

焊接工艺参数对仰焊 MAG 堆焊成形的影响

李晨阳, 许燕, 周建平, 李静
(新疆大学, 乌鲁木齐 830000)

摘要: 以 ER50-6 碳钢焊丝作为堆焊焊丝, 在 Q235B 基板上进行仰焊 MAG 堆焊试验。通过单因素法研究了送丝速度、焊接速度和焊丝伸出长度 3 个主要焊接工艺参数对仰焊单道焊缝熔宽和余高的影响, 分析了不同焊接工艺参数下焊缝出现驼峰缺陷的原因。基于此, 对仰焊单道多层堆焊提出了堆焊策略, 即减小热输入、减少熔池冷却时间和熔池扰动。在此基础上, 进行了仰焊单道多层连续堆焊 10 层成形, 并进行了拉伸测试。结果表明, 在送丝速度 3.5 m/min、焊接速度 0.25 m/min、焊丝伸出长度 6 mm 的焊接工艺参数下, 成形质量相对稳定, 抗拉强度达到 518 MPa, 能满足一些对精度要求不高的零件的使用要求, 验证了所提出的仰焊单道多层堆焊策略的可行性, 为仰焊堆焊成形零件焊接工艺参数的选择提供了参考。

关键词: 仰焊; 焊接工艺参数; 成形; 单道多层焊

中图分类号: TG455 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20220324007

Effects of welding parameters on formation of overhead position MAG surfacing

Li Chenyang, Xu Yan, Zhou Jianping, Li Jing
(Xinjiang University, Urumqi 830000, China)

Abstract: ER50-6 carbon steel welding wire was chosen as surfacing welding wire to carry out overhead position MAG surfacing test on Q235B substrate. Effects of three main welding parameters, wire feeding speed, welding speed and wire extension, on weld width and reinforcement of single pass overhead weld was studied by single factor method. Causes of hump defects in welds under different welding parameters were analyzed. Based on this, surfacing strategy for single pass multi-layer overhead position surfacing was proposed, namely reducing heat input, cooling time and disturbance of molten pool. On this basis, 10 layers of single pass multi-layer continuous overhead position surfacing were formed, and tensile test was carried out. The results showed that under welding parameters of wire feeding speed 3.5 m/min, welding speed 0.25 m/min and wire extension 6 mm, forming quality was relatively stable and tensile strength reached 518 MPa, which could meet requirements of some parts with low accuracy requirements. Feasibility of the proposed single pass multi-layer overhead position surfacing strategy was verified, which provided a reference for the selection of welding parameters of overhead position surfacing forming parts.

Key words: overhead position welding, welding parameters, formation, single pass multi-layer welding

0 前言

金属增材制造, 也被称为金属堆焊, 是以高能束流(激光、电子束、电弧等)作为热源, 通过熔化粉材或丝材实现金属构件逐层堆积成形^[1-3]。根据所采用

能量源和成形材料的不同, 典型的金属增材制造主要包括激光选区熔化^[4]、电子束选区熔化^[5]、激光近净成形技术^[6]、电子束熔丝沉积成形^[7]和电弧增材制造^[8]。电弧增材制造是通过连续堆积形成沉积层, 最终形成“近形”制件, 沉积层厚度为毫米量级, 具有成

收稿日期: 2022-03-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51765063); 机器人及智能装备技术科技创新团队(2022D14002)。

