

# 热处理对激光沉积修复GH4169合金高温性能的影响

卞宏友<sup>1,2</sup> 赵翔鹏<sup>1\*</sup> 曲 伸<sup>2</sup> 杨 光<sup>1</sup> 钦兰云<sup>1</sup> 王 维<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司焊接研究所, 辽宁 沈阳 110043

**摘要** 热处理是改善激光沉积修复GH4169合金力学性能的重要手段。研究了不同热处理方式和时效热处理温度对激光沉积修复GH4169合金高温拉伸性能的影响规律,结果表明:采用局部热处理和真空热处理方式对修复试样进行直接时效热处理后,试样显微组织与沉积态基本一致,枝晶间Laves相少量熔解;真空热处理后试样的高温抗拉强度和屈服强度略高,达到锻件标准Q/3B 548-1996(高强)的86%和95%,断后伸长率略有下降。在提高时效热处理温度后,Laves脆性相进一步轻微熔解,修复试样的高温抗拉强度与屈服强度有所提高,达到锻件标准的92%和98%。

**关键词** 激光光学;激光沉积修复;GH4169合金;热处理;显微组织;高温拉伸性能

中图分类号 TG166 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0103008

## Effect of Heat Treatment on High Temperature Tensile Properties of Laser Deposition Repair GH4169 Superalloy

Bian Hongyou<sup>1,2</sup> Zhao Xiangpeng<sup>1</sup> Qu Shen<sup>2</sup> Yang Guang<sup>1</sup> Qin Lanyun<sup>1</sup> Wang Wei<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Welding Institute, AVIC Shenyang Liming Aero-Engine (Group) Corporation LTD, Shenyang, Liaoning 110043, China

**Abstract** Heat treatment is an important method to improve the mechanical property of laser deposition repair GH4169 alloy. The effects of different heat treatment methods and aging heat treatment temperature on high temperature tensile properties of laser deposition repair GH4169 alloy are investigated. As compared with as-deposited (AD) samples, after the local heat treatment and vacuum heat treatment for laser deposition repair GH4169 alloy, microstructure of laser deposition repair GH4169 alloy changes little, the interdendritic Laves phase slightly dissolved. The high temperature tensile strength and yield strength of vacuum heat treatment samples are slightly higher, reaching over 86% and 95% of the wrought standard of Q/3B548-1996, however, the elongation after fracture decreases slightly. After increasing the temperature of aging heat treatment, the Laves phase slightly dissolved further, the high temperature tensile strength and yield strength of repaired specimen are improved, reaching over 92% and 98% of the wrought standard.

**Key words** laser optics; laser deposition repair; GH4169 alloy; heat treatment; microstructure; high temperature tensile properties

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3850

## 1 引 言

GH4169(Inconel 718)是一种时效沉淀强化的镍基高温合金,被广泛应用于航空发动机、燃气轮机及核工

收稿日期: 2015-09-01; 收到修改稿日期: 2015-10-09

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和修复技术等方面的研究。E-mail: bhy@sia.cn

\*通信联系人。E-mail: xiangpengzhao@163.com

业领域<sup>[1-2]</sup>。高温合金零部件在制造和服役过程中会不可避免地出现机加超差、磨损、裂纹或蚀坑等损伤失效的情况。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<sup>[3-5]</sup>。

在航空发动机领域,GH4169合金主要被用于制造机匣、叶片、涡轮盘等高温端部件,占发动机总质量的30%以上<sup>[6]</sup>。这些部件由于长期在高温环境下工作,因此其高温力学性能极其关键,决定了零部件的性能水平和服役寿命。学者们对激光修复高温合金的力学性能进行了广泛的研究,Zhang等<sup>[7]</sup>对激光熔覆Inconel 718合金涂层进行了热处理研究,结果表明:980STA标准热处理改善了熔覆层的硬度,Laves相的体积分数由30.6%降至11.4%,且Nb含量高于直接时效热处理态和沉积态试样。Lambarri等<sup>[8]</sup>对Inconel 718合金进行了激光熔覆及热处理研究,虽然塑性低于锻件水平,但其力学性能等超过航空应用要求。Zhao等<sup>[9-11]</sup>的研究表明:对激光沉积成形Inconel 718合金进行热处理能显著提高其室温和高温力学性能。于慧臣等<sup>[12]</sup>研究了热处理对GH141合金的高温拉伸性能、持久性能与显微组织之间的关系。上述研究表明热处理是改善高温合金力学性能的重要手段。

