

# δ 时效处理对激光增材修复 Inconel 718 合金组织与性能的影响

张杰<sup>1,2</sup>, 张群莉<sup>1,2\*</sup>, 李栋<sup>1,2</sup>, 童文华<sup>1,2</sup>, 姚建华<sup>1,2</sup>, 冷志斌<sup>3</sup>

<sup>1</sup>浙江工业大学激光先进制造研究院, 浙江 杭州 310023;

<sup>2</sup>特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室(浙江工业大学), 浙江 杭州 310023;

<sup>3</sup>江苏亚威机床股份有限公司, 江苏 扬州 225200

**摘要** 采用激光增材修复技术和 Inconel 718 球形粉末对预制凹槽的 Inconel 718 合金进行逐层修复, 然后在 800 °C 下进行不同时间(4, 8, 16, 32 h)的 δ 时效处理, 研究了时效时间对修复层组织和性能的影响。结果表明: 随着时效时间延长, 修复层中的 Laves 相和强化相 γ' 相逐渐消失, 而 δ 相通过切变的方式在 γ' 相密排面层错的基础上形核并长大。修复区中的 δ 相在残余 Laves 相周围呈细针状析出, 并随着时效时间的延长而变大; 而母材中的 δ 相优先在晶界处形核长大, 最终在晶粒内以平行式生长。虽然时效处理能够有效提高修复区及母材的显微硬度及抗拉强度, 但随着时效时间的持续增加, 硬度及力学性能均呈现下降的趋势; 修复区及母材的显微硬度在时效 4 h 时分别达到最高值 361 HV 和 465 HV, 之后随着时效时间的延长而逐渐下降; 不同时效处理后的修复件的拉伸断裂部位均位于修复区, 断口整齐, 呈典型的脆性断裂。

**关键词** 激光技术; 激光增材修复; Inconel 718; δ 相析出机制; 拉伸性能

中图分类号 TG456.7

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0102001

## Effect of δ Aging Treatment on Microstructure and Tensile Properties of Repaired Inconel 718 Alloy Using Laser Additive Manufacturing

Zhang Jie<sup>1,2</sup>, Zhang Qunli<sup>1,2\*</sup>, Li Dong<sup>1,2</sup>, Tong Wenhua<sup>1,2</sup>, Yao Jianhua<sup>1,2</sup>, Leng Zhibin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Laser Advanced Manufacturing, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of E & M (Zhejiang University of Technology), Ministry of Education & Zhejiang Province, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;

<sup>3</sup>Jiangsu Yawei Machine-Tool Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225200, China

**Abstract** Inconel 718 alloys with premade grooves are repaired layer by layer with Inconel 718 spherical powder via the laser additive manufacturing process. The repaired Inconel 718 alloys are then subjected to δ aging treatment at 800 °C for different time (4, 8, 16, and 32 h) to study the effect of the aging time on the microstructure and tensile properties of the repaired layer. The results show that the Laves and strengthened γ' phases in the repaired layer gradually disappear with the increase of the aging time, whereas the δ phase nucleates and grows on the basis of the stacking faults of the γ' phase on the close-packed plane through the shearing mechanism. In addition, needle-like precipitates appear in the δ phase of the repaired zone around the residual Laves phase and become larger with aging time. However, precipitates in the substrate metal preferentially nucleate and grow at the grain boundaries and eventually grow in parallel within the grains. Although the aging treatment can effectively improve the microhardness and tensile strength of the repaired zone and the substrate metal of Inconel 718 alloys, the hardness and mechanical properties decrease as the aging time continues to increase. After aging treatment for 4 h, the microhardnesses of the repaired zone and the substrate metal reach the highest values of 361 HV and 465 HV, respectively, and then gradually decrease with the aging time. Furthermore, with different aging treatments, all the

收稿日期: 2019-07-31; 修回日期: 2019-08-26; 录用日期: 2019-09-16

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1103600)、浙江省重点研发计划联合技术研发与示范推广项目(2019C04004)、省属高校基本科研业务费项目(RF-C2019003)

\* E-mail: zql@zjut.edu.cn

tensile fractures of the repaired parts are located in the repaired zone. The fracture surfaces are flat, showing typical brittle fracture characteristics.

**Key words** laser technique; laser additive repair; Inconel 718;  $\delta$  phase precipitation mechanism; tensile properties

**OCIS codes** 140.3390; 140.3380; 160.3900

## 1 引 言

Inconel 718 合金是一种常见的时效硬化合金,已被广泛应用于航空航天、石油化工等行业。在工业实际应用中,为了使 Inconel 718 合金达到最好的使用性能,通常需要根据应用环境和使用要求来选择合适的热处理方案<sup>[1-3]</sup>。

