文章编号:1674-2869(2024)06-0657-06

基于冷金属过渡焊接的铝合金增材制造工艺研究

李景乾[1,2,3],菅晓霞*[1,2],万文轩[1]

1. 武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430205;
2. 智能焊接装备与软件工程技术湖北省研究中心,湖北 武汉 430205;
3. 中核四0四有限公司,甘肃 嘉峪关 735100

摘 要:5183铝合金具有优异的比强度、比刚度及耐腐蚀性能,在航空航天及交通运输领域应用广泛。使用增材制造技术加工5183铝合金构件在缩短周期、降低成本等方面具有显著优势,但是目前采用丝弧增材工艺制造的铝合金具有表面精度低、力学性能不佳等问题。本文采用基于冷金属过渡焊接的工艺制造5183铝合金薄壁件,研究工艺参数对增材形貌及力学性能的影响规律。结果表明,当焊接速度为7 mm/s、焊接电流为110 A时,焊缝表面光滑,成形系数λ接近1,是所选范围内最优的焊接工艺参数。沉积态铝合金中下部区域层内晶粒组织以细小的等轴晶为主,而层间晶粒有枝晶破碎和晶粒粗化现象。所选取试样在水平方向和竖直方向上的平均抗拉强度分别为245.2、211.7 MPa,各向异性特征不明显,平均断后伸长率分别为19.5%和10.3%,高度方向塑性较差。试样拉伸断口位于层间结合区域,在气孔侧壁上分布有很多细小的微裂纹,证明气孔与裂纹降低了铝合金承载外部载荷的能力,同时也增加了构件的开裂倾向。

关键词:电弧焊接;快速成型;铝合金;力学性能

中图分类号:TG444 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202207014

Aluminum alloy additive manufacturing process based on cold metal transfer welding technology

LI Jingqian[1,2,3], *JIAN Xiaoxia*[*1,2], *WAN Wenxuan*[1]

1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;
2. Hubei Research Center of Intelligent Welding Equipment and Software Engineering Technology, Wuhan 430205, China;
3. China National Nuclear Industry Corporation 404, Jiayuguan 735100, China

Abstract: The 5183 aluminum alloy exhibits exceptional specific strength, specific stiffness, and corrosion resistance, making it a widely applied material in aerospace and transportation industries. Utilizing additive manufacturing technology for processing 5183 aluminum alloy components offers notable advantages in terms of production cycle and cost reduction. However, current aluminum alloys produced using the wire arc additive processes suffer from issues such as low surface accuracy and poor mechanical properties. This study focuses on the fabrication of thin-walled 5183 aluminum alloy components using cold metal transfer additive manufacturing. Through experimentation, optimal welding parameters were determined, to investigate their influence on morphology and mechanical performance of manufactured additives. Findings reveal that at a welding speed of 7 mm/s and a welding current of 110 A, the weld seam exhibits a smooth surface, with a forming coefficient λ close to 1, representing the optimal welding parameters within the specified range.

收稿日期:2022-07-10

基金项目:国家自然科学基金(51705133)

作者简介:李景乾,硕士研究生。Email:2292164617@qq.com

***通信作者**:菅晓霞,博士,副教授。 Email:179947304@qq.com

引文格式:李景乾,菅晓霞,万文轩. 基于冷金属过渡焊接的铝合金增材制造工艺研究[J]. 武汉工程大学学报,2024,46(6):657-662.

Microstructural analysis indicates that the middle and lower regions of the deposited 5183 aluminum alloy predominantly feature fine equiaxed grains, while interlayer grains display varying complexities in size, type, and orientation, accompanied by dendrite fragmentation and grain coarsening phenomena. The average tensile strength of the selected samples in the horizontal and vertical directions is 245.2 and 211.7 MPa respectively, with fracture elongation rates of 19.5% and 10.3%, respectively, and the plasticity is relatively poor in the vertical direction. Tensile fractures occur at interlaminar bonding areas, revealing numerous fine microcracks along the sidewall of the pores, which suggests that pores and cracks compromise the load-bearing capacity of the aluminum alloy, exacerbating the propensity for cracking of the components.

