带状组织生成,如图 4(b)(c)所示。Baufeld 将增材制造后钛合金组织不均匀性解释为:Ti-6Al-4V 合金电弧熔丝增材制造过程中,试样中间层某一区域的热循环温度属于  $\beta$  转变温度区间或  $\alpha + \beta$  转变温度区间,导致微观组织发生相变,并最终转变为带状组织。当沉积最后一层钛合金金属时,试样上半部区域温度都处于  $\beta$  转变温度以上,因而产生如图 4(b)所示的顶部区域组织。电弧熔丝增材制造过程中焊接电弧热输入越大,冷却后钛合金试样中带状组织面积越小。实际加工过程中,往往通过调节温度场实现对组织含量的控制。Wang 等<sup>[5]</sup>在使用 TIG 热源焊接时也产生了相似的  $\beta$  柱状晶组织,如图 5(a)所示,还研究了送丝速度对焊后组织转变的影响。实验将焊接速度保持为 0.24 m/min,并逐渐增加送丝速度。当送丝速度大于 2.2 m/min 时,柱状  $\beta$  晶粒最终将转变为等轴晶形貌,如图 5(b)所示。这是因为送丝速度的增加使得更多的 Ti-6Al-4V 焊丝被送入熔池,提供更多的异质形核点促进柱状晶粒向等轴晶粒转变<sup>[28]</sup>。但 Baufeld 和 Wang 研究结果中柱状  $\beta$  晶粒的生长方向略有不同,这是因为在焊接过程中 Baufeld 采用单一方向送丝增材,而 Wang 则采用交替往复方式进行沉积。两者实验结果差异说明沉积过程中散热路径对柱状  $\beta$  晶粒的生长方向将产生显著影响。刘宁<sup>[29]</sup>则从固态相变角度解释了 Ti-6Al-4V 合金电弧后区域组织差异的产生机理。 $\beta$  相变点温度值对钛合金组织不均匀性产生影响,焊接过程中层间温度差异及  $\beta$  相区以及  $\alpha + \beta$  相区冷却速率不同最终导致钛合金电弧熔丝增材制造后区域组织不均匀性。研究后发现带状组织主要为粗化的魏氏  $\alpha$  结构,而层带间的组织主要为网状  $\alpha$  结构。

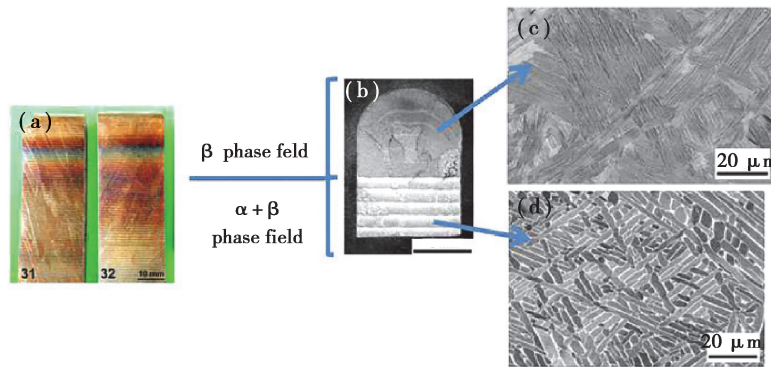
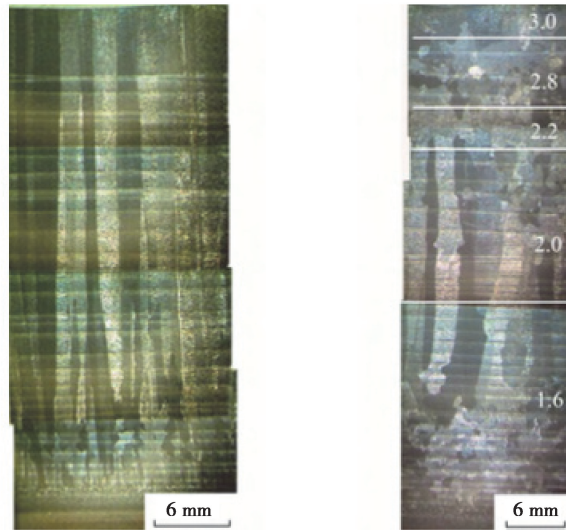


图 4 (a)试样外表面形貌;(b)试样截面腐蚀图;(c)试样上层区域 SEM 图;(d)试样底端区域 SEM 图<sup>[30]</sup>

Fig. 4 (a) The surface morphology of the sample; (b) the corrosion section of the sample; (c) the SEM of the upper layer of the sample; (d) SEM of the bottom area of the sample<sup>[30]</sup>

近年来,国内外学者尝试利用有限元(finite element, FE)与元胞自动机(cellular automation, CA)技术研究了 Ti-6Al-4V 合金电弧熔丝增材制造过程的组织演化规律<sup>[31]</sup>。杨海欧等<sup>[30,32]</sup>对电弧熔丝增材工艺制造钛合金直壁墙过程中焊接工艺参数对宏观晶粒演化规律的影响进行了研究。该研究以单道单层焊接实验修正后双椭球热源模型形状参数<sup>[33]</sup>(图 6)对 4 组电弧熔丝增材制造钛合金直壁墙实验中的熔池温度场及温度变化速率进行了模拟(图 7),并对制造过程中宏观组织的演变规律进行了分析。模拟及实验结果表明:增加焊接速度与送丝速度,降低焊接电流能降低试样底部生成的等轴晶尺寸。李晗嫣等<sup>[11]</sup>基于 PROCAST 平台研



(a) 柱状晶组织

(b) 送丝速度对晶粒转变的影响

图 5 送丝速度改变对 Ti-6Al-4V 合金微观组织的影响<sup>[5]</sup>

Fig. 5 Effect of variable wire feed speed on microstructure of Ti-6Al-4V alloy<sup>[5]</sup>

