

# 热处理对激光立体成形 GH3536 力学性能的影响

王树森<sup>1</sup>, 郝铭淞<sup>2, 3</sup>, 梁静静<sup>2</sup>, 刘丽荣<sup>3</sup>, 王道红<sup>4</sup>, 张 鹏<sup>4</sup>

(1. 中国人民解放军海军装备部驻沈阳地区军事代表局驻鞍山地区军事代表室, 辽宁鞍山 114001;  
2. 中国科学院金属研究所师昌绪材料创新中心, 辽宁沈阳 110016; 3. 沈阳工业大学, 辽宁沈阳 110016;  
4. 江苏飞跃机泵集团有限公司, 江苏靖江 214537)

**摘要:** 为提高激光立体成形GH3536航空发动机零件高温段的力学性能, 对成形后的合金采用3种热处理制度, 测试热处理后试样的拉伸和持久性能, 分析了断口形貌和失效机理。结果表明: 经双级时效热处理后的GH3536合金的抗拉强度和持久寿命有所提高; 980 °C固溶+双级时效热处理后的合金显微组织中存在Laves相, 影响了合金力学性能; 适当提高固溶处理温度和延长保温时间后, 合金组织内部强化相弥散分布, 改善了合金力学性能。

**关键词:** 激光立体成形; GH3536镍基高温合金; 热处理; 力学性能

航空发动机的发展水平体现了一个国家的整体工业水平。发动机工作时, 内部环境大多处于高温、高压和高交变载荷的环境, 这就要求一些发动机零部件具有耐高温、高压、耐腐蚀以及优良的抗疲劳等性能特点。并且, 航空发动机的研制周期长, 技术难度大, 耗费资金多, 其对设计、加工及制造能力都有很高的要求, 是一种典型的技术密集型产品<sup>[1]</sup>。

GH3536合金是一种具有优异抗氧化性、耐腐蚀性和持久蠕变性能的镍基高温合金, 该合金中Fe元素含量较高, Mo、W元素含量较低; 塑性较好, 易加工成不同尺寸的板材、线材、棒材和金属管材<sup>[2]</sup>, 是目前用量较大的几种常用高温合金之一。

增材制造是一种新型无模具、短流程、低成本、数字化、柔性高的金属零部件成形加工技术, 它是从CAD设计的三线实体数据出发, 以合金粉末作为初始材料, 逐点扫描实现零部件的近净成形。该技术集设计与制造为一体, 可以突破传统工艺制造多孔网络、空心等复杂结构的技术瓶颈, 实现产品结构复杂化和轻量化<sup>[3-5]</sup>。由于激光立体成形过程中冷却速度较快, 导致合金中部分元素来不及析出而形成过饱和固溶体, 进而起到强化作用。通过热处理可以控制析出相的析出行为。为此, 本试验以GH3536合金粉末为成形材料, 研究热处理制度对激光立体成形GH3536合金力学性能的影响, 为激光立体成形高性能GH3536合金零部件的研制奠定基础。

## 1 试验材料与方法

本试验采用的基板材料均为锻造GH3536合金, 避免基板的导热系数等物理性能对成形后的GH3536力学性能产生影响。试验前将其切成25 mm × 25 mm × 10 mm尺寸的块状。用砂纸将其表面的氧化皮打磨光亮并用乙醇清洗干净。激光立体成形的粉末材料由氩气雾化喷粉所制备的GH3536合金球形粉末。合金粉末化学成分见表1, 其微观形貌见图1。

本试验用于制备样品的激光器型号为E-T-N CO<sub>2</sub>激光器。最大功率为4 000 W, 由氩气动态气氛保护装置、循环冷却系统、同轴送粉装置及成形控制计算机系统组