激光增材修复技术作为一种先进的制造技术,目前已被广泛用于缺损、失效零件的修复。但是,由于激光增材修复过程具有快速加热、快速冷却的特点,增材修复区域的组织通常与常规方法制备的基体组织有所不同,一般呈现为亚稳态组织<sup>[4-8]</sup>。此外,由于熔池冷却速度较快,修复区域中的强化相析出不充分,力学性能通常不理想。为了使修复后的零件达到使用要求,需要采用合适的热处理方法对其进行强化处理。研究表明,适当的热处理能够显著提高激光修复后再制造件的力学性能。赵剑峰等<sup>[9]</sup>对激光修复 GH4169 合金的高温断裂性能进行了研究,结果表明,采用优化工艺修复后的零件的高温抗拉强度能够达到原始零件的 85%。卞宏友等<sup>[10-11]</sup>研究了热处理制度对激光再制造 GH4169 合金组织和力学性能的影响,实验结果表明,对合金进行时效处理后,枝晶间 Laves 相减少,抗拉强度提高至与锻件相当,但塑性降低。可见,时效处理对进一步提高再制造件的力学性能非常重要。刘奋成等<sup>[12]</sup>研究了时效处理对固溶态及沉积态激光立体成形 Inconel 718 合金中  $\delta$  相析出的影响规律,认为固溶态及沉积态试样在时效过程中  $\delta$  相析出规律有所不同,固溶态试样中的  $\delta$  相优先在晶界处形核长大,且形核速率小于沉积态试样。此外,激光增材再制造零件的热处理制度与激光增材制造零件的热处理制度有所差异。对于激光增材制造件来说,可以利用高温固溶处理消除 Laves 相,但是对于激光增材再制造件来说,高温固溶处理容易使母材部分的晶粒尺寸变大,力学性能降低<sup>[13]</sup>。

目前,激光增材再制造 Inconel 718 合金的时效热处理制度往往直接沿用锻造和铸造的热处理

制度,没有针对激光增材再制造技术及 Inconel 718 沉积态合金的组织特点进行充分优化,且缺乏激光再制造件在时效处理过程中母材组织及力学性能方面的相关研究报道<sup>[11-13]</sup>。本课题组前期研究了热处理温度对 Laves 相溶解规律的影响,结果表明,在高于 1080 °C 下热处理 1 h 能使 Laves 相基本溶解,而热处理温度较低(940 °C 和 980 °C)时,在 Laves 相周围析出了少量针状  $\delta$  相<sup>[14]</sup>。 $\delta$  相作为强化相  $\gamma'$  的平衡相,对力学性能具有非常重要的调控作用。此外,与 Laves 相相比, $\delta$  相虽然消耗的 Nb 元素相对较少,而且它的适量析出能够在一定程度上控制合金的晶粒尺寸,提高合金的缺口敏感性,但是如果在热处理过程中析出了过量的  $\delta$  相,则势必会影响强化相  $\gamma'$  的析出<sup>[12,15]</sup>。鉴于此,本文对经过不同时效处理的激光增材再制造 Inconel 718 修复区及母材的组织 and 性能的演变规律进行分析,并讨论了时效处理过程中主强化相  $\gamma'$  相和  $\delta$  相的转变行为,以期对激光增材修复 Inconel 718 合金提供理论基础。

## 2 实验材料及方法

### 2.1 实验材料

实验所用母材为 100 mm×80 mm×15 mm 的轧制态 Inconel 718 高温合金板材,实验前对其进行如图 1 所示的预制坡口处理。为防止修复过程中熔合不良缺陷的产生,根据前期工作经验选择坡口角度  $\alpha=140^\circ$  的预制凹槽进行修复<sup>[16]</sup>。激光增材修复材料采用与母材成分相似的 Inconel 718 球形粉末,粒径为 53~150  $\mu\text{m}$ ,化学成分见表 1。

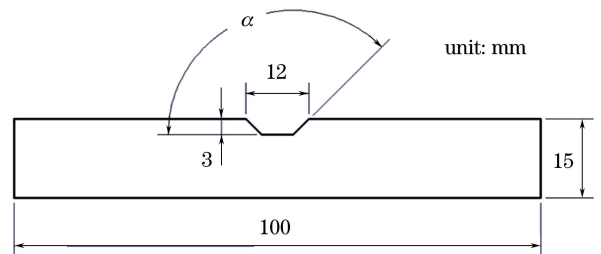


图 1 预制凹槽尺寸图

Fig. 1 Dimensions of premade groove

表 1 Inconel 718 基板和合金粉末的化学成分

Table 1 Chemical compositions of Inconel 718 substrate and alloy powder

Element	Mass fraction /%									
	Nb	Cr	Fe	Mo	Al	Ti	Si	C	Mn	Ni
Substrate	5.0	19.0	17.45	3.0	0.7	1.0	0.3	0.072	0.2	Bal.
Powder	4.92	19.20	18.1	3.19	0.54	0.97	0.20	0.045	0.04	Bal.

