

激光立体成形 17-4 PH 不锈钢组织性能研究

吴晓瑜 林 鑫 吕晓卫 杨海欧 陈 静 黄卫东

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 对激光立体成形 17-4 PH(0Cr17Ni4Cu4Nb)沉淀硬化不锈钢沉积区热处理前后的组织和常规力学性能进行了研究。光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线衍射(XRD)结果表明,沉积态组织主要由板条状马氏体和分布于其上 and 板条间少量的第二相强化质点组成。根据合金特性,推测马氏体基体上弥散析出的第二相强化质点应该为 M_7C_3 及 NbC 型碳化物等。靠近基材处的沉积态组织以细长的板条状淬火马氏体为主;远离基材的沉积态组织则变成粗大的板条状马氏体。沉积态试样经过固溶时效处理后,组织变为细小均匀的板条状回火马氏体,并且基体上析出了更多的第二相强化质点,这类强化质点推测应为 NbC 型以及 M_7C_3 , $M_{23}C_6$ 型碳化物。成形件经过热处理后,强度、硬度略微提高,而塑性则显著增加。并且其抗拉强度和塑性均高于锻棒标准,屈服强度则略低于锻棒标准。热处理前后成形件拉伸断裂均属于韧性断裂,其中 M_7C_3 型碳化物等形成的第二相质点是微观空穴和韧窝形成之源。

关键词 激光技术;17-4 PH 钢;沉淀硬化不锈钢;激光立体成形;马氏体

中图分类号 TN279; TG142 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0203005

Study on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Solid Forming 17-4 PH Stainless Steel

Wu Xiaoyu Lin Xin Lü Xiaowei Yang Haiou Chen Jing Huang Weidong

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract The microstructure and mechanical properties of as-deposited and heat-treated laser solid forming (LSF) 17-4 PH (0Cr17Ni4Cu4Nb) precipitation-hardening stainless steel are investigated. The results of optic microscope (OM), scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffraction (XRD) show that the microstructure of as-deposited LSF 17-4 PH steel consists of lath martensite and a small quantity of the second phase strengthening particles which distribute in and between the laths. According to the characteristics of alloy, the precipitating second phase strengthening particles should be M_7C_3 and NbC carbides, etc. The microstructure at the bottom of the deposited LSF 17-4 PH is mainly thin lath hardened martensite, however, there are thick lath martensite at the top of the deposited one. The microstructure of heat-treated LSF 17-4 PH is thin homogeneous lath martensite and there are more second phase strengthening particles precipitated in the substrate as well. These second phase strengthening particles should be NbC and M_7C_3 , $M_{23}C_6$ carbides. After heat-treatment, the strength and hardness of samples are slightly improved, while the plasticity is highly improved. In addition, the tensile strength and plasticity of the heat-treated samples are higher than forging bar standard, meanwhile, the yield strength is slightly lower than forging bar standard. The analysis on fractography shows that both the as-deposited and heat-treated LSF 17-4 PH steel exhibit toughness fracture and the second phase particles which consist of M_7C_3 carbides are the resource of microcavities and dimples.

Key words laser technique; 17-4 PH steel; precipitation-hardening stainless steel; laser solid forming; martensite

OCIS codes 160.3900; 140.3300; 140.3470

收稿日期: 2010-06-03; **收到修改稿日期**: 2010-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(50971102)、中国博士后科学基金(20090461312)、西北工业大学基础研究基金(NPU-FFR-JC200808)和凝固技术国家重点实验室(西北工业大学)自主研究课题(16-TZ-2007, 39-QZ-2009 和 05-BZ-2010)资助课题。

作者简介: 吴晓瑜(1986—),女,硕士研究生,主要从事激光立体成形方面的研究。E-mail:wxy-cl@163.com

导师简介: 黄卫东(1954—),男,教授,主要从事凝固理论和激光立体成形等方面的研究。E-mail:huang@nwpu.edu.cn

1 引言

17-4 PH (0Cr17Ni4Cu4Nb) 钢是在 Cr17 型不锈钢基础上,加入 Cu, Nb 等强化元素研制的一种新型马氏体沉淀硬化超高强度不锈钢^[1,2]。此钢低碳、高铬,且含铜、镍、铌,其耐蚀性较 Cr13 型和 Cr17Ni2 等马氏体钢好,多用作既要求耐弱酸、碱、盐腐蚀又要求高强度的部件,如汽轮机轴类零件和叶片等。这一类零件大多是重型机械上的重要承载部件,服役环境恶劣,很容易由于磨损、磨蚀、高温气体冲刷烧蚀、高低周疲劳、外力作用等发生破坏。其一旦损坏将直接导致整个机组输出功率下降甚至瘫痪,同时,这些零件大多制造成本较高,生产周期长,零件损伤或损坏产生的直接和间接经济损失也非常巨大,因此具有较高的修复价值。

