

960 高强钢脉冲 TIG 电弧增材制造热过程及组织与力学性能研究

陆万全^{1,2}, 乔及森^{1,2,✉}, 王磊^{1,2}, 刘永涛^{1,2}, 冯睿^{1,2}, 祝伟^{1,2}

1 兰州理工大学材料科学与工程学院, 兰州 730050

2 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050

采用直流和脉冲直流钨极惰性气体保护焊(Tungsten Inert Gas Welding, TIG 焊)电弧沉积工艺来制造 960 高强钢薄壁构件。通过对比分析两种沉积方法,系统研究了不同工艺因素对沉积热过程中熔滴过渡和熔池稳定性的影响,探讨了沉积与结合层微观组织和力学性能的演化规律,为脉冲 TIG(Pulsed-TIG)技术的工程应用提供有益参考。结果表明,直流 TIG-WAAM(Wire arc additive manufacturing)和脉冲直流 TIG-WAAM(Pulsed-TIG-WAAM)工艺下,构件整体成形过程相对稳定,脉冲直流沉积构件的焊道高宽比相对较低,加入脉冲后沉积层变得更为扁平,有利于沉积过程中熔池保持稳定,提高成形精度。沉积层自下而上的微观组织分布较不均匀,底层为细小奥氏体晶粒,中层为粗大等轴晶,顶层为奥氏体组织。脉冲的引入有效改善了组织均匀性,回火马氏体组织的形成提高了材料的塑性和韧性。直流 TIG-WAAM 和脉冲直流 TIG-WAAM 熔滴过渡模式分别为大滴过渡和细滴过渡,过渡频率分别为 5.24 Hz 和 9.17 Hz。脉冲条件下的细滴过渡模式更有利于保证整个沉积过程的热稳定性、构件成形精度和工艺稳定性。

关键词 脉冲 TIG 增材制造 960 高强钢 宏观和微观结构 熔滴过渡 力学性能

中图分类号: TG457 文献标识码: A

Study on Thermal Process, Microstructure and Mechanical Properties of Thin-walled Components During Pulsed TIG Wire Arc Additive Manufacturing of 960 High-strength Steel

LU Wanquan^{1,2}, QIAO Jisen^{1,2,✉}, WANG Lei^{1,2}, LIU Yongtao^{1,2}, FENG Rui^{1,2}, ZHU Wei^{1,2}

1 School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2 State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

We made a 3D printing of 960 high-strength steel thin-walled components using direct current and pulsed current wire arc additive manufacturing and conducted the research on thermal process, microstructure and mechanical properties of thin-walled components during wire arc additive manufacturing of 960 high-strength steel, which provides useful reference for the engineering application of Pulsed-TIG(PTIG) technology. The results indicated that both the direct current deposition and the pulsed current one are really stable, and have reliable precision. The height to width ratio of pulse current deposition component is relatively low and the deposition layer becomes more flatter after pulse is added, which is beneficial to keep the molten pool stable during deposition and improve the forming accuracy. The microstructure distribution of the sedimentary layer from bottom to top is not uniform. The bottom layer is composed of fine austenite grains, the middle layer is coarse equiaxed grains, and the top layer is composed of austenite and partially tempered martensite. Through the introduction of pulse, the structure uniformity and temper martensite structure formation are effectively improved, and the plasticity and toughness of the material are improved. Direct current TIG-wire arc additive manufacturing(TIG-WAAM) and pulse current TIG-wire arc additive manufacturing(PTIG-WAAM) droplet transition modes were large droplet transition and fine droplet transition, respectively, and the transition frequencies were 5.24 Hz and 9.17 Hz, respectively. The high-frequency transition mode of droplets under pulse current is more beneficial to ensure the thermal stability, forming accuracy and process stability of the whole deposition process.

Key words pulsed TIG wire arc additive manufacturing, 960 high-strength steel, macrostructure and microstructure, droplet transfer, mechanical property

0 引言

作为金属 3D 打印的一种^[1],丝材-电弧增材制造(Wire arc additive manufacturing, WAAM)是一项用于逐层制造复杂致密金属构件的增材技术^[2]。与传统的减材制造技术相比,WAAM 能实现复杂金属结构的快速、精确无模具成形,从而显著提高制造灵活性和生产效率^[3]。

脉冲 TIG(Pulsed-TIG)增材制造是 WAAM 领域一项重要的研究技术,通过周期性的脉冲电流精确控制熔滴过渡和熔池,达到金属的逐层沉积和净成形效果。相比于激光和电子束的粉体增材工艺,PTIG 电弧增材制造稳定性好、飞溅小、

电流可调控范围大,适用于制造高质量的金属 3D 构件^[4],特别是在复杂薄壁构件的直接制造方面前景突出。其具有生产成本低、零件密度高、原料利用率高等优点^[5],这极大地促进了 PTIG 在制造大型金属部件方面的应用^[6]。

