

复合热源钛合金熔丝高质量增材制造工艺研究

冯启高¹, 王琳鑫^{1,2*}, 王磊^{2,3}, 马利杰¹, 汤永凯³, 李波波^{2,3}¹河南科技学院机电学院, 河南 新乡 453003;²西安交通大学高端制造装备协同创新中心, 陕西 西安 710049;³西安增材制造国家研究院有限公司, 陕西 西安 710300

摘要 针对钛合金熔丝增材制造零件表面粗糙度差、尺寸精度低的问题,提出了高质量复合热源熔丝成形工艺。以激光和焦耳热为热源,选用直径为 0.3 mm 的 TC4 钛合金细丝为沉积材料,首先通过焦耳电流预热金属丝,然后以低功率激光加热形成小尺寸熔池,随着基板的运动,金属丝被持续送入熔池并稳定沉积。通过单道沉积试验,研究了工艺参数对单道沉积层几何特征的影响规律。结果表明:当激光功率在 50~200 W、送丝速度在 60~360 mm/min 的范围内变化时,工艺参数对沉积层几何特征的影响显著;当移动速度在 30~360 mm/min 的范围内增加时,沉积层宽度减小,高度稳定;当焦耳电流增大至 10 A 时,出现了周期性丝材熔断,恶化了沉积形貌和沉积稳定性。在稳定沉积参数组合(激光功率为 125 W,送丝速度为 240 mm/min,移动速度为 300 mm/min,焦耳电流为 8 A)的基础上,以 25 W 的降序功率梯度进行过渡,优化了坍塌、变形等缺陷,获得了高质量的钛合金薄壁件,其表面粗糙度(R_a)为 1.776 μm ,平均壁厚为 0.648 mm,平均壁厚偏差为 0.004 mm,优于主流的送丝增材制造工艺,且沉积态试样在移动方向和沉积方向的拉伸强度分别为(918.91 \pm 9.54)MPa 和(926.516 \pm 22.52)MPa。

关键词 激光技术; 复合热源; 增材制造; 钛合金; 高质量沉积; 工艺优化

中图分类号 TG44

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220917

1 引言

钛合金作为一种具有高强度、高刚度和良好耐腐蚀性等优异性能的轻质合金,得到了广泛的研究^[1-3]。相对于传统的减材制造,钛合金增材制造工艺灵活性高,有效地解决了复杂结构件加工困难的问题,同时具备快速成形、低成本等优势,在航空航天等领域中具有广阔的应用前景^[4-7]。在金属增材制造的主流工艺中,金属熔丝增材制造因具有低成本、接近 100% 的材料利用率和无污染等优点而受到关注^[8],但该工艺往往存在制件表面粗糙度差、尺寸精度低的问题,这制约了它的广泛应用^[9]。

在激光熔丝增材制造工艺中,成形质量受激光功率、送丝速度、移动速度等工艺参数的直接影响,已有大量学者对这方面进行了研究。Liu 等^[10]以试验和建模的方法建立了不同工艺组合的成形数据库,分析了工艺参数对沉积层几何特征的影响,研究表明,移动速度和激光功率对沉积单道的几何特征的影响最为显著,送丝速度对沉积层高度的影响更明显。李凯斌等^[11]研究了工艺参数对单道沉积层形貌的影响,研究表明,宏观形貌主要由激光功率、扫描速度和送丝速度

主导,而离焦量的影响相对较小;在此基础上,分析了工艺参数对单道沉积层几何特征的影响规律,通过优化激光能量密度和熔丝率获得了稳定的熔覆道。Brandl 等^[12]研究了激光功率、移动速度与送丝系数对沉积层尺寸的影响,结果表明,随着激光功率的增加,沉积宽度增加、高度减小;移动速度对沉积层的影响与激光功率相反,送丝系数只影响高度不影响宽度。Mok 等^[13]的研究表明,沉积宽度受激光功率的影响较大,移动速度对沉积高度的影响比激光功率更显著。Wang 等^[14]探讨了激光和电弧复合制造工艺参数对沉积层几何特征的影响,发现激光功率和移动速度对沉积层有显著影响。以上文献研究选用的激光功率都较高,在光束的作用下熔池尺寸的控制难度高,制件易产生裂纹、变形等缺陷^[15-17]。此外,该工艺逐层沉积的成形特性会使零件表面产生一定程度的阶梯效应,降低了零件的质量和精度,从而增加了后处理成本和交付时间^[18]。

针对降低金属熔丝增材制造零件表面粗糙度的措施,已有一些学者进行了探索。Shaikh 等^[19]以直径为 0.1 mm 的不锈钢丝为材料,通过优化成形工艺参数,获得了表面粗糙度为 8~16 μm 的沉积件。Demir^[20]提

收稿日期: 2022-05-27; 修回日期: 2022-07-13; 录用日期: 2022-08-09; 网络首发日期: 2022-08-19

基金项目: 173 计划、河南省高等学校重点科研项目(22A460019)、西安市科技计划(21ZCZZHXJS-QCY6-0002)

通信作者: *wx08036012@163.com

出了微激光细丝沉积技术,以正交建模的方法优化了沉积工艺,获得了尺寸精度较高的薄壁。Li等^[21]利用复合热源增材制造工艺对直径为0.3 mm的不锈钢细丝进行了沉积,并通过化学抛光获得了较好的表面质量。上述研究表明,通过控制能量输入来形成小尺寸熔池的方式具有提升金属熔丝沉积制件成形质量的潜力。但关于获得高质量钛合金制件的成形工艺仍未有报道。

综上所述,本文以激光和焦耳热复合热源对直径为0.3 mm的钛合金细丝进行了熔融沉积,系统地研究了激光功率、移动速度、送丝速度和电流对单道沉积层几何特征的影响规律,并获得了稳定成形的工艺参数

组合。在此基础上,以控形为主要目标,采用激光功率梯度过渡的沉积方式获得了高质量的薄壁件。研究结果为提升钛合金增材制造零件的表面质量和尺寸精度提供了参考。

2 材料及方法

2.1 试验材料

试验使用的基板和金属丝材均为Ti-6Al-4V钛合金,基板厚度为5 mm,金属丝直径为0.3 mm。为了使钛合金基板对激光有更好的能量吸收,用砂纸对基板表面进行打磨处理,利用无水乙醇冲洗表面杂质,烘干后使用。材料的主要化学成分如表1所示。

表1 Ti-6Al-4V的化学成分

Table 1 Chemical compositions of Ti-6Al-4V

Element	Al	Si	Fe	V	C	O	N	Ti
Mass fraction /%	5.40	0.15	0.30	3.41	11.00	0.15	0.15	Bal.

2.2 工艺原理

激光和焦耳热细丝熔融沉积原理及装置如图1所示。试验用的复合热源系统由光纤激光器和编程电源组成,通过G代码控制能量输出、平台移动及送丝速度。该工艺利用激光和电阻热作为复合热源,其中,通

入电流形成的电阻热用于预热金属丝,激光能量用于形成小尺寸的金属熔池。复合热源减少了金属丝熔化对单一热源的依赖,从而减小了激光功率^[22-23]。在工作过程中,激光器和送丝结构的夹角接近100°;通过控制激光器离焦量来调节激光束的光斑大小,选定离焦

