

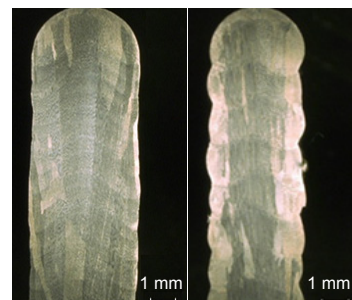


## 沉积效率对激光近净成形 316L 不锈钢组织及性能的影响

苗 佩<sup>1</sup>, 牛方勇<sup>1</sup>, 马广义<sup>1</sup>, 吕建忠<sup>2</sup>, 吴东江<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024;

<sup>2</sup>大连三垒机器股份有限公司, 辽宁 大连 116024



**摘要:** 利用激光近净成形技术进行了 316L 不锈钢单道多层结构的制备。在相同的激光功率及扫描速度条件下, 通过调整送粉率及层间提升量实现了不同沉积效率的成形, 并讨论了不同沉积效率下成形结构的微观组织及力学性能特征。结果表明, 在一定的激光功率及扫描速度条件下, 随着送粉率及层间提升量的提升, 沉积效率由初始工艺参数条件下的  $12.14 \text{ mm}^3/\text{s}$  提高至  $22.62 \text{ mm}^3/\text{s}$ , 提高了 86.3%。同时成形单位有效体积消耗的激光能量由初始工艺参数条件下的  $98.84 \text{ J}/\text{mm}^3$  降低至  $53.06 \text{ J}/\text{mm}^3$ , 能量利用效率提高了 46.32%。成形结构的微观组织呈柱状枝晶形态, 随着沉积效率的提高, 枝晶长度呈明显的增大趋势。性能检测结果显示, 不同沉积效率下的样件力学性能保持了较高的一致性, 并未随沉积效率的提高而降低, 成形样件抗拉强度及屈服强度分别稳定在 510 MPa 与 290 MPa, 延伸率稳定在 40% 左右, 显微硬度也未出现明显波动, 处于 180 HV, 均达到了锻造的同等水平。该研究表明, 在一定的工艺参数范围内, 可以实现沉积效率及力学性能的协同优化, 达到低能耗高效制备高性能零件的效果。

**关键词:** 激光近净成形; 316L 不锈钢; 沉积效率; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG142.71

文献标志码: A

## Effect of deposition efficiency on microstructure and property of 316L stainless steel fabricated by laser engineered net shaping

Pei Miao<sup>1</sup>, Fangyong Niu<sup>1</sup>, Guangyi Ma<sup>1</sup>, Jianzhong Lü<sup>2</sup> and Dongjiang Wu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; <sup>2</sup> Dalian Sunlight Machinery Co., Ltd., Dalian 116024, China

**Abstract:** Laser engineered net shaping is a promising technique to fabricate high-performance components with complex geometry rapidly. Excellent properties of fabricated specimen and high deposition efficiency are both important for this additive manufacturing method, but few researches have been done on the relationship between them. In this paper, single-bead multilayer structures of 316L stainless steel are fabricated by laser engineered net shaping (LENS). Using the same laser power and scanning speed, different deposition efficiencies are achieved by adjusting powder flow rate and layer increment. Microstructures and mechanical properties of the deposited structures under different deposition efficiencies are discussed. The results show that, for certain laser power and scanning speed, the deposition efficiency increases from  $12.41 \text{ mm}^3/\text{s}$  to  $22.62 \text{ mm}^3/\text{s}$  with the increase of the powder flow rate and layer increment, which increases by 86.3% compared with the initial process. Laser energy consumed by depositing unit effective volume reduces from initial  $98.84 \text{ J}/\text{mm}^3$  to  $53.06 \text{ J}/\text{mm}^3$  and the energy efficiency in-

收稿日期: 2016-11-13; 收到修改稿日期: 2017-01-04

\*E-mail: djwudut@dlut.edu.cn

creases by 46.32%. Microstructures of the specimen consist of columnar dendrite and the dendrite length increases obviously with the deposition efficiency. Property test shows that properties of the specimen under different deposition efficiencies are consistent and do not decrease with the deposition efficiency. Tensile strength and yield strength are stable in 510 MPa and 290 MPa, respectively. The elongation rate is around 40% while the micro-hardness is about 180 HV, all of which have reached the same level of forging. The results illustrate that the deposition efficiency and mechanical property can be optimized, which achieves fabrication of high performance parts with low energy consumption and high efficiency.

