

工艺参数对等离子弧沉积 316L 不锈钢形貌及组织的影响

尚晓峰¹, 李世硕^{1,2}, 王志国^{2,3*}, 赵吉宾^{2,3}, 赵宇辉^{2,3**}, 何振丰, 聂长武

¹沈阳航空航天大学机电工程学院, 辽宁 沈阳 110136;

²中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016;

³中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110169

摘要 以 316L 不锈钢粉末为原料, 采用等离子弧沉积技术在高沉积速率下获得了致密无缺陷的单道试样。首先研究了沉积电流、扫描速度、送粉速度与沉积层高度、沉积层宽度、沉积角之间的关系, 然后对沉积试样的微观组织和组成成分进行了检测与分析。结果表明: 沉积角随着送粉速度的增大而增大, 随着沉积电流的增大而减小; 沉积角主要是锐角, 有利于试样的沉积; 沉积电流对沉积层宽度的影响最大, 扫描速度对沉积层高度的影响最大, 稀释率随着扫描速度的增大而减小, 随着沉积电流的增大而增大, 随送粉速度增大而减小; 沉积试样成分均匀, 凝固组织为奥氏体和铁素体。

关键词 材料; 等离子弧增材制造; 316L 不锈钢; 组织; 形貌

中图分类号 TG661

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.011601

Effects of Processing Parameters on Morphology and Microstructure of Plasma Arc Deposition Using 316L Stainless Steel

Shang Xiaofeng¹, Li Shishuo^{1,2}, Wang Zhiguo^{2,3*}, Zhao Jibin^{2,3},
Zhao Yuhui^{2,3**}, He Zhenfeng, Nie Changwu

¹ School of Mechatronics Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang, Liaoning 110136, China;

² Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China;

³ Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110169, China

Abstract In this study, dense and defect-free specimens of a single track are fabricated at a high deposition rate using the plasma arc deposition, in which the 316L stainless steel powder is used as the deposition material. The effects of the deposition current, scanning speed, and powder feeding rate on the deposition height, width, and angle of the specimens are studied. Moreover, the microstructure and composition of the deposited samples are examined and analyzed. The results indicate that the deposition angle increases with increase in the powder feeding rate and decreases with increase in the deposition current. The deposition angles of the specimens fabricated under different deposition parameters are mainly sharp angles, which is beneficial for the deposition of the lapped samples. Among all the process parameters, the width of the single track is mostly affected by the deposition current, while its height is mostly affected by the scanning speed. The dilution rate decreases under a higher scanning speed, lower deposition current, or higher powder feeding rate. The composition distribution of the deposition specimens is uniform. The solidified microstructure comprises austenite and ferrite phases.

Key words materials; plasma arc additive manufacturing; 316L stainless steel; microstructure; morphology

OCIS codes 160.3900; 350.3390; 160.3380

收稿日期: 2019-05-10; 修回日期: 2019-06-12; 录用日期: 2019-07-02

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1102002)

* E-mail: wangzhiguo@sia.cn; ** E-mail: yhzhaos@sia.cn

1 引言

316L 奥氏体不锈钢具有良好的耐蚀性、抗辐照性、抗氧化性、高温和低温力学性能、生物中性以及有良好的食品相容性等,已被广泛应用于交通电力、石油化工、航空航天、航海国防、轻工纺织、医学食品等工业领域^[1-2]。不锈钢成本较高,采用传统加工方法制备不锈钢零件通常会造很大的资源浪费。

目前,国内外普遍采用激光增材制造技术^[3-5]制备 316L 不锈钢,如:Kamath 等^[6]采用增材制造技术成形了 316L 不锈钢,成形件的相对密度为 99.3%~99.5%,但成形效率仅为 $3.12 \text{ mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; Yadroitsev 等^[7]采用选区激光熔化技术在层厚为 $50 \mu\text{m}$ 、扫描速率为 $100 \sim 300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下成形了 316L 不锈钢,成形件的相对密度为 96.72%~99.93%,但成形效率仅为 $1.2 \text{ mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; Laohaprapanon 等^[8]采用选取激光熔化技术成形了厚度为 $100 \mu\text{m}$ 的 316L 不锈钢,其相对密度可达 99.9%。以上研究结果表明,激光增材制造 316L 不锈钢的致密度较好,但存在成形效率低的问题,并且其设备昂贵、成形尺寸小,应用范围大大受限。