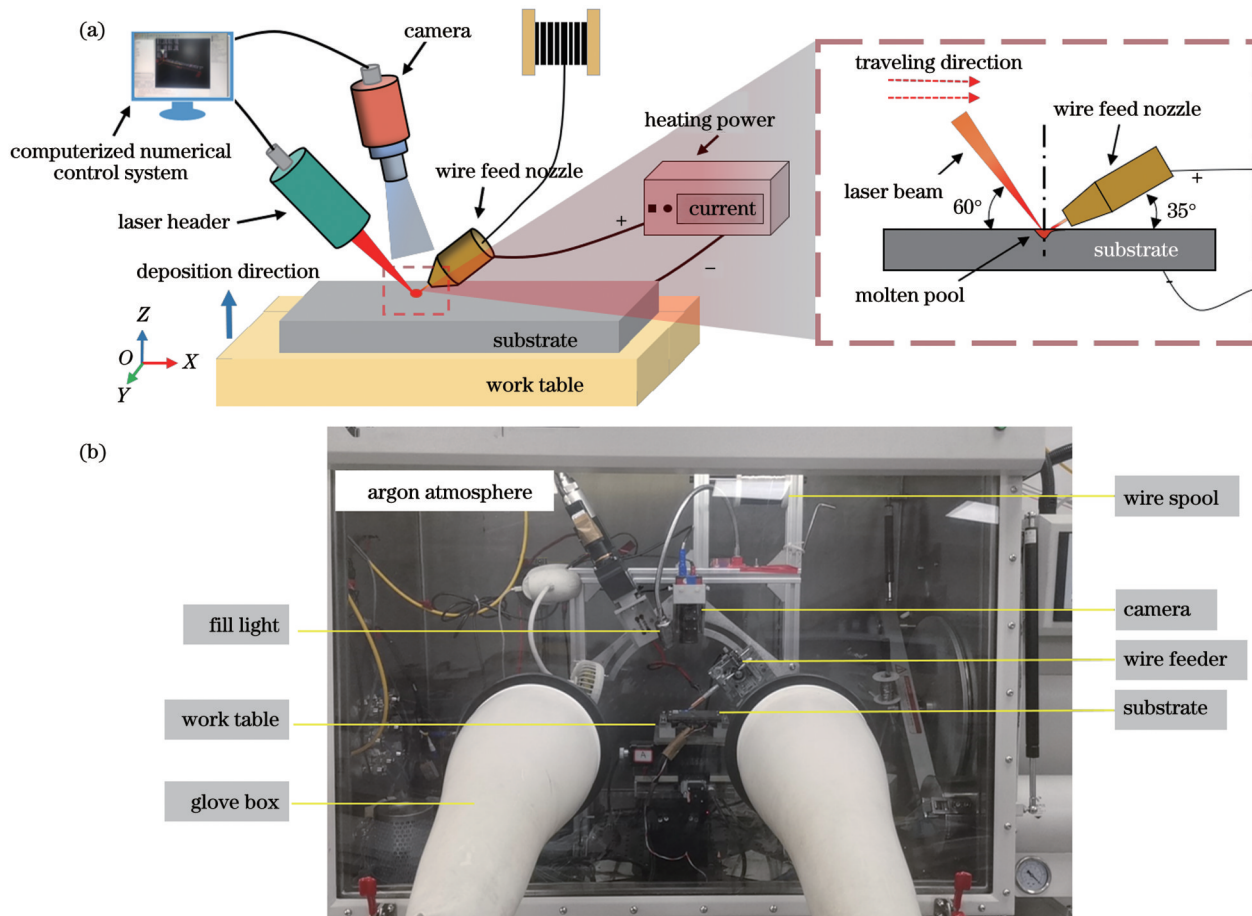


图1 激光和焦耳热复合热源细丝沉积工艺。(a)原理图;(b)试验装置图

Fig. 1 Fine-wire deposition process with laser and joule heat hybrid source. (a) Schematic; (b) experimental device

量为 -2 mm; 通入电流的金属丝和基板接触时产生电阻热, 可将金属丝加热至接近熔点或熔化的状态; 同时, 随着基板的运动, 控制激光能量输入, 在基板上形成小尺寸的熔池, 送丝系统将加热的金属丝持续送入熔池中沉积和凝固, 进而形成连续光滑的沉积层。为了避免沉积物氧化, 整体试验台放置在充满氩气的正压手套箱内, 试验环境中的水、氧含量(体积分数)均维持在 10^{-5} 以下。

2.3 试验方法

单道沉积层的形状控制对增材制件的整体形貌至关重要。单道沉积层的几何特征主要体现在宽度(D)、高度(H)和润湿角(θ), 如图 2 所示。在沉积过程中, 通过选择合适的单道宽度和高度及较小的润湿角, 可以有效减小沉积层表面的波纹度, 提升增材制件的表面质量。本文通过改变工艺参数进行了相应的单道试验, 分析了各工艺参数对单道沉积层几何特征的影响。

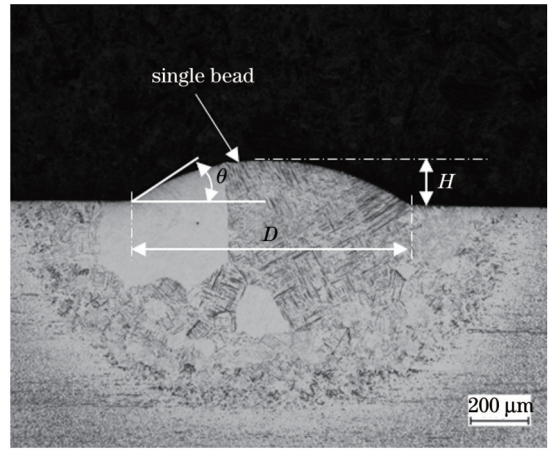


图 2 单道沉积层的几何特征

Fig. 2 Geometric characteristics of single-bead deposition layer

具体试验参数如表 2 所示, 其中下划线值为试验组中的固定参数。

表 2 激光和焦耳热复合热源细丝沉积试验参数

Table 2 Experimental parameters of fine-wire deposition with laser and joule heat hybrid source

Process parameter	Value
Laser power P / W	50, 75, 100, 125, 150, <u>175</u> , 200
Wire feed speed V_f / (mm·min ⁻¹)	60, <u>120</u> , 180, 240, 300, 360
Travel speed V_s / (mm·min ⁻¹)	30, 60, 90, <u>120</u> , 150, 180, 210, 240, 270, 300
Joule current I / A	0, 2, 4, <u>5</u> , 6, 8, 10, 12

3 结果与讨论

3.1 激光功率

图 3 所示为激光功率对单道沉积层几何特征尺寸的影响规律。研究发现, 当激光功率由 50 W 增加到 200 W 时, 单道沉积层的宽度由 295.508 μm 增加到 997.025 μm , 高度由 289.36 μm 减小至 129.686 μm 。

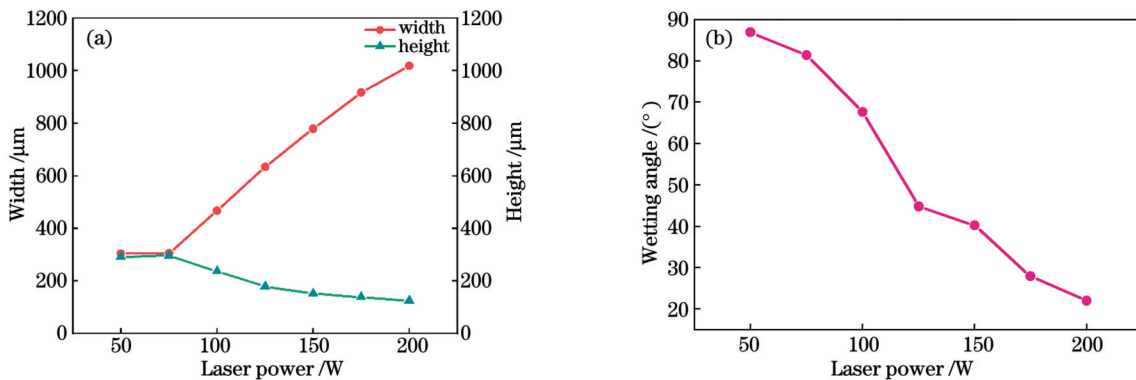


图 3 激光功率对单道几何特征的影响。(a)宽度和高度;(b)润湿角

Fig. 3 Effects of laser power on geometric characteristics of single bead. (a) Width and height; (b) wetting angle

如图 4(a)中虚线框所示, 当激光功率小于 75 W 时, 单道沉积层的冶金结合较差。低的激光功率不能在基板上形成熔池, 仅有微小的热影响区域, 不能完全熔融丝材, 导致沉积形貌出现球化或脱落现象; 随着激

