

# 汽车液压油缸 316L 不锈钢复合增材工艺 及性能研究

王卫军<sup>1</sup>, 郭紫威<sup>1</sup>, 代孝红<sup>1</sup>, 王鑫<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>长春汽车工业高等专科学校汽车运用学院, 吉林 长春 130013;

<sup>2</sup>长春一东离合器股份有限公司, 吉林 长春 130022)

**摘要** 采用光纤激光-电弧复合增材方式对 316L 不锈钢进行增材制造, 利用高速摄像研究了焊接电流对激光-电弧复合增材制造过程稳定性的影响, 选取焊接稳定性最高的工艺参数进行堆积试验。试验结果表明, 当电流为 210 A、激光功率为 1 500 W 时, 焊接稳定性最佳; 气孔率是影响试样力学性能的关键因素, 制备的多层堆积试样抗拉强度为 569.9 MPa, 延伸率为 16.8%。

**关键词** 316L 不锈钢; 微观组织; 熔滴过渡

**中图分类号:** TG456.7

**文献标志码:** A

**doi:** 10.14128/j.cnki.al.20224212.059

## Research on Composite Additive Technology and Performance of 316L Stainless Steel for Automobile Hydraulic Cylinder

Wang Weijun<sup>1</sup>, Guo Ziwei<sup>1</sup>, Dai Xiaohong<sup>1</sup>, Wang Xin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Automobile Application College, Chang Chun Automobile Industry Institute, Changchun, Jilin 130013, China;

<sup>2</sup>Changchun Yidong Clutch Co., Ltd., Changchun, Jilin 130022, China)

**Abstract** In the experiment, 316L stainless steel component was manufactured by fiber laser-arc hybrid additive manufacturing. The influence of welding current on the stability of laser-arc hybrid additive manufacturing process was studied by high-speed camera, and the process parameters with the highest welding stability were selected for the stacking experiment. Experimental results show that when the current is 210 A and the laser power is 1 500 W, the welding stability is the best, and the porosity is the key factor affecting the mechanical properties of the sample. The tensile strength and elongation of the multilayer stacking sample prepared are 569.9 MPa and 16.8%, respectively.

**Key words** 316L stainless steel; microstructure; droplet transfer

## 0 引言

激光-电弧复合增材制造是基于激光-电弧复合焊接的一种高效的增材制造技术, 激光和电弧所组成的复合热源能够大大降低增材过程的热输入量, 通过激光的稳弧作用, 既在一定范围内提高制造速度, 又可以改善增材制造过程的稳定性, 从而降低成形过程中的气孔倾向<sup>[1-3]</sup>。

316L 不锈钢作为一种低碳奥氏体不锈钢, 具有良好的力学性能和优异的抗腐蚀性能。传统锻造或铸造不锈钢零部件的材料利用率低且成本较高, 通

过增材制造小批量、定制个性化、复杂结构的零部件具有一定优势<sup>[4-6]</sup>。液压油缸采用激光-电弧复合增材制造相比于铸造锻造可以大大节省时间, 并且按需求调控局部力学性能。

孙承帅等<sup>[7]</sup>研究了激光功率在增材制造过程中对组织和性能的影响, 随着激光功率增大, 墙体微观组织细化, 降低了气孔率, 对于力学性能有一定的提升。李旭文等<sup>[8]</sup>研究了激光诱导电弧增材 316L 不锈钢制造过程, 激光能够诱导并压缩电弧, 不仅提高了堆积速度, 还提高了稳定性, 较少的热输入提高了

收稿日期: 2021-12-22; 修回日期: 2022-01-04

基金项目: 吉林省职业教育与成人教育教学改革研究课题(2020ZCY199)

作者简介: 王卫军(1969—), 男, 本科, 副教授。研究方向: 车辆工程。E-mail: wangwj0418@163.com

墙体的力学性能。陈晓晖等<sup>[9]</sup>研究了不同电弧功率下的 316L 不锈钢 MIG 增材组织及性能,较高的热输入提高了制备效率,但是生成的  $\sigma$  相降低了抗拉强度和延伸率。

程灵钰等<sup>[10]</sup>和徐亮等<sup>[11]</sup>分别通过激光选区熔化和电弧增材的方式制备 316L 不锈钢,再使用热处理方式提高力学性能以达到使用要求。王晓光等<sup>[12]</sup>和苗玉刚等<sup>[13]</sup>通过 CMT 电弧增材,研究了不同焊接工艺参数下材料的表面成形精度、组织与性能关系,其速度分别为 0.60 m/min 和 0.78 m/min,而通过激光-电弧复合增材,激光稳定电弧可以使用较高速度,从而提高熔覆量,使增材制造效率得到提高。

产品质量和制造效率直接影响着企业的生产效益。为了追求更高的零件制造效率,激光-电弧复合增材制造逐渐受到更多关注,激光的加入也可减少后热处理复杂的工艺过程。本文采用光纤激光-电弧复合增材方式,通过工艺-组织-性能的研究过程,为复合增材提供一定的工艺指导。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验设备

采用由 IPG YLS-6000 光纤激光器、松下 YD400AT3 焊机与机器人组成的焊接系统,激光波

长  $\lambda=1.07 \mu\text{m}$ ,最大输出功率  $P=6.0 \text{ kW}$ ,光纤直径为  $200 \mu\text{m}$ ,焦距  $f=200 \text{ mm}$ ,光斑直径  $D=0.3 \text{ mm}$ 。激光束采用垂直入射,激光束与焊枪夹角为  $65^\circ$ ,电弧焊保护气体为 5% (体积分数,下同)  $\text{CO}_2 + 95\% \text{ Ar}$ ,气流量为 19 L/min。光纤激光-电弧复合增材系统示意图如图 1 所示。

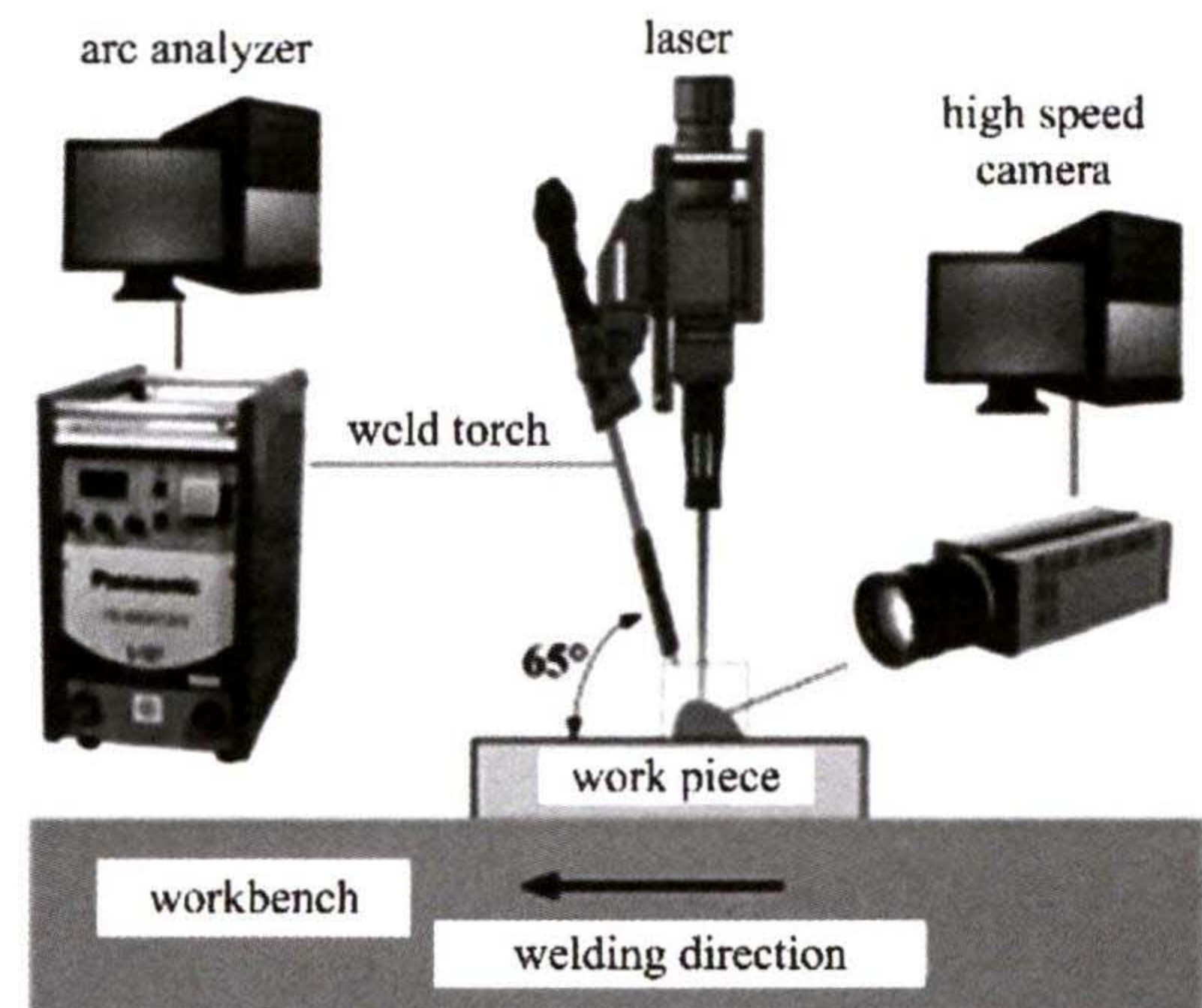


图 1 光纤激光-电弧复合焊接系统示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of fiber laser-arc hybrid welding system