Keywords: arc welding; rapid prototyping; aluminum alloy; mechanical properties

增材制造技术是一种通过逐层累积原材料来制造零件的工艺,与传统制造工艺相比,增材制造技术加工成本低,研发周期短,制造形式灵活[1-2]。金属的增材制造以激光、电子束和电弧作为移动热源,相比于前两种热源,电弧增材制造(wire arc additive manufacturing,WAAM)具有沉积效率高、制造成本低、加工尺寸不受限等优点[3],近年来广泛应用于工业生产领域。

铝合金材料由于质量轻、比强度高和低温性能好等优点广泛应用于工业、医疗等领域[4-7]。虽然目前铝合金增材主要采用高能束热源,但是铝合金对激光的反射率高,热源利用率低,难以推广应用[8-10]。以电弧作为热源进行铝合金增材制造,具有效率高、成本低廉的显著优势,近年来受到广泛的关注。但WAAM过程中成形试样精度不足,气孔率高,成形过程易出现塌陷等缺点[11-12]。

本文采用Fronius公司研发的冷金属过渡(cold metal transfer,CMT)技术进行5183铝合金增材制造技术的工艺研究。该项技术相对于传统的焊接技术在熔滴短路过渡时,电流迅速下降(接近0 A),电弧自动熄灭,从而极大减小热输入,减少零件变形和残余应力[13-14],特别适合低熔点金属的快速成形。采用CMT技术建立铝合金WAAM系统,研究不同的焊接工艺参数对焊缝成形特征的影响,分析不同焊接工艺下堆焊成形试样的微观组织和力学性能。

1 实验部分

选用尺寸为300 mm×150 mm×5 mm的5356铝合金基板作为母材,焊丝选用直径1.2 mm的5183铝镁合金焊丝,焊丝化学成分见表1。焊接前先用不锈钢刷清除基板氧化物并用酒精湿巾擦拭油污。

表1 基板和焊丝化学成分

Tab. 1 Chemical compositions of base metal and filler wire %

材料	w(Si)	w(Mg)	w(Zn)	w(Fe)	w(Cr)	w(Ti)	w(Cu)	w(Mn)	w(Al)
基板	0.04	4.8	0.01	0.110	0.1	0.008 5	0.010	0.14	余量
焊丝	0.04	4.8	0.01	0.004	0.2	0.001 5	0.005	0.85	余量

实验中采用的增材制造系统如图1所示,基本组成包括CMT弧焊电源(CMT 5000R Advanced)、送丝机、六轴焊接机器人、机器人控制柜、焊接平台和焊接保护气(99.99%纯氩气)组成。



图1 WAAM设备

Fig. 1 WAAM equipment

2 结果与讨论

2.1 焊接参数对单层焊缝的影响

为实现定量分析,定义焊缝的成形系数为λ($\lambda=W/h$,其中W为焊缝成形宽度,即层宽,h为焊缝成形高度,即余高),其余参数为润湿角θ和熔深a。上述特征参数如图2所示。

为了研究电流对成形的影响,采用一元化焊接方法,设定焊接速度为7 mm/s,其余参数保持一致,在不同焊接电流下开展单道单层焊接实验。所得焊缝的宏观形貌如图3所示。

由图3可以看出铝合金焊缝整体无明显缺陷、表面光滑、致密性良好、成形美观。焊缝横截面如

图4所示。由图4可知，当焊接电流为110 A时，焊缝截面扁而宽，表面平整度好，同时也能保证焊接效率。

图5为不同焊接电流下焊缝成形特征参数的变化曲线。当电流在90~100 A范围时，熔深 a 和成形系数 λ 变化较小，当超过100 A时，二者上升幅度明显加快；润湿角 θ 总体变化趋势接近于线性