根据GH4169合金薄壁类零件的裂纹损伤结构特点,对贯通槽损伤样件进行了激光沉积修复,研究了感应加热局部热处理和真空炉整体热处理两种方式以及不同时效热处理温度对激光沉积修复GH4169合金显微组织和高温力学性能的影响,并讨论了显微组织与高温力学性能之间的关系,为修复件的热处理工艺优化提供指导依据。

## 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6 kW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。

试验中的基体材料选用时效处理的GH4169镍基合金,基体尺寸为200 mm×100 mm×3 mm。熔覆材料为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,修复前在基体上加工出一条贯通槽,如图1(a)所示:槽长 $L$ 为30 mm,上沿宽 $W$ 为14 mm,高 $H$ 为3 mm,坡角 $\theta$ 为30°。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GH4169合金试样的工艺参数为: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。激光沉积修复GH4169合金试样如图1(b)所示。

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
Inconel718	0.03	3.17	53	Bal.	19.2	0.54	0.65	5.16

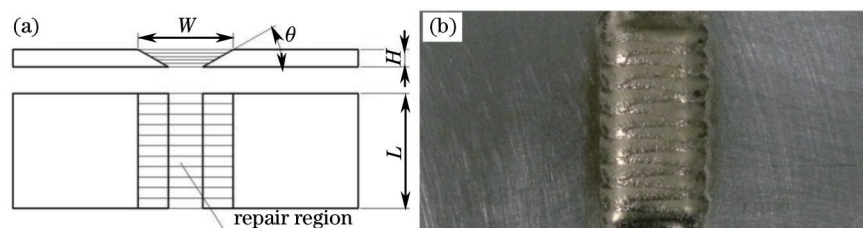


图1 (a) 修复件槽损伤试样示意图; (b) 激光沉积修复试样

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

为了提高沉积态(AD)修复试样的力学性能,对修复试样以不同热处理方式和不同热处理温度进行直接时效热处理。热处理方式分别为采用VAF-130型真空炉的整体热处理和采用感应加热系统的局部热处理。感应加热系统包括:通过调节电流(最大输入电流为37 A)来控制加热温度及加热速度的高频(30 kHz)感

应加热设备;可根据试样修复部位的实际形状进行仿形设计制造的感应加热器;以及对试样热处理温度进行实时检测的MAG30型红外热像仪(测温范围:200℃~1500℃,最大采样帧频可达50 Hz)。局部热处理时氩气箱内水氧含量净化控制在 $10^{-4}$ 以下。热处理工艺采用不同保温温度的直接时效热处理,如表2所示。

表2 激光沉积修复GH4169合金热处理工艺

Table 2 Heat treatment for laser deposition repair GH4169 alloy

Samples	Heat treatment
AD	—
1#	720℃/8 h(50℃/h, FC <sup>a</sup> )to 620℃/8 h, AC <sup>b</sup>
2#	760℃/8 h(55℃/h, FC)to 650℃/8 h, AC

FC<sup>a</sup>: Furnace cool; AC<sup>b</sup>: Air cool

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(体积比: $V_{HCl}:V_{HNO_3}:V_{HF}=80:7:13$ )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AG-X 250 kN型试验机在650℃条件下测试修复试样的高温拉伸性能,拉伸试样尺寸如图2所示。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。