目前 PTIG 增材制造技术的研究仍处于起步阶段,在材料方面,学者们主要针对镁铝合金、镍基合金、Ti-6Al-4V 以及不锈钢开展了研究,成功制备了薄壁板件和筒件等简单结构成形件。赵鹏康等^[7]针对 TIG 电弧增材制造的 5356 铝合金试样不同区域的微观组织及性能变化开展研究,结果表明,沉积层组织均以等轴晶为主,在灰色基体上弥散分布黑色 β -Al₃Mg₂ 第二相,并伴有少量 Mg₂Si 和 (FeMn)Al₆ 金属间化

基金项目:国家自然科学基金(52063017);有色金属先进加工与循环利用国家重点实验室联合资助项目(18LHPY007)

This work was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (52063017) and the Joint Found of State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals (18LHPY007).

✉ qiaojisen@lut.cn

21110135-1

DOI: 10.11896/cldb.21110135

合物,结合层存在大量气孔及缩孔等缺陷;底部区域沉积层晶粒尺度最小,而结合层缺陷最多。Guo 等^[8]利用 PTIG 增材制造 AZ31 镁合金件,结果表明,脉冲频率对成形件的宏观形貌有显著影响,在频率为 5 Hz 和 10 Hz 时,熔池发生了共振,因此成形件宏观成形质量较差。Katou 等^[9]利用 PTIG 增材制造 Ti 合金件,研究了工艺参数对成形质量的影响规律,并成功制备了 Ti 合金成形件。结果表明:随着峰值电流的增加,焊道的倾角和高度逐渐减小,熔宽逐渐增加,成形件中未发现气孔、裂纹等缺陷,而且微观组织比较均匀。而对高强度 PTIG 电弧增材的研究较少;在 PTIG 增材制造的热过程控制方面,主要集中于增材工艺对成形件组织与力学性能的影响规律研究,以及针对复杂零部件的快速工艺优化方法。PTIG 工艺参数复杂,对缺陷的敏感因素较多,因此掌握控形和控性的基本原理和方法至关重要。Qi 等^[10]探讨了 PTIG 电弧行为对单焊道成形尺寸的影响,结果表明,随着脉冲频率的增加,电弧电压、电弧力和电弧刚度增加,电弧收缩效应也逐渐显著,电弧力增大促使熔深增加,而电弧收缩则导致熔宽减小。Ghosh 等^[11]维持热输入不变,着重探讨了脉冲因子变化对单焊道成形质量的影响,结果表明因子 φ 变化对熔池的熔深、熔宽及传热行为有显著影响。

本工作使用直流和脉冲直流沉积来制造 960 高强度薄壁构件。通过对比分析两种沉积方法,系统研究了不同工艺因素对沉积热过程中熔滴过渡和熔池稳定性的影响,探讨了沉积与结合层微观组织和力学性能的演化规律,以期 PTIG 技术的工程应用提供有益参考。

1 实验

1.1 工艺试验设计

增材制造平台由 KEMPPI MASTERTIG 335TIG 焊机、KEMPPI 10P 自动送丝机和 DQ 04 型号十字滑台搭建而成,如图 1 所示,焊枪运动是通过数控工作台的水平移动实现的。基板选用 200 mm×100 mm×5 mm 的 960 高强度钢板,焊丝选用直径 1.2 mm 的 960 高强度钢丝。基板和焊丝的化学组成如表 1 所示。将 TIG 焊枪与送丝嘴连接的工作夹具在沉积一层后向上移动,移动距离等于上一层沉积的高度。送丝喷嘴与基板夹角为 18°。保护气体为氩气,流量为 12 L/min。采用 TIG 电弧增材制造系统沉积了直流和脉冲两种不同电弧模式的构件。单层长度为 170 mm,行程方向为往复式。如表 2 所示,通过大量工艺试验研究,确立了直流沉积和脉冲直流沉积工艺下的电弧电流、送丝速度、焊接速度、气体流

表 1 基板和焊丝的化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical compositions(mass fraction,%) of the substrate and filler wire

元素	C	Mn	Si	Ni	P	S	Cu	Nb	Cr	V	Ti	Mo	Fe
BS960	0.08	1.24	0.20	—	—	—	0.06	0.14	0.6	0.02	0.15	0.29	余量
ER120S	0.06	1.59	0.5	3.56	0.05	0.005	0.23	—	—	—	—	0.78	余量

表 2 TIG-WAAM 的工艺参数
Table 2 Process parameters during the TIG-WAAM

电弧模式	实际电流 $I_{实}/A$	实际电压 U/V	峰值电流 $I_{峰}/A$	基值电流 $I_{基}/A$	电弧功率 P/W	送丝速度 $V_1/(m/min)$	焊接速度 $V_2/(m/min)$	气体流量 $Q/(L/min)$	脉冲频率 Hz
直流沉积	123	13.2	—	—	1623.6	0.38	0.163	10	—
脉冲直流沉积	144	13.6	230	69	1958.4	0.38	0.163	12	2.3