形效率高,制造成本低等优点,正在成为一种重要的金属成形技术^[9-13]。

为了使用电弧增材制造复杂的组件,通常不可避免的会沉积悬垂结构,如果采取常规平焊增材,以固定的垂直向上的方向沉积,则需要临时支撑结构,导致沉积额外的材料,以及后加工工艺去除它的额外成本^[14],这时就体现出仰焊等多方向增材制造的优势。Kazanas 等学者^[15]对基于熔化极气体保护焊的多向电弧增材制造进行了初步研究,验证了其可行性,并认为焊接速度是增材过程的关键因素。Radel 等学者^[16]提出了一种在没有任何支撑的情况下自动制造复杂梁结构的方法,监测焊缝形状并且使用计算机辅助制造(Computer aided manufacturing, CAM)软件来校正焊缝的几何形状以用于后续的堆焊。陈贤达等学者^[17]开展了斜壁无支撑结构激光熔丝增材制造驼峰形成机理的研究,熔池受到重力、表面张力等综合作用,产生向下流淌的趋势,是产生驼峰缺陷的主要原因。在仰焊方向上,郑明涛^[18]开展了氩弧焊仰焊位置耐热合金管子—管板焊接的研究,认为合理配比工艺参数是满足焊缝成形和内在质量要求的关键。刘帛炎等学者^[19]开展了等离子弧焊钛合金管道仰焊位置焊缝成形的研究,认为当各焊接工艺参数相互匹配时,可得到良好的焊缝成形。刘黎明等学者^[20]开展了高强钢激光电弧复合仰焊成形的研究,在 180~220 A 电流区间能实现仰焊焊缝正背面良好成形,且仰焊接头具有良好的抗拉强度。但对于仰焊金属堆焊,已有研究并未详细开展焊接工艺参数对仰焊单道焊缝成形尺寸的影响及后续多层沉积的工艺研究,因此有必要在仰焊方向上开展焊接工艺参数对堆焊成形的研究。

以 ER50-6 碳钢焊丝作为堆焊焊丝,在 Q235B 基板上进行仰焊 MAG 堆焊试验。通过单因素法研究了送丝速度、焊接速度和焊丝伸出长度 3 个主要焊接工艺参数对仰焊单道焊缝熔宽和余高的影响,分析了焊缝出现驼峰缺陷的原因,并对单道多层焊提出堆焊策略。在此基础上,进行了仰焊连续堆焊 10

层的单道多层堆焊试验,并进行了拉伸测试,验证了所提策略的可行性,为仰焊堆焊成形零件工艺参数的选择提供了参考。

1 试验设备及方法

试验采用新疆大学开发的基于极坐标系统下的堆焊成形平台进行,整个平台由 3 部分组成,分别是焊接电源、机床本体及控制系统。其中,焊接电源主要由熔化极气体保护焊机、送丝机和保护气组成,熔化极气体保护焊具有成本低、效率高且成形过程易于控制等优点。机床本体由机架、主轴、径向进给装置、焊枪角度控制器、焊枪及成形平台组成,通过径向进给带动焊枪在可升降平台的配合下实现三维空间的运动。控制系统由 IPC(Industrial personal computer)、运动控制卡和电机驱动器构成。采用上位机编写的 Pascal 软件通过 IPC 和运动控制卡对机床几个电机驱动器进行协同控制,从而实现对焊接过程的精确控制,平台实物如图 1 所示。

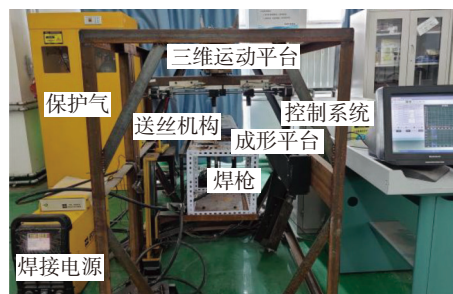


图 1 堆焊成形平台

试验使用的焊接电源是时代逆变 TDN3501 MB 型熔化极气体保护焊焊接电源,其是以 80% Ar + 20% CO₂ 混合气体作为堆焊保护气体,气体流量为 10 L/min,送丝机选用的是时代逆变 TFN6000FN 系列自动送丝机,堆焊基板为尺寸 150 mm × 150 mm × 8 mm 的 Q235B 低碳钢基板,基板温度为 25 °C,堆焊焊丝为 φ1 mm 的 ER50-6 碳钢氩弧焊丝,焊丝末端到基板的距离即为 2 mm,ER50-6 焊丝与 Q235B 基板的化学成分见表 1。

表 1 ER50-6 焊丝和 Q235B 化学成分(质量分数,%)

材料	C	Mn	Si	S	P	Cu
ER50-6	0.06 ~ 0.15	1.40 ~ 1.85	0.80 ~ 1.15	≤0.035	≤0.025	≤0.50
Q235B	0.12 ~ 0.20	0.30 ~ 0.70	≤0.030	≤0.045	≤0.045	—