其中, 当激光功率增加至 100 W 时, 单位时间内吸收的能量增加, 熔池尺寸增大, 单道沉积层的宽、高尺寸发生显著变化。随着激光功率逐步增加至 200 W, 激光束的能量密度进一步增大, 单道沉积层的宽度和高度的变化幅度增加。由于熔池变宽, 而单位时间内的送丝速度和移动速度固定, 在高能量的激光束作用下, 单道沉积层的高度和润湿角逐渐减小。

光功率的增大, 沉积层在基板上的热影响区域也增大。在 200 W 的激光功率下, 热影响区域的深度达到 840.545 μm , 是单道沉积层高度的 6 倍之多, 这将引起下几层的过度重熔, 影响沉积层的几何特征尺寸; 在

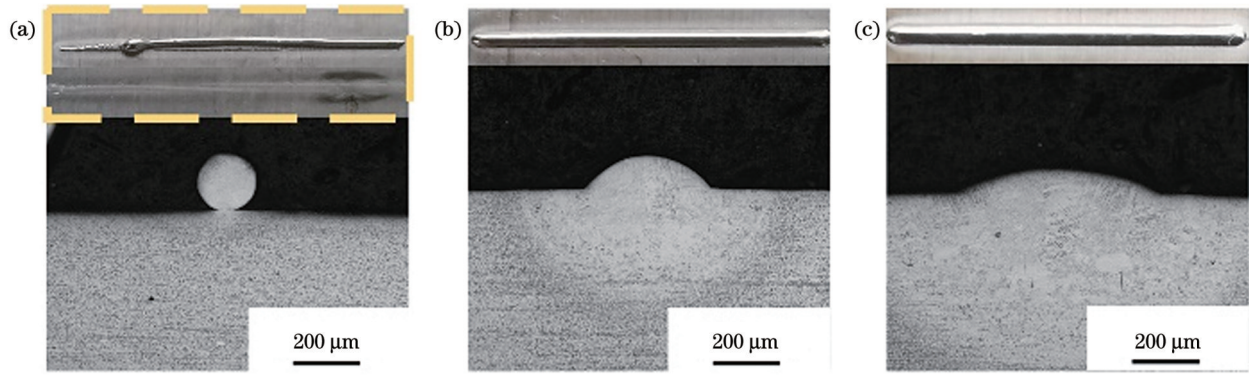


图 4 不同激光功率下的成形形貌和截面。(a) $P=75\text{ W}$; (b) $P=125\text{ W}$; (c) $P=200\text{ W}$

Fig. 4 Forming morphologies and cross sections under different laser powers. (a) $P=75\text{ W}$; (b) $P=125\text{ W}$; (c) $P=200\text{ W}$

100 W 的激光功率下,热影响区域的深度为 $405.089\ \mu\text{m}$,润湿角为 67.4° ,但较大的润湿角在一定程度上会增强阶梯效应,影响薄壁的表面质量。综合分析,认为在 125 W 的激光功率下可实现良好的冶金结合和几何特征尺寸,具有良好的沉积效果。

3.2 送丝速度

图 5 所示为送丝速度对单道沉积层几何特征尺寸的影响规律。研究发现,当送丝速度增加时,单道沉积层的高度和润湿角有显著变化。随着送丝速度的增加,沉积高度由 $61.268\ \mu\text{m}$ 增加至 $291.914\ \mu\text{m}$,宽度由

$895.524\ \mu\text{m}$ 小幅增加至 $954.970\ \mu\text{m}$,表明送丝速度对单道沉积层的宽度影响较小。此外,熔池大小被固定的能量输入限制,金属丝只能在熔池范围中熔化凝固,从而增加了沉积层高度,所以送丝速度对宽度的影响较小。当送丝速度低于 120 mm/min 时,送出的金属丝受到高能的影响而形成熔滴,以连续的鱼鳞片状形式沉积,此时单道沉积层的表面不连续,高度起伏较大,成形质量较差,如图 6(a) 所示。随着送丝速度的逐步增加,单道沉积层的形貌逐渐光滑连续,具有较好的成形轮廓。

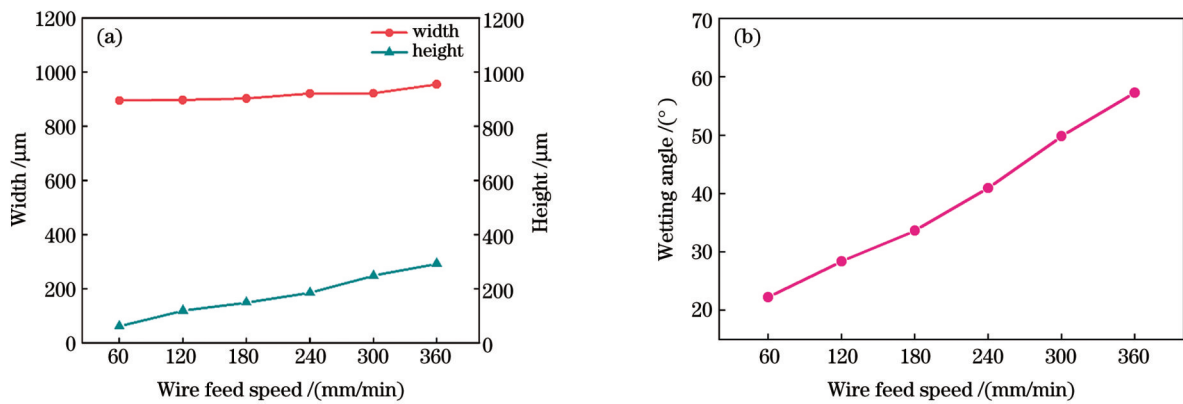


图 5 送丝速度对单道几何特征的影响。(a) 宽度和高度; (b) 润湿角

Fig. 5 Effects of wire feed speed on geometric characteristics of single bead. (a) Width and height; (b) wetting angle

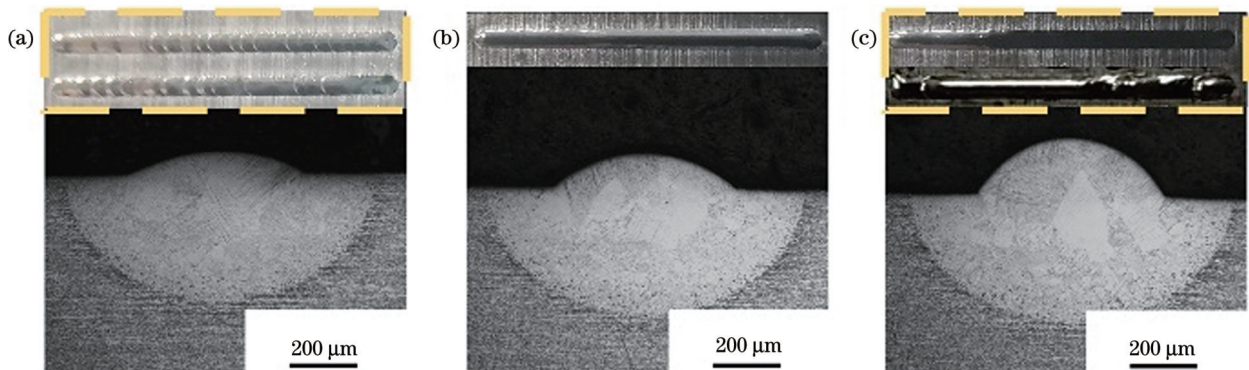


图 6 不同送丝速度下的成形形貌和截面。(a) $V_f=60\text{ mm/min}$; (b) $V_f=240\text{ mm/min}$; (c) $V_f=360\text{ mm/min}$

Fig. 6 Forming morphologies and cross sections under different wire feed speeds. (a) $V_f=60\text{ mm/min}$; (b) $V_f=240\text{ mm/min}$; (c) $V_f=360\text{ mm/min}$

