

文章编号: 0258-7025(2008)11-1830-06

## 2Cr13 不锈钢粉末激光直接 堆积成形的组织与性能研究

张 伟 姚建华 彭 伟 董辰辉 汤晓丹

(浙江工业大学机械制造及自动化教育部重点实验室, 激光加工技术工程研究中心, 浙江 杭州 310014)

**摘要** 为说明激光直接金属堆积(DMD)成形件的组织与性能特点,进行了 2Cr13 不锈钢粉末的直接成形实验研究。检测了不同工艺参数组合下单道熔覆、多道搭接和多层堆积的显微组织形貌,测试了 2Cr13 零件的硬度、耐磨损、拉伸和残余应力等性能。研究表明,单道熔覆的典型组织有柱状、胞状枝晶和等轴晶三种,其相互转化由温度梯度和凝固速率所决定;由于粉末实时供给,搭接区与预置熔覆有很大不同;多层堆积枝晶生长表现出一定倾斜性,受扫描方式影响较大;不同工艺参数下,熔覆层平均硬度为 300~550 HV0.2;当组织为细化的树枝晶时,成形件耐磨损性能可比调质态 2Cr13 提高一倍以上;成形件的平均抗拉强度比调质态 2Cr13 提高 30%;直薄壁零件不同位置处残余应力不同,但残余应力水平较低。

**关键词** 激光技术;快速成形;组织与性能;激光直接金属堆积;2Cr13 不锈钢

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083511.1830

### Research on Microstructure and Properties of 2Cr13 Stainless Steel Parts Made by Laser Direct Metal Deposition

Zhang Wei Yao Jianhua Peng Wei Dong Chenhui Tang Xiaodan

(Key Laboratory of Mechanical Manufacture and Automation, Ministry of Education,  
Research Center of Laser Processing Technology and Engineering,  
Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China)

**Abstract** Direct forming 2Cr13 parts were studied experimentally for explaining the performance of laser direct metal deposition (DMD) forming. The microstructure of single track cladding, multiple tracks overlapping cladding, and multi-layer deposition were observed. The mechanical properties of specimens, such as hardness, anti-abrasive, tensile and residual stress distribution, were tested. The experimental results showed that the typical patterns of single track had cellular dendritic, column dendritic, and equiaxed crystals. The patterns depended on the temperature gradient and the solidification rate of cladding. The overlapping zone of DMD specimen was different from that of powder preset cladding. The grains of multi-layer deposition specimen showed the characteristic of orientated growth which was influenced greatly by scanning path. Under different technological parameters, the average hardnesses of specimens changed from 300 HV0.2 to 550HV0.2. When the microstructure was thin dendritic crystal, the anti-abrasive property increased one time than that of 2Cr13 substrate which was quenched and tempered. The average tensile strength increased by 30%. The residual stresses were different at different positions, but all of them were small.

**Key words** laser technique; rapid forming; microstructure and property; laser direct metal depositiob; 2Cr13 stainless steel

收稿日期:2008-03-17;收到修改稿日期:2008-06-18

基金项目:科技部国际科技合作项目(JG-JD-2008001)、浙江省教育厅科研项目(20070305)、浙江省自然科学基金(Y107489)、浙江工业大学先进制造技术与装备重中之重学科开放基金(AMT200506009)资助课题。

作者简介:张 伟(1980-),男,山东人,博士研究生,主要从事激光快速成形方面的研究。

E-mail:zhangwei\_zjut@sina.com

导师简介:姚建华(1965-),男,浙江人,教授,主要从事激光加工技术方面的研究。

E-mail:laser@zjut.edu.cn(通信联系人)

