

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2024.04.03

大型冲击式转轮机器人电弧增材制造技术应用研究

杨年浩¹, 金 宝^{2*}, 李海军¹, 冯 涛², 蔡 喜¹, 李红辉¹, 郭中才², 高炼玲²

1. 中国三峡建工(集团)有限公司, 湖北 武汉 430000

2. 东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 随着冲击式机组容量参数越来越大, 机组核心部件转轮的尺寸不断增大, 受制于锻件厂家设备制造能力和性能保障工艺, 厚大马氏体不锈钢锻件质量风险巨大, 成为大型冲击式机组能否研制成功的关键因素。而外部水斗结构复杂, 锻件加工时材料利用率低, 制造成本高, 人工焊接时气孔、夹渣等缺陷不易控制, 焊接质量风险大。本文通过基于电弧增材制造工艺结构设计、机器人电弧增材制造系统集成及工艺研究, 开发出了一套适用于大型冲击式转轮制造的增材工艺, 并成功应用于冲击式转轮的制造, 大幅压缩了中心体锻件的规格, 释放了厚大马氏体不锈钢锻件的制造风险, 提高了外部水斗的材料利用率和焊接质量。

关键词: 冲击式转轮; 尾翼; 外部水斗; 机器人; 电弧增材

中图分类号: TG409 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2024)04-0023-06

Application Research on Robot Weld Arc Additive Manufacturing Technology for Large Pelton Runner

YANG Nianhao¹, JIN Bao^{2*}, LI Haijun¹, FENG Tao², CAI Xi¹, LI Honghui¹, GUO Zhongcai², GAO Lianling²

1. China Three Gorges Construction Engineering Corporation, Wuhan 430000, China

2. Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., Deyang 618000, China

Abstract: With the increasing capacity parameters of the pelton unit, the size of the core component runner of the unit continues to increase. Due to the manufacturing capacity and performance guarantee process of forging manufacturers, the quality risk of thick and large martensitic stainless steel forgings is enormous, which has become a key factor in the success of the development of large pelton units. The external water bucket has a complex structure, low material utilization during forging processing, high manufacturing costs, and difficult to control defects such as pores and slag inclusions during manual welding, resulting in high welding quality risks. This article develops a set of additive technology suitable for the manufacturing of large impact runners based on the structural design of arc additive manufacturing process, integration of robot arc additive manufacturing system, and process research. It has been successfully applied to the manufacturing of impact runners, greatly compressing the specifications of center body forgings, releasing the manufacturing risks of thick and large martensitic stainless steel forgings, and improving the material utilization rate and welding quality of external buckets.

Keywords: pelton runner; tail; external bucket; robot; WAAM

引用格式: 杨年浩, 金宝, 李海军, 等. 大型冲击式转轮机器人电弧增材制造技术应用研究[J]. 电焊机, 2024, 54(4): 23-28.

Citation: YANG Nianhao, JIN Bao, LI Haijun, et al. Application Research on Robot Weld Arc Additive Manufacturing Technology for Large Pelton Runner[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(4): 23-28.

0 引言

随着“碳达峰、碳中和”的提出, 水力发电作为

一种高效清洁能源, 越来越受到人们的重视^[1]。冲击式机组由于电站建设成本小、开挖量小, 且适应高水头、水流量变化大、泥沙含量大的工况, 成为了

收稿日期: 2023-12-04 修回日期: 2024-01-04

作者简介: 杨年浩(1981—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事水力机械的研究。

通讯作者: 金 宝(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事先进焊接技术的研究。E-mail: jimbao8836@163.com。

