

激光沉积修复GH4169合金热处理的组织及性能

卞宏友¹ 赵翔鹏^{1*} 杨光¹ 钦兰云¹ 王维¹ 王世杰² 任宇航¹

¹沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 辽宁 沈阳 110136

²沈阳工业大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870

摘要 激光沉积修复GH4169合金强度与塑性仅达到铸件标准Q/5B 453-1995,热处理是改善其力学性能的重要手段。研究了不同热处理工艺对激光沉积修复GH4169合金显微组织和拉伸性能的影响规律,结果表明:激光沉积修复GH4169合金试样经直接时效热处理后,与沉积态相比,枝晶间的Laves相少量溶解,拉伸强度提高,与锻件标准Q/3B 548-1996(高强)相当,而塑性略有下降;且随着时效时间的延长,试样拉伸强度与塑性没有提高。修复试样经固溶处理后,Laves相部分溶解,并在其周围析出大量针状 δ 相,拉伸强度达到锻件标准,断后伸长率比沉积态提高21%;修复试样经均匀化处理,Laves相基本溶解,在晶界及晶内均析出了 δ 相,拉伸强度接近锻件标准,断后伸长率超过了锻件标准27.1%。试验表明合适的热处理能有效提高激光沉积修复GH4169合金的强度与塑性。

关键词 激光光学;激光沉积修复;GH4169合金;热处理;显微组织;力学性能

中图分类号 TG156.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1206001

Microstructure and Properties of Heat Treatment GH4169 Alloy by Laser Deposition Repair

Bian Hongyou¹ Zhao Xiangpeng¹ Yang Guang¹ Qin Lanyun¹ Wang Wei¹
Wang Shijie² Ren Yuhang¹

¹Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang, Liaoning 110136, China

²School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China

Abstract Strength and plasticity of laser deposition repair GH4169 alloy reach only the casting standard Q/5B 453-1995. Heat treatment is an important method to improve the mechanical property. The effects of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of laser deposition repair GH4169 alloy are investigated. As compared with as-deposited (AD) samples, after the direct aged (DA) heat treatment for laser deposition repair GH4169 alloy, the interdendritic Laves phase is slightly dissolved, the tensile strength of DA samples increase obviously, equaling to the wrought standard of Q/3B548-1996 at room temperature, however, the plasticity of DA samples decreases slightly. The strength and plasticity of DA samples is not improved when prolonging aged time. The solution heat treatment results in further dissolution of Laves phase and precipitation of a large number of needle δ phase around it, the tensile strength of the solution samples reach the wrought standard, the elongation after fracture increase by 21% compared with as-deposited samples. The homogenization heat treatment results in almost entirely dissolution of Laves phase, and the δ phase is precipitated in the grain and grain boundary, the tensile strength of the homogenization samples is roughly equivalent to the wrought standard, the elongation after fracture surpassed the wrought standard by 27.1%. The results show that the strength and plasticity of laser deposition repair GH4169 alloy can be effectively improved by the suitable heat treatment.

收稿日期: 2015-07-15; 收到修改稿日期: 2015-08-01

基金项目: 国家自然科学基金(51375316)、辽宁省自然科学基金(201202173)、航空科学基金(2014ZE54028)、辽宁省高等学校科学研究(L2014054)

作者简介: 卞宏友(1975—),男,博士,副教授,主要从事激光沉积成形/修复技术方面的研究。E-mail: bhy@sia.cn

*通信联系人。E-mail: xiangpengzhao@163.com

Key words laser optics; laser deposition repair; GH4169 alloy; heat treatment; microstructure; mechanical property

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引 言

GH4169(美国牌号 Inconel 718)是一种时效沉淀强化的镍基超合金,因其良好的高温力学性能,被广泛应用于航空发动机、燃气轮机以及核工业领域。在航空发动机领域,主要用于制造机匣、叶片和涡轮盘等高温端部件,占发动机总质量的30%以上^[1-2]。高温合金零部件在制造和服役过程中不可避免地出现机加超差、磨损或疲劳裂纹等损伤失效情况。激光沉积修复技术具有热影响区小、工艺重复性好及可实现缺损部位近净成形修复等优点,在GH4169合金等贵重金属零件的快速修复方面表现出明显的技术优势和巨大的应用前景^[3-5]。

