

专题——激光复合制造与表面改性

预制坡口角度对激光增材再制造
IN718 合金组织与性能的影响张群莉^{1,2}, 李栋^{1,2}, 张杰^{1,2}, 姚建华^{1,2}, Volodymyr S. Kovalenko^{1,3}

(1.浙江工业大学 激光先进制造研究院, 杭州 310014; 2.浙江省高端激光制造装备协同创新中心, 杭州 310014; 3.乌克兰国立科技大学 激光技术研究所, 乌克兰 基辅 03056)

摘 要: **目的** 研究在激光增材再制造 IN718 合金过程中, 不同预制坡口角度对其组织与性能的影响。**方法** 利用激光增材再制造技术对不同预制凹槽进行逐层叠加修复, 采用光学显微镜观察显微组织, 采用扫描电镜观察断口形貌, 采用维氏硬度计对再制造试样进行硬度测量, 采用残余应力测试仪测量再制造后基体表面的残余应力, 采用万能拉伸试验机进行拉伸力学性能测试。**结果** 当预制坡口角度大于 130°时, 能得到无组织缺陷、成形质量良好的增材再制造试样; 当预制坡口角度小于 110°时, 修复界面会出现熔合不良现象, 且修复区内部会出现裂纹。预制大的坡口角度进行激光增材再制造试验能获得组织更加细密、硬度分布更为均匀的再制造层, 且大的坡口角度能有效降低再制造试样基体的残余应力。增大坡口角度有助于提高再制造试样的塑性, 随着坡口角度的减小, 再制造试样的力学性能变差。**结论** 在进行激光增材再制造试验时, 不宜预制过小的坡口角度, 应根据损伤情况预制坡口角度较大的凹槽, 有助于增加再制造成形件的组织均匀性, 提高其力学性能。

关键词: 激光增材再制造; IN718 高温合金; 坡口角度; 显微组织; 残余应力; 拉伸性能

中图分类号: V261.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)05-0090-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.05.014

Influence of Pre-fabricated Groove Angle on Microstructure and Properties of Laser Additive Remanufactured IN718 Alloy

ZHANG Qun-li^{1,2}, LI Dong^{1,2}, ZHANG Jie^{1,2}, YAO Jian-hua^{1,2}, Volodymyr S. Kovalenko^{1,3}

(1.Institute of Laser Advanced Manufacturing, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2.Zhejiang Provincial Collaborative Innovation Center of High-end Laser Manufacturing Equipment, Hangzhou 310014, China; 3. Laser Technology Research Institute, National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute", Kiev 03056, Ukraine)

ABSTRACT: The work aims to investigate the influence of different pre-fabricated groove angles on the microstructure and properties of laser additive remanufactured IN718 alloy. The pre-fabricated grooves were repaired layer by layer by laser addi-

收稿日期: 2018-12-04; 修订日期: 2019-02-14

Received: 2018-12-04; Revised: 2019-02-14

基金项目: 国家自然科学基金 (51605441); 浙江省公益技术应用研究项目 (2017C31048); 高等学校学科创新引智计划资助 (110000213920168001)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51605441); Zhejiang Provincial Commonweal Technology Application Research Project (2017C31048); the Programme of Introducing Talents of Discipline to Universities (110000213920168001)

作者简介: 张群莉 (1979—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为激光复合制造工艺技术及应用。

Biography: ZHANG Qun-li (1979—), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: laser hybrid manufacturing technology and application.

通讯作者: 姚建华 (1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为激光复合制造工艺技术及应用。邮箱: laser@zjut.edu.cn

Corresponding author: YAO Jian-hua (1965—), Male, Doctor, Professor, Research focus: laser hybrid manufacturing technology and application. E-mail: laser@zjut.edu.cn

tive remanufacturing technology. The microstructure and fracture morphology of the remanufactured samples were observed by optical microscope and scanning electron microscopy, respectively. The hardness, residual stress and tensile mechanical properties of the remanufactured samples were measured by Vickers hardness tester, residual stress tester and universal tensile tester, respectively. When the pre-fabricated groove angle was greater than 130°, the additive remanufactured samples without structural defects and good forming quality could be obtained. When the pre-fabricated groove angle was lower than 110°, the fusion interface might be poorly fused, and cracking might occur on the repaired area. The pre-fabricated larger groove angle could obtain remanufactured samples with finer structure and more uniform hardness distribution during laser additive remanufacturing experiment, and the larger groove angle could reduce the residual stress of the remanufactured sample matrix. Increasing the groove angle could significantly improve the plasticity of the remanufactured samples. As the groove angle decreased, the mechanical properties of the remanufactured samples deteriorated. During the laser additive remanufacturing process, it is not suitable to pre-fabricate too small groove angle, the groove with larger groove angle should be pre-fabricated according to the damage condition, which is beneficial to improving the uniformity and mechanical properties of the remanufactured sample.