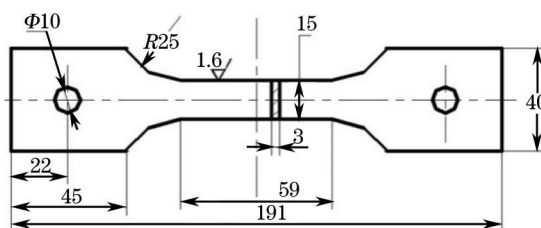


图2 高温拉伸性能测试试样尺寸(单位:mm)

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

### 3 试验结果与分析

GH4169合金沉积态修复试样及采用不同时效热处理方式、不同时效热处理温度进行热处理后试样中Laves相的晶粒大小、体积分数、Nb元素质量分数以及在650℃条件下高温拉伸性能数据如表3所示。高温拉伸试验依照GB/T 4338-2006标准而做。

表3 激光沉积修复GH4169合金显微组织特征及高温拉伸性能

Table 3 Microscopic characteristics and high temperature tensile property of laser deposition repair GH4169 alloy

Sample	Heat treatment method	Heat treatment process	Size of Laves phase grain / $\mu\text{m}$	Volume fraction of Laves phase /%	Mass fraction of Nb in Laves phase /%	$\sigma_b$ / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	$\delta$ /%
AD	—	—	—	6.5	19.51	733	555	5.0
L1	Local heat treatment	1#	4.0	5.8	18.91	852	750	4.5
V1	Vacuum heat treatment	1#	3.6	5.7	21.05	930	888	3.5
V2	Vacuum heat treatment	2#	2.8	5.4	20.09	993	908	2.0
Wrought standard (Q/3B 548-1996)						1080	930	12

#### 3.1 沉积态显微组织与高温拉伸性能

激光沉积修复GH4169合金显微组织OM照片如图3(a)所示,沉积态试样的修复区为典型的外延枝晶组织,趋向于沿沉积高度方向贯穿多个沉积层生长。这主要是因为,在冷却过程中,熔化的金属粉末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;同时因为修复基体中晶粒取向的关系,枝晶间有小角度的转向<sup>[13]</sup>。在修复区与基体的结合界面处形成了致密的冶金结合,界面两侧分别为修复区的枝晶组织和基体的等轴晶组织,如图3(b)和3(d)[为图3(b)中B区域]所示。图3(c)为图3(a)中A区域的高倍SEM组织。由于熔池中的温度梯度和凝固速度较大,因此修复区的枝晶组织细小,无明显二次枝晶,一次



枝晶间距在  $6\ \mu\text{m}$  左右。枝晶间析出白色、树枝状的连续 Laves 相, 体积分数为 6.5%。表 4 为图 3(c) 中枝晶间区域 Laves 相和枝晶干区域基体相的能谱分析(EDS)结果, 可以看出 Laves 相中 Nb 元素的质量分数为 19.51%, 富含的 Nb 元素远高于枝晶干区域。

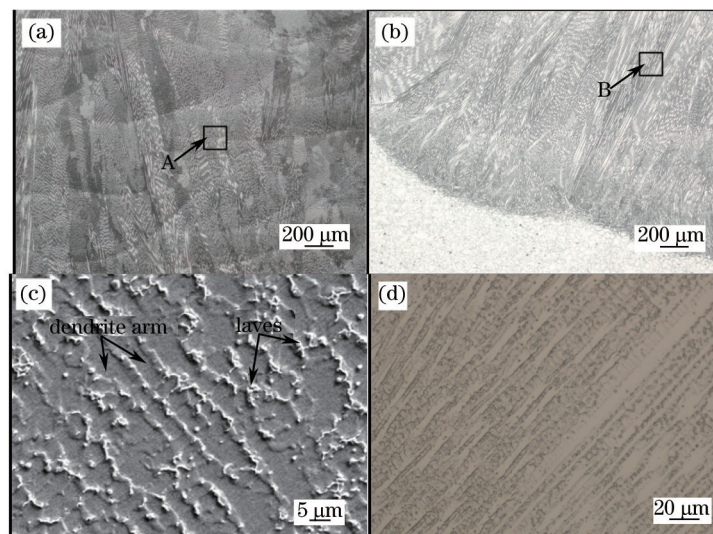


图 3 激光沉积修复 GH4169 合金沉积态显微组织。(a) 修复区 OM 照片; (b) 界面处 OM 照片; (c) 修复区 A 区域 SEM 照片; (d) 修复区 B 区域高倍 OM 照片