试验过程通过德国 Optronic 公司 CR5000 高速摄像机进行记录,照片采集频率为 5 000 帧/s。焊接工艺参数如表 1 所示。

表 1 焊接工艺参数

Table 1 Welding process parameters

No.	Weld power $P/\text{W}$	Weld current $I/\text{A}$	Weld speed $v/(\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$
1	1 500	160	90
2	1 500	210	90
3	1 500	240	90

焊后采用 X 射线探伤方法检测焊缝中气孔。在焊缝中心选取 100 mm 长度,利用 Image Pro plus 分析软件进行气孔率统计。气孔率  $h$  为气孔面积  $S_p$  与焊缝投影面积  $S_w$  的比值,即:

$$h = \frac{S_p}{S_w} \times 100\% \quad (1)$$

复合增材薄壁结构采取每次上移 0.5 cm,通过型号为优利德(UT320)非接触式红外测温仪(测温范围  $-50 \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$ )监测焊接温度,当温度冷却至  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  时,进行下一道次焊接。保护气体为高纯 Ar (99.9%)。堆积方式如图 2 所示。

### 1.2 试验材料

试验材料为 316L 不锈钢,焊接底板材料为

Q235,焊接前采用细砂纸对底板钢板进行打磨,使钢板表面光滑无锈,并用丙酮清洗表面。钢板尺寸为  $180 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。焊丝材料为 316L 不锈钢,直径  $D=1 \text{ mm}$ 。高强钢和焊丝化学成分如表 2 所示。

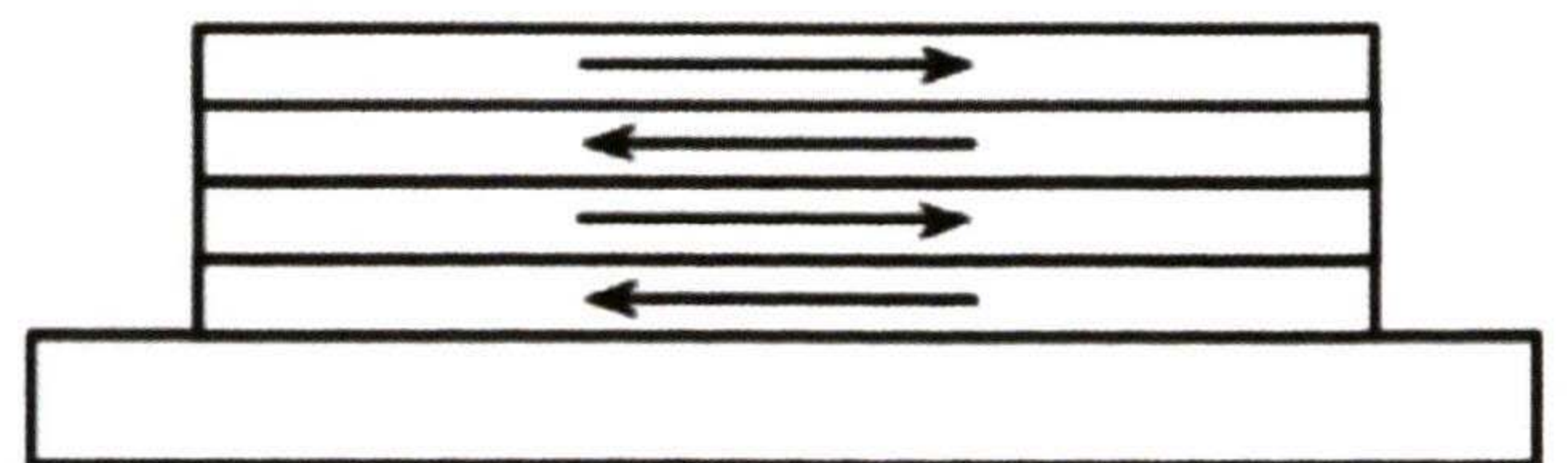


图 2 复合焊接堆积方式  
Fig. 2 The hybrid welding stacking method

表 2 试验材料化学成分

Table 2 Test material chemical composition

Materials		C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	S	P	Fe
Mass	Q235	0.220	0.350	1.400	—	—	—	0.050	0.030	97.950
fraction/%	316L	0.025	0.800	1.700	17.000	2.500	12.000	0.030	0.030	65.915

## 2 结果与讨论

### 2.1 焊接电流对形貌的影响

图 3 为不同工艺参数下单道复合增材形貌,从图中可以看出:在焊接电流较小时( $I=160\text{ A}$ ),焊道宽度较小,焊道不平直且表面形成较多飞溅,说明焊接过程不稳定;当焊接电流为  $210\text{ A}$  时,焊道平直且无表面飞溅;当焊接电流为  $240\text{ A}$  时,焊缝宽度随着电流增大而增大,焊缝成形较好,仅在起弧处出现飞溅;当焊接电流过大时,表面有过氧化现象出现。