然而,送丝速度的增大将引起单道沉积层的润湿角度增加。当送丝速度超过 300 mm/min 时,单道的润湿角超过 50°,这将增强阶梯效应,影响沉积的表面质量。小的送丝速度对应较小的润湿角,但沉积高度不足,甚至没有光滑连续的成形样貌。此外,当送丝速度过快时,送入熔池的丝材无法完全熔化,从而形成递送阻力,影响送丝稳定形,使沉积层高度随沉积距离的增加而逐渐下降,如图 6(c)所示。综上所述,认为 240 mm/min 的送丝速度较为合适。

3.3 移动速度

图 7 所示为移动速度对单道沉积层几何特征尺寸的影响规律,图 8 所示为不同移动速度下的成形形貌和截面。结果表明,当移动速度增加时,单道沉积层的

宽度逐步减小;在高度达到一定值后,移动速度对高度无明显影响。当移动速度由 30 mm/min 逐步增加时,沉积高度由 156.78 μm 降低至 129.73 μm,在移动速度大于 90 mm/min 后,高度稳定在 129 μm 左右,润湿角在 30°左右;随着移动速度的增加,单位时间内的线能量减少,熔池的宽度也逐渐减小,单道沉积层的宽度由 971.253 μm 减小至 800.834 μm。其次,送丝速度与移动速度呈正比关系,当熔池宽度减小时,金属液体无法向外扩张,从而沉积层的高度维持不变,因此,在移动速度达到 90 mm/min 后有稳定的成形高度。在单道沉积层高度稳定的情况下增加移动速度,沉积宽度小幅度减小,润湿角没有明显变化。为了最大化沉积效率,选择 300 mm/min 的移动速度进行沉积较为合适。

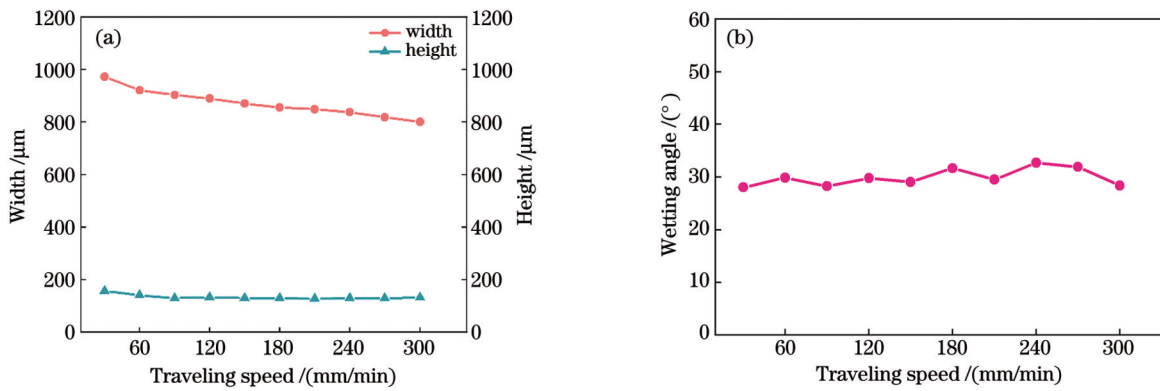


图 7 移动速度对单道几何特征的影响。(a)宽度和高度;(b)润湿角

Fig. 7 Effects of traveling speed on geometric characteristics of single bead. (a) Width and height; (b) wetting angle

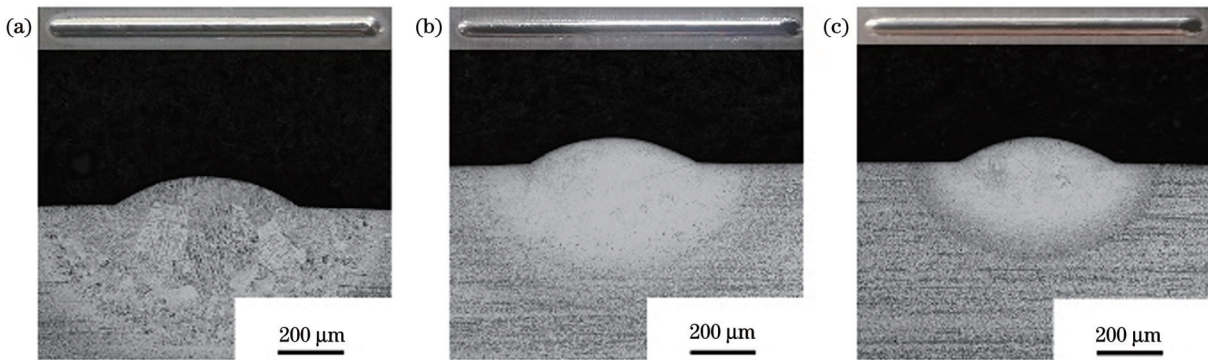


图 8 不同移动速度下的成形形貌和截面。(a) $V_s=30$ mm/min; (b) $V_s=150$ mm/min; (c) $V_s=300$ mm/min

Fig. 8 Forming morphologies and cross sections under different travel speeds. (a) $V_s=30$ mm/min; (b) $V_s=150$ mm/min; (c) $V_s=300$ mm/min

3.4 焦耳电流

图 9 所示为焦耳电流对单道沉积层几何特征尺寸的影响规律。结果表明,单道沉积层的几何特征没有随电流的变化出现明显的改变。在电流增大的过程中,金属丝被加热,表面颜色逐渐明亮。在电流增加至 10 A 时,沉积失稳,熔滴滴落并迅速凝固,恶化了沉积形貌,如图 10(c)中虚线框所示。在其他工艺参数不变的情况下,增大通入电流,金属丝接受的电阻热增加,在接触更高温度的熔池时丝材瞬间熔断,因此中等移动速度下的焦耳电流不易过大。试验表明,焦耳电

流在 8 A 内时沉积稳定。为了保证沉积层有良好形貌,避免丝材过载熔断,成形工艺参数选择 8 A 焦耳电流较为合适。

3.5 稳定成形参数组合的验证

为了验证单道沉积试验中稳定成形参数组合下的实际沉积效果,选择激光功率为 125 W、送丝速度为 240 mm/min、移动速度为 300 mm/min、电流为 8 A 进行单层沉积。如图 11 所示,在该工艺参数组合下,沉积表面光滑均匀,无明显缺陷,为沉积薄壁打下了良好的基础。

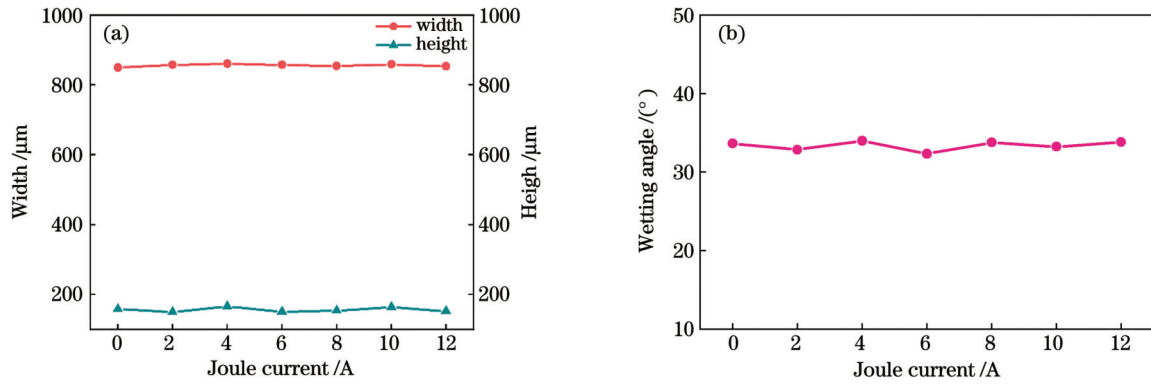


图 9 电流对单道几何特征的影响。(a)宽度和高度;(b)润湿角

Fig. 9 Effects of joule current on geometric characteristics of single bead. (a) Width and height; (b) wetting angle