### 作者简介:

王树森(1982-), 男, 硕士, 主要从事舰船材料研究工作。电话: 18804122930, E-mail: 446757808@qq.com

### 通讯作者:

梁静静, 女, 研究员, 博士。E-mail: jiliang@imr.ac.cn

中图分类号: TG146.1<sup>+</sup>5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

05-0508-06

### 基金项目:

国家科技重大专项(Y2019-VII-0011-0151)。

### 收稿日期:

2022-04-24 收到初稿,  
2022-07-17 收到修订稿。

表1 GH3536粉末化学成分  
Table 1 Chemical composition of GH3536 powder  $w_B/\%$

Cr	Fe	Co	W	Mo	C	Ni
21.75	18.5	1.5	0.6	9.0	0.12	余量

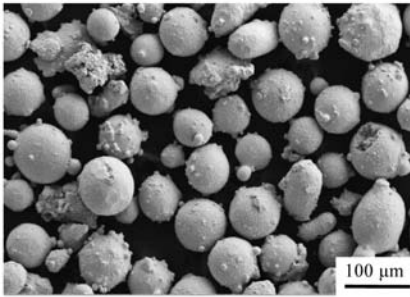


图1 H3536合金粉末形貌

Fig. 1 Morphology of GH3536 alloy powder

成。光斑直径为2 mm。送粉量为11 g/min。保护气为99.99%纯度的氩气，气流量控制在0.3 g/min。每成形16层沉积方向Z轴抬高2 mm，经优化的激光功率和扫描速度分别为 $P=1\ 300\ W$ ， $V=1\ 300\ mm/min$ 。采用上述方法

制备尺寸为20 mm × 20 mm × 60 mm试样。根据高温合金手册规定并结合GH3536合金的特点，对所得样品进行三种工艺的热处理见表2<sup>[6-8]</sup>。

将试样加工成板材状拉伸试样。拉伸试样尺寸及实物图如图2所示。试验时采用3个平行样品，以避免偶然性误差。室温采用GB/T 228—2010标准，高温采用GB/T 228—2015标准，使用WDW-100万能试验机测试沉积方向的拉伸性能，拉伸速度为0.3 mm/min。在持久试验机上进行试验条件为500 °C/85 MPa和815 °C/110 MPa的持久试验。对拉伸和持久断裂后的试样使用扫描电镜进行断口形貌的观察。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 拉伸性能

图3为不同热处理状态下GH3536合金在3种温度下的拉伸应力-应变曲线。表3为沉积态和热处理态GH3536合金拉伸数据。相比于沉积态，热处理后合金拉伸性能有所提高。室温条件下，经热处理后的GH3536合金，抗拉强度略有提高，伸长率升高。其中

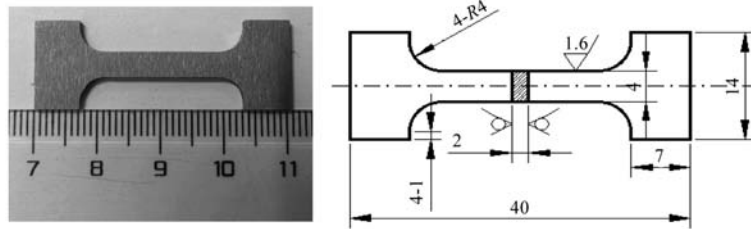
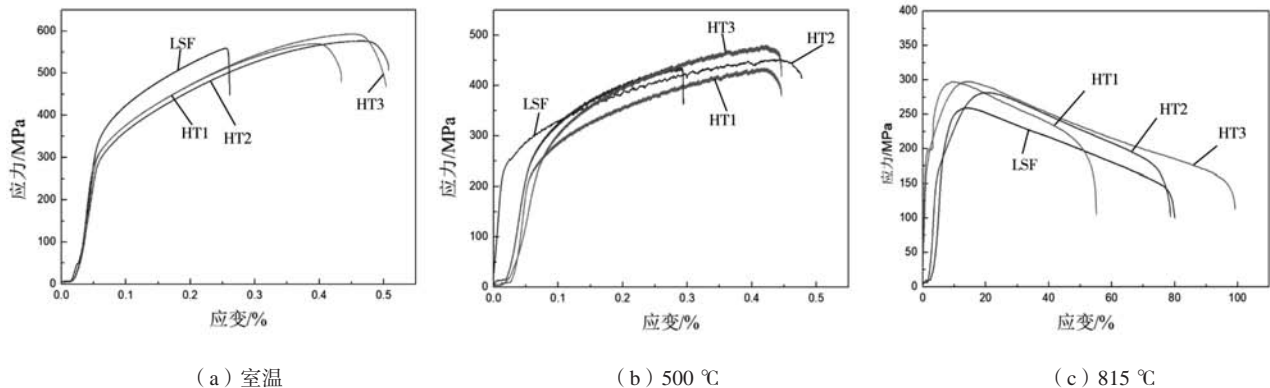