等离子弧增材制造具有设备简单、成本低、成形效率高优点,而且成形件的组织致密、力学性能好,具有广阔的发展前景^[9]。目前,研究人员已对等离子弧增材制造技术进行了研究,但材料主要集中在钛合金上,如:Martina 等^[10]、罗震等^[11]、柏久阳

等^[12]基于等离子弧增材制造系统对钛合金的增材制造工艺进行了研究,分析了成形件的宏观形貌和微观组织。所查资料显示,现有文献尚未涉及工艺参数对等离子弧送粉增材 316L 不锈钢形貌及组织影响的详细研究。

本文以建立工艺参数与沉积试样形貌、微观结构之间的关系为目的,用正交试验的方法研究不同工艺参数沉积得到的 316L 单道试样的组织和性能,为等离子弧增材制造提供理论依据,使 316L 增材零件具有良好的组织和优异的性能。

2 实验设备、材料和方法

实验选取 316L 不锈钢粉末为材料,其成分如表 1 所示。以 45 钢为基板,其尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$,实验前用 240# 砂纸打磨基板表面,以除去表面的油污及氧化皮,然后用丙酮清洗干净。实验设备为 DML-V03BD 等离子弧焊机(输入电压为三相 380 V)以及库卡机器人。在等离子弧沉积过程中,为了避免成形试样出现气孔、裂纹等缺陷,沉积出合适的几何形貌,需要考虑沉积电流、扫描速度、焊枪与沉积表面的距离、送粉速度、环境温度等诸多因素的影响。对于电弧沉积工艺来说,最容易精确控制的影响因素是沉积电流、扫描速度和送粉速度。因此本次研究着重研究沉积电流、扫描速度和送粉速度对沉积试样宏观形貌的影响规律。按表 2 所示的工艺参数进行单道沉积,扫描长度均为 10 mm。

表 1 316L 不锈钢粉末的化学成分

Table 1 Chemical compositions of 316L stainless steel powder

Element	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	C	P	S	N	Fe
Mass fraction /%	17.09	10.61	2.38	1.17	0.59	0.013	0.011	0.011	0.09	Bal.

从单道试样的中部用线切割方式切取成形试样,试样经粗磨、细磨、抛光处理后用王水溶液腐蚀,然后采用奥林巴斯 GX-51 型倒置式光学显微镜(OM)和 TESCAN MAIA3 电镜(SEM)观察试样的组织。

单道沉积示意图如图 1 所示,其中 H 为单道沉积的高度, W 为沉积层的宽度, θ 为沉积试样的沉积角,这些量能够呈现沉积试样的宏观形貌特征。

3 实验结果和讨论

3.1 沉积电流、扫描速度对沉积层宏观形貌的影响

图 2 是单道沉积层的宏观形貌,可以发现沉积层的高度、宽度随着工艺参数的变化而变化明显。为了精确控制沉积层的形貌,需要分析单个工艺参数与宏观形貌之间的规律,从而对不同的工艺参数组合进行

合理调控,进而对沉积形貌实现精准控制。图 3 为选择不同扫描速度、沉积电流时沉积层尺寸的变化。

在相同的沉积电流(80 A)和送粉速度($15 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$)下,随着扫描速度从 $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,沉积层的宽度下降了 23%。产生这种现象的原因是,在相同的送粉速度下,随着扫描速度增加,单位距离上沉积的金属量变少,导致沉积层宽度的减小。在相同的扫描速度($10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)的条件下,随着沉积电流从 140 A 降到 80 A,沉积层的宽度下降了 48%。产生这种现象的原因是,单位时间内熔化金属粉末的量是一定的,但沉积电流越小,熔池的温度以及所受到的电弧压力越小,因此熔池的流动性变差,沉积试样的宽度变小。与扫描速度相比,沉积电流对沉积层宽度的影响更明显。

表 2 等离子弧沉积工艺参数表

Table 2 Process parameters of plasma arc deposition

No.	Deposition current /A	Traverse speed / (mm · s ⁻¹)	Powder feed speed / (g · min ⁻¹)
1	80	10	15
2	80	15	15
3	80	20	15
4	110	10	15
5	110	15	15
6	110	20	15
7	140	10	15
8	140	15	15
9	140	20	15
10	80	10	25
11	80	15	25
12	80	20	25
13	110	10	25
14	110	15	25
15	110	20	25
16	140	10	25
17	140	15	25
18	140	20	25