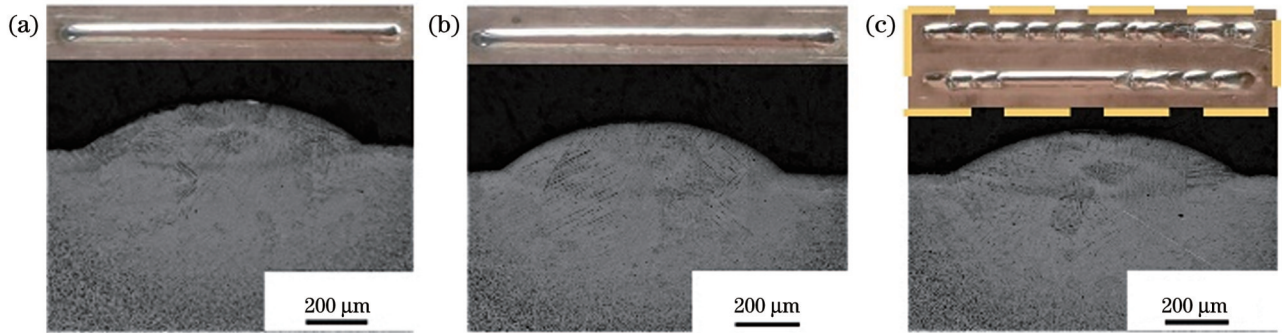


图 10 不同电流下的成形形貌和截面。(a) $I=4\text{ A}$; (b) $I=6\text{ A}$; (c) $I=10\text{ A}$

Fig. 10 Forming morphologies and cross sections under different currents. (a) $I=4\text{ A}$; (b) $I=6\text{ A}$; (c) $I=10\text{ A}$

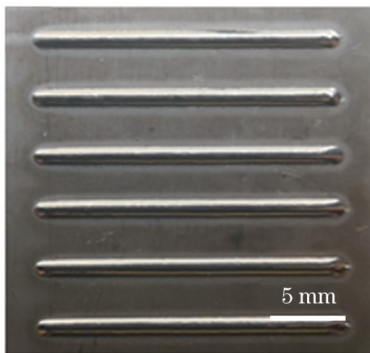


图 11 沉积单道形貌

Fig. 11 Morphology of deposited single bead

4 钛合金薄壁件的成形及其质量测试

4.1 薄壁件的成形工艺及优化

在激光熔丝增材制造工艺中,薄壁结构的沉积和单道沉积存在很大区别。由于逐层往复沉积的工艺特性,薄壁成形经历数次热循环,形成热累积,需要实时调整工艺参数以降低热累积的影响。除工艺参数外,层间增量(ΔZ)会影响熔丝的过渡状态,最终改变薄壁结构的表面形貌。因此,主要通过调整激光功率和层间增量来控制薄壁的成形。

图 12(a)~(c)为不同热输入下的薄壁形貌。过小的热输入不能完全熔化金属丝,成形冶金结合较差,在逐层沉积中产生的残余热应力导致薄壁分层和变形。

而残余应力引起的变形使打印高度变化,致使熔滴的过渡形式发生改变,从而形成沉积空窗或高突,严重影响沉积质量,如图 12(a)所示。过大的热输入会影响沉积层形貌和熔丝过渡形式,导致薄壁产生塌陷,也增加了沉积的热累积,使层宽度增加,层高度减小。在固

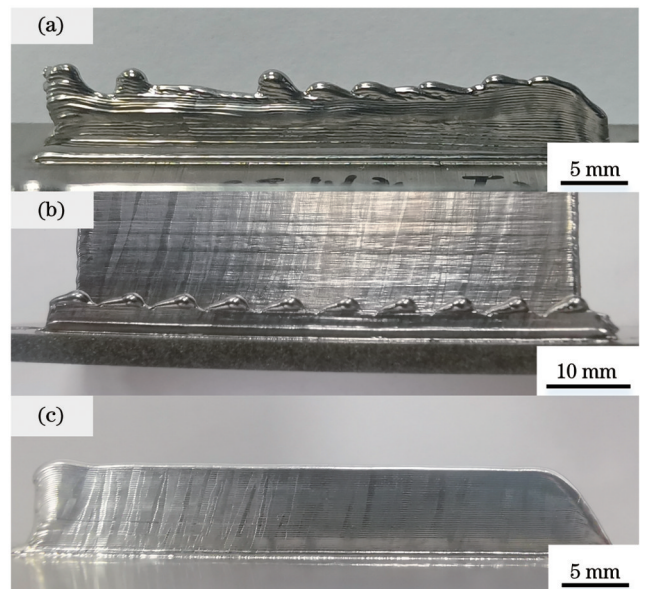


图 12 不同工艺参数下的薄壁形貌。(a) $P=50\text{ W}$; (b) $P=175\text{ W}$; (c) $P=100\text{ W}$

Fig. 12 Thin wall morphologies under different process parameters. (a) $P=50\text{ W}$; (b) $P=175\text{ W}$; (c) $P=100\text{ W}$

定的层间增量下,层间距离逐层增加,导致金属丝在沉积过程中不能接触沉积件表面,而是形成熔滴悬挂在送丝嘴上,并在激光束作用下持续变大。当熔滴自身重力大于表面张力时,形成的大熔滴凝固在沉积层上,导致周期性波浪形貌的产生,进而无法稳定沉积,如图 12(b)所示。在合适的热输入下,沉积件的表面没有明显缺陷,具有良好的沉积质量,如图 12(c)所示。

其次,层间增量 ΔZ 是影响熔丝过渡的主要因素。试验使用的金属丝直径较小,对层间增量的控制精度要求更高。过大的 ΔZ 使送出的金属丝没有接触沉积层就被熔化,形成熔滴滴落,影响沉积形貌,如图 13(a)所示;在过小的 ΔZ 下,随着层数的增加,层间距离逐渐减小,送丝嘴触碰制件的沉积层,影响送丝系统的稳定性和精密度。

在薄壁成形过程中,控制热输入对于解决薄壁坍塌和层间结合差问题十分关键。然而,激光功率大幅度变化会影响沉积层的几何尺寸,从而影响沉积表面质量。为了避免这种现象的出现,采用激光功率梯度过渡的方式进行沉积。合适的激光功率有助于获得饱满的沉积形貌和良好的几何特征,因此,选择在 125 W 的激光功率下沉积至第 3 层。为了避免热量累积形成坍塌,选择在 100 W 的激光功率下沉积至第 10 层;然后,过渡沉积 12 层,降低激光功率至 75 W。热输入的减小使沉积层的宽度和高度发生微小变化,这对 ΔZ 的控制要求更高。通过判断闭合回路中是否有电流变化来确定送出的丝材是否与沉积层接触,接触前、后的高度差就是层间增量 ΔZ 的实际值。研究发现,11~22 层的层间增量在 0.126~0.133 mm 区间波动,在 23 层之后稳定的 ΔZ 为 0.131 mm。

除上述因素外,沉积终点金属丝的球化也是影响成形质量的原因之一。在沉积过程中,金属丝被不断地送入到小尺寸的熔池中,直至单层沉积结束。在激光能量的作用下,送出的丝材被灼烧而球化,使下一层起点的沉积量增大,逐层累积造成沉积起点凸起,如图 13(b)、(c)所示。为了避免球化,在沉积结尾处 X、Y 运动方向的高速合成动作使金属丝脱离沉积层,并施加高速的回抽速度,在沉积开始前对回抽丝材进行等量补偿,从而保证丝材正常的送出量。

图 14(a)所示为薄壁的沉积过程。通过工艺优化,避免了上述的沉积缺陷,可稳定地沉积高质量的钛合金薄壁,图 14(b)、(c)所示为不同形式的薄壁结构。薄壁打印结束后,对薄壁的长度尺寸(L)和壁厚尺寸(W)进行测量。使用游标卡尺每间隔 4 mm 测量一次薄壁长度,薄壁件的长度均值为 58.74 mm,平均偏差为 0.0575 mm,最大偏差为 0.16 mm。使用螺旋测微仪在 7、14、21 mm 的薄壁高度处均分选择 6 个点测量薄壁厚度,薄壁件的平均壁厚为 0.648 mm,平均偏差为