## 1 引言

激光直接金属堆积(DMD)采用载气式同轴送粉,即粉末在载气流的带动下,沿着与激光束同轴的环形圆锥喷嘴喷出,在空中汇聚后注入熔池,经过沿预定轨迹的单道熔覆,多道搭接,多层堆积等过程,最终可堆积出所需形状的三维实体零件或仅需少量后续加工的近形件<sup>[1,2]</sup>。激光 DMD 成形技术由于具有激光功率高,成形材料范围广、成形件比选择性激光烧结件致密<sup>[3,4]</sup>、可自由成形等特点而成为高性能金属零件和工模具直接成形领域的一个研究热点<sup>[5]</sup>。由于成形过程较为复杂<sup>[6,7]</sup>,成形件的组织 and 性能有别于传统的铸造、加工零件。2Cr13 不锈钢属于马氏体不锈钢,整体性能较好,常用来制造抽运轴、轴套、叶轮、叶片等承受较高应力的零部件,应用非常广泛。本文研究了 2Cr13 不锈钢粉末激光 DMD 成形时的组织转变规律以及成形件的性能特点,为成形工艺控制和该类成形件的应用提供依据。

## 2 实验材料、设备和工艺

2Cr13 不锈钢粉末主要成分如表 1 所示。粉末形状接近椭圆形,尺寸在 32~70  $\mu\text{m}$  之间。基材以及性能对比试样为调质态 2Cr13 马氏体不锈钢。成形系统为实验室构建的 7 kWCO<sub>2</sub> 激光成形系统,采用同轴送粉方式(图 1 所示),以氩气作为保护气体和粉末载气。工艺参数范围为:光斑半径  $R$  为 1~2.5 mm,扫描速度  $V_s$  为 100~500 mm/min,激光功率  $P$  为 1~4 kW,送粉速率  $V_p$  为 5~15 g/min,载气流速  $V_g$  为 3~10 L/min。图 2 为各种 2Cr13 不锈钢成形件,对成形件进行了取样,用 HXD-1000 型显微硬度计,WM-2002 型摩擦磨损实验仪,WE-30 液压万能材料实验机,Hitachi S-4700(II)型场发射扫描电子显微镜(SEM)和 Thermo Noran Vantage Eis 能谱仪,X-350A 残余应力分析仪,Thermoarl-Scintagx Trax 型 X 射线衍射(XRD)仪等仪器对试样的显微组织和性能进行了检测和分析。

表 1 2Cr13 不锈钢粉末的主要成分(质量分数%)

Table 1 Chemical composition of 2Cr13 stainless steel powder (mass fraction%)

C	Cr	Si	Ni	Fe
0.21	13.00	1.16	0.77	Bal.