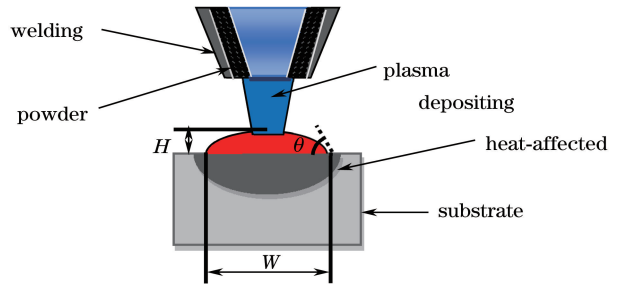


图 1 等离子弧同轴送粉沉积示意图

Fig. 1 Schematic of plasma arc deposition with coaxial powder feeding

在相同的沉积电流 (80 A) 和送粉速度 (15 g · min⁻¹) 下,随着扫描速度从 10 mm · s⁻¹ 增大到 20 mm · s⁻¹,沉积层的高度下降了 32%。这是因为扫描速度的增加使得单位距离下沉积的金属量降低,从而导致沉积层高度降低。当扫描速度为 10 mm · s⁻¹ 时,随着沉积电流从 80 A 增大到 140 A,沉积层高度下降了 11.3%,这说明增大沉积电流能够显著提高沉积过程中的能量输入,进而提高了熔池的流动性,使得沉积层的高度下降。对比沉积电流对高度的影响后可以明显发现扫描速度对高度的影响更明显。

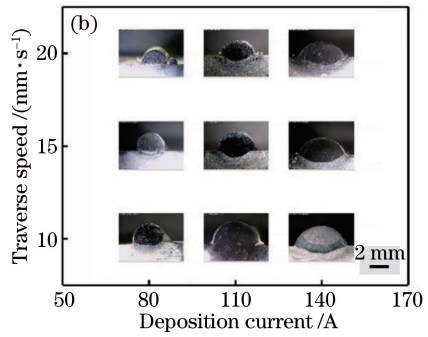
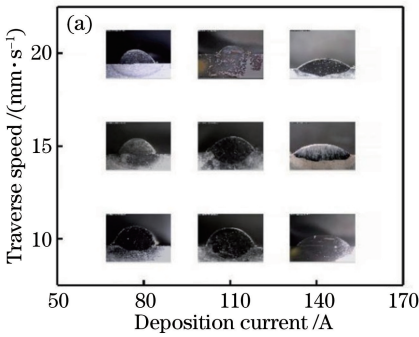


图 2 不同送粉速度下得到的单道沉积层的宏观形貌。(a) 15 g · min⁻¹; (b) 25 g · min⁻¹

Fig. 2 Macroscopic morphologies of single-track deposited layers with different powder feeding rates.

(a) 15 g · min⁻¹; (b) 25 g · min⁻¹

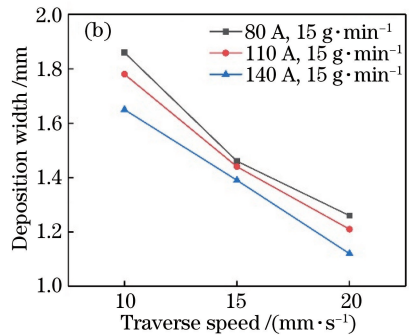
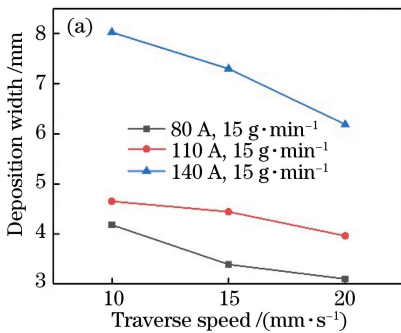


图 3 不同工艺参数下得到的单道沉积层的尺寸。(a) 沉积宽度; (b) 沉积高度

Fig. 3 Dimensions of single-track deposited layers with different process parameters. (a) Deposition width; (b) deposition height