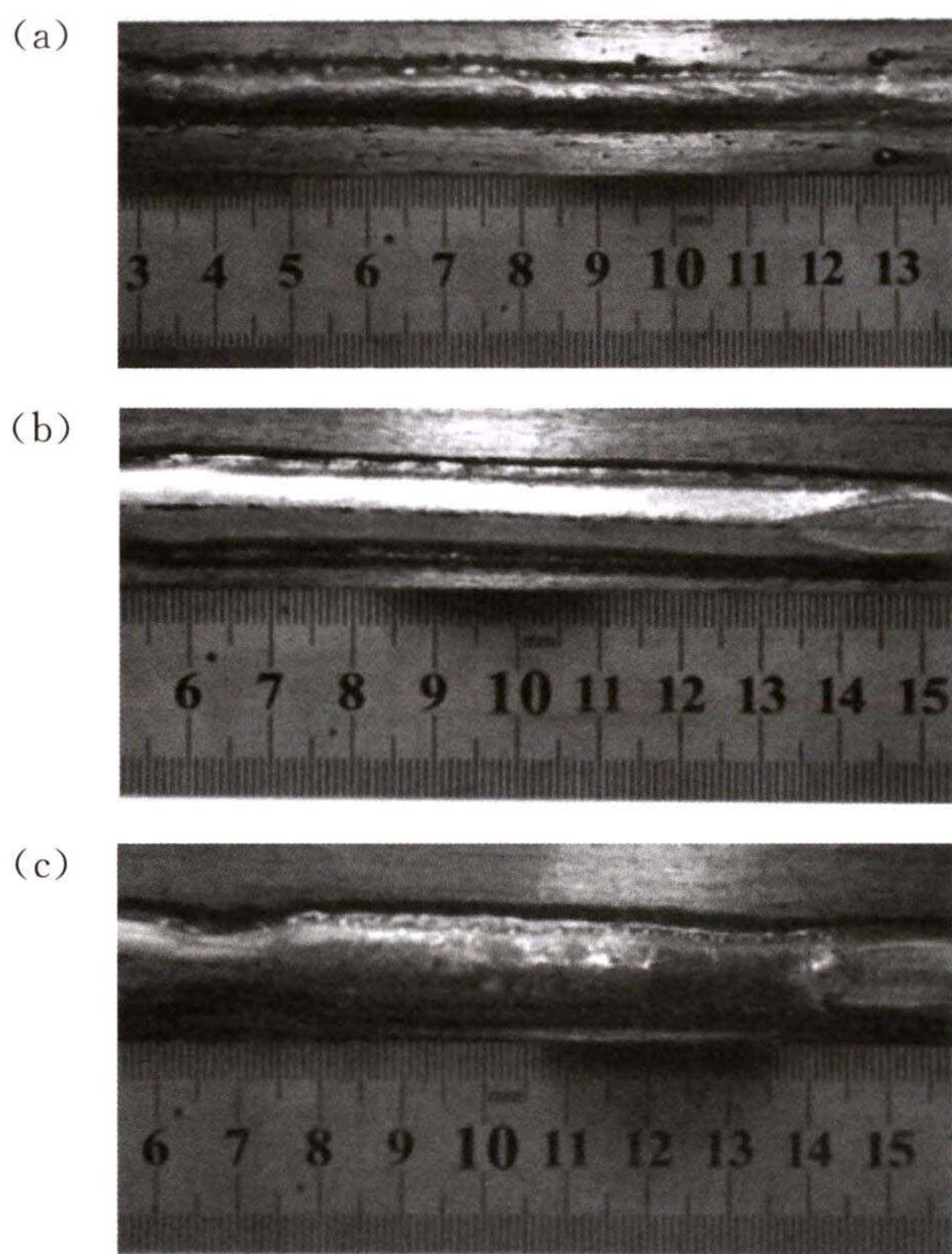


图 3 不同焊接电流下表面形貌图像。

(a)焊接电流  $I=160\text{ A}$ ; (b)焊接电流  $I=210\text{ A}$ ;  
(c)焊接电流  $I=240\text{ A}$

Fig. 3 Surface topography images of different welding currents. (a) Welding current  $I=160\text{ A}$ ;  
(b) welding current  $I=210\text{ A}$ ;  
(c) welding current  $I=240\text{ A}$

### 2.2 焊接电流对熔滴过渡的影响

不同焊接电流熔滴过渡图像如图 4 所示。当焊接电流为  $160\text{ A}$  时,此时的熔滴过渡模式为短路过

渡,熔滴进入熔池瞬间产生了爆炸,熔滴在电弧力的作用下加剧了熔滴的活动,电弧力将焊丝端部的熔体分割,分割出的部分被排斥出电弧区,形成了较大的飞溅,焊缝表面飞溅多,如图 3(a)所示。当焊接电流为  $210\text{ A}$  时,此时的熔滴过渡模式为射滴过渡,熔滴在重力、电磁力、电弧排斥力、等离子体流力、匙孔蒸气压力的作用下以液桥形式进入熔池,由于熔滴尺寸较大,会在熔池表面形成波动,影响激光匙孔的稳定性,造成匙孔塌陷,是引起工艺气孔的因素之一。当焊接电流为  $240\text{ A}$  时,此时的熔滴过渡模式为射流过渡,熔滴尺寸极小,熔滴过渡周期极短,熔滴来不及长大就进入熔池,这样的自由过渡形成飞溅的概率小于射滴过渡,对激光匙孔的影响也小,形成了稳定的熔滴过渡模式。

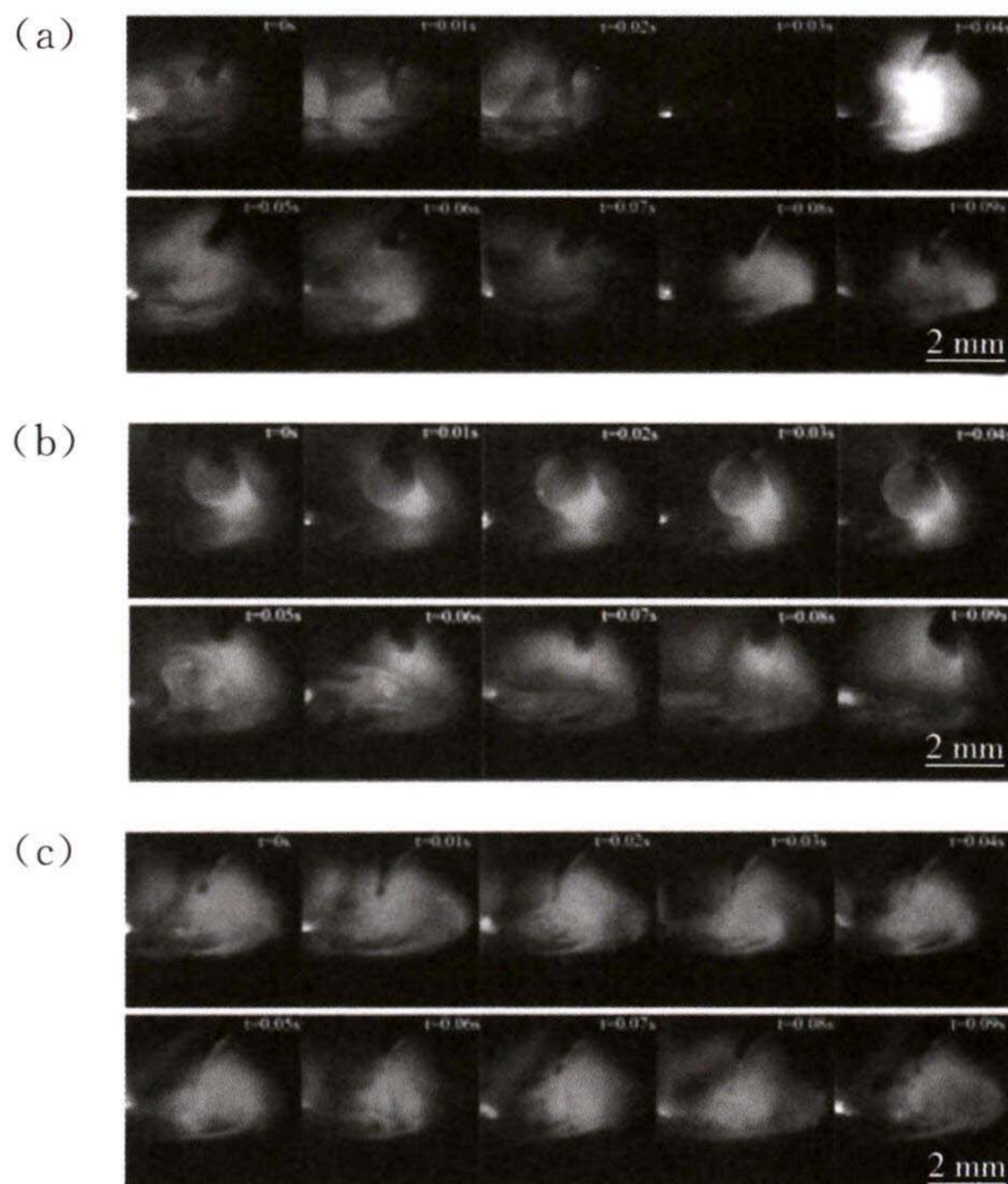


图 4 不同焊接电流下熔滴过渡图像。

(a)焊接电流  $I=160\text{ A}$ ; (b)焊接电流  $I=210\text{ A}$ ;  
(c)焊接电流  $I=240\text{ A}$

Fig. 4 Transition images of droplets of different welding currents. (a) Welding current  $I=160\text{ A}$ ;  
(b) welding current  $I=210\text{ A}$ ;  
(c) welding current  $I=240\text{ A}$

图 5 为不同焊接电流下的气孔率。当焊接电流为 240 A 时,气孔率最低。通过 X 射线探伤底片可以看出,图 6 中 160 A 时为短路过渡,焊缝内有较大气孔,随着熔滴过渡模式改变,气孔倾向降低。