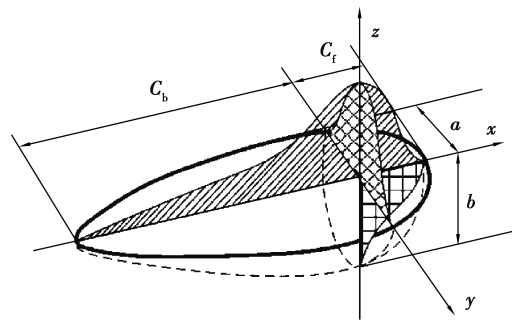
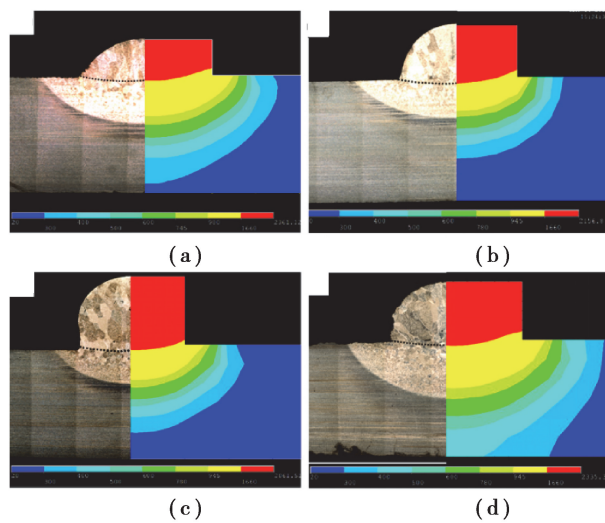


图 6 双椭球热源模型示意图<sup>[33]</sup>

Fig. 6 Schematic diagram of double ellipsoid heat source model



(a)

(b)

(c)

(d)

图 7 各工艺参数下钛合金 WAAM 过程熔池温度场模拟及实验对照<sup>[32]</sup>

Fig. 7 Simulation and experimental comparison of temperature field in WAAM process of titanium alloy under various process parameters<sup>[32]</sup>

究了 WAAM 过程中温度场与钛合金固液转变、初始  $\beta$  晶形核及生长、晶体取向的作用,如图 8~10 所示。研

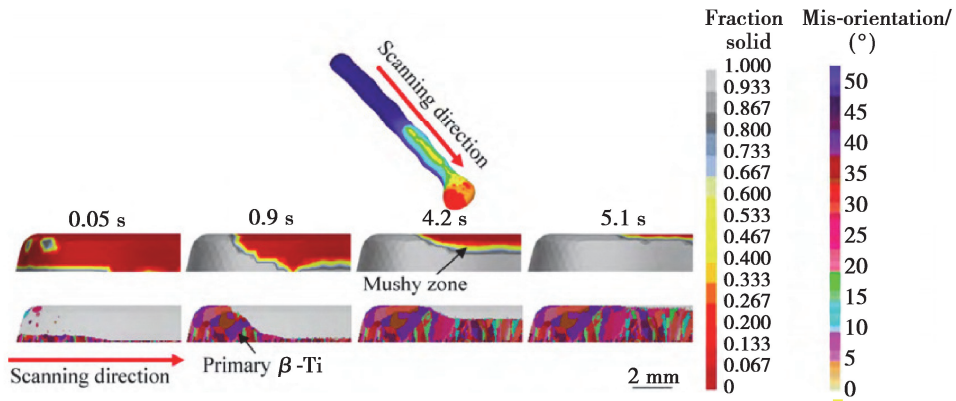


图 8 钛合金 WAAM 初始阶段温度梯度分布、液固转变及初始  $\beta$  晶形核生长<sup>[11]</sup>

Fig. 8 Temperature gradient distribution, liquid-solid transition and initial  $\beta$ -nucleation growth of Ti-6Al-4V alloy at WAAM initial stage<sup>[11]</sup>

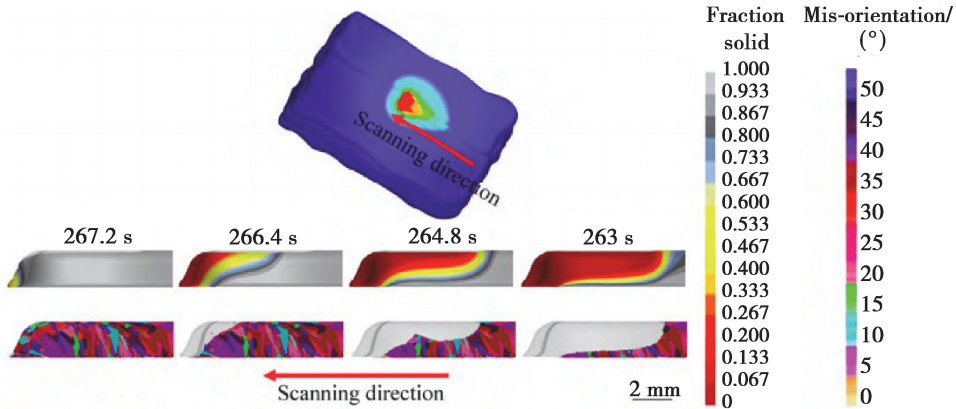


图 9 钛合金 WAAM 稳定阶段温度梯度分布、液固转变及初始  $\beta$  晶形核生长<sup>[11]</sup>

Fig. 9 Temperature gradient schematic, liquid-solid transition and primary  $\beta$ -Ti nucleation-growth of Ti-6Al-4V alloy at WAAM stabilization stage<sup>[11]</sup>