图2 成形件实物图和试样尺寸

Fig. 2 Physical drawing of the forming part and sample size

表2 激光立体成形GH3536合金的热处理工艺  
Table 2 Heat treatment processes of the laser solid forming GH3536 alloy

工艺	过程
双级时效 (HT1)	720 °C/8 h+620 °C/8 h炉冷
980 °C固溶+双级时效 (HT2)	980 °C/40 min/水冷+720 °C/8 h+620 °C/8 h炉冷
1 100 °C固溶+双级时效 (HT3)	1 100 °C/1 h/水冷+720 °C/8 h+620 °C/8 h炉冷



(a) 室温

(b) 500 °C

(c) 815 °C

图3 不同温度下GH3536合金拉伸数据应力-应变曲线

Fig. 3 Tensile data stress-strain curves of GH3536 alloy at different temperatures

表3 不同状态GH3536合金拉伸数据  
Table 3 Tensile data of GH3536 alloy in different states

试样状态	室温			500 °C			815 °C		
	$\sigma_{p0.2}/\text{MPa}$	$\sigma_b/\text{MPa}$	$\delta_5/\%$	$\sigma_{p0.2}/\text{MPa}$	$\sigma_b/\text{MPa}$	$\delta_5/\%$	$\sigma_{p0.2}/\text{MPa}$	$\sigma_b/\text{MPa}$	$\delta_5/\%$
LSF	342	559	27	222	453	46.5	179	259	75
HT1	347	570	43.4	220	435	44.6	175	297	55.5
HT2	317	576	50.8	210	438	40.5	236	282	65.5
HT3	322	593	50.4	223	480	44.7	168	298	75

1 100 °C固溶+双级时效处理后的GH3536合金室温拉伸性能最佳。抗拉强度较沉积态提高40 MPa, 伸长率提高一倍。500 °C试验条件下, 双级时效处理和980 °C固溶+双级时效处理后的GH3536合金, 抗拉强度和伸长率无变化; 1 100 °C固溶+双级时效处理后的拉伸性能提高。815 °C试验条件下, 热处理后GH3536合金抗拉强度升高, 伸长率无变化。

## 2.2 拉伸断口

图4为不同状态GH3536合金的拉伸断口宏观形貌。3种试验温度下, 随着热处理步骤的增加以及固溶温度的提高, 断口形貌趋于平整。表明热处理后的合金在拉伸过程中发生塑性变形, 断裂方式为韧性断裂。同一种热处理制度的GH3536合金, 随着拉伸试验

温度的提高, GH3536合金的脆性降低。

图5为不同状态GH3536合金的拉伸断口微观形貌。热处理后的GH3536合金拉伸断口存在大量细小韧窝, 表明其断裂方式以韧性断裂为主。热处理后的GH3536合金塑性增强。室温试验条件下, 随着热处理温度的提高, 拉伸断口逐渐平整。随着试验温度的提高, 断口中导致裂纹生成的孔洞数量增加, 进而导致抗拉强度降低。