KEY WORDS: laser additive remanufacturing; IN718 alloy; groove angle; microstructure; residual stress; tensile property

IN718 高温合金（中国对应牌号 GH4169）作为现代工业高温零部件所需的重要结构材料,在 650 ℃ 以下温度具有较高的强度、良好的塑性,同时具有良好的耐腐蚀性能、蠕变性能以及抗高温氧化性能^[1-4]。由于 IN718 合金零部件的工作环境比较恶劣,在长期服役过程中难免会出现冲蚀、磨损和裂纹等缺陷,如果继续使用,会带来巨大的安全隐患,若更换缺损零件,则造成巨大的浪费,增加生产成本。基于绿色、经济、环保的制造理念,可以采取再制造的方法来修复 IN718 合金的损伤缺陷^[5-7]。激光增材再制造技术具有热变形小、热影响区小以及柔性化制造等特点^[8-10],在重要零部件的修复问题上表现出巨大的技术优势和应用潜力。

针对穿透性裂纹损伤问题,通常需要在修复前对损伤部位进行切除处理。在实验室研究中,一般用预制凹槽来模拟实际切除过程。卞宏友等^[11]通过预制凹槽研究了扫描方式对激光沉积修复 GH4169 合金修复件的残余应力、微观组织及拉伸性能的影响,发现短边扫描有利于提高修复件的室温拉伸性能。Jianli Song 等^[12]采用激光熔覆方法成功修复了预制的 V 形槽,发现修复层的性能高于基材。赵剑峰等^[13]采用镍基高温合金 FGH95 粉末对 GH4169 合金进行激光修复试验,研究表明,当激光能量密度为 100 J/mm²

时,修复试样的高温抗拉强度达到了无损试样的 90.4%,其屈服强度超过无损试样的 4.3%。然而大部分研究都侧重于某一固定坡口角度损伤修复后的组织和性能,对预制坡口角度对修复质量的影响鲜有研究。

本文针对 IN718 合金常规的损伤形式,预制一定坡口角度的凹槽,并采用激光增材再制造技术逐层叠加修复缺损区域,研究不同坡口角度凹槽对再制造试样的成形质量、微观组织、显微硬度、残余应力以及相关力学性能的影响规律。

1 试验材料与方法

试验采用的基材为 IN718 高温合金板材(尺寸为 100 mm × 80 mm × 15 mm),出厂前经过固溶处理。粉末采用粒径为 53~150 μm 的气雾化 IN718 球形粉。表 1 为基材和粉末的化学成分。试验前用线切割在基板上预制不同角度的凹槽,凹槽尺寸如图 1 所示(α 分别为 150°、140°、130°、110°、90°)。凹槽部分用粗砂纸打磨露出新鲜金属光泽后,继续打磨到 1000# 砂纸,而后用酒精清洗,并吹干。激光再制造试验前,在真空烘干箱内对熔覆粉末进行烘干除湿处理,烘干温度为 120 ℃,保温时间大于 4 h。

表 1 IN718 基体材料与 IN718 粉末的化学成分
Tab.1 Chemical composition of IN718 substrate and IN718 powder

Materials	wt. %									
	Fe	Al	Ti	Nb	Cr	Mo	Si	C	Mn	Ni
IN718 Substrate	17.45	0.70	1.00	5.00	19.00	3.00	0.30	0.072	0.20	Bal.
IN718 Powder	18.10	0.54	0.97	4.92	19.20	3.19	0.20	0.045	0.04	Bal.

激光增材再制造 IN718 合金所采用的激光设备是 Laserline 2 kW 光纤耦合半导体激光器,额定功率为 2 kW,运动机构为 ABB 机械手臂,采用同轴送粉方式输送 IN718 合金粉末,采用氩气作为载气和保护

