

# 激光增材制造 05Cr15Ni5Cu4Nb 沉淀硬化不锈钢 的热处理工艺

刘正武<sup>1,2</sup>, 程 序<sup>1,2</sup>, 李 佳<sup>1,2\*</sup>, 王华明<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>北京航空航天大学大型金属构件增材制造国家工程实验室, 北京 100191;

<sup>2</sup>北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100191

**摘要** 采用激光增材制造技术制备了 05Cr15Ni5Cu4Nb 沉淀硬化不锈钢板件, 分析了沉积态、调整态、固溶态组织经时效热处理后的显微组织、析出相及力学性能, 并优化了热处理工艺。结果表明: 沉积态组织主要由外延生长的柱状晶组成, 柱状晶内包含多个胞状枝晶, 枝晶间存在残余铁素体, 沉积态组织抗拉强度为 1128.5 MPa。经时效热处理后, 残余铁素体消除, 马氏体板条中弥散分布 NbC 颗粒和大量纳米级  $\epsilon$ -Cu 相。与沉积态组织相比, 时效态组织的显微硬度和拉伸强度均有大幅提高, 直接时效态和固溶时效态组织的塑性稍有降低, 但抗拉强度分别达 1440 MPa 和 1367 MPa; 调整时效态组织可获得良好的强韧性配比, 延伸率与抗拉强度分别为 16% 和 1164.5 MPa。

**关键词** 激光技术; 激光增材制造; 05Cr15Ni5Cu4Nb; 显微组织; 力学性能

**中图分类号** TG142.1

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0602010

## Heat-Processing Technology for Laser Additive Manufacturing of 05Cr15Ni5Cu4Nb Precipitation-Hardening Stainless Steels

Liu Zhengwu<sup>1,2</sup>, Cheng Xu<sup>1,2</sup>, Li Jia<sup>1,2</sup>, Wang Huaming<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Engineering Laboratory of Additive Manufacturing for Large Metallic Components,  
Beihang University, Beijing 100191, China;

<sup>2</sup>School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

**Abstract** The 05Cr15Ni5Cu4Nb precipitation-hardening stainless steel plate is fabricated by the laser additive manufacturing technique. The microstructure, precipitated phase and mechanical property of the as-deposited, adjusted and solid solution state microstructures after aging heat treatments are analyzed, and the technology for the heating processing is optimized. The results show that the as-deposited microstructure mainly consists of epitaxial columnar grains where there are several cellular-like dendrites and residual ferrite exists in the inter-dendritic region. The tensile strength of the as-deposited state microstructure is 1128.5 MPa. After aging heat treatments, the residual ferrite is eliminated, the NbC particles and a large number of nano-sized  $\epsilon$ -Cu phases distribute dispersedly in the martensite lath. There are significant increase in both the microhardness and the tensile strength. Compared with that of the as-deposited state microstructure, the plasticity of the direct-aging and solid-solution-aging state microstructure is lower, but the tensile strengths are 1440 MP and 1367 MPa, respectively. The adjusted state microstructure has a favorable ratio of strength and toughness, and the elongation rate and tensile strength are 16% and 1164.5 MPa, respectively.

**Key words** laser technique; laser additive manufacturing; 05Cr15Ni5Cu4Nb; microstructure; mechanical properties

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390; 160.3900

**收稿日期:** 2017-01-22; **收到修改稿日期:** 2017-02-28

**基金项目:** 国家自然科学基金(U1508213)

**作者简介:** 刘正武(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光材料加工制造方面的研究。E-mail: liuzhengwu@buaa.edu.cn

**导师简介:** 王华明(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事先进材料激光制备与成形制造技术方面的研究。

E-mail: wanghm@buaa.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: lijia@buaa.edu.cn

# 1 引 言

05Cr15Ni5Cu4Nb 是马氏体沉淀硬化不锈钢,具备较高的强度和韧性及优异的耐蚀性<sup>[1-3]</sup>,被广泛应用于宇航工业、核工业等领域<sup>[4]</sup>。利用传统加工技术(铸造、锻造等)制备大型复杂的 05Cr15Ni5Cu4Nb 不锈钢零件,需要模具、大型装备及复杂的后续加工<sup>[4-5]</sup>,生产周期长、成本高。激光增材制造技术利用激光熔化合金粉末,通过多道搭接、逐层沉积的方式实现零件致密近净成形,相比传统加工技术,具有成本低、制造周期短、材料利用率高优点,同时还可实现零件结构设计的优化,特别适合制备大型高强度复杂结构零件<sup>[6-8]</sup>。激光增材制造板件具有定向凝固的组织特征<sup>[7,9-11]</sup>,力学性能优异,被广泛应用于制备钛合金、高温合金、不锈钢、铝合金等材料的零件<sup>[7-8,12-15]</sup>。