沉积角是影响沉积质量的一个重要因素,尤其是对于平面以及三维零件的沉积。对于等离子弧沉积工艺,沉积角与熔池的表面张力以及电弧与熔池的距离有关。当沉积角为锐角时,沉积试样的致密度更高。当沉积角大于 90° 时,在平面沉积过程中,相邻试样间更容易出现间隙,进而影响沉积质量^[13-14]。本文对单道沉积试样 5 个不同位置左右两侧的沉积角数据进行了采集,并计算其平均值,如表 3、4 所示,可以发现:在相同的沉积电流和扫描速度下,沉积角的大小随着送粉速度的增大而增大;在两种送粉速度下采用相同的扫描速度时,沉积角随着沉积电流的增大而减小;沉积角大部分为锐角 ($34.4^\circ \sim 83.9^\circ$),这有利于试样的沉积。

表 3 $15 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ 送粉速度下沉积角与沉积电流、扫描速度的关系

Table 3 Relationship among deposition angle, deposition current, and scanning speed at powder feeding rate of $15 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$

Deposition current /A	Scanning speed /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Deposition angle /($^\circ$)	
		Left	Right
80	10	81	74.6
80	15	60.4	65.5
80	20	64.6	60.8
110	10	62.4	69
110	15	53.9	59
110	20	60.8	59.5
140	10	50.6	60
140	15	39.4	39.1
140	20	36.4	34.4

稀释率^[15-16]是指在等离子弧沉积过程中,熔覆合金中混入了熔化的基体而引起熔覆合金成分变化的程度,用基材合金在沉积层中所占的百分比表

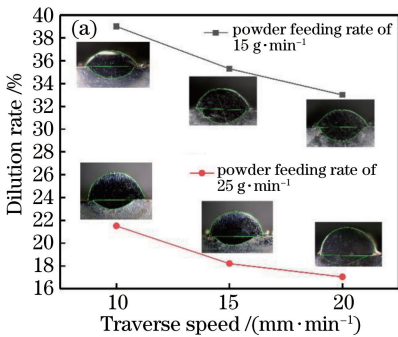


表 4 $25 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ 送粉速度下沉积角与沉积电流、扫描速度的关系

Table 4 Relationship among depositing angle, deposition current, and scanning speed at powder feeding rate of $25 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$

Deposition current /A	Scanning speed /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Deposition angle /($^\circ$)	
		Left	Right
80	10	91.4	82.4
80	15	108.1	95.2
80	20	65	68.5
110	10	83.9	76.8
110	15	82.5	73.2
110	20	95.4	74.3
140	10	68.5	66.5
140	15	67.7	62.9
140	20	60.3	63.7

示。图 4 是沉积层截面示意图,根据稀释率的定义,稀释率 η 可按照 $\eta = A_1 / (A_2 + A_1)$ 计算,其中 A_1 为基体熔化区域的截面积, A_2 为等离子弧沉积层的截面积。图 5 为不同扫描速度、沉积电流和送粉速度下,等离子弧沉积层稀释率的变化曲线。

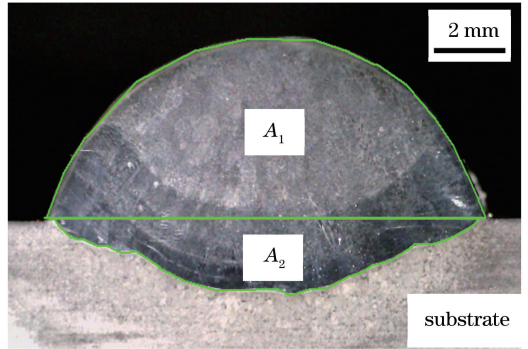


图 4 沉积层截面示意图

Fig. 4 Schematic of cross section of deposited layer

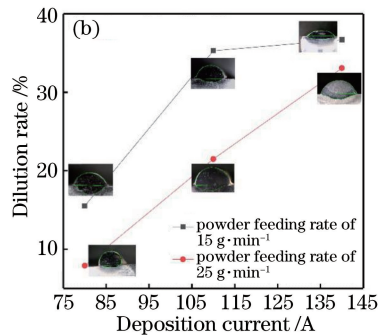


图 5 不同工艺参数下沉积层的稀释率。(a)不同扫描速度下沉积层的稀释率;(b)不同沉积电流下沉积层的稀释率

Fig. 5 Dilution rates of deposited layer with different process parameters. (a) Dilution rates of deposited layer with different scanning speeds; (b) dilution rates of deposited layer with different deposition currents