气体。经过前期的激光成形工艺优化试验,选取激光增材再制造工艺参数如表 2 所示。激光增材再制造过程的扫描方式选择长边扫描,即激光沿着 80 mm 的边进行扫描。

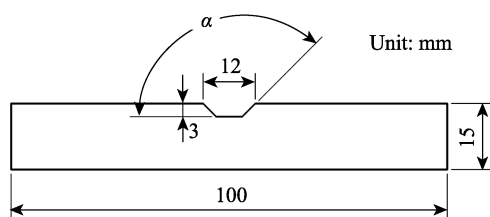


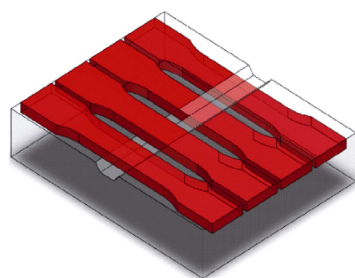
图1 预制凹槽试样示意图

Fig.1 Schematic diagram of prefabricated groove sample

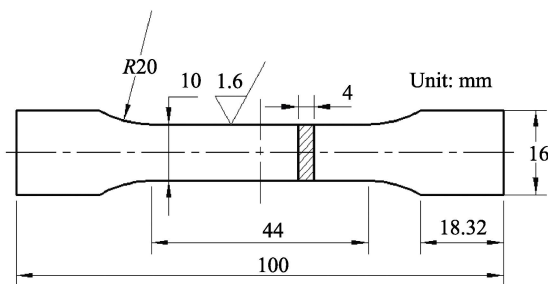
表2 激光增材再制造工艺参数
Tab.2 Laser additive remanufacturing processing parameters

Laser power/W	Scanning velocity/(mm·s ⁻¹)	Powder feeding rate/(g·min ⁻¹)	Overlap ratio/%	Increment of Z/mm
900	6	10	40	0.64

激光再制造后,用线切割切取横截面试样,用砂纸打磨并抛光至镜面。金相试样采取标准制样方法,



a 取样位置



b 拉伸试样尺寸

图3 拉伸试样

Fig.3 Tensile sample: (a) sampling position; (b) tensile sample size

2 结果与讨论

2.1 再制造成形件宏观形貌

图4为不同坡口角度凹槽激光增材再制造后的横截面宏观形貌。从图4中可以看出,坡口角度为150°和130°时,基材与修复区域之间形成良好的冶金

结合,修复区域未发现组织缺陷;坡口角度为110°时,可观察到修复界面开始出现了熔合不良缺陷;当坡口角度减小到90°时,基材与修复区域界面出现更大面积的连续分布的熔合不良缺陷,且在修复区内部有裂纹出现。如果令 q 为单位面积激光能量密度, α 为斜面与水平方向的夹角(如图1所示),则单位面积斜面吸收的能量为 $q \cdot \cos(180^\circ - \alpha)$ 。因此坡口角度 α

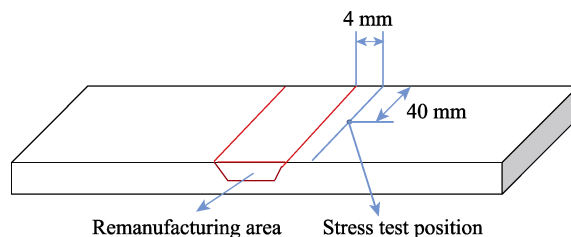


图2 残余应力测试点示意图

Fig.2 Schematic diagram of residual stress test point

结合,修复区域未发现组织缺陷;坡口角度为110°时,可观察到修复界面开始出现了熔合不良缺陷;当坡口角度减小到90°时,基材与修复区域界面出现更大面积的连续分布的熔合不良缺陷,且在修复区内部有裂纹出现。如果令 q 为单位面积激光能量密度, α 为斜面与水平方向的夹角(如图1所示),则单位面积斜面吸收的能量为 $q \cdot \cos(180^\circ - \alpha)$ 。因此坡口角度 α