05Cr15Ni5Cu4Nb 不锈钢的传统热处理方式为固溶加时效,也可在固溶、时效之间进行调整处理,其经热处理后形成板条马氏体,并析出强化相(富铜相  $\epsilon$ -Cu),从而获得高强度。关于 05Cr15Ni5Cu4Nb 不锈钢热处理过程中工艺参数对显微组织和力学性能的影响,国内外已有较多报道<sup>[1,3,16-17]</sup>。Bajguirani<sup>[3]</sup>研究了时效温度和时效时间对 05Cr15Ni5Cu4Nb 不锈钢组织的影响,观察到 NbC 和  $M_7C_3$  碳化物,并有  $\epsilon$ -Cu 析出。Peng 等<sup>[17]</sup>研究了时效热处理对力学性能的影响,发现其沉淀硬化效果取决于逆变奥氏体(时效过程中由马氏体转变成)软化和富铜析出相硬化的共同作用。余强等<sup>[18-20]</sup>发现 05Cr15Ni5Cu4Nb 不锈钢在 1040 °C 左右固溶时,可以实现强度和韧性的最佳配合,调整处理可使溶质元素扩散均匀,温度为 780 °C 时强度最高。在 480~620 °C 的时效过程中,随着温度的升高和保温时间的延长,05Cr15Ni5Cu4Nb 不锈钢均发生强度降低、塑性提高的现象。在 485 °C 左右时效时,材料强度最高且塑性良好(延伸率大于 10%),保温 4 h 后其力学性能趋于稳定,而当时效温度低于 450 °C 时, $\epsilon$ -Cu 相析出困难,硬化效果不明显。

金属材料的组织和性能受制备方法的影响非常大,热处理前的组织状态对力学性能也有很大影响<sup>[4]</sup>。利用激光增材制造技术制备的不锈钢,其沉积态组织具有沿沉积增高方向外延生长枝晶的特征<sup>[7,9,13]</sup>,因此研究适合激光增材制造 05Cr15Ni5Cu4Nb 不锈钢的热处理工艺具有重要意义。本文在 05Cr15Ni5Cu4Nb 不锈钢传统热处理基础上,针对激光增材制造的特殊组织形态,主要研究了在沉积态、调整处理和固溶处理三种状态下,经 485 °C/4 h 时效后,不锈钢显微组织以及力学性能的变化。

## 2 试验材料与方法

试验中使用的 05Cr15Ni5Cu4Nb 预合金粉末通过等离子旋转电极雾化法制备,粉末以及成形板化学成分见表 1。

表 1 05Cr15Ni5Cu4Nb 不锈钢粉末及其沉积板的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of powder and laser deposited part for 05Cr15Ni5Cu4Nb stainless steels (mass fraction, %)

Element	C	Cr	Ni	Cu	Nb	Mn	Si	P	S	Fe
Powder	0.046	14.690	5.000	3.180	0.350	0.540	0.320	0.020	0.0018	Bal.
Laser deposited plate	0.048	14.830	5.130	3.000	0.380	0.470	0.380	0.018	0.0015	Bal.

沉积过程在激光材料加工成套系统中进行,采用高纯氩气保护成形腔(氧体积分数控制在  $75 \times 10^{-6}$  以下),基板采用锻造 05Cr15Ni5Cu4Nb 板材,经喷砂、烘干处理。激光增材制造工艺参数如下:激光功率 6~8 kW,光斑直径 6~8 mm,扫描速度 15~20 mm/s,单层厚度 0.5~0.8 mm,送粉速度 6.5~7.5 g/min。按照上述加工参数,在基板上采用多道搭接、逐层沉积方式,成形出 T 形截面高度为 200 mm 的板件。沉积过程如图 1 所示。激光沉积方向为 Z 向,激光束扫描方向为 X 向,垂直于激光沉积方向和扫描方向为 Y 向。

对沉积态组织进行多种热处理,直接时效的工艺为沉积态组织加 485 °C 时效 4 h,空冷;调整时效的工艺为:沉积态组织加 780 °C 调整 1 h,空冷加 485 °C 时效 4 h,空冷;固溶时效的工艺为:沉积态组织加 1040 °C 固溶 1 h,空冷加 485 °C 时效 4 h,空冷。