**Keywords:** laser engineered net shaping; 316L stainless steel; deposition efficiency; microstructure; mechanical property

**DOI:** 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.04.005

**Citation:** *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(4): 410–417

## 1 引言

激光近净成形(Laser engineered net shaping, LENS<sup>TM</sup>)技术是由美国桑迪亚国家实验室发明的一种基于送粉式的增材制造技术,具有成形速度快、可制备零件尺寸大且性能优异的特点,可实现金属、陶瓷及高分子材料功能零件的直接制备<sup>[1-2]</sup>。经过近 20 年的发展与完善,激光近净成形技术已逐步具备实际应用水平,其系统目前已成为诸多高新技术制造企业重点配置的装备。

316L 不锈钢是超低碳奥氏体不锈钢,为 18-18 (Cr-Ni)不锈钢成分改型合金,具有卓越的耐晶间腐蚀性能及良好的综合力学性能。在航空航天、医疗器械、能源动力及海洋化工等高新技术领域具有广泛的应用。传统 316L 不锈钢零件的制备需要锻造及机械加工,生产周期长且材料利用率低,不利于产品的快速低成本开发。随着增材制造技术优势的凸显,激光近净成形技术被较早地应用于 316L 不锈钢零件的直接制备,得到国内外相关机构的广泛关注和深入研究。

目前的研究已经就激光近净成形 316L 不锈钢零件的工艺过程、微观组织特征及形成机理、力学性能、应力和精度控制等方面进行了较为全面的探讨<sup>[3-8]</sup>,可以实现高性能 316L 不锈钢复杂零件的高精度制备。激光近净成形技术各工艺参数,如激光功率、扫描速度及送粉量等具有较大的调整范围,针对金属材料成形的工艺窗口也往往较大。相应地,沉积效率这一关

系到制造周期和成本的重要指标可以在较大范围内实现,在保证成形结构性能的前提下尽可能地提高沉积效率,对于缩短制造周期,降低激光能耗具有重要的实际意义。然而目前关于沉积效率对激光近净成形 316L 不锈钢组织及性能影响的系统研究鲜有报道。

质量与效率是制造技术始终关注的核心问题,高质、高效、低能耗制造是科技人员一贯追求的目标。本文利用激光近净成形技术进行 316L 不锈钢的成形制备,在相同的激光功率及扫描速度条件下,通过调整送粉率及层间提升量进行沉积效率的优化,并进一步研究不同的沉积效率对成形样件微观组织及力学性能的影响规律,以期实现力学性能及沉积效率的协同优化,同时达到降低激光能耗的目的。

## 2 实验条件及方法

实验所用激光近净成形系统主要由激光器、送粉器和数控系统三大部分组成。激光器为德国 Laserline 公司生产的 Laserline LDF4000-100 型半导体激光器,最大功率 4000 W,输出波长范围为 900~1070 nm。为了避免 316L 不锈钢在激光近净成形过程中被氧化,载粉气体和保护气均选用氩气。选取冷轧 304 不锈钢作为实验基板,基板尺寸 200 mm×20 mm×15 mm。成形材料为 316L 不锈钢粉末,粉末颗粒大小在 45~90 μm 之间,粉末成分如表 1 所示,其化学成分符合 316L 不锈钢国标要求。激光近净成形实验前,真空烘干不锈钢粉末 4 h,以除去粉末吸附的水分。

表 1 316L 不锈钢粉末化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of 316L stainless steel powder(wt, %)

Element	C	Cr	Ni	Mo	Si	Cu	Al	Fe
Wt(%)	<0.03	17.45	11.91	2.82	1.17	0.11	0.03	bal.

制备长 140 mm、高 30 mm 的单道多层样件,所采用的初始工艺参数为:激光功率 1200 W,扫描速度 5 mm/s,保护气体流量 4.5 L/min。为了保证成形样件的连续稳定沉积,改变送粉率的同时需要调整层间提升量,在送粉器稳定工作范围之内,设计送粉率与层间提升量参数如表 2 所示。为研究成形零件的力学性能,在如图 1 所示的薄壁板上切取平行于基板方向的片状拉伸试样,金相观察面为垂直于基板的纵断面。采用“Z”字形往复循环扫描方式在基板上进行成形实验,如图 2 所示。

表 2 激光近净成形工艺参数.

	Serial number				
	1	2	3	4	5
Powder feed rate/(g/min)	7.2	9.6	12	14.4	16.8
Interlayer lifting capacity/mm	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4

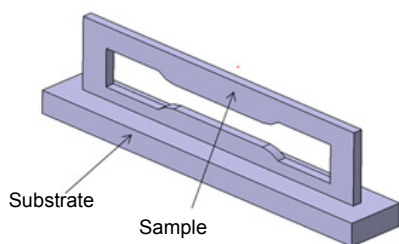


图 1 316L 不锈钢样件及取样部位示意图.

Fig. 1 Schematic of 316L stainless steel specimen and sampling position.

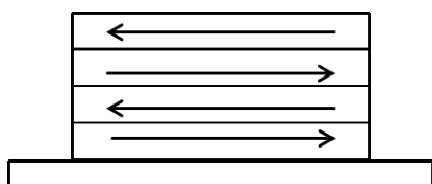


图 2 316L 不锈钢沉积方式示意图.

Fig. 2 Schematic of 316L stainless steel deposition mode.