目前,对于金属零件的修复,传统技术有钎焊、氩弧焊、热喷涂、电火花和激光熔覆等,这些技术对于某些零件表面及一些形状较简单的缺陷的修复是适合的,但仍存在一些不足之处。例如,焊接和热喷涂,热注入大,能量不集中,零件基体热影响区很大,易使零件变形,甚至产生开裂。近年来,在材料加工制造领域出现了一种新的高性能修复技术——激光成形修复技术。该技术的基础是综合了快速原型 (RP) 技术和激光熔覆技术 (LCT) 特点为一体的激光立体成形 (LSF) 技术,能够实现高性能复杂结构金属零件的无模具、快速、全致密近净成形^[3,4]。这样,若以损伤零件作为基材,即可实现损伤零件所具有缺陷的高性能三维成形修复,恢复零件的几何性

能和力学性能。

激光成形修复技术作为一种新的再制造修复技术,已经在钛合金、高温合金和热强钢等飞机及发动机结构件的修复工作上取得了进展^[5~7]。西北工业大学对钛合金飞机结构件、航空发动机中钛合金、高温合金、热强钢等机匣、油管、叶片一类构件的损伤进行了激光成形修复的研究,取得了良好的效果^[5,6]。浙江工业大学研究了 2Cr13 不锈钢叶片冲蚀区的激光修复,发现修复件的性能优于新叶片,能较大程度地提高叶片的使用寿命^[7]。如果能将激光成形修复技术成功应用于 17-4 PH 不锈钢零件的成形修复,不仅可以满足现役零件损伤后的再生制造的迫切要求,还可以大大降低部件的生产总成本。因为激光立体成形技术是激光成形修复技术的基础,所以本文对激光立体成形 17-4 PH 不锈钢的组织 and 性能开展了研究,为与 17-4 PH 不锈钢零件相类似的汽轮机部件和轴类用高强度不锈钢零件的高性能修复提供可能。

2 实验

激光立体成形实验是在本实验室建立的激光立体成形系统上进行的。激光立体成形系统由激光器及外光路、数控机床、送粉装置几部分组成。成形基材为 $\phi 60 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的 17-4 PH 锻件圆板,熔覆沉积材料为旋转电极法制备的 17-4 PH 粉末,粒度为 200~325 目 (45~75 μm),粉末成分如表 1 所示。

表 1 实验用 17-4 PH 不锈钢粉末化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of 17-4 PH stainless steel powder (mass fraction, %)

Cr	Cu	Mn	Nb	Ni	Si	C	S	P	Fe
16.75	3.29	0.224	0.260	3.64	0.303	0.048	0.030	0.033	Excess

试样制备过程工艺参数^[8]为:激光功率 2.1~2.3 kW,扫描速度 360 mm/min,送粉率 8 g/min,光斑直径 2 mm,单层熔覆高度 0.4~0.5 mm,采用氩气保护,保护气体流量为 3 L/min。

激光立体成形前,用砂纸打磨基材以去除待沉积表面的氧化膜,后用丙酮清洗表面油污,以减少表面污损对激光沉积组织的影响;对合金粉末进行 120 min 真空烘干处理,以除去粉末中吸附的水分。激光立体成形后,为了提高零件综合性能,参考 17-4 PH 不锈钢锻件的热处理制度,对成形件进行了热处理。热处理制度为固溶处理 [1040 $^{\circ}\text{C}$, 1 h/空冷 (AC)] 和时效处理 (550 $^{\circ}\text{C}$, 4 h/空冷)^[9,10]。采用线切割切除沉积态和热处理后试样的基材后,分别制

备 X 射线衍射 (XRD) 测试试样、金相试样和力学性能测试试样。

对于 XRD 测试试样,粗磨后,用 1000~1200 号砂纸精磨,保证测试面表面平整无划痕。在 X'Pert MPD PRO X 射线衍射仪上分别对沉积态和热处理后的试样进行测试。对于金相试样,进行机械打磨抛光后,用配比为硫酸铜 4 g,浓盐酸 20 mL,水 20 mL 的腐蚀剂进行化学腐蚀。利用 OLYMPUS GX71 光学显微镜 (OM) 和 TESCAN VEGAII LMH 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察金相组织。利用 WOLPERT GROUP 500RA 型洛氏硬度仪对试样进行硬度测量,加载载荷 1471 N。