结合拉伸数据和断口形貌, 可知不同状态下GH3536合金拉伸性能的变化与微观组织中析出相的种类、数量与分布有关。经双级时效处理后的GH3536合金拉伸断口(图6a)富含Cr、Mo元素碳化物。这种碳化物的存在提高了双级时效热处理后的合金抗拉强度。经980 °C固溶+双时效处理后GH3536合金(图

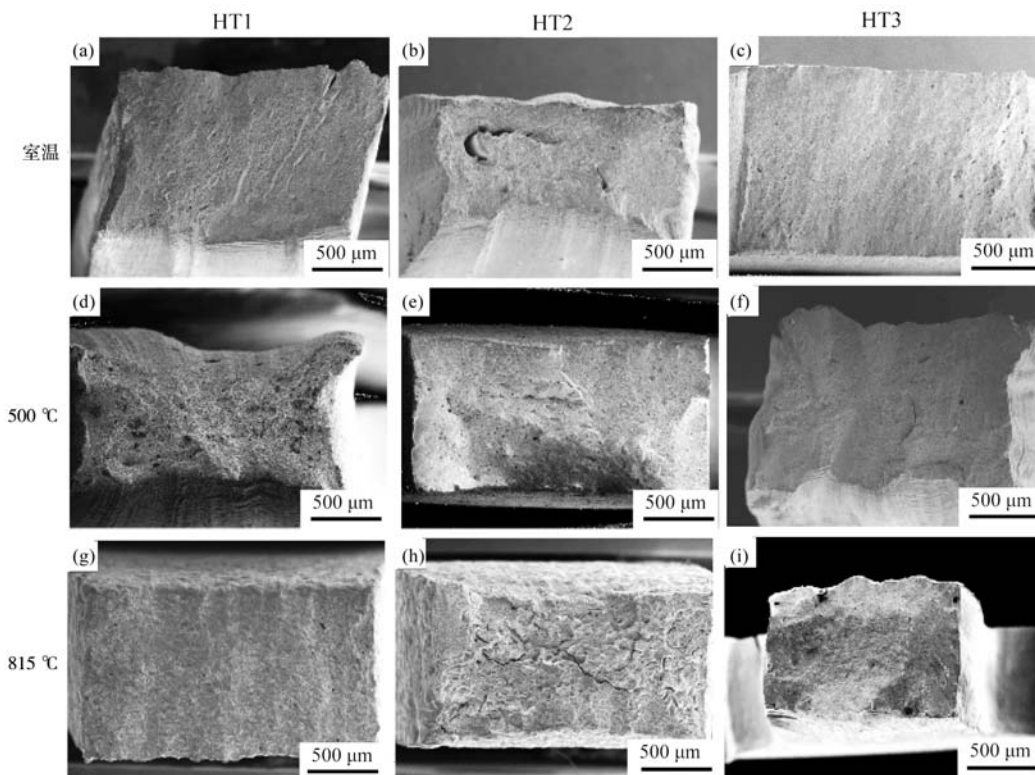


图4 不同状态GH3536合金不同温度拉伸断口宏观形貌

Fig. 4 Macroscopic morphologies of tensile fractures of GH3536 alloy in different states at different temperatures