激光沉积修复属于快速熔凝,沉积态组织通常是亚稳态的,且快速冷却也抑制了强化相的充分析出,使得修复试样强度与塑性仅达到铸件标准。Zhong等^[6]针对 Inconel 738单晶叶片进行了激光沉积修复,修复后工件的拉伸性能达到了基体的80%。为满足某些修复件的性能要求,有必要进一步优化调整修复区显微组织以改善修复件力学性能,而热处理是其重要手段^[7]。Blackwell^[8]、赵卫卫等^[9]研究了激光沉积成形 Inconel 718合金,发现经热处理后 Inconel 718成形件的强度可达到甚至超过锻件的水平。席明哲等^[10]研究了激光沉积成形 Inconel 718合金的各向异性问题,经过热处理后3个相互垂直方向上的拉伸力学性能均大幅度提高,达到了锻件拉伸力学性能标准。

本文研究了直接时效热处理、固溶+时效热处理以及均匀化+固溶+时效热处理对激光沉积修复GH4169合金试样显微组织和力学性能的影响,并讨论了热处理工艺对显微组织的影响规律以及显微组织与力学性能之间的关系,为修复件的热处理工艺优化提供了指导依据。

2 试验材料与方 法

激光沉积修复GH4169合金试样在沈阳航空航天大学构建的LDM-800系统上完成,该系统由6kW光纤激光器、悬臂式三轴平移运动系统、集成冷却和保护气系统的同轴熔覆头、双桶送粉器、气体循环净化系统以及氩气保护箱等组成。采用SGM.VB30/12G型箱式电阻炉在充氩条件下对修复试样进行热处理。

修复试样的基体材料为时效处理的GH4169镍基合金;粉末材料为 Inconel 718球形粉末,粒度为53~150 μm,基体与粉末材料的化学成分如表1所示。根据GH4169合金薄壁类零件的裂纹损伤结构特点,修复试样基体尺寸为200 mm×100 mm×3 mm,加工成贯通槽形式,如图1(a)所示:槽长(L)30 mm,上沿宽(W)14 mm,高(H)3 mm,坡角(θ)30°。

表1 GH4169和 Inconel 718合金粉末的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of GH4169 and Inconel 718 powders (mass fraction, %)

Elements	C	Mo	Ni	Fe	Cr	Al	Ti	Nb
GH4169	0.046	2.92	51.96	Bal.	18.16	0.48	1.04	5.02
Inconel 718	0.03	3.17	53	Bal.	19.2	0.54	0.65	5.16

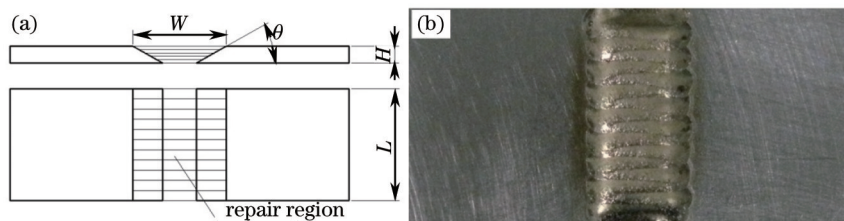


图1 (a) 修复件槽损伤试样示意图; (b) 激光沉积修复试样

Fig.1 (a) Schematic diagram of defects through-groove damage; (b) laser deposition repair specimens

采用多道多层沉积方式修复试样,修复过程中在贯通槽下方添加一块背板,用于承接粉末并作为形成熔池的基体;激光沉积修复工艺参数为:激光功率1400 W,扫描速度7 mm/s,送粉速率6.5 g/min,搭接率40%,层高0.5 mm。图1(b)为实际的激光沉积修复试样。修复试样采用的热处理工艺制度如表2所示。

表2 激光沉积修复GH4169合金热处理工艺制度

Table 2 Heat treatment for GH4169 alloy of laser deposition repair

Samples	Heat treatment
As-deposited	—
1#	720 °C/8 h(50 °C/h, FC)to 620 °C/8 h, AC
2#	720 °C/16 h(50 °C/h, FC)to 620 °C/8 h, AC
3#	720 °C/24 h(50 °C/h, FC)to 620 °C/8 h, AC
4#	720 °C/28 h(50 °C/h, FC)to 620 °C/8 h, AC
5#	980 °C/1 h, AC+720 °C/8 h (50 °C/h, FC) to 620 °C/8 h, AC
6#	1100 °C/1.5 h, AC+980 °C/1 h, AC+720 °C/8 h (50 °C/h, FC) to 620 °C/8 h, AC