将试样打磨抛光并腐蚀(腐蚀液成分包括 1.5 g 氯化铜、33 mL 酒精、33 mL 硝酸、33 mL 水),采用德国徕卡公司生产的 Leika-DM4000 型金相显微镜和日本电子生产的 JSM-6010LA 型扫描电镜观察显微组织。利用日本理学生产的 D/MAX-2500 旋转阳极 X 射线衍射仪(XRD, Cu K $\alpha$  射线,扫描速度为 6(°)/min,管电压为 40 kV,管电流为 150 mA)进行物相分析。使用日本理学生产的 JXA-8230 电子探针设备测定微区化学

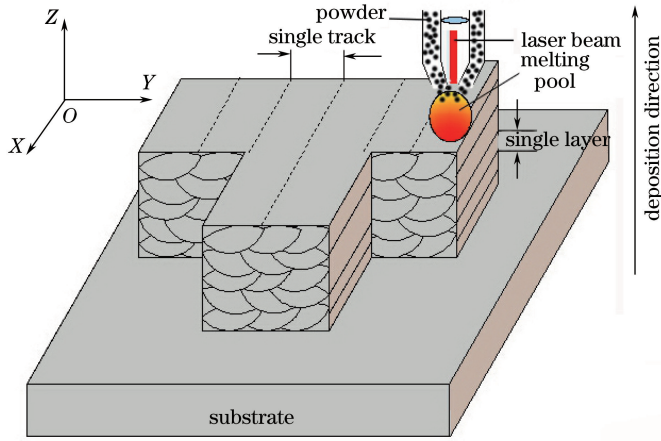


图 1 激光增材制造过程示意图

Fig. 1 Schematic illustration of laser additive manufacturing process

成分。制备透射电镜(TEM)试样并采用美国 FEI 公司生产的 Tecnai F30 场发射 TEM 观察。利用日本恒一电子生产的 FM800 型显微硬度仪测试试样的显微硬度,按照国际标准化组织(ISO) 6892-1:2009 标准进行室温拉伸试验,试样具体尺寸如图 2 所示,每组取 3 个平行试样进行测试。

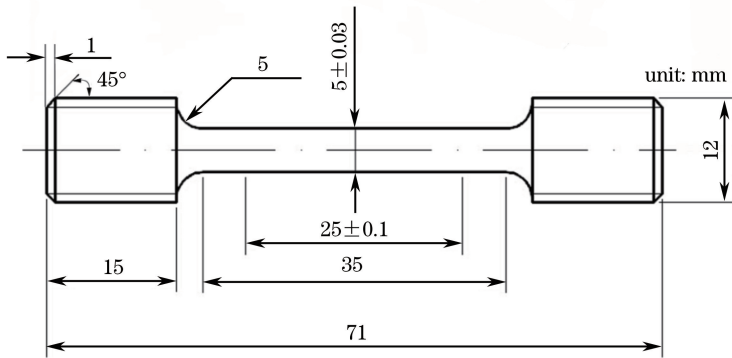


图 2 拉伸试样形状尺寸示意图

Fig. 2 Schematic diagram of shape and dimension of specimen for tensile test

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 沉积态显微组织

铸锻态 05Cr15Ni5Cu4Nb 不锈钢主要由等轴晶组成,尺寸约为  $20 \mu\text{m}$ <sup>[1,17]</sup>,激光增材制造沉积态组织主要由沿 Z 轴向外延生长的柱状晶组成,如图 3(a)所示,宽度为  $100\sim 300 \mu\text{m}$ 。柱状晶内包含多个胞状枝晶,宽度为  $8\sim 30 \mu\text{m}$ ,如图 3(b)所示。枝晶间存在残余铁素体,如图 3(c)所示。结合文献报道及 XRD 分析,如图 3(d)所示,沉积态组织主要由马氏体组成,其中  $2\theta$  为衍射角, M 表示马氏体。由图 3(b)可见,枝晶间具有较多的枝晶间相,经 TEM 分析发现,枝晶间相具有体心立方(BCC)结构,电子探针结果(见表 2)显示该区域富含 Cr、Nb 等元素(铁素体形成元素<sup>[4-5]</sup>)。由此推测,沉积态显微组织中的枝晶臂为马氏体,枝晶间为铁素体。金相法统计得到,沉积态铁素体的体积分数为 2.08%。在沉积过程中,晶粒形貌受热流传导方向和晶体生长择优取向的影响。05Cr15Ni5Cu4Nb 凝固过程中的初析相为铁素体<sup>[5]</sup>,其择优取向为  $\langle 001 \rangle$  晶向<sup>[21]</sup>,沉积板中部的热流方向主要沿沉积增高方向的反方向,因而形成沿 Z 轴向外延生长的柱状晶形貌。沉积过程冷却速度较快,在最后凝固阶段形成的铁素体在随后冷却过程中不发生奥氏体转变而残留在枝晶间区域<sup>[5]</sup>。