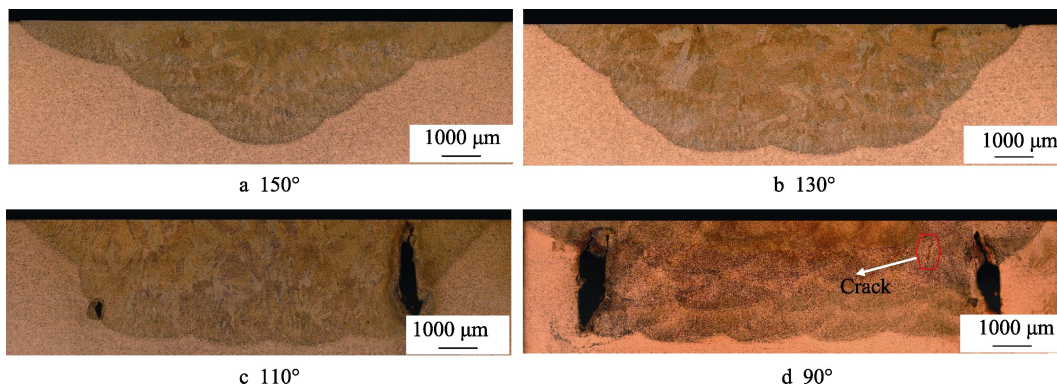


图4 不同坡口角度凹槽激光增材再制造试样横截面宏观形貌

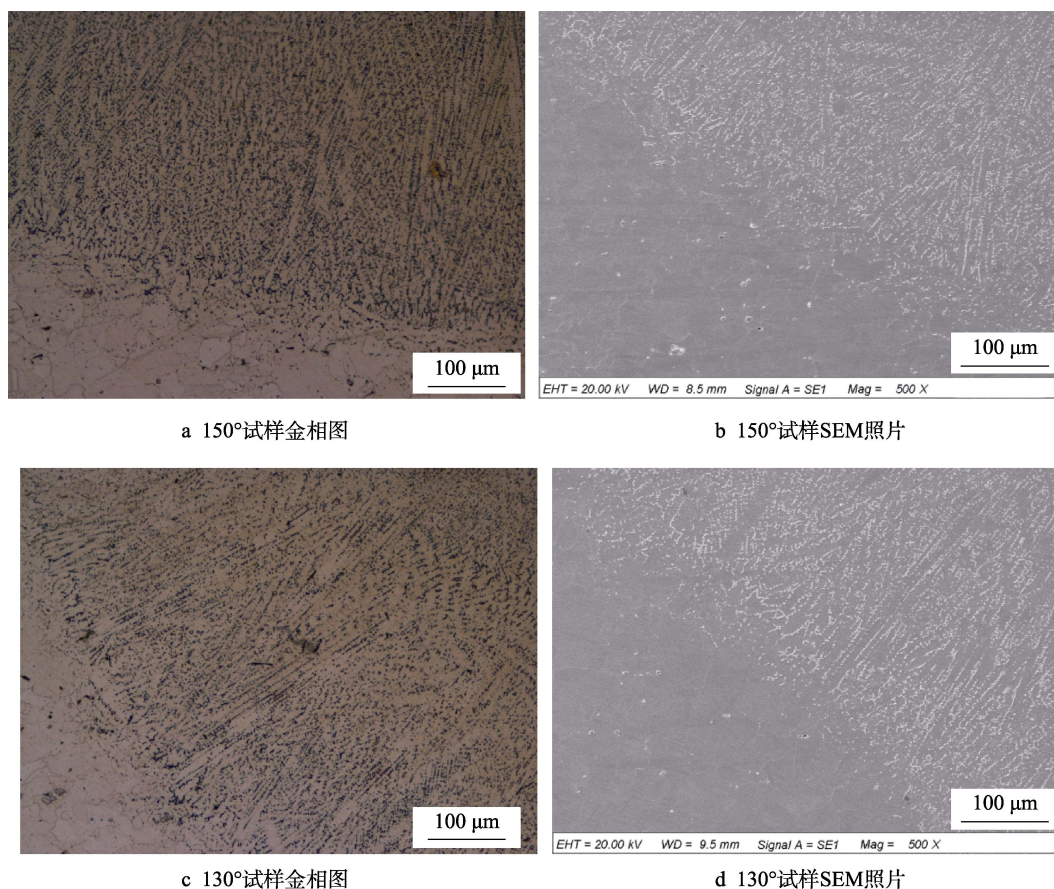
Fig.4 Macroscopic morphology for cross-section of laser additive remanufactured samples in different groove angles

越小,单位面积斜面吸收的激光能量越小。当 α 减小到某一阈值时,单位面积斜面吸收的激光能量不足以使修复界面完全熔化^[14],进而导致修复界面结合处出现熔合不良现象,且随着坡口角度的继续减小,修复界面的熔合不良缺陷增多。

2.2 再制造成形件显微组织

图 5 为不同坡口角度凹槽激光增材再制造后的显微组织。观察图 5a、5c 可知,不同坡口角度凹槽的修复区域组织特征相同,修复区域的组织均为取向性较强的柱状晶,具有外延生长的特点,且侧壁枝晶

生长方向趋于垂直侧壁方向。这与激光熔覆时总的热量的扩散方向有关,熔池与基体界面处的形核过冷度最低,提供了很好的形核基底,从而导致熔池随后的冷却凝固呈现出外延柱状生长特点^[15]。激光增材再制造试样显微组织的 SEM 图如图 5b、5d 所示,激光熔覆 IN718 合金在枝晶间析出了白色的 Laves 相,且坡口角度 150°试样的 Laves 相要比坡口角度 130°试样更细密,这是因为 150°凹槽修复体积小于 130°凹槽修复体积,导致总的热输入量变小,冷却凝固速率加快,Laves 相更均匀细密。



a 150°试样金相图

b 150°试样SEM照片

c 130°试样金相图

d 130°试样SEM照片

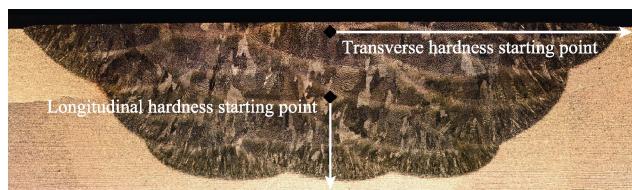
图 5 不同坡口角度凹槽激光增材再制造试样显微组织

Fig.5 Microstructure of laser additive remanufactured samples in different groove angles:(a) metallographic image 150° sample; (b) SEM image of 150° sample; (c) metallographic image of 130° sample; (d) SEM image of 130° sample