Note: As-deposited (AD);furnace cool (FC);air cool (AC)

利用线切割沿垂直于激光扫描方向截取试样,经打磨、抛光和盐酸硝酸氢氟酸混合液($V_{HCl}:V_{HNO_3}:V_{HF}=80:7:13$)化学腐蚀后制成金相试样;并采用OLYMPUS-DP71型光学显微镜(OM)和S3400型扫描电镜(SEM)对金相试样进行显微组织观察分析。采用线切割和磨削的方式将修复试样加工成拉伸试样,尺寸如图2所示,然后利用Z050型试验机进行室温拉伸,拉伸时采用位移控制,加载速率1 mm/min。采用Image-Pro Plus 6.0图像分析软件对试样中相的体积分数和晶粒大小进行定量分析。

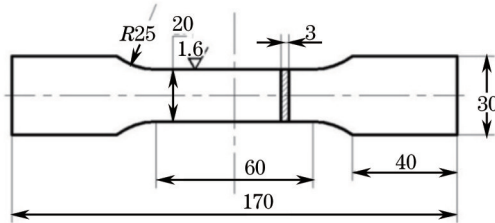


图2 拉伸性能测试样尺寸(单位: mm)

Fig.2 Sketch of tensile testing specimen (unit: mm)

3 试验结果与分析

修复试样沉积态及不同热处理后的Laves相的晶粒大小、体积分数以及室温拉伸性能的测试分析数据如表3所示。

表3 激光沉积修复GH4169合金显微组织特征及力学性能

Table 3 Microscopic characteristics and mechanical property of laser deposition repair GH4169 alloy

Samples	Size of laves phase grain / μm	Volume fraction of laves phase /%	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
As-deposited	--	6.5	820	636	6.2
1#	4	5.7	1320	1158	5
2#	2	5.6	1269	1042	5
3#	2	4.0	1251	1009	4.75
4#	2	4.0	1259	1105	4.5
5#	--	--	1315	1047	7.5
6#	--	--	1248	1077	15.25
	Casting standard (Q/5B 453-1995)		825	640	5
	Wrought standard (Q/3B 548-1996)		1340	1100	12

3.1 沉积态显微组织与性能

激光沉积修复GH4169合金沉积态试样的显微组织如图3(a)所示,沉积态修复截面上可观察到厚度均匀、规律分布的多层沉积层(层与层之间的层带结构,道与道之间的弧状结构)以及贯穿数个沉积层、长短不一的柱状枝晶组织。沉积态界面组织如图3(b)和3(d)所示,界面两侧分别为修复区的柱状枝晶组织和基体的等轴晶组织,形成了致密的冶金结合。

由图3(c)可以看出,激光沉积修复区组织无明显二次枝晶,组织细密;一次枝晶间距在6 μm 左右。枝晶间析出白色、树枝状的连续Laves相,体积分数为6.5%。Laves相中Nb元素的原子数分数为12.89%,该相中

富含 Nb 元素。Laves 相会占用大量的强化相元素 Nb, 作为脆性金属间化合物, 是易发生裂纹萌生和扩展的部位, 对材料的断裂强度和塑性性能不利^[11-12]。

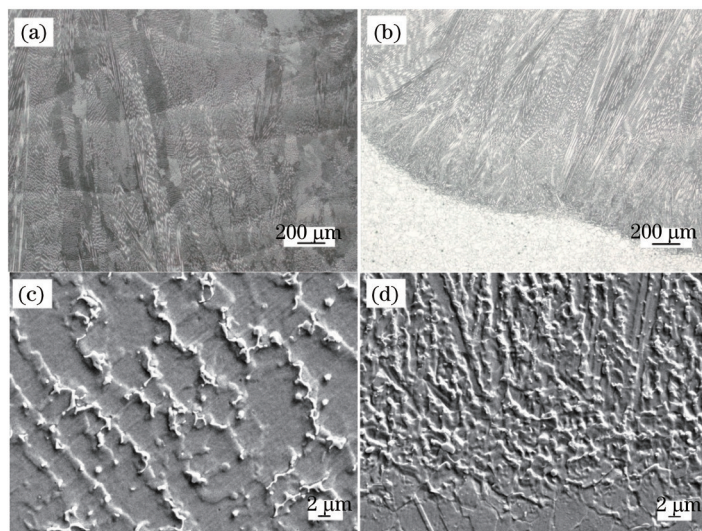


图3 激光沉积修复 GH4169 合金沉积态显微组织。(a) 修复区 OM 照片; (b) 界面处 OM 照片; (c) 修复区 SEM 照片; (d) 界面处 SEM 照片