### 2.2 实验方法

采用配有同轴送粉头的最大输出功率为 2 kW 的 LDF 型柔性光纤耦合半导体激光器对预制凹槽进行修复。激光波长为 980~1070 nm, 焦距为 400 mm, 光斑直径为 4 mm, 光斑能量密度呈近似平顶分布。修复过程中使用氩气作为保护气及载气。激光再制造修复工艺参数如下<sup>[14]</sup>: 激光功率  $P=0.9$  kW, 扫描速度  $v=6$  mm/s, 送粉速率  $Q=10$  g/min, 搭接率为 40%,  $z$  轴抬升量为 0.64 mm, 修复方式为长边扫描, 即沿着垂直于预制槽宽 (12 mm) 的方向进行填充。不同的时效处理实验方案如表 2 所示。

表 2 激光增材再制造 Inconel 718 合金直接时效处理实验方案

Table 2 Experimental scheme of direct aging treatment for Inconel 718 alloy repaired by laser additive manufacturing

Aging temperature / °C	Aging time / h	Cooling way
800	4, 8, 16, 32	Furnace cooling to 620 °C, holding for 8 h, air cooling

用腐蚀液 (100 mL HCl+100 mL C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH+5 g CuCl<sub>2</sub>) 对试样进行腐蚀, 然后利用 ZEISS EVO18 型扫描电镜 (SEM) 对试样的显微组织及析出相进行观察和分析。采用自动维氏硬度计测试不同时效时间下的试样显微硬度, 加载的载荷为 1.96 N, 加载时间为 10 s。利用万能试验机 (SANS 公司) 进行常温拉伸性能测试, 拉伸件尺寸如图 2 所示。

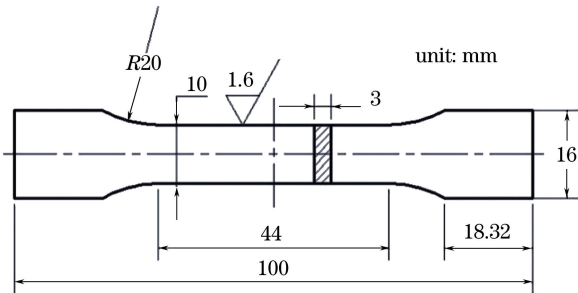


图 2 常温拉伸性能测试试样的尺寸

Fig. 2 Dimensions of specimen for testing tensile properties at room temperature

### 3 实验结果与分析

图 3 所示为在 800 °C 时效不同时间的 Inconel 718 沉积层的组织形貌, 可以看出: 当时效时间为 4 h 时, Laves 相周围存在强化相  $\gamma''$  和少量细针状  $\delta$  相; 随着时效时间延长, 强化相  $\gamma''$  逐渐消失, 针状  $\delta$  相逐渐长大, 时效 16 h 后基本无  $\gamma''$  相存在, 时效 32 h 后长链状 Laves 相明显减少。此外,  $\delta$  相在残余 Laves 相周围的生长具有一定的特点, 即基本依附于 Laves 相周围, 并向两侧枝晶生长。

表 3 是在 800 °C 时效不同时间后修复层中  $\delta$  相的平均长度  $L$  和平均宽度  $W$ 。通过统计发现,  $\delta$  相的平均长度  $L$ 、平均宽度  $W$  均与时效时间的立方根  $t^{1/3}$  成线性关系, 如图 4 所示。由文献[17]可知, 该生长过程遵循 LSW (Lifeshitz-Slyozow-Wagner) 理论, 其动力学关系式为

$$D^3 - D_0^3 = Kt, \quad (1)$$

式中:  $D$  为时效处理后  $\delta$  相的平均尺寸, 单位为 nm;  $D_0$  为  $\delta$  相开始长大时的平均尺寸, 单位为 nm;  $K$  为长大速率, 单位为 nm<sup>3</sup>/h;  $t$  为时效时间, 单位为 h。从图 4 可以看到,  $\delta$  相在长度方向的生长速率高于在宽度方向上的长大速率。

表 3 在 800 °C 时效不同时间后的修复层中  $\delta$  相的平均长度  $L$  和平均宽度  $W$

Table 3 Average length  $L$  and width  $W$  of  $\delta$  phase in repaired layer with different aging time at 800 °C

Holding time / h	$L$ / nm	$W$ / nm
4	1300	100
8	2050	150
16	2900	237
32	4008	310

由文献[12-15]可知,  $\delta$  相的析出行为与其形核位置及时效温度有关。当时效温度高于 900 °C 时,  $\delta$  相可以直接从过饱和的固溶体中析出, 而当时效温度低于 900 °C 时, 由于强化相  $\gamma''$  的析出能垒比  $\delta$  相的析出能垒低得多, 所以  $\delta$  相一般晚于  $\gamma''$  和  $\gamma'$  相析出。因此, 在 800 °C 的时效处理过程中, Laves 相周围优先析出强化相  $\gamma''$ , 但是由于  $\gamma''$  为亚稳定相, 随着时效过程的进行会发生  $\delta$  相转变, 具体过程如图 5

