

引文格式: 潘士建, 郝靖宇, 阚田田, 等. GH3230 高温合金激光填丝焊组织和力学性能[J]. 焊接学报, 2025, 46(10): 124 – 131.  
PAN Shijian, HAO Jingyu, KAN Tiantian, *et al.* Microstructure and mechanical properties of GH3230 superalloy laser welding with filler wire[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2025, 46(10): 124 – 131.



## GH3230 高温合金激光填丝焊组织和力学性能

潘士建<sup>1</sup>, 郝靖宇<sup>2</sup>, 阚田田<sup>1</sup>, 姜梦<sup>2</sup>, 陈曦<sup>2</sup>, 何鹏<sup>2</sup>, 陈彦宾<sup>2</sup>

(1. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳, 110043; 2. 哈尔滨工业大学, 材料结构精密焊接与连接全国重点实验室, 哈尔滨, 150001)

**摘要:** 针对在航空领域具有广泛应用前景的 GH3230 高温合金, 开展了激光填丝焊的工艺、组织和力学性能研究, 将焊缝成形、接头组织、室温拉伸性能和高温持久性能与传统钨极氩弧焊 (tungsten inert gas welding, TIG) 接头进行对比。结果表明, 激光填丝焊工艺可以得到成形良好的 GH3230 对接接头, 且成形质量优于 TIG 接头, 且更大的激光能量密度使接头热影响区 (heat-affected zone, HAZ) 较小。微观组织方面, 较大的温度梯度和极短的熔池存续时间使焊缝组织多为树枝晶, 晶间与晶内分布的析出碳化物起析出强化的作用。力学性能方面, 激光填丝焊接头的室温拉伸试样在母材 (base metal, BM) 断裂, 而 TIG 接头因晶粒粗化与碳化物减少, 室温拉伸性能下降, 断裂位置位于焊缝区。在高温持久性能条件下, TIG 接头高温持久性能略高于激光填丝焊, 两者均高于 BM; 弯曲试验中激光填丝焊接头与 TIG 接头均无裂纹缺陷, 弯曲性能良好。

**创新点:** (1) 对 GH3230 高温合金进行了激光填丝焊工艺试验, 得到了成形良好的对接焊缝。

(2) 分析了 GH3230 激光填丝焊接头的组织与力学性能, 并将其与 TIG 接头进行对比。

**关键词:** 高温合金 GH3230; 激光填丝焊; 树枝晶; 碳化物; 高温持久性能; 弯曲性能

中图分类号: TG 456.7; TG 444+.1

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20240813002

## Microstructure and mechanical properties of GH3230 superalloy laser welding with filler wire

PAN Shijian<sup>1</sup>, HAO Jingyu<sup>2</sup>, KAN Tiantian<sup>1</sup>, JIANG Meng<sup>2</sup>, CHEN Xi<sup>2</sup>,  
HE Peng<sup>2</sup>, CHEN Yanbin<sup>2</sup>

(1. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang, 110043, China; 2. State Key Laboratory of Precision Welding & Joining of Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China)

**Abstract:** GH3230 superalloy has broad application prospects in the aviation field. The process, microstructure, and mechanical properties of laser welding with filler wire were investigated, and the weld formation, joint microstructure, room temperature tensile properties, and high-temperature endurance performance were compared with those of traditional tungsten inert gas welding (TIG) joints. The results have shown that the GH3230 butt joint with good shape can be obtained by the laser welding process with filler wire. The formation quality is better than TIG joints. As the energy density of the laser becomes larger, the heat-affected zone (HAZ) of joints is smaller. In terms of microstructure, the large temperature gradient and short duration of the molten pool lead to a weld microstructure mainly composed of dendrite crystals. The precipitation carbides that distribute between and within the grains contribute to precipitation strengthening. In terms of mechanical properties, the room temperature tensile specimens of joints by laser welding with filler wire fracture at base metal (BM), while TIG joints experience a decrease in room temperature tensile properties due to grain coarsening and reduction of carbides, resulting in fracture at the weld seam. Under high-temperature

收稿日期: 2024-08-13; 录用日期: 2024-11-24

基金项目: 中国博士后基金面上项目 (2021M700990); 黑龙江省博士后基金资助项目 (LBH-Z20143)

conditions, the high-temperature endurance performance of TIG joints is slightly higher than that of laser welding with filler wire, and both are higher than that of the BM. In the bending test, both joints by laser welding with filler wire and TIG joints show no crack defects and exhibit reliable bending performance.

**Highlights:** (1) laser welding with filler wire process experiments were conducted on GH3230 high-temperature alloy, and well formed butt welds were obtained.

(2) The microstructure and mechanical properties of GH3230 laser welding with filler wire joints were analyzed and compared with TIG joints.