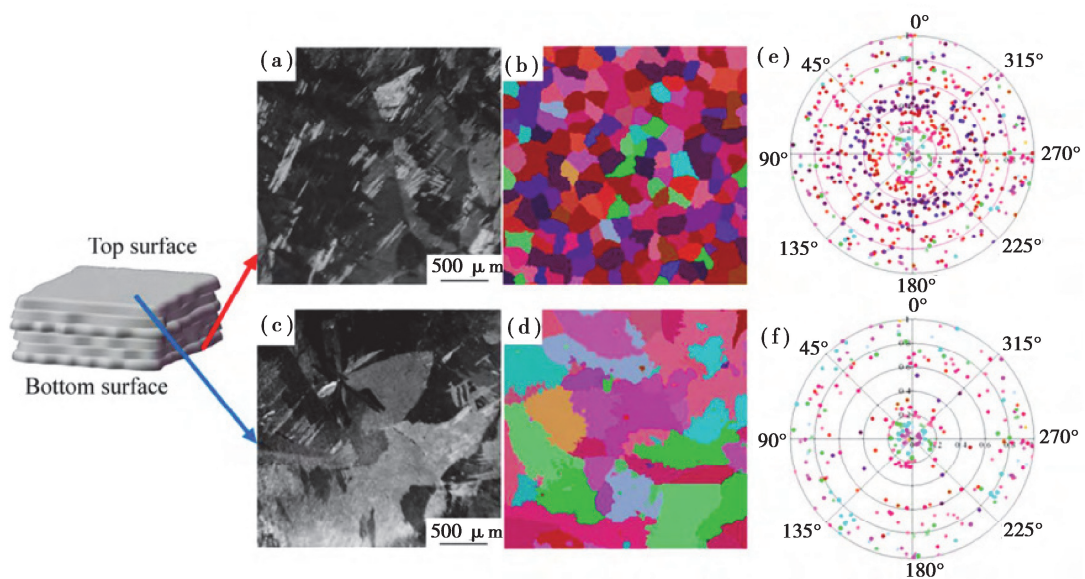
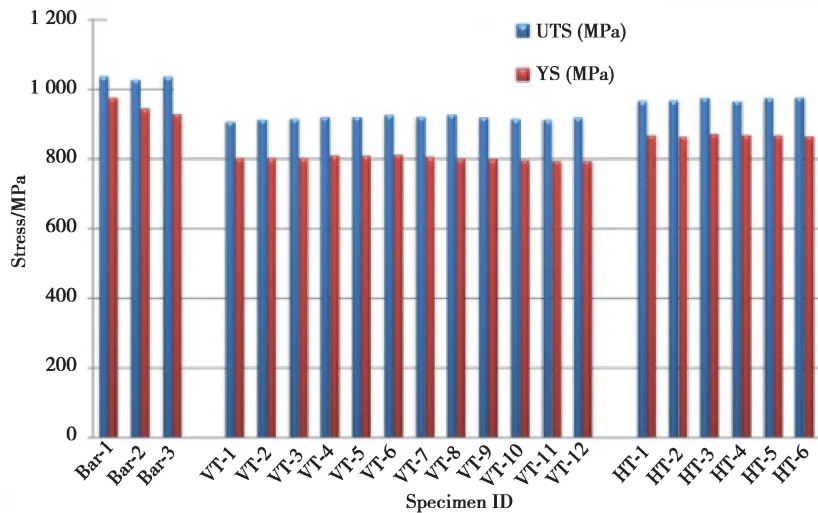


图 10 钛合金丝 WAAM 制造中初始  $\beta$ -Ti 的实际与模拟结果对照及上下表面的晶粒  $\langle 001 \rangle$  取向极图<sup>[11]</sup>

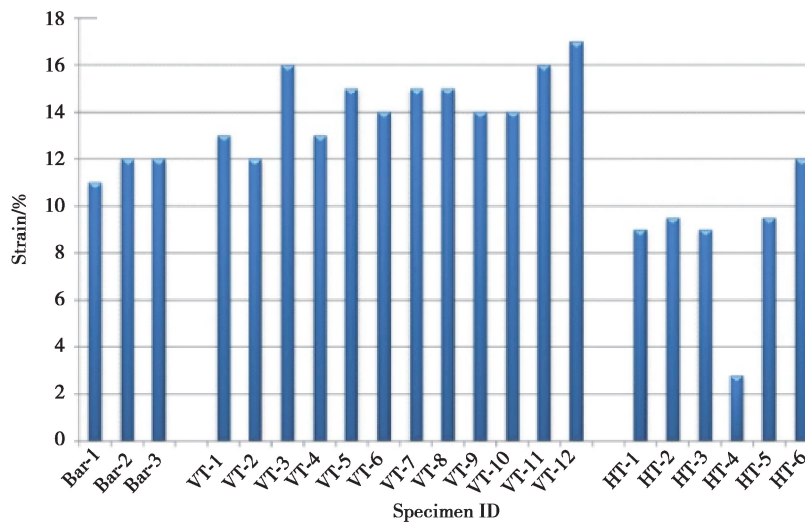
Fig. 10 Comparison of actual experiment and simulated results of primary  $\beta$ -Ti crystals of wire+arc additive manufactured Ti-6Al-4V alloy, and polar diagrams of  $\langle 001 \rangle$  grain orientation deviations<sup>[11]</sup>

究表明:PROCAST 平台凝固及 CAFE 模块能对 Ti-6Al-4V 合金的电弧熔丝增材过程微观组织演变进行较高精度的模拟;随着增材制造过程的进行,试样水平区域温差减小,固-液转变糊状区域平均宽度增加,钛合金初始  $\beta$  晶平均晶粒尺寸增加;晶体取向与焊接热流传递方向近似相同(与实验中焊接冷基板方向相垂直)。

电弧增材制造钛合金的力学性能是仅次于微观组织的研究热点内容之一。Wang 等<sup>[5]</sup>对制件的力学各向异性进行了研究。如图 11 所示,相较于沉积方向,钛合金制件在室温时沿焊接方向的抗拉强度(ultimate tensile strength, UTS)更高,而延伸率更低。该现象产生的原因是:试样拉伸过程中晶界  $\alpha$  在载荷穿过  $\beta$  晶粒晶界时提前失效。Baufeld 则将钛合金力学性能各向异性的产生归因于外延的柱状晶。相较于沉积方向,焊接方向的平均晶粒尺寸更小,晶界数目更多,而晶界是拉伸时的失效根源。