#### 3.2 热处理态显微组织

沉积态组织经直接时效、调整时效和固溶时效以后,显微组织分别如图 4、5、6 所示。

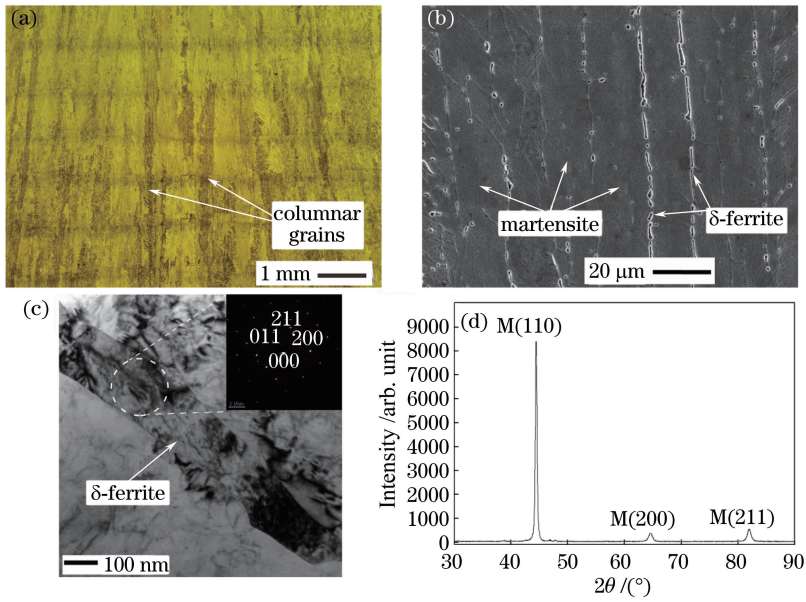


图 3 (a)柱状晶形貌;(b)枝晶形貌;(c)残余铁素体;(d)相组成

Fig. 3 (a) Columnar grain morphology; (b) dendrites morphology; (c) residual ferrite; (d) phase composition

表 2 枝晶间及枝晶臂元素分布(质量分数,%)

Table 2 Element distributions in interdendritic region and dendrite arm (mass fraction, %)

Position	Cr	Ni	Cu	Nb
Interdendritic region	18.561	2.959	2.093	0.718
Dendrite arm	15.101	5.242	3.183	0.364

由图 4(a)~(c)可见,沉积态 05Cr15Ni5Cu4Nb 不锈钢组织经直接时效以后,柱状晶以及枝晶形貌没有变化,枝晶内组织为回火马氏体,相比沉积态组织(图 3),马氏体组织细化,枝晶间的残余铁素体基本消失。TEM 结果显示,马氏体板条中弥散分布较多析出相;通过透射斑点及高分辨图像分析可知,此析出相具有

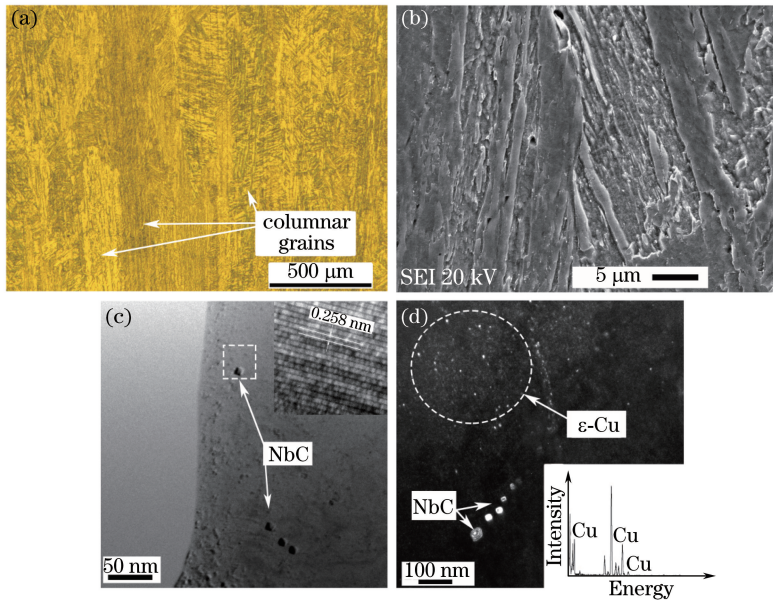


图 4 直接时效后 05Cr15Ni5Cu4Nb 不锈钢的微观形貌。(a)柱状晶形貌;(b)回火马氏体;(c) NbC 析出相,

右上角为 NbC 高分辨二维晶格像;(d) ε-Cu 与 NbC,右下角为富铜相能谱

Fig. 4 Microstructure of 05Cr15Ni5Cu4Nb stainless steel after direct-aging. (a) Columnar grain morphology;