**Key words:** GH3230 superalloy; laser welding with filler wire; dendrite crystal; carbide; high-temperature endurance performance; bending performance

## 0 序言

高温合金具有良好的耐高温和抗氧化等特点, 在航空航天领域发挥着举足轻重的作用. 随着航空发动机等飞行器核心部件逐渐复杂化和大型化, 飞行器的速度与载荷能力不断提升, 各类航空发动机中零件的服役环境向着更高温度、更大载荷的方向发展, 对关键飞行器零部件的各项性能也提出了更苛刻的要求<sup>[1-3]</sup>. 在航空发动机关部件的制造中, 由于燃气温度和运行载荷的不断提高, 传统高温合金在服役条件下的高温力学性能已无法满足航空器进一步发展的需求<sup>[4]</sup>. GH3230 在传统 Ni-Cr 基高温合金的基础上, 添加了 Mo 元素、W 元素和 La 元素等元素, 形成的碳化物对材料产生析出强化作用, 合金的高温强度比传统的镍基高温合金 GH3536 等有了明显提高, 同时服役温度与钴基合金 GH5188 等相比也有了大幅提高, 长期使用温度最高可达 1 100 °C<sup>[5]</sup>. GH3230 具有高温强度高、热稳定性好和抗氧化能力强的特点, 逐渐成为航空发动机的关键材料之一<sup>[6]</sup>.

随着发动机产品的复杂化与大型化, 零件的加工制造难度不断提高, 传统的铸造、锻压和机械加工难以实现复杂结构零件的加工, 但高温合金的增材制造方式受制于零件大小与工艺特点, 在大型部件的制造精度与力学性能方面仍有欠缺<sup>[7-8]</sup>. 因此, 发动机产品等大型复杂零件的加工制造手段仍以焊接为主. 近年来, 针对 GH3230 的焊接工艺的研究主要集中在 TIG<sup>[9-10]</sup>、激光焊 (laser beam welding, LBW)<sup>[11-12]</sup> 和扩散焊<sup>[13-14]</sup> 等方面. 在熔化焊方面, 张天昊等人<sup>[9-10]</sup> 研究了 GH3230 TIG 接头在不同温度、不同时间的热暴露下组织与性能的变化, 发现 700 ~ 1 000 °C 的长时间热暴露将使焊缝金属的枝晶组织向铸态组织转变, 且 HAZ 中的碳化物在

800 °C 以上的长时间热暴露下将会出现回熔从而导致抗拉强度的下降与塑性的上升, 并进一步探究了 GH3230 合金焊接板材在不同温度、不同时间的长期热暴露处理后的显微组织与力学性能变化. 许璠等人<sup>[11]</sup> 研究了焊点形状对 GH3230 激光焊搭接接头性能的影响, 并对不同形式搭接焊缝进行了力学性能测试与断口分析. 董志波等人<sup>[12]</sup> 针对及激光焊接得到的 GH3230 接头的残余应力分布进行了有限元模拟与试验验证, 表明焊接残余应力的存在大幅降低了层板结构焊缝区域热疲劳寿命. 目前, GH3230 的工业应用与实际生产中的焊接仍以 TIG 为主, 但高温合金 TIG 存在焊接效率低、焊后变形大和接头力学性能下降等问题<sup>[15-18]</sup>. 相比之下, 激光焊接具有焊接速度快、焊接变形小、能量密度大、热作用范围小和自动化程度高等优点<sup>[19-22]</sup>. 采用激光焊接技术可以解决 TIG 在焊接 GH3230 时热输入与焊接应力大, HAZ 范围大以及晶粒粗化严重从而导致的力学性能下降等问题, 并可以结合机器人焊接设备实现激光自动化焊接, 大幅度提升焊接效率与自动化程度, 而 GH3230 的激光焊接工艺与方法的相关研究相对较少.

文中针对在航空发动机制造领域具有良好应用前景的高温合金 GH3230 材料, 开展激光填丝焊工艺及组织性能的研究. 为展现高能激光热源作用下 GH3230 焊接接头的组织性能特点, 将激光填丝焊与传统 TIG 填丝焊进行了对比, 详细分析了焊接接头的宏观成形、微观组织、静载力学性能和高温持久性能, 为 GH3230 激光填丝焊工程化应用提供理论支撑.

## 1 试验方法

试验中采用规格为 300 mm × 100 mm × 1 mm

的 GH3230 高温合金固溶态板材和直径为 1.2 mm 的 HGH3128 焊丝, 板材与焊丝化学成分, 如表 1 所示. 焊接前用丙酮对板材表面进行擦拭, 并对试板两端进行点固. 为了探究高温合金 GH3230 激光填丝焊的组织性能特点, 首先进行了 GH3230 的激光填丝焊试验, 试验所使用的激光器为 YLS-6000 激光器、激光焊接头为 IPG wobble D50 摆动激光焊接头. 激光填丝焊过程示意图, 如图 1 (a). 采用无

摆动的前送丝激光填丝工艺进行试验焊接, BM 正面与背面采用氩气进行保护, 正面气流量为 25 L/min, 背面气流量为 15 L/min 其余参数, 如表 2 所示. 作为对比, 采用焊接电流为 55 A、电弧电压为 15 V 和焊接速度为 0.33 m/min 的 TIG 填丝焊进行一组对照试验, TIG 填丝焊过程示意图, 如图 1 (b) 所示. 采用的送丝角度  $\alpha$  均为  $45^\circ$ , 每种焊接参数进行两组试验.