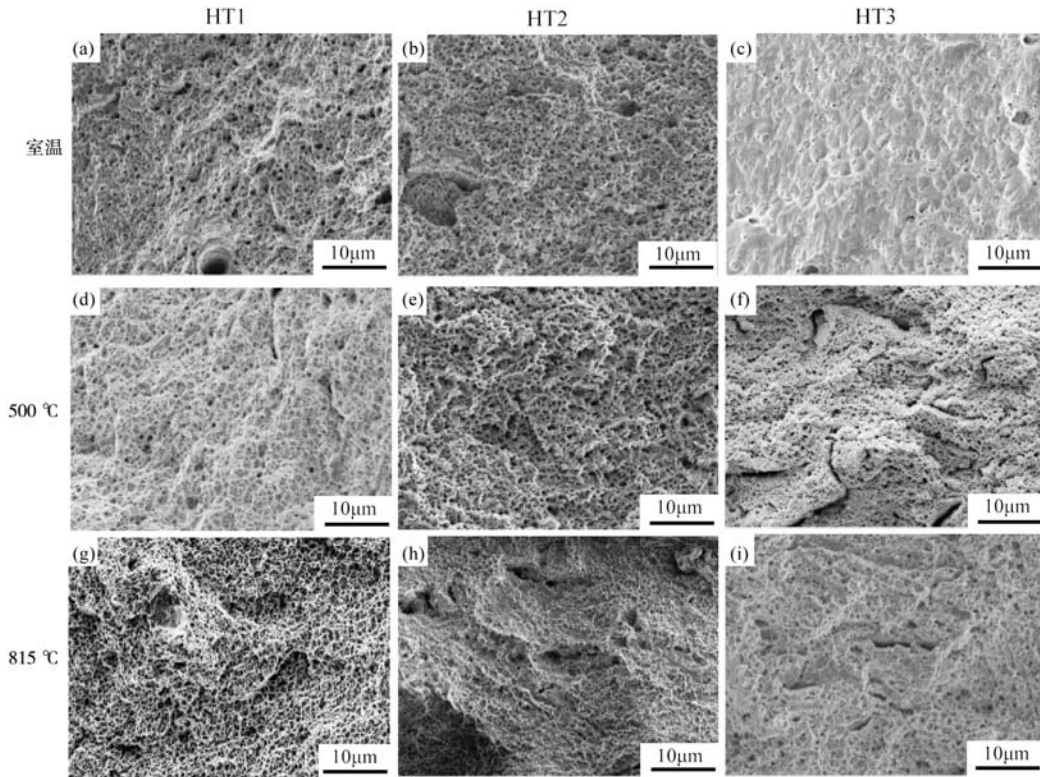


图5 不同状态GH3536合金不同温度拉伸断口微观形貌

Fig. 5 Micromorphologies of the tensile fractures of the GH3536 alloy in different states at different temperatures

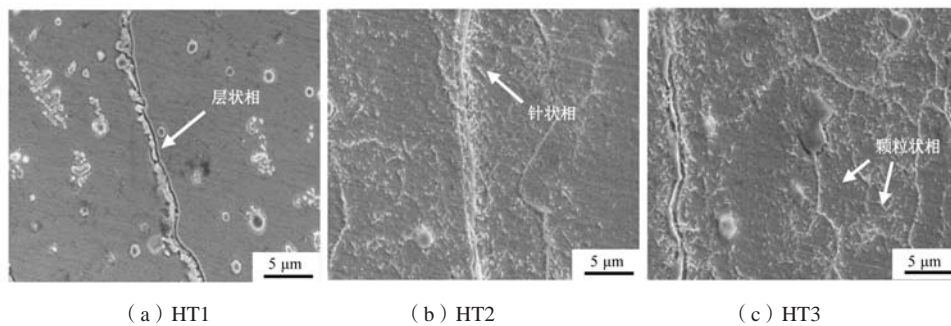


图6 GH3536合金热处理后显微组织

Fig. 6 Microstructures of the GH3536 alloy after heat treatment

6b), 晶界处碳化物形貌由颗粒状变为连续分布的链状, 在晶界附近析出针状的Laves相。因此, 980 °C固溶+双级时效处理后的GH3536合金抗拉强度无明显变化。当提高固溶处理温度和延长保温时间后, 晶界附近析出的Laves相分解为弥散分布在晶粒内部的颗粒状相(图6c), 提高了力学性能。因此, 固溶+双级时效处理后的GH3536合金抗拉性能最佳。图7为图6标记处的析出相EDS成分分析结果。

### 2.3 持久性能

图8为不同状态下GH3536合金在500 °C/85 MPa和815 °C/110 MPa试验条件下持久性能曲线图。沉积态合金在两种试验条件下寿命分别为260.7 h和18.7 h。经热

