

# 1Cr13 不锈钢粉末的激光直接成形性能研究

张永杰 虞 钢 何秀丽 郑彩云 宁伟健

(中国科学院力学研究所先进制造工艺力学重点实验室, 北京 100190)

**摘要** 针对 1Cr13 马氏体不锈钢粉末的激光直接成形性能进行了实验研究,观测了成形薄壁件中显微硬度和典型微观组织结构沿高度方向上的分布,通过实时记录基板中两个特定位置的完整热历程分析解释了 1Cr13 不锈钢薄壁件中微观组织和显微硬度分布特点的形成原因。研究表明,由于多层堆积过程,激光直接成形 1Cr13 不锈钢薄壁件中的微观组织及显微硬度具有独特的分布特点,薄壁件与基板连接区域由于珠光体的存在使得硬度达到 350 HV 以上,其它区域微观组织结构趋于均匀一致,硬度稳定在 200 HV。

**关键词** 激光技术;激光直接成形;热历程;微观组织;显微硬度;1Cr13 不锈钢

**中图分类号** TN249; TH16 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.s100120

## Research on Properties of 1Cr13 Stainless Steel Parts Deposited by Laser Aided Direct Metal Deposition

Zhang Yongjie Yu Gang He Xiuli Zheng Caiyun Ning Weijian

(Key Laboratory of Mechanics in Advanced Manufacturing, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract** Experiments of laser aided direct metal deposition of 1Cr13 martensitic stainless steel thin walls are carried out. Thermal histories of two specified points in the substrate are recorded during the whole deposition process. Microstructure and microhardness in the vertical direction of the thin walls are observed and tested respectively. The results show that the microstructure and microhardness distribution in the martensite stainless steel parts made by laser aided direct metal deposition usually exhibit specific features because of the multilayer deposition process. Microhardness near the joint region is higher than 350 HV due to the exist of pearlite. However, the microhardness in the upper region is about 200 HV.

**Key words** laser technique; laser aided direct metal deposition; thermal history; microstructure; microhardness; 1Cr13 stainless steel

**OCIS codes** 140.3390; 350.2660; 350.3390; 350.3850

## 1 引 言

激光直接成形技术具有成形材料范围广,自动化程度高,可自由成形,可制备功能梯度材料等特点<sup>[1~4]</sup>。由于涉及激光与材料相互作用、材料多次熔凝等复杂过程,成形件中的微观组织结构比较复杂,从而影响着最终成形件所表现出的力学性能。

1Cr13 不锈钢(AISI410 不锈钢)是一种应用广泛的马氏体型不锈钢,具有较高的抗腐蚀性和强度,通常用来制作无缝钢管、叶轮叶片以及医疗器械

等<sup>[5]</sup>。关于 1Cr13 不锈钢的激光直接成形研究,在数值研究方面,主要是针对激光成近净形 410 不锈钢薄壁件过程温度场的数值模拟<sup>[6~9]</sup>,文献<sup>[9]</sup>假设最终 410 不锈钢薄壁件中的微观组织只包含回火马氏体、未回火马氏体、残余奥氏体,通过求解的温度场求得了硬度场分布,结果显示在基板与板件结合区由于马氏体转化不完全而呈现出低硬度,随后硬度逐渐升高并最终保持稳定;在实验研究方面,集中在熔池温度场的观测和残余应力的测量<sup>[6,10,11]</sup>。对

**收稿日期:** 2011-02-20; **收到修改稿日期:** 2011-03-05

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(10832011)资助课题。

**作者简介:** 张永杰(1983—),男,博士研究生,主要从事激光直接成形方面的研究。E-mail: zyojie@126.com

**导师简介:** 虞 钢(1958—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光与材料相互作用和激光先进制造工艺力学等方面的研究。E-mail: gyu@imech.ac.cn(通信联系人)

1Cr13 不锈钢的激光直接成形薄壁件过程中的微观组织与显微硬度的分布特征、热历程以及它们之间的相互关系缺乏相应的实验研究。

针对 1Cr13 不锈钢的激光直接成形薄壁件过程,对薄壁件中沿高度方向上的典型微观组织结构和显微硬度进行了观察测试。实时记录基板中两个特定位置的完整热历程,分析基板与已堆积材料在整个成形过程中的热量变化过程,并对微观组织与显微硬度的分布规律进行了分析讨论。