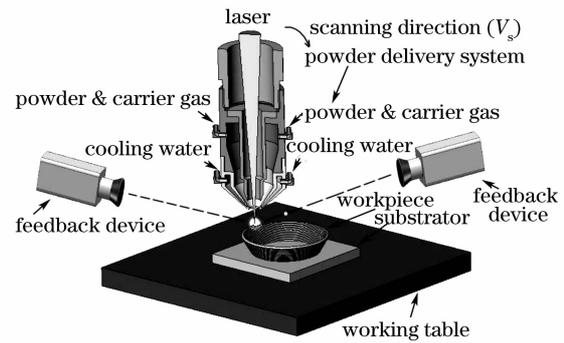


图 1 DMD 成形示意图

Fig. 1 Schematic of DMD forming

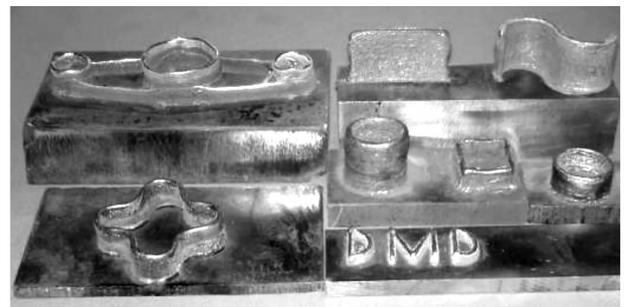


图 2 DMD 成形的 2Cr13 不锈钢薄壁件

Fig. 2 Different 2Cr13 stainless steel forming parts

## 3 显微组织分析

实验发现在不同的工艺参数组合下(光束尺寸、激光功率、扫描速度、送粉速度等),熔覆层的组织形貌、晶粒尺寸等有较大差异。激光扫描过程中熔化和凝固速率很快,温度梯度较大,同时合金材料结晶温度范围大,因此熔覆层一般呈现为树枝状的枝晶组织。枝晶的生长方式有胞状晶、柱状晶和等轴晶几种,主要由固液界面处的温度梯度和凝固速度决定<sup>[8]</sup>。激光扫描过程中,实际熔池形状较为复杂<sup>[9]</sup>,凝固区各处的温度梯度和凝固速率不均匀,一般靠近基体处温度梯度大,凝固速率小,在凝固界面处温度梯度小,凝固速率大。因此单道熔覆层常得到柱状晶、胞状晶和等轴晶的混合组织。研究表明,增加送粉速率,减小扫描速率有利于生成等轴晶组织,当扫描速率小于 100 mm/min 或扫描速率小于 300 mm/min 并且送粉速率大于 15.58 g/min 时,熔覆层一般得到等轴晶组织;在本文的实验参数范围内,比较容易得到胞状枝晶组织;柱状晶比较难获得,只有当扫描速率大于 800 mm/min,并且给基体施加冷却时才能得到。

### 3.1 搭接区的组织形貌

图 3 是搭接系数(也称搭接率,两道重叠部分与

熔宽之比值)为 30%时,试样横截面的组织形貌。从图中可看出, DMD 搭接区形貌与预置铺粉有较大不同:预置铺粉的搭接区分布如图 4(a)所示, A, B, C 分别是回火区、退火区和熔化区<sup>[10]</sup>; DMD 由于采用同轴实时送粉, 搭接实际上也是一种在已有熔覆层表面边缘堆积的过程, 因此搭接区的熔合线沿

着原熔覆层的表面(如图 3(a), 4(b))。在熔合线上方为新熔覆层, 在连续搭接时, 由于散热较慢, 一般晶粒比前道熔覆层晶粒粗大。熔合线下方为前道熔覆层, 由于受到搭接过程的热影响, 过饱和固溶体枝晶分解, 呈现不同程度的回火状态(如图 3(b), 3(c)), 其组织为回火马氏体、残余奥氏体以及碳化物等。

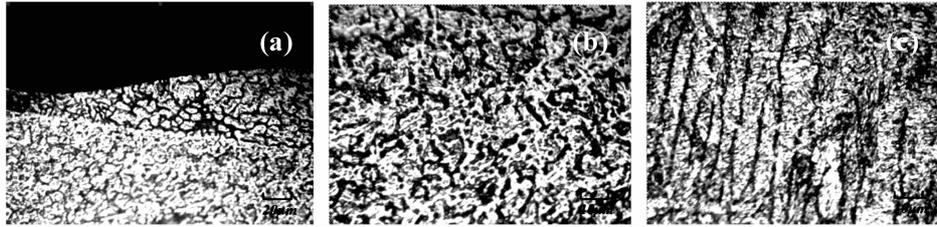


图 3 搭接区的组织形貌

(a) 搭接区整体形貌; (b) 熔合线下部区域形貌; (c) 枝晶回火形貌(600×)

Fig. 3 Microstructure of cross-section of overlapping specimen

(a) full view of overlapping zone; (b) the zone below fusion line; (c) the tempering image of dendritic(600×)

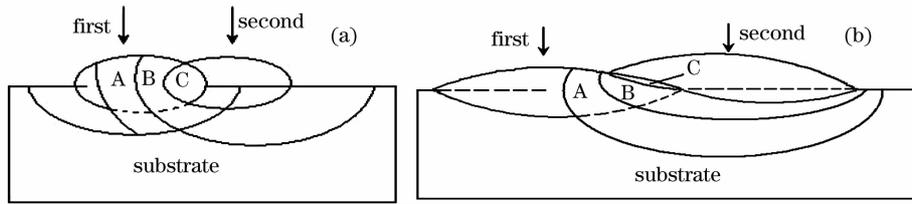


图 4 搭接横截面分区示意图。(a) 铺粉预置; (b) 同轴送粉

Fig. 4 Schematic representation of overlapping. (a) powder preset; (b) coaxial feeding