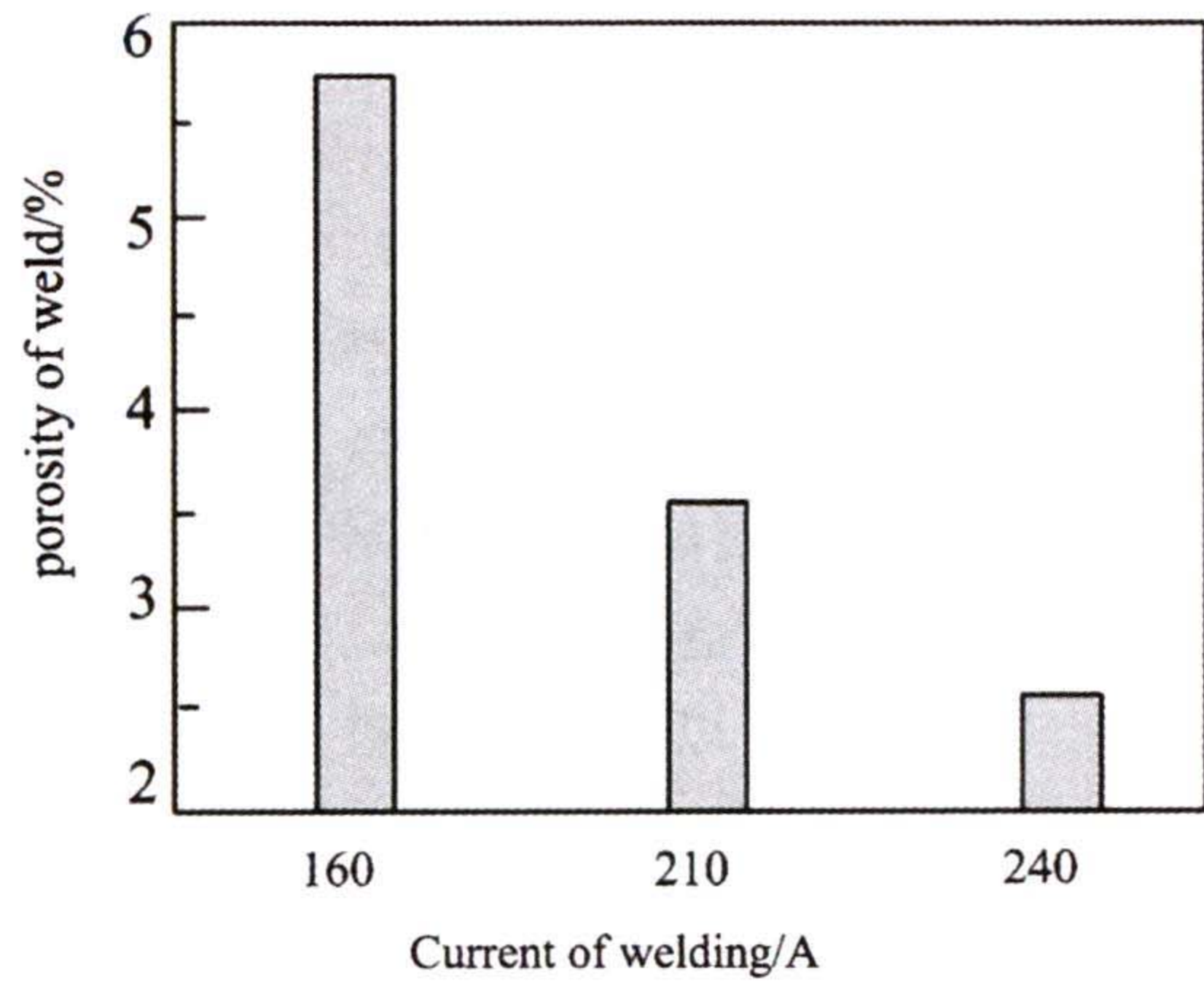


图 5 不同焊接电流下气孔率  
Fig. 5 The porosity of samples under different welding currents

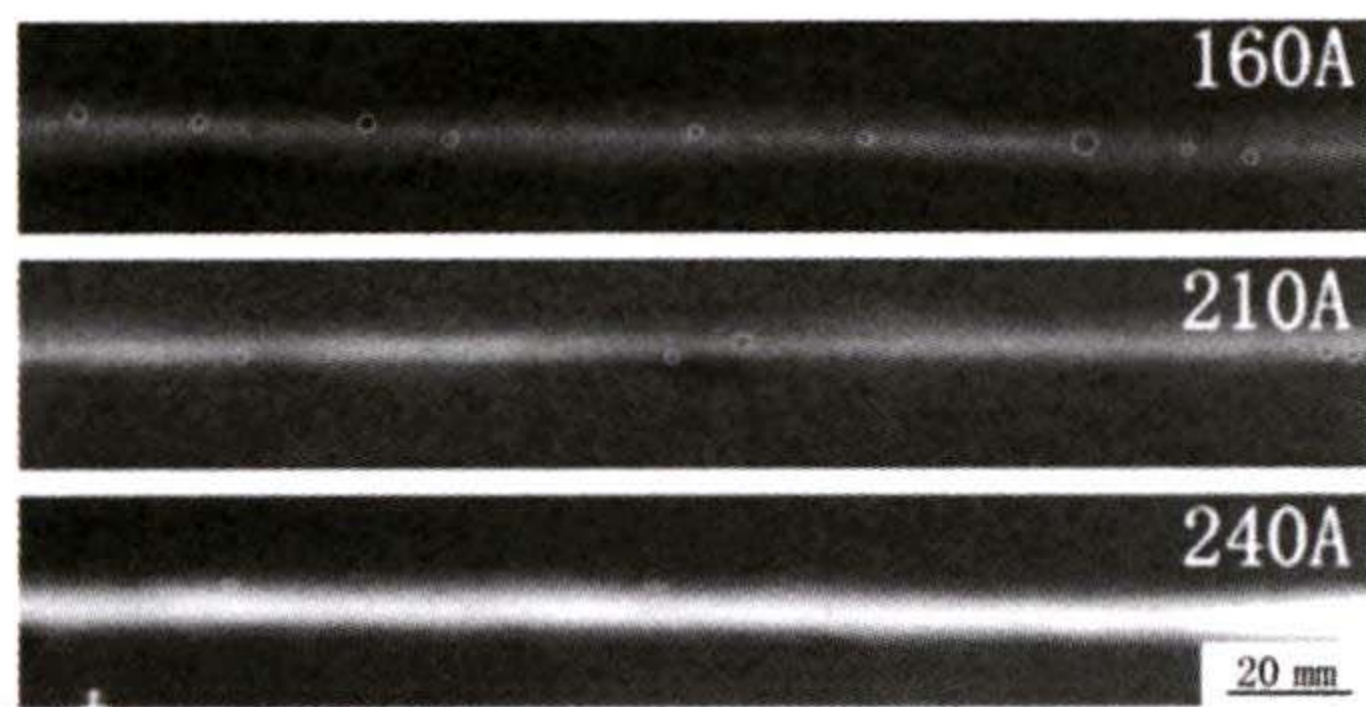


图 6 不同焊接电流 X 射线图像  
Fig. 6 X-ray images of samples under different welding currents

### 2.3 复合增材组织及力学性能

当焊接电流为 240 A 时,气孔率最低,为 2.67%。以此工艺参数制备复合薄壁结构。增材制造堆积层金相组织如图 7(a)所示,下方堆积层在制造过程中经过上方堆积层的重熔,在层中部分未见气孔,在最后一道堆积层出现气孔,主要原因是激光器与焊枪高度不断抬升,导致保护气体保护不充分。堆积层在制造过程中经历多层多道的制造过程,形成了热循环的叠加作用。根据热循环可以将热影响区各区域进行分类,如图 7(b)所示,形成了未变粗晶区(UACGHAZ)、过临界粗晶区(SCCGHAZ)、临界粗晶区(ICCGHAZ)、亚临界粗晶区(SCGHAZ),在堆积层间形成了联生结晶,如图 7(c)所示,生长方向有明显的方向性,朝向焊缝顶端生长,此方向是温度梯度降低的最快方向,每一层底部都经历过一次加热,相当于在焊前进行预热处理。