高水头电站建设的首选^[2-3]。转轮是冲击式机组的核心部件,在运行中受到高速水流的循环冲击作用,为典型的疲劳载荷,对转轮制造质量提出了极高的要求。冲击式转轮常规的制造方式有三种,即整体铸造转轮、整体锻造转轮和焊接转轮^[4],由于铸件缺陷无法控制,而整体锻件制造难度大,对于大型冲击式转轮来说,采用锻焊分瓣式结构最为合适,即中心体带根部高应力区水斗采用整体锻件加工,外部水斗采用锻件加工后与根部水斗焊接为一体。随着高水头大容量冲击式机组的开发,转轮的尺寸越来越大,所需的马氏体不锈钢锻件规格远超已有的工程经验,现有锻造设备很难实现厚大马氏体不锈钢的锻透压实,马氏体不锈钢锻件质量风险巨大,成为大型冲击式机组能否研制成功的关键因素^[5]。另外由于外部水斗为空间三维薄壁复杂结构,采用常规的锻件制造时,其材料利用率低,制造成本极高。且外部水斗人工焊接时,气孔、夹渣等缺陷不易控制,焊接质量风险大。

机器人电弧增材制造基于三维模型,以电弧为热源,在机器人规划路径上熔化焊丝,层层堆积成形三维金属构件^[6]。与传统的铸、锻、焊相比,电弧增材性能稳定且内外性能一致、材料利用率高,可实现柔性化制造^[7-8],其原材料、设备成本低,增材尺寸不受限制、增材效率高。冲击式转轮水斗为薄壁式空间曲面,采用铸锻+增材的复合制造方式,既可利用铸锻高效率制造的优点,也可发挥增材制造柔性制造、近净成形的优点^[9-10],对解决大型冲击式转轮的制造难点具有重要意义。因此,本文开发了一种冲击式转轮机器人电弧增材制造工艺,并成功应用于根部水斗低应力区尾翼和外部水斗的制造。

1 基于电弧增材制造的冲击式转轮制造工艺结构设计

转轮制造的关键之一是应保证水斗根部最大应力区采用高性能锻件材料,由于整体锻件尺寸过大,无法整体锻造。为缩小转轮制造规格,将转轮沿环向分瓣(分瓣区为低应力区),分为中心体带根部水斗和外部水斗,如图1所示。为进一步压缩锻

件的规格,保证大型冲击式转轮水斗根部锻件材料性能,根据转轮结构应力分析,如图2所示,将水斗分为水斗根部高应力区(40%~100%最大工作应力)和低应力区(小于40%最大工作应力),如图3所示。其制造方式如下:(1)中心体带根部高应力区水斗采用锻件04Cr13Ni5Mo;(2)根部低应力区水斗(尾翼)采用电弧增材;(3)外部水斗采用电弧增材。

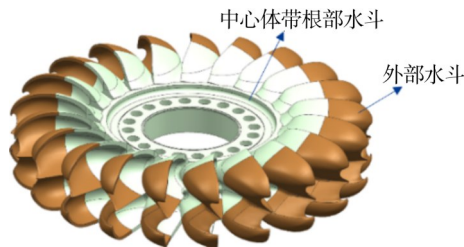


图1 大型冲击式转轮环向分瓣结构

Fig. 1 Large pelton runner circumferential split structure

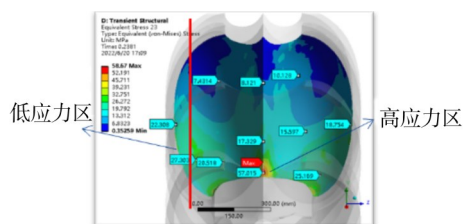


图2 转轮结构应力分析

Fig. 2 Stress analysis of runner bucket

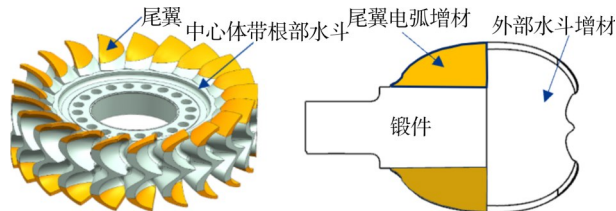


图3 转轮中心体制造工艺结构

Fig. 3 Structure of the runner donut manufacturing process

通过电弧增材制造技术的开发应用,中心体带根部水斗采用锻件+复合增材制造,与常规全锻件相比较,在充分保证增材质量、性能的同时,压缩锻件尺寸,规避大型锻件的质量风险,提高大型锻件质量可靠性。提高外部水斗的材料利用率的同时,采用全机器人增材制造,可规避人工焊接缺陷不易控制带来的质量风险,改善工作环境。