利用超景深显微镜(VHX-600E)测量样件有效宽度。抛光后的金相试样采用 10%的草酸溶液进行电解腐蚀,利用光学显微镜(OLMPLUS-MX40)观察微观组织。在拉伸样机(WDW-50E)上对样件进行室温拉伸性能测试,加载速率 5 mm/min,拉伸样机最大载荷为 50 kN。用扫描电镜(QUANTA)对拉伸断口进行观察,同时采用扫描电镜配备的能谱分析仪(EDS)分析夹杂物成分。在维氏硬度计(MVC-1000B)上测量硬度,加载 100 g,载荷保持时间为 15 s。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 送粉率及层间提升量对成形结构形貌特征及沉积效率的影响

图 3(a)是在送粉率为 16.8 g/min,层间提升量 1.4 mm 条件下的不锈钢薄壁件,薄壁件的尺寸长约 140 mm,高约 30 mm,宽约 3.9 mm。图中可以看出,不锈钢薄壁件层层堆积而成,层间条纹清晰,形状规整,表面没有粘粉,为成形后的原始状态。薄壁件成形尺寸与设计尺寸几乎一致,说明成形效果与预期实验设计比较吻合。图 3(b)为沉积层纵截面示意图,表面呈现周期性振荡起伏,这是因为熔池表面张力使得沉积层纵截面呈现半球形,冷却下来形成凸起<sup>[9]</sup>。实际成形效果如图 4(a)~4(e)。单道沉积层是激光快速成形薄壁件中的基本组成单位,其成形尺寸不仅决定了沉积效率,而且也决定了加工精度<sup>[10]</sup>。在其它工艺参数不变的情况下,单道沉积层的尺寸形貌取决于送粉率与层间提升量。送粉率决定了单位时间内喷射到熔池中粉末的数量,层间提升量决定了激光头距离前一层沉积层的高度。为了减小误差,选取薄壁件多处区域测量宽度并且同一种工艺参数下反复测量三个薄壁样件,以平均值作为最终结果。有效宽度定义为表征实际能够应用的样件尺寸,以  $W$  表示。

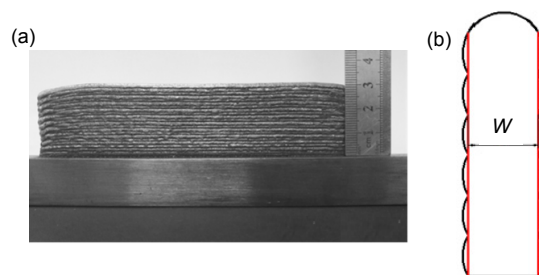


图 3 (a) 激光近净成形薄壁件. (b) 纵截面成形示意图.

Fig. 3 (a) Thin wall part of laser engineered net shape. (b) Schematic diagram of longitudinal section.

由图 5 可以看出有效宽度随着送粉率的升高而呈下降趋势,由 4.047 mm 降到 3.317 mm。分析可知,在激光近净成形 316L 不锈钢过程中,激光功率、扫描速度不变的情况下,激光输出的能量分为两部分,一部分用来熔化前一沉积层形成重熔层,另一部分用来熔化粉末。当送粉率提高后,用于熔化粉末的能量增多,熔化前一沉积层的能量相对减少,由于粉末的初始温度低于前一沉积层的初始温度,因此熔化的总质量减小,体积降低,有效宽度随之降低<sup>[11]</sup>。通过适

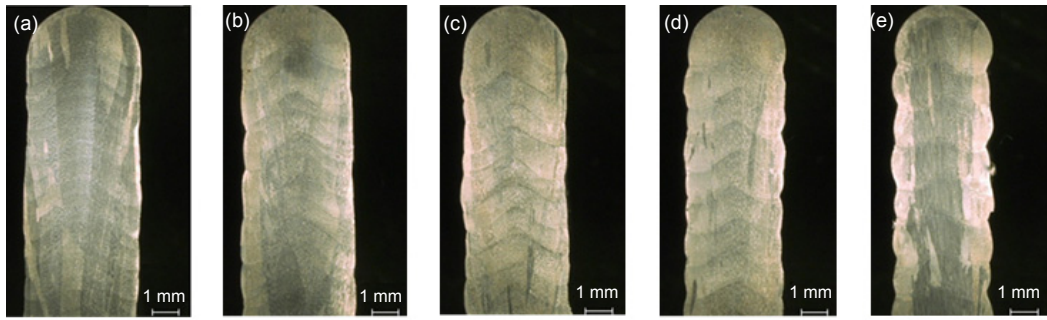


图4 316L 不锈钢薄壁件纵截面局部低倍放大图. (a)  $Q=7.2$  g/min. (b)  $Q=9.6$  g/min. (c)  $Q=12$  g/min. (d)  $Q=14.4$  g/min. (e)  $Q=16.8$  g/min.

Fig. 4 Local low magnification of the longitudinal section of the 316L stainless steel thin-walled parts. (a)  $Q=7.2$  g/min. (b)  $Q=9.6$  g/min. (c)  $Q=12$  g/min. (d)  $Q=14.4$  g/min. (e)  $Q=16.8$  g/min.

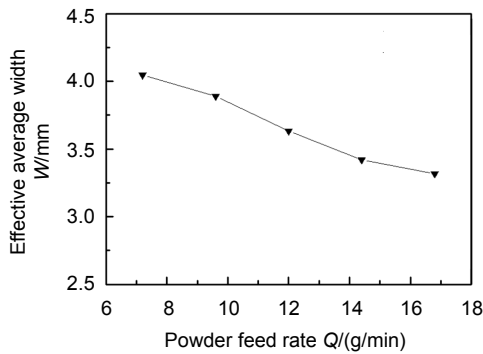


图5 有效宽度随送粉率变化的趋势.