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

表 4 GH4169 合金沉积态组织的 EDS 分析结果

Table 4 EDS analysis results of GH4169 alloy as-deposited state

	Element	Al	Nb	Ti	Cr	Fe	Ni
Laves	Mass fraction /%	0.14	19.51	1.12	13.75	12.86	52.62
	Atomic percentage /%	0.33	12.89	1.43	16.23	14.13	55.00
Dendrite Arm	Mass fraction /%	0.45	1.84	0.63	17.76	19.49	59.82
	Atomic percentage /%	0.95	1.13	0.75	19.41	19.84	57.92

激光沉积修复 GH4169 合金沉积态试样在  $650\ \text{°C}$  条件下的高温拉伸性能见表 3。其高温抗拉强度与屈服强度仅为锻件标准 Q/3B 548-1996(高强)的 68% 和 60%, 断后伸长率为锻件标准的 42%。由于在凝固过程中, 沉积态试样中枝晶间存在较严重的 Nb 元素偏析现象, 导致枝晶间区域析出了大量的 Laves 相。作为脆性金属间化合物<sup>[14-15]</sup>, Laves 相是裂纹萌生和扩展的通道, 对材料的断裂强度和塑性性能不利。同时又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  $\gamma''$  及减小缺口敏感性的  $\delta$  相析出<sup>[10]</sup>, 使得沉积态试样的力学性能无法得到强化。

### 3.2 不同时效热处理方式对显微组织和高温拉伸性能的影响

图 4 为激光沉积修复 GH4169 合金分别经感应加热系统局部加热和 VAF-130 型真空炉整体加热两种方式热处理后的 OM 照片和 SEM 照片。两种热处理方式均采用 1# 时效热处理工艺:  $720\ \text{°C}$ , 8 h 炉冷至  $620\ \text{°C}$ , 8 h 空冷。由图 4(a) 和 4(b) 可以看出, 经过两种不同方式热处理后试样组织与沉积态基本一致。但是, 试样中 Laves 相的形貌和尺寸有所变化, 如图 4(c) [为图 4(a) 中 A 区域] 和 4(d) [为图 4(b) 中 B 区域] 所示, 与沉积态试样中连续树枝状的形态相比, 热处理后的 Laves 相形貌呈颗粒状或岛状, 呈现出一定的断裂碎化趋势, 表明 Laves 相经热处理后少量溶解。局部热处理态和真空热处理态的 Laves 相的大小分别约为  $4.0\ \mu\text{m}$  和  $3.6\ \mu\text{m}$  左右, 其体积分数分别为 5.8% 和 5.7%, Nb 元素的质量分数分别为 18.91% 和 21.05%。

局部热处理态(L1)与真空热处理态(V1)试样在  $650\ \text{°C}$  条件下的高温拉伸性能如表 3 和图 5 所示。相比于 AD 试样, 热处理后试样高温拉伸强度均有明显提高, 局部热处理态试样的高温拉伸强度略低于真空热处理态。其中真空热处理态试样的高温抗拉强度和屈服强度分别高出 AD 试样 27% 和 60%, 达到锻件标准