拉伸试样尺寸如图 1 所示 (长度方向平行于沉

积方向),在 INSTRON11-96 力学性能试验机上进行室温拉伸性能测试,最大载荷 100 kN,加载速率

2~3 mm/min。利用 SEM 观察分析断口形貌。

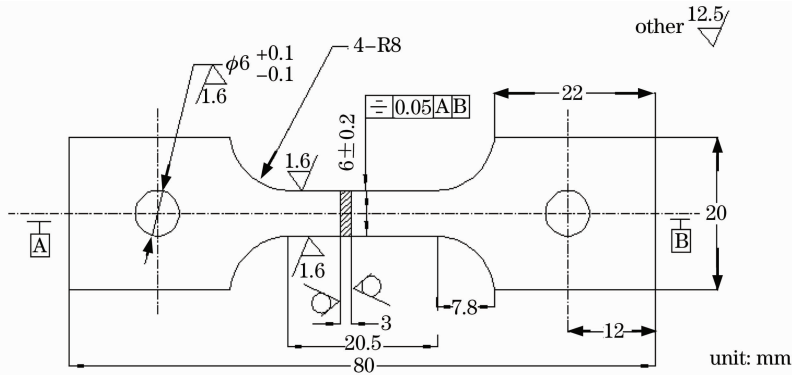


图 1 片状拉伸试样示意图

Fig. 1 Schematic of the tensile sample

3 实验结果与分析

3.1 XRD 物相分析

激光立体成形 17-4 PH 不锈钢沉积态和热处理态试样的 XRD 谱图如图 2 所示。由图可见,沉积态试样和热处理后试样都以马氏体相为主。另外,根据沉淀硬化不锈钢的合金特性,17-4 PH 不锈钢的相组成中应该还有少量的 ϵ -Cu 沉淀相^[10~12]。但是在 XRD 谱图中并没有 Cu 相衍射峰的出现,这可能是由于时效时间较短,Cu 相的析出量较少,导致在 XRD 谱线上没有明显示出。

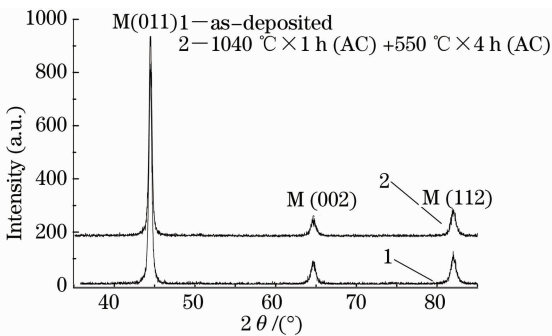


图 2 激光立体成形 17-4 PH 不锈钢沉积态和热处理态试样的 XRD 谱图(M 为马氏体)

Fig. 2 XRD pattern of as-deposited and heat-treated LSF 17-4 PH stainless steels (M refers to martensite)

3.2 沉积态组织

激光立体成形 17-4 PH 不锈钢沉积态宏观组织如图 3(a)所示,可以看到,单层熔覆层高度约为 0.4~0.5 mm,沉积态组织沿垂直于扫描方向呈现层间带状结构,层间为致密的冶金结合,很好地保证了层间的结合强度。

参考沉积态试样 XRD 的结果(图 2)并结合图 3(b)~(d)显示的微观组织特征,可知,该合金沉积态组织主要由板条状马氏体组成。另外,还可以看到在马氏体基体和板条间析出了一些细小颗粒,如图 3(c),(d)所示。根据合金特性,17-4 PH 不锈钢组织中存在少量的富铜的 ϵ 相强化质点和 M_7C_3 及 NbC 型碳化物等^[10~12]。但由于 ϵ -Cu 相强化质点尺度通常在纳米级,同时,激光立体成形过程中所存在的快速加热和冷却过程使得 ϵ -Cu 相即使析出也很难长大,在现有放大倍数的沉积态金相组织观察中应该很难看到。因此,推测沉积态马氏体基体上弥散析出的第二相强化质点应该为 M_7C_3 及 NbC 型碳化物等。