Fig. 5 Variation trend of effective width with powder feeding rate.

当增加激光功率可以实现相同的沉积宽度。

沉积效率定义为成形样件在单位时间内沉积的有效体积，即  $V = WLH/T$ ， $V$  为沉积效率， $W$  为有效宽度， $L$  为长度， $H$  为沉积高度， $T$  为沉积时间即激光能量输入时间。消耗能量  $\eta$  定义为单位有效体积消耗的能量，即  $\eta = PT/(WLH)$ ，式中  $P$  为激光功率。计算得到的沉积效率、消耗能量如表 3 所示，沉积效率、有效能量值随着送粉率的变化趋势分别如图 6(a) 和 6(b) 所示。

图 6(a) 可以看出沉积效率随着送粉率提高而近似线性提高，沉积效率由  $12.14 \text{ mm}^3/\text{s}$  提高到  $22.62$

表3 不同送粉量对应的沉积效率、消耗能量.

Table 3 Deposition efficiency and energy consumption corresponding to different powder feeding rates.

Powder feed rate/(g/min)	7.2	9.6	12	14.4	16.8
Energy input time/s	1400	1064	840	700	616
Deposition efficiency $V/(\text{mm}^3/\text{s})$	12.14	15.36	18.17	20.52	22.62
Energy consumption $\eta/(\text{J}/\text{mm}^3)$	98.84	78.15	66.06	58.48	53.06

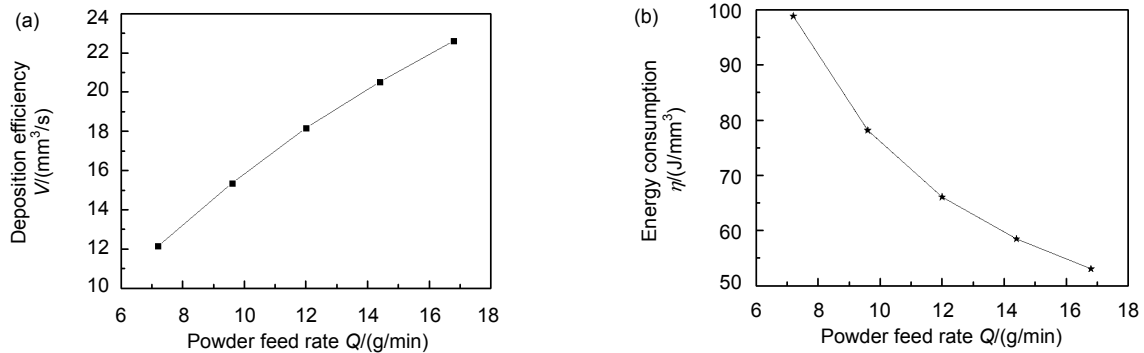


图6 (a) 沉积效率随送粉率变化的趋势. (b) 消耗能量随送粉率变化的趋势.

Fig. 6 (a) Trend of the deposition efficiency with powder feeding rate. (b) Trend of the energy consumption with the powder flow rate.



$\text{mm}^3/\text{s}$ ,提高了 86.3%,即有效沉积体积一样的情况下,提高送粉率可以节约将近一半的时间。图 6(b)显示了单位有效体积消耗的能量逐渐降低,从  $98.84 \text{ J}/\text{mm}^3$  降到  $53.06 \text{ J}/\text{mm}^3$ ,能量利用率提高了 46.32%。成形相同尺寸的样件,送粉量与层间提升量的线性提高使得加工时间缩短,沉积效率提高,激光输入的能量降低,成本随之降低。因此研究激光成形样件的沉积效率、消耗能量对实际生产具有很大的指导意义。

### 3.2 不同沉积效率下成形样件微观组织特征

图 7 为不同沉积效率下样件纵向中部的微观组织特征。不同沉积效率下的成形样件两侧均呈现细长的定向柱状枝晶,而中部微观组织有所不同。图 7(a)为送粉率  $7.2 \text{ g}/\text{min}$  时的微观组织,该组织为柱状树枝晶,但是枝晶的长度较短,二次枝晶非常发达,柱状枝晶的特征不够明显。图 7(b)为送粉率  $9.6 \text{ g}/\text{min}$  的微观组织,枝晶略长,柱状枝晶的特征开始明显。图 7(c)为送粉率  $12 \text{ g}/\text{min}$  时的微观组织,枝晶长度  $110 \mu\text{m}$  左右。图 7(d)为送粉量  $14.4 \text{ g}/\text{min}$  的微观组织,枝晶长度  $200 \mu\text{m}$  左右。图 7(e)为送粉率  $16.8 \text{ g}/\text{min}$  时的微观组织,枝晶长度更长,垂直于基板生长的优势突出,呈现外延生长连续性。图 7(a)~7(e)可以看出随着沉积效率的提高,成形结构纵向中部的柱状枝晶长度呈明