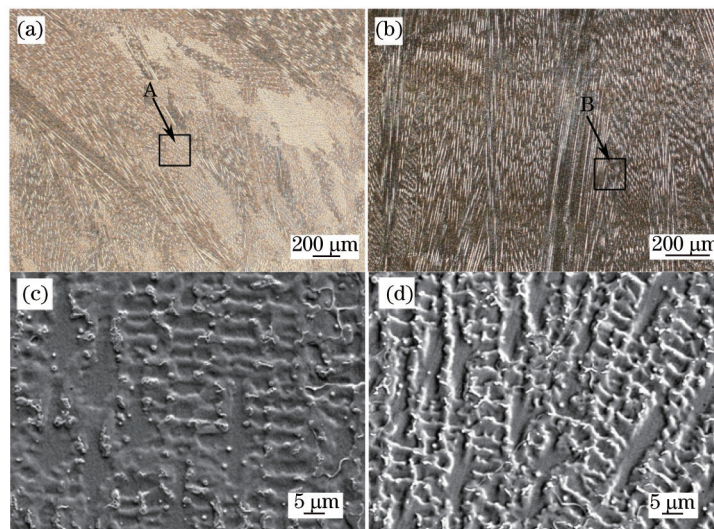


图4 激光沉积修复GH4169合金的显微组织。(a)和(c)为局部热处理态的OM和SEM照片;  
(b)和(d)为真空热处理态的OM和SEM照片

Fig.4 Microstructure of laser deposition repair GH4169 alloy. (a) and (c) are OM and SEM photos for the local heat treatment state;  
(b) and (d) are OM and SEM photos for the vacuum heat treatment state

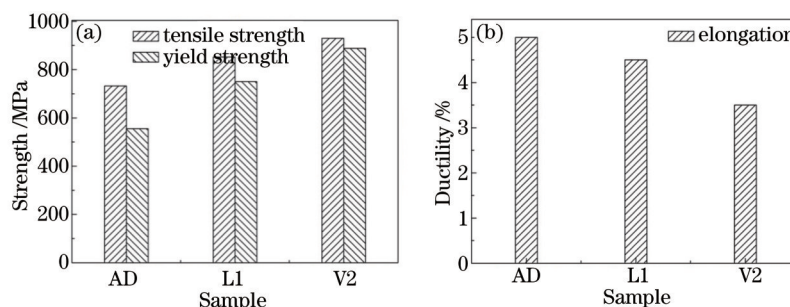


图5 激光沉积修复GH4169合金经局部和真空热处理后的高温拉伸性能。(a)强度性能;(b)塑性性能

Fig.5 High temperature tensile properties of laser deposition repair GH4169 alloy after local heat treatment and vacuum heat treatment. (a) Strength property; (b) ductility property

Q/3B 548-1996(高强)的86%和95%。热处理后试样的断后伸长率相比于沉积态略有下降。

沉积态组织中Laves相富含Nb元素,在Laves相与其临近的基体相之间存在合金元素浓度梯度。在热处理高温条件下,Nb元素会发生扩散而趋近均匀化。由于激光沉积修复的快速凝固特性,在结晶过程中形成大量空位和位错等晶格缺陷,在热处理时间延长导致的变形应力作用下,晶格缺陷产生移动,有利于Nb元素扩散及Laves相的熔解。时效热处理后析出的强化相 $\gamma''$ 和 $\gamma'$ 相在基体中产生很大的晶格错配度,引起很高的应变能,从而有效地阻碍位错的运动,使试样高温拉伸强度得以提高<sup>[6]</sup>。

直接时效热处理的温度低于Laves相1080℃以上的完全固溶温度<sup>[10]</sup>,Laves相被少量熔解,但仍大量存在,Laves相一方面降低了Nb元素的固溶强化作用,同时也导致时效后基体中 $\gamma''$ 相的析出减少,从而降低了激光沉积修复GH4169合金试样的高温拉伸强度,使其无法达到锻件标准;另一方面,作为脆性相,其本身的塑性变形能力较差,容易在Laves相周围因位错塞集引起应力集中而成为裂纹源<sup>[17]</sup>,从而使得激光沉积修复试样的塑性无法得到改善。

真空热处理是对修复试样进行整体加热,相比于仅对试样的修复部位进行局部加热的局部热处理而言,真空热处理态试样的残余应力能够在更大的区域中得到更为均匀的重新分布和松弛<sup>[18]</sup>,所以真空热处理态试样的高温拉伸性能略高于局部热处理态。