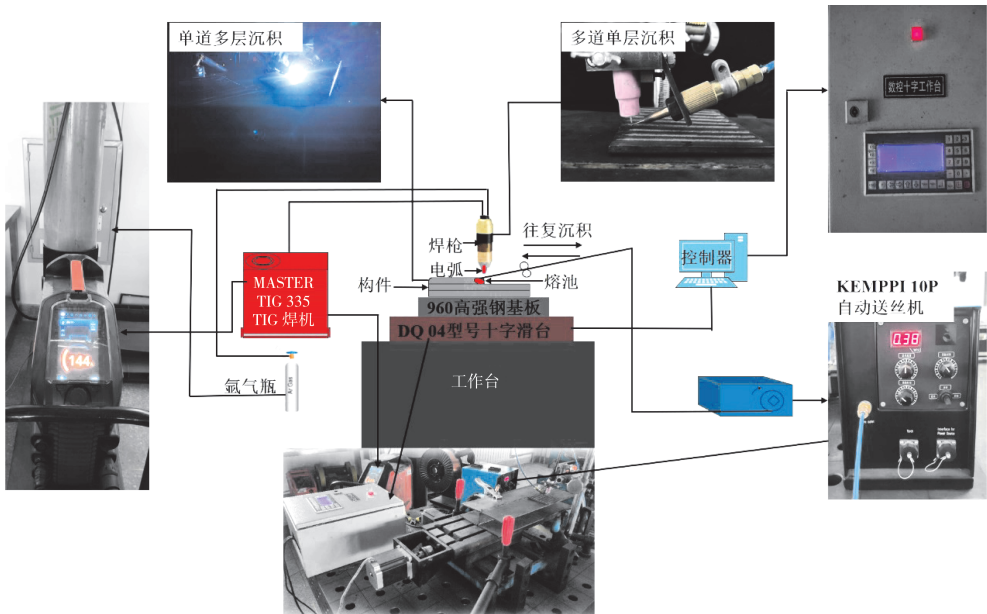


图 1 TIG-WAAM 实验平台
Fig. 1 TIG-WAAM experimental setup

量、脉冲频率等主要最优工艺参数。

1.2 电弧、熔滴动态过程的采集与分析

如图 2 所示,采用高速摄像系统(Os3-S1)和红外热成像

仪(FLIR A655 sc)对增材热过程中脉冲电弧、熔滴过渡及熔池进行拍摄,再利用数字图像分析获得熔滴过渡频率与过渡形貌。比较不同沉积模式下电弧特性和熔滴过渡规律,揭示

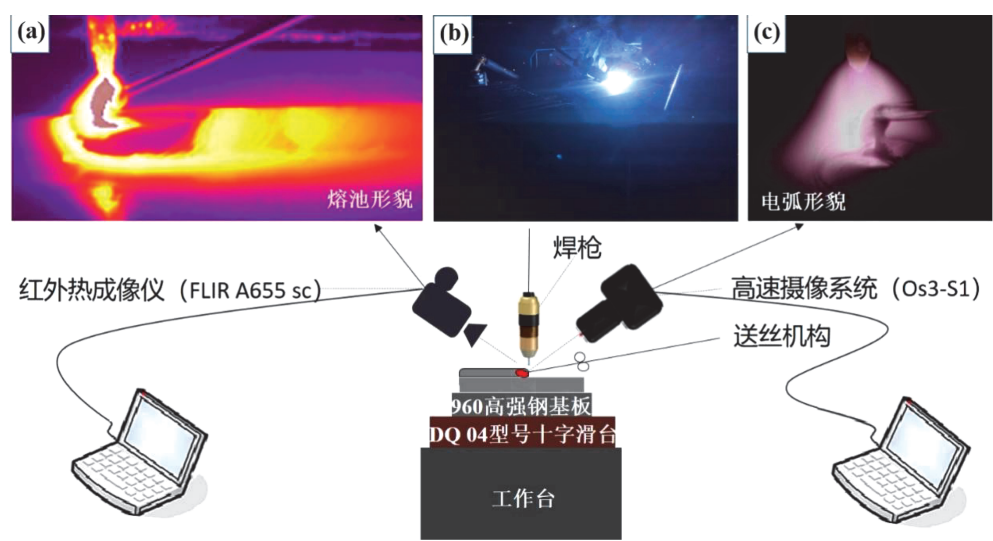


图 2 电弧熔滴熔池动态过程同步采集系统
Fig. 2 Synchronous acquisition system for dynamic process of arc droplet pool