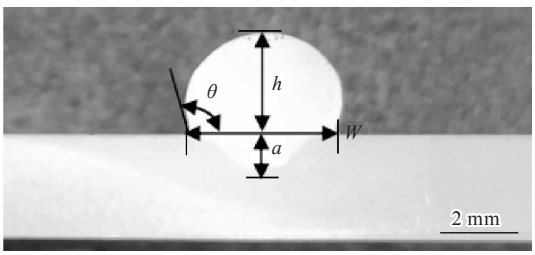

图2　单层焊缝成形特征

Fig. 2　Single-layer weld forming features

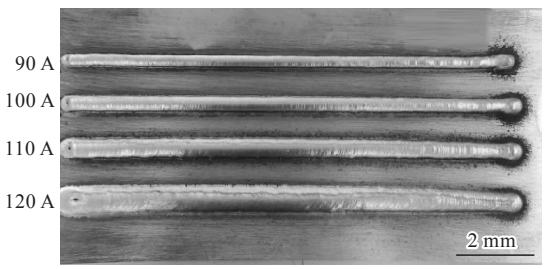

图3　不同焊接电流下铝合金单层焊缝宏观形貌

Fig. 3　Macroscopic morphology of aluminum alloy single-layer weld under different welding currents

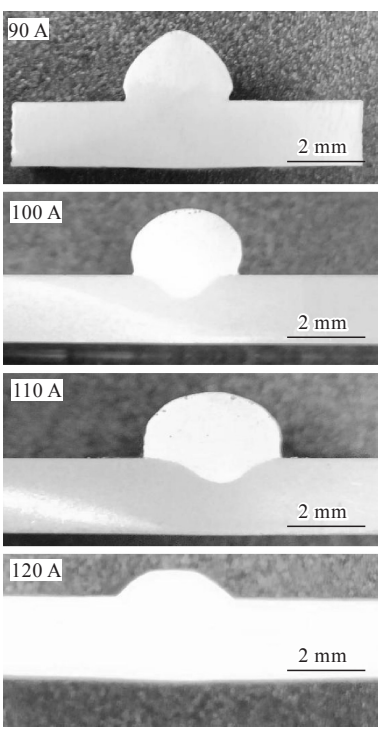

图4　不同焊接电流下单层焊缝截面图

Fig. 4　Cross-section of a single-layer specimen with different welding currents

增大。分析认为焊接电流在90 A时，母材熔化量少，熔池体积小，熔深及液态金属铺展性均不足，熔化的焊丝主要转化为余高 h，导致润湿角 θ 较小。随着焊接电流 I 的增加，热源在基板上的线能量增大，热输入量大幅增加，基板温度提升，液态金属铺展性变好，熔深、熔宽增加，余高变化不明显。

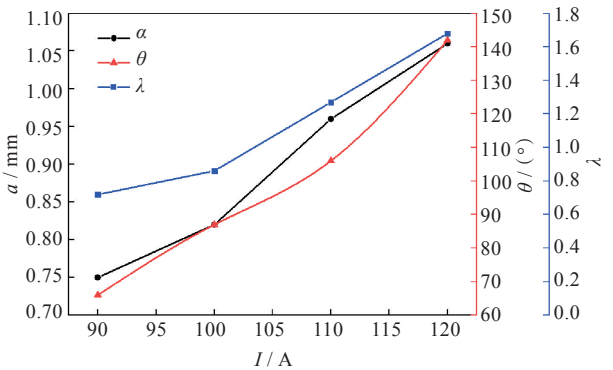

图5　不同焊接电流下焊缝成形特征参数变化情况

Fig. 5　Changes in weld forming characteristic parameters under different welding currents

焊接速度直接影响焊缝的成形质量和尺寸精度。焊接速度与线能量呈负相关，这是因为当焊接速度过小时，熔化金属量增多，焊缝变宽；而当焊接速度过大时，熔化金属量减少，焊缝成形不良，甚至出现焊缝成形不连续。图6为采用CMT焊接模式，焊接电流为110 A，不同焊接速度下获得的单层焊缝。

当焊接速度为5 mm/s时，熔宽较宽。其原因是焊接速度较低时，母材上线能量大，单位时间内熔化金属量多。焊接速度为13 mm/s时，焊缝成形并不均匀，这是因为熔敷金属因焊接速度过大而来不及铺展，致使焊缝呈现不均匀甚至不连续的现象。图7为焊缝截面打磨后的情况。可以看出，随着焊接速度的增大，所得试样成形宽度减小幅度较大，高度变化不明显。