(a) 屈服和抗拉强度



(b) 延伸率

图 11 钛合金试样的力学性能参数<sup>[5]</sup>Fig. 11 Mechanical properties of titanium alloy<sup>[5]</sup>

由于合金多应用于飞机起落架、机翼翼梁等航空关键构件,对 Ti-6Al-4V 合金电弧熔丝增材制造试样疲劳寿命、裂纹扩展的研究不可或缺。Wang 等<sup>[5]</sup>对电弧熔丝增材制造 Ti-6Al-4V 合金的高周疲劳寿命进行了研究,实验结果如图 12 所示。相较于锻造生产试样,采用电弧熔丝增材制造 Ti-6Al-4V 合金的疲劳性能更优。这是因为相较于锻造所获双态组织,采用电弧熔丝增材制造工艺加工钛合金中  $\alpha$  集束和  $\alpha$  片层组织可以更有效地阻碍位错运动,使钛合金试样的疲劳性能得到提高。Xie 等<sup>[34]</sup>对电弧熔丝增材制造 Ti-6Al-4V 合金试样在循环载荷下微裂纹扩展速率(fatigue crack growth rate,FCGR)的各向异性进行了研究。结果表

明:钛合金层间微裂纹更易向等轴晶组织区域扩展。增材试样的区域组织不均匀性将导致微裂纹在沉积方向上的扩展速率比焊接方向上高约 5%。Zhang 等<sup>[35]</sup>对增材制造后微观组织、焊接残余应力与试样微观裂纹扩展间的关系进行了研究,结果表明:相较于上层试样沉积区所具有的  $\alpha$  片层组织,裂纹在靠近焊接基台的下层试样等轴晶组织中的扩展路径更平直,裂纹扩展速率更高。可对焊接工艺参数进行调整,提高组织中  $\alpha$  片层组织相对含量从而提高试样抗裂纹性能。

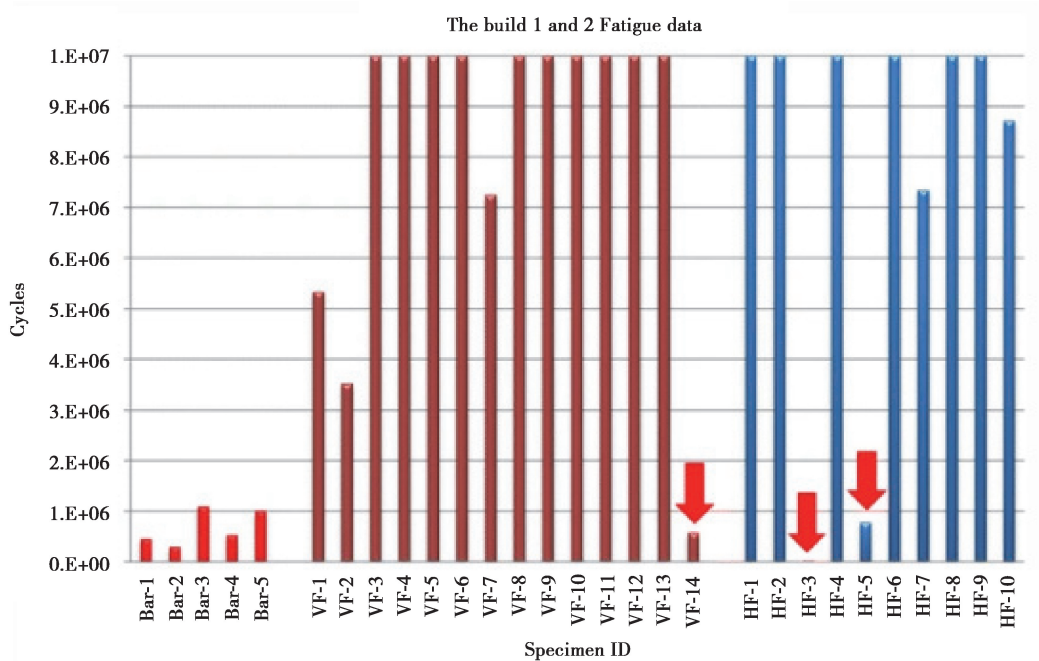


图 12 钛合金试样的高周疲劳寿命测试<sup>[5]</sup>

Fig. 12 Fatigue test cycles to failure of titanium alloy<sup>[5]</sup>

### 3 调控工艺研究进展

实现对 Ti-6Al-4V 合金电弧熔丝增材制造后微观组织的调控从而提高其力学性能,可对焊接工艺参数进行优化(如增加送丝速度、提高焊接电源脉冲频率等)<sup>[22, 36-37]</sup>,也可引入外部物理辅助手段。何智<sup>[38]</sup>及许明方等<sup>[39]</sup>将超声波辅助系统(ultrasonic vibration assisted, UVA)引入 Ti-6Al-4V 合金电弧熔丝增材制造,所获钛合金制件柱状晶尺寸降低,针状马氏体数量增多,微观组织性能显著改善。一些学者则将电弧熔丝增材制造技术与压力加工技术结合对增材后的钛合金晶粒进行细化,其设备组成如图 13 所示<sup>[40-41]</sup>。McAAndrew 等<sup>[42]</sup>应用层间轧制技术降低了钛合金原始  $\beta$  晶粒的晶粒尺寸。Colegrove 等<sup>[43]</sup>则对轧制方向与 Ti-6Al-4V 合金残余应力、微观组织影响关系进行了研究,如图 14 所示。相较于未轧制对照组,加载 75 kN 载荷轧制后宏观  $\beta$  晶粒形貌发生了改变,微观  $\alpha$  片层也发生了一定程度的破碎与细化,如图 15 所示。Donoghue 等<sup>[44]</sup>研究发现,对电弧熔丝增材制造后的 Ti-6Al-4V 合金试样进行轧制能在一定程度上提高材料的位错密度、空位密度和材料内部的存储,而晶粒尺寸则随着轧制力的增大而降低。