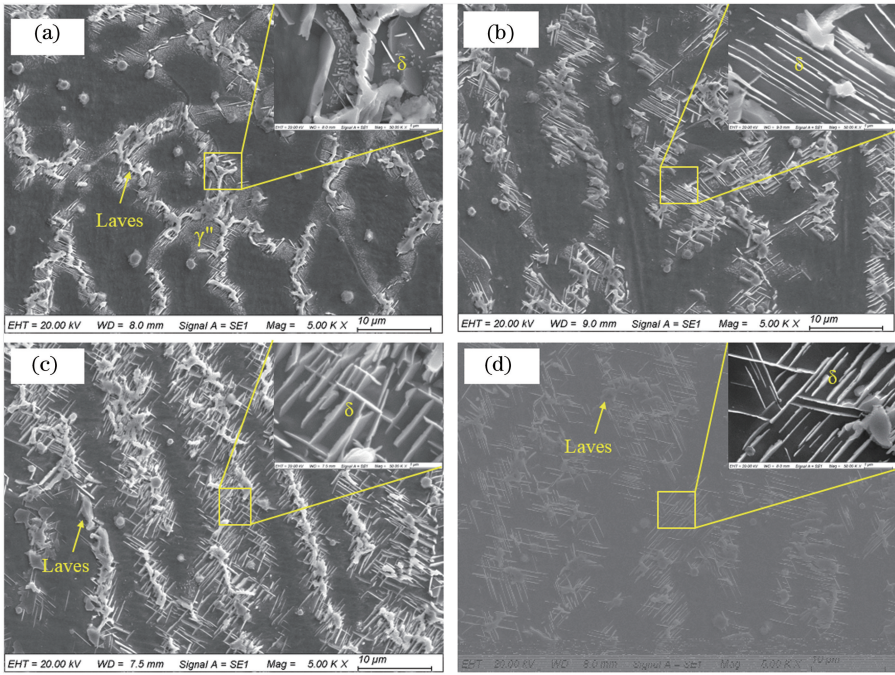


图 3 在 800 °C 时效不同时间后的修复层的 SEM 形貌。(a) 4 h; (b) 8 h; (c) 16 h; (d) 32 h

Fig. 3 SEM images of repaired Inconel 718 alloy with different aging time at 800 °C. (a) 4 h; (b) 8 h; (c) 16 h; (d) 32 h

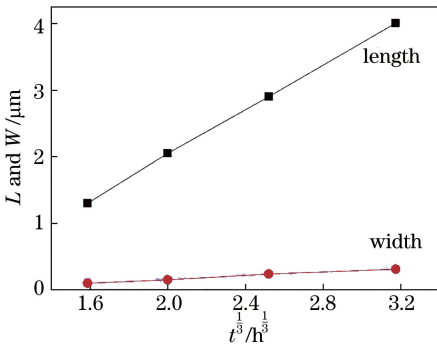


图 4  $\delta$  相平均尺寸随时效时间的变化

Fig. 4 Average size of  $\delta$  phase as a function of aging time shown. In the aging process, with the passage of time,  $\gamma''$  phase absorbs Nb elements dissolved in Laves phase and nucleates in  $\gamma$  matrix, and then produces a large lattice distortion at  $\gamma''/\gamma$  interface, leading to  $\gamma''$

相在(112)密排面上出现错排,从而产生堆垛层错。该层错为 3 个连续的 CACA 堆垛型结构,其结构与  $\delta$  相的晶体结构特征一致<sup>[17-18]</sup>。因此, $\delta$  相很容易通过切变的方式在  $\gamma''$  相密排面层错的基础上形核。之后,形核的  $\delta$  相沿着  $\gamma''$  相的密排方向不断长大,在与其他  $\gamma''$  相接触或者相交时产生新的层错,促使新的  $\delta$  相形核和长大,即促使  $\gamma'' \rightarrow \delta$  的转变。

图 6 是轧制态母材 Inconel 718 合金在 800 °C 下时效不同时间后的 SEM 形貌,可以看出:时效 4 h 后, $\gamma''$  相在晶内析出,但尺寸较小,棒状、颗粒状和细小的针状  $\delta$  相在晶界析出;随着时效时间延长,晶内  $\gamma''$  相粗化,且部分区域出现了长针状  $\delta$ ;当时效时间达到 32 h 时,晶界处的  $\delta$  相沿晶界生长,晶体内的绝大部分强化相  $\gamma''$  消失,晶内生成的  $\delta$  相彼此平行,生

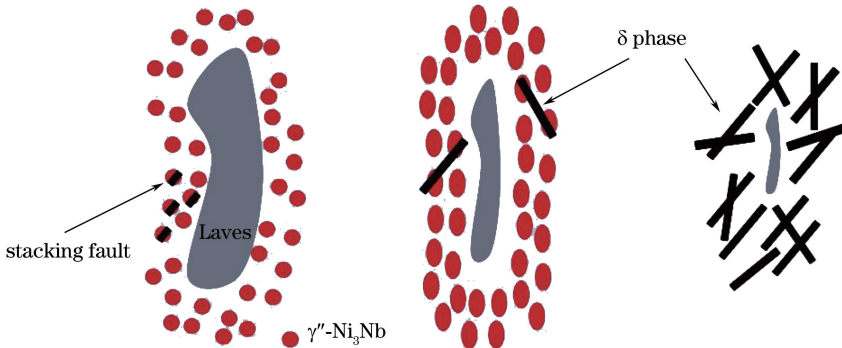


图 5  $\delta$  相的形核与长大机制

Fig. 5 Nucleation and growth mechanism of  $\delta$  phase

长方向规律。这是因为随着时效时间延长,  $\delta$  相在强化相  $\gamma''$  的层错上形核并长大析出, 相邻  $\delta$  相彼此连接, 在晶内表现为平行式生长, 且时效时间越久,  $\delta$  相尺寸越大。