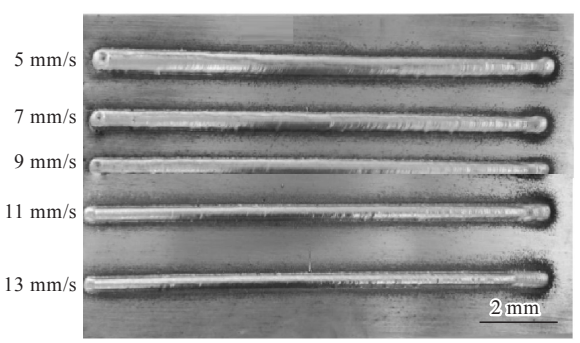

图6　不同焊接速度下单层成形试样

Fig. 6　Single-layer formed specimens at different welding speeds

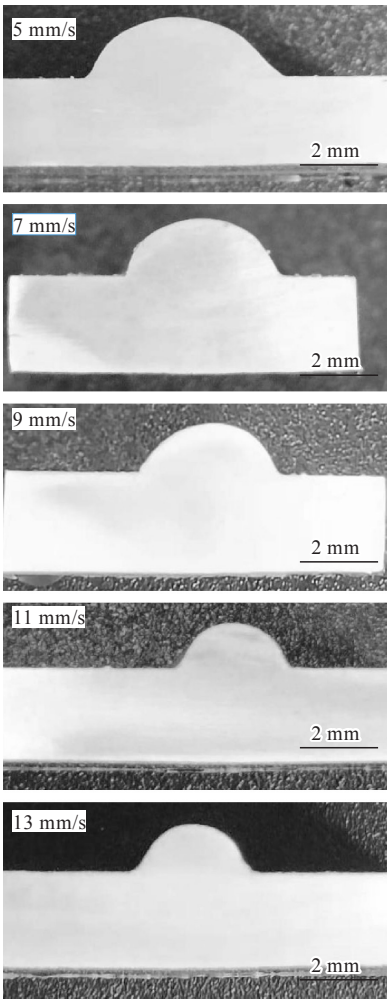

图7 不同焊接速度下单层试样截面图

Fig. 7 Cross-sectional view of a single-layer specimen at different welding speeds

图8为不同焊接速度下熔深、润湿角及成形系数变化曲线。由图8可以看出 a 随焊接速度增大，总体上呈递减趋势；θ 上下浮动的幅度较小，总体变化趋势不太明显；λ 随焊接速度的增大先减小后增大。分析认为焊接速度增大后，线能量降低，母材熔化量减少，熔池体积变小，熔深呈线性递减；

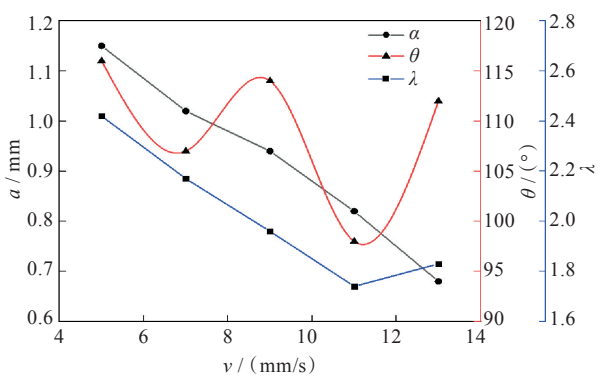

图8 不同焊接速度下焊缝成形特征参数变化情况

Fig. 8 Changes in weld forming characteristic parameters at different welding speeds

虽然液态金属铺展性下降，但焊丝熔化量减少，导致余高并无明显增加的趋势，润湿角保持相对稳定；随着焊接速度的增加，层宽减小的速率高于余高减小的速率，焊接速度增加到11 mm/s后，层宽的减小速率小于余高的减小速率，导致 λ 先减小后增大。

2.2 焊接工艺对增材制造铝合金试样的影响

采用热输入最低的变极性冷金属过渡(CMT-ADV)和热输入最高的脉冲冷金属过渡(CMT-P)两种焊接模式进行堆焊。每种焊接方法采用3组工艺参数，具体如表2所示，其中 U 为焊接电压。通过调整送丝速度 μ 和焊接速度 v 的大小，使同种焊接模式下3组实验的线能量 E 相近。

如图9所示，6组沉积试样在增材首层统一设定左侧为起弧端、右侧为收弧端，后续沉积层则为往复焊接。由图9可以看出试样在其起弧阶段和收弧阶段成形质量较差，焊接中间部分成形质量较高。