2 机器人电弧增材制造系统集成

针对转轮尾翼的增材,根据大型冲击式转轮中

心体的结构特点,集成多台多自由度、重型精密机器人系统,机器人系统十字操作架、机器人本体、CMT电源及外围设备,如图4所示,使机器人的工作半径满足大型冲击式转轮在无需变位的情况下完成整体增材。中心体锻件制造完成后,将其置于多台机器人的中心,增材时,机器人通过其自由度,依次完成每个水斗尾翼的增材。



图4 水斗尾翼机器人电弧增材制造系统

Fig. 4 robot WAAM system of bucket tail

针对外部水斗的增材,设计转轮滚动工装,包括地坑、滚轮架、滚筒等,集成4台机器人,增材时,以两个水斗为一组,按组依次增材,如图5所示。

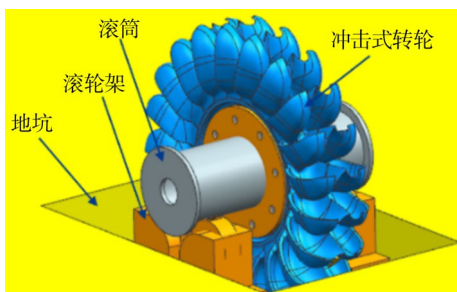


图5 外部水斗增材制造工装设计

Fig. 5 Design of WAAM tooling for external buckets

为提高增材效率,减少人工参与,基于WIFI+5G,对机器人群进行联网联控。并基于C++,开发机器人集成控制系统,实现多台机器人增材的协同控制、过程参数监测、反馈、焊量统计等,并基于数字孪生与远程控制技术,实现过程的无人值守,如图6、图7所示。

3 机器人电弧增材制造工艺研究

3.1 工艺三维造型设计

冲击式转轮水斗为复杂空间异形结构,水斗倾



图6 外部水斗增材制造系统

Fig. 6 WAAM system for external bucket



图7 机器人电弧增材制造集成控制系统

Fig. 7 Integrated control system for robot WAAM

角大,直接增材时无法成型,如何实现水斗的高精度高质量成形是冲击式转轮水斗增材的关键。为此,通过水斗制造三维模型设计及工艺试验,将水斗尾翼下部设计为带支撑的空心结构,尾翼上部为实心结构,如图8所示。

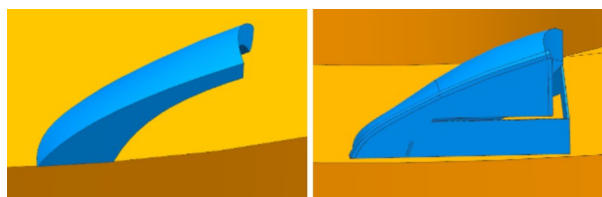


图8 水斗尾翼增材工艺三维造型

Fig. 8 Three-dimensional modeling of the WAAM process of the bucket tail

将外部水斗设计为多段增材,如图9所示,沿倾角反方向翻转一定角度,以补偿水斗倾角带来的层间错边过大导致的无法成型,从而减小层间错边,如图10所示,实现复杂空间型面水斗的高精度高质量成型。

3.2 轨迹规划

机器人增材轨迹是影响增材质量、性能、效率的至关重要的因素,不同的轨迹方式、层间轨迹、轮廓与填充层距离对增材性能、效率影响较大,不同的轨迹对增材性能、质量影响较大,如在单层轨迹