在相同的沉积电流(110 A)和两种送粉速度 ($15 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $25 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$)下,随着扫描速度从

$10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,稀释率分别降低了 15.38% 和 20.7%,如图 5(a)所示。这是因为随

着扫描速度增加,单位时间内基体的热量供给减少,所以对基体的稀释效应减小。在相同的扫描速度($10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)和两种送粉速度($15 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $25 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$)下,随着沉积电流从 80 A 增大到 140 A ,稀释率分别提高了 55.76% 和 76.13% ,如图 5(b)所示。这是因为沉积电流的增大显著提高了熔池的温度,更多的基体被熔化。在其他工艺参数一定的条件下提高送粉速度(从 $15 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ 提高到 $25 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$),沉积层的稀释率降低。

低的稀释率是熔覆工艺设计的目的之一,熔覆层的组织、性能与稀释率的大小有关。在保证沉积层与基体实现冶金结合的条件下,应尽量采用较低的稀释率,以保证充分发挥沉积材料的性能;但稀释率过小,则界面结合力就会变差,熔覆层易于剥落,开裂倾向变大^[17-18]。因此,在工艺实施过程中,应针对不同的沉积体系和性能要求,选择适宜的稀释率,综合考虑各工艺参数之间的相互匹配。

3.2 组织分析

等离子弧沉积单道试样(3#和16#)的显微组

织如图 6、7 所示,其中 3# 试样为低能量输入下沉积的试样,16# 试样为高能量输入下沉积的试样。通过分析图 6(b)和图 7(e)可以发现沉积试样的底部组织均为柱状晶粒。液态金属的凝固过程主要沿着垂直于基板的方向散热,在该方向上形成了负的温度梯度,使得晶粒在此条件下沿着冷却方向凝固,因此,在靠近基板的位置,两试样凝固的方向性均很明显。对比图 6(c)和图 7(d)可以明显看出,图 6(c)中的组织为柱状晶粒,晶粒沿着外表面向熔池中心生长,而图 7(d)中的组织以胞状晶和等轴晶为主,这是由于 3# 试样设置的工艺参数为低电流、高扫描速度,因此该试样的能量输入较低,组织的凝固速度较快,使得组织生长的方向性更明显;而 16# 试样在沉积过程的能量输入高,与基板距离远的位置组织的凝固速度较慢,组织生长的方向性不明显,顶部位置的晶粒相对粗大。可见,不同的工艺参数组合能够控制沉积过程中的能量输入,能量输入决定了沉积试样的组织形貌。此外,由图 6、7 可以看出,等离子弧沉积试样的组织致密,无缺陷存在。

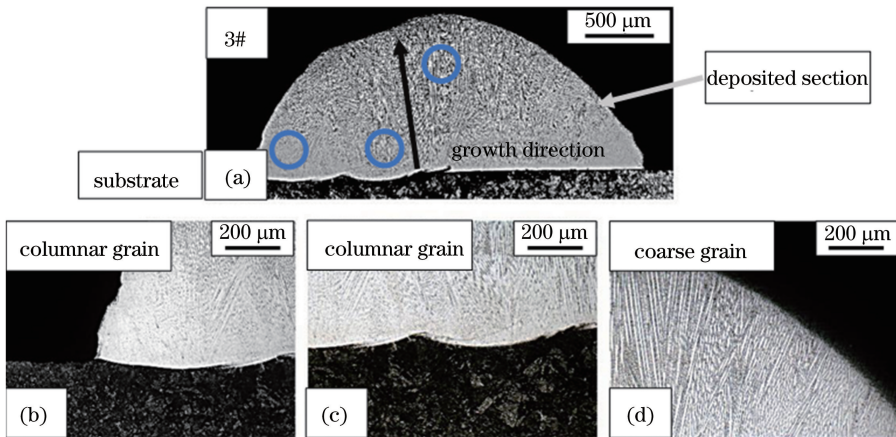


图 6 3# 沉积试样的显微组织。(a)整体形貌;(b)左侧位置;(c)底部位置;(d)顶部位置

Fig. 6 Microstructures of 3# deposited specimen. (a) Overall morphology; (b) left section; (c) bottom section; (d) top section