## 2 实验材料及方法

### 2.1 实验装置

实验使用连续 Nd:YAG 激光器、DPSF-2 型送粉器和自行设计的同轴送粉头。使用 Polyvar-MET 金相显微镜和 LEICA-S440 扫描电子显微镜

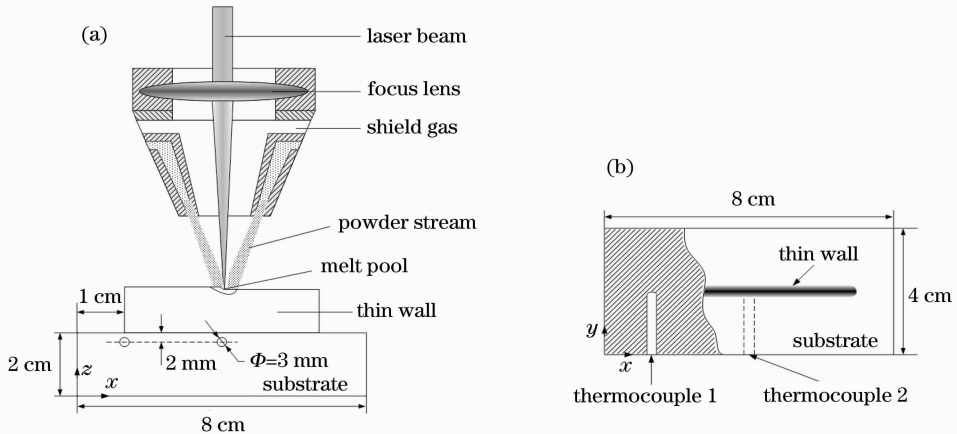


图 1 (a) 实验装置示意图, (b) 基板俯视图

Fig. 1 (a) Schematic diagram of the experimental setup, (b) vertical view of the substrate

粉末材料为水雾化 1Cr13 不锈钢粉末,粒度为 30~90  $\mu\text{m}$ 。其化学成分如表 1 所示。在实验进行之前,对粉末进行烘干处理,以去除粉末中所吸附的水分。

表 1 1Cr13 不锈钢粉末的主要化学成分

Table 1 Chemical composition of 1Cr13 stainless steel powder

Chemical composition	Mass fraction /%
C	0.10
Cr	12.0
Si	1.52
Mn	0.15
Fe	Bal.

### 2.3 激光直接成形 1Cr13 薄壁件实验

在 316 不锈钢基板上成形两个 1Cr13 不锈钢薄壁件,薄壁件的设计长度和厚度分别为 60 mm 和 3 mm。两个薄壁件的高度分别为 20 mm 和 40 mm。实验所采用的主要工艺参数如表 2 所示。成形时,不锈钢粉末

(SEM)对最终试样进行微观组织观察和能谱分析(EDS)。使用 HXD-1000B 显微硬度计测试硬度,测试载荷为 100 g,加载时间为 15 s。

### 2.2 实验材料

为了能清楚地分辨成形薄壁件与基板连接部位的微观组织分布情况,基板材料采用 316 不锈钢,基板的几何尺寸为 80 mm×40 mm×20 mm。实验前用丙酮将基板清洗干净。为了测量基板内接近薄壁件位置的温度演化过程,在基板侧边打孔,分别将两个铠装热电偶插入孔内,热电偶触头置于薄壁件成形轨迹的中点和端点,从而可以在成形过程中实时记录温度数据。对于往复扫描式加工轨迹,这两个位置的热历程具有典型性和代表性。实验示意图及热电偶的布置如图 1 所示。

由送粉器送出,在载粉气体的输送下经同轴送粉头送到熔池中,载粉气体和保护气均采用氩气。每堆积一层,激光头整体抬高 0.1 mm。往复扫描,堆积达到设计高度时,停止激光和送粉,使薄壁件自然冷却到室温。成形后的 1Cr13 薄壁件试样经过线切割、打磨、抛光和腐蚀后制成金相试样,对试样进行微观组织观察和显微硬度测试。

表 2 实验所用的工艺参数

Table 2 Process parameters used in the experiments

Parameter	Value
Laser power /W	500
Laser travel speed /(mm/s)	2.5
Defocus distance /mm	9
Beam radius /mm	1.5
Powder feed rate /(g/min)	0.72
Z-increment between layers /mm	0.1
Shielding gas flow rate /(L/min)	10