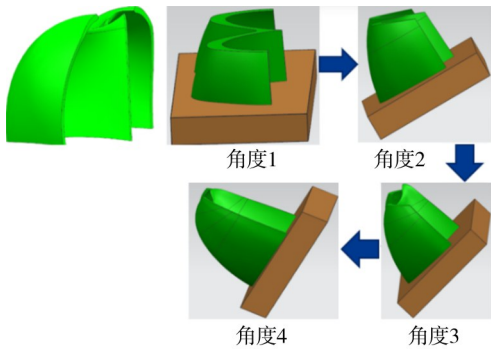


图9 外部水斗增材三维工艺造型

Fig. 9 Three-dimensional modeling of the WAAM process of the external bucket

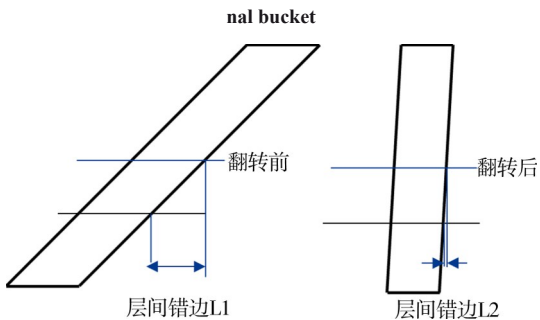


图10 外部水斗翻转前后层间错边对比

Figure 10 Schematic diagram of the comparison of interlayer misalignment before and after flipping the external bucket

规划时,采用内旋成形路径时(见图11a),内部热量堆积,内部成型性能差,采用往复成型路径时,可均匀化各处的热量,避免局部热量过高;在层间轨迹规划时,采用层间同方向时(见图11b),层间的局部凹槽回逐层累计,从而形成未熔合、夹渣等缺陷,而采用十字交叉时,局部凹槽可层间补偿,焊接质量好。另外,水斗截面轮廓是复杂的曲线,全部采用直线往复的轨迹规划时,在边缘区域为相错直线,焊缝为锯齿状,外轮廓与内部填充的交界处极易形成未熔合缺陷(见图11c)。因此,轨迹规划时,减小外轮廓与填充层之间的距离,增加其搭接量,保证外轮廓与填充层之间的焊接质量。

3.3 增材工艺参数选择

增材工艺参数是影响增材质量和性能的关键,控制增材缺陷、提高增材韧性可大幅提高转轮的疲劳性能。增材参数包括焊接电流、电压、焊接速度、熔覆搭接量、层间温度、热处理温度等,焊接电流、电压、焊接速度决定线能量的大小,线能量过大会引起熔池温度过高、晶粒粗大、金属烧损严重等问题,线能量过小,易产生未焊透、夹渣、焊瘤、冷裂纹