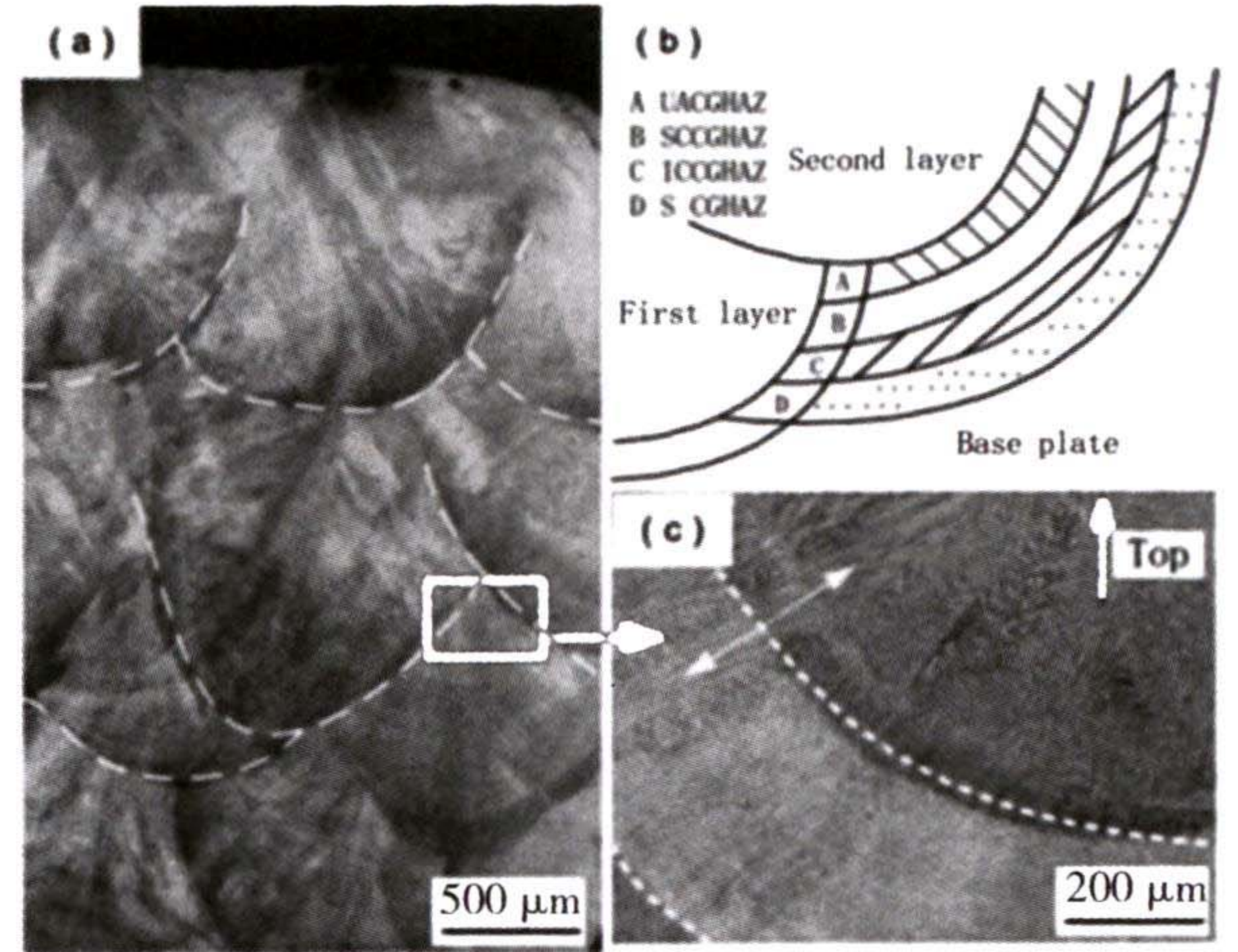


图 7 堆积层整体金相图。(a)金相组织图;  
(b)热影响区各部分示意图;(c)枝晶生长方向  
Fig. 7 Overall metallographic diagram of the accumulation layer. (a) Metallographic structure diagram; (b) schematic diagram of each part of the heat-affected zone; (c) dendrite growth direction

复合增材显微组织主要由胞状晶和树枝晶组成,物相组成为奥氏体基底和铁素体,铁素体呈骨架状,如图 8 所示。

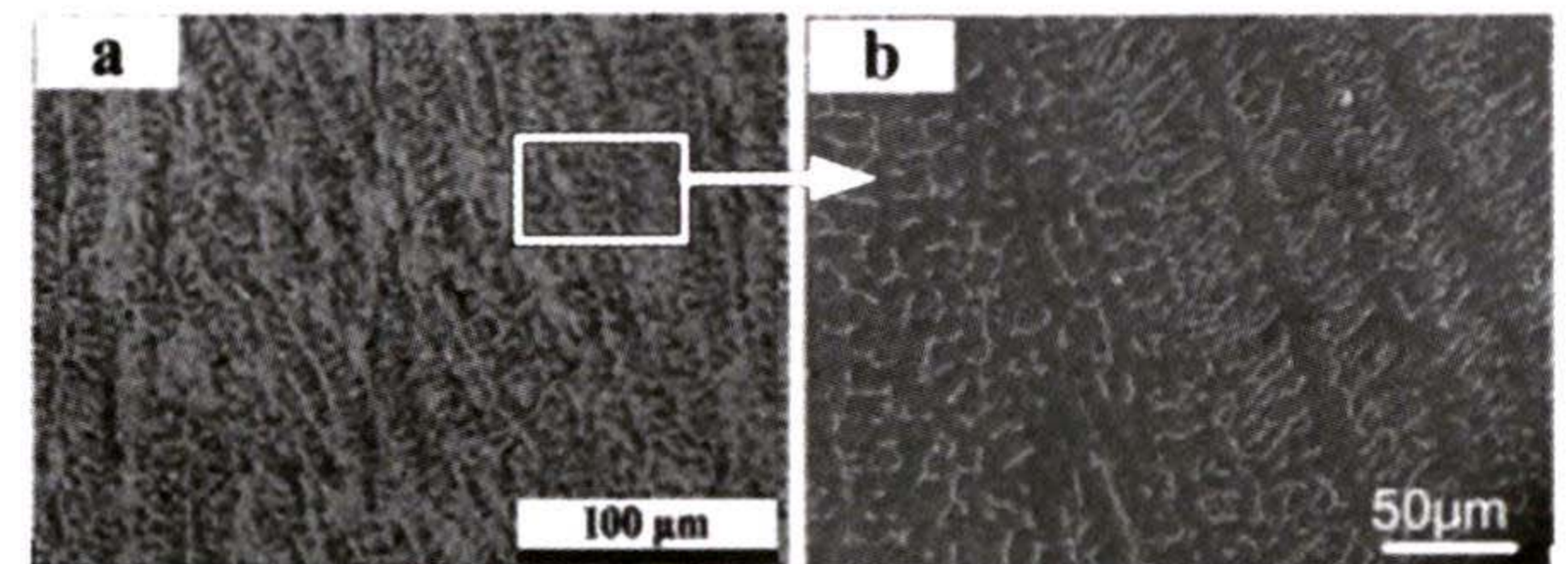


图 8 显微组织图像。(a)高倍金相组织图;  
(b)骨架状铁素体扫描电子显微镜图  
Fig. 8 Image of microstructure.  
(a) High magnification microstructure;  
(b) SEM image of skeleton ferrite

从堆积层第二层取样进行物相分析,如图 9 所示。通过 XRD 图像可知,焊缝具有双相组织,由奥氏体和少量铁素体组成,与 SEM 分析一致。采用 316L 不锈钢焊丝进行增材制造,其微观组织取决于凝固行为和凝固后的相组成。多层制造过程中,前一层与后一层都起到预热与后热的作用,冷却速度的降低致使堆积层处于两相区时间延长,部分铁素体向奥氏体转变,凝固模式主要为 FA 模式<sup>[14]</sup>: $L \rightarrow L + \delta \rightarrow L + \delta + \gamma \rightarrow \delta + \gamma$ 。熔池内金属凝固时首先析出  $\delta$  铁素体,当熔池完全凝固后,随着温度的降低,单相  $\delta$  铁素体逐渐转变为  $\gamma$  奥氏体,形成了双相组织。