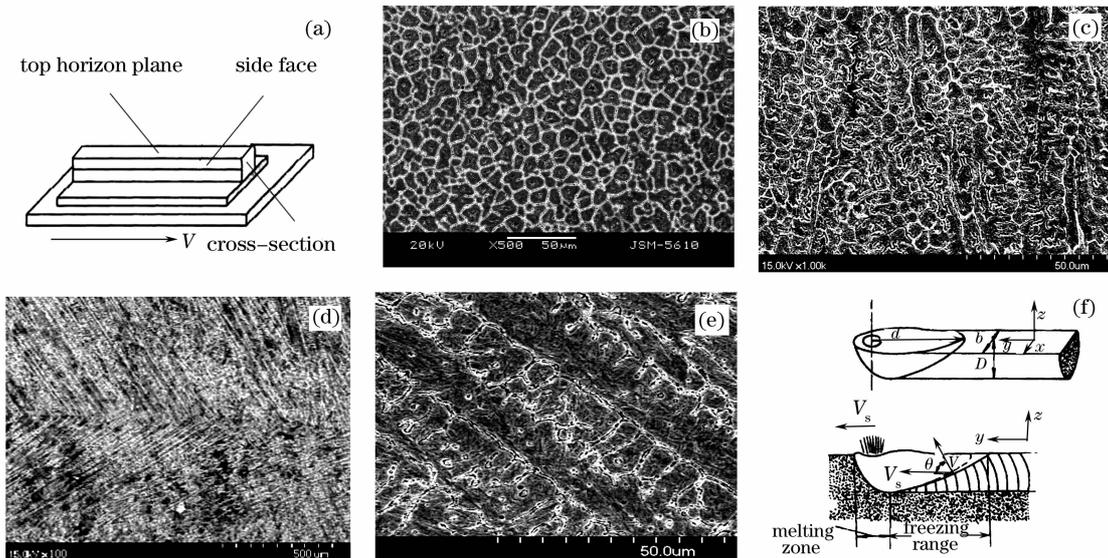


图 5 多层堆积直薄壁零件的组织形貌

(a) 显微组织检测位置示意图; (b) 直薄壁墙顶部组织形貌; (c) 直薄壁墙横截面组织形貌;

(d) 往复式扫描直薄壁墙侧面组织形貌; (e) 单向扫描直薄壁墙侧面组织形貌; (f) 熔化区与凝固区的形状

Fig. 5 Microstructure of multi-layer deposition specimen. (a) sketch map of different position;

(b) SEM image of top horizon plane; (c) SEM image of cross-section; (d) SEM image of side face under reciprocating scanning; (e) SEM image of side face under unidirection scanning; (f) sketch map of molten zone and solidified zone

### 3.2 多层堆积的组织形貌

图 5 为多层堆积直薄壁零件的扫描电镜组织形貌。图 5(a) 为显微组织观察位置示意图。图 5(b) 为顶部电镜形貌, 可看出晶粒水平截面近似六边形, 晶粒尺寸较均匀, 平均粒径  $20\ \mu\text{m}$ 。图 5(c) 为横截面的扫描电镜形貌, 为胞状枝晶组织。图 5(d) 为往复式扫描时, 侧面的扫描电镜形貌, 呈现出倾斜的树枝晶组织。这主要是在连续扫描过程中, 熔池前沿加热, 后沿冷却, 热流方向(最大温度梯度方向) 向后端凝固区倾斜。因此, 当树枝晶沿着热流方向生长时, 其凝固界面法线方向与扫描速度存在夹角  $\theta^{[1]}$  (凝固角, 如图 5(f)), 凝固后树枝晶倾斜生长特征比较明显。对于往复式扫描两层枝晶的生长方向有  $2\theta$  的夹角, 而对于单向扫描枝晶生长方向一致, 因此组织更均匀, 通过辅助冷却, 使枝晶生长始终处