显的增大趋势,枝晶一次间距逐渐减小,二次分枝也逐渐减小。

分析可知,熔池凝固起始于熔池底部,成形过程中由于粉末同步送入熔池,熔池产生倾斜,大部分位置的温度梯度沿着垂直扫描方向的分量大于其他方向的分量,而枝晶一般是与温度梯度方向最为接近的方向择优生长,316L 不锈钢属于面心立方晶体,枝晶的择优生长方向正是  $\langle 100 \rangle$ 。热流方向不改变晶轴的生长方向,只是选择三个  $\langle 100 \rangle$  方向中与热流方向夹角最小的一个方向生长<sup>[12-14]</sup>。沉积层通过基板散热,热流方向与界面垂直,界面前沿存在正的温度梯度,因此成形过程中枝晶生长方向平行于沉积方向。相同的激光功率及扫描速度条件下,对于相同几何尺寸结构的成形,沉积效率越高,单道沉积层的重熔次数也就越少,相应的热积累效应减弱,凝固速率  $V$  加快,相对容易形成更高的温度梯度  $G$ ,由于高的温度梯度加快熔池中的金属液体流动,熔池中心温度下降更为快速,有利于枝晶外延生长,因此枝晶长度逐渐增大<sup>[15]</sup>。枝晶间距与固/液界面前沿的温度梯度  $G$ 、凝固速率  $V$  因素相关:  $\lambda \propto G^{-a} V^{-b}$ , 式中  $a$ 、 $b$  为正的常数。当温度梯度、凝固速度增大时,枝晶的一次间距逐渐减小,二次分枝也逐渐减小<sup>[16-17]</sup>。

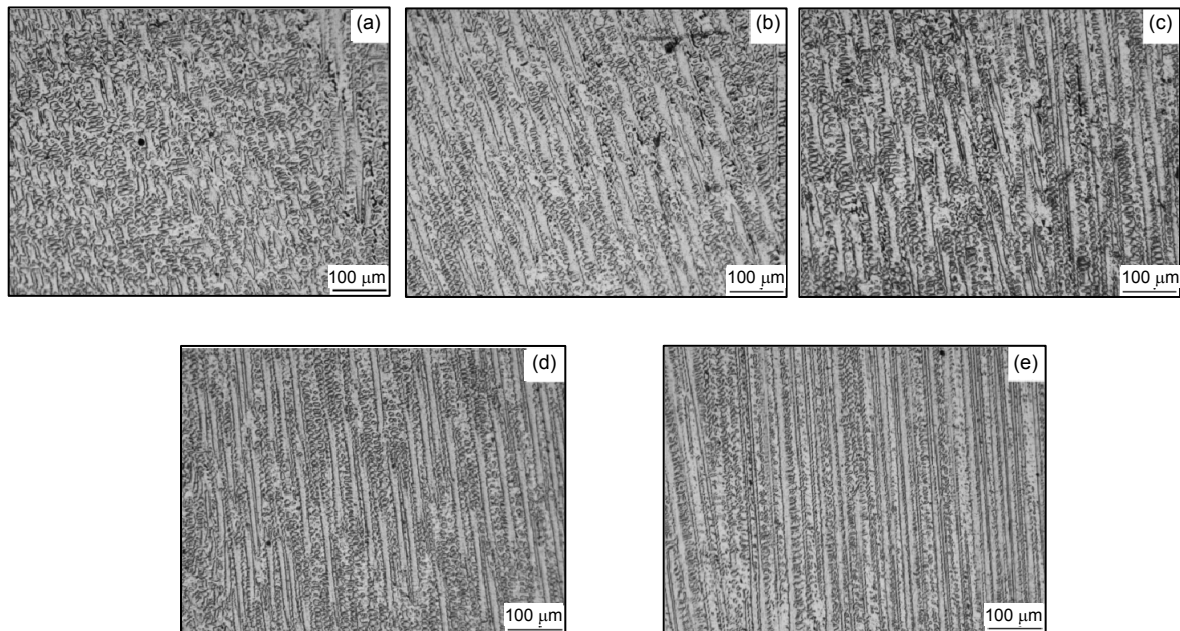


图 7 不同沉积效率下纵向中部微观组织图。(a)  $Q=7.2 \text{ g}/\text{min}$ 。(b)  $Q=9.6 \text{ g}/\text{min}$ 。(c)  $Q=12 \text{ g}/\text{min}$ 。(d)  $Q=14.4 \text{ g}/\text{min}$ 。(e)  $Q=16.8 \text{ g}/\text{min}$ 。

Fig. 7 Microstructures of the longitudinal middle section under different deposition efficiencies. (a)  $Q=7.2 \text{ g}/\text{min}$ . (b)  $Q=9.6 \text{ g}/\text{min}$ . (c)  $Q=12 \text{ g}/\text{min}$ . (d)  $Q=14.4 \text{ g}/\text{min}$ . (e)  $Q=16.8 \text{ g}/\text{min}$ .