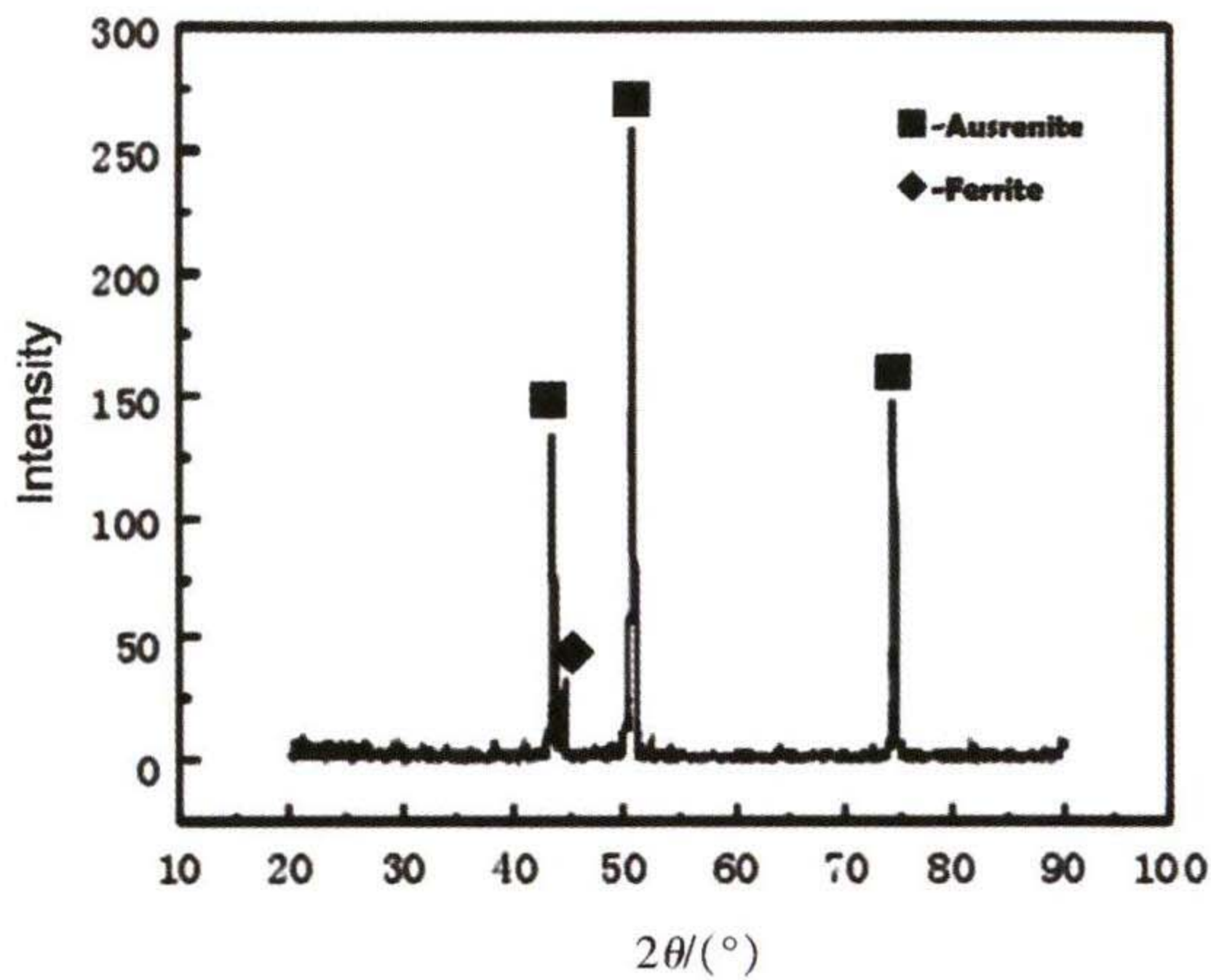


图 9 增材制造第二层 XRD 图

Fig. 9 XRD image of the second layer of additive manufacturing

测试位置为第一层第二、第三焊道和第二层第二、第

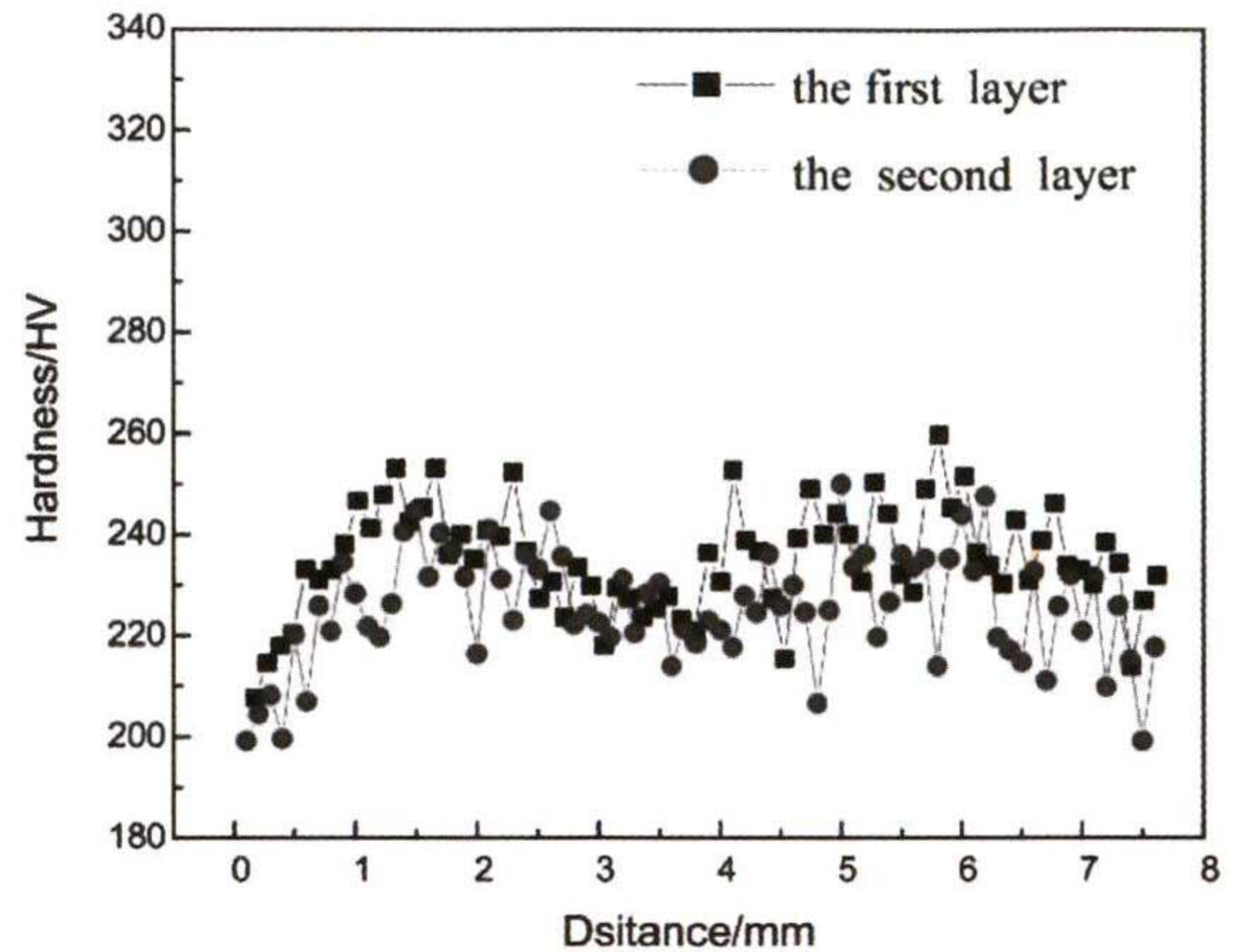


图 10 增材制造第一层和第二层显微硬度分布

Fig. 10 The microhardness distribution of the first and second layers of additive manufacturing

图 10 为增材制造的不同堆积层硬度分布, 硬度

表 3 316L 和复合增材试样力学性能

Table 3 Mechanical properties of 316L and composite additive samples

Parameter	Tensile strength/MPa			Elongation/%		
316L	480	—	—	40	—	—
Additive manufacturing	575.5	562.8	571.6	16.2	17.5	16.8

三焊道,以第二焊道边缘为起始位置。第一层平均硬度为 221.5 HV,第二层平均硬度为 238.6 HV,第一层在复合热源的作用下形成了重熔,第二层在后续焊道的激光作用下细化了晶粒,形成了更细小的枝晶,硬度略高于第一层。

通过光纤激光-电弧复合增材形成的抗拉试样取样位置如图 11 所示。通过线切割获取拉伸试样,复合增材及 316L 力学性能如表 3 所示,复合增材方式形成的拉伸试样平均抗拉强度为 569.9 MPa,延伸率为 16.8%,拉伸试样的应力-应变曲线如图 12 所示。拉伸试样断裂形式为韧性断裂,在断口表面分散着细小韧窝,如图 13 所示。与 316L 丝材相比,复合增材试样的抗拉强度提高,延伸率有所降低,降低了 58%。