(b) tempered martensite; (c) NbC precipitated phase, high-resolution two-dimensional lattice image of NbC is at upper right corner; (d) ε-Cu and NbC, energy spectrum of copper-rich phase is at lower right corner

面心立方(FCC)晶体结构,晶格常数为 0.443 nm,(111)面晶面间距为 0.258 nm,可确定该析出相为 NbC,直径为 12~20 nm。由图 4(d)TEM 暗场像可见,除了尺寸较大的 NbC 颗粒,组织中部分区域仍有密集分布的大量小亮点;能谱结果表明该区域富含 Cu 元素,TEM 测得析出相直径约为 4~10 nm,这与 Habibi 等<sup>[3,22]</sup>在 05Cr15Ni5Cu4Nb 中观察到的具有孪晶层错特征的  $\epsilon$ -Cu 特征相吻合,表明沉积态组织经直接时效以后,在马氏体基体中析出了大量纳米级富铜相。

由图 5 可见,激光增材制造的 05Cr15Ni5Cu4Nb 不锈钢沉积态组织经调整时效热处理后仍具有明显的枝晶形貌,但柱状晶边界难以分辨,马氏体组织明显细化,表明经调整时效热处理后,组织成分均匀。由图 6 可见,经固溶时效后,柱状晶及枝晶形貌均难以分辨,显微组织为回火马氏体。TEM 结果显示,调整时效和固溶时效后马氏体板条中弥散分布着 NbC 颗粒,部分区域排成一行,暗场像下可见大量密集分布的  $\epsilon$ -Cu 相。

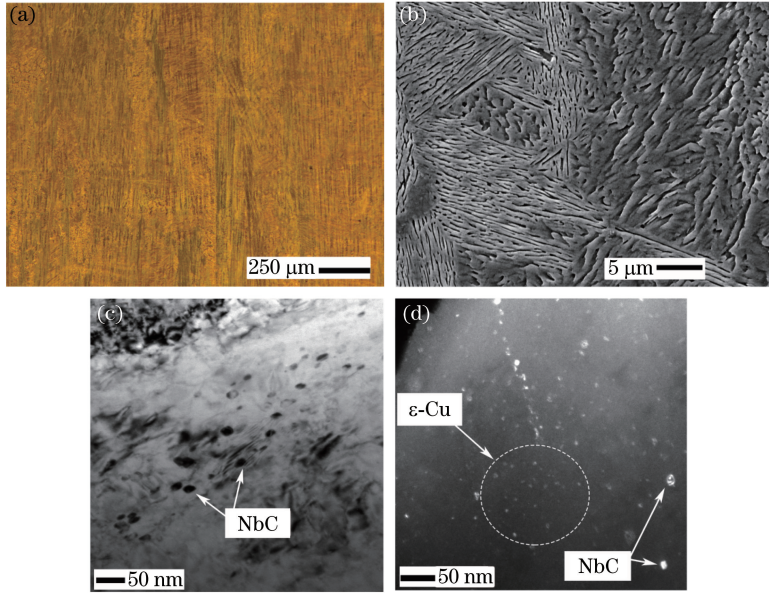


图 5 调整时效后 05Cr15Ni5Cu4Nb 不锈钢的形貌。(a)宏观形貌;(b)回火马氏体;(c) NbC;(d)  $\epsilon$ -Cu 与 NbC

Fig. 5 Morphology of 05Cr15Ni5Cu4Nb stainless steel after adjusted-aging. (a) Macro morphology; (b) tempered martensite; (c) NbC; (d)  $\epsilon$ -Cu and NbC

### 3.3 力学性能分析

表 3 为 05Cr15Ni5Cu4Nb 不锈钢的沉积态以及不同热处理态的显微硬度。可见,沉积态组织经不同热处理后显微硬度均有大幅提高,其中直接时效后硬度值最高,达到 477.6 HV;固溶时效后为 452.5 HV;调整时效后显微硬度值较低,为 399.7 HV。