母材和修复层中  $\delta$  相的析出行为有所差异, 这是因为  $\delta$  相的析出与 Nb 元素含量有很大关系, 且

Nb 元素含量越高越有利于其快速析出。对于沉积态 Inconel 718 来说, 由于强化元素 Nb 主要在枝晶间偏析, 因此,  $\delta$  相优先在枝晶间的 Laves 相周围生成。而对于轧制态母材来说, 由于其制备特点, Nb 元素在晶界处的含量高于晶内含量, 因此优先在晶界析出。

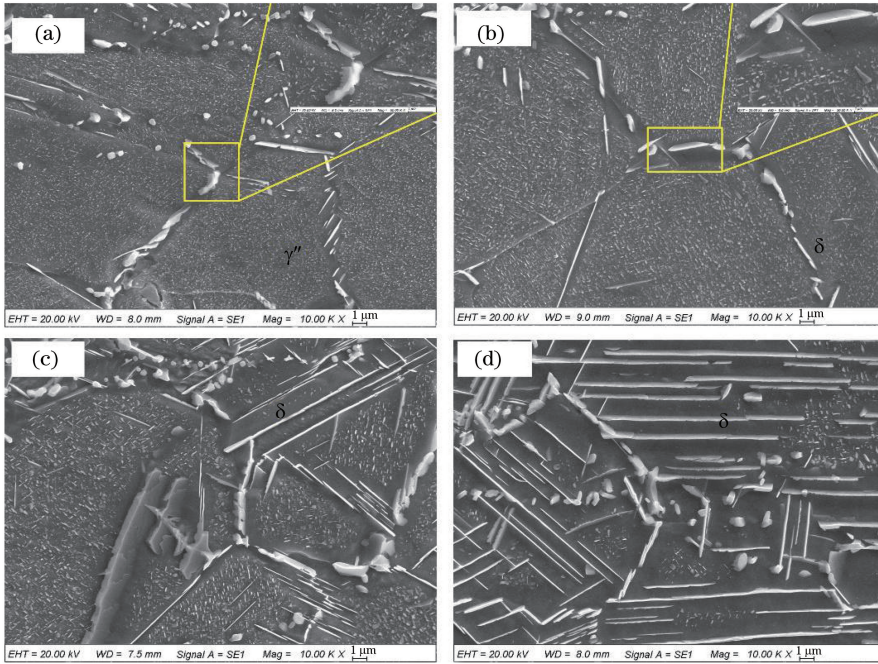


图 6 在 800 °C 时效不同时间后的热轧态母材的 SEM 形貌。(a) 4 h; (b) 8 h; (c) 16 h; (d) 32 h

Fig. 6 SEM images of hot-rolled Inconel 718 substrate with different aging time at 800 °C.

(a) 4 h; (b) 8 h; (c) 16 h; (d) 32 h

从图 7 可以看出: 时效处理前, 修复层及母材的显微硬度较小; 经过 4 h 时效处理后, 显微硬度显著提高, 但是随着时效时间的进一步延长, 两者的显微硬度均呈现逐渐降低的趋势。这是因为沉积态组织中几乎没有强化相  $\gamma''$  析出, 而在后续时效处理过程中, 强化相  $\gamma''$  析出, 从而使得显微硬度显著提高; 但是随着时效时间的推移, 强化相  $\gamma''$  逐渐粗化并逐渐

发生  $\gamma'' \rightarrow \delta$  的转变, 使其硬度呈现下降趋势。此外, 在相同的时效时间下, 母材的显微硬度高于修复层的显微硬度。这是因为母材为热轧态的锻造板材, 热加工过程中没有 Laves 相析出, 微观偏析不严重, 与激光修复层相比易于在后续时效过程中析出强化相。

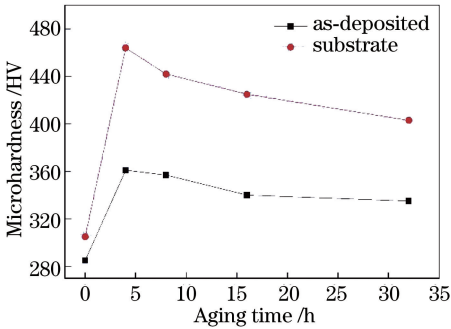


图 7 在 800 °C 时效不同时间后的修复层及母材的显微硬度

Fig. 7 Microhardness of repaired layer and substrate of Inconel 718 alloy with different aging time at 800 °C

图 8 是激光增材修复 Inconel 718 合金在 800 °C 下时效不同时间后的室温拉伸应力-应变曲线以及拉伸性能柱状图。由图 8 可知: 与沉积态试样相比, 在 800 °C 时效处理后的试样的拉伸性能明显提高; 随着时效时间延长, 试样的抗拉强度在时效 4 h 时达到峰值 1026 MPa, 较沉积态试样的 884 MPa 提高了 16.1%, 此时, 断后伸长率为 5.2%; 时效 8 h 后, 试样的拉伸性能有所降低, 抗拉强度和断后伸长率分别为 988 MPa 和 4.8%; 继续延长时效时间, 试样的拉伸性能进一步变差, 当时效时间延长至 32 h 时, 抗拉强度降低为 882 MPa, 此时试样中的  $\gamma''$  相几乎全部转变为  $\delta$  相, 对 Inconel 718 合金强