在沉积区不同部位,组织略有差异。如图 3(b)所示,靠近基材处的沉积态组织以细长的板条状马氏体为主,呈不同取向的块状团簇分布。然而,远离基材的沉积态组织则变成粗大的板条状马氏体,如图 3(c)所示。图 3(d)进一步显示了扫描电镜下粗大的马氏体板条的组织形貌。另外,熔覆层层与层间的组织尺度较之层内组织稍微细小一些,如图 3(e)所示。这主要是由于新熔覆层沉积时存在对熔池界面附近热影响区内已熔覆层组织的回火作用,使得层与层间的组织产生不完全再结晶的结果。

由经典凝固枝晶生长理论模型可知,一次枝晶间距 λ_1 与固液界面前沿温度梯度 G_L 及凝固速率 V 通常的关系为^[13]

$$\lambda_1 = AG_L^{-1/2}V^{-1/4}$$

式中 A 为与材料相关的常数。

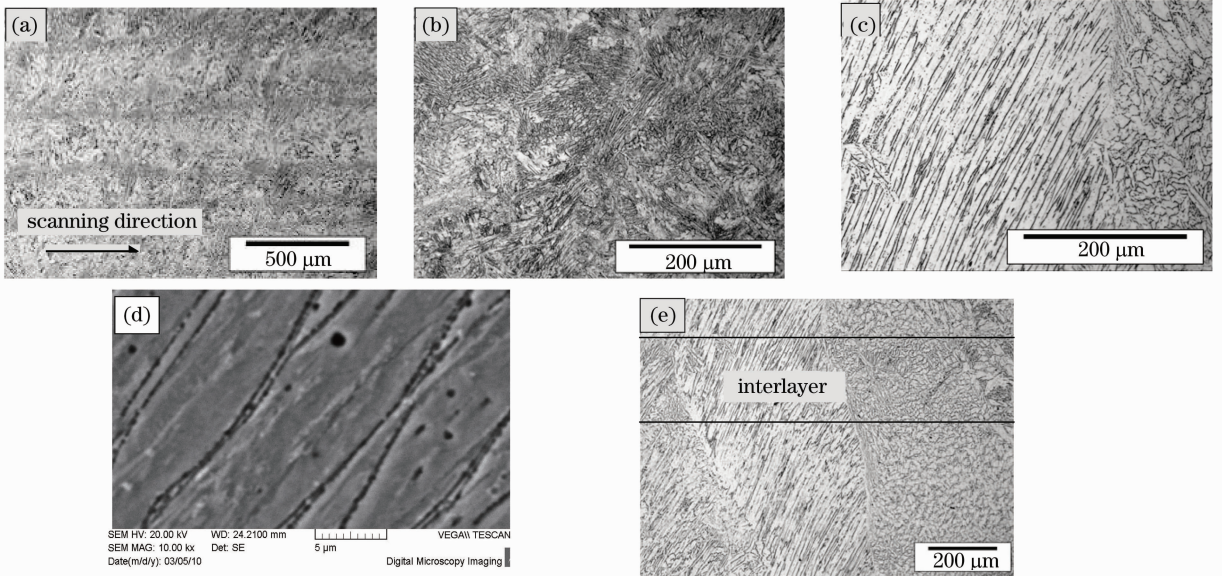


图3 激光立体成形 17-4 PH 不锈钢沉积态试样宏微观组织. (a) OM 宏观组织, (b) 沉积区下部 OM 微观组织, (c) 沉积区上部 OM 微观组织, (d) 沉积区上部 SEM 高倍微观组织, (e) 沉积区熔覆层间 OM 微观组织
 Fig. 3 Macrostructure and microstructure of as-deposited 17-4 PH stainless steel. (a) OM macrostructure, (b) OM microstructure at the bottom of the deposit, (c) OM microstructure at the top of the deposit, (d) SEM microstructure at the top of the deposit, (e) OM microstructure between layers of the deposit