表 3 激光增材制造 05Cr15Ni5Cu4Nb 不锈钢不同热处理态的显微硬度

Table 3 Microhardness of 05Cr15Ni5Cu4Nb stainless steel by laser additive manufacturing after different heat treatments

Heat treatment	As-deposited	Direct-aging	Adjusted-aging	Solution-aging
Microhardness /HV	358.5±3.4	477.6±9.8	399.7±8.3	452.5±11.1

图 7 所示为不同热处理态与沉积态激光增材制造 05Cr15Ni5Cu4Nb 不锈钢以及传统热处理(1040 °C/1 h,空冷加 485 °C/4 h,空冷)铸锻件<sup>[23]</sup>的室温拉伸性能对比。抗拉强度和屈服强度的比较结果如图 7(a)所示,可见其变化趋势与显微硬度的一致,直接时效态的最高,分别达到 1440 MPa 和 1308 MPa;固溶时效态的次之,分别为 1367 MPa 和 1280 MPa;直接时效和固溶时效的拉伸强度均达到了铸锻件水平;调整处理态的最低,分别为 1164.5 MPa 和 1132 MPa。延伸率和断面收缩率的比较结果如图 7(b)所示,可见调整时效态的最高,且优于铸锻件水平,直接时效和固溶时效的相近。相比沉积态,直接时效态和固溶时效态的组织塑性稍有降低,但强度得到大幅提升,且直接时效态的更高;调整时效态组织在保持良好塑性的情况下,强度得到了很大提升。

05Cr15Ni5Cu4Nb 马氏体沉淀硬化不锈钢的强化方式主要有相变强化、固溶强化、时效强化以及晶界强

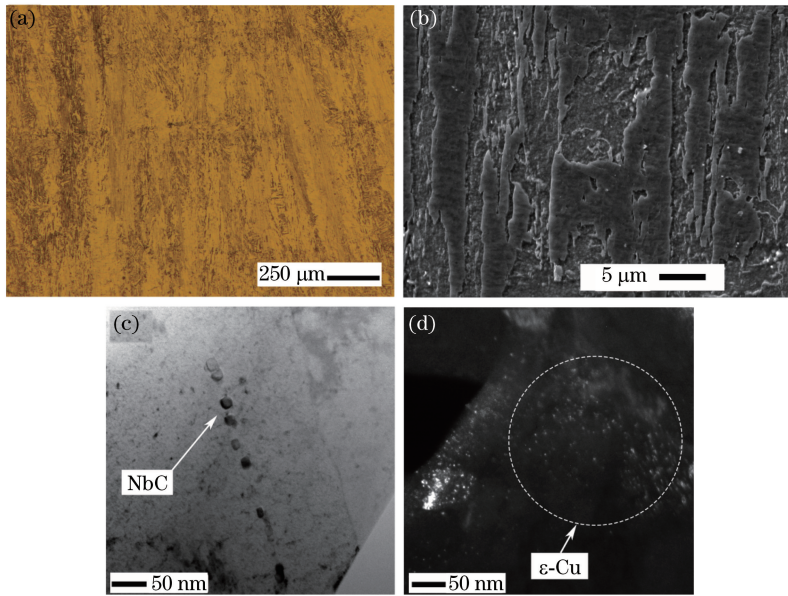


图 6 固溶时效后 05Cr15Ni5Cu4Nb 不锈钢的形貌。(a) 宏观形貌; (b) 回火马氏体; (c) NbC; (d)  $\epsilon$ -Cu  
Fig. 6 Morphology of 05Cr15Ni5Cu4Nb stainless steel after solution-aging. (a) Macro morphology; (b) tempered martensite; (c) NbC; (d)  $\epsilon$ -Cu