### 3.3 不同时效热处理温度对显微组织和高温拉伸性能的影响

表2中的两种时效热处理工艺制度,相比1#热处理工艺,2#热处理工艺(760℃,保温8h炉冷至650℃,保温8h空冷)中的保温温度有所提高。V2号试样是采用VAF-130型真空炉整体加热方式按2#工艺处理的,



其显微组织形貌如图6所示。由图6(a)可知,时效热处理的保温温度提高后,修复试样的光学显微组织没有明显变化。枝晶间的Laves相进一步轻微溶解,碎化呈颗粒状,如图6(b)[为图6(a)中A区域]所示,其晶粒大小为 $2.8\ \mu\text{m}$ ,体积分数为5.4%,Laves相中Nb元素的质量分数为20.09%,与L1和V1号试样相比较而言,各热处理态试样中Laves相的Nb元素含量变化不大。

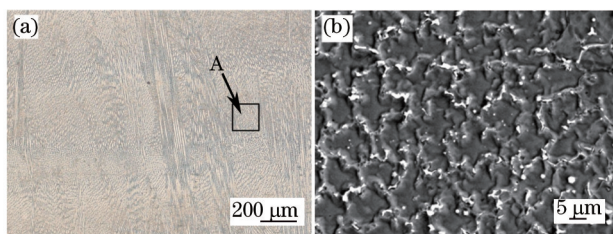


图6 激光沉积修复GH4169合金经 $760\ \text{℃}/8\ \text{h}$ ( $55\ \text{℃}/\text{h}$ , FC)至 $650\ \text{℃}/8\ \text{h}$ , AC热处理后的显微组织。(a) OM照片;(b) SEM照片

Fig.6 Microstructure of laser deposition repair GH4169 alloy after  $760\ \text{℃}/8\ \text{h}$  ( $55\ \text{℃}/\text{h}$ , FC) to  $650\ \text{℃}/8\ \text{h}$ , AC heat treatment.

(a) OM photo; (b) SEM photo

由表3和图7可知,V2号试样的高温拉伸强度要高于V1号试样,其高温抗拉强度和屈服强度分别相当于锻件标准的92%和98%。由于时效热处理温度越高,Nb元素扩散越充分,Laves相溶解愈加充分,试样中Laves相的含量进一步降低。另外,强化相尺寸增加的速率与时效热处理的保温温度有关,保温温度越高,则强化相尺寸增加的速率越快<sup>[9]</sup>;在 $\gamma'$ 强化相的尺寸达到临界尺寸使其与基体 $\gamma$ 相失去共格关系之前,共格强化的作用随析出强化相尺寸的增加而增加;因此提高时效热处理的保温温度,高温抗拉强度和屈服强度有所提高。但由于时效热处理工艺的温度低于Laves相 $1080\ \text{℃}$ 的完全固溶温度<sup>[10]</sup>,使得时效热处理后试样中Laves相的体积分数虽有所降低,但依然大量存在,试样的塑性没有提高。

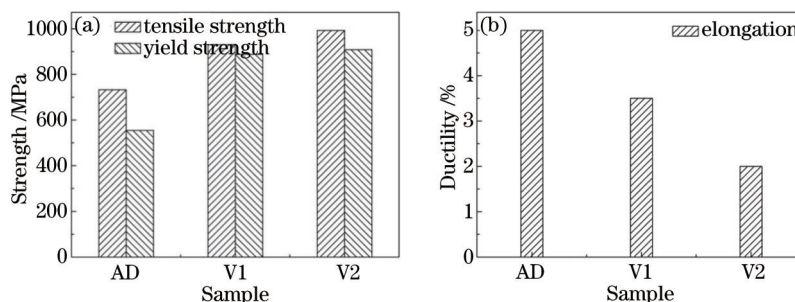


图7 激光沉积修复GH4169合金经1#和2#工艺热处理后的高温拉伸性能。(a)强度性能;(b)塑性性能

Fig.7 High temperature tensile properties of laser deposition repair GH4169 alloy after 1# and 2# heat treatment.