Fig.3 Microstructure of GH4169 as-deposited alloy of laser deposition repair. (a) OM photo of repair area; (b) OM photo of interface; (c) SEM photo of repair area; (d) SEM photo of interface

GH4169 合金试样修复区为典型的外延柱状枝晶, 枝晶之间有小角度转向, 这与基体晶粒的取向有关。在凝固过程中, 由于基体的传热速度最快, 在修复初期熔池内获得很大的过冷度, 同时基体表面作为非均匀形核的基底, 液态金属首先在熔池与基体的界面处形核, 并沿着热量流失速率最大的反方向外延生长。相比界面处, 熔池内部传热速度慢, 晶粒会沿着优先生长方向长大, 使得柱状枝晶之间相互平行或者有小角度的转向, 形成了贯穿多个沉积层的稳定柱状枝晶^[13]。

激光沉积修复 GH4169 合金沉积态试样的室温拉伸强度和塑性达到了铸件技术标准(Q/5B 453-1995)。枝晶间析出大量的 Laves 脆性相, 降低了沉积态试样的塑性; 同时由于激光熔池的快速冷却凝固特征, 抑制了与基体共格的强化相 γ'' 及减小缺口敏感性的 δ 相析出, 使得沉积态试样的力学性能无法得到强化。

3.2 直接时效热处理对激光沉积修复 GH4169 合金组织和拉伸性能的影响

激光沉积修复 GH4169 合金经过直接时效热处理后, 与沉积态试样相比组织变化不大。图 4 所示为沉积态修复试样经过不同时长时效热处理后的 SEM 形貌, 可以看出, 随着时效时间的延长, 试样中 Laves 相的形貌和尺寸有所变化。由图 4(a)和表 3 所示, 1#试样经 720 °C 保温 8 h 的时效热处理后, 试样中 Laves 相呈断续的树枝状, 相比于沉积态试样略微细化, 大多数 Laves 相的长度约在 4 μm 左右。随着 720 °C 阶段时效时间的延长, 2#[图 4(b)]、3#[图 4(c)]、4#[图 4(d)]试样中 Laves 相进一步细化, 呈颗粒状或岛状, 且分布比较均匀, 大小约在 2 μm 左右。经统计各试样中 Laves 相的体积分数, 分别为 1#的 5.7%, 2#的 5.6%, 3#和 4#的 4.0%。可见时效时间的延长可以使沉积态修复试样中 Laves 相的体积含量略微下降, 但当时效时间超过 24 h 后, Laves 相的体积含量变化趋缓近于停止。因为直接时效热处理的温度低于 Laves 相 1080 °C 以上的完全固溶温度^[9], 只能少量溶解 Laves 相, 故随着时效时间的延长, Laves 相的体积含量变化不明显。

由表 3 和图 5 所示的 1#~4#直接时效热处理试样的拉伸性能数据分析可见。相比于沉积态试样, 经过直接时效热处理后试样强度有明显提高, 均接近或达到锻件标准 Q/3B 548-1996(高强), 但塑性略有降低。直接时效热处理主要是析出主要强化相 γ'' 和辅助强化相 γ' , 其中 720 °C 的热处理阶段主要析出 γ'' 相。 γ'' 相的析出可以起到共格强化和有序强化的作用, 从而提高了修复试样的拉伸强度^[14-15]。但随着时效时间的延长, 修复试样的强度并没有随之提高; 这是因为随着时效时间的延长, 强化相 γ'' 的尺寸也随之增加并超过了临界尺寸; 且经过 8 h 的时效处理后, 合金中绝大部分的 γ'' 相已经析出。直接时效热处理对 Laves 脆性相的溶解没有明显的作用, 使得枝晶间析出的 Laves 相依然存在, 修复试样的塑性没有提高。