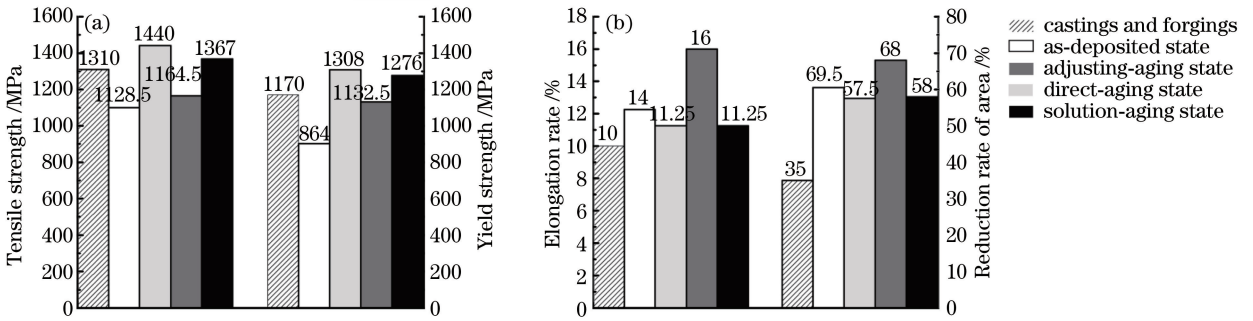


图 7 不同热处理态与沉积态激光增材制造 05Cr15Ni5Cu4Nb 沉淀硬化不锈钢及铸锻件的室温拉伸性能对比。  
(a) 抗拉强度和屈服强度; (b) 延伸率和断面收缩率

Fig. 7 Tensile property comparison among 05Cr15Ni5Cu4Nb precipitation-hardening stainless steels by laser additive manufacturing after different heat treatments, as-deposited states, and castings and forgings at room temperature.

(a) Tensile strength and yield strength; (b) elongation rate and reduction rate of area

化等<sup>[18,24]</sup>,板条马氏体兼具较高的强度和良好的塑韧性。本试验中影响激光增材制造 05Cr15Ni5Cu4Nb 不锈钢力学性能的因素主要有残余铁素体含量、 $\epsilon$ -Cu 和 NbC 析出相数量、板条马氏体尺寸等。沉积态组织由于残留了一定量的铁素体,拉伸强度降低<sup>[5]</sup>,且强化相析出较少,故强度较低。时效态组织的马氏体板条中析出了大量纳米级弥散分布的  $\epsilon$ -Cu 相,这是显微硬度和拉伸强度获得大幅提高的主要原因。此外,经时效热处理后,残余铁素体溶解,碳原子以及合金元素原子向位错等晶体缺陷处的偏聚及 NbC 的弥散析出等,起到钉扎位错作用,使位错难以运动,进一步增强了马氏体组织强度<sup>[18-20]</sup>。沉积态、调整态、固溶态组织经时效热处理后,显微组织均为回火马氏体,其中调整时效态的马氏体组织细化最明显,马氏体强度增强的同时材料获得了良好的塑性。

## 4 结 论

研究了 05Cr15Ni5Cu4Nb 不锈钢在沉积态、调整处理和固溶处理三种状态下,经 485 °C/4 h 时效后,显微组织以及力学性能的变化,得到如下结论。

1) 激光增材制造 05Cr15Ni5Cu4Nb 沉淀硬化不锈钢沉积态的组织主要由沿纵向外延生长的柱状晶组

成,柱状晶内包含多个胞状枝晶,枝晶臂为马氏体,枝晶间存在残余铁素体,降低了拉伸强度。

2) 沉积态、调整态、固溶态组织经时效热处理后,显微组织均为回火马氏体,残余铁素体消失,马氏体板条中析出大量弥散分布的纳米级  $\epsilon$ -Cu 相,NbC 颗粒弥散分布在马氏体板条中,直径为 12~20 nm。

3) 相比沉积态组织,直接时效态和固溶时效态组织的塑性稍有降低,延伸率均为 11.25%,但强度得到大幅提升,抗拉强度分别达 1440 MPa 和 1367 MPa;调整时效态组织可获得良好的强韧性配比,延伸率与抗拉强度分别为 16%和 1164.5 MPa。时效态马氏体组织中析出大量纳米级  $\epsilon$ -Cu 相和弥散分布的 NbC 颗粒是强度得到提高的主要原因,调整时效态组织的明显细化使塑性得到较大提高。