3.3 成分及组成相分析

对图 6、7 中的三个标记位置进行 EDS 分析,结果显示:这三处位置处的成分没有发生明显波动,说明结晶过程各组元扩散充分,成分分布均匀。通过对比图 8 可以发现,采用不同能量输入的等离子弧工艺会使沉积材料的结晶成分不同,这是因为基体的稀释率不同。

Katayama 等^[19]的研究表明,奥氏体不锈钢在非平衡凝固过程中,合金元素的偏析会影响和改变奥氏体不锈钢的凝固过程以及相关的显微组织。根据 316L 粉末成分计算得到 Cr 当量 $w(\text{Cr}_{\text{eq}}) = 20$ 、

65%、Ni 当量 $w(\text{Ni}_{\text{eq}}) = 13.73\%$,根据 Schaeffler 相图^[20]可知 316L 成分位于铁素体-奥氏体区,可以预测铁素体相的质量分数为 $0 \sim 5\%$ 。然而,Zhang 等^[21]在激光沉积的 316 不锈钢零件中观察到的全是奥氏体组织,这是由较高的冷却速率导致的。Elmer 等^[22]认为高冷却速率溶质扩散受到了抑制,铬当量与镍当量之比较低的合金在高冷却速率下只能得到单相奥氏体组织。而本次研究采用的是等离子弧沉积工艺,该工艺与激光沉积工艺相比能量输入大,因此在此工艺下沉积试样的冷却速率较慢。本实验沉积得到的 316L 不锈钢的 SEM 照片如图 9

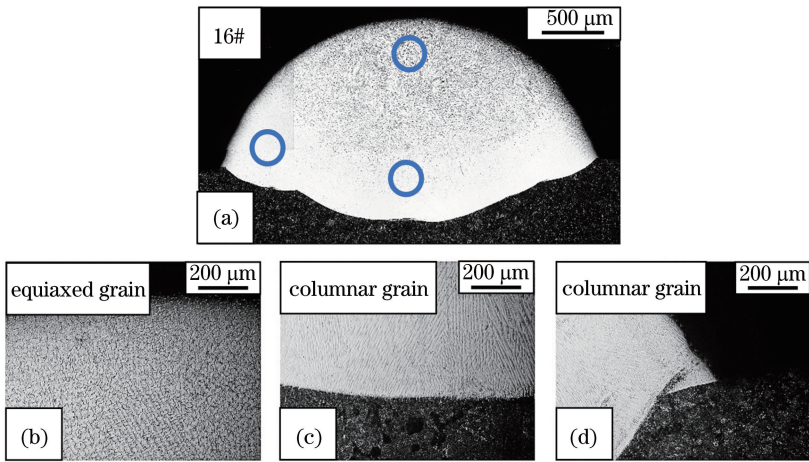


图 7 16# 沉积试样的显微组织。(a)整体形貌;(b)左侧位置;(c)底部位置;(d)顶部位置
Fig. 7 Microstructures of 16# deposited specimen. (a) Overall morphology; (b) left section; (c) bottom section; (d) top section

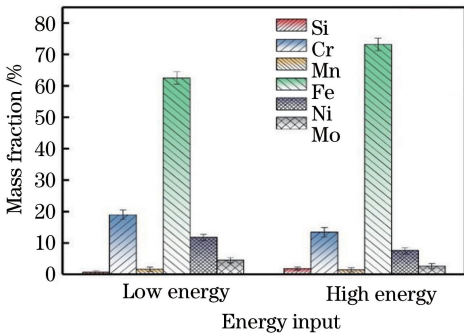


图 8 不同能量输入下各元素的质量分数

Fig. 8 Mass fraction of each element under different energy input

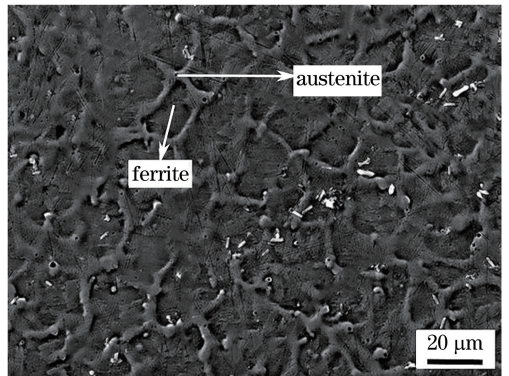


图 9 等离子弧沉积 316L 不锈钢的 SEM 照片
Fig. 9 SEM image of 316L stainless steel after plasma arc deposition