于竖直正温度梯度约束下, 可大大减小  $\theta$  角, 这也是定向凝固的基本方法。此外, 在两层堆积交接处, 存在很薄的重熔区, 晶粒较粗大, 而采用单向扫描并且扫描速度较快时, 重熔区不明显, 组织较均匀(如图 5(e))。

### 3.3 物相及能谱分析

为进一步研究成形件的组织成分, 对多层堆积试样进行 XRD 分析和能谱 EDX 元素面扫描分析(mapping), 分析位置为多层堆积直薄壁墙(图 5(a) 所示) 侧面, 组织为树枝晶(图 5(d), (e) 所示), 分析结果如图 6 所示。元素面扫描结果表明, Fe, Cr, C 等主要元素的分布比较均匀; XRD 分析结果表明, 多层堆积薄壁件的主要相为铁铬合金(Fe-Cr), 为枝晶快速冷却过程中形成的过饱和固溶体。

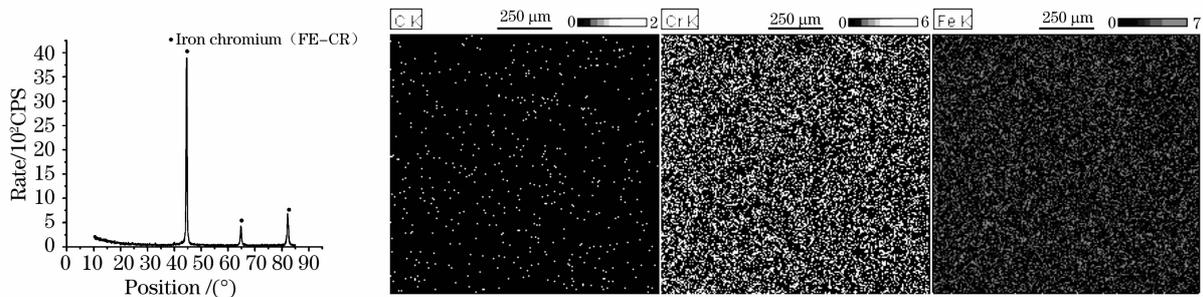


图 6 多层堆积直薄壁墙试样侧面的物相分析及元素面扫描分析

Fig. 6 X-ray diffraction (XRD) analysis and area element scanning analysis of vertical thin wall specimen

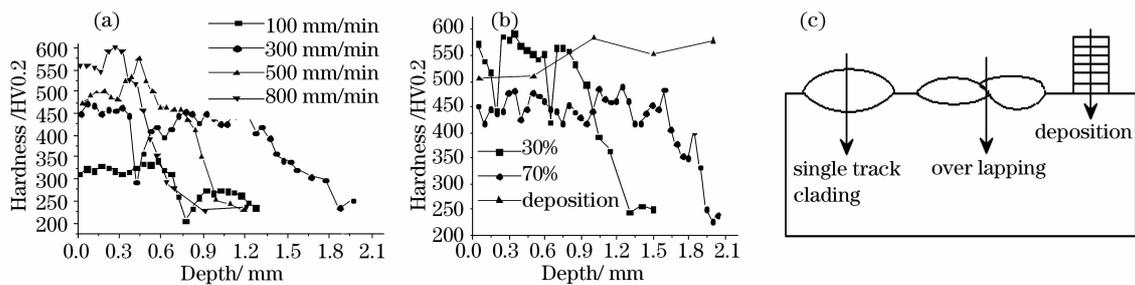


图 7 显微硬度分布曲线。(a) 不同扫描速度; (b) 不同搭接系数; (c) 硬度测试位置及方向示意图

Fig. 7 Microhardness distribution curve of different specimens

(a) different scanning speed, (b) different overlapping rate, (c) sketch map of test position and direction