## 参 考 文 献

- [1] Laurent C, Frederic D G, Marion D, *et al.* Evolution of the microstructure of a 15-5PH martensitic stainless steel during precipitation hardening heat treatment[J]. *Mater Design*, 2016, 107: 416-425.
- [2] Weinberger T. Microstructural and mechanical characterisation of friction stir welded 15-5PH steel[J]. *Science & Technology of Welding & Joining*, 2009, 14(3): 210-216.
- [3] Bajguirani H R H. The effect of ageing upon the microstructure and mechanical properties of type 15-5 PH stainless steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2002, 338(1-2): 142-159.
- [4] Gan Yong, Tian Zhiling, Dong Han, *et al.* China materials engineering canon: Volume 3 iron and steel materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 1179.  
干 勇, 田志凌, 董 翰, 等. 中国材料工程大典: 第 3 卷钢铁材料工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 1179.
- [5] Lippold J C, Kotecki D J. *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*[M]. New York: Wiley-Interscience, 2005: 63-67.
- [6] Li J, Wang H M, Tang H B. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser melting deposited Ni-base superalloy Rene'41[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 550: 97-102.
- [7] Ran X Z, Liu D, Li A, *et al.* Microstructure characterization and mechanical behavior of laser additive manufactured ultrahigh-strength AerMet100 steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 663: 69-77.
- [8] Zhu Y Y, Liu D, Tian X J, *et al.* Characterization of microstructure and mechanical properties of laser melting deposited Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si titanium alloy[J]. *Mater Design*, 2014, 56: 445-453.
- [9] Liu Y, Li A, Cheng X, *et al.* Effects of heat treatment on microstructure and tensile properties of laser melting deposited AISI 431 martensitic stainless steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 666: 27-33.
- [10] Wang T, Zhu Y Y, Zhang S Q, *et al.* Grain morphology evolution behavior of titanium alloy components during laser melting deposition additive manufacturing[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 632: 505-513.
- [11] Wang Zhihui, Wang Huaming, Liu Dong. Microstructure and mechanical properties of AF1410 ultra-high strength steel using laser additive manufacture technique[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(4): 0403001.  
王志会, 王华明, 刘 栋. 激光增材制造 AF1410 超高强度钢组织与力学性能研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0403001.
- [12] Gäumann M, Bezençon C, Canalis P, *et al.* Single-crystal laser deposition of superalloys: Processing microstructure maps[J]. *Acta Mater*, 2001, 49(6): 1051-1062.
- [13] Wang Y D, Tang H B, Fang Y L, *et al.* Microstructure and mechanical properties of laser melting deposited 1Cr12Ni2WMoVNb steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527(18-19): 4804-4809.
- [14] Chen Yongcheng, Zhang Shuquan, Tian Xiangjun, *et al.* Microstructure and microhardness of 4045 aluminum alloy fabricated by laser melting deposition[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(3): 0303008.  
陈永城, 张述泉, 田象军, 等. 激光熔化沉积 4045 铝合金显微组织及显微硬度[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0303008.
- [15] Chen Bo, Shao Bing, Liu Dong, *et al.* Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser melting deposited TC17 titanium alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0403001.  
陈 博, 邵 冰, 刘 栋, 等. 热处理对激光熔化沉积 TC17 钛合金显微组织及力学性能的影响[J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0403001.
- [16] Hua X J, Huang J H, Nie L, *et al.* Effect of aging temperature on microstructure and corrosion behavior of 15-5PH precipitation hardened stainless steel[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2014, 34(2): 131-137.
- [17] Peng X, Zhou X, Hua X, *et al.* Effect of aging on hardening behavior of 15-5 PH stainless steel[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2015, 22(7): 607-614.

- [18] Yu Qiang, Fan Yunying, Liu Zhenbao, *et al.* Effects of aging on microstructure and mechanical properties of 15-5PH precipitation hardened stainless steel[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2013, 38(9): 16-21.  
余 强, 范云鹰, 刘振宝, 等. 时效处理对 15-5PH 沉淀硬化不锈钢组织及性能的影响[J]. *金属热处理*, 2013, 38(9): 16-21.
- [19] Qiu Zhen'an, Wang Haitao, Li Jiliang, *et al.* Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 15-5PH stainless steel[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2014, 39(5): 77-81.  
仇振安, 王海涛, 李继良, 等. 热处理工艺对 15-5PH 不锈钢组织和力学性能的影响[J]. *金属热处理*, 2014, 39(5): 77-81.
- [20] Pei Haixiang, Wang Xitao, Wang Lixin, *et al.* Effect of ageing treatment on structure and mechanical properties of precipitation-hardening martensite stainless steel 15-5PH[J]. *Special Steel*, 2012, 33(5): 47-48.  
裴海祥, 王西涛, 王立新, 等. 时效处理对 15-5PH 沉淀硬化马氏体不锈钢组织和力学性能的影响[J]. *特殊钢*, 2012, 33(5): 47-48.
- [21] Morito S, Huang X, Furuhashi T, *et al.* The morphology and crystallography of lath martensite in alloy steels[J]. *Acta Mater*, 2006, 54(19): 5323-5331.
- [22] Habibi H R. Atomic structure of the Cu precipitates in two stages hardening in maraging steel[J]. *Materials Letters*, 2005, 59(14-15): 1824-1827.
- [23] Gan Y, Tian Z L, Dong H, *et al.* China materials engineering canon[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 665.
- [24] Morito S, Yoshida H, Maki T, *et al.* Effect of block size on the strength of lath martensite in low carbon steels[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 438-440: 237-240.