采用适当的热处理工艺能有效改善合金组织、降低焊后残余应力。为提高 Ti-6Al-4V 合金组织、性能的均匀性,提高构件的塑性与疲劳寿命,可对试样进行焊间层中冷却、焊后保温及增加合金元素等处理。徐国建等<sup>[45]</sup>研究发现对增材制造后的钛合金试样进行 950~1 050 °C 正火处理可均匀化组织,获得细小的针状初生  $\alpha$  相。Wu 等<sup>[46]</sup>利用如图 16 所示的装置对沉积状态中的钛合金喷射氩气、氮气或二氧化碳气体,该工艺可以控制钛合金层间热循环温度,细化微观晶粒尺寸、提升制件的表面硬度及光洁度并提高制造效率。勾健等<sup>[47]</sup>对焊后钛合金实验进行了 600 °C、4 h 的均质化保温处理,提高了电弧增材钛合金试样的抗拉强度。Birmingham 等<sup>[48]</sup>研究了添加微量元素 B 对电弧熔丝增材制造工艺制造 Ti-6Al-4V 及 Ti-6Al-4V-0.13B 两种合金压缩性能的影响。相较于沉积态,微量元素 B 的添加使其压缩塑形提升约 40%。



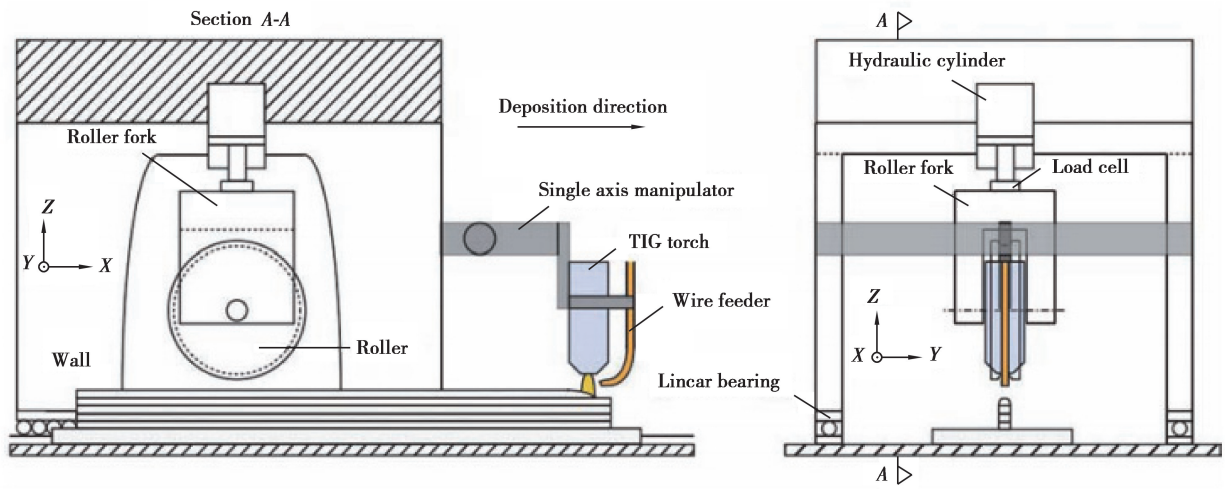
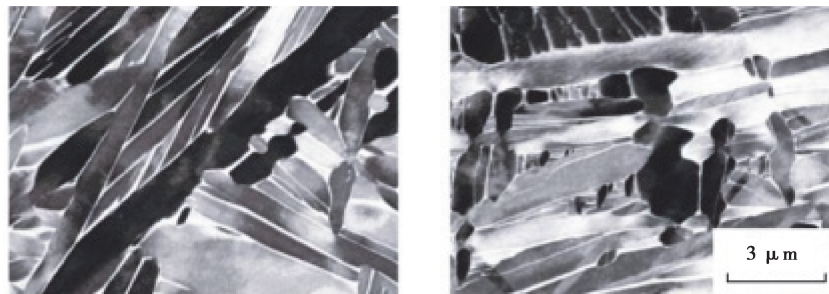