表 1 GH3230 BM 与 HGH3128 焊丝成分 (质量分数, %)  
Table 1 Chemical compositions of GH3230 BM and HGH3128 welding wire

牌号	Cr	W	Mo	Al	Ti	Fe	Mn	Si	C	Co	La	Ni
GH3230	20.0~24.0	13.0~15.0	1.0~3.0	0.2~0.5	≤0.1	≤3.0	0.3~1.0	0.25~0.75	0.05~0.15	≤5.0	0.005~0.5	余量
HGH3128	19.0~22.0	7.5~9.0	7.5~9.0	0.4~0.8	0.4~0.8	≤2.0	≤0.5	≤0.8	≤0.05	-	-	余量

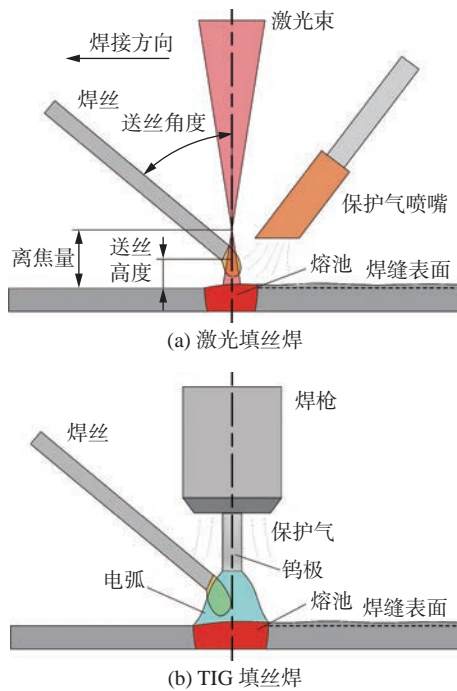


图 1 焊接成形工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of welding forming process. (a) laser welding with filler wire; (b) TIG with filler wire

试板焊接完成后, 首先对试板进行无损检测, 渗透检测按照行业标准 HB/Z 61-1998《渗透检验》执行, X 射线检测按照行业标准 HB 20160-2014《X 射线照相检测》执行. 为模拟工程实际中焊缝焊接后不经焊后处理而直接服役的工况, 试样

在切割后仅对表面进行轻微粗磨以去除氧化层及飞溅物, 并在检测完成后采用电火花线切割加工设备在每条焊缝上分别切取金相试样、室温拉伸试样、高温持久试样和弯曲试样, 同一参数的室温拉伸、高温持久和弯曲试验各进行两次.

金相试样尺寸为 20 mm × 20 mm, 分别使用 80 号、180 号、800 号、2000 号、3000 号和 5000 号砂纸打磨后, 用粒度为 1.5 μm 的水溶性金刚石抛光剂进行抛光, 至表面无划痕后, 采用 10% 草酸溶液, 在 5 V 的电压下电解腐蚀 3 ~ 5 s, 采用光学显微镜拍摄金相试样的焊缝横截面宏观形貌与不同放大倍数下的焊缝组织形貌. 室温拉伸试验按照国家标准 GB/T 2651-2023《金属材料 焊缝破坏性试验 焊缝拉伸试验》执行, 试样切割完成后采用砂纸对表面与线切割截面进行打磨, 拉伸试样尺寸, 如图 2 所示. 拉伸速率为 2 mm/min, 记录每种参数下试样在断后伸长率为 0.2% 时的名义屈服强度、断裂时的抗拉强度和断后伸长率, 每条焊缝取 3 处试样计算平均值.

高温持久试验按照国家标准 GB/T 2039-2012《金属材料 单轴拉伸蠕变试验方法》执行, 高温持久试样尺寸, 如图 3 所示. 环境温度为 927 °C, 对试样施加载荷为 62 MPa, 统计每种参数下试样的失效时间与断后伸长率, 每条焊缝取 3 处试样计

表 2 激光填丝焊参数  
Table 2 Parameters of laser welding with filler wire

功率 $P/W$	光纤直径 $D/\mu\text{m}$	焊接速度 $v/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	离焦量 $F/\text{mm}$	光斑直径 $d/\text{mm}$	送丝速度 $v_f/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	送丝高度 $f/\text{mm}$
1100	100	1	+5	1.86	0.5	≤1

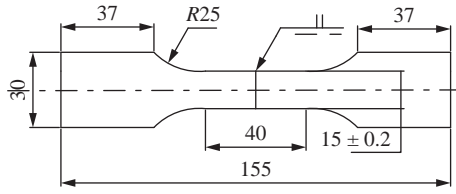


图 2 室温拉伸试样尺寸示意图 (mm)

Fig. 2 Schematic diagram of room temperature tensile test specimen size

算平均值. 弯曲试验按照国家标准 GB/T 232-2024《金属材料 弯曲试验方法》执行, 弯曲试样尺寸, 如图 4 所示. 为保证受弯部位位于焊缝处, 试验前将试样焊缝余高进行打磨. 弯曲时试样的弯曲轴线平行于板材轧制方向, 采用弯曲系数为 1.5 的弯曲压头, 对试样进行 180°面弯, 观察焊缝弯曲后的表面状态.