## 4 机械性能分析

### 4.1 显微硬度

实验表明不同工艺参数组合下, 成形件的硬度分布有所不同。单道熔覆层的硬度受扫描速度影响较大, 如图 7(a) 所示。在扫描速率  $100\sim 800\ \text{mm/min}$  (送粉速率为  $5.35\ \text{g/min}$ ) 范围内, 单道熔覆层的平均硬度在  $300\sim 550\ \text{HV}0.2$  范围内变化。当扫

描速率比较快时, 熔覆层组织一般为树枝晶结构, 硬度较高; 当扫描速率比较慢时, 熔覆层组织倾向于等轴晶生长, 硬度较低。这主要是因为: 扫描速率快时, 熔池加热时间短, 凝固速率快。一方面较快的凝固速率使晶粒细化, 晶界比较多, 能一定程度上抵抗外力引起的变形, 使得强度和韧性增加; 另一方面, 由于凝固速率比较快, 溶质原子(Cr, C)来不及析出, 形成了过饱和固溶体, 也有利于增加硬度。当扫

描述率比较慢时,熔池加热时间长,凝固速率比较慢,晶粒粗大,并且溶质原子有充分的时间析出,因此硬度较低。

图 7(b)为搭接区和堆积横截面的硬度分布,送粉速度  $V_p$  为 5.35 g/min,光束半径  $R$  为 1 mm,扫描速率  $V_s$  为 300 mm/min,功率  $P$  为 3.00 kW。其中搭接区由于存在重熔、退火和回火,整体硬度有所下降,并且搭接系数越大,硬度下降得越明显。多层堆积的晶粒生长方向一致,晶粒尺寸均匀,层和层之间的交接区很小,因此其硬度分布较均匀。

#### 4.2 耐磨损性能

采用 WM-2002 型摩擦磨损实验仪测试了 DMD 试样(平均硬度 500HV0.2)和基体试样(平均硬度 250HV0.2)的耐磨损性能。试样线切割成 8 mm×8 mm,厚 2 mm 的矩形片状,载荷 250 g,摩擦副为  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷球测试,转速 600 r/min,实验时间为 1 h。磨损形貌如图 8 所示,可看出基材的磨损属于粘着磨损,有片状脱落,而 DMD 试样的磨损属于磨粒磨损,有细小的犁沟。实验完毕后称量了磨损前后的质量变化,数据如表 2 所示。磨损测试表明 DMD 试样的摩擦系数比基体降低了 15%,DMD 试样与基体的相对磨损性  $\epsilon$  为 0.418,即 DMD 试样的耐磨性比基体提高了一倍以上。DMD 成形件耐磨损性能的提高,一方面是因为 DMD 试样的硬度比基体高,磨损方式不同;另一方面是因为 DMD 试样由于细晶强化和固溶强化的作用,强度和韧性同时得到了提高;此外,固溶体枝晶加枝晶间网络状碳化

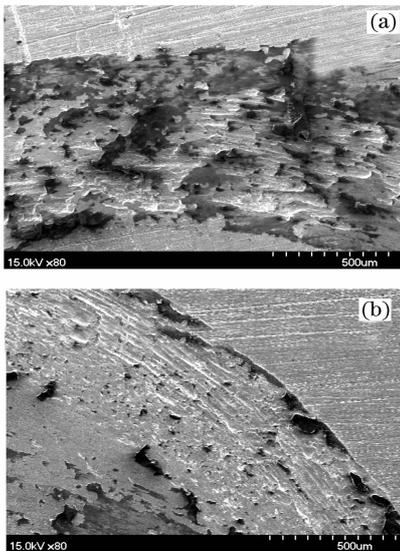


图 8 试样表面的磨损形貌。(a)基材试样;(b)DMD 试样

Fig. 8 Abrasion pattern

(a) substrate specimen;(b) DMD specimen

物的这种结构可以减少磨损过程中材料的剥离,从而更耐磨,有利于延长零件的使用寿命。

表 2 磨损实验数据

Table 2 Data of abrasion test

Specimen	Wearing capacity/mg	Fraction factor/ $\mu$
Substrate	1.51	0.586
DMD	0.63	0.492