所示,其凝固组织主要由奥氏体组成,在奥氏体枝晶间形成了具有包晶特性的铁素

体组织。

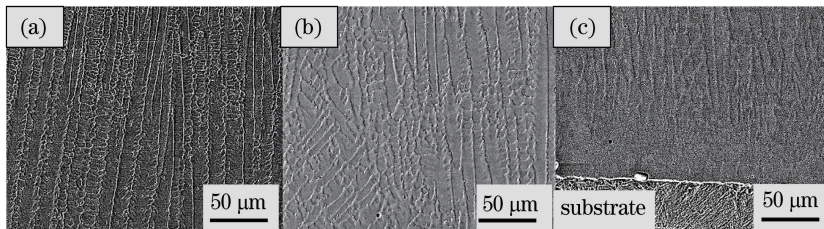


图 10 3# 试样的微观组织。(a)顶部位置;(b)中部位置;(c)底部位置

Fig. 10 Microstructures of 3# deposited specimen. (a) Top section; (b) middle section; (c) bottom section

在图 10(a)所示的单道的顶部位置能够发现铁素体主要以条状沿着垂直方向生长,而从图 10(b)所示的中部位置可以发现铁素的形态发生了转变,铁素体沿着垂直方向生长的趋势受到了限制,主要以网状存在,在一部分位置能够发现条状铁素体。这是因为在组织凝固过程中铁素体沿着负的温度梯度方向生长,靠近表面位置的铁素体的生长条件较好,沿着外表面

向熔池中心生长。中部位置的凝固速度较慢,抑制了铁素体的生长,使得铁素体主要以网状存在。图 10(c)为靠近基板位置的 316L 不锈钢的微观形貌,由于此位置靠近基板,等离子弧输入的能量可以通过基板快速传导走,因此该位置的组织为快速凝固组织。在快速冷却的条件下,奥氏体还来不及向铁素体转化便已凝固。因此,该区域组织主要以奥氏体为

主^[23]。

4 结 论

扫描速度和沉积电流决定了沉积层的宽度和高度;扫描速度对沉积层高度的影响更大,而沉积电流对沉积层宽度的影响更大;沉积角主要是锐角(34.4°~83.9°);在相同的沉积电流和扫描速度下,沉积角的大小随着送粉速度的增大而增大;在两种送粉速度条件下,采用相同的扫描速度进行实验,沉积角均随着沉积电流的增大而减小;在两种送粉速度下,采用相同的沉积电流进行实验,稀释率均随着扫描速度的增大而减小;在两种送粉速度下,采用相同的扫描速度进行实验,稀释率均随着沉积电流的增大而增大;其他工艺参数一定时,稀释率随着送粉速度的增大而减小。

沉积试样不同位置处的成分相近,说明在等离子弧沉积过程,熔池中各组元的扩散充分,成分分布均匀;在不同能量输入条件下得到的凝固组织的成分不同,这是由稀释率不同造成的。

等离子弧沉积得到的 316L 不锈钢的凝固组织主要由奥氏体组成,在奥氏体枝晶间形成了具有包晶特性的铁素体组织。铁素体组织受凝固速度的影响,在靠近基板位置处,铁素体分布较少,且以细小的网状存在;在沉积层的中部和顶部位置,铁素体分布较多,铁素体以条状存在。

参 考 文 献

- [1] Cheng X N, Dai Q X. Austenite design and control [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 4-5.
程晓农, 戴起勋. 奥氏体钢设计与控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 4-5.
- [2] Duan X X, Gao S Y, Gu Y F, et al. Study on reinforcement mechanism and frictional wear properties of 316L-SiC mixed layer deposited by laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 0103004.
段晓溪, 高士友, 顾勇飞, 等. 激光熔覆 316L+SiC 的强化机制和摩擦磨损性能研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0103004.
- [3] Raj B, Mudali U K. Materials development and corrosion problems in nuclear fuel reprocessing plants [J]. Progress in Nuclear Energy, 2006, 48(4): 283-313.
- [4] Schwendner K I, Banerjee R, Collins P C, et al. Direct laser deposition of alloys from elemental