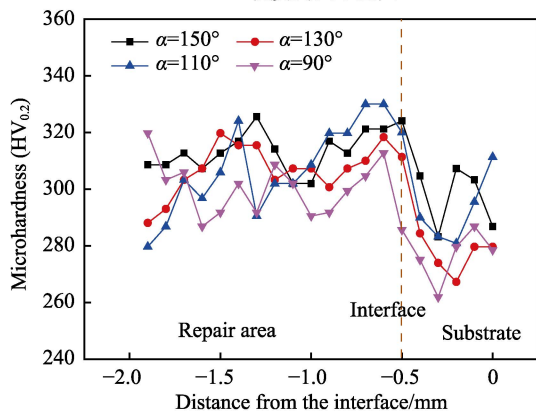
2.3 再制造成形件显微硬度

硬度是反映材料性能的重要指标,不同位置硬度的变化规律对试件不同位置的强度以及试件的修复质量有着十分重要的意义。图 6 是不同坡口角度凹槽激光增材再制造试样显微硬度测试示意图和横纵向硬度分布曲线。从修复区域横截面正中心往下,每隔 0.1 mm 作为一个测量位置,进行纵向硬度测量,如图 6a 所示。从图 6b 可以看出,四种坡口角度凹槽再制造件的显微硬度变化趋势相同,硬度从熔覆层到热

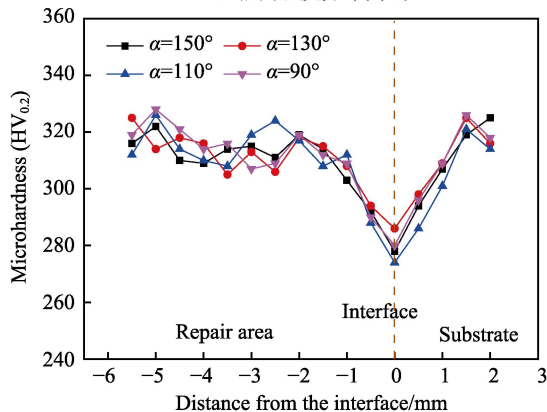
影响区有递减趋势,热影响区由于激光能量的累积,相当于对其进行了回火处理,使其硬度降低。150°、130°、110°、90°的凹槽修复区域的平均硬度分别为 314、307、309、300HV_{0.2},平均硬度差异很小,但明显可以看出,150°和 130°的凹槽修复区域的显微硬度分布更均匀,说明较大坡口角度的激光增材再制造件具有更好的组织均匀性。从修复表面正中心往右,每隔 0.5 mm 作为一个测量位置,进行横向硬度测量,由图 6c 可知,四种坡口角度凹槽再制造件表面硬度分布较均匀,平均硬度都在(313±15)HV_{0.2}范围内变化。



a 硬度测试示意图



b 纵向硬度分布曲线



c 横向硬度分布曲线

图6 不同坡口角度凹槽激光增材再制造
试样显微硬度分布图

Fig.6 Microhardness distribution of laser additive remanufactured samples in different groove angles: (a) hardness test diagram; (b) longitudinal hardness distribution curve; (c) transverse hardness distribution curve

2.4 再制造成形件残余应力

表3为不同坡口角度凹槽激光增材再制造试样基体表面残余应力的测试数据,其中 σ_x 为垂直于激光扫描速度方向的残余应力, σ_y 为平行于激光扫描速度方向的残余应力。由表3可知,在预制坡口式激光增材再制造试样基体上的残余应力为压应力,这是因为在激光增材再制造过程中,基体与修复区熔池之间产生很大的温度梯度,当高能量密度的激光束到达修复区域时,粉末和基体瞬时熔化,体积受热产生膨胀,但又受到周围较冷区域的约束作用,最终导致基体上的残余应力为压应力,这与激光焊接不锈钢时残余应力的分布规律一致^[16]。

图7为不同坡口角度凹槽激光增材再制造试样

基体残余应力变化折线图,可以看出,当修复区域与基体结合良好时,即坡口角度 α 为 150° 、 140° 、 130° 时, σ_x 、 σ_y 随着坡口角度的减小而增大。这是因为减小坡口角度使得修复区域的体积变大,总的热输入变大,引起基体与修复区域之间的温度梯度增大,进而使得残余应力有一定程度的增大。然而随着坡口角度继续减小, σ_x 、 σ_y 有一定程度的减小,这与修复界面出现熔合不良缺陷有关。