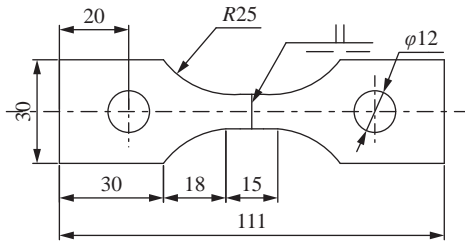


图 3 高温持久试样尺寸示意图 (mm)

Fig. 3 Schematic diagram of high-temperature endurance test specimen size

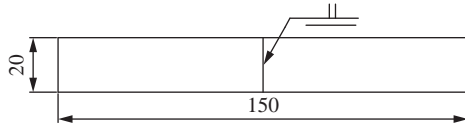


图 4 弯曲试样尺寸示意图 (mm)

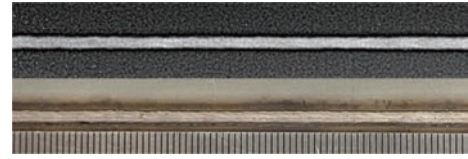
Fig. 4 Schematic diagram of bending test specimen size

## 2 试验结果与分析

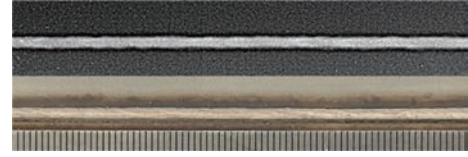
### 2.1 焊缝宏观成形分析

图 5 (a) 和图 5 (b) 分别为激光填丝焊工艺得到的接头 LBW-1 与 LBW-2 表面成形及 X 射线检测结果, 激光接头焊缝表面平整, 成形良好, 无咬边、裂纹与气孔等缺陷. 图 5 (c) 和图 5 (d) 分别为 TIG-1 与 TIG-2 接头表面成形及 X 射线检测结果, 表面无明显缺陷, 但在焊缝区域内 X 射线检测图像中存在多处明暗不一的区域, 焊缝存在内凹缺陷.

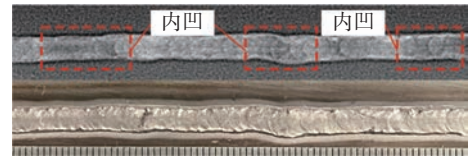
试板焊接接头焊缝横截面宏观形貌, 如图 6 所示. 焊缝尺寸, 如表 3 所示. 激光填丝焊接头的熔化区域明显小于 TIG 填丝焊接接头, 激光焊接接头的正面平均熔宽与背面平均熔宽均小于 TIG 接头



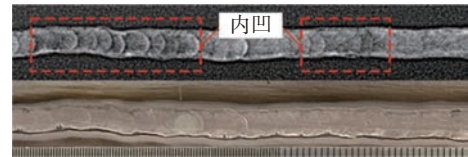
(a) LBW-1



(b) LBW-2



(c) TIG-1



(d) TIG-2

图 5 焊缝成形及 X 射线检测结果

Fig. 5 Welding seam formation and X-ray test results. (a) LBW-1; (b) LBW-2; (c) TIG-1; (d) TIG-2



(a) LBW-1



(b) LBW-2



(c) TIG-1



(d) TIG-2

图 6 光学显微镜下 50 倍放大接头横截面

Fig. 6 Cross section of 50 times enlarged joint under optical microscope. (a) LBW-1; (b) LBW-2; (c) TIG-1; (d) TIG-2

的一半, 这是由于在保证熔透能力相同的前提下,

表 3 TIG 填丝焊与激光填丝焊焊缝尺寸对比

Table 3 Comparison of weld seam size between laser welding with filler wire and TIG with filler wire

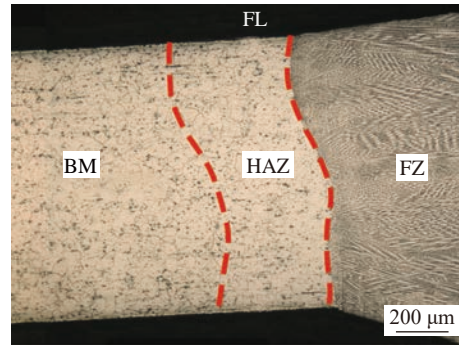
焊接方法	序号	熔宽 $W/mm$		平均熔宽 $W_{ave}/mm$	
		正面	背面	正面	背面
激光填丝	LBW-1	2.34	1.76	2.37	1.93
激光填丝	LBW-2	2.40	2.10	2.37	1.93
TIG填丝	TIG-1	4.49	4.79	5.03	4.79
TIG填丝	TIG-2	5.56	4.79	5.03	4.79

激光高能量密度的特点使得激光填丝焊具有更小的热作用范围与更小的热输入,这也将使得激光填丝接头焊缝的组织形貌和接头力学性能与 TIG 焊缝产生一定差异.

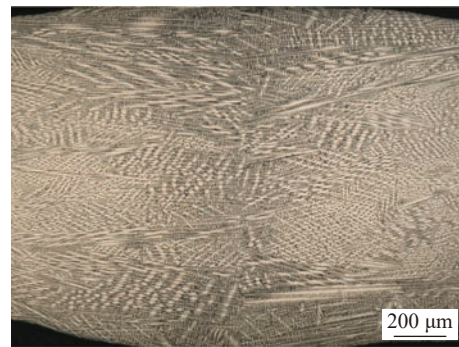
## 2.2 焊接接头微观组织分析

图 7 为 100 倍放大的光学显微镜下的接头组织,激光焊接接头的 HAZ 宽度很小,与 BM 相比,HAZ 中晶粒存在一定程度的粗化;接头 HAZ 与焊缝熔合区 (fusion zone, FZ) 之间存在有一条明显的熔合线 (fusion line, FL); 焊缝熔化区内晶粒主要以树枝晶形式生长,树枝晶在越靠近焊缝中部的的位置,枝晶轴越细密,呈现出从两侧向中间生长的趋势,并在中部位置相遇,形成一个相对明显的界线.这种细小枝晶组织的产生原因是激光焊接过程中较大的温度梯度和较快的热量传递速度,使得熔池凝固时间极短,枝晶迅速生长,更倾向于产生较细晶轴的枝晶.相比之下, TIG 过程的凝固过程速度小、熔化范围大,熔池存在时间较长,枝晶生长缓慢,晶粒生长过程中粗化,而这一过程中,较长的热作用时间与较大的热影响范围,也使得 TIG 接头的 HAZ 明显大于激光接头,进而影响焊接接头的力学性能.