处理后, GH3536合金在500 °C/85 MPa试验条件下的持久寿命为265.2 h、199.5 h、315.4 h; 815 °C/110 MPa试验条件下的持久寿命为20.4 h、12.3 h、27.5 h。

### 2.4 持久断口

图9为试样持久断裂后的断口形貌。其中图9a-d是500 °C/85 MPa试验条件下不同状态断口形貌, 图9e-h是815 °C/110 MPa试验条件下不同状态断口形貌。从图中可以观察到, 断口截面中均有大小不等的圆形或者椭圆形等轴韧窝存在。两种试验条件下持久试样断口显示为方向性明显的沿柱状树枝晶排列的韧窝。韧窝是韧性断裂的基本微观特征, 结合断口形貌可以判断, 持久试样的断裂方式为典型的微孔聚集性韧性断裂, 符合

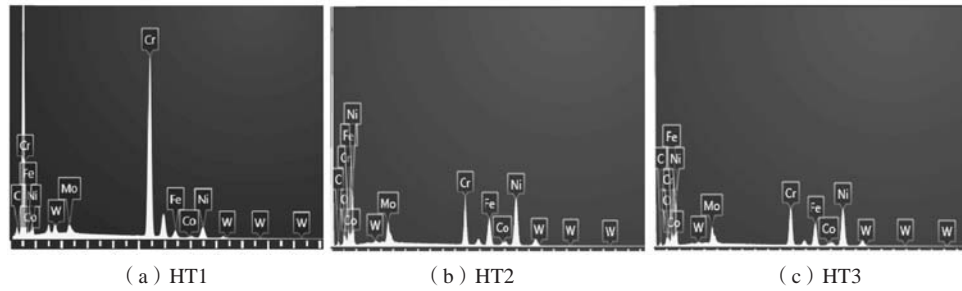


图7 GH3536合金热处理后析出物EDS成分分析结果

Fig. 7 Analysis results of EDS composition of the precipitates of the GH3536 alloy after heat treatment

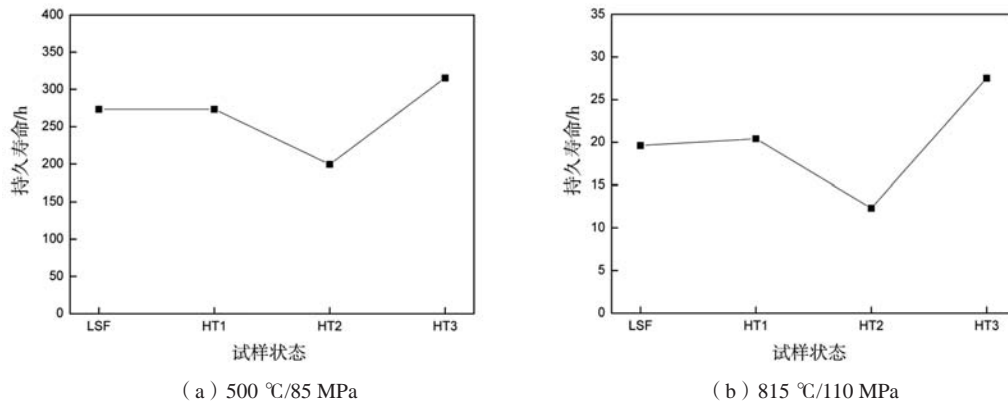


图8 不同状态GH3536合金500 °C/85 MPa和815 °C/110 MPa条件下持久寿命

Fig. 8 Endurance life of GH3536 alloy in different states at 500 °C/85 MPa and 815 °C/110 MPa