度带来不利影响。李亚敏等<sup>[19]</sup>在长时间时效处理对 GH625 合金组织及性能影响的研究中也发现了

相似的结果,即时效过程中大量  $\delta$  相的析出长大导致 GH625 合金的强度和塑性降低。

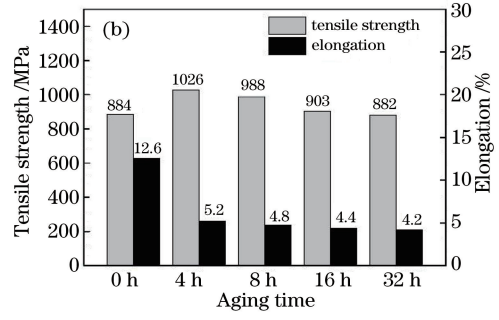
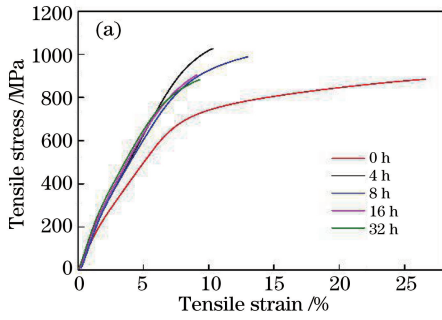


图 8 激光增材修复 Inconel 718 合金在 800 °C 时效不同时间后的拉伸应力-应变曲线及拉伸性能。(a)应力-应变曲线;(b)拉伸性能

Fig. 8 Tensile stress-strain curves and tensile properties of Inconel 718 alloy repaired by laser additive manufacturing with different aging time at 800 °C. (a) Tensile stress-strain curves; (b) tensile properties

图 9 为激光增材修复 Inconel 718 合金在不同时效时间下的拉伸断裂宏观图,可以看出,不同时效时间下的试样均断裂于修复区,而非修复结合处,这说明增材修复区域与母材连接良好。同时也表明激光增材修复件经时效处理后,修复区仍然是薄弱区域。此外,所有试样的拉伸断口整齐,没有发生明显的塑性变形,呈现典型的脆性断裂特征。用扫描电镜对断口进行观察,结果如图 10 所示,可以看出,不同试样拉伸断口上的韧窝尺寸相近,但是随着时效时间延长,韧窝深度变浅,说明试样的塑性逐渐变差,这与图 8 中的拉伸测试结果一致。

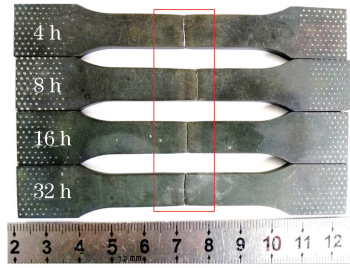


图 9 激光增材修复 Inconel 718 合金在 800 °C 时效不同时间后的拉伸断裂宏观图

Fig. 9 Macrograph of tensile fractures of Inconel 718 alloy repaired by laser additive manufacturing with different aging time at 800 °C

图 11 是激光增材修复 Inconel 718 合金在

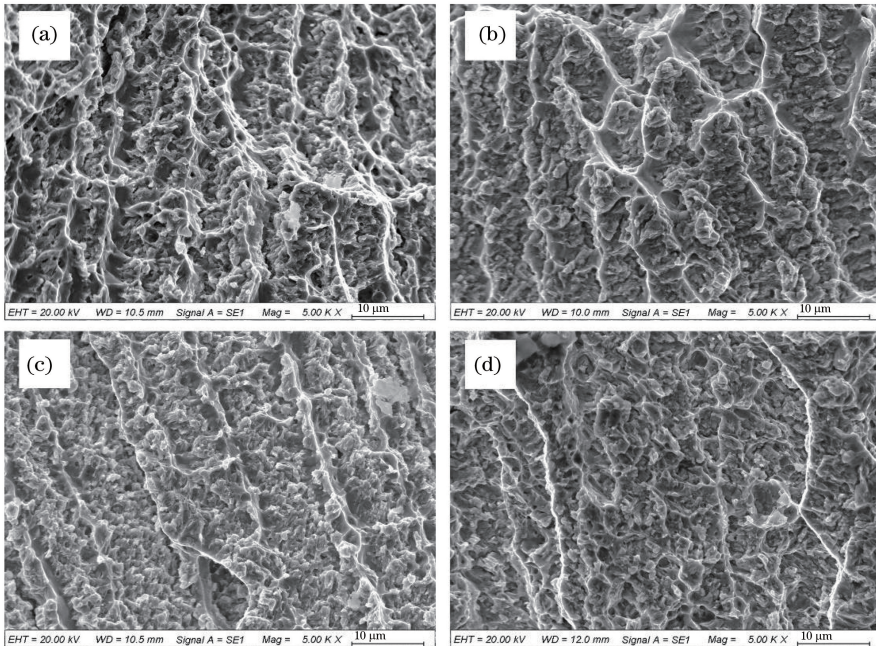


图 10 激光增材修复 Inconel 718 合金在 800 °C 时效不同时间后的拉伸断口形貌。(a) 4 h; (b) 8 h; (c) 16 h; (d) 32 h