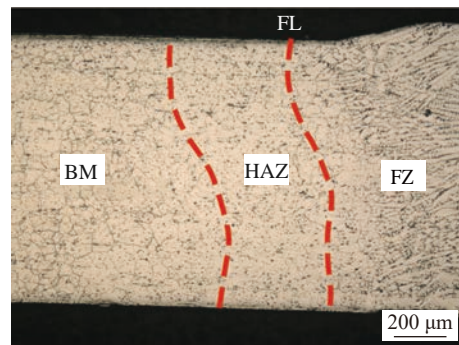
图 8 为光学显微镜下放大 500 倍的接头微观组织. GH3230 BM 为典型的奥氏体  $\gamma$  相铸态组织,在其晶界与晶内弥散分布着细小的碳化物析出相,对基体起到弥散强化作用,如图 8 (a) 所示. 激光接头的 HAZ 整体也为铸态组织,且 HAZ 中组织粗化程度较小,碳化物分布未发生显著变化,如图 8 (b) 所示. 结合文献 [23] 发现,图 8 (c) 与图 8 (d) 中焊缝边缘靠近 FL 侧部位的组织为外延生长的树枝晶,以细长的一次枝晶为主,而焊缝中部组织更加细密,枝晶长度变小,存在明显的二次枝晶,碳化物弥散分布在枝晶间隙析出相的数量也相对 BM 更多. 原因为激光焊接冷却过程中焊缝边缘与未熔化



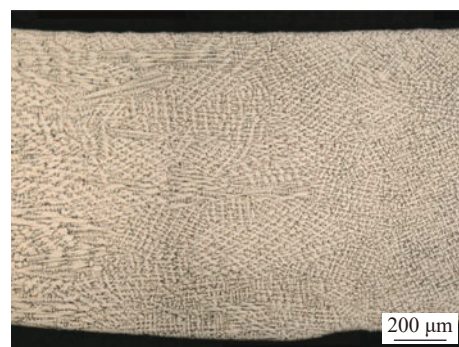
(a) LBW 接头 HAZ



(b) LBW 接头焊缝



(c) TIG 接头 HAZ



(d) TIG 接头焊缝

图 7 光学显微镜下 100 倍放大接头金相组织

Fig. 7 Metallographic structure of 100 times magnification joint under optical microscope. (a) HAZ of LBW joint; (b) weld seam of LBW joint; (c) HAZ of TIG joint; (d) weld seam of TIG joint

的 BM 直接接触,具有更大的温度梯度,使得一次枝晶的迅速生长,焊缝中部位置温度梯度相对均匀,一次枝晶生长速度较慢,在一次枝晶形成后,其

周围液相溶质浓度升高, 形成成分过冷区为二次枝晶的形成提供驱动力. 图 8 (e) 与图 8(f) 中 TIG 接头的 HAZ 晶粒粗化严重, 较长时间的热作用也使得碳化物出现回熔, 导致析出量减少. 焊缝边缘部

位枝晶尺寸较大, 以柱状树枝晶为主. 焊缝中部以等轴树枝晶为主, 并存在大量的孪晶与二次枝晶, TIG 接头较小的温度梯度也使得枝晶间距大于激光接头.

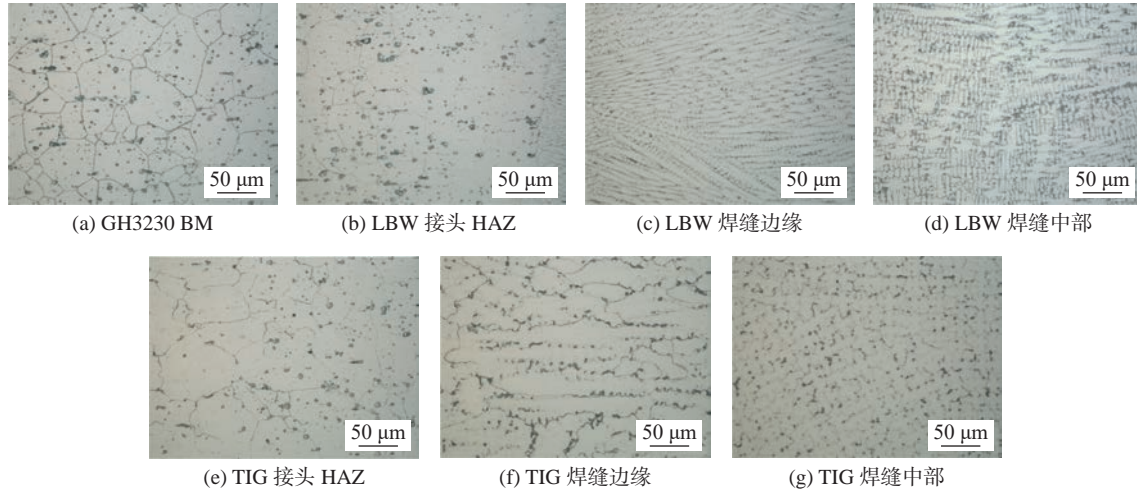


图 8 光学显微镜下 500 倍放大的接头金相组织

Fig. 8 Fig. 7 Metallographic structure of 500 times magnification joint under optical microscope. (a) GH3230 BM; (b) HAZ of LBW joint; (c) edge of LBW weld seam; (d) middle of LBW weld seam; (e) HAZ of TIG joint; (f) edge of TIG weld seam; (g) middle of TIG weld seam