2 试验结果与讨论

单道焊缝的成形尺寸和质量对整个零件成形有着很重要的影响,不同焊接工艺参数对单道焊缝成形尺寸和表面质量的影响不同。影响单道焊缝成形尺寸和质量的因素众多,主要包括:焊接电流、电弧电压、送丝速度、焊接速度、焊丝伸出长度、焊枪角度、预热温度、保护气类型及流量等。该试验的焊接电源具有一元化调节模式,其焊接电流、电弧电压和送丝速度三者之间具有一定的线性关系,不需要再单独把焊接电流和电压拿出来作为研究对象。因此,该文选择送丝速度、焊接速度和焊丝伸出长度^[21]3个主要参数分别研究其对单道焊缝成形尺寸的影响,其余焊接工艺参数取固定值。

2.1 送丝速度对成形的影响

为了研究送丝速度的影响,焊接速度为0.2 m/min,焊丝伸出长度为10 mm,而送丝速度在3.0~6.0 m/min之间变化,表2列出了仰焊单道焊缝试验的焊接工艺参数设置、每条焊缝的熔宽与余高的测量值和对应的热输入。图2给出了不同送丝速度下焊缝熔宽和

余高的变化情况。不同送丝速度下单道焊缝外观形貌如图3所示。通过试验发现,随着送丝速度的增加,焊缝的熔宽和余高都会有所变化。从图2可以看出,送丝速度对熔宽和余高的影响,熔宽和余高都会随着送丝速度的增加而增加。原因是当送丝速度不断增大时,呈线性关系的焊接电流也在不断增大,因此,熔池的热输入和单位时间内进入熔池的金属量也随之增大,熔融金属在表面张力的作用下不断铺展,焊缝的熔宽呈线性增加;在熔池冷却凝固过程中,熔融金属受重力作用,焊缝的余高呈线性增加。但焊缝的熔宽和余高不会一直呈线性增加,在其它焊接工艺参数一定时,当送丝速度达到临界值时,焊缝会出现不规则形态,如图3g所示。从图3中可以看出,当送丝速度较小时,焊接电流较小,相应的热输入较小,熔池冷却速度较快,焊道表面粗糙,焊缝两端出现前宽后窄的现象,成形熔宽较窄,不利于后续多层堆焊试验;当送丝速度较大时,焊接电流较大,熔池流动性较好,焊道成形表面圆滑且美观,较宽的熔宽有利于后续多层堆焊成形试验,但当送丝速度超过6.0 m/min时,焊缝会出现驼峰缺陷,如图3g所示。

表2 不同送丝速度下的焊接试验

编号	送丝速度 $v_f/(m \cdot min^{-1})$	焊接速度 $v_w/(m \cdot min^{-1})$	焊丝伸出长度 l/mm	熔宽 W/mm	余高 H/mm	热输入 $E/(J \cdot cm^{-1})$
1	3.0	0.2	10	4.12	3.60	2 967
2	3.5	0.2	10	4.78	3.86	3 423
3	4.0	0.2	10	5.22	4.16	4 106
4	4.5	0.2	10	5.80	4.50	4 699
5	5.0	0.2	10	6.30	4.80	5 302
6	5.5	0.2	10	7.10	5.18	5 907
7	6.0	0.2	10	—	—	6 720

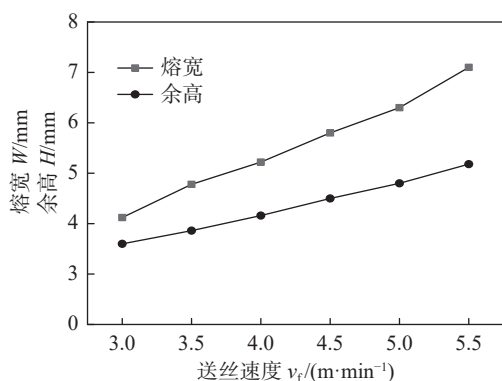


图2 不同送丝速度下焊缝熔宽和余高变化

针对出现驼峰缺陷,给出了仰焊熔池静力平衡模型,如图4所示^[22]。解释这种现象有2个原因:①表面张力与温度成反比,过高的热输入降低了表面张力,即降低了保持力,难以保持熔池稳定性;②熔融金属的体积和质量随着送丝速度的增加而增加,从而增加了重力,过多的热输入也延长了熔融金属冷却凝固时间;随着更长的冷却时间,熔融金属不断向后方熔池聚集,焊缝几何形状恶化,出现“驼峰”现象。