### 3 结果与讨论

#### 3.1 基板热历程

图 2 为基板中两个热电偶测得的温度随时间变化(前 2000 s)曲线。可以看出,热历程是由一个接一个的热循环组成,由于测量位置的不同,热电偶 1 测得的热历程周期是热电偶 2 测得的热历程周期的两倍。虽然它们在同一时间段内热循环的最高温度、最低温度和周期都不同,但是它们却有着相同的变化规律,即在开始阶段,基板的整体温度随着激光作用是逐渐增加的,增加速度随着成形高度的增加而逐渐减缓,最终温度只在某一稳定温度范围内波动,并且热历程的最高温度和最低温度逐渐接近并趋于平衡。这个过程反映了激光直接成形过程中基板与已堆积材料的热量变化过程。激光直接成形开始时,基板处于室温,激光照射基板表面产生熔池,粉末被送入熔池。基板和已堆积材料吸收热量,整体温度逐渐增高。当成形薄壁件达到一定高度时,基板和已堆积的材料通过表面辐射、对流等方式损失的热量与其从激光中得到的热量接近平衡,反映在基板中两个特定点的热历程中就是最高温度和最低温度都趋于稳定。

#### 3.2 薄壁件的力学性能和微观组织

为了观察薄壁件中不同层材料的微观组织及显

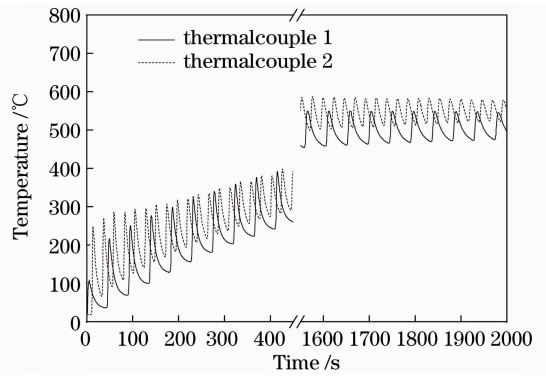


图 2 基板中两个热电偶测得的热历程

Fig. 2 Thermal histories of the two points in the substrate

微硬度,将成形后的薄壁件沿垂直方向如图 3(a)所示切开,并对截面 A-A 沿  $z$  轴高度方向上的显微硬度进行测量,结果如图 3(b)所示,可以看出,两个薄壁件中的显微硬度具有相似的演化规律。316 不锈钢基板在成形前后硬度变化不大,硬度的最大值出现在基板与薄壁件连接的区域,最高达到 350 HV 以上,这一区域的微观组织如图 4 所示,主要是由铁素体基体和镶嵌在其中的渗碳体组成的珠光体。这主要是因为初始阶段,基板温度处于室温,410 不锈钢材料堆积在基板表面时发生快速熔凝过程,经过多次热循环,最终自然冷却至室温形成的。

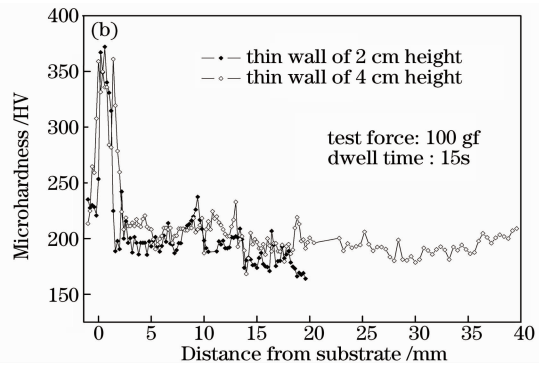
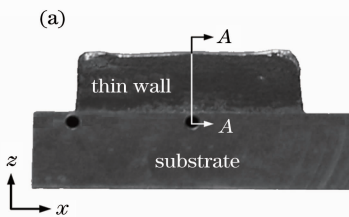


图 3 (a)薄壁件剖面示意图,(b)剖面中沿高度方向上显微硬度分布曲线

Fig. 3 (a) Photograph of the sample, (b) microhardness along the centerline of the cross-section A-A