表3 不同坡口角度凹槽激光增材再制造试样残余应力
Tab.3 Residual stress of laser additive remanufactured samples in different groove angles

		MPa			
α	Residual stress	1	2	3	Average
150°	σ_x	-224	-316	-243	-261
	σ_y	-8	-36	-42	-29
140°	σ_x	-432	-476	-456	-455
	σ_y	-158	-162	-173	-164
130°	σ_x	-758	-650	-720	-709
	σ_y	-346	-359	-320	-342
110°	σ_x	-562	-576	-546	-561
	σ_y	-506	-519	-502	-509
90°	σ_x	-540	-524	-530	-531
	σ_y	-187	-217	-220	-208

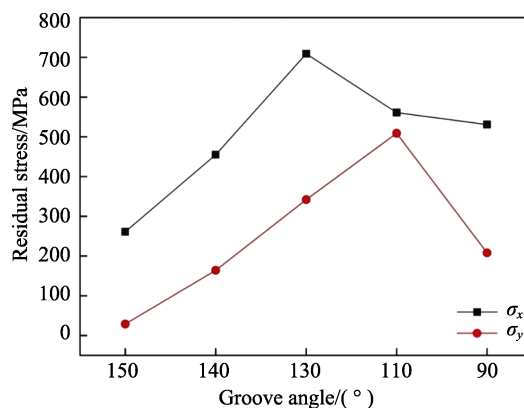


图7 不同坡口角度凹槽激光增材再制造试样
残余应力变化折线图

Fig.7 Residual stress change line diagram of laser additive remanufactured samples in different groove angles

2.5 再制造成形件拉伸性能

图8为不同坡口角度凹槽激光增材再制造试样的室温拉伸性能测试数据,可知坡口角度为 150° 和 140° 的试样抗拉强度差异很小,当坡口角度减小到 130° 时,抗拉强度为798 MPa,较 150° 坡口角度的试样降低了12%;断后延伸率随着坡口角度的减少而明显减小,从 150° 的15.25%降低到 130° 的6%,降低了60.7%。图9为拉伸试样断裂位置,可以看出,试

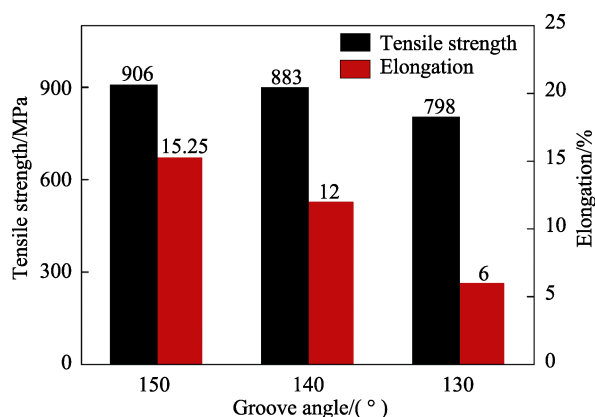


图 8 不同坡口角度凹槽激光增材再制造试样拉伸性能比较

Fig.8 Comparison of tensile properties of laser additive remanufactured samples in different groove angles

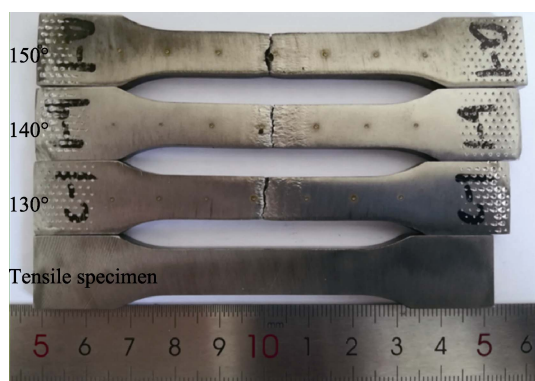
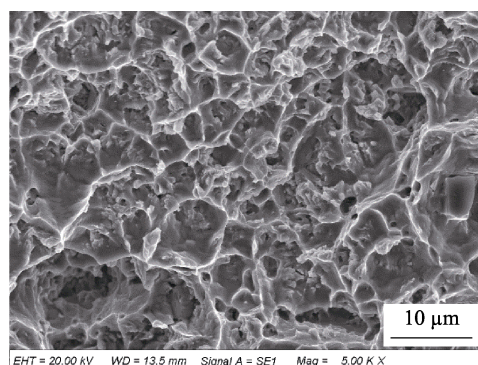