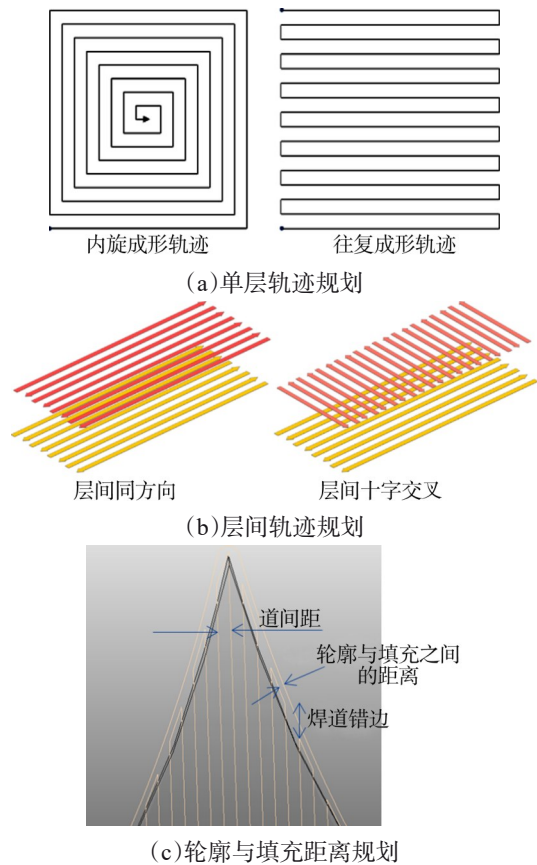


图11 增材制造不同轨迹规划

Fig. 11 Different trajectory planning for WAAM

等缺陷,焊道搭接量影响成形质量,搭接量过小,焊层易形成沟槽,搭接量过大,焊道成形不良。

焊后热处理一方面可以消除残余应力,另一方面可以改善马氏体不锈钢焊后组织。在热处理过程中,将淬火马氏体逐渐转变为回火马氏体,增加其强韧性。并且在热处理加热到 A_s 以上、低于 A_{c1} 温度时将发生 $M \rightarrow \gamma'$ 的“逆转变”。这种组织不同于 A_{c1} 温度以上转变形成的奥氏体,也不同于从高温冷却时残留的奥氏体,因此称为逆变奥氏体。这种组织富碳富镍,具有良好的组织稳定性,通常弥散分布于低碳马氏体基体,具有明显的强韧化作用。通常来说,冲击功和逆变奥氏体含量成正比,这是因为在断裂过程中,塑性变形吸收变形时产生的能量并转变成马氏体,阻碍了裂纹的扩展。而热处理参数可影响逆变奥氏体的含量。

因此选择适合的增材工艺参数对成形质量和性能控制至关重要。通过大量的试验研究,本文选择增材工艺参数如表1所示,可实现马氏体不锈钢

表 1 增材工艺参数

Table 1 WAAM process parameters

电流 /A	电压 /V	焊接速度 /m/min	搭接量 /mm	层间温度 /°C	热处理 /°C
200	21	0.7	4	120~150	580

的高质量高性能增材。

3.4 低氧化氛围设计

氧元素是影响增材性能和过程稳定性的重要因素。增材过程中,氧的来源主要有两方面,一方面,对于MAG焊来说,保护气体为富氧气体,增材过程中,氧会与合金元素发生氧化反应,从而增加熔覆金属的含氧量;另一方面,由于增材速度过快,增材焊道冷却前,气体保护即前移,高温焊道保护不佳,从而导致高温焊道与空气中的氧形成氧化。

氧的增加会导致冲击韧性降低,根据熔敷金属断口形貌和夹杂物分析,如图12所示,熔敷金属冲击断口的韧窝底部分布有大量球形夹杂物,夹杂物EDS分析的位置如圆框所示,排除基体成分Cr、Ni、Mo等元素的干扰,夹杂物中主要含有O、Si、Mn、Al等合金元素。经过能谱分析可知球状夹杂物为氧化物夹杂,试样在变形过程中氧化物夹杂与基体分离形成微裂纹,并发展为韧窝。氧与Si、Mn合金元素形成夹杂,氧化物/氧夹杂再晶界富集偏聚,造成晶界弱化;同时氧含量超过一定值,作为韧性相形核质点的氧化物改变后不利于韧性相形成。

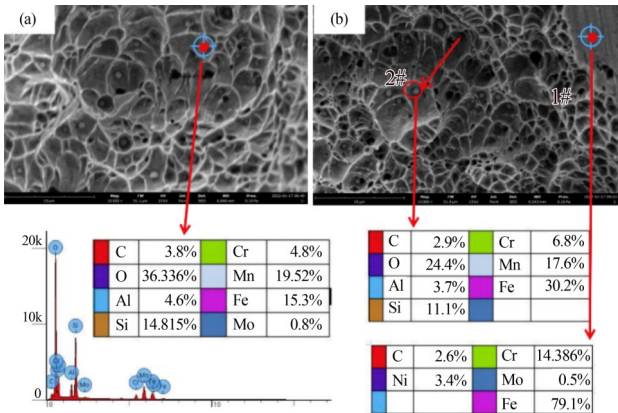


图 12 增材金属冲击断口形貌及夹杂物分析

Fig. 12 Analysis of the morphology and inclusions of the impact fracture of the WAAM metal