2.2 焊接速度对成形尺寸的影响

为了研究焊接速度的影响,送丝速度为3.5 m/min,

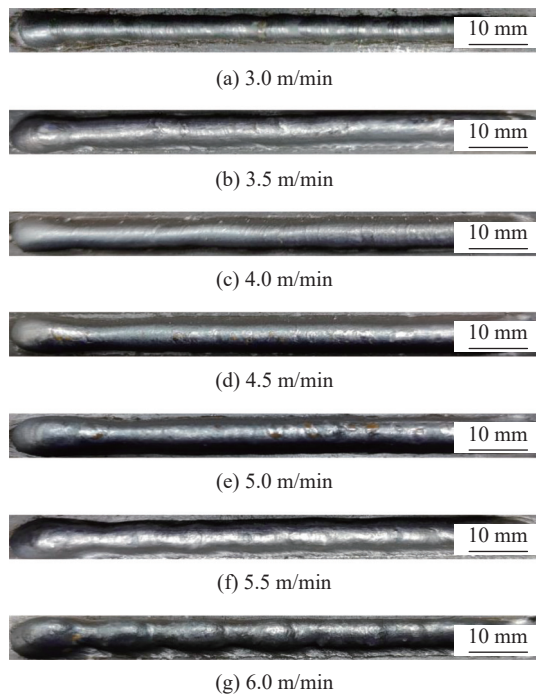


图3 不同送丝速度下的焊缝形貌

焊丝伸出长度为 10 mm, 而焊接速度在 0.10 ~ 0.40 m/min 之间变化, 表 3 列出了仰焊单道焊缝试验的焊接工艺参数设置、每条焊缝的熔宽与余高的测量值和对应的热输入。图 5 给出了不同焊接速度下焊缝熔宽和余高的变化情况。不同焊接速度下单道焊缝外观形貌如图 6 所示。通过试验发现, 随着焊接速度的增加, 焊缝的熔宽和余高都会有所变化。从图 5 可以看出

表 3 不同焊接速度焊接试验

编号	焊接速度 $v_w/(m \cdot min^{-1})$	送丝速度 $v_f/(m \cdot min^{-1})$	焊丝伸出长度 l/mm	熔宽 W/mm	余高 H/mm	热输入 $E/(J \cdot cm^{-1})$
8	0.10	3.5	10	6.40	5.80	6 846
9	0.15	3.5	10	5.80	4.16	4 564
10	0.20	3.5	10	4.78	3.86	3 423
11	0.25	3.5	10	4.48	3.10	2 738
12	0.30	3.5	10	3.92	2.70	2 282
13	0.35	3.5	10	3.62	2.38	1 956
14	0.40	3.5	10	—	—	1 712

对于出现驼峰缺陷, 给出驼峰形成机制示意图, 如图 7 所示^[23]。解释这种现象原因如下: 在电弧压力和熔滴的冲击力下, 在基板上产生熔池区域, 焊丝和基板的熔融金属从电弧中心连续流动到熔池后方,

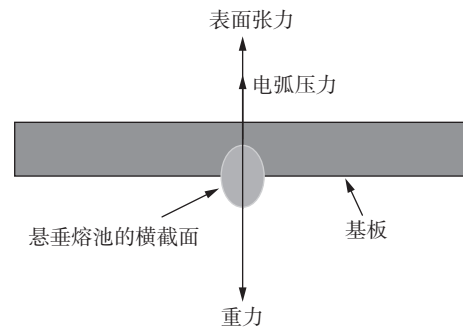


图 4 仰焊熔池静力平衡模型

使用适当的焊接速度, 熔融金属回填熔池; 在高焊接速度下, 焊丝末端始终位于熔池的前缘, 导致熔池过渡区域过早凝固, 随着温度的下降, 由于熔融金属在尾部的“隔离”而形成驼峰缺陷。