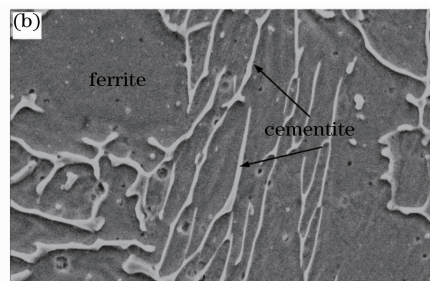
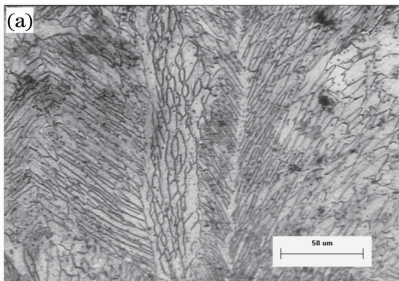


图 4 基板与薄壁件连接区域微观组织。(a)镜像显微镜图,(b)扫描电镜图

Fig. 4 Microstructure in the joint region of the substrate and the thin wall. (a) optical mirror micrograph, (b) SEM micrograph

在薄壁件中  $z > 2$  mm 以后材料的硬度趋于稳定,在 200 HV,对薄壁中此区域进行 X 射线衍射物相分析(XRD),如图 5 所示,可以看出,微观组织主要为 Fe-Cr 合金,此区域的微观组织如图 6 所示。说明材料每个热循环中冷却速度相对较高,当最终加工完成后自然冷却到室温,此完全退火过程使得材料通过完全重结晶,组织细化、均匀化,最终形成过饱和固溶体。还可以看到组织中均匀地分布着一些颗粒物,通过对颗粒物的能谱(EDS)分析,其化学成分为 Fe:Cr:Si:O,各组分的质量分数为 18.3%:13.79%:10.83%:57.36%,如图 7 所示,结合 XRD 分析结果,可以判断颗粒物为  $\text{SiO}_2$ 。

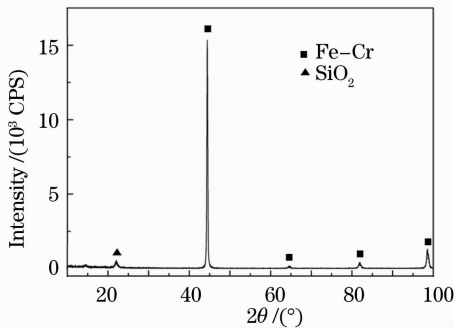


图 5 薄壁的 X 射线衍射物相分析  
Fig. 5 XRD results of the thin wall

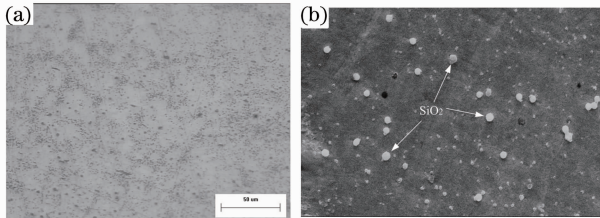


图 6 薄壁中低硬度区微观组织。(a) 镜像显微镜图, (b) 扫描电镜图

Fig. 6 Microstructure of the region with lower microhardness. (a) optical mirror, (b) SEM micrograph

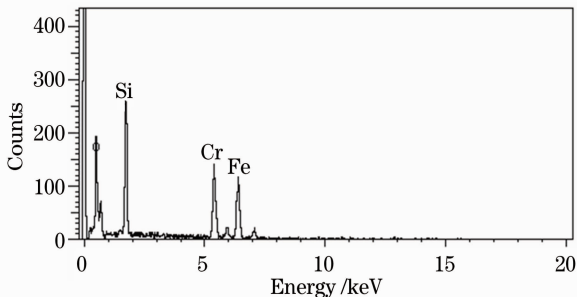


图 7 颗粒物的能谱曲线

Fig. 7 EDS spectrum of the particles

在薄壁件的顶部最后几层,材料的微观组织如图 8 所示,可以看出是由沿不同方向生长的柱状晶组织组成,晶粒大小在  $10 \mu\text{m}$  左右。这主要是因为堆积最后一层过程中,熔池中液体金属材料开始凝固时,枝晶沿着热流方向生长,在熔池中心位置形成沿激光扫描方向生长的柱状晶。