图 13 压力加工与 WAAM 复合制造设备组成<sup>[40]</sup>

Fig. 13 Manufacturing equipment of pressure processing and WAAM<sup>[40]</sup>

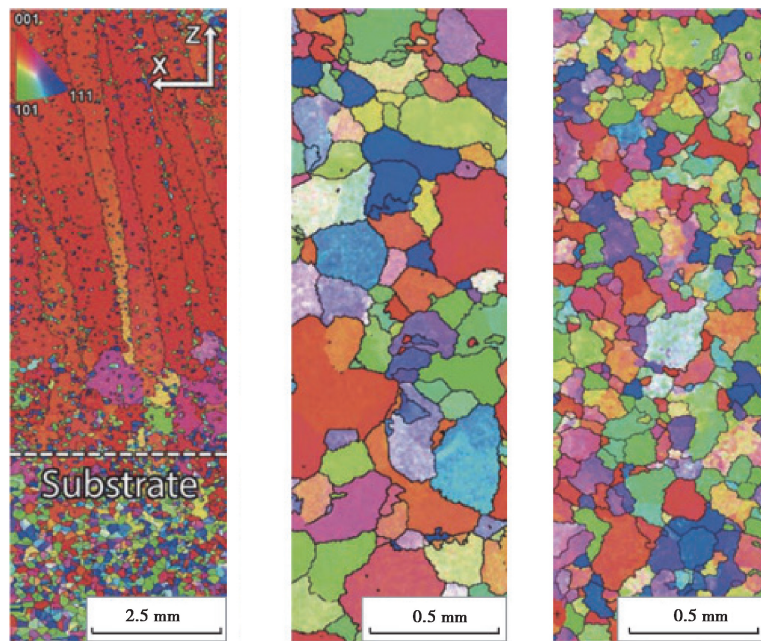


(a) 未轧制

(b) 75 kN 轧制

图 14 轧制前后  $\alpha$  片层对比<sup>[43]</sup>

Fig. 14 Comparison of  $\alpha$  lamella before and after rolling<sup>[43]</sup>



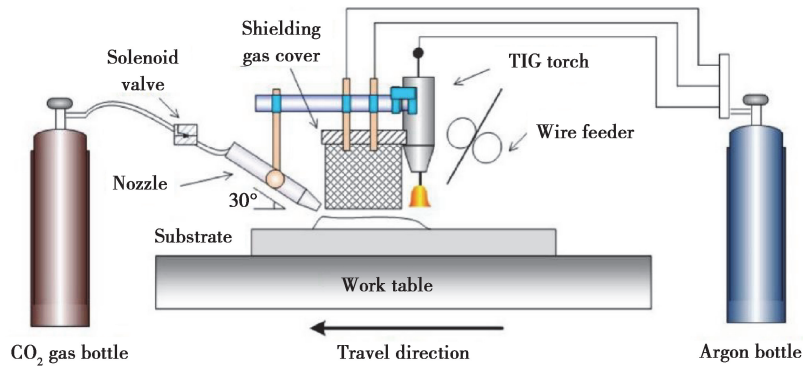
(a) 未轧制

(b) 50 kN 轧制力

(c) 75 kN 轧制力

图 15 不同冷轧压下力对 Ti-6Al-4V 合金微观组织的影响<sup>[40]</sup>

Fig. 15 Effect of cold rolling force on Ti-6Al-4V alloy WAAM microstructure<sup>[40]</sup>

图 16 WAAM 层间气冷联合工艺设备组成<sup>[46]</sup>Fig. 16 Schematic diagram of the combined WAAM gas cooling process equipment<sup>[46]</sup>

## 4 结论与展望

电弧熔丝增材制造工艺具有材料利用率和沉积效率高、生产成本低、设备通用性强等优势,在航空钛合金大型部件生产中具有广阔的应用前景,但在现有焊接工艺条件下存在焊后区域组织不均匀性,导致所加工试样存在力学性能存在各向异性、结构相对简单等缺陷,钛合金电弧熔丝增材制造工艺距离大规模推广应用还需进行较多的研究。

为解决钛合金组织的不均匀性,可从减小焊接热输入方面进行研究。可将低热输入量焊接电源应用于 Ti-6Al-4V 合金电弧熔丝增材制造工艺,如使用 CMT 焊接电源(可实现降低回抽过程电流电压并于 CMT-PADV 变极性复合脉冲模式下具有更低热输入量<sup>[49]</sup>)、高脉冲频率焊接电源(可通过高频脉冲频率振荡焊接实现熔池冷却速率的改变<sup>[50]</sup>)、变极性的焊接电源(可通过改变电磁力及电弧压力周期实现晶粒细化<sup>[51]</sup>)等替换目前增材制造工艺常使用的 MIG 热源及 TIG 热源。降低电弧熔丝增材制造过程热输入可提高熔池冷却速率,降低焊接过程热积累,实现对合金柱状  $\beta$  晶粒生长的抑制;同时有害气体的溶解度也随焊接热输入的减少而降低,最终能有效抑制增材制造试样中微观孔隙的形成。

Ti-6Al-4V 电弧熔丝增材制造试样微观组织与力学性能的调控,还可通过增加外部物理辅助手段与先进焊接电源的复合实现。对电弧增材后的钛合金试样进行轧制可显著降低晶粒尺寸、降低区域微观组织差异从而提升材料在各方向上的力学均匀性。可将脉冲电源、CMT 焊接电源与轧制、焊中层间冷却、焊后锤击等辅助配套工艺相结合,消除钛合金焊后可能产生的粗大的  $\beta$  晶粒,减小焊接残余应力从而提高钛合金电弧熔丝增材产品的疲劳寿命。为解决电弧增材制件表面粗糙度大的缺陷,将电弧增材系统与数控铣削机床相结合是一个热门研究方向。这些复合工艺需要开发更多的技术规范,如相应工艺设备的研发与改造、辅助工艺的作用位置及作用时间以及焊丝的状态及表面情况等。

采用适当的热处理工艺能有效改善合金组织、降低 Ti-6Al-4V 合金电弧熔丝增材制造后材料的残余应力。目前所采用的增加微量元素及均质化处理均不能完全消除电弧熔丝增材制造后 Ti-6Al-4V 合金的微观组织及力学性能的方向性差异。此外,在采用低热量输入电源下施加外部辅助物理手段后的电弧增材制造钛合金组织与大热量输入下组织及织构强度并不相同,需研究新的热处理工艺及设备实现对组织及力学性能的调控。

电弧熔丝增材技术在航空工业关键零部件快速成型生产制备方面具有独特优势,随着设备的集成升级改造以及工艺的不断积累与优化,电弧增材制造 Ti-6Al-4V 将会有更大的发展空间。

### 参考文献:

- [1] 金和喜, 魏克湘, 李建明, 等. 航空用钛合金研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(2): 280-292.  
Jin H X, Wei K X, Li J M, et al. Research development of titanium alloy in aerospace industry[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(2): 280-292. (in Chinese)