焊接速度对熔宽和余高的影响, 熔宽和余高都会随着焊接速度的增加而减小。原因是当焊接速度较小时, 过慢的成形速度使得单位时间内进入熔池的金属量增大, 热输入也增大, 熔融金属在表面张力的作用下不断铺展, 又由于重力的作用, 焊缝的熔宽和余高比较大; 当焊接速度较大时, 单位时间内进入熔池的金属量减小, 热输入也减小, 焊缝的熔宽与余高呈线性减小。但焊缝的熔宽和余高不会一直呈线性减小, 在其它焊接工艺参数一定时, 当焊接速度达到临界值时, 焊缝会出现不规则形态, 如图 6g 所示。从图 6 中可以看出, 当焊接速度较小时, 热输入大, 熔池冷却速度慢, 焊缝表面不光滑, 焊接效率低; 当焊接速度较大时, 热输入减少, 熔池冷却时间较快, 焊缝表面圆滑且美观, 有利于后续多层堆焊成形试验。但当焊接速度达到 0.40 m/min 时, 焊缝会出现驼峰缺陷, 如图 6g 所示。

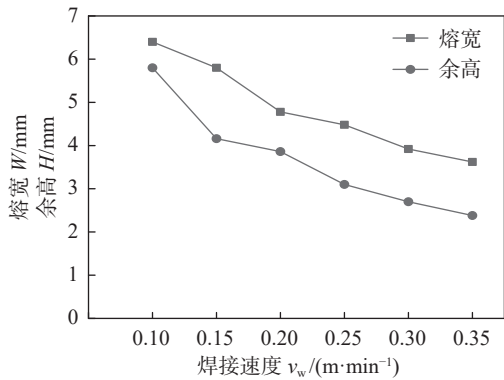


图5 不同焊接速度下焊缝熔宽和余高变化

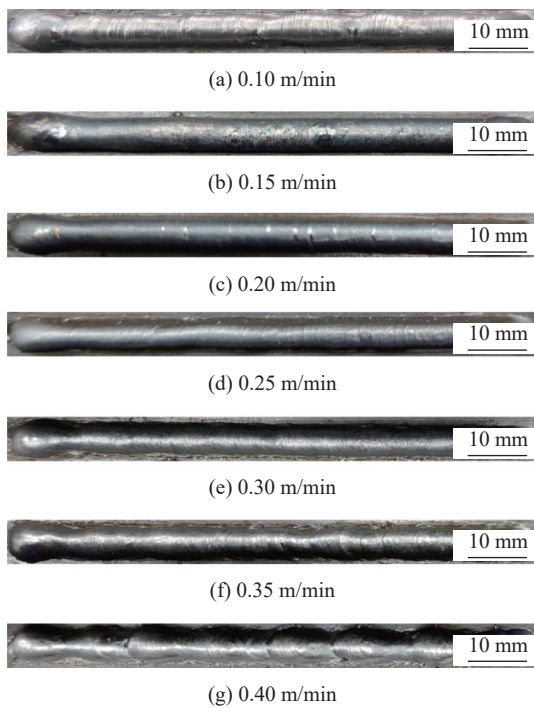


图6 不同焊接速度下的焊缝形貌

2.3 焊丝伸出长度对成形的影响

为了研究焊丝伸出长度的影响,送丝速度为 3.5

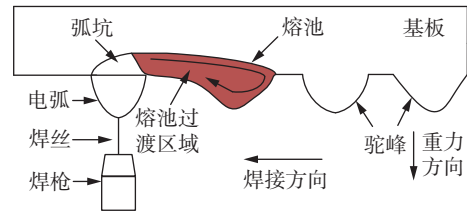


图7 驼峰形成机制示意图

m/min, 焊接速度为 0.25 m/min, 而焊丝伸出长度在 2 ~ 18 mm 之间变化, 表 4 列出了仰焊单道焊缝试验的焊接工艺参数设置及平均焊接电流和平均电弧电压。不同焊丝伸出长度下单道焊缝外观形貌如图 8 所示。表 4 中平均焊接电流和电弧电压信息通过焊接电源中的内置传感器获取并计算得出, 从表 4 中可以看出电流随着焊丝伸出长度的增加而减小, 而电弧电压几乎保持不变。原因是: 熔化极气体保护焊在焊接时, 弧长随电弧电压变化而变化, 通常使用恒压电源来维持稳定的电弧, 因此电弧电压恒定; 根据欧姆定律, 通过电阻的电流与电阻成反比, 随着弧长保持稳定, 焊丝伸出长度的增加, 焊丝的电阻增大, 为了保持恒定的电弧电压, 焊接电流在电源自动调节下减小。从图 8 中可以看出, 随着焊丝伸出长度的增加, 焊缝形貌出现了恶化。原因是: 焊丝伸出长度的增加, 焊接电流减小和焊丝对热量的消耗增加, 导致工件的热输入减少, 焊接过程不稳定; 尤其达到一定值时, 焊接过程中弧长起伏变化较大, 飞溅增多, 焊接不连续, 容易产生缺陷, 如图 8e 所示。