### 3.3 不同沉积效率对成形结构力学性能的影响

#### 3.3.1 拉伸实验结果分析

根据国标《GBT 228.1-2010 金属材料拉伸试验第1部分：室温试验方法》进行成形样件的拉伸试验，设计拉伸试样，试样结构与尺寸如图8所示。每种工艺参数对应3个成形样件，平均抗拉强度、屈服强度与塑性的变化规律见表4。由表4可知，不同沉积效率情况下的样件力学性能保持了较高的一致性，激光近净成形316L不锈钢样件抗拉强度均在500 MPa以上，在505~509 MPa范围内浮动；平均屈服强度在284~294 MPa范围内变化，稳定在290 MPa；沉积效率较低时，平均延伸率为30.4%，沉积效率较高时，延伸率稳定在40%左右等同于锻造水平。提高沉积效率，样件力学性能有所改善并维持稳定。

图9为不同沉积效率条件下激光近净成形样件拉伸断口显微形貌。断口显示均为等轴韧窝形貌，其中韧窝是由于发生塑性变形时夹杂物与基体界面脱离或其自身在受力过程中发生断裂而形成显微空洞，空洞的形成使得位错受到的排斥力大大降低，大量的位错在外力的作用下向新生成的显微空洞运动，这些空洞生核、长大、集聚形成显微裂纹，在连续变形过程中裂纹扩展连接导致断裂，在断口上留下韧窝形貌。图

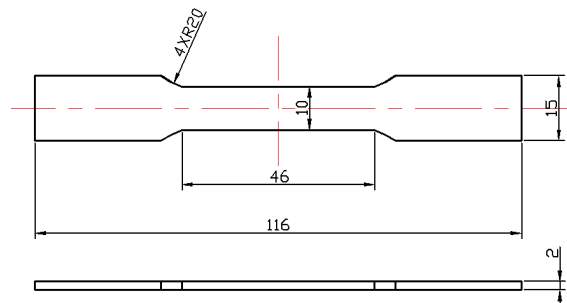


图8 拉伸试样的形状和尺寸。

Fig. 8 Shape and dimensions of tensile samples.

表4 激光近净成形316L不锈钢平均抗拉强度、屈服强度、延展性以及同铸造、锻造性能的对比。  
Table 4 Average tensile strength, yield strength and ductility of laser engineered net shaping as well as compared with casting and forging properties.

Powder feed rate/(g/min)	Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elongation rate/(%)
7.2	509	284	30.4
9.6	508	292	39.9
12.0	505	292	40.2
14.4	506	294	39.7
16.8	507	289	39.1
Casting	440	180	30
Forging	480	177	40

10为316L不锈钢激光近净成形后韧窝中夹杂物的扫描照片及能谱图，夹杂物如图10(a)箭头所示，所观察到的夹杂物均呈现球状，尺寸比较小，低于 $3\ \mu\text{m}$ ，这是由于表面张力的作用而呈现球状，说明夹杂物在固液界面往前推进的凝固过程中已经形成。图10(b)对夹杂物进行能谱分析，发现该夹杂物中金属元素含有Si、Cr、Fe、Ni元素，说明该夹杂物含有某种硅酸盐以及氧化物<sup>[18]</sup>。

#### 3.3.2 显微硬度分析

图11为316L不锈钢沉积件沿着沉积方向的维氏硬度随送粉率的变化趋势。从图中可以看出硬度变化趋势总体一致，距离底部5 mm以内，硬度逐渐下降，最高可达205 MPa。之后，硬度变化趋于稳定，变化范围稳定在173~184 MPa。这是因为在最初的几层，沿着基板散热明显，硬度较高，当继续沉积的时候，循环加热导致沉积件热量累积，冷却速度减慢，使得散热效果不如前几层，导致硬度降低趋于稳定<sup>[19]</sup>。在不同沉积效率条件下，硬度并没有表现出较大的差异。这是由于扫描速度较慢，每一层的加工时间相对较长，使得累积的热量相对减弱，因此在不同沉积效率的条件下，硬度趋于稳定差别不大。