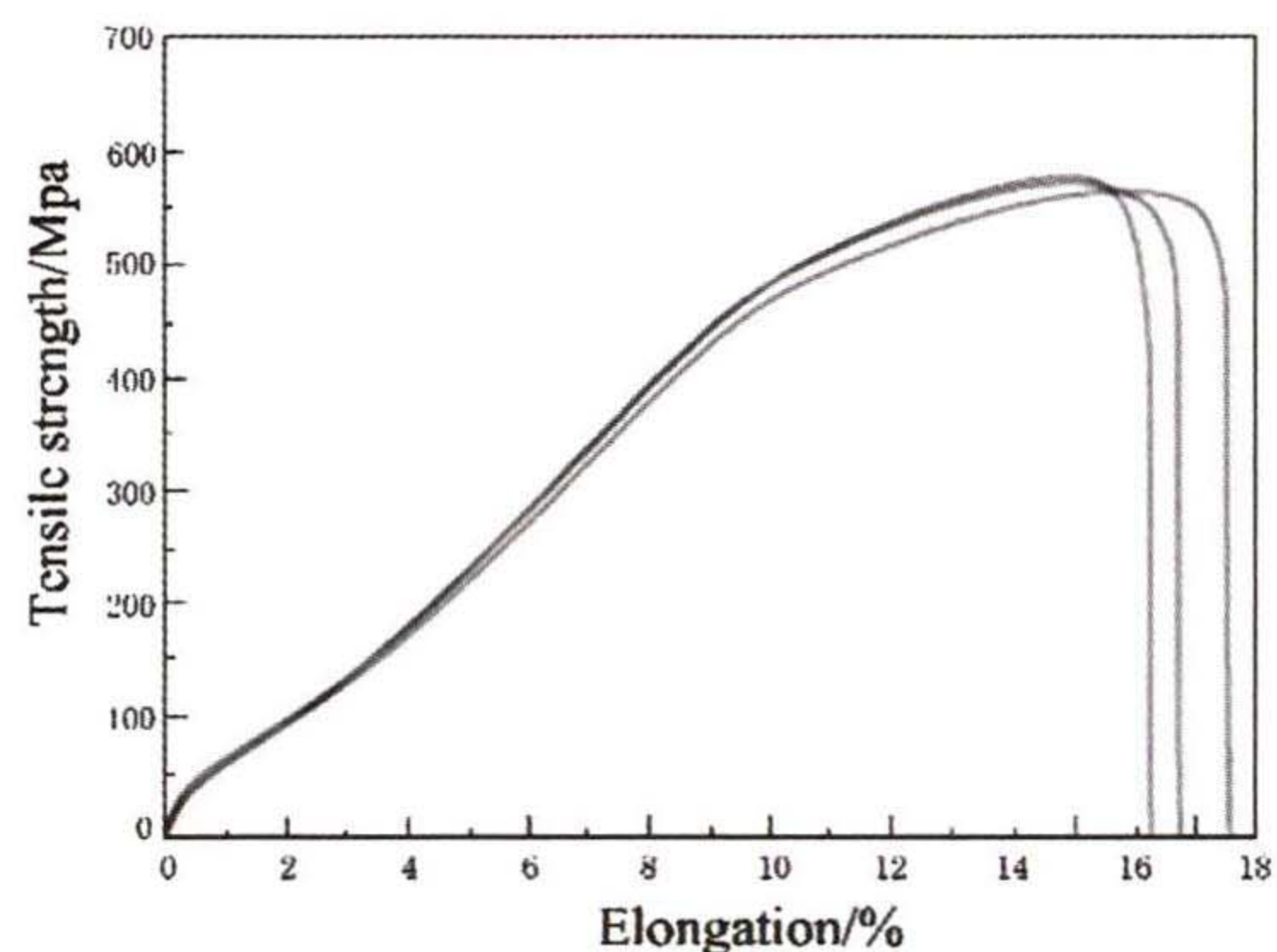


图 12 增材制造拉伸试样应力-应变曲线

Fig. 12 The Stress-strain curve of tensile specimen of additive manufacturing

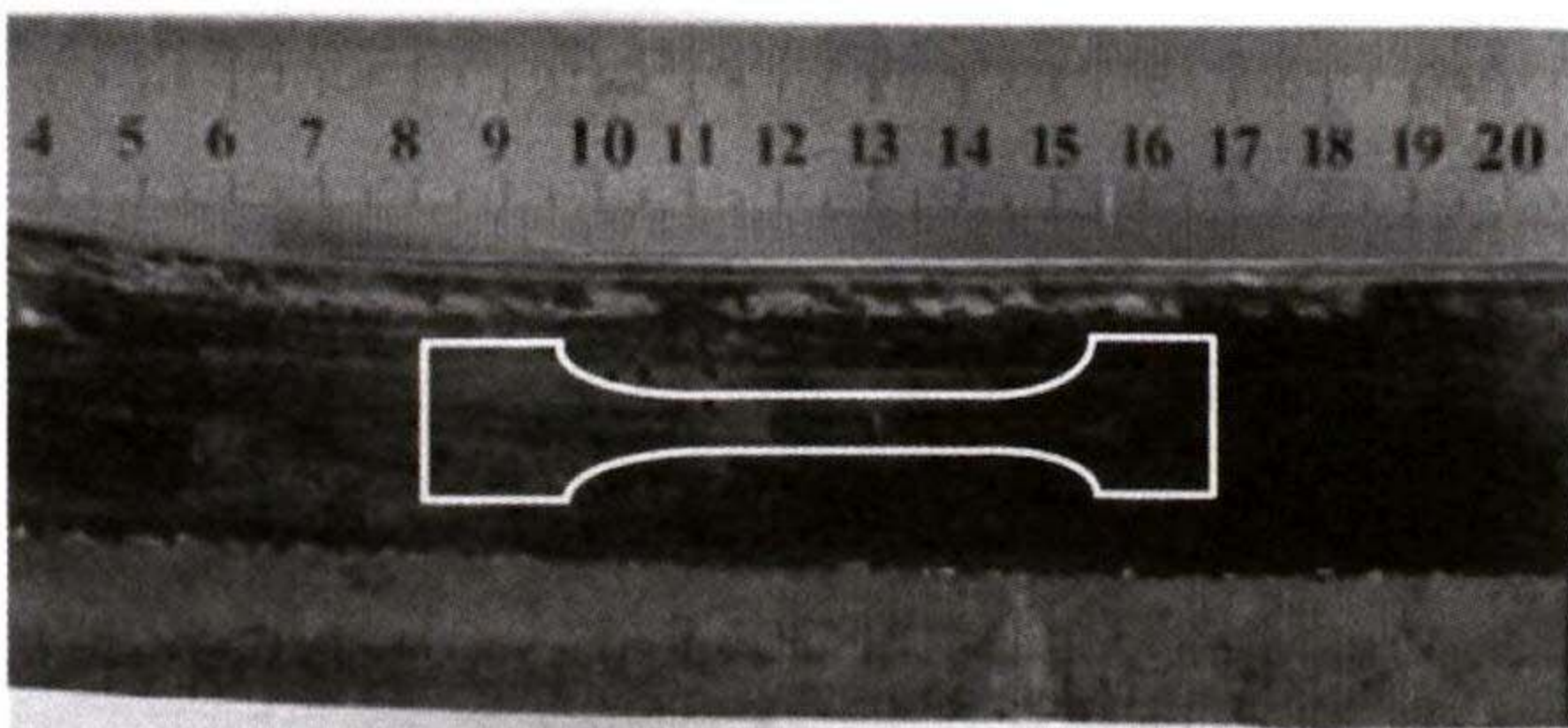


图 11 取样示意图

Fig. 11 Schematic diagram of sampling

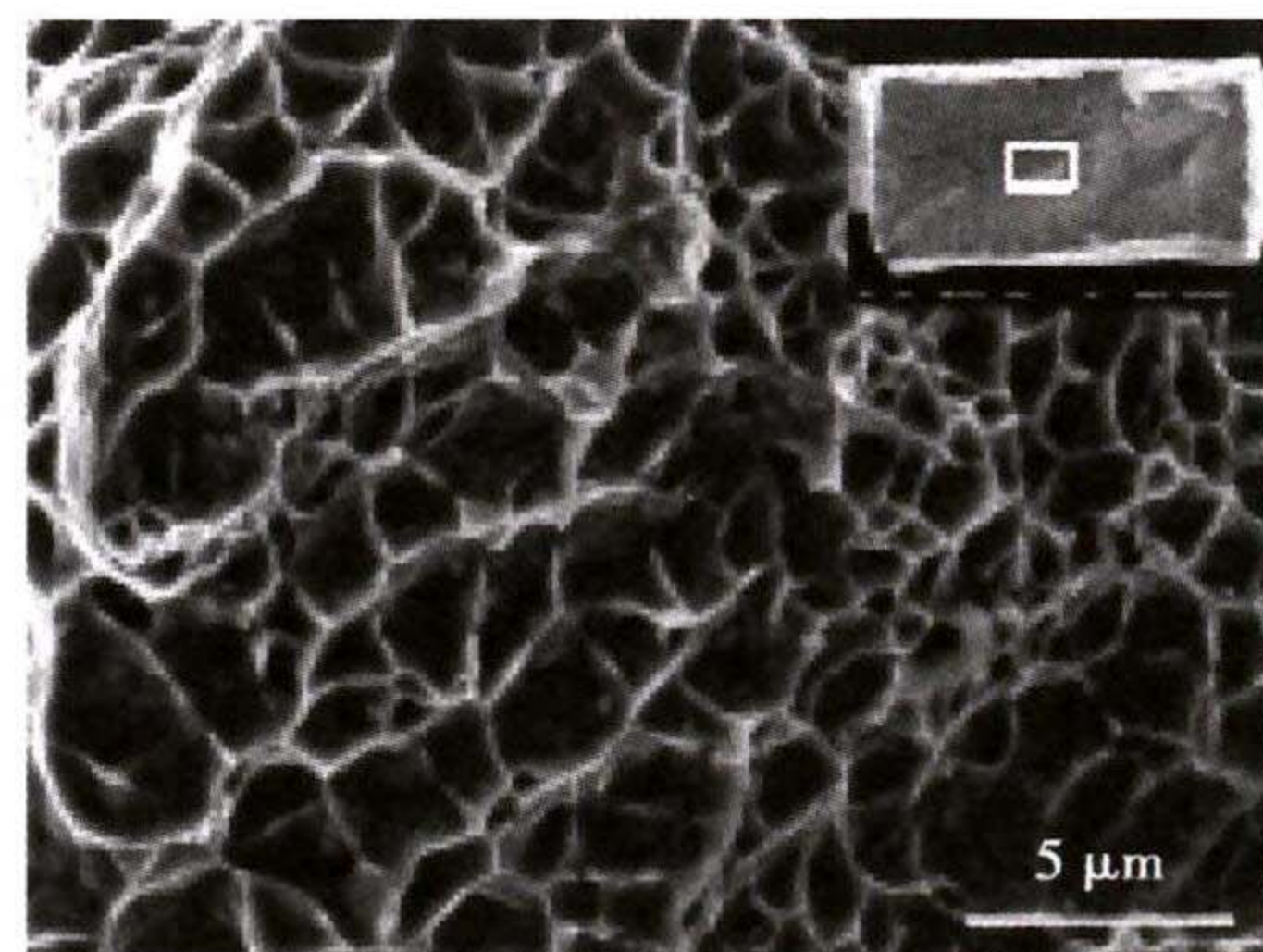


图 13 拉伸断口扫描电子显微图像

Fig. 13 SEM of stretched fracture

### 3 结论

(1) 当焊接电流为 240 A, 激光功率  $P = 1.5 \text{ kW}$ , 焊接速度为 90 cm/min, 熔滴过渡模式为射滴过渡时, 光纤激光-电弧复合增材制造过程稳定性最佳, 气孔率最低为 2.67%。

(2) 复合增材焊缝组织由胞状晶和树枝晶组成, 物相由奥氏体和铁素体组成, 在奥氏体基底上分散着骨架状铁素体, 枝晶生长方向朝向堆积方向, 凝固模式为 FA。

(3) 复合增材试样第二层硬度略高于第一层硬度, 抗拉强度为 569.9 MPa, 延伸率为 16.8%, 与 316L 丝材相比, 强度提高了 18.7%, 延伸率降低了 58%。

### 参考文献

- [1] LU B H, LI D C. Development of the additive manufacturing(3D printing) technology[J]. Machine Building & Automation, 2013, 42(4): 1-4.  
卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D 打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(4): 1-4.
- [2] WANG Q W, ZHU S, CHEN C L, et al. Research progress of additive remanufacturing technology based on energy beam and energy field[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(6): 1-8.  
王启伟, 朱胜, 陈春良, 等. 能束能场增材再制造技术的研究进展[J]. 中国表面工程, 2018, 31(6): 1-8.
- [3] LI A, LIU X F, YU B, et al. Key factors and developmental directions with regard to metal additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(2): 159-173.  
李昂, 刘雪峰, 俞波, 等. 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, 41(2): 159-173.
- [4] CHEN B, HUANG Y H, TAN C W, et al. Maraging steel laser additive manufacturing process and microstructure study [J]. Applied Laser, 2017, 37(4): 487-491.  
陈波, 黄煜华, 檀财旺, 等. 马氏体时效钢激光增材制造工艺及组织研究[J]. 应用激光, 2017, 37(4): 487-491.
- [5] YAN K, CHEN C J, ZHANG M, et al. Laser cladding Ni/WC composite on H13 steel fabricated by additive manufacturing [J]. Applied Laser, 2017, 37(2): 175-180.  
严凯, 陈长军, 张敏, 等. 增材制造 H13 钢表面熔覆 Ni/WC 涂层组织及性能研究[J]. 应用激光, 2017, 37(2): 175-180.
- [6] CHEN X H. Effect of heat treatment on microstructure, mechanical and corrosion properties of austenitic stainless steel 316L using arc additive manufacturing [J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 715: 307-314.
- [7] SUN C S, ZHANG Z D, LIU L M. Effect of laser power on microstructure and properties of 5356 aluminum alloy by laser induced MIG arc additive manufacturing [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(9): 13-18.  