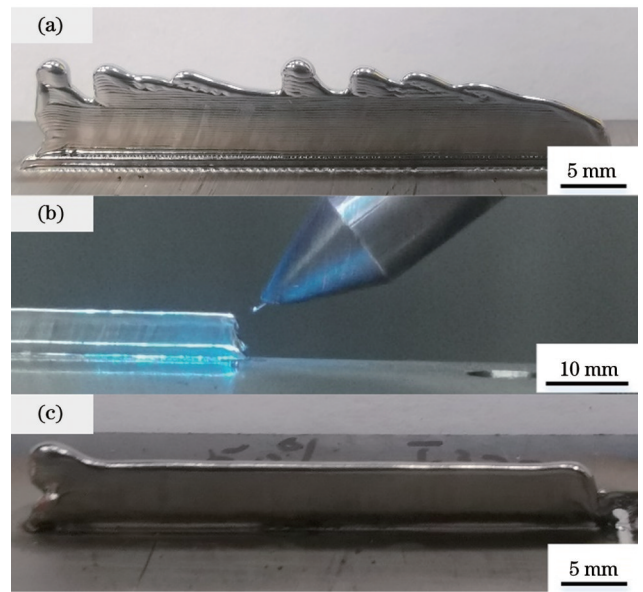


图 13 缺陷对薄壁成形的影响。(a)层间增量过大;(b)丝材球化;(c)沉积起点突起
Fig. 13 Effects of defects on thin wall forming. (a) Interlayer increment is too large; (b) wire spheroidization; (c) protrusions at deposition origin

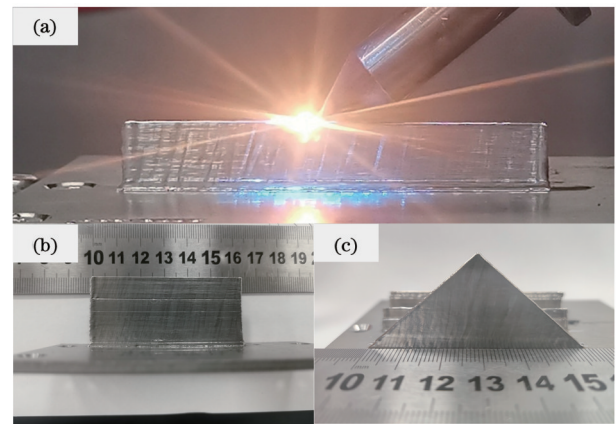


图 14 薄壁成形过程及试样展示。(a)薄壁沉积过程;(b)成形薄壁件;(c)三角形薄壁展示
Fig. 14 Thin wall forming process and sample display. (a) Thin wall deposition process; (b) forming thin-walled parts; (c) triangular thin wall display

0.004 mm,最大偏差为 0.014 mm。图 15 所示为长度及壁厚的测量结果,不同高度处的长度和壁厚尺寸稳定,薄壁件表面及两端平整,无毛刺、坍塌和变形等缺陷,形貌控制较好,具有稳定的成形质量和较高的尺寸精度。

4.2 表面粗糙度检测

使用共聚焦显微镜测量薄壁件的表面粗糙度,选择 4 mm×4 mm 的区域,经过调平、滤波等处理,获得了表面形貌图和轮廓图,具体选区如图 16 所示。

为了保证线粗糙度的准确性,测量时避开噪点存在的区域,线粗糙度的测量位置如图 17(a1)~(c1)所示。沉积方向上三次测量线粗糙度(R_a)均值为

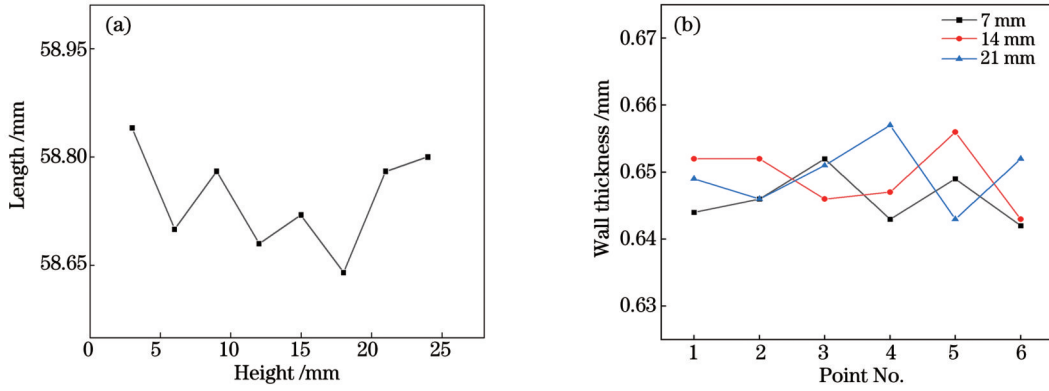


图 15 薄壁尺寸测量结果。(a)长度;(b)壁厚

Fig. 15 Measured results of thin wall dimensions. (a) Length; (b) wall thickness



图 16 表面粗糙度的测量区域

Fig. 16 Surface roughness measurement areas

1.776 μm , 面粗糙度(S_a)均值为 5.133 μm 。不同测量

区域内都有 30 个完整清晰的轮廓曲线,证明薄壁层高度和层间增量稳定,没有明显的沉积缺陷,从而也表明沉积过程比较稳定。然而不足的是,由于钛合金表面晶界的存在和晶粒光泽的不同,检测表面出现噪点,其密集分布在晶粒区域,影响了面粗糙度的检测结果,导致 S_a 和 R_a 的测量结果具有一定的差异。在这种情况下,薄壁件的参数指标仍然较好,沉积态的表面质量远高于现有送丝增材制造工艺。

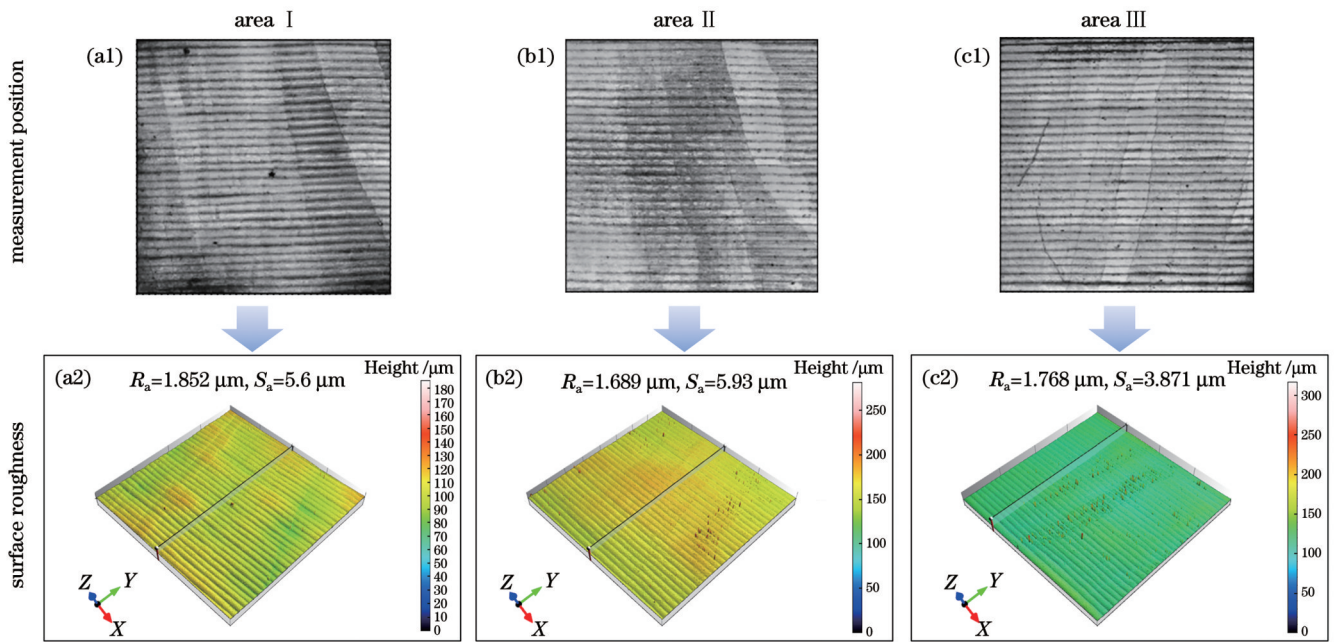


图 17 薄壁件表面粗糙度检测。(a1)(a2)区域 I ;(b1)(b2)区域 II ;(c1)(c2)区域 III

Fig. 17 Surface roughness test of thin-walled parts. (a1)(a2) Area I ; (b1)(b2) area II ; (c1)(c2) area III