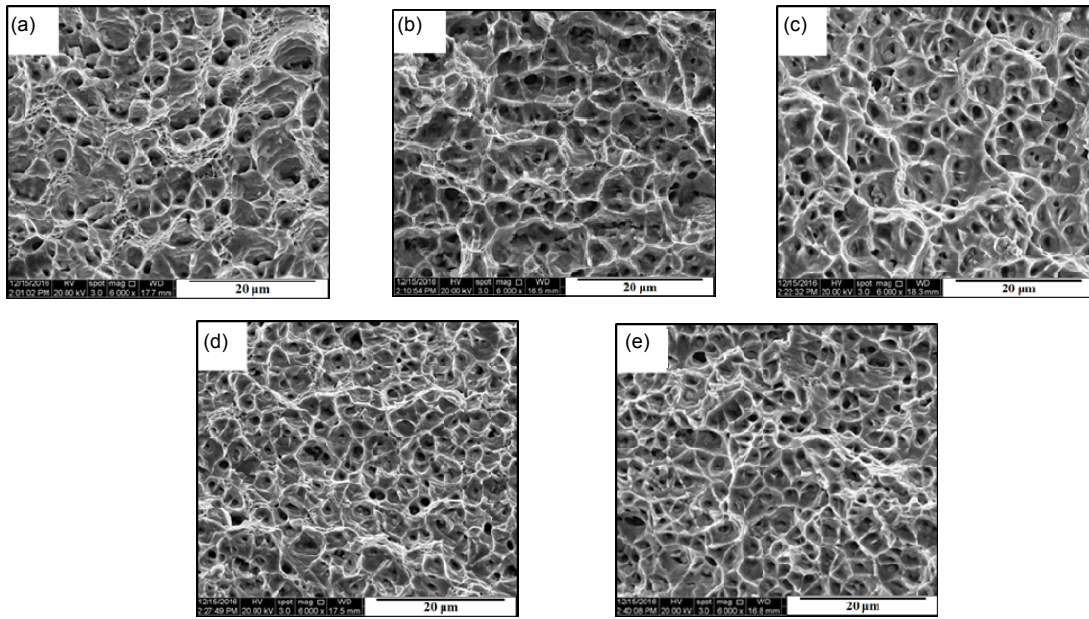


图9 不同沉积效率下激光近净成形316L拉伸断口形貌. (a)  $Q=7.2$  g/min. (b)  $Q=9.6$  g/min. (c)  $Q=12$  g/min. (d)  $Q=14.4$  g/min. (e)  $Q=16.8$  g/min.  
 Fig. 9 Tensile fracture morphologies under different deposition efficiencies. (a)  $Q=7.2$  g/min. (b)  $Q=9.6$  g/min. (c)  $Q=12$  g/min. (d)  $Q=14.4$  g/min. (e)  $Q=16.8$  g/min.

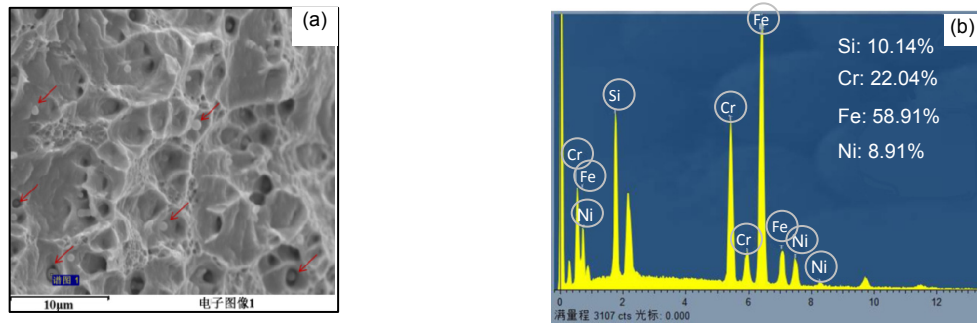


图10 (a) 夹杂物的扫描照片. (b) 能谱图.  
 Fig. 10 (a) Scanning image of inclusion. (b) Energy spectrum.

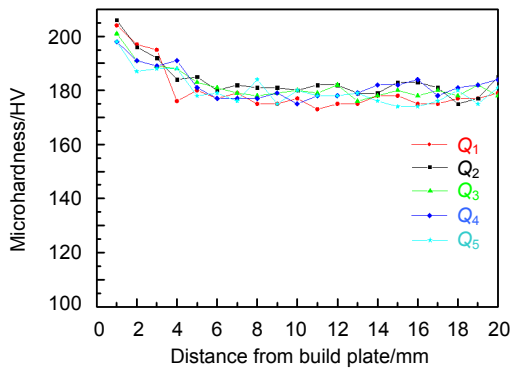


图11 不同沉积效率下316L不锈钢沉积件硬度变化的曲线.  
 Fig. 11 Curves of hardness variation of 316L stainless steel under different deposition efficiencies.

## 4 结论

质量与效率是制造技术始终关注的核心问题, 高质、高效、低能耗制造是科技人员一贯追求的目标。本文针对相同的激光功率及扫描速度, 通过调整送粉率及层间提升量实现了不同沉积效率的成形, 并分析了不同沉积效率下成形结构的微观组织及力学性能特征, 得到如下结论:

1) 在一定的激光功率及扫描速度条件下, 随着送粉率及层间提升量的提升, 样件表面有效宽度呈现降低的趋势。沉积效率由初始工艺参数条件下的  $12.14$   $\text{mm}^3/\text{s}$  提高至  $22.62$   $\text{mm}^3/\text{s}$ , 提高了  $86.3\%$ 。同时成形



单位有效体积消耗的激光能量由初始工艺参数条件下的  $98.84 \text{ J/mm}^3$  降低至  $53.06 \text{ J/mm}^3$ , 能量利用效率提高了 46.32%。

2) 不同沉积效率下的成形样件两侧均呈现细长的定向柱状枝晶, 而纵向中部微观组织有所不同。对于沉积样件中部微观组织, 沉积效率较低时, 柱状枝晶不是很明显。随着沉积效率的提高, 枝晶长度呈明显的增大趋势, 枝晶一次间距逐渐减小。

3) 微观组织对样件的性能并没有产生明显的影响。样件力学性能保持了较高的一致性, 并未随沉积效率的提高而降低, 抗拉强度及屈服强度分别稳定在 510 MPa 与 290 MPa, 延伸率稳定在 40% 左右, 显微硬度也未出现明显波动, 处于 180 HV, 均达到了锻造的同等水平。