表2 焊接方法及工艺参数

Tab. 2 Welding methods and process parameters

焊接模式	I / A	U / V	μ / (m/min)	v / (mm/s)	E / (J/mm)
CMT+ADV-1	122	10.3	9	103.84	396.85
CMT+ADV-2	109	10.1	8	91.67	384.70
CMT+ADV-3	96	9.8	7	78.34	419.64
CMT+P-1	159	19.3	9	255.67	271.53
CMT+P-2	109	19.2	8	224.00	264.66
CMT+P-3	96	19.1	7	191.00	256.60

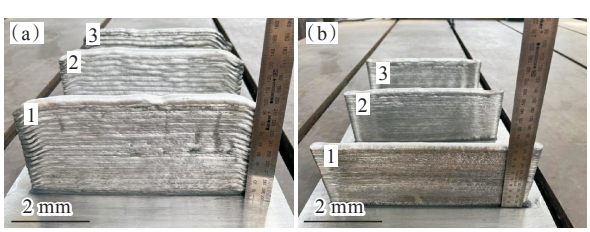

图9 不同焊接模式下沉积态试样宏观形貌：(a)CMT+ADV焊接模式，(b)CMT+P焊接模式

Fig. 9 Macroscopic morphology of the sedimentary specimens under different welding modes: (a) CMT+ADV welding mode, (b) CMT+P welding mode

以线能量输入较大的CMT+ADV-1试样为例，研究不同位置处沉积态组织在层间与层内晶粒形貌的差异性。

选择成形质量较稳定的中下部区域观察层间与层内晶粒形貌，发现层内晶粒表现为等轴晶形貌，晶粒尺寸相近，如图10(a)所示。与层内相比，

层间的晶粒由大小不一的柱状晶逐渐向等轴晶转变，如图10(b)所示，且层间区域出现更多气孔、裂纹等缺陷。

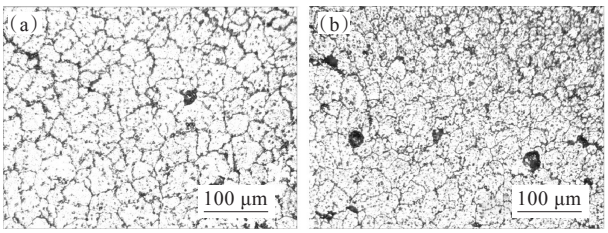

图10　沉积态试样中部区域晶粒形貌：(a)层内组织形貌，(b)层间组织形貌

Fig. 10　Grain morphology in the middle region of specimen in the sedimentary state: (a) intrastratum tissue morphology, (b) interlaminar tissue morphology

增材试样的中部与底部具有类似的晶粒形貌及演化趋势，不同之处在于底部区域层中部分晶粒尺寸更小，层间偏下部分晶粒粗化程度更明显，气孔更多，如图11所示。

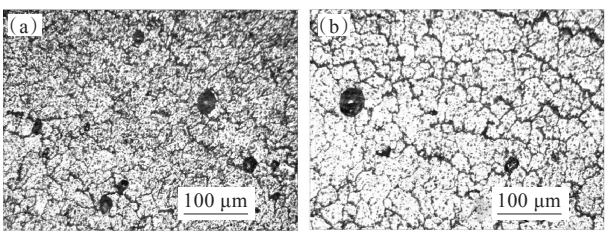

图11　沉积态试样底部区域晶粒形貌：(a)层内组织形貌，(b)层间组织形貌

Fig. 11　Grain morphology of the bottom region of specimen in the sedimentary state: (a) intrastratum tissue morphology, (b) interlaminar tissue morphology

观察水平方向成形试样和竖直方向成形试样经拉伸断裂后的断口形貌，分析同一成形工艺下两种成形方向上断口形貌的特点及产生的原因。图12为得到的CMT+ADV-1试样竖直方向放大500和1 000倍的拉伸试样断口形貌。可以看到500倍下断面表现出凹凸不平的特点，在断面的边缘部位，出现了部分剪切带，剪切带内有孔洞类缺陷；放大至1 000倍后观察到大量韧窝，为准解理断裂特征。