同时氧的增加会导致增材后表面氧化渣过多,造成下一次起弧困难,因此,需焊前对氧化渣进行清理,导致层间清理过多,影响增材过程的连续性。

为此,根据焊接速度和焊道冷却速度,设计圆形保护装置,如图13所示,从而排开焊缝高温区空气,形成低氧化氛围,并达到降低焊缝含氧量、减少合金元素氧化、减少氧化渣、减少过程清理、提高增材效率等多重效果。



图 13 圆形保护装置

Fig. 13 Actual picture of the circular protection device

4 工程应用

通过基于电弧增材制造的冲击式转轮工艺结构设计、机器人电弧增材制造系统集成及工艺研究,实现了空间复杂曲面的高质量、高精度成型,并应用于国产化150MW冲击式转轮的制造,如图14所示,完成了转轮水斗尾翼的增材制造,将锻件厚度由810 mm压缩至510 mm,大幅降低了锻件的厚度,降低了锻件的制造难度。

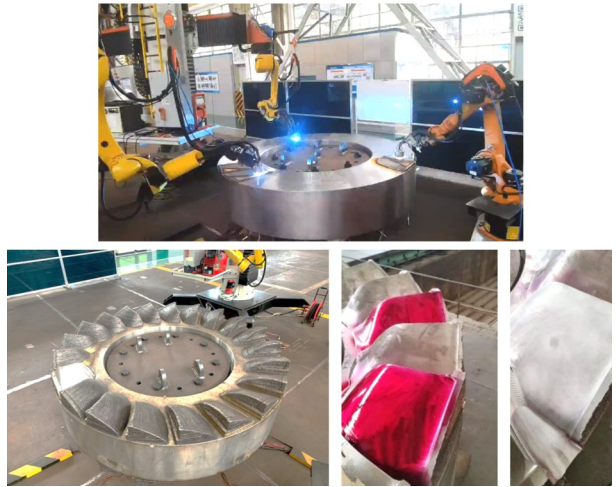


图 14 机器人电弧增材制造在冲击式转轮尾翼中的应用

Fig. 14 Application of robot WAAM in 150MW pelton runner tail

依托150MW冲击式转轮,在国内首次实现了冲击式转轮外部水斗机器人电弧增材制造的工程

应用,如图 15 所示。增材过程中,实现了双机器人协同增材制造,增材效率达到 6 kg/h,UT、PT 探伤合格率超过 99.5%,超过精品要求值,达到预期目标。

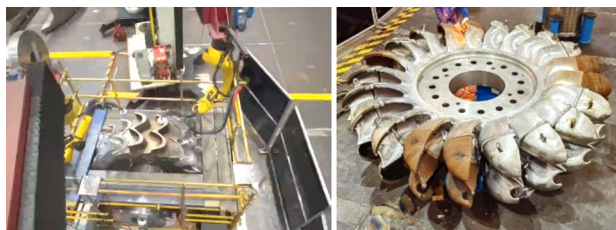


图 15 机器人电弧增材制造在冲击式转轮外部水斗的应用

Fig. 15 Application of robot WAAM in 150MW pelton runner external bucket

5 结论

(1)通过锻件+电弧增材的复合制造,可大幅压缩锻件规格,降低厚大马氏体不锈钢锻件制造难度,释放大件质量风险;

(2)通过空间复杂型面结构的结构设计,可实现外部水斗的高效高精度增材制造,提高外部水斗的材料利用率,保证外部水斗的焊接质量和性能;