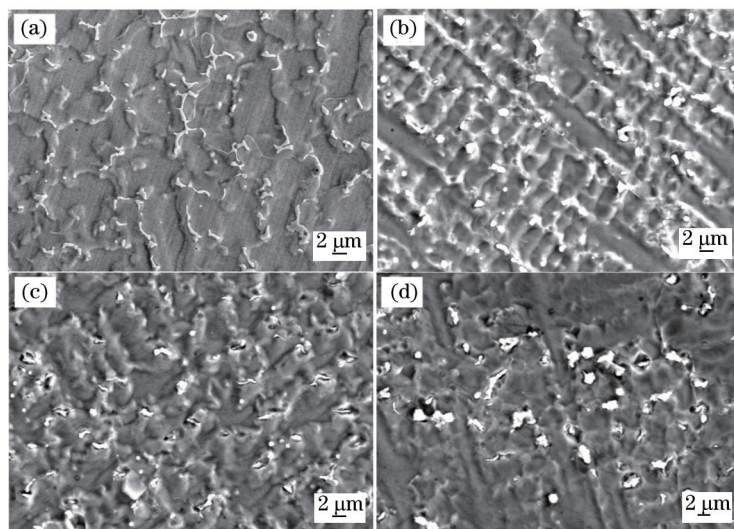


图4 激光沉积修复GH4169合金经不同时长时效热处理后显微组织。(a) 720 °C/8 h (50 °C/h, FC) to 620 °C/8 h, AC; (b) 720 °C/16 h (50 °C/h, FC) to 620 °C/8 h, AC; (c) 720 °C/24 h (50 °C/h, FC) to 620 °C/8 h, AC; (d) 720 °C/28 h (50 °C/h, FC) to 620 °C/8 h, AC

Fig.4 Microstructure of GH4169 alloy of laser deposition repair after aging heat treatment with different time.

(a) 720 °C/8 h (50 °C/h, FC) to 620 °C/8 h, AC; (b) 720 °C/16 h (50 °C/h, FC) to 620 °C/8 h, AC; (c) 720 °C/24 h (50 °C/h, FC) to 620 °C/8 h, AC; (d) 720 °C/28 h (50 °C/h, FC) to 620 °C/8 h, AC

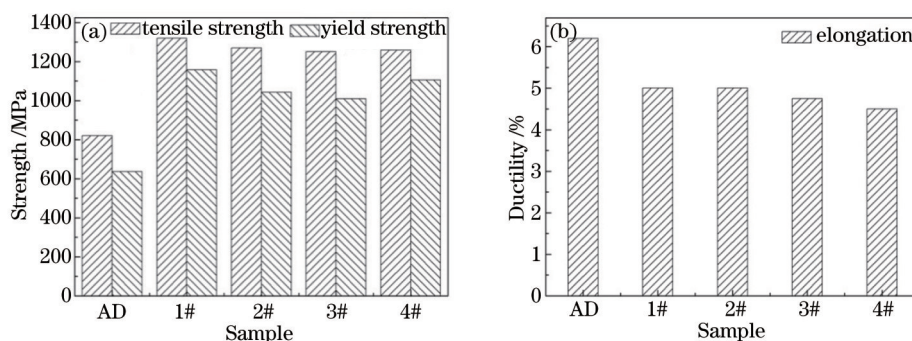


图5 激光沉积修复GH4169合金经不同时长时效热处理后拉伸性能。(a) 强度性能; (b) 塑性性能

Fig.5 Tensile properties of GH4169 alloy of laser deposition repair after aging heat treatment with different time.

(a) Strength property; (b) ductility property

3.3 固溶处理和均匀化处理对激光沉积修复GH4169合金组织和拉伸性能的影响

固溶+时效热处理与均匀化+固溶+时效热处理的光学显微组织照片和SEM照片分别如图6和图7所示。由图6(a)和6(b)可以看出,5#试样在经过固溶+时效热处理[980 °C/1 h,空冷+720 °C/8 h(50 °C/h,炉冷)to 620 °C/8 h,空冷]后,柱状枝晶的晶界开始扩展、合并,逐渐向等轴晶转变。但在修复区与基体之间,柱状枝晶与等轴晶的界面依然可以清晰的看到。

6#试样在经过均匀化+固溶+时效热处理[1100 °C/1.5 h,空冷+980 °C/1 h,空冷+720 °C/8 h(50 °C/h,炉冷)to 620 °C/8 h,空冷]后,显微组织发生了静态再结晶^[16],柱状枝晶的晶界经扩展、合并后形成新的晶粒。由图6(c)可以看出沉积态的粗大柱状枝晶已经转变为较细小的等轴晶,但晶粒细化的同时,也可看到这些再结晶的等轴晶晶粒尺寸并不均匀,部分晶粒的尺寸超过800 μm,其余部分的晶粒尺寸约在60 μm。由于发生了静态再结晶,修复区中的柱状枝晶向等轴晶转变,使得6#试样修复区与基体之间的界面基本消失,如图6(d)所示。