Fig. 10 SEM images of tensile fractures of Inconel 718 alloy repaired by laser additive manufacturing with different aging time at 800 °C. (a) 4 h; (b) 8 h; (c) 16 h; (d) 32 h

800 °C 时效不同时间后拉伸断口的横截面形貌,可以看出,拉伸断口主要沿着枝晶间的 Laves 相、 $\delta$  相和  $\gamma$  基体之间的相界面延伸。这是因为在修复过程中,Nb、Mo 和 Ti 等强化元素在枝晶间偏析形成了 Laves 相,导致  $\gamma$  基体的强化元素贫瘠,大大削弱了

$\gamma$  基体的强度,促使裂纹沿着 Laves 相界面产生。此外,时效过程中  $\delta$  相通过消耗强化元素在枝晶间大量析出,并且随着时效时间延长而不断增多,加剧了枝晶间强化元素的贫瘠程度,削弱了基体的强度,为拉伸过程中裂纹的萌生与扩展提供便利通道。

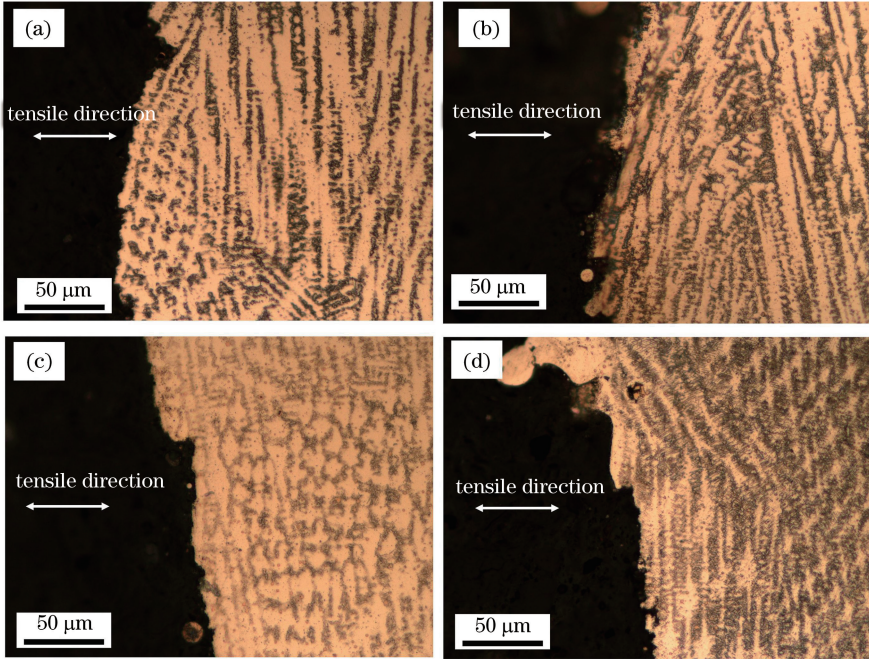


图 11 激光增材修复 Inconel 718 合金在 800 °C 时效不同时间后拉伸断口的横截面形貌。

(a) 4 h; (b) 8 h; (c) 16 h; (d) 32 h

Fig. 11 Cross-sectional morphologies of tensile fractures of Inconel 718 alloy repaired by laser additive manufacturing with different aging time at 800 °C. (a) 4 h; (b) 8 h; (c) 16 h; (d) 32 h

## 4 结 论

在时效过程中,Inconel 718 合金激光修复层中的  $\delta$  相通过切变的方式在 Laves 相周围  $\gamma''$  相密排面层错的基础上形核,并沿着  $\gamma''$  相的密排方向不断长大。

激光再制造试件在时效处理过程中,母材中的  $\delta$  相优先在晶界处形核,随着时效时间的延长, $\delta$  相最终在晶粒内部形成且取向一致。

随着时效时间延长,Laves 相及强化相  $\gamma''$  逐渐减少, $\delta$  相不断形核长大,导致激光再制造 Inconel 718 合金母材及修复区的显微硬度呈现下降趋势。

在 800 °C 下时效不同时间后,激光再制造试件在修复区发生脆性断裂,断口上韧窝的尺寸相似;随着时效时间延长,韧窝深度变小。

## 参 考 文 献

[1] Zhao W W, Lin X, Liu F C, 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.

赵卫卫, 林鑫, 刘奋成, 等. 热处理对激光立体成形 Inconel 718 高温合金组织和力学性能的影响[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3220-3225.

[2] Wei X P, Zheng W J, Song Z G, et al. Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Inconel 718 alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(8): 53-58. 魏先平, 郑文杰, 宋志刚, 等. 热处理对 Inconel 718 合金组织及力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(8): 53-58.