2.4 单道多层堆焊成形

根据前面试验提出仰焊单道多层堆焊的策略: 减小热输入, 减少熔池冷却时间, 减小熔池扰动。根据这个策略, 送丝速度不易选太大, 焊接速度不易选太小。根据上文试验及前期试验结果^[24], 选择①送丝速度 4.0 m/min、焊接速度 0.25 m/min、焊丝伸出长度

表 4 不同焊丝伸出长度焊接试验

编号	焊丝伸出长度 l / mm	送丝速度 $v_f / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	焊接速度 $v_w / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	平均焊接电流 I / A	平均电弧电压 U / V	熔宽 W / mm	余高 H / mm
15	2	3.5	0.25	104	15.9	5.08	3.10
16	6	3.5	0.25	100	15.8	5.20	3.24
17	10	3.5	0.25	97	15.8	4.66	3.04
18	14	3.5	0.25	94	15.9	3.70	2.96
19	18	3.5	0.25	90	15.8	—	—

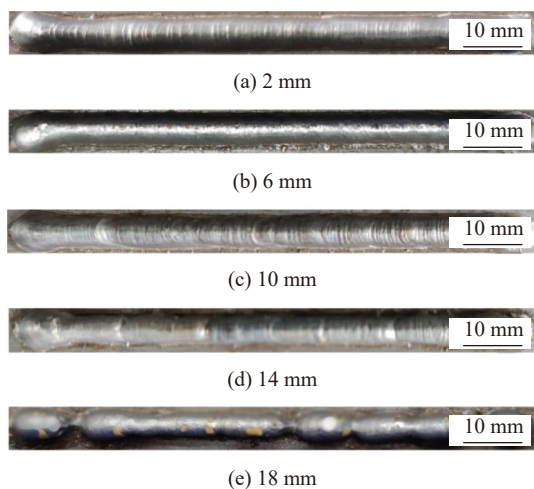


图8 不同焊丝伸出长度下的焊缝形貌

6 mm; ②送丝速度 3.5 m/min、焊接速度 0.20 m/min、焊丝伸出长度 6 mm; ③送丝速度 3.5 m/min, 焊接速度 0.25 m/min, 焊丝伸出长度 6 mm 这 3 组参数在另外一块相同材料的基板上进行了仰焊单道多层堆焊试验, 连续堆焊 10 层, 每层采用交替式焊接路径。

第①组和第②组参数下的试验结果如图 9 所示。这 2 组参数下均未能实现连续堆焊 10 层成形。在第③组参数下, 成功进行了连续 10 层堆焊试验, 结果如图 10 所示。验证了所提出的策略的可行性。