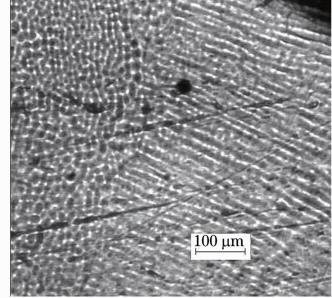


图 8 薄壁件顶部材料的微观组织

Fig. 8 Optical micrograph of the top layers in the thin wall

1Cr13 不锈钢发生熔化后,在快速冷却凝固过程中会发生马氏体转化,而在多层激光直接成形过程中,材料发生多次熔化凝固过程,并且长时间经受大量热循环作用,材料内部微观组织受此影响会发生明显变化,在与基板连接区域,最终的微观组织为珠光体,而在薄壁件中高度大于 2 mm 后的区域,最终微观组织为均匀的 (Fe, Cr) 过饱和固溶体。可以看出,材料经历的热历程决定了材料的微观组织演化,而微观组织很大程度上影响着最终材料表现出的力学性能。在多层激光直接成形过程中,基板和已堆积的材料经历一个吸收热量大于损失热量导致整体温度逐渐升高并最终吸收热量和损失热量接近平衡的过程。因此,可以结合材料的相图分析,通过控制工艺参数或者环境温度来影响材料的热历程,从而改进最终成形零件中的微观组织及力学性能。

## 4 结 论

针对 1Cr13 马氏体不锈钢粉末的激光直接成形性能进行实验研究,观测了成形薄壁件中显微硬度和典型微观组织结构沿高度方向上的分布。研究发现,激光多层堆积成形 1Cr13 不锈钢薄壁件中的微观组织及显微硬度具有独特的分布特点,在薄壁件与基板连接区域由于珠光体的存在,硬度达到 350 HV 以上,薄壁中其它位置微观组织结构趋于均匀,硬度稳定在 200 HV 左右。

## 参 考 文 献

1 J. Mazumder, D. Dutta, N. Kikuchi *et al.*. Closed loop direct metal deposition: art to part [J]. *Optics and Lasers in*

- Engineering, 2000, **34**(4-6): 397~414
- 2 Zhang Pingzhi, Zhang Yongzhong, Shi Likai *et al.*. Research on laser direct deposition of metallic parts [J]. *Chinese J. Rare Metals*, 2001, **25**(2): 28~31  
章萍芝, 张永忠, 石力开等. 金属零件的激光直接成形研究[J]. *稀有金属*, 2001, **25**(2): 28~31
- 3 Zhang Wei, Yao Jianhua, Peng Wei *et al.*. Research on microstructure and properties of 2Cr13 stainless steel parts made by laser direct metal deposition [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1830~1835  
张伟, 姚建华, 彭伟等. 2Cr13 不锈钢粉末激光直接堆积成形的组织与性能研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1830~1835
- 4 Yang Haiou, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Functionally gradient materials prepared with laser rapid forming [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4): 567~570  
杨海欧, 林鑫, 陈静等. 利用激光快速成形技术制造高温合金不锈钢梯度材料[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4): 567~570
- 5 B. V. Krishna, A. Bandyopadhyay. Surface modification of AISI 410 stainless steel using laser engineered net shaping [J]. *Materials & Design*, 2009, **30**(5): 1490~1496
- 6 L. Wang, S. D. Felicelli, J. E. Craig. Experimental and numerical study of the LENS rapid fabrication process [J]. *J. Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the Asme*, 2009, **131**(4): 041019
- 7 L. Wang, S. Felicelli, Y. Gooroochurn *et al.*. Optimization of the LENS process for steady molten pool size [J]. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2008, **474**(1-2): 148~156
- 8 H. Yin, S. Felicelli, L. Wang. Fluid flow, heat and mass transfer in the molten pool of the LENS process [C]. EPD Congress, 2008: 261~270
- 9 L. Wang, S. Felicelli. Process modeling in laser deposition of multilayer SS410 steel [J]. *J. Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the Asme*, 2007, **129**(6): 1028~1034
- 10 L. Wang, S. D. Felicelli, P. Pratt. Residual stresses in LENS-deposited AISI 410 stainless steel plates [J]. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2008, **496**(1-2): 234~241
- 11 P. Pratt, S. D. Felicelli, L. Wang *et al.*. Residual stress measurement of laser-engineered net shaping AISI 410 thin plates using neutron diffraction [J]. *Metallurgical and Materials Transactions a-Physical Metallurgy and Materials Science*, 2008, **A39**(13): 3155~3163