(3)机器人电弧增材制造技术的开发应用,为大型冲击式机组的研制提供了坚实的技术支撑。

(4)大型冲击式转轮尺寸大,增材量大,为满足制造周期需要,将进一步开展多机器人联动增材及增减材复合制造,以提高制造效率。

参考文献:

- [1] 闫妮,戎虎仁,王思敏,等. 电力能源结构及水力发电建设趋势综述[J]. 电力学报,2022,37(4):295-301.
YAN N, RONG H R, WANG S M, et al. A review of power energy structure and hydropower construction trend[J]. Journal of Electric Power Society, 2022, 37(4):295-301.
- [2] M·萨拉伯尔格,马元琰. 混流式和冲击式水轮机最新技术比较[J]. 水利水电快报,2009,30(8):34-38.
SLBG M, MA Y T. Comparison of the latest technologies of Francis and percussion turbines[J]. Water Resources and Hydropower Bulletin, 2009, 30(8):34-38.
- [3] 张宝勇,胡雄峰. 高水头、多泥沙水电站水轮机机型选择[J]. 浙江水利科技,2021(4):35-39.
ZHANG B Y, HU X F. Selection of turbine model for high-head, sediment-heavy hydropower station[J]. Zhejiang Water Science and Technology, 2021(4):35-39.
- [4] J·韦塞利,马元琰. 冲击式水轮机转轮的现代制造技术[J]. 水力水电快报,2006,27(22):13-15+19.
Wesley J, MA Y T. Modern manufacturing technology for pelton turbine runner [J]. Hydroelectric Express, 2006, 27(22):13-15+19.
- [5] 谭晓霞. 大型冲击式转轮用国产 04Cr13Ni5Mo 马氏体不锈钢锻件研究现状[J]. 材料导报,2022,36(S2):422-425.
TAN X X. Research status of domestic 04Cr13Ni5Mo martensitic stainless steel forgings for large pelton runner [J]. Journal of Materials Science, 2022, 36 (Z2): 422-425.
- [6] 李昂,刘雪峰,俞波. 金属增材制造技术的关键因素及发展方向[J]. 工程科学学报,2019(2):159-173.
LI A, LIU X F, YU Bo. Key factors and developmental directions with regard to metal additive manufacturing [J]. Chinese Journal of Engineering, 2019(2):159-173.
- [7] 张含嫣,熊俊,陈勇,等. 低热输入高效成形电弧增材制造研究进展及展望[J]. 电焊机,2023,53(2):1-11.
ZHANG H Y, XIONG J, CHEN Y, et al. Research Progress and Prospect of Wire and Arc Additive Manufacturing with Low Heat Input and High-efficiency Forming [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(2):1-11.
- [8] 王晋,虞华森,余祖英,等. 四种铝合金焊丝电弧增材制造构件的成形质量和组织性能对比研究[J]. 电焊机,2024,54(3):36-42.
WANG J, YU H S, YU Z Y, et al. Comparison of Forming Quality, Microstructure and Properties of Four Types of Aluminum Alloy Components Fabricated by Wire and Arc Additive Manufacturing [J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(3):36-42.
- [9] 郅默繁,何长树,李送斌,等. 电弧增材制造 Al-Zn-Mg-Cu 合金组织与性能的研究[J]. 航天制造技术,2023,10(5):28-33.
QIE M F, HE C S, LI S B, et al. Study on the Microstructure and Properties of Al-Zn-Mg-Cu Alloy Produced by Wire-arc Additive Manufacturing [J]. Aerospace manufacturing technology, 2023, 10(5):28-33.
- [10] 范阳阳,冯涛,王平,等. 水轮机部件的机器人快速精密成形技术研究[J]. 现代制造业,2014,41:317-320.
FAN Y Y, FENG T, WANG P, et al. Research on robot rapid precision forming technology for hydraulic turbine Components [J]. Modern manufacturing industry, 2014, 41:317-320.