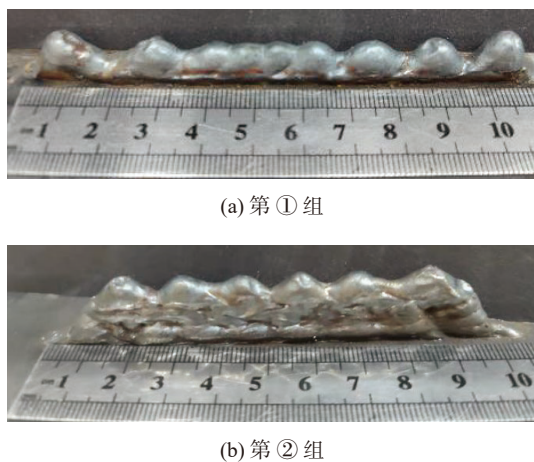


图9 第①组和第②组参数单道多层堆焊成形

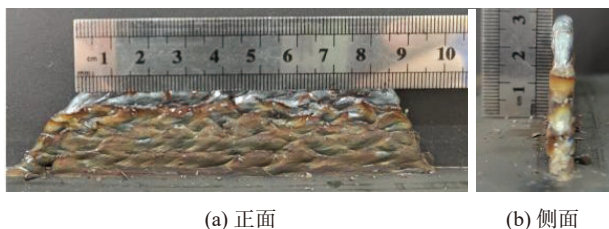


图10 第③组参数单道多层堆焊成形

为了测试单道多层堆焊零件的抗拉强度, 对单道多层堆焊零件水平方向进行了拉伸试验, 试样按国标 GB/T 228—2002《金属材料 室温拉伸试验方法》的要求利用线切割切取, 如图 11a 所示, 并用砂纸进行打磨。拉伸试验在拉伸试验机上进行, 在室温条件下, 加载速率为 2 mm/min, 拉伸试样发生了明显的颈缩, 如图 11b 所示。试件的抗拉强度为 518 MPa, 如图 12 所示。比焊丝的抗拉强度 500 MPa 略高, 能满足一些对精度要求不高的零件的使用要求。

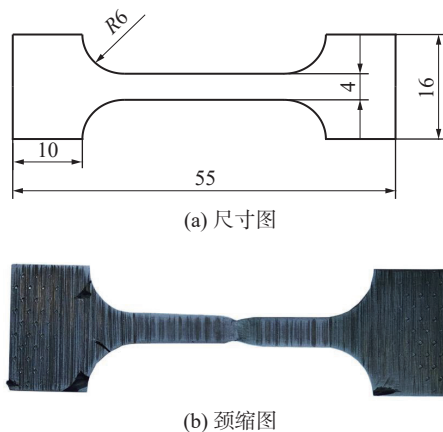


图11 拉伸试样尺寸图及颈缩图

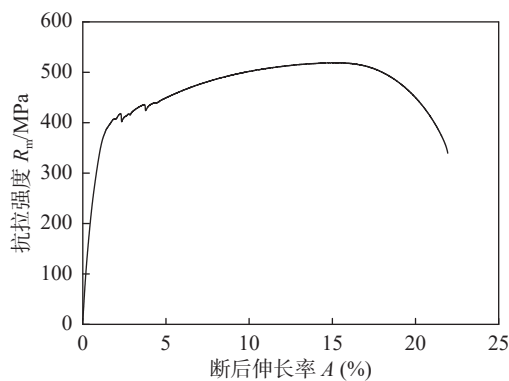


图12 拉伸试验结果

3 结论

(1)通过单因素法研究了送丝速度、焊接速度和焊丝伸出长度 3 个主要焊接工艺参数对仰焊单道焊缝熔宽和余高的影响, 熔池受到重力、表面张力等综合作用达不到平衡状态是焊缝出现驼峰等缺陷的原因。

(2)提出仰焊单道多层堆焊的策略: 减小热输入, 减少熔池冷却时间, 减小熔池扰动。在送丝速度 3.5 m/min, 焊接速度 0.25 m/min, 焊丝伸出长度 6 mm 的