图13为拉伸试样水平方向放大500和1 000倍的断口形貌。在放大倍数为500倍时，韧窝数量相对较多，呈均匀密集状分布，断面相较于竖直方向较为平整；继续放大至1 000倍，可以看到许多分布均匀的韧窝，大量的韧窝也表明在水平方向上拉伸试样为微孔聚集型断裂，这是典型的韧性断裂。

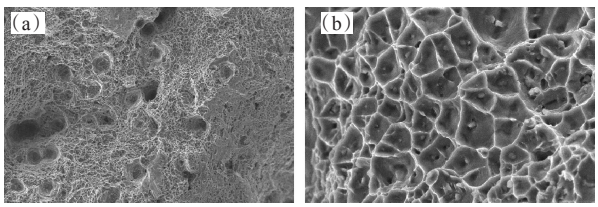

图12　竖直方向拉伸断口：(a)放大500倍，(b)放大1 000倍

Fig. 12　Stretch the fracture vertically: (a) 500x magnification, (b) 1 000x magnification

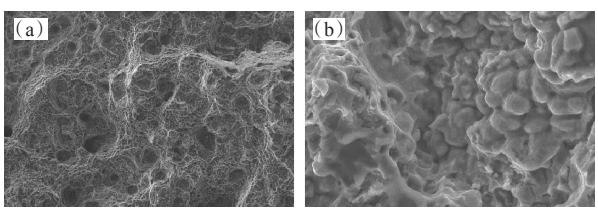

图13　水平方向拉伸断口：(a)放大500倍，(b)放大1 000倍

Fig. 13　Stretch the fracture horizontally: (a) 500x magnification, (b) 1 000x magnification

3　力学性能

力学性能是增材制造铝合金结构件能否达到使用要求的重要指标。本文研究不同焊接模式及工艺参数下成形试样的力学性能。使用线切割方法在沉积试样的横向和纵向分别切割3个拉伸试件。根据GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》确定拉伸试样的尺寸，如图14所示。在室温条件下，将待测拉伸试样在Instron-5569电子万能试验机上进行拉伸测试。计算断后伸长率，并记录数据。对每个拉伸试样，采用多次测试求平均值的方法得到最终结果。

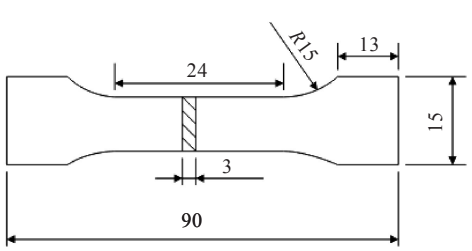

图14　拉伸试样尺寸

Fig. 14　Tensile specimen size

将所有增材制造试样在其有效部分的水平方向切取上、中、下3个标准试样，竖直方向上取前、中、后3个标准试样分别进行拉伸，测试每个试样的抗拉强度及断后伸长率，拉伸试样表面提前进行打磨处理，以消除直壁体表面的成型纹路，降低