5#试样在经过980 °C保温1 h的固溶处理后,枝晶间的Laves相大量熔解,使得Laves相中的Nb元素部分回溶到奥氏体基体中。同时,由于980 °C的固溶温度处在δ相的析出温度范围860 °C~995 °C之中^[9],使得Laves相周围析出大量针状δ相[如图7(a)所示]。

6#试样经过均匀化+固溶+时效热处理后,Laves相基本熔解,仅有少量的颗粒状分布。另外,在晶界及晶内均析出了针状或短棒状的δ相,如图7(b)所示。可以看出,1100 °C保温1.5 h的均匀化处理更有利于

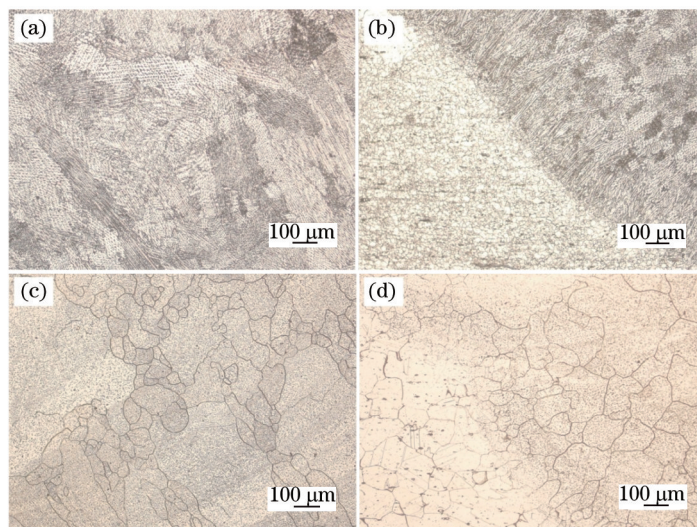


图6 激光沉积修复GH4169合金经固溶处理和均匀化处理后的OM照片。(a)和(b)分别为修复区和界面处
[980 °C/1 h, AC+720 °C/8 h (50 °C/h, FC) to 620 °C/8 h, AC]; (c)和(d)分别为修复区和界面处
[1100 °C/1.5 h, AC+980 °C/1 h, AC+720 °C/8 h (50 °C/h, FC) to 620 °C/8 h, AC]

Fig.6 OM photo of GH4169 alloy after solution treatment and homogenization treatment. (a) and (b) for the repair area and
interface[980 °C/1 h, AC+720 °C/8 h (50 °C/h, FC) to 620 °C/8 h, AC]; (c) and (d) for the repair area and
interface[1100 °C/1.5 h, AC+980 °C/1 h, AC+720 °C/8 h (50 °C/h, FC) to 620 °C/8 h, AC]

Laves相的固溶;Laves相的熔解,在晶间释放出更多的Nb原子,这将有利于在随后的固溶和时效处理阶段中进一步促进 δ 相以及 γ'' 相和 γ' 相的析出。 δ 相作为合金的稳定相,其含量、形貌及分布对合金的缺口敏感性有着重要影响,适量的 δ 相对提高合金塑性是有益的^[17]。

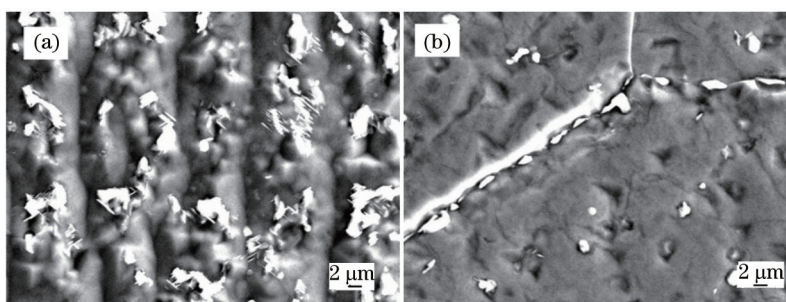


图7 激光沉积修复GH4169合金经固溶处理和均匀化处理后的SEM照片。(a) 980 °C/1 h, AC+720 °C/8 h (50 °C/h, FC)
to 620 °C/8 h, AC; (b) 1100 °C/1.5 h, AC+980 °C/1 h, AC+720 °C/8 h (50 °C/h, FC) to 620 °C/8 h, AC