17-4 PH 不锈钢凝固时首先生成高温铁素体, 随着温度降低, 高温铁素体发生包晶转变成奥氏体, 在快速冷却的条件下, 发生马氏体转变, 形成马氏体。可以推测, 高温铁素体的枝晶间距会影响到奥氏体的晶粒尺度, 进而影响到马氏体的板条尺寸。在激光立体成形 17-4 PH 试样过程中, 在靠近基材处, 由于基材的直接冷却作用, 激光熔池的温度梯度较高^[14], 使得凝固形成的高温铁素体枝晶的间距较小, 形成的奥氏体晶粒较细, 同时由于激光熔池很小, 只有几百微米, 而基材尺度相对很大, 导致在扫描过程中基材对熔覆沉积熔池的冷却强度很大^[15,16], 沉积层冷却速度较高, 使得此处形成细小的淬火马氏体。随着沉积高度增加, 沉积层热量的累积使得沉积层温度不断升高, 激光熔池中的温度梯度逐渐下降, 导致熔池凝固过程中形成的高温铁素体枝晶间距增大, 同时, 沉积层温度的提高使得沉积层的冷却速度不断降低, 从而使形成的淬火马氏体板条较为粗化。另外, 激光熔覆沉积过程中的多次热循环还会对已熔覆沉积层产生回火作用, 进而形成较为粗化的回火马氏体组织。

3.3 热处理后组织

图4是热处理后的激光立体成形 17-4 PH 不锈钢组织形貌。可以看到经过固溶时效处理后, 熔覆层

间的层带结构消失, 不同部位的组织无明显差异, 呈细小均匀分布 [图 4(a)]。观察其微观组织 [图 4(b)], 并结合 XRD 谱图 (图 2) 可知, 热处理后 17-4 PH 不锈钢组织主要是细小致密的板条状回火马氏体, 呈不同取向的块状团簇分布。还可以看到, 相比沉积态组织而言, 热处理后马氏体基体上弥散析出了更多的第二相强化质点, 如图 4(b), (c) 所示。由于纳米级尺度的 ϵ -Cu 相很难在现有放大倍数的金相组织中观察到, 因此根据合金特性和热处理制度, 推测认为组织中弥散析出的细小颗粒为 NbC 型以及 M_7C_3 , $M_{23}C_6$ 型碳化物等, 其中 $M_{23}C_6$ 型碳化物是在时效过程中由亚稳定的 M_7C_3 型化合物转变而来的^[10~12]。

3.4 常规力学性能测试

激光立体成形 17-4 PH 不锈钢沉积区热处理前后的拉伸性能、硬度测试结果分别如表 2 和图 5 所示, 其中图 5 纵坐标中 HRC 表示洛氏硬度。为了更好地对比激光立体成形 17-4 PH 不锈钢的拉伸性能, 表 2 中也列出了 17-4 PH 不锈钢锻棒经 550 °C 时效处理后拉伸性能的国家标准。可以发现, 激光立体成形 17-4 PH 不锈钢沉积区热处理试样的抗拉强度 (σ_b) 和塑性 (δ) 都高于锻棒标准, 而屈服强度 ($\sigma_{0.2}$) 则略低于锻棒标准。

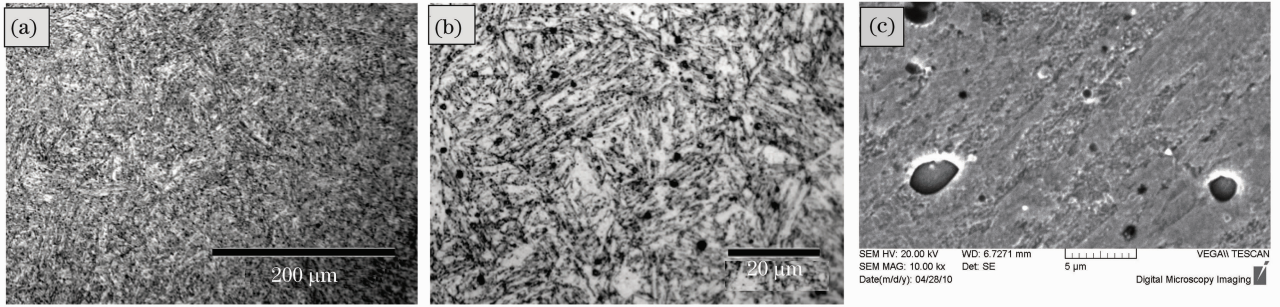


图 4 激光立体成形 17-4 PH 不锈钢试样热处理后的宏微观组织. (a) OM 宏观组织, (b) OM 微观组织, (c) SEM 高倍微观组织

Fig. 4 Macrostructure and microstructure of heat-treated 17-4 PH stainless steel, (a) OM macrostructure, (b) OM microstructure, (c) SEM microstructure

表 2 激光立体成形 17-4 PH 不锈钢沉积区热处理前后试样的拉伸性能

Table 2 Tensile properties of as-deposited and heat-treated LSF 17-4 PH stainless steels