- [2] Zhou H Y, Shi X L, Lu G C, et al. Friction and wear behaviors of TC4 alloy with surface microporous channels filled by Sn-Ag-Cu and  $Al_2O_3$  nanoparticles[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 387: 125552.
- [3] 杨川, 徐文臣, 万星杰, 等. TC4钛合金薄壁高筋构件近等温锻造技术研究[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(2): 69-78.  
Yang C, Xu W C, Wan X J, et al. Research on near isothermal forging process of TC4 titanium alloy forgings with thin wall and high rib[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26(2): 69-78. (in Chinese)
- [4] 赵永庆, 葛鹏. 我国自主研发钛合金现状与进展[J]. 航空材料学报, 2014, 34(4): 51-61.  
Zhao Y Q, Ge P. Current situation and development of new titanium alloys invented in China[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(4): 51-61. (in Chinese)
- [5] 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 A, 2013, 44(2): 968-977.
- [6] Wang J, Lin X, Wang M, et al. Effects of subtransus heat treatments on microstructure features and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 776: 139020.
- [7] 张金田, 王杏华, 王涛. 单道多层电弧增材制造成形控制理论分析[J]. 焊接学报, 2019, 40(12): 63-67, III-IV.  
Zhang J T, Wang X H, Wang T. Research on forming control for single-pass multi-layer of WAAM[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(12): 63-67, III-IV. (in Chinese)
- [8] 李雷, 于治水, 张培磊, 等. TC4钛合金电弧增材制造叠层组织特征[J]. 焊接学报, 2018, 39(12): 37-43, II.  
Li L, Yu Z S, Zhang P L, et al. Microstructural characteristics of wire and arc additive layer manufacturing of TC4 components[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(12): 37-43, II. (in Chinese)
- [9] Ou W, Wei Y, Liu R, et al. Determination of the control points for circle and triangle route in wire arc additive manufacturing (WAAM)[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 53: 84-98.
- [10] Szost B A, Terzi S, Martina F, et al. A comparative study of additive manufacturing techniques: residual stress and microstructural analysis of CLAD and WAAM printed Ti-6Al-4V components[J]. Materials & Design, 2016, 89: 559-567.
- [11] 李晗嫣, 陈文革, 张飞奇, 等. 基于CAFE模拟钛合金丝材电弧增材制造凝固过程的组织演变[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(9): 1775-1783.  
Li H Y, Chen W G, Zhang F Q, et al. Evolution of wire+arc additive manufactured titanium alloy during solidification process based on CAFE simulation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(9): 1775-1783. (in Chinese)
- [12] Panda B, Shankhwar K, Garg A, et al. Evaluation of genetic programming-based models for simulating bead dimensions in wire and arc additive manufacturing[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2019, 30(2): 809-820.
- [13] 田银宝, 申俊琦, 胡绳荪, 等. 丝材+电弧增材制造钛/铝异种金属反应层的研究[J]. 金属学报, 2019, 55(11): 1407-1416.  
Tian Y B, Shen J Q, Hu S S, et al. Study of the reaction layer of Ti and Al dissimilar alloys by wire and arc additive manufacturing[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2019, 55(11): 1407-1416. (in Chinese)
- [14] 贾金龙, 赵玥, 董明晔, 等. 基于温度函数法的铝合金电弧增材制造残余应力与变形数值模拟[J]. 焊接学报, 2019, 40(9): 1-6, I.  
Jia J L, Zhao Y, Dong M Y, et al. Numerical simulation on residual stress and deformation for WAAM parts of aluminum alloy based on temperature function method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(9): 1-6, I. (in Chinese)
- [15] Ralph B. Method of making decorative articles; US1533300[P]. 1925-04-14.
- [16] 鞠洪涛, 徐东生, 单飞虎, 等. Ti-6Al-4V电弧熔丝增材辊轧复合制造的有限元模拟[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(3): 878-882.  
Ju H T, Xu D S, Shan F H, et al. Finite element simulation of hybrid manufacturing of Ti-6Al-4V by wire arc additive manufacturing and rolling[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(3): 878-882. (in Chinese)
- [17] 张纪奎, 陈百汇, 张向. 电弧增材制造钛合金界面处残余应力及其影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(3): 920-926.  
Zhang J K, Chen B H, Zhang X. Residual stress at the interface of wire + arc additive manufactured titanium alloy and its influence[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(3): 920-926. (in Chinese)

- [18] 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[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2002, 17(1): 103-124.
- [19] Kwak Y M, Dumanidis C C. Geometry regulation of material deposition in near-net shape manufacturing by thermally scanned welding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2002, 4(1): 28-41.
- [20] 胡晓冬. 基于弧焊的直接金属成形技术研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2003.  
Hu X D. Research on direct metal forming technology based on arc welding[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2003. (in Chinese)
- [21] 熊俊. 多层单道 GMA 增材制造成形特性及熔敷尺寸控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
Xiong J. Forming characteristics in multi-layer single-bead GMA additive manufacturing and control for deposition dimension[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [22] 卢振洋, 田宏宇, 陈树君, 等. 电弧增材复合制造精度控制研究进展[J]. *金属学报*, 2020, 56(1): 83-98.  
Lu Z Y, Tian H Y, Chen S J, et al. Review on precision control technologies of additive manufacturing hybrid subtractive process[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2020, 56(1): 83-98. (in Chinese)
- [23] 张海鸥, 熊新红, 王桂兰, 等. 等离子熔积成形与铣削光整复合直接制造金属零件技术[J]. *中国机械工程*, 2005, 16(20): 1863-1866.  
Zhang H O, Xiong X H, Wang G L, et al. Direct manufacturing technology of metal parts by hybrid plasma deposition shaping and milling finishing[J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(20): 1863-1866. (in Chinese)
- [24] Song Y A, Park S, Choi D, et al. 3D welding and milling: Part I—a direct approach for freeform fabrication of metallic prototypes[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, 45(9): 1057-1062.
- [25] Baufeld B, Brandl E, van der 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[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(6): 1146-1158.
- [26] Baufeld B, van der Biest O, Gault R. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: microstructure and mechanical properties[J]. *Materials & Design*, 2010, 31: S106-S111.
- [27] Baufeld B, van der Biest O, Gault R. Microstructure of Ti-6Al-4V specimens produced by shaped metal deposition[J]. *International Journal of Materials Research*, 2009, 100(11): 1536-1542.
- [28] 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(5/6/7/8): 597-603.
- [29] 刘宁. TC4 钛合金 TIG 填丝堆焊成型技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.  
Liu N. Research on Ti-6Al-4V shaped metal deposition by TIG welding with wire[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [30] 杨海欧, 王健, 周颖惠, 等. 电弧增材制造技术及其在 TC4 钛合金中的应用研究进展[J]. *材料导报*, 2018, 32(11): 1884-1890.  
Yang H O, Wang J, Zhou Y H, et al. Wire and arc additive manufacturing technology and its application in TC4 titanium alloy: a review[J]. *Materials Review*, 2018, 32(11): 1884-1890. (in Chinese)
- [31] 付作鑫, 谢明, 沈月, 等. CA-FE 法凝固组织数值模拟的应用研究进展[J]. *材料导报*, 2012, 26(S2): 154-158.  
Fu Z X, Xie M, Shen Y, et al. Recent developments in numerical simulation of solidification using CA-FE method[J]. *Materials Review*, 2012, 26(S2): 154-158. (in Chinese)
- [32] 杨海欧, 王健, 王冲, 等. 电弧增材制造 TC4 钛合金宏观晶粒演化规律[J]. *材料导报*, 2018, 32(12): 2028-2031, 2046.  
Yang H O, Wang J, Wang C, et al. Macrostructure evolution of TC4 titanium alloy fabricated by wire and arc additive manufacturing[J]. *Materials Review*, 2018, 32(12): 2028-2031, 2046. (in Chinese)
- [33] Goldak J, Bibby M, Moore J, et al. Computer modeling of heat flow in welds[J]. *Metallurgical Transactions*, 1986, 17B: 587-600.
- [34] Xie Y, Gao M, Wang F D, et al. Anisotropy of fatigue crack growth in wire arc additive manufactured Ti-6Al-4V[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 709: 265-269.
- [35] Zhang J K, Wang X Y, Paddea S, et al. Fatigue crack propagation behaviour in wire+arc additive manufactured Ti-6Al-4V: effects of microstructure and residual stress[J]. *Materials & Design*, 2016, 90: 551-561.
- [36] 马振书, 陈广森, 吴倩茹, 等. 脉冲频率和热输入对电弧增材制造 TC4 钛合金形貌和组织的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2018, 47(7): 2144-2150.