## 2.3 焊接接头力学性能分析

### 2.3.1 接头的室温拉伸性能

室温拉伸试验结果包括, 激光填丝焊接头在断后伸长率在 0.2% 时的名义屈服强度  $R_{e1}$  为 429 MPa, 抗拉强度  $R_m$  为 877.5 MPa, 断裂时断后伸长率  $A$  为 45.8%. TIG 填丝焊接接头在断后伸长率在 0.2% 时的名义屈服强度  $R_{e1}$  为 325 MPa, 抗拉强度  $R_m$  为 663 MPa, 断裂时断后伸长率  $A$  为 36.8%. 断后 BM 试样, 如图 9 所示.

激光焊接接头在 BM 处失效, BM 发生了明显塑性变形, 结合文献 [24] 分析认为, 激光焊接接头的强度明显高于 BM 强度, 主要由于激光焊接接头 HAZ 较小, 晶粒的粗化程度小, 且焊缝区域以细小的树枝晶为主, 枝晶边缘析出碳化物分布十分细

密, 起到了一定的弥散强化作用. TIG 接头均在焊缝处失效, 并从 FL 附近开裂, 说明 TIG 接头内凹导致的力学性能下降程度小于焊接导致 FL 处组织变化导致的性能下降, 原因为 TIG 接头的 FL 附近的晶粒粗化明显, 且碳化物回熔导致析出相分布减少, 析出强化的作用减弱, 接头力学性能下降, 受拉伸作用时首先开裂.

### 2.3.2 接头的高温持久性能与弯曲性能

在环境温度 927 °C 与 62 MPa 载荷条件下的高温持久试验结果为, 激光焊接接头平均断裂时间为 88.7 h, 平均断后伸长率为 25%; TIG 接头平均断裂时间为 110.8 h, 平均断后伸长率为 30.5%. 高温持久试验试样的断裂位置, 如图 10 所示. 在高温持久的试验条件下试样均从 BM 处开始断裂, 说明激光焊接接头与 TIG 接头的高温持久性能均优于 BM. 两种焊接工艺均未成为接头在高温长期载荷下的薄弱环节, 整体具备良好的高温服役可靠性.

尽管激光焊接具有更高的冷却速率和更细小的枝晶组织, 理论上应具备更高的高温强度, 但在持久载荷与高温环境的耦合作用下, 材料的失效机制由室温下的强度主导转变为以蠕变损伤与晶界弱化为主导. 激光焊接接头因极高的温度梯度和极短的熔池存续时间, 形成了高度取向性强、枝晶细密且二次枝晶发达的组织, 虽然提升了室温强度,

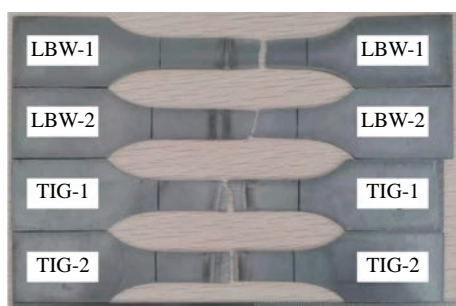


图 9 室温拉伸试验试样

Fig. 9 Room temperature tensile test specimens

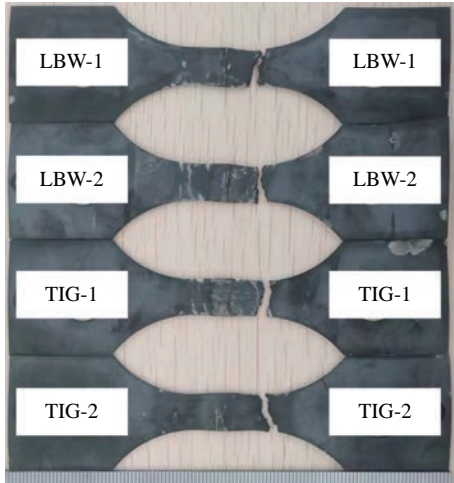


图 10 高温持久试验试样

Fig. 10 High-temperature endurance test specimens

但也引入了比 TIG 接头更高密度的晶界与亚晶界。在 927 °C 的高温环境下, 界面成为原子扩散的快速通道, 易于发生碳化物回熔、晶界滑移和空洞聚集, 从而加速了蠕变损伤的累积。也使得在环境温度 927 °C 条件下, BM、焊缝与 HAZ 中的析出碳化物出现回熔, 晶粒逐渐增大, 此时晶界处受压产生内应力, 使得晶界成为受力时的薄弱环节, 而 BM 中晶粒更小、晶界更多, 产生内应力较大<sup>[25-26]</sup>。因此断裂多发生在 BM 处。综上所述, 在高温持久条件下, 激光焊接接头相比 TIG 接头的细晶高界面密度的组织特征一方面提升了强度, 另一方面也加剧了高温下的界面扩散与损伤演化, 但由于焊缝与 BM 固有的组织差异, 两者均能达到 BM 服役的高温持久性能要求。