#### 4.3 拉伸性能试验

制作了满足 GB6397-86 规定拉伸试样,如图 9(a)所示。表 3 是拉伸试验测量数据,可看出纵向堆积试样的平均抗拉强度要高于横向堆积试样,这主要与枝晶生长方向有关,即沿枝晶生长方向上抗拉强度较大。DMD 试样的平均抗拉强度要比调质态基体提高 30%,从图 9(b)和(c)拉伸断口形貌上可看出由于 DMD 试样晶粒较细,其断口“韧窝”数目比基体试样的多,并且尺寸比较小,因此抗拉强度大。DMD 拉伸试样的延伸率要低于基体,表明其塑性有所下降,但整体性能依然优于调质基体,更优于一般铸坯。需要说明的是工艺参数对试样的拉伸性能具有很大影响,如多层堆积或多道搭接结合不牢或有空隙时必然影响到试样的拉伸性能。

表 3 拉伸试验测量数据及性能对比

Table 3 Data of tensile test

Style	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ /%
Lengthwise	723.025	26.39
Cross direction	670.396	27.88
Substrate	531.542	37.88
Casting blank	$\geq 441$	$\geq 25$

表 4 薄壁墙零件的残余应力分布

Table 4 Data of residual stress test

Measuring position	Direction	Residual stress/MPa
Side	Horizontal	-5.6
Face	Vertical	34.7
Top	Horizontal	16.5
Half	Vertical	42.8

#### 4.4 残余应力分布

DMD 成形过程较为复杂,零件成形后的残余应力分布一直是比较关心的问题。DMD 直薄壁墙零件的残余应力测试结果如表 4 所示(测试位置如图 9(a)所示)。由于液态金属凝固过程中,一般伴随着体积膨胀,因此薄壁墙成形件总体表现出残余

拉应力,但残余应力水平较低;由于存在着从上到下的正温度梯度,因此晶体定向凝固的结果使得纵向残余应力要大于横向残余应力;在堆积层间由于存在重熔,凝固速率较低,晶体生长方向性不强,由凝

固膨胀导致的拉应力相应减小,特别是在平行于扫描方向上由于冷却过程中的相变等因素的影响,残余应力转变为压应力。

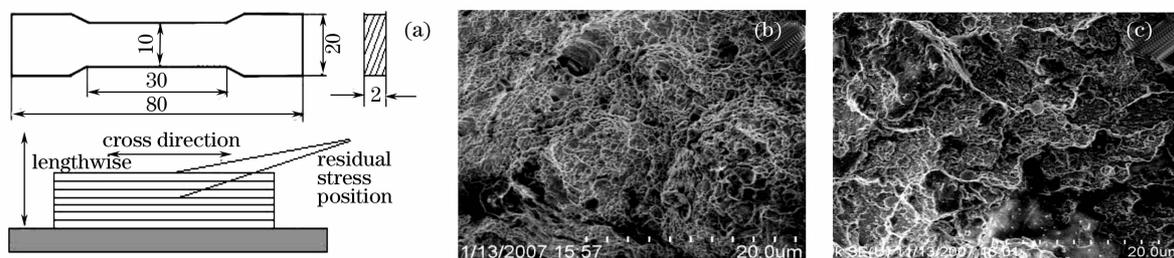


图9 拉伸试样尺寸及断口形貌

(a)拉伸试样尺寸及取样方向;(b) DMD 试样断口形貌;(c) 基体试样断口形貌

Fig. 9 Fracture pattern of tensile specimens

(a) sketch map of sampling direction and specimen size;(b)DMD specimen;(c)substrate specimen