- powder blends[J]. Scripta Materialia, 2001, 45(10): 1123-1129.
- [5] Pu Y S, Wang B Q, Zhang L G. Metal 3D printing technology[J]. Surface Technology, 2018, 47(3): 78-84.
蒲以松, 王宝奇, 张连贵. 金属 3D 打印技术的研究 [J]. 表面技术, 2018, 47(3): 78-84.
- [6] Kamath C, El-Dasher B, Gallegos G F, et al. Density of additively-manufactured, 316L SS parts using laser powder-bed fusion at powers up to 400 W [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74: 65-78.
- [7] Yadroitsev I, Smurov I. Selective laser melting technology: from the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape [J]. Physics Procedia, 2010, 5: 551-560.
- [8] Laohaprapanon A, Jeamwattthanachai P, Wongcumchang M, et al. Optimal scanning condition of selective laser melting processing with stainless steel 316L powder[J]. Advanced Materials Research, 2011, 341/342: 816-820.
- [9] Liu Y B, Sun Q J, Jiang Y L, et al. Rapid prototyping process based on cold metal transfer arc welding technology [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(7): 1-4, I.
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, I.
- [10] Martina F, Mehnen J, Williams S W, et al. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(6): 1377-1386.
- [11] Luo Z, Zhang Y, Jia P. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V titanium alloy parts based on microplasma arc surfacing [J]. Welding & Joining, 2016(4): 13-16, I.
罗震, 张禹, 贾鹏. Ti-6Al-4V 钛合金微束等离子弧堆焊增材制造工艺研究 [J]. 焊接, 2016(4): 13-16, I.
- [12] Bai J Y, Fan C L, Yang Y C, et al. Microstructures of 2219-Al thin-walled parts produced by shaped metal deposition [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(6): 124-128, VI.
柏久阳, 范成磊, 杨雨晨, 等. 2219 铝合金 TIG 填丝堆焊成形薄壁试样组织特征 [J]. 焊接学报, 2016, 37(6): 124-128, VI.
- [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] Smurov I, Doubenskaia M, Zaitsev A. Comprehensive analysis of laser cladding by means of optical diagnostics and numerical simulation [J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 220: 112-121.
- [15] Pan H, Zhao J F, Liu Y L, et al. Controllability research on dilution ratio of nickel-based superalloy by laser cladding repairment [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(4): 0403007.
潘浒, 赵剑峰, 刘云雷, 等. 激光熔覆修复镍基高温合金稀释率的可控性研究 [J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0403007.
- [16] Yu J, Chen J, Tan H, et al. Effect of process parameters in the laser rapid forming on deposition layer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(7): 1014-1018.
于君, 陈静, 谭华, 等. 激光快速成形工艺参数对沉积层的影响 [J]. 中国激光, 2007, 34(7): 1014-1018.
- [17] Guo W, Li K K, Chai R X, et al. Numerical simulation and experiment of dilution effect in laser cladding 304 stainless steel [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(5): 051402.
郭卫, 李凯凯, 柴蓉霞, 等. 激光熔覆 304 不锈钢稀释效应的数值模拟与实验 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(5): 051402.
- [18] Chen G, Li X F, Zuo D W, et al. Simulation on substrate relative dilution ratio for GH4033 [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(1): 011601.
陈刚, 黎向锋, 左敦稳, 等. GH4033 基材相对稀释率的仿真研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(1): 011601.
- [19] Katayama S, Fujimoto T, Matsunawa A. Correlation among solidification process, microstructure, microsegregation and solidification cracking susceptibility in stainless steel weld metals (materials, metallurgy & weldability) [J]. Transactions of JWRI, 1985, 14(1): 123-138.
- [20] Schaeffler A L. Constitution diagram for stainless steel weld metal [J]. Metal Progress, 1949, 56(11): 680.
- [21] Zhang B C, Dembinski L, Coddet C. The study of the laser parameters and environment variables effect on mechanical properties of high compact parts elaborated by selective laser melting 316L powder [J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 584: 21-31.
- [22] Elmer J W, Allen S M, Eagar T W. Microstructural development during solidification of stainless steel alloys [J]. Metallurgical Transactions A, 1989, 20(10): 2117-2131.
- [23] Chen X H, Li J, Cheng X, et al. Microstructure and mechanical properties of the austenitic stainless steel 316L fabricated by gas metal arc additive manufacturing [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 703: 567-577.