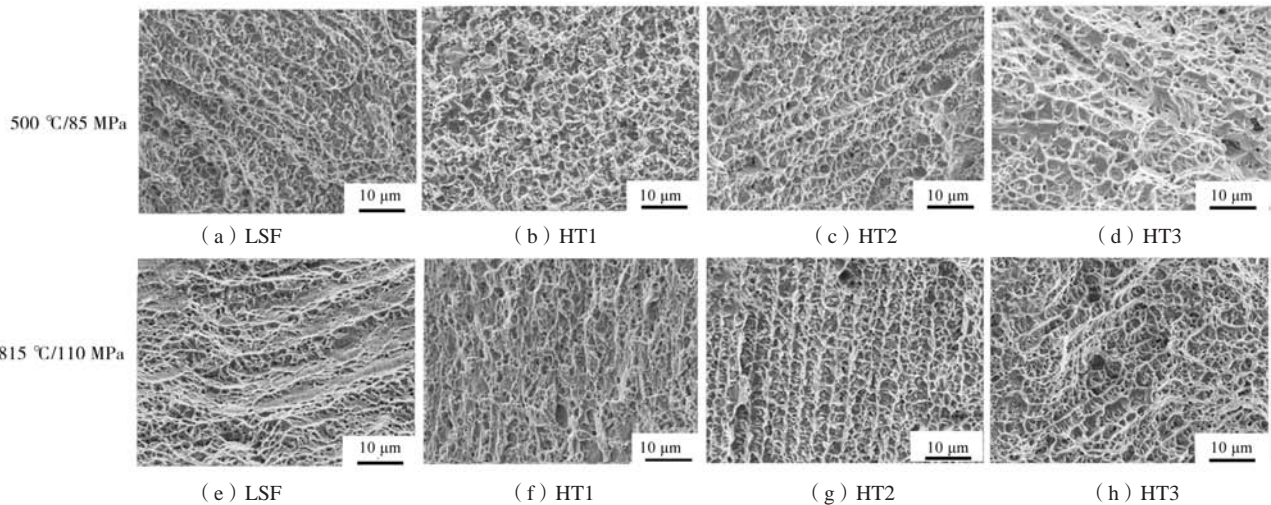


图9 不同状态下GH3536合金500 °C/85 MPa和815 °C/110 MPa条件下持久断口形貌

Fig. 9 Permanent fracture morphologies of GH3536 alloy in different states at 500 °C/85 MPa

FCC奥氏体合金和镍基高温合金变形的一般规律<sup>[9]</sup>。

沉积态和双级时效处理后的合金持久性能无差别。经980 °C固溶+双级时效处理后的合金试样断口韧窝大而深，这是因为合金中析出了大量的Laves相(Cr<sub>2</sub>Mo)(图10)，这种Laves相具有较大的脆性。当持久进行时，基体发生塑性变形，这些脆性的Laves相会被压碎，与基体分离产生微孔，微孔继续长大相互连续形成韧窝组织。所以此热处理条件下的合金持久性能较低。提高固溶处理温度和延长保温时间，晶

界附近的Laves相分解为弥散分布的颗粒状相，产生弥散强化，从而提高了持久寿命。

四种状态的断裂机制均为微孔聚集型。韧窝是在外力作用下位错源开动不断产生新的位错，这些位错运动产生强烈滑移，在很大变相量的区域形成很多显微空洞，或者因为析出相夹杂物破碎和基体界面的破碎形成了很多的微小空洞，在持久过程中经载荷的作用下不断长大、聚集形成裂纹直至分离<sup>[10]</sup>。

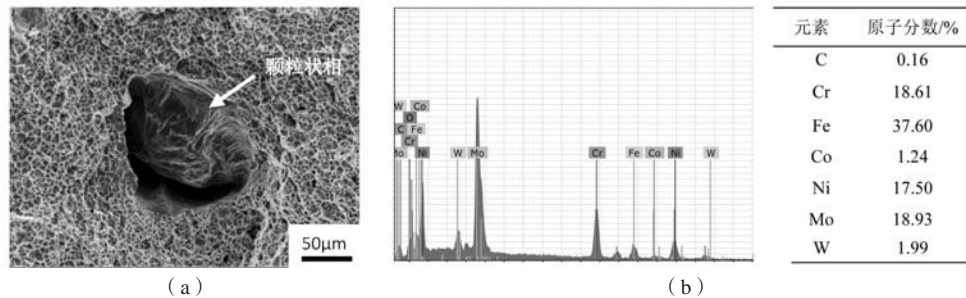


图10 持久断口颗粒状相EDS的成分分析

Fig. 10 EDS component analysis of the granular phase in persistent fracture

### 3 结论

(1) 激光立体成形GH3536沉积态的拉伸性能和持久寿命较低, 试样断口形貌凸凹不平, 断口边缘为波浪形边界, 在断裂过程中产生了塑性变形, 断裂方式为韧性断裂。