## 5 结 论

在本文工艺参数范围内,以胞状树枝晶最为常见。搭接区熔合线附近,原有熔覆层组织出现不同程度的回火。多层堆积时,晶体生长更有方向性,从而表现出定向凝固的特征。物相分析和能谱分析表明,枝晶组织是由(Fe,Cr,C)过饱和固溶体枝晶和枝晶间的 CrC 组成。由于固溶强化和细晶强化的双重作用,成形件的机械性能有不同程度的提高。其中,硬度根据组织形态的不同在 300~550HV0.2 变化。当组织为比较细化的树枝晶时,耐磨损性能可比调质态 2Cr13 不锈钢基体提高一倍,抗拉强度提高 30%。对于直薄壁零件,成形后总体表现出拉应力,在晶体生长方向上应力水平较高,垂直于晶体生长方向上应力水平较低,在两层交接区横向上存在拉应力向压应力转化的倾向。

## 参 考 文 献

- J. Mazumder, D. Dutta, N. Kikuchi *et al.*. Closed loop direct metal deposition: art to part [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, **34**:397~414
- Zhang Wei, Yao Jianhua, Hu Xiaodong *et al.*. Research and application progress of laser direct metal deposition formation [J]. *Manufacturing Automation*, 2008, **30**(2):4~9  
张 伟,姚建华,胡晓冬等.激光直接金属堆积成形技术的研究与应用进展[J]. *制造业自动化*, 2008, **30**(2):4~9
- Lu Zhongliang, Shi Yusheng, Liu Jinhui *et al.*. Comparisons of indirect selective laser sintering with selective laser melting[J]. *Foundry Technology*, 2007, **28**(11):1436~1441  
鲁中良,史玉升,刘锦辉等.间接选择性激光烧结与选择性激光熔化对比研究[J]. *铸造技术*, 2007, **28**(11):1436~1441
- Fan Chunhua, Dong Lihua, Huang Kaixu. Analysis of densification rate of Fe-C mixture powder forming with laser sintering[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1):137~141  
范春华,董丽华,黄开旭. Fe-C 混合粉末激光烧结成形致密度分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1):137~141
- Jia Wenpeng, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Temperature/stress field numerical simulation of hollow blade produced by laser rapid forming[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9):1308~1312  
贾文鹏,林 鑫,陈 静等.空心叶片激光快速成形过程的温度/应力场数值模拟[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9):1308~1312
- Xi Mingzhe, Yu Gang, Zhang Yongzhong *et al.*. Interaction of the laser beam and the metal powder conveyed by coaxial powder feeder[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4): 562~566  
席明哲,虞 钢,张永忠等.同轴送粉激光成形中粉末与激光的相互作用[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4):562~566
- Xi Mingzhe, Zhang Yongzhong, Zhang Pingzhi *et al.*. Influence of processing parameter on the microstructure and properties of 316L SS fabricated by laser direct deposition[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29** (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, **A29** (11):1045~1048
- M. Gaumann, C. Bezenec, P. Canalis *et al.*. Single-crystal laser deposition of superalloys; processing microstructure maps [J]. *Acta Mater.*, 2001, **49**:1051~1062
- Chen Jing, Tan Hua, Yang Haiou *et al.*. Evolution of molten pool shape in the process of laser rapid forming[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3):442~446  
陈 静,谭 华,杨海欧等.激光快速成形过程中熔池形态的演化[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3):442~446
- Zhang Qingmao, Liu Ximing, Sun Ning *et al.*. Investigation on microstructure and properties of broad-beam laser overlapping cladding F305 formed by powder feeding method [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2001, (4):13~18  
张庆茂,刘喜明,孙宁等.送粉式宽带激光搭接熔覆 F305 粉组织和性能的研究[J]. *金属热处理*, 2001, (4):13~18
- A. Rossz, I. Teleszky, F. Boros. Solidification of Al-6Zn-2Mg alloy after laser remelting [J]. *Materials Science and Engineering*, 1993, **A173**:351~354