面弯后试样, 如图 11 所示。全部试样在弯曲 180°后释放载荷, 均产生一定角度的回弹, 焊接接头部位均未发现裂纹等缺陷, 说明两种方法得到的接头弯曲性能均良好。

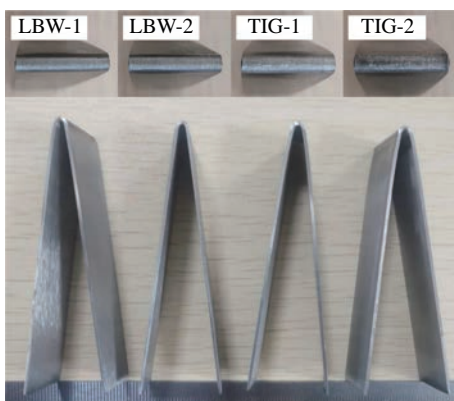


图 11 弯曲试验试样

Fig. 11 Bending test specimens

### 3 结论

(1) 高温合金 GH3230 具有良好的激光焊接性能, GH3230 激光填丝对接接头成形良好, 无咬边、裂纹与气孔等缺陷, 相比 TIG 接头, 激光焊接接头成形更加均匀, 焊缝更加平整美观。

(2) 由于激光焊接能量密度高, 其 HAZ 较小, 且晶粒无明显粗化, 较大的温度梯度使得焊缝组织以树枝晶为主, 碳化物弥散的分布在枝晶间隙; TIG 接头 HAZ 粗化明显, 焊缝区从 FL 到焊缝中心枝晶间距均较大, 且析出碳化物减少。

(3) GH3230 激光焊接接头具有良好的室温拉伸性能、弯曲性能与高温持久性能, 而 TIG 接头由于晶粒粗化与碳化物的减少, 室温拉伸性能低于激光焊接接头。在 927 °C 与 62 MPa 高温持久试验条件下, 晶粒中的碳化物回熔, 晶粒生长, 晶界处成为受力时的薄弱环节, 这也使得激光焊接接头与 TIG 接头的高温持久性能均高于 BM。

### 参考文献

- [1] HUANG Z L, ZHAI Z R, LIN W H, *et al.* On the orientation dependent microstructure and mechanical behavior of Hastelloy X superalloy fabricated by laser powder bed fusion[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2022, 844: 143208.
- [2] WANG W Z, CHEN Z G, LU W J, *et al.* Heat treatment for selective laser melting of Inconel 718 alloy with simultaneously enhanced tensile strength and fatigue properties[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 913: 165171.
- [3] LIN D Y, XI X, YAN M Z, *et al.* Significantly improved weldability in laser welding of additively manufactured haynes 230 superalloys by tailoring microstructure[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 26: 7873 - 7892.
- [4] YU T Q, CHEN L, ZHANG X Z, *et al.* Effect of ultrasonic shot peening on microstructure and mechanical properties of GH3230 superalloy during selective laser melt solution heat treatment[J]. *Materials Today Communications*, 2024, 39: 108850.
- [5] WANG Y, LI N, JIA C L, *et al.* Effects of solution treatment on the microstructural evolution and tensile properties of GH 3230 superalloy manufactured by laser melting deposition[J]. *Materials Characterization*, 2022(194): 112339.
- [6] 闫梦喆, 席鑫, 李霄, 等. 选区激光熔化制备 GH3230 镍基高温合金成形工艺及热处理影响研究 [J]. *电焊机*, 2023, 53(9): 116 - 123.
- [7] YAN M Z, XI X, LI X, *et al.* Study on the porosity and heat treatment of GH3230 nickel-based superalloy prepared by SLM[J]. *Electric Welding Machine*, 2023, 53(9): 116 - 123.
- [7] YUAN Z W, CHEN A Z, XUE L, *et al.* Effect of hot isostatic pressing and heat treatment on the evolution of precipitated phase