孙承帅, 张兆栋, 刘黎明. 激光功率对 5356 铝合金激光诱导 MIG 电弧增材制造组织性能的影响[J]. 焊接学报, 2018, 39(9): 13-18.
- [8] LI X W, SONG G, ZHANG Z D, et al. Microstructure and properties of 316 stainless steel produced by laser-induced arc hybrid additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1202006.  
李旭文, 宋刚, 张兆栋, 等. 激光诱导电弧复合增材制造 316 不锈钢的组织性能[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1202006.
- [9] CHEN X H, ZHANG S Q, RAN X Z, et al. Effect of arc power on microstructure and mechanical properties of austenitic stainless steel 316L fabricated by high efficient arc additive manufacturing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(5): 42-49.  
陈晓晖, 张述泉, 冉先喆, 等. 电弧功率对 MIG 电弧增材制造 316L 奥氏体不锈钢组织及力学性能的影响[J]. 焊接学报, 2020, 41(5): 42-49.
- [10] CHENG L Y, ZHU X G, LIU Z W, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel prepared by selective laser melting[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41(7): 80-86.  
程灵钰, 朱小刚, 刘正武, 等. 热处理对激光选区熔化成形 316L 不锈钢组织和力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(7): 80-86.
- [11] XU L, YANG K, WANG Q Y, et al. Effect of heat treatment on microstructure properties of austenitic stainless steel 316L using arc additive manufacturing [J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(10): 29-34.  
徐亮, 杨可, 王秋雨, 等. 热处理对电弧增材制造 316L 不锈钢组织和性能的影响[J]. 电焊机, 2020, 50(10): 29-34.
- [12] WANG X G, LIU F C, FANG P, et al. Forming accuracy and properties of wire arc additive manufacturing of 316L components using CMT process[J]. Transac-

- tions of the China Welding Institution, 2019, 40(5): 100-106.
- 王晓光, 刘奋成, 方平, 等. CMT 电弧增材制造 316L 不锈钢成形精度与组织性能分析[J]. 焊接学报, 2019, 40(5): 100-106.
- [13] MIAO Y G, LI C W, YIN C H, et al. Study on additive manufacturing of BC-MIG for marine aluminum/steel welded joints [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(12): 129-132.
- 苗玉刚, 李春旺, 尹晨豪, 等. 船用铝/钢焊接接头 BC-MIG 电弧增材制造工艺[J]. 焊接学报, 2019, 40(12): 129-132.
- [14] LIPPOLD J C, KOTECKI D J. Welding metallurgy and weldability of stainless steels[M]. CHEN J H, Transl. Beijing:China Machine Press. 2008:144-146.
- LIPPOLD J C, KOTECKI D J. 不锈钢焊接冶金学及焊接性[M]. 陈剑虹, 译. 北京: 机械工业出版社, 2008: 144-146.