脉冲电流对熔滴过渡、熔池稳定性的影响。

1.3 微观组织与力学性能研究

如图 3a 所示,选取横截面的不同区域进行金相观察。依据焊道顺序和散热条件不同,将增材制造的典型单壁零件划分为顶部 TOP、中部 MID、及底部 BOT 三个区域,其中顶部包含焊道 33—44,中部包含焊道 13—32,底部包含焊道 01—12。沉积后,通过电火花数控线切割机得到直流和脉冲两种不同电弧模式下构件的横截面,对所有金相试样依次在 200 目、400 目、800 目、2 000 目水砂纸上进行粗磨,然后依次使用 0.5 μm 、0.3 μm 、0.05 μm 粒度的氧化铝抛光液在抛光机上精抛光试样至无划痕,抛光后的试样使用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀 11 s,最后用光学显微镜观察两个构件的横截面。在两构件的横截面上采集显微硬度,本次试验采用 WILSON VH1102 显微硬度仪,施加 4.9 N 载荷 10 s,如图 3c 所示,从两组横截面的底层到顶层,沿竖直方向每隔 1 mm 总共采集 24 个硬度点。

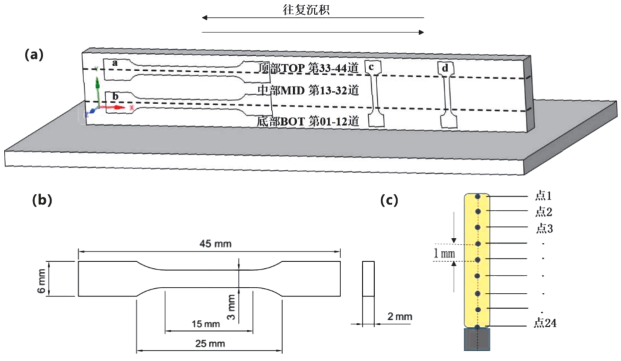


图 3 (a) 金相试样位置;(b)拉伸试样尺寸;(c)显微硬度试样
Fig. 3 (a) Metallography sample locations; (b) tensile sample dimensions; (c) microhardness sample

沉积后,沿水平方向和竖直方向分别取拉伸试样。如图 3a 所示,“a”和“b”为平行于沉积方向截取的拉伸试样,

“c”和“d”为垂直于沉积方向截取的拉伸试样。采用 SHIMADZU-10TA 万能试验机进行拉伸试验,加载速率为 1 mm/min。采用 QUANTA FEG 450 SEM 扫描电镜观察断口形貌。

2 结果与讨论

2.1 构件宏观形貌和尺寸

图 4a、b 分别为直流沉积和脉冲直流两种工艺下的成形构件外观。两种工艺条件下的构件整体焊道平整光滑,表面及横截面上均未发现裂纹和气孔等缺陷。但直流沉积的焊道在起弧处的凸起余高较大,脉冲沉积的焊道在尾端熄弧处有较大塌陷,前者是起弧停留延时造成,后者是尾端热输入增大和送丝量滞后造成,通过往复沉积方式,这些尺寸偏差皆能得到有效修正。表 3 为两个多层构件的几何尺寸,测试表明:构件多层沉积焊道高度和宽度始终保持恒定,绝对误差分别为 0.026 8 mm 和 0.000 9 mm,证明整体成形过程稳定,精度可靠。当沉积层数相等时,脉冲直流沉积构件的焊道高宽比相对较低。直流沉积和脉冲直流沉积的单道平均层厚分别为 0.59 mm 和 0.50 mm,说明加入脉冲后沉积层变得更

表 3 两个多层构件的几何尺寸
Table 3 Geometric dimensions of two multilayer components

构件	层数 n	构件长度 L/mm	构件高度 H/mm	构件宽度 W/mm	层厚 h/mm
直流沉积	44	180	26	8.47	0.59
脉冲直流沉积	44	170	22	9.31	0.50

2.2 构件的宏观和微观结构

图 5 和图 6 分别为直流沉积和脉冲直流沉积制备的 960 高强钢薄壁构件的宏观和微观金相组织。两种工艺条件下,

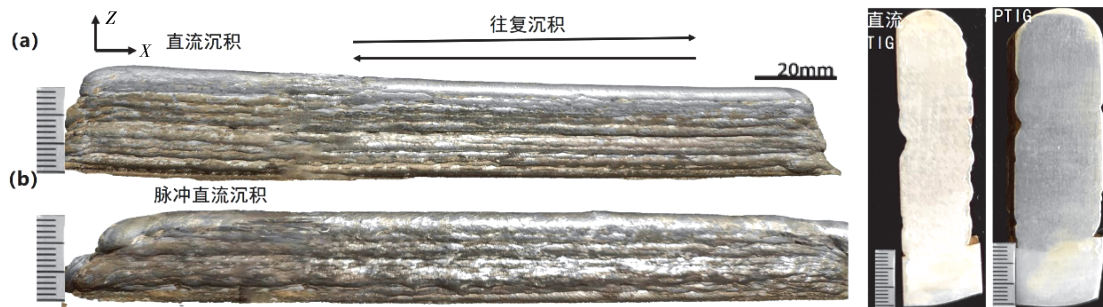


图4 两个多层构件的完整外观:(a)直流沉积;(b)脉冲直流沉积

Fig. 4 Full appearance of two multilayer components: (a) direct current deposition; (b) pulsed current deposition