[3] Niu J, Zhang F Y, Yang S L, et al. Effects of aging treatments on the microstructure and mechanical properties of GH4169 alloy [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(20): 45-48.

牛静, 张凡云, 杨树林, 等. 不同时效处理对 GH4169 合金组织性能的影响[J]. 航空制造技术, 2016(20): 45-48.

[4] Zhang Q L, Yao J H, Mazumder J. Laser direct metal deposition technology and microstructure and

- composition segregation of Inconel 718 superalloy[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2011, 18(4): 73-78.
- [5] Zhang Y C, Li Z G, Nie P L, et al. Effect of ultrarapid cooling on microstructure of laser cladding IN718 coating [J]. Surface Engineering, 2013, 29(6): 414-418.
- [6] Feng X T, Gu H, Zhou S F, et al. Microstructure and electrochemical corrosion behavior of TC4 titanium alloy cladding layer prepared with powder feeding laser additive manufacturing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0302003.  
冯晓甜, 顾宏, 周圣丰, 等. 送粉式激光增材制造 TC4 钛合金熔覆层组织及电化学腐蚀行为的研究 [J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0302003.
- [7] Wei J, Li Y L, He Y L, et al. Influence of Hastelloy-X powder composition on anisotropic forming performance of selective laser melting [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1202011.  
魏菁, 李雅莉, 何艳丽, 等. Hastelloy-X 粉末成分对激光选区熔化成形各向成形性能的影响 [J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1202011.
- [8] Yu Q, Wang C S. Laser additive manufacturing of Ni45 alloys assisted by electromagnetic stirring [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0402003.  
于群, 王存山. 电磁搅拌辅助 Ni45 合金的激光增材制造 [J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0402003.
- [9] Zhao J F, Cheng C, Xie D Q, et al. High-temperature tensile property of GH4169 nickel-based superalloys by laser repair [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0802012.  
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): 0802012.
- [10] Bian H Y, Zhao X P, Qu S, et al. Effect of heat treatment on high temperature tensile properties of laser deposition repair GH4169 superalloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 0103008.  
卞宏友, 赵翔鹏, 曲伸, 等. 热处理对激光沉积修复 GH4169 合金高温性能的影响 [J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0103008.
- [11] Bian H Y, Zhao X P, Yang G, et al. Microstructure and properties of heat treatment GH4169 alloy by laser deposition repair [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(12): 1206001.  
卞宏友, 赵翔鹏, 杨光, 等. 激光沉积修复 GH4169 合金热处理的组织及性能 [J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1206001.
- [12] Liu F C, Lü F Y, Ren H, et al.  $\delta$  phase precipitation of Inconel 718 Ni-based superalloy fabricated by laser solid forming [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1202009.  
刘奋成, 吕飞阅, 任航, 等. 激光立体成形 Inconel 718 镍基高温合金  $\delta$  相析出规律 [J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1202009.
- [13] Sui S, Chen J, Ma L, et al. Microstructures and stress rupture properties of pulse laser repaired Inconel 718 superalloy after different heat treatments [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 770: 125-135.
- [14] Zhang J, Zhang Q L, Chen Z J, et al. Effects of solution temperature on microstructure and properties of Inconel 718 alloy fabricated via laser additive manufacturing [J]. Surface Technology, 2019, 48(2): 47-53.  
张杰, 张群莉, 陈智君, 等. 固溶温度对激光增材制造 Inconel 718 合金组织和性能的影响 [J]. 表面技术, 2019, 48(2): 47-53.
- [15] Shen J L. Study on the characteristics of  $\delta$  phase precipitation and its effect on welding seam fracture in GH4169 alloy [D]. Guiyang: Guizhou University, 2018: 22-33.  
申佳林. GH4169 合金中  $\delta$  相析出特征及其对焊缝断裂性能影响规律研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2018: 22-33.
- [16] Zhang Q L, Li D, Zhang J, et al. Influence of pre-fabricated groove angle on microstructure and properties of laser additive remanufactured IN718 alloy [J]. Surface Technology, 2019, 48(5): 90-96.  
张群莉, 李栋, 张杰, 等. 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 [J]. 表面技术, 2019, 48(5): 90-96.
- [17] Di X J, Xing X X, Wang B S. Nucleation and coarsening mechanism of  $\delta$  phase in Inconel 625 deposited metal [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(3): 323-328.  
邸新杰, 邢希学, 王宝森. Inconel 625 熔敷金属中  $\delta$  相的形核与粗化机理 [J]. 金属学报, 2014, 50(3): 323-328.
- [18] Zhang J L. Effect of  $\delta$ -phase on the microstructural evolution and properties of GH4169 alloy [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017: 23-32.  
张京玲.  $\delta$  相对 GH4169 合金的组织演化和性能影响 [D]. 天津: 天津大学, 2017: 23-32.
- [19] Li Y M, Zhu R M, Liu H J, et al. Effect of long-time aging on precipitated phase and tensile properties of GH625 alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(2): 262-269.  
李亚敏, 朱瑞明, 刘洪军, 等. 长时间时效对 GH625 合金析出相和拉伸性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(2): 262-269.