参数下实现了连续堆焊 10 层成形, 测试抗拉强度达到 518 MPa, 验证了所提出策略的可行性。

参考文献

- [1] 徐富家, 杨义成, 雷振, 等. 激光同轴送粉增材制造粉末束流关键特征表征与分析[J]. 焊接学报, 2022, 43(8): 68 – 72.
- [2] 王廷, 王一帆, 魏连峰, 等. TC4钛合金低压电子束熔丝沉积层组织与性能[J]. 焊接学报, 2020, 41(10): 54 – 59.
- [3] Sun Qingjie, Sang Haibo, Liu Yibo, et al. Cross section scan trace planning based on arc additive manufacturing[J]. *China Welding*, 2019, 28(4): 16 – 21.
- [4] Yin Yan, Zhang Yuan, Dong Kaiji, et al. The development of 3D printing technology and the current situation of controlling defects in SLM technology[J]. *China Welding*, 2020, 29(3): 9 – 19.
- [5] 邵世友, 李东, 曾春杰, 等. 一种Ti-6Al-4V功能梯度网状结构的设计与压缩性能[J]. 焊接学报, 2019, 40(7): 156 – 160.
- [6] 杨健, 陈静, 张强. 激光近净成形TC21钛合金的组织与性能[J]. 金属热处理, 2015, 40(3): 48 – 52.
- [7] 陈国庆, 树西, 张秉刚, 等. 国内外电子束熔丝沉积增材制造技术发展现状[J]. 焊接学报, 2018, 39(8): 123 – 128.
- [8] 郝婷婷, 李承德, 王旭, 等. 钎含量对电弧增材制造2319铝合金组织与性能的影响[J]. 焊接学报, 2022, 43(7): 49 – 56.
- [9] 林三宝, 夏云浩, 董博伦, 等. 双丝电弧增材制备Al-Mg-Zn-Cu-Sc铝合金工艺与组织性能[J]. 焊接学报, 2022, 43(11): 36 – 42.
- [10] 杨笑宇, 李言, 赵鹏康, 等. 电弧增材制造技术在材料制备中的研究现状及挑战[J]. 焊接, 2018(8): 14 – 20.
- [11] 种润, 郭绍庆, 张文扬, 等. GH4169合金激光增材制造过程热-力发展数值模拟[J]. 焊接, 2021(3): 13 – 21.
- [12] Pan Jiajing, He Xixin, Zhao Pengcheng, et al. Numerical analysis of typical droplets transfer mode in wire and arc additive manufacture process[J]. *China Welding*, 2020, 29(3): 44 – 53.
- [13] 周好斌, 高东, 刘皓. 焊接快速成形技术的发展现状及思考[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2018, 33(2): 106 – 112.
- [14] Jiang J C, Xu X, Stringer J. Support structures for additive manufacturing: a review[J]. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2018, 2(4): 64 – 87.
- [15] Kazanas P, Deherkar P, Almeida P M S, et al. Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2012, 226(6): 1042 – 1051.
- [16] Radel S, Diourte A, Soulié F, et al. Skeleton arc additive manufacturing with closed loop control[J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 26: 106 – 116.
- [17] 陈贤达, 母中彦, 罗曼乐兰, 等. 斜壁无支撑结构激光熔丝增材制造的驼峰形成机理[J]. 电焊机, 2021, 51(12): 23 – 27.
- [18] 郑明涛. 耐热合金管子-管板仰焊工艺研究及应用[J]. 压力容器, 2021, 38(7): 81 – 86.
- [19] 刘帛炎, 郭春富, 苗澍. TA2钛合金管道仰焊位置PAW焊缝成形研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(5): 63 – 67.
- [20] 刘黎明, 陈亮, 宋刚. 高强度低功率脉冲激光诱导熔化活性气体保护电弧仰焊成形[J]. 中国机械工程, 2020, 31(17): 2137 – 2141.
- [21] 刁国宁, 徐国敏, 张天奕, 等. 焊丝伸出长度对三丝间接电弧焊稳定性和焊缝成形的影响[J]. 焊接学报, 2022, 43(3): 31 – 36.
- [22] 韩常乐. 无支撑悬垂结构电弧增材制造工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2020.
- [23] Yuan Lei, Pan Zengxi, Ding Donghong, et al. Fabrication of metallic parts with overhanging structures using the robotic wire arc additive manufacturing[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 6: 24 – 34.
- [24] 许燕, 邓红敏, 单学海, 等. 堆焊快速成形中的缺陷分析及参数优化[J]. 热加工工艺, 2017, 46(15): 194 – 198.

第一作者: 李晨阳, 硕士; 主要从事电弧增材制造工艺的研究; 747458685@qq.com。

通信作者: 许燕, 硕士, 教授, 博士生导师; 主要从事金属增材智能控制与成形性能的研究; 1370973166@qq.com。

(编辑: 王龙权)

本文引用格式:

李晨阳, 许燕, 周建平, 等. 焊接工艺参数对仰焊 MAG 堆焊成形的影响[J]. 焊接, 2023(3): 32 – 38.

Li Chenyang, Xu Yan, Zhou Jianping, et al. Effects of welding parameters on formation of overhead position MAG surfacing[J]. *Welding & Joining*, 2023(3): 32 – 38.