在不同沉积层间材料的微观组织皆存在明显差异。研究表明,增材制造过程中的热积累效应是多层沉积构件组织转变的主要原因。图5c—e和图6c—e分别为多层构件顶部、中部和底部的高倍显微图。在底部区域靠近基板处,因为焊前基板没有预热,熔覆金属冷却较快,抑制了晶粒的生长,所以底部组织晶粒细小。随着焊层增加,中部焊缝受前序焊道的热量累计,相当于预热作用;同时后续焊道又迅速覆盖堆积于当前焊道之上,相当于后热作用,因此构件中部的焊层散热较慢,焊缝冷却缓慢,由此导致微观组织改变,晶粒长大。而靠近顶部焊道层,虽然有前序焊道的预热作用,但由于其上层覆盖堆积焊道层减少,焊后的冷却速度逐层加快,晶粒度减小,并出现了一定量的回火相变组织。

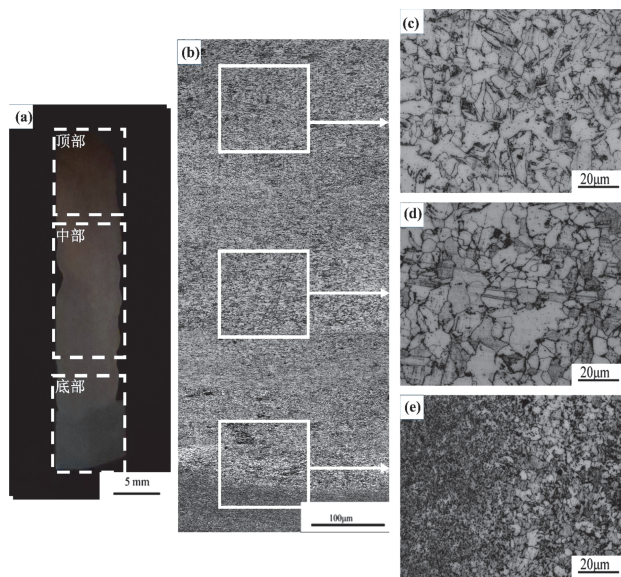


图5 直流沉积制备960高强钢薄壁构件的宏观组织和显微组织:(a)横截面($x-z$ 面)宏观形貌;(b)横截面($x-z$ 面)微观形貌;(c)顶部区域微观组织;(d)中部区域微观组织;(e)底部区域微观组织

Fig. 5 Macrostructure and microstructure of 960 high-strength steel produced by direct current deposition: (a) cross-section ($x-z$ plane) morphology; (b) cross-section ($x-z$ plane) microstructure; (c) microstructure in the top region; (d) microstructure in the middle region; (e) microstructure in the bottom region

图7为直流和脉冲直流工艺构件截面不同区域光学显微组织对比。图7a、c分别为直流TIG-WAAM构件的顶部、中部区域,可以看出直流TIG工艺下,在顶部及中部焊缝组织中出现条块状马氏体组织,并沿着奥氏体晶粒的边界向晶内生长贯穿晶粒,且奥氏体晶粒较为细小。脉冲TIG工艺条件下,顶部焊缝组织的奥氏体晶粒长大,由于整体热输入较

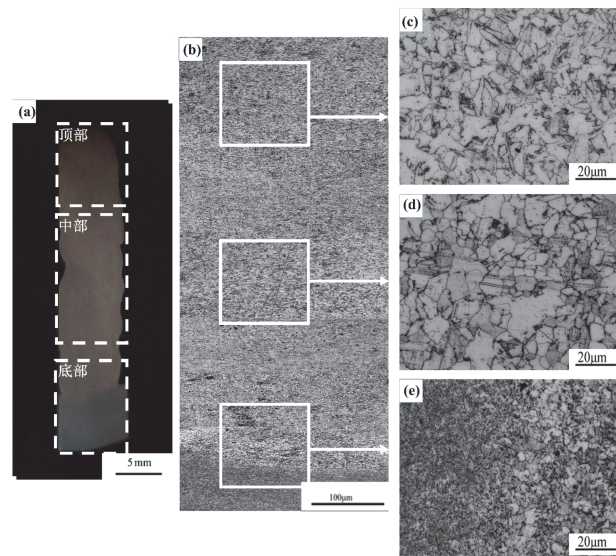


图6 脉冲直流沉积制备960高强钢薄壁构件的宏观组织和显微组织:(a)横截面($x-z$ 面)宏观形貌;(b)横截面($x-z$ 面)微观形貌;(c)顶部区域微观组织;(d)中部区域微观组织;(e)底部区域微观组织