(a) Strength property; (b) ductility property

## 4 结 论

1) 激光沉积修复GH4169合金显微组织为沿沉积高度方向贯穿多个沉积层的外延生长的枝晶组织,枝晶间析出Laves相。在 $650\ \text{℃}$ 条件下的高温拉伸强度与锻件标准Q/3B 548-1996(高强)差距较大。

2) 沉积态修复试样采用局部热处理和真空热处理方式经直接时效热处理后,显微组织与沉积态基本一致,枝晶间Laves相少量溶解,呈碎化趋势。真空热处理态试样的高温抗拉强度和屈服强度略高于局部热处理态,达到锻件标准的86%和95%。

3) 提高时效热处理的保温温度,试样的显微组织没有明显变化,Laves相含量进一步降低,高温抗拉强度和屈服强度有所提高,达到锻件标准的92%和98%。

## 参 考 文 献

- Guo Jianting. The current situation of application and development of superalloys in the fields of energy industry[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(5): 513-527.  
郭建亭. 高温合金在能源工业领域中的应用现状与发展[J]. 金属学报, 2010, 46(5): 513-527.
- Qi Huan. Review of Inconel 718 alloy: Its history, properties, processing and developing substitutes[J]. Journal of Materials Engineering,

- 2012(8): 92-100.  
齐 欢. Inconel 718(GH4169)高温合金的发展与工艺[J]. 材料工程, 2012(8): 92-100.
- 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): 391-394.  
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): 391-394.
- 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 repair[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 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.
- 7 Zhang Y C, Li Z G, Nie P L, *et al.*. Effect of heat treatment on niobium segregation of laser-cladded IN718 alloy coating[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44(2): 708-716.
- 8 Lambarri J, Leunda J, Navas V G, *et al.*. Microstructural and tensile characterization of Inconel 718 laser coatings for aeronautic components [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(7): 813-821.
- 9 Zhao X, Chen J, Lin X, *et al.*. Study on microstructure and mechanical properties of laser rapid forming Inconel 718[J]. Materials Science and Engineering, 2008, 478(1): 119-124.
- 10 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): 3220-3225.  
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.
- 11 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 and Materials Transactions A, 2009, 40(10): 2410-2422.
- 12 Yu Huichen, Xie Shishu, Zhao Guangpu, *et al.*. High temperature tensile and creep rupture properties in Ni-based superalloy GH141 [J]. Journal of Materials Engineering, 2003, (9): 3-6.  
于慧臣, 谢世殊, 赵光普, 等. GH141 合金的高温拉伸及持久性能[J]. 材料工程, 2003, (9): 3-6.
- 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 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.
- 15 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.
- 16 Zhang Yaocheng. Studies on Component Segregation and Strengthening Mechanism of Laser Cladding Inconel 718 Alloy Coating[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013: 107-132.  
张尧成. 激光熔覆 Inconel 718 合金涂层的成分偏聚与强化机理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013: 107-132.
- 17 Ming Xianliang, Chen Jing, Tan Hua, *et al.*. Research on persistent fracture mechanism of laser forming repaired GH4169 superalloy[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0403005.  
明宪良, 陈 静, 谭 华, 等. 激光修复 GH4169 高温合金的持久断裂机制研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0403005.
- 18 Wang Zejun, Lu Huiping, Jing Hongyang. Effect of heated region on stress relief ratio of local heat treatment on spherical tanks[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(3): 125-128.  
王泽军, 卢惠屏, 荆洪阳. 加热面积对球罐局部热处理应力消除效果的影响[J]. 焊接学报, 2008, 29(3): 125-128.
- 19 Ming Xianliang, Chen Jing, Tan Hua, *et al.*. Coarsening behavior of  $\gamma''$  precipitates in GH4169 superalloy fabricated by laser solid forming [J]. Journal of 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  $\gamma''$  相的高温粗化行为[J]. 材料工程, 2014, (8): 8-14.

栏目编辑: 张浩佳