拉伸试样表面粗糙度，进而保证拉伸结果的准确性。6组试样水平方向和竖直方向拉伸测试结果如图15所示。

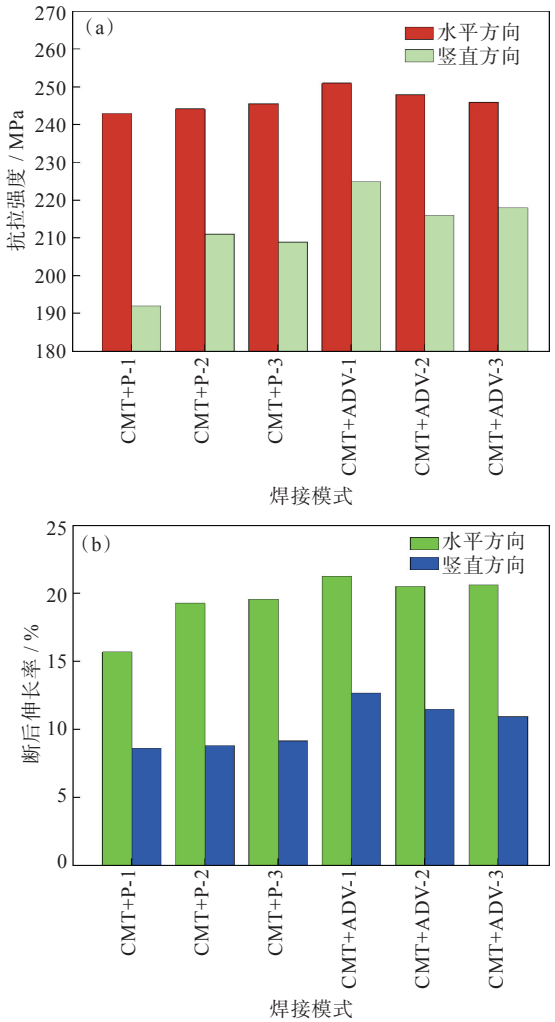

图15 沉积试样力学性能：(a)抗拉强度，(b)断后延伸率

Fig. 15 Mechanical properties of deposited samples: (a) tensile strength, (b) elongation after fracture

从图15中可以发现，增材制造所得试样的抗拉强度和断后伸长率均在水平和竖直两个方向上存在差异。经计算6个增材制造所得5183铝合金试样的水平方向和竖直方向的平均抗拉强度和平均断后伸长率分别为225 MPa和13.73%，而由铸态工艺所得5183铝合金的抗拉强度为290 MPa，断后伸长率为25%，增材制造得到的铝合金试样的抗拉强度和断后伸长率分别达到常规铸造的77.58%和54.92%。

由于CMT-P存在额外的脉冲电流，在焊接层数相等、焊接速度偏大、送丝速度一致的情况下，试样宽度明显大于CMT-ADV所得试样，且由于丝材熔化量少，试样体积小于CMT-ADV试样。在长度一定的情况下，其高度明显偏低。在竖直方向上切取其下部区域时，会切取到基板。为确保试样抗拉强度及断后伸长率的准确性，本文对该模式下得到的全部试样，在竖直方向上只选取上部和中部的拉伸数据。

对选取后的所有试样在水平方向和竖直方向上的力学性能进行对比，发现在水平方向和竖直方向上，平均抗拉强度分别为245.2和211.7 MPa，平均断后伸长率分别为19.5%和10.3%。沉积态5183铝合金在水平方向上的抗拉强度总是略微高于竖直方向，而断后伸长率则相差甚大，竖直方向平均值只能达到水平方向的52.9%，因此可认为力学性能存在一定的各向异性。

4 结 论

(1)基于CMT技术开展5183铝合金的电弧增材实验。随着焊接电流的增大，成形系数λ呈增大趋势；随焊接速度的增大，λ呈减小趋势，焊接速度为11 mm/s时，λ值最小。

(2)在相同线能量下，CMT-ADV与CMT-P两种焊接模式下增材所得6组试样经选取后，其在水平和竖直方向上的平均抗拉强度分别为245.2、211.7 MPa，两个方向平均断后延伸率分别为19.5%、10.3%，力学性能存在一定的各向异性。

(3)沉积层层内晶粒特征相近，层间晶粒形貌相对复杂。气孔大部分分布在层间位置，在水平方向上分布较少，呈条带状分布；而在竖直方向的断面中，气孔数量较多，呈均匀密集状分布。水平方向上拉伸试样为微孔聚集型断裂，存在大量的韧窝；竖直方向上断面较为平整，为准解理断裂。

参考文献

[1] HAI-OU Z, WANG R, LIANG L Y, et al. HDMR technology for the aircraft metal part [J]. Rapid Prototyping Journal, 2016, 22(6): 857-863.

[2] YU Z L, YUAN T, XU M, et al. Microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy fabricated by wire+arc additive manufacturing [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 62: 430-439.

[3] 刘一搏，孙清洁，姜云禄，等. 基于冷金属过渡技术快速成形工艺[J]. 焊接学报，2014，35(7)：1-4.

[4] 从保强，丁佳洛. CMT工艺对Al-Cu合金电弧增材制造气孔的影响[J]. 稀有金属材料与工程，2014，43(12)：3149-3153.

[5] 柏久阳. 2219铝合金GTA增材制造及其热处理过程的组织演变[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2019.

(下转第675页)