Fig. 6 Macrostructure and microstructure of 960 high-strength steel produced by pulsed current deposition: (a) cross-section ($x-z$ plane) morphology; (b) cross-section ($x-z$ plane) microstructure; (c) microstructure in the top region; (d) microstructure in the middle region; (e) microstructure in the bottom region

大,相比直流工艺的后热保温时间较长,冷却速度减慢,只有少量的条状马氏体析出,仍然分布于晶界处,向晶内生长,但未能贯穿晶体。在中部的焊缝组织中,几乎已观察不到马氏体组织,整体呈现较为均匀的等轴奥氏体晶粒。因此,脉冲的引入大幅减少了淬硬组织的形成,改善了组织的均一性,提高了材料的塑性和韧性,但由于热输入较大,焊后冷却缓慢,也导致焊缝晶粒有一定程度长大,总体力学性能仍然优于直流TIG工艺条件下的材料。

图8和图9为通过高速摄像系统(Os3-S1)和红外热成像仪(FLIR A655 sc)采集的直流和脉冲直流工艺下电弧、熔滴和熔池的动态过程。对比图8a、b可以看出,当采用直流TIG-WAAM时,熔滴较大,熔滴过渡频率较慢,单滴过渡时间约为191 ms,而且焊丝主要在电弧边缘形成熔滴再由电磁力送入熔池,这一过程中由于电磁力偏向作用于熔滴,在脱离焊丝之前熔滴易发生侧旋和飞溅,熔滴过渡模式主要为大滴过渡,熔池也是浅而窄。当采用脉冲直流TIG-WAAM时,熔滴明显减小,熔滴过渡频率显著加快,单滴过渡时间约为109 ms,且焊丝主要在电弧中心熔化进入熔池,受到的电磁力更为均匀,熔滴过渡的指向性更好,极少出现飞溅打旋的

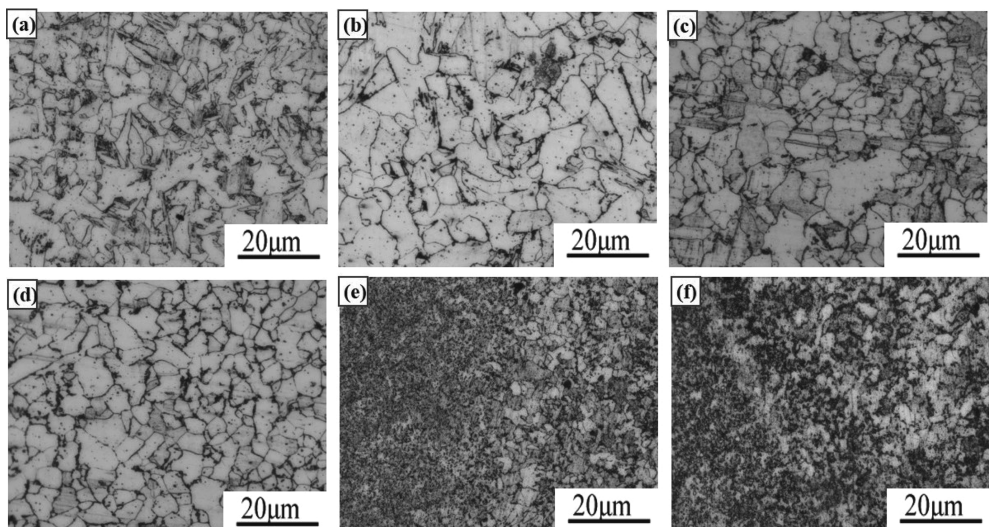


图 7 两种不同工艺构件的截面光学显微图: (a) 直流 TIG-WAAM 构件的顶部区域; (b) 脉冲直流 TIG-WAAM 构件的顶部区域; (c) 直流 TIG-WAAM 构件的中部区; (d) 脉冲直流 TIG-WAAM 构件的中部区域; (e) 直流 TIG-WAAM 构件的底部区域; (f) 脉冲直流 TIG-WAAM 构件的底部区域

Fig. 7 Cross-sectional optical micrographs of two different technological multilayer components: (a) top region of the component fabricated by direct current TIG-WAAM; (b) top region of the component fabricated by pulsed current TIG-WAAM; (c) middle region of the component fabricated by direct current TIG-WAAM; (d) middle region of the component fabricated by pulsed current TIG-WAAM; (e) bottom region of the component fabricated by direct current TIG-WAAM; (f) bottom region of the component fabricated by pulsed current TIG-WAAM



图 8 两种 TIG-WAAM 工艺的电弧和熔滴形貌: (a) 直流沉积; (b) 脉冲直流沉积

Fig. 8 Arc and droplet morphology of two TIG-WAAM processes: (a) direct current deposition; (b) pulsed current deposition