Fig.7 SEM photo of GH4169 alloy after solution treatment and homogenization treatment. (a) 980 °C/1 h, AC+720 °C/8 h
(50 °C/h, FC) to 620 °C/8 h, AC; (b) 1100 °C/1.5 h, AC+980 °C/1 h, AC+720 °C/8 h (50 °C/h, FC) to 620 °C/8 h, AC

由表3和图8可以看出,经过固溶+时效热处理后,5#试样的抗拉和屈服强度明显提高,与锻件标准相当;断后伸长率为锻件标准的62.5%,与沉积态试样相比,断后伸长率提高了21%。这是因为在固溶处理阶段有大量的Laves相被熔解,释放出大量的Nb元素,并在Laves相周围析出了大量的针状 δ 相,减小了试样的缺口敏感性,提高了塑性。 δ 相的析出也占用了一部分强化相形成元素Nb,使得5#试样相比于经直接时效热处理的1#试样并没有过多析出强化相 γ'' 。虽然5#试样的断后伸长率相比于沉积态和直接时效态试样有了提高,但与锻件标准相比依然有很大差距。这与固溶温度依然低于Laves相的完全固溶温度,组织中依然存在着较多的Laves相有关。

经过均匀化+固溶+时效热处理后,6#试样的抗拉和屈服强度明显提高,分别达到了锻件标准的93.1%和97.9%;断后伸长率超出锻件标准27.1%,约为沉积态试样的2.5倍。这是由于均匀化处理可以溶解枝晶间的Laves相,消除合金元素的微观偏析从而实现合金元素的均匀化,可使强化相在整个材料组织中均匀析出;另外均匀化处理还会使晶粒细化,使合金组织由粗大柱状枝晶转换为等轴晶;这都有利于提高材料的综合

力学性能。

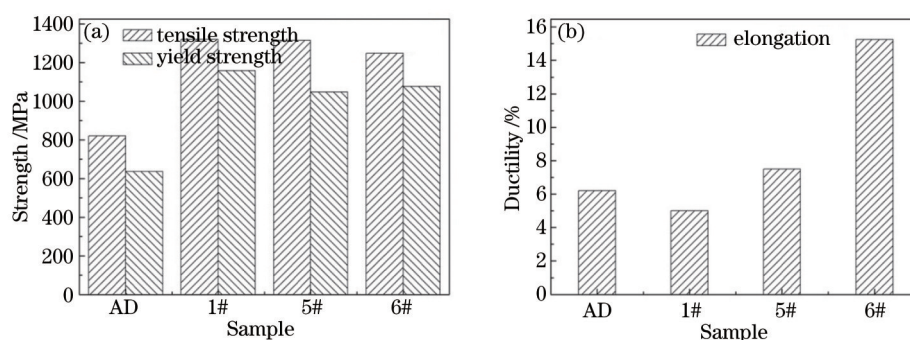


图8 激光沉积修复GH4169合金经固溶处理和均匀化处理后的拉伸性能。(a)强度性能;(b)塑性性能

Fig.8 Tensile properties of GH4169 alloy of laser deposition repair after solution treatment and homogenization treatment.

(a) Strength property; (b) ductility property

4 结 论

1) 激光沉积修复GH4169合金宏观组织为贯穿多个沉积层外延生长的柱状枝晶组织,枝晶间析出连续Laves相。沉积态试样拉伸性能达到铸件标准,与锻件标准差距较大。

2) 激光沉积修复GH4169合金经直接时效热处理后,宏观组织与沉积态相比变化不大,显微组织中Laves相的体积分数略微降低,试样强度均接近或达到锻件标准,但断后伸长率略有降低。时效时间的延长,对试样强度和断后伸长率影响甚微。

3) 激光沉积修复GH4169合金经固溶+时效热处理后,显微组织中Laves相部分溶解,试样强度与锻件标准相当,断后伸长率提高21%,为锻件标准的62.5%。

4) 激光沉积修复GH4169合金经均匀化+固溶+时效热处理后,显微组织中Laves相仅余少量颗粒状分布。拉伸强度接近锻件标准,断后伸长率超出锻件标准27.1%。