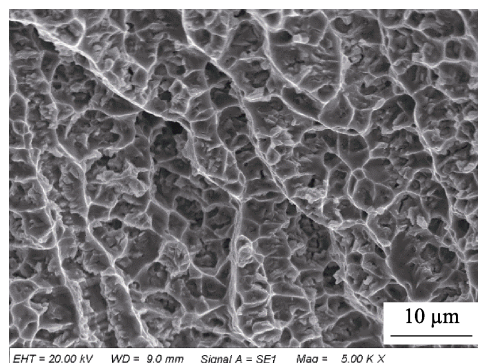
图 9 不同坡口角度凹槽激光增材再制造试样拉伸测试后
Fig.9 Samples after tensile test of laser additive remanufactured samples in different groove angles

样断裂位置均位于修复凹槽内部而非侧壁结合处,进一步表明侧壁与修复区域形成了良好的冶金结合。激光增材再制造试样的抗拉强度均低于锻件标准(抗拉强度为 1276 MPa^[17]),但 150°和 140°降低的断后延伸率达到锻件标准,130°降低的断后延伸率低于锻件标准(断后延伸率为 12%^[17])。沉积态修复区域内含有脆硬 Laves 相,激光增材再制造 IN718 合金是一个快速非平衡凝固过程,导致强化相 γ'' 和 γ' 没有充足的时间析出来,因此,沉积态修复试样的抗拉强度均低于锻件标准水平。随着坡口角度的减小,修复体积增大,需要修复的总道数增多,总热输入变大,导致后面几层的冷却速率较低,而冷却速率的降低会引起 Laves 相尺寸变大和含量增多^[18],进而导致拉伸性能变差。激光增材再制造 IN718 合金的拉伸性能与拉伸方向的组织形态有密切关系,本文 2.2 节发现侧壁树枝晶的生长方向与侧壁垂直,可以推算出拉伸方向与侧壁树枝晶的夹角为 $\alpha-90^\circ$,即随着坡口角 α 的减小,拉伸方向与侧壁树枝晶的夹角变小,此时树枝晶晶界对受力变形产生的阻碍作用变弱,结果导致强度和塑性降低,这与席明哲等的研究结果^[19]一致。

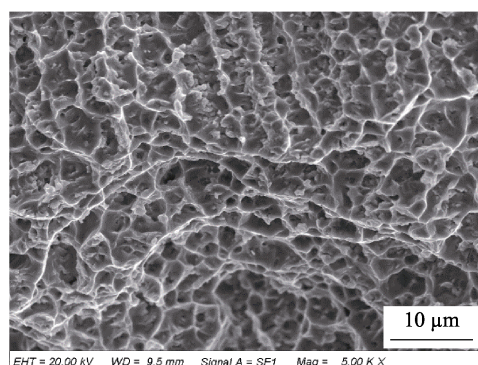
图 10 为不同坡口角度凹槽激光增材再制造试样室温拉伸微观断口。从微观的韧窝形貌来看,各试样断口的韧窝沿柱状枝晶方向排列,可见各试样的断裂失效模式均为穿晶韧性断裂。但大坡口角度的再制造试样具有大而深的韧窝,随着坡口角度的减小,韧窝尺寸变得小而浅,这就说明大坡口角度的再制造试样的塑性要高于较小坡口角度再制造试样,与拉伸测试性能所得数据相对应。



a 150°试样



b 140°试样



c 130°试样

图 10 不同坡口角度凹槽激光增材再制造试样室温拉伸微观断口

Fig.10 Notch tensile fracture of laser additive remanufactured samples in different groove angles (a) 150° sample;(b) 140° sample; (c) 130° sample

3 结论

1) 当预制坡口角度大于 130°时,可获得无组织

缺陷、成形质量良好的增材再制造试样；当预制坡口角度小于 110° 时，修复界面出现熔合不良现象，且在修复区内部出现裂纹。

2) 预制大坡口角度进行激光增材再制造，可获得组织更加细密、硬度分布更为均匀的再制造试样，且大坡口角度能有效降低再制造区域的残余应力。

3) 增大坡口角度能显著提高再制造试样的塑性，随着坡口角度的减小，再制造试样的力学性能变差。

参考文献:

- [1] 谢锡善, 董建新, 付书红, 等. γ' 和 γ 相强化的 Ni-Fe 基高温合金 GH4169 的研究与发展[J]. 金属学报, 2010, 46(11): 1289-1302.
XIE Xi-shan, DONG Jian-xin, FU Shu-hong, et al. Research and development of γ' and γ strengthened Ni-Fe base superalloy GH4169[J]. Acta metallurgica sinica, 2010, 46(11): 1289-1302.
- [2] 赵卫卫, 林鑫, 刘奋成, 等. 热处理对激光立体成形 Inconel718 高温合金组织和力学性能的影响[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3220-3225.
ZHAO Wei-wei, LIN Xin, LIU Fen-cheng, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser solid forming Inconel 718 superalloy[J]. Chinese journal of lasers, 2009, 36(12): 3220-3225.
- [3] JOHNSON A S, SHAO S, SHAMSAEI N, et al. Microstructure, fatigue behavior, and failure mechanisms of direct laser deposited Inconel 718[J]. The journal of the minerals, metals & materials society, 2017, 69(3): 597-603.
- [4] ZHAOX, CHEN J, LIN X, et al. Study on microstructure and mechanical properties of laser rapid forming Inconel 718[J]. Materials science & engineering A, 2008, 478(1): 119-124.
- [5] KUMAR L J, NAIR C G K. Laser metal deposition repair applications for Inconel 718 alloy[J]. Materials today proceedings, 2017, 4(10): 11068-11077.
- [6] PETRAT T, GRAF B, GUMENYUK A, et al. Laser metal deposition as repair technology for a gas turbine burner made of Inconel 718[J]. Physics procedia, 2016, 83: 761-768.
- [7] 徐滨士, 董世运, 朱胜, 等. 再制造成形技术发展及展望[J]. 机械工程学报, 2012, 48(15): 96-105.
XU Bin-shi, DONG Shi-yun, ZHU Sheng, et al. Prospects and developing of remanufacture forming technology [J]. Journal of mechanical engineering, 2012, 48(15): 96-105.
- [8] WANG M, LIN X, HUANG W. Laser additive manufacture of titanium alloys[J]. Materials & processing report, 2015, 31(2): 90-97.
- [9] SCHMIDTKE K, PALM F, HAWKINS A, et al. Process and mechanical properties: Applicability of a scandium modified Al-alloy for laser additive manufacturing[J]. Physics procedia, 2011, 12(1): 369-374.
- [10] 王志坚. 装备零件激光再制造成形零件几何特征及成形精度控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
WANG Zhi-jian. Research of geometric characteristics and shaping control of formed structure in laser remanufacturing equipment parts[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [11] 卞宏友, 董文启, 王世杰, 等. GH4169 薄壁零件表面损伤的激光沉积修复试验研究[J]. 中国激光, 2016, 43(10): 90-96.
BIAN Hong-you, DONG Wen-qi, WANG Shi-jie, et al. Experimental study on laser deposition repair of surface damage of GH4169 thin-walled components[J]. Chinese journal of lasers, 2016, 43(10): 90-96.
- [12] SONG J, DENG Q, CHEN C, et al. Rebuilding of metal components with laser cladding forming[J]. Applied surface science, 2006, 252(22): 7934-7940.
- [13] 赵剑峰, 成诚, 谢得巧, 等. 激光修复 GH4169 镍基高温合金的高温拉伸性能[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 167-172.
ZHAO Jian-feng, CHENG Cheng, XIE De-qiao, et al. High-temperature tensile property of GH4169 nickel-based superalloys by laser repair[J]. Chinese journal of lasers, 2016, 43(8): 167-172.
- [14] 罗登, 路媛媛, 郭溪溪, 等. 单晶高温合金 V 槽的激光修复工艺研究[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 31-37.
LUO Deng, LU Yuan-yuan, GUO Xi-xi, et al. Laser repairing process of V-groove in single-crystal superalloy[J]. Chinese journal of lasers, 2016, 43(5): 31-37.
- [15] 俞照辉, 李东. 侧向送丝不锈钢光纤激光熔覆技术研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(24): 134-137.
YU Zhao-hui, LI Dong. Investigation of laser cladding on stainless steel with wire feeding[J]. Hot working technology, 2015, 44(24): 134-137.
- [16] 卢海飞, 鲁金忠, 张文泉, 等. 激光冲击 316L 不锈钢焊接件的模拟分析与试验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 336-343.
LU Hai-fei, LU Jin-zhong, ZHANG Wen-quan, et al. Simulation analysis and experimental study of 316L stainless steel weldments processed by laser shock peening[J]. Laser & optoelectronics progress, 2017, 54(10): 336-343.
- [17] QI H, AZER M, RITTER A. Studies of standard heat treatment effects on microstructure and mechanical properties of laser net shape manufactured Inconel 718[J]. Metallurgical & materials transactions A, 2009, 40(10): 2410-2422.
- [18] 李栋, 张群莉, 张杰, 等. 不同气氛对激光熔覆 IN718 涂层形貌、组织与性能的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(7): 185-190.
LI Dong, ZHANG Qun-li, ZHANG Jie, et al. Influence of atmospheres on morphology, microstructure and properties of laser cladding IN718 coatings[J]. Surface technology, 2018, 47(7): 185-190.
- [19] 席明哲, 高士友. 激光快速成形 Inconel 718 超合金拉伸力学性能研究[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 68-73.
XI Ming-zhe, GAO Shi-you. Research on tensile properties of Inconel 718 superalloy fabricated by laser rapid forming process[J]. Chinese journal of lasers, 2012, 39(3): 68-73.