问题,熔滴过渡模式主要为细滴过渡。附加脉冲后的电弧刚度和挺度增加,在电弧压力作用下,熔池变得宽而扁平,形态相对稳定,更有利于金属的连续沉积。这说明脉冲的引入有效提高了熔滴过渡精度和熔池稳定性,从而改善了构件的成形性能和工艺稳定性。

2.3 力学性能

图 10 显示了直流沉积和脉冲直流沉积构件的显微硬度沿沉积高度的变化规律。直流 TIG 和脉冲 TIG 构件的硬度

范围分别在 170.65HV ~ 139.1HV 和 162.1HV ~ 133.5HV,两种构件在底部区域靠近基板,形成的急冷组织晶粒细小,硬度较高;中层组织长大,硬度下降,靠近顶部的焊缝因冷却速度加快,出现马氏体组织,所以硬度有所上升。整体分析,无论是直流还是脉冲工艺,其构件显微硬度从底层到顶层的变化规律为两端高、中间低。但是由于脉冲焊的热输入较直流 TIG 更大,其整体平均硬度也比直流构件低。

图11为直流沉积和脉冲直流沉积构件材料沿水平和竖

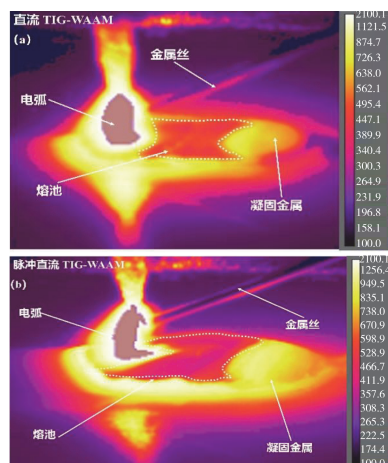


图9 两种 TIG-WAAM 工艺的熔池形貌:(a) 直流沉积;(b) 脉冲直流沉积(电子版为彩图)

Fig. 9 Weld pool morphology of two TIG-WAAM processes:(a) direct current deposition;(b) pulsed current deposition

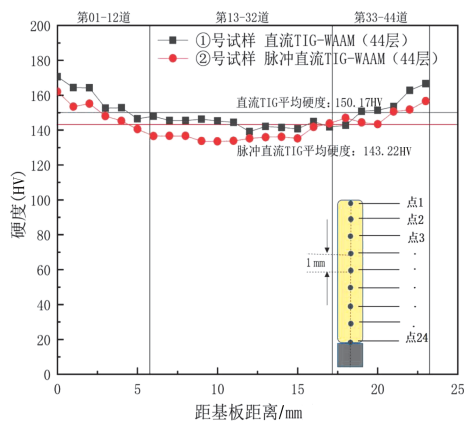


图10 直流沉积和脉冲直流沉积构件的维氏硬度

Fig. 10 Vickers hardness of the direct current and pulsed current additive manufactured components

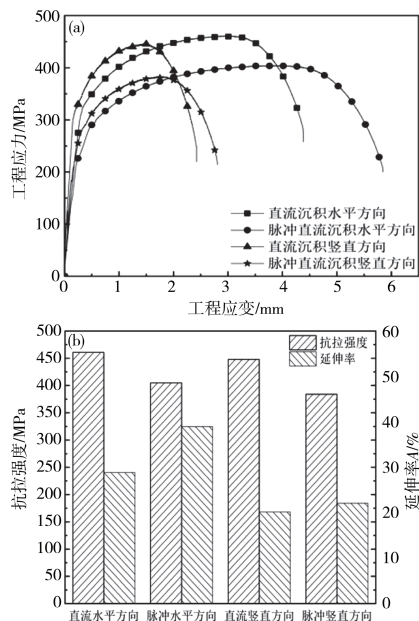


图11 直流沉积和脉冲直流沉积构件拉伸试样的拉伸性能:(a) 沿水平和竖直方向的应力-应变曲线;(b) 抗拉强度和延伸率

Fig. 11 Tensile property of the direct current and pulsed current additive manufactured tensile specimens:(a) stress-strain curves along the horizontal and vertical direction;(b) tensile strength and elongation

直两个方向的拉伸力学性能曲线。结果表明 3D 打印构件存在明显各向异性。在水平方向直流和脉冲直流薄壁构件平均抗拉强度分别为 461 MPa 和 405 MPa,延伸率分别为 28.85% 和 38.96%,在竖直方向直流和脉冲直流平均抗拉强度分别为 448 MPa 和 384 MPa,延伸率分别为 20.16% 和 22.10%。由此可见,金属沉积层内及层间的微观组织不均匀性导致沿金属沉积水平方向的强度和塑性明显高于竖直方向对应指标。同时优化后的脉冲直流 TIG 工艺所得的构件虽然强度较直流 TIG 有所下降,但材料塑性得到明显提升,这有利于进一步提高增材构件成品性能。