- Ma Z S, Chen G S, Wu Q R, et al. Influence of pulse frequency and heat input on macrostructure and microstructure of TC4 titanium alloy by arc additive manufacturing[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47(7): 2144-2150. (in Chinese)
- [37] Hoefler K, Mayr P. 3DPMD-Arc-based additive manufacturing with titanium powder as raw material[J]. *China Welding*, 2019, 28(1): 11-15.
- [38] 何智. 超声冲击电弧增材制造钛合金零件的组织性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.  
He Z. Effect of ultrasonic impact on the properties of arc additive manufacturing of titanium alloy[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2016. (in Chinese)
- [39] 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.  
Xu M F, Chen Y H, Deng H B, et al. Microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy made by UVA-CMT WAAM[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2019, 11(5): 142-148. (in Chinese)
- [40] 李明祥, 张涛, 于飞, 等. 金属电弧熔丝增材制造及其复合制造技术研究进展[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(17): 14-21.  
Li M X, Zhang T, Yu F, et al. Research progress of wire and arc additive manufacturing and hybrid manufacturing technology for metal components[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(17): 14-21. (in Chinese)
- [41] 刘小军, 陈伟, 黄志江, 等. 电弧增材制造航空钛合金构件组织及力学性能研究现状[J]. *精密成形工程*, 2019, 11(3): 66-75.  
Liu X J, Chen W, Huang Z J, et al. Research progress of microstructure and mechanical properties of aerospace titanium alloy members by wire additive manufacturing technology[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2019, 11(3): 66-75. (in Chinese)
- [42] McAndrew A R, Alvarez Rosales M, Colegrove P A, et al. Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 21: 340-349.
- [43] Colegrove P A, Donoghue J, Martina F, et al. Application of bulk deformation methods for microstructural and material property improvement and residual stress and distortion control in additively manufactured components[J]. *Scripta Materialia*, 2017, 135: 111-118.
- [44] Donoghue J, Antonysamy A A, Martina F, et al. The effectiveness of combining rolling deformation with Wire-Arc Additive Manufacture on  $\beta$ -grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V[J]. *Materials Characterization*, 2016, 114: 103-114.
- [45] 徐国建, 柳晋, 陈冬卅, 等. 正火温度对电弧增材制造 Ti-6Al-4V 组织与性能的影响[J]. *焊接学报*, 2020, 41(1): 39-43, 99.  
Xu G J, Liu J, Chen D S, et al. Effect of normalizing temperature on microstructure and properties of Ti-6Al-4V fabricated by arc additive manufacturing[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2020, 41(1): 39-43, 99. (in Chinese)
- [46] Wu B T, Pan Z X, Ding D H, et al. The effects of forced interpass cooling on the material properties of wire arc additively manufactured Ti6Al4V alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 258: 97-105.
- [47] 勾健, 王志江, 胡绳荪, 等. CMT+P 过程及后热处理对 TC4 钛合金增材构件组织和性能影响[J]. *焊接学报*, 2019, 40(12): 31-35, 46, II.  
Gou J, Wang Z J, Hu S S, et al. Effects of CMT+P process and post heat treatment on microstructure and properties of TC4 component by additive manufacturing[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(12): 31-35, 46, II. (in Chinese)
- [48] Bermingham M J, Sim W M, Kent D, et al. Tool life and wear mechanisms in laser assisted milling Ti-6Al-4V[J]. *Wear*, 2015, 322/323: 151-163.
- [49] Cong B Q, Ouyang R J, Qi B J, et al. Influence of cold metal transfer process and its heat input on weld bead geometry and porosity of aluminum-copper alloy welds[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(3): 606-611.
- [50] Wang L L, Wei H L, Xue J X, et al. Special features of double pulsed gas metal arc welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 251: 369-375.
- [51] Wang Y P, Qi B J, Cong B Q, et al. Arc characteristics in double-pulsed VP-GTAW for aluminum alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 249: 89-95.