(2) 双级时效处理后的GH3536抗拉强度和持久寿命增加, 塑性提高, 合金断口形貌趋于平整, 断裂

方式仍为韧性断裂。

(3) 980 °C固溶+双级时效处理的GH3536合金抗拉强度降低, 持久寿命降低。拉伸和持久试验过程中, 显微组织内部产生Laves相并生成大量的二次裂纹, 从而降低了力学性能。将固溶处理温度提高至1 100 °C, 并延长保温时间, 显微组织内部发生弥散强化, 进而提高力学性能。

#### 参考文献:

- [1] 刘凯. 热等静压工艺对SLM成形GH3536合金的组织及性能影响 [D]. 北京: 机械科学研究总院, 2018.
- [2] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [3] 李涤尘, 田小永. 增材制造技术的发展 [C]//中国机械工程学会. 第14届全国特种加工学术会议, 苏州: 2011: 34-36.
- [4] 杨继全, 朱玉芬. 先进制造技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [5] MIRELES J, KIM H, LEE H, et al. Development of a fused deposition modeling system for low temperature metal alloys [J]. Journal of Electronic Packaging, 2013, 13 (5): 18-26.
- [6] MESSE O, MUNOZ-MORENO R, ILLSTON T, et al. Metastable carbides and their impact on recrystallisation in IN738LC processed by selective laser melting [J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 394-404.
- [7] 于广娜, 宋玺玉, 曹一超, 等. 重复固溶处理对GH3536合金板材组织和性能的影响 [J]. 金属热处理, 2017, 44 (11): 144-147.
- [8] 师昌绪. 中国航空材料手册: 第2卷 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [9] 王磊, 张滨, 崔彤, 等. 材料的力学性能 [M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2014.
- [10] 黄卫东, 林鑫, 陈静, 等. 激光立体成形-高性能致密金属零件的快速自由成形 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007.

## Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties of Laser Solid Forming GH3536

WANG Shu-sen<sup>1</sup>, HAO Ming-song<sup>2,3</sup>, LIANG Jing-jing<sup>2</sup>, LIU Li-rong<sup>3</sup>, WANG Dao-hong<sup>4</sup>, ZHANG Peng<sup>4</sup>  
 (1. Chinese the Military Representative Office of the Military Representative Office of the Armament Department of the Navy of the People's Liberation Army in Shenyang in Anshan, Anshan114001, Liaoning, China; 2. ShiChangxu Materials Innovation Center, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China; 3. Shenyang University of Technology, Shenyang 110016, Liaoning, China; 4. Jiangsu Feiyue Machine Pump Group Co., Ltd., Jingjiang 214537, Jiangsu, China)

#### Abstract:

In order to improve the high temperature performance of GH3536 aeroengine parts formed by laser solid forming, the influence of three kinds of heat treatment states on the tensile and rupture properties of this alloy were studied. The fracture morphology and failure mechanism were analyzed. The results showed that the tensile strength and rupture life of the alloy after two-stage aging heat treatment were improved; Laves phase existed in the alloy experienced a heat treatment of 980 °C solid solution and double aging, which affected the mechanical properties of the alloy. After properly increasing the solution treatment temperature and prolonging the holding time, the strengthening phase was dispersed in the alloy and the mechanical properties of the alloy were improved.

#### Key words:

laser solid forming; GH3536 superalloy; heat treatment; mechanical properties