参 考 文 献

- 1 Tang Zhongjie, Guo Tieming, Fu Ying, *et al.*. Research present situation and the development prospect of nickel-based superalloy[J]. Jinshu Shijie, 2014, (1): 36-40.
唐中杰, 郭铁明, 付迎, 等. 镍基高温合金的研究现状与发展前景[J]. 金属世界, 2014, (1): 36-40.
- 2 Shi Changxu, Zhong Zengyong. Development and innovation of superalloy in China[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(11): 1281-1288.
师昌绪, 仲增墉. 我国高温合金的发展与创新[J]. 金属学报, 2010, 46(11): 1281-1288.
- 3 Xue Lei, Huang Weidong, Chen Jing, *et al.*. Application of laser forming repair technology on the aerial castings[J]. Foundry Technology, 2008, 29(3): 391-393.
薛蕾, 黄卫东, 陈静, 等. 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): 391-393.
- 4 Qi Yong'ai, Zhao Jianfeng, Xie Deqiao, *et al.*. Flexural property of GH4169 nickel-based superalloy by laser repair[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1103009.
戚永爱, 赵剑峰, 谢德巧, 等. 激光修复GH4169镍基高温合金的弯曲性能[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1103009.
- 5 Pan Hu, Zhao Jianfeng, Liu Yunlei, *et al.*. Controllability research on dilution ratio of nickel-based superalloy by laser cladding reparation [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0403007.
潘浒, 赵剑峰, 刘云雷, 等. 激光熔覆修复镍基高温合金稀释率的可控性研究[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0403007.
- 6 Zhong M L, Sun H Q, Liu W J, *et al.*. Boundary liquation and interface cracking characterization in laser deposition of Inconel 738 on directionally solidified Ni-based superalloy[J]. Scripta Materialia, 2005, 53(2): 159-164.
- 7 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.
- 8 Blackwell P L. The mechanical and microstructural characteristics of laser-deposited IN718[J]. J Materials Processing Technol, 2005,

- 170(1-2): 240-246.
- 9 Zhao Weiwei, Lin Xin, Liu Fencheng, *et al.*. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser solid forming Inconel 718 superalloy[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(12): 3221-3225.
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.
- 10 Xi Mingzhe, Gao Shiyu. Research on tensile properties of Inconel 718 superalloy fabricated by laser rapid forming process[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0303004.
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): 0303004.
- 11 Zhang Y N, Cao X, Wanjara P. Microstructure and hardness of fiber laser deposited Inconel 718 using filler wire[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2013, 69(9): 2569-2581.
- 12 Liu Honggang. Research on Laser Cladding 4169 Superalloy Coating[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012: 42-45.
刘洪刚. 激光熔覆 4169 高温合金涂层的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012: 42-45.
- 13 Huang Weidong. Laser Solid Forming[M]. Xi'an: Northwest Industrial University Press, 2007: 126-135.
黄卫东. 激光立体成形[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007: 126-135.
- 14 Ming Xianliang, Chen Jing, Tan Hua, *et al.*. Coarsening behavior of γ'' precipitates in GH4169 superalloy fabricated by laser solid forming [J]. J Materials Engineering, 2014, (8): 8-14.
明宪良, 陈 静, 谭 华, 等. 激光立体成形 GH4169 高温合金 γ'' 相的高温粗化行为[J]. 材料工程, 2014, (8): 8-14.
- 15 Ge Feng, Zhang Yubi, Wang Chunguang, *et al.*. Research progress of effects of heat treatment on microstructure and properties of Inconel 718 alloy[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(12): 177-180.
葛 锋, 张玉碧, 王春光, 等. 热处理对 Inconel 718 合金组织与性能影响的研究进展[J]. 热加工工艺, 2013, 42(12): 177-180.
- 16 Liu Fencheng, Lin Xin, Yu Xiaobin, *et al.*. Evolution of interface and crystal orientation of laser solid formed GH4169 superalloy during recrystallization[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(4): 463-470.
刘奋成, 林 鑫, 余小斌, 等. 激光立体成形 GH4169 合金再结晶过程中的界面和晶体取向演化[J]. 金属学报, 2014, 50(4): 463-470.
- 17 Kong Yonghua, Li Huyan, Chen Guosheng, *et al.*. Effects of different heat treatment on creeping property of GH4169 alloy[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2014, 42(1): 52-56.
孔永华, 李胡燕, 陈国胜, 等. 热处理工艺对 GH4169 合金蠕变性能的影响[J]. 稀有金属与硬质合金, 2014, 42(1): 52-56.

栏目编辑: 张浩佳