State	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
As-deposited LSF 17-4 PH	1020	965	7.5
Heat-treatment LSF 17-4PH	1090	970	15.5
GB /T1220-2007	1070	1000	12

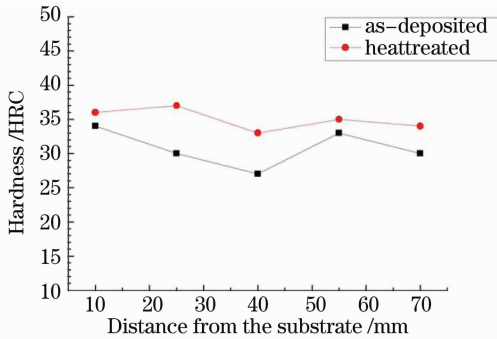


图 5 激光立体成形 17-4 PH 不锈钢沉积区试样热处理前后的硬度分布

Fig. 5 Rockwell hardness of as-deposited and heat-treated LSF 17-4 PH stainless steels

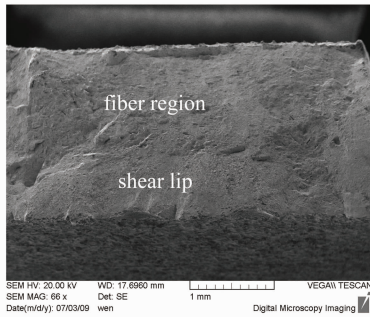
另外,还可以看到热处理后强度、硬度都比热处理前稍微增高,塑性有大幅度的提高。由试样的微观组织以及 XRD 测试分析结果,可以推断原因可能有两点:一方面,在固溶处理(1040 °C, 1 h 风冷)过程中,Cu 大量地溶入了高温形成的单相奥氏体基体中。风冷时,冷却速度很快,Cu 来不及析出,固溶在奥氏体转变形成的马氏体基体中,形成过饱和固溶体。在随后的等温时效过程(550 °C, 4 h 空冷)中,过饱和的 Cu 在热力学条件满足时发生脱溶转变,在马氏体基体上大量析出纳米级 ϵ -Cu 相,产生了沉淀强化作用^[17,18]。另一方面,由于 17-4 PH 钢中合金元素含量较高,固溶处理时,在高温形成的单

相奥氏体基体中固溶了大量过饱和的 Cr, Mn, Nb 等合金元素,在随后的等温时效过程中,这些过饱和的合金元素以合金碳化物 M_7C_3 , $M_{23}C_6$ 等形式析出,均匀细小地分布在马氏体基体上产生弥散强化或二次硬化作用^[19]。以上两方面的综合强化作用使得热处理后合金获得了良好的综合力学性能。对于沉积态组织而言,虽然在激光成形过程中,经历多次热循环,相当于进行了反复的回火和时效处理,但是由于保温时间不够长,强化相没有完全析出,导致力学性能略低于热处理后的试样。

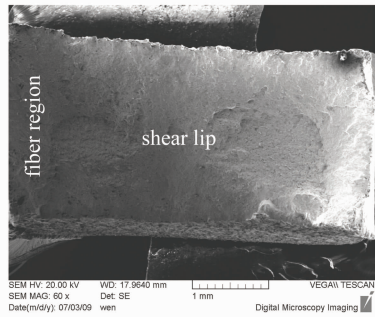
3.5 拉伸断口分析

在扫描电镜下,观察热处理前后激光立体成形 17-4 PH 不锈钢激光沉积区拉伸试样断口。从断口形貌看,二者宏观断口[图 6(a), (b)]均呈现典型的韧性断裂特征,具有纤维区和剪切唇等区域。整个断面比较平滑,没有大的突起,色泽灰暗,没有结晶颗粒和金属光泽。对比两个断口,可以发现其中热处理状态的试样断口剪切唇较明显,说明其塑性较高。