4.3 力学性能

在室温下,利用拉伸试验机对试样进行抗拉性能测试。由于打印件尺寸的限制,以非标样进行测试,取样尺寸如图 18(a)所示。两个方向上各进行三组测试,拉伸速率为 0.3 mm/min,试样的应力-应变结果如图 18(b)所示。试样移动方向上的抗拉强度(UTS)为 (918.91 ± 9.54) MPa,断裂发生在 $(5.66 \pm 1.33)\%$ 的应变内,测量得到的拉伸试样的伸长率范围为

14.0%~19.6%;沉积方向上的抗拉强度为 (926.516 ± 22.52) MPa,断裂发生在 $(5.07 \pm 1.11)\%$ 的应变内,测量得到的拉伸试样的伸长率范围为 15.6%~20.0%。沉积方向上的抗拉强度均值略高于移动方向,与传统的锻铸工艺相当,具体如表 3 所示。

图 19 为拉伸断口的扫描电镜(SEM)图。可以发现:沉积态的断口边缘处有明显可见的颈缩,且沉积方向和移动方向均有不同尺寸的韧窝,这说明成形件具

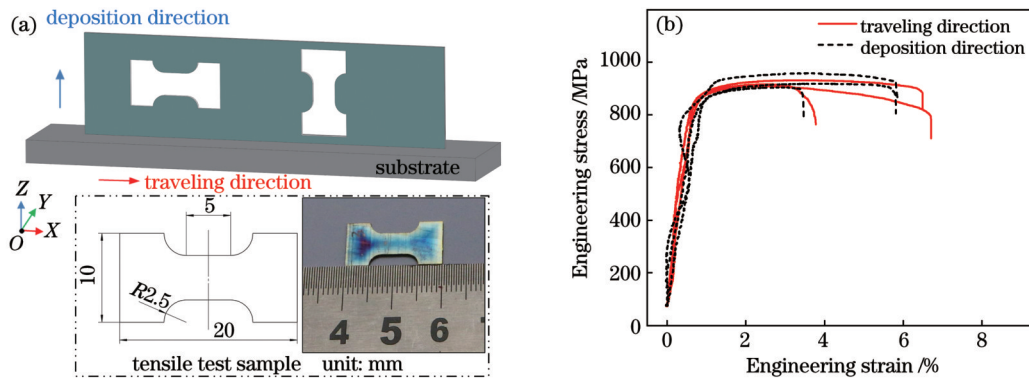


图 18 力学性能测试。(a)拉伸试样尺寸;(b)应力-应变曲线

Fig. 18 Mechanical property test. (a) Tensile specimen size; (b) stress-strain curves

表 3 不同工艺下的力学性能比较

Table 3 Comparison of mechanical properties under different processes

Condition	UTS /MPa	Yield strength /MPa	Elongation /%
Casting	835	765	5
Forging	895	828	10
Wire based additive layer manufacturing ^[24]	872-940	791-874	4.1-12.5
This process	905-960	610-870	14-20

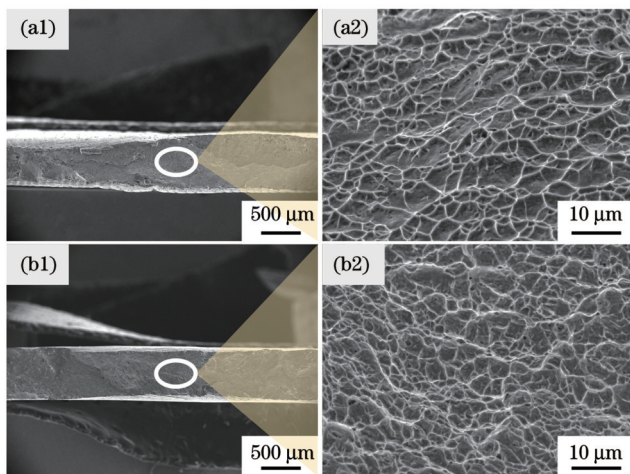


图 19 断口的宏微观形貌。(a1)(a2)移动方向;(b1)(b2)沉积方向

Fig. 19 Macro/micro morphology of fracture. (a1)(a2) Traveling direction; (b1)(b2) deposition direction

备一定的塑性特征,其断裂方式均为韧性断裂。

5 结 论

基于激光和焦耳热钛合金细丝沉积工艺,以控形为主要目标,讨论了工艺参数对单道沉积层几何特征的影响规律,通过控制沉积过程中的热输入和层间增量,获得了较高质量的沉积薄壁。主要结论如下:

1) 利用焦耳热对金属丝进行预热,并将其送入到低功率激光加热形成的小尺寸熔池中进行连续沉积,成形件具有良好的形貌。以此方式对直径为 0.3 mm 的钛合金丝材进行沉积,在功率为 125 W、送丝速度为

240 mm/min、移动速度为 300 mm/min 和电流为 8 A 时,单道沉积层的宽度和高度均匀,表面光滑。

2) 在单一变量条件下,随着激光功率的增加,宽度增大,高度减小;随着送丝速度的增加,宽度稳定,高度增加;随着移动速度的增加,宽度和高度均减小,而高度在达到一定值后趋于稳定;通过的焦耳电流对单道沉积层的几何特征并未有明显影响,但过大的电流会影响成形质量。

3) 通过改变激光功率来控制工艺的热输入,可以有效提升沉积质量。在优化成形缺陷的基础上,以 25 W 的激光功率梯度过渡的形式,减小激光功率至 75 W,成功沉积了尺寸稳定、厚度均匀的薄壁。薄壁结构无明显缺陷,在未经后处理的情况下表面粗糙度 R_a 可达 1.776 μm ,优于主流的金属送丝增材制造工艺。

4) 激光和焦耳热熔丝工艺下的钛合金在移动方向上的抗拉强度为 (918.91 ± 9.54) MPa,在沉积方向上的抗拉强度为 (926.516 ± 22.52) MPa,成形件具有一定的塑性特征,且断口均表现为韧性断裂。

参 考 文 献

- [1] 董春林, 谭锦红, 林志成, 等. 钛合金增材制造技术研究进展[J]. 金属加工(热加工), 2020(7): 16-21.
Dong C L, Tan J H, Lin Z C, et al. Research progress of titanium alloy additive manufacturing technology[J]. MW Metal Forming, 2020(7): 16-21.
- [2] Liu S Y, Shin Y C. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: a review[J]. Materials & Design, 2019, 164: 107552.
- [3] 李长富, 任皓显, 步佳硕, 等. 增材制造的含硼 Ti-6Al-4V 钛合金的组织与性能研究[J]. 中国激光, 2021, 48(18): 1802014.
Li C F, Ren H X, Bu J Q, et al. Study on microstructures and