- and mechanical properties of GH3230 superalloy fabricated via selective laser melting[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024(30): 507 – 519.
- [8] XI X, LIN D Y, SONG X G, *et al.* Strength-plasticity transition mechanism after the solution treatment of GH3230 superalloy fabricated via laser powder bed fusion[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2023(876): 145124.
- [9] 张天昊, 鞠泉, 蒙肇斌, 等. GH3230 合金焊接板材长期热暴露后组织和性能研究 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2023, 52(7): 2573 – 2581.  
ZHANG Tianghao, JU Quan, MENG Zhaobin, *et al.* Study on microstructure and properties of GH3230 welded plates after long-term heat exposure treatment[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2023, 52(7): 2573 – 2581.
- [10] 张天昊, 鞠泉, 蒙肇斌, 等. GH3230 合金薄板填丝钨极氩弧焊接头的组织稳定性 [J/OL]. *金属学报*, 10.11900/0412.1961.2023.00452.  
ZHANG Tianghao, JU Quan, MENG Zhaobin, *et al.* Microstructural stability in tungsten argon-arc welded joint of GH3230 superalloy plate[J/OL]. *Acta Metallurgica Sinica*, 10.11900/0412.1961.2023.00452.
- [11] 许璠, 李星, 刘政, 等. 焊点形状对 GH3230 高温合金激光焊接性能的影响 [J]. *中国激光*, 2023, 50(4): 59 – 66.  
XU Fan, LI Xing, LIU Zheng, *et al.* Influence of welding spot shapes on laser welding performance of GH3230 superalloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(4): 59 – 66.
- [12] 董志波, 李承昆, 王程程, 等. 残余应力对 GH3230 层板焊缝热疲劳寿命影响规律研究 [J]. *中国机械工程*, 2024, 35(6): 1097 – 1102.  
DONG Zhibo, LI Chengkun, WANG Chengcheng, *et al.* Study on influence rules of residual stress on thermal fatigue life of GH3230 laminate welds[J]. *China Mechanical Engineering*, 2024, 35(6): 1097 – 1102.
- [13] 曲文卿, 张斯涵, 吕彦龙, 等. 航空发动机 GH3230 高温合金层板结构 TLP 扩散焊接制备及力学性能研究 [J]. *航空制造技术*, 2024, 67(3): 24 – 29.  
QU Wenqing, ZHANG Sihan, LYU Yanlong, *et al.* TLP diffusion welding and joint mechanical property of GH3230 superalloy laminate structure in aero-engine[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2024, 67(3): 24 – 29.
- [14] 吴磊, 滕俊飞, 吕彦龙, 等. GH3230 合金 TLP 扩散连接动力学实验研究 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2024, 50(8): 2596 – 2600.  
WU Lei, TENG Junfei, LYU Yanlong, *et al.* Experimental study on kinetics of TLP diffusion bonding of GH3230 alloy[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2024, 50(8): 2596 – 2600.
- [15] 孙元, 秦鑫冬, 王诗洋, 等. 高温合金熔化焊的研究现状及发展趋势 [J]. *工程科学学报*, 2024, 46(6): 1065 – 1076.  
SUN Yuan, QIN Xindong, WANG Shiyang, *et al.* Research status and future perspectives on superalloy fusion welding[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2024, 46(6): 1065 – 1076.
- [16] FANG H S, LI Z J, YUAN X D, *et al.* Microstructure and mechanical properties of GH3535 superalloy joints using keyhole TIG welding[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2025, 432: 113780.
- [17] 滕彬, 武鹏博, 李晓光, 等. GH3128 合金激光焊接接头组织与性能 [J]. *焊接学报*, 2022, 43(7): 82 – 87.  
TENG Bin, WU Pengbo, LI Xiaoguang, *et al.* Microstructure and properties of GH3128 alloy laser welding joint[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2022, 43(7): 82 – 87.
- [18] MORADI A, NAJAFI F M, CHEN Y, *et al.* Evaluation of mechanical characteristics of tungsten inert gas (TIG) welded butt joint of Inconel 600[J]. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2025, 9(6): 177.
- [19] 安晶. 激光焊接技术在航空工业机械制造中的应用 [J]. *现代工业经济和信息化*, 2024, 14(4): 121 – 123.  
AN Jing. Application of laser welding technology in aerospace industry mechanical manufacturing[J]. *Modern Industrial Economy and Informationization*, 2024, 14(4): 121 – 123.
- [20] 滕彬, 潘士建, 蒋宝, 等. GH536 合金激光焊与钨极氩弧焊接头组织性能对比研究 [J]. *电焊机*, 2022, 52(5): 106 – 111.  
TENG Bin, PAN Shijian, JIANG Bao, *et al.* Comparison of microstructure and mechanical properties between laser welding and TIG welding of GH536 alloy[J]. *Electric Welding Machine*, 2022, 52(5): 106 – 111.
- [21] 岳考捷, 贾晨, 王云嵩, 等. 镍基合金薄板激光焊接研究进展 [J]. *光电工程*, 2022, 49(12): 26 – 44.  
YUE Kaojie, JIA Chen, WANG Yunsong, *et al.* Research progress in laser welding of nickel-based alloy sheet[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2022, 49(12): 26 – 44.
- [22] ZHANG S Q, WANG S W, WANG L Y, *et al.* Microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy laser beam welded joint[J]. *China Welding*, 2024, 33(4): 58 – 64.
- [23] ZHANG B, HAN YQ, ZHEN L, *et al.* Effect of carbon content on microstructure and tensile properties of Ni-based GH3230 superalloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025: 6628 – 6640.
- [24] ZHANG B, CHENG B Y, CAO S H, *et al.* Effect of solution treatment on microstructure and tensile properties of GH3230 superalloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025(1027): 180568.
- [25] 何思逸, 刘翔宇, 郭双全, 等. SLM 成形 IN718 合金高温持久各向异性影响因素 [J]. *焊接学报*, 2024, 45(3): 91 – 98.  
HE S Y, LIU X Y, GUO S Q, *et al.* Study on factors affecting high temperature anisotropic stress rupture properties of SLM-IN718 alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2024, 45(3): 91 – 98.
- [26] BARWINSKA I, KOPE M, KUKLA D, *et al.* Thermal barrier coatings for high-temperature performance of nickel-based superalloys: a synthetic review[J]. *Coatings*, 2023, 13(4): 769.

作者简介: 潘士建, 硕士, 高级工程师; 主要研究方向为航空发动机自动化焊接工艺研究; Email: 915633115@qq.com. 姜梦 (通信作者), 博士, 副教授; Email: mengjiang@hit.edu.cn.