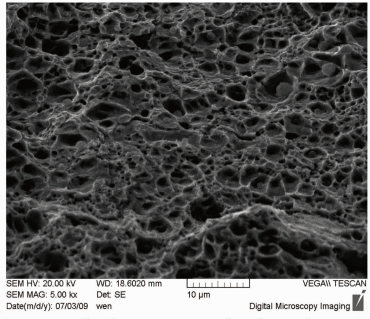
对纤维区等轴韧窝的微观观察发现,两种试样的拉伸断口内均存在着等轴韧窝如图 6(c), (d) 所示。在韧窝的底部可发现第二相粒子的存在。对沉积态试样的拉伸断口韧窝内的第二相粒子进行能谱分析,如图 7 所示,测得的数据(表 3)显示第二相粒子主要是 M_7C_3 型碳化物。也就是说韧窝主要是由于底部的 M_7C_3 型碳化物等第二相粒子扩展形成的显微孔穴在拉伸正应力作用下形成的。其中激光沉积态的第二相粒子尺寸较大,韧窝较浅,有明显的撕裂棱特征,说明沉积态试样塑性较差。而热处理后试样拉伸断口的韧窝分布均匀,深度大,第二相粒子尺寸较小,说明热处理后试样的塑性较好。



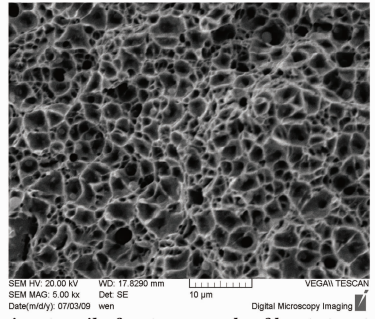
(a) macro-tensile fracture graph of as-deposited



(b) macro-tensile fracture graph of heat-treated



(c) micro-tensile fracture graph of as-deposited



(d) micro-tensile fracture graph of heat-treated

图 6 激光立体成形 17-4 PH 不锈钢拉伸断口 SME 照片

Fig. 6 SEM micrograph of the tensile fracture surfaces of LSF 17-4 PH stainless steel

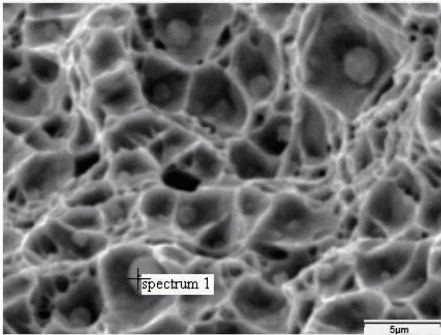


图 7 韧窝底部第二相质点

Fig. 7 Particle at the bottom of the dimple

表 3 第二相质点的能谱分析

Table 3 Analysis of chemical compositions of particle by energy dispersive spectrometer

Element	Mass fraction / %
Cr	29.30
Mn	18.64
Fe	41.47
Cu	0.72
Nb	0.33

4 结 论

1) 激光立体成形 17-4 PH 不锈钢直接沉积态的组织主要由板条状马氏体和少量的第二相强化质点组成。根据合金特性,推测弥散析出的第二相强化质点应该为 M_7C_3 及 NbC 型碳化物等。

2) 激光立体成形 17-4 PH 不锈钢经过热处理后,组织变成致密而均匀的细小板条状回火马氏体,并且在时效过程中析出了更多的 M_7C_3 , $M_{23}C_6$ 及 NbC 型碳化物等第二相强化质点。

3) 对比热处理前后的力学性能发现,热处理后成形件的强度、硬度有小幅度的提高,塑性有了较大幅度的提高,获得了更好的综合力学性能。对比 17-4 PH 锻棒拉伸性能国家标准后发现,热处理试样的抗拉强度和塑性高于标准,而屈服强度则略低于标准。

4) 激光立体成形 17-4 PH 不锈钢热处理前后试样均属于韧性断裂,对拉伸断口韧窝内第二相粒子的能谱分析结果显示,该粒子的成分主要是 M_7C_3 型碳化物。 M_7C_3 型碳化物等第二相质点是微观空穴和韧窝形成的起源。

参 考 文 献

- 1 Li Chunsheng. Handbook for Iron and Steel Materials [M]. Nanchang: Jiangxi Publishing House of Science and Technology, 2004. 509
- 2 李春胜. 钢铁材料手册[M]. 南昌: 江西科学出版社, 2004. 509
- 3 Editorial Board of Practical Handbook for Engineering Materials. Practical Handbook for Engineering Materials. Structural Steel & Stainless Steel [M]. Beijing: China Standards Press, 2001. 508~512
- 4 《工程材料实用手册》编辑委员会. 工程材料实用手册. 结构钢 & 不锈钢[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001. 508~512
- 5 Huang Weidong, Li Yanmin, Feng Liping *et al.*. Laser solid forming of metal powder materials [J]. *J. Materials*