- properties of additive manufactured Ti-6Al-4V alloy with boron[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(18): 1802014.
- [4] Liu Z Y, He B, Lü T Y, et al. A review on additive manufacturing of titanium alloys for aerospace applications: directed energy deposition and beyond Ti-6Al-4V[J]. JOM, 2021, 73(6): 1804-1818.
- [5] Lin Z D, Song K J, Yu X H. A review on wire and arc additive manufacturing of titanium alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 70: 24-45.
- [6] Herzog D, Seyda V, Wycisk E, et al. Additive manufacturing of metals[J]. Acta Materialia, 2016, 117: 371-392.
- [7] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500002.
- Gu D D, Zhang H M, Chen H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500002.
- [8] 章敏. 送粉式和送丝式的钛合金激光增材制造特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 52-54.
- Zhang M. Research on laser additive manufacturing characteristics of titanium alloy with powder and wire[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 52-54.
- [9] Ding D H, Pan Z X, Cuiuri D, et al. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1): 465-481.
- [10] Liu S, Brice C, Zhang X L. Comprehensive quality investigations of wire-feed laser additive manufacturing by learning of experiments data[EB/OL]. (2021-03-23) [2022-02-04]. <https://arxiv.org/abs/2103.12662>.
- [11] 李凯斌, 李东, 刘东宇, 等. 光纤激光送丝熔覆修复工艺研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1103006.
- Li K B, Li D, Liu D Y, et al. Research of fiber laser cladding repairing process with wire feeding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(11): 1103006.
- [12] Brandl E, Michailov V, Viehweger B, et al. Deposition of Ti-6Al-4V using laser and wire, part II: hardness and dimensions of single beads[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 206(6): 1130-1141.
- [13] Mok S H, Bi G J, Folkes J, et al. Deposition of Ti-6Al-4V using a high power diode laser and wire, Part I: Investigation on the process characteristics[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(16): 3933-3939.
- [14] Wang C, Suder W, Ding J L, et al. Wire based plasma arc and laser hybrid additive manufacture of Ti-6Al-4V[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 293: 117080.
- [15] 姚讯杰, 王佳玮, 杨雁程, 等. 金属构件激光增材制造缺陷产生机理及控制机制探究[J]. 中国激光, 2022, 49(14): 1402802.
- Yao X J, Wang J W, Yang Y C, et al. Review on defect formation mechanisms and control methods of metallic components during laser additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(14): 1402802.
- [16] Wu B T, Pan Z X, Ding D H, et al. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 35: 127-139.
- [17] Fritz K, Kristian A, Nils K, et al. Wire-based laser metal deposition for additive manufacturing of TiAl6V4: basic investigations of microstructure and mechanical properties from build up parts[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10095: 100950U.
- [18] Maleki E, Bagherifard S, Bandini M, et al. Surface post-treatments for metal additive manufacturing: progress, challenges, and opportunities[J]. Additive Manufacturing, 2021, 37: 101619.
- [19] Shaikh M O, Chen C C, Chiang H C, et al. Additive manufacturing using fine wire-based laser metal deposition[J]. Rapid Prototyping Journal, 2019, 26(3): 473-483.
- [20] Demir A G. Micro laser metal wire deposition for additive manufacturing of thin-walled structures[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 100: 9-17.
- [21] Li B B, Wang B W, Zhu G, et al. Low-roughness-surface additive manufacturing of metal-wire feeding with small power[J]. Materials, 2021, 14(15): 4265.
- [22] 温鹏, 郑世卿, 获崎贤二, 等. 填充热丝激光窄间隙焊接的试验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1103004.
- Wen P, Zheng S Q, Shinozaki K, et al. Experimental research on laser narrow gap welding with filling hot wire[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(11): 1103004.
- [23] Liu S, Liu W, Kovacevic R. Experimental investigation of laser hot-wire cladding[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2017, 231(6): 1007-1020.
- [24] 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.

Research on High-Quality Additive Manufacturing Process of Titanium Alloy Fuse with Composite Heat Source

Feng Qigao¹, Wang Linxin^{1,2*}, Wang Lei^{2,3}, Ma Lijie¹, Tang Yongkai³, Li Bobo^{2,3}

¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, Henan, China;

²Collaborative Innovation Center of High-End Manufacturing Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China;

³National Institute Corporation of Additive Manufacturing, Xi'an 710300, Shaanxi, China

Abstract

Objective Titanium alloys are lightweight alloys with excellent properties including high strength, high stiffness, and good corrosion resistance. Hence, they are widely used in aerospace, automobile manufacturing, and other fields and are one of the most widely studied engineering materials in the field of additive manufacturing. Metal wire feed deposition forming is an important metal additive manufacturing process that has the advantages of low cost and 100% material utilization rate. However, the process characteristics easily lead to problems of poor surface roughness and low dimensional accuracy of parts, which limits the wide

application of this process. Accordingly, to improve the surface roughness and dimensional accuracy of such parts, fine metal wires can be deposited by controlling the energy input. However, a method for obtaining high-quality titanium alloy parts has not been reported in the literature. In this study, the composite heat source of the laser and joule heat is used to fuse and deposit the fine titanium alloy wire with the diameter of 0.3 mm. The influence of process parameters on the geometrical characteristics of the deposited single bead is systematically investigated, and a stable combination of the forming process parameters is obtained. Then, based on a stable single bead, aiming at shape control, high-quality thin-walled parts are obtained using the gradient transition deposition method.

Methods The process uses the synergy of a laser and joule current to deposit metal wires on a traveling substrate. Metal wires are continuously fed into the molten pool for continuous deposition as the substrate moves and rapidly solidify to form continuous smooth single beads. In this experiment, the effects of process parameters on the geometric properties of single bead are systematically studied, metallographic sample of single bead is prepared, and pictures and geometric characteristic data are collected. A high-quality titanium alloy thin wall is deposited by a stable single-layer deposition process parameter combination, the length and wall thickness of thin-walled parts are measured, and the line roughness and surface roughness of the thin-walled titanium alloy are determined. Finally, the thin-walled parts are cut into non-standard tensile specimens to test the mechanical properties in the deposition and travel directions.

Results and Discussions The width and height of the deposited single bead are significantly affected by laser power. Under univariate conditions, with an increase in the laser power, the width of the single bead increases, the height decreases, and the wetting angle decreases (Fig. 3); with an increase in the wire feeding speed, the width remains stable, the height increases, and the wetting angle decreases (Fig. 4); with an increase in the travel speed, the width of the single bead decreases, the height tends to remain stable after reaching a certain speed, and the wetting angle does not change significantly (Fig. 5); the current does not affect the single bead deposition geometric features, but excessive current could worsen the formed morphology (Fig. 6). Thin-walled titanium alloys are deposited based on optimized process parameters, and it is found that the main factors affecting the deposition quality are the heat input and interlayer increment. By controlling the gradient input of the laser power and optimizing the interlayer increment and wire drawing method, the deposition quality is improved, and defects in the deposited parts are avoided. Finally, a titanium alloy thin-walled part without defects and with uniform width and height is obtained (Fig. 14). The average wall thickness of the titanium alloy thin-walled parts without post-treatment is 0.648 mm, with the thickness deviation of 0.004 mm (Fig. 15) and surface roughness (R_a) of 1.776 μm (Fig. 17). Results regarding the mechanical properties show that the tensile strength of the titanium alloy sample is 905.05–957.64 MPa (Fig. 18), and the mechanical properties are comparable to those of forging and casting (Table 3).

Conclusions In this study, the effects of process parameters on the geometrical characteristics of deposited single bead are investigated using filament melting deposition process with the composite heat source of laser and joule heat. Using the composite energy generated by the laser and joule heat as the heat source and by controlling the heat input, titanium alloy is continuously deposited during the process of heating the wire, and high-quality thin-walled parts can be obtained at low laser power. By optimizing the deposition process, the defects and deficiencies in the deposition process are solved, and a thin-walled titanium alloy part with high surface quality and high dimensional accuracy is obtained. Accordingly, R_a is determined as 1.776 μm . The forming quality is much higher than that of mainstream wire feed additive manufacturing, and the maximum ultimate tensile strength is 957.64 MPa. The mechanical properties are comparable to those of forgings and casting.

Key words laser technique; composite heat source; additive manufacturing; titanium alloy; high-quality deposition; process optimization