两种焊接工艺条件下焊后构件在水平方向上的拉伸试样断口如图 12 所示,断口形貌均呈现均匀的等轴韧窝,结合拉伸力学曲线分析,二者皆为微观孔洞聚合型的韧性断裂。

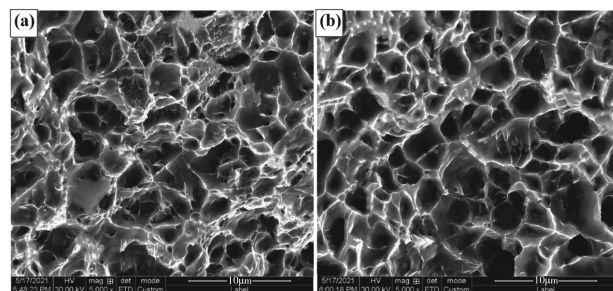


图12 直流沉积和脉冲直流沉积构件截面断口形貌:(a) 直流沉积;(b) 脉冲直流沉积

Fig. 12 Scanning electron microscopy (SEM) images of the fracture morphologies of the components fabricated by (a) direct current deposition and (b) pulsed current deposition

3 结论

(1) 直流 TIG-WAAM 和脉冲直流 TIG-WAAM 工艺下,构件整体成形过程相对稳定,往复沉积过程中,平均层厚分别为 0.59 mm 和 0.50 mm,脉冲直流沉积构件的焊道深宽比相对较低,加入脉冲后沉积层变得更为扁平,有利于沉积过程中熔池保持稳定,提高成形精度。

(2) 沉积层自下而上的微观组织分布较不均匀,底层为细小奥氏体晶粒,中层为粗大等轴晶,顶层为奥氏体加部分回火马氏体组织。脉冲的引入有效改善了组织均匀性,减少了回火马氏体组织形成,提高了材料的塑性和韧性。

(3) 直流 TIG-WAAM 和脉冲直流 Pulsed-TIG-WAAM 熔滴过渡模式分别为大滴过渡和细滴过渡,过渡频率分别为 5.24 Hz 和 9.17 Hz。脉冲条件下的细滴过渡模式指向性更好,且飞溅较少,更有利于保证构件成形精度和工艺稳定性。

(4) 直流和脉冲 TIG 打印构件在整体力学性能上都存在明显的各向异性,水平方向的强度比竖直方向分别高出 2.9% 和 5.5%,这种明显的性能不均匀性影响了构件的后续服役性能。

(5) 断口分析直流和脉冲无明显差异,皆以等轴韧窝为主,直流脉冲沉积构件具有更好的塑性变形能力,随变形进行出现大量的微孔洞,最终演化为孔洞聚合型的损伤与断裂模式。

参考文献

- 1 Bekker A, Verlinden J C. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 177,

- 438.
- 2 Luo Y, Li J, Xu J, et al. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 259, 353.
- 3 Yilmaz O, Uglu A A. *Journal of Engineering Manufacture*, 2016, 230 (10), 1781.
- 4 Yi H, Qi L, Luo J, et al. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2018, 130, 1.
- 5 Gokhale P N, Kala P, Sharma V, et al. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2020, 34(2), 701.
- 6 Wang L, Xue J, Wang Q. *Materials Science & Engineering A*, 2019, 751, 183.
- 7 Zhao P K, Tang C, Pu Z Y, et al. *Transactions of the China Weld Institution*, 2020, 41(5), 65(in Chinese).
- 赵鹏康, 唐成, 蒲尊严, 等. *焊接学报*, 2020, 41(5), 65.
- 8 Guo J, Zhou Y, Liu C, et al. *Materials*, 2016, 9(10), 823.
- 9 Katou M, Oh J, Miyamoto Y, et al. *Materials & Design*, 2007, 28(7), 2093.
- 10 Qi B J, Yang M X, Cong B Q, et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 66(9-12), 1545.
- 11 Ghosh P K, Kumar R. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2015, 46(2), 831.

(责任编辑 赖 丹)



陆万全, 2019年6月于天津工业大学获得工学学士学位, 现为兰州理工大学材料科学与工程学院硕士研究生。在乔及森教授指导下进行研究, 目前主要研究领域为高强钢脉冲 TIG 电弧增材制造工艺及性能。



乔及森, 通信作者, 兰州理工大学材料科学与工程学院教授、博士研究生导师。2007年12月毕业于兰州理工大学焊接工程系获得材料加工工程博士学位, 同年加入兰州理工大学材料科学与工程学院工作至今, 主要从事移动装置焊接结构轻量化设计与制造基础研究、金属材料塑性大变形力学行为研究。在国际和国内学术期刊发表相关研究论文 60 余篇, 申请国家发明专利 7 项。