- Engineering, 2002, (3): 40~43
- 黄卫东, 李延民, 冯莉萍等. 金属材料激光立体成形技术[J]. 材料工程, 2002, (3): 40~43
- 4 Wang Junwei, Chen Jing, Liu Yanhong *et al.*. Research on microstructure of TC17 titanium alloy fabricated by laser solid forming[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 847~851
- 王俊伟, 陈静, 刘彦红等. 激光立体成形 TC17 钛合金组织研究[J]. 中国激光, 2010, **37**(3): 847~851
- 5 Lin Xin, Xue Lei, Chen Jing *et al.*. Microstructure and mechanical properties of laser forming repaired Ti-6Al-4V alloy component[J]. *China Surface Engineering*, 2009, **22**(1): 19~24
- 林鑫, 薛蕾, 陈静等. 激光成形修复 Ti-6Al-4 V 钛合金零件的组织与性能[J]. 中国表面工程, 2009, **22**(1): 19~24
- 6 Xue Lei, Huang Weidong, Chen Jing. Application of laser forming repair technology on the aerial castings[J]. *Foundry Technology*, 2008, **29**(3): 391~394
- 薛蕾, 黄卫东, 陈静. 激光成形修复技术在航空铸件修复中的应用[J]. 铸造技术, 2008, **29**(3): 391~394
- 7 Zhang Wei, Yao Jianhua, Dong Chenhui *et al.*. Repairing and strengthening of eroded turbine blades by laser technology[J]. *Power Engineering*, 2008, **28**(6): 967~971
- 张伟, 姚建华, 董辰辉等. 汽轮机叶片冲蚀区的激光修复与强化[J]. 动力工程, 2008, **28**(6): 967~971
- 8 Yu Jun, Chen Jing, Tan Hua *et al.*. Effect of process parameters in the laser rapid forming on deposition layer[J]. *Chinese J. 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
- 9 Fujita Wakatsuki. Heattreatment of Stainless Steel[M]. Ding Wenhua Transl. Beijing: China Machine Press, 1983. 8
- 藤田辉夫. 不锈钢的热处理[M]. 丁文华译. 北京: 机械工业出版社, 1983. 8
- 10 Yang Xiao. Study on the Performance and Microstructure of 17-4 PH Stainless Steel[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007
- 杨晓. 17-4 PH 不锈钢性能和组织研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007
- 11 Zou Hong, Wang Jun. Study on microstructure transformation of 17-4 PH stainless steel after long-term aging at 350 °C [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2005, **26**(4): 397~401
- 邹红, 王均. 17-4 PH 不锈钢 350 °C 长期时效组织演化的透射电镜观察[J]. 核动力工程, 2005, **26**(4): 397~401
- 12 Wang Jun. Study on the Properties of a 17-4 PH Stainless Steel Used in a Nuclear Reactor[D]. Chengdu: Sichuan University, 2007
- 王均. 核反应堆用 17-4 PH 不锈钢的性能研究[D]. 成都: 四川大学, 2007
- 13 R. Trivedi, W. Kurz. Solidification microstructures: A conceptual approach[J]. *Acta Metall. Mater*, 1994, **42**(1): 15~23
- 14 Tan Hua, Chen Jing, Zhang Feiyang *et al.*. Estimation of laser solid forming process based on temperature measurement[J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, **42**(1): 47~54
- 15 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
- 16 Chen Jing, Jiang Guozheng, Lin Xin *et al.*. Microstructure and phase structure of laser solid forming Ti₂AlNb-based alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 593~598
- 陈静, 姜国政, 林鑫等. 激光立体成形 Ti₂AlNb 基合金的组织 and 相结构[J]. 中国激光, 2010, **37**(2): 593~598
- 17 Liu Zongchang, Ren Huiping, Wang Haiyan. Solution and aging process of high purity steel containing copper [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2004, **29**(12): 58~61
- 刘宗昌, 任慧平, 王海燕. 含铜低碳高纯净钢的固溶与时效工艺[J]. 金属热处理, 2004, **29**(12): 58~61
- 18 Deschamps, M. Militzer, W. J. Poole *et al.*. Precipitation kinetics and strengthening of a Fe-0.8 wt% Cu alloy [J]. *ISIJ Inter*, 2001, **41**(2): 196~205
- 19 Hu Guangli, Xie Xiwen. Heattreatment of Stainless Steel[M]. (2nd ed.) Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2004. 9
- 胡光立, 谢希文. 钢的热处理[M]. (第2版) 西安: 西北工业大学出版社, 2004. 9