## 基金项目

国家自然科学基金(51402037); 国家重点基础研究发展计划(2015CB057305)。

## 参考文献

- Wu Dongjiang, Lu Weifeng, Chen Yunxiao, et al. Experimental study on ceramic of  $\text{ZrO}_2\text{-13\%Al}_2\text{O}_3$  by laser engineered net shaping[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(7): 703004.  
吴东江, 卢卫锋, 陈云啸, 等.  $\text{ZrO}_2\text{-13\%Al}_2\text{O}_3$  陶瓷薄壁件激光近净成形实验[J]. *中国激光*, 2012, **39**(7): 703004.
- Wu Dongjiang, Sun Bei, Niu Fangyong, et al. Microstructure and crack in color  $\text{Al}_2\text{O}_3$  samples by laser engineered net shaping[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2013, **41**(12): 1621-1626.  
吴东江, 孙贝, 牛方勇, 等. 激光近净成形不同颜色  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷件微观组织及裂纹分析[J]. *硅酸盐学报*, 2013, **41**(12): 1621-1626.
- Xi Mingzhe, Zhang Yongzhong, Zhang Pingzhi, et al. Influence of scanning velocity on microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel fabricated by laser rapid prototyping[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2002, **26**(2): 93-97.  
席明哲, 张永忠, 章萍芝, 等. 扫描速度对激光快速成型 316L 不锈钢组织性能的影响[J]. *稀有金属*, 2002, **26**(2): 93-97.
- Zhang Yongzhong, Xi Mingzhe, Shi Likai, et al. Microstructure and properties of 316L stainless steel fabricated by laser direct forming[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2002, **31**(2): 103-105.  
张永忠, 席明哲, 石力开, 等. 激光快速成型 316L 不锈钢的组织及性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2002, **31**(2): 103-105.
- Yang Jian, Huang Weidong, Yang Hai'ou. Study on the planar residual stress distribution of laser rapid forming 316L sheet[J]. *Applied Laser*, 2005, **25**(3): 151-154.  
杨健, 黄卫东, 杨海欧. 激光快速成型 316L 不锈钢残余应力分布[J]. *应用激光*, 2005, **25**(3): 151-154.
- Yu Jun, Chen Jing, Tan Hua, 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.
- De Lima M S F, Sankaré S. Microstructure and mechanical behavior of laser additive manufactured AISI 316 stainless steel stringers[J]. *Materials & Design*, 2014, **55**: 526-532.
- Zietala M, Tomasz T, Polański M, et al. The microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of 316L stainless steel fabricated using laser engineered net shaping[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2016, **677**: 1-10.
- Zhang Kai, Wang Shijie, Liu Weijun, et al. Characterization of stainless steel parts by laser metal deposition shaping[J]. *Materials & Design*, 2014, **55**: 104-119.
- Zhang Kai, Liu Weijun, Shang Xiaofeng. Research on the processing experiments of laser metal deposition shaping[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**(3): 549-557.
- Niu Fangyong, Wu Dongjiang, Zhou Siyu, et al. Power prediction for laser engineered net shaping of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic parts[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014, **34**(15): 3811-3817.
- Gäumann M, Henry S, Cléton F, et al. Epitaxial laser metal forming: analysis of microstructure formation[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1999, **271**(1-2): 232-241.
- Rappaz M, David S A, Vitek J M, et al. Development of microstructures in Fe-15Ni-15Cr single crystal electron beam welds[J]. *Metallurgical Transactions A*, 1989, **20**(6): 1125-1138.
- Song Jianli, Deng Qilin, Hu Dejin, et al. Microstructure characterization and properties of laser cladding forming 316L stainless steel[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **32**(10): 1441-1444.  
宋建丽, 邓琦林, 胡德金, 等. 激光熔覆成形 316L 不锈钢组织的特征与性能[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10): 1441-1444.
- Xi Mingzhe, Zhang Yongzhong, Zhang Pingzhi, et al. Influence of processing parameter on the microstructure and properties of the 316L SS fabricated by laser direct deposition[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, **29**(11): 1045-1048.  
席明哲, 张永忠, 章萍芝, 等. 工艺参数对激光快速成型 316L 不锈钢组织性能的影响[J]. *中国激光*, 2002, **29**(11): 1045-1048.
- Kurz W, Fisher D J. Fundamentals of solidification[M]. Uetikon-Zuerich, Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 1998.
- Feng Liping, Huang Weidong, Li Yanmin, et al. Influences of crystal orientation of substrate on microstructure of multi-layer laser cladding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **28**(10): 949-952.  
冯莉萍, 黄卫东, 李延民, 等. 基材晶体取向对激光多层涂覆微观组织的影响[J]. *中国激光*, 2010, **28**(10): 949-952.
- Casati R, Lemke J, Vedani M. Microstructure and fracture behavior of 316L austenitic stainless steel produced by selective laser melting[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2016, **32**(8): 738-744.
- Yadollahi A, Shamsaei N, Thompson S M, et al. Effects of process time interval and heat treatment on the mechanical and microstructural properties of direct laser deposited 316L stainless steel[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2015, **644**: 171-183.