

# 0.2 mm 厚 GH4169 薄片激光微焊接接头的组织性能

龚伟怀<sup>1</sup> 陈玉华<sup>1</sup> 吕 榛<sup>2</sup> 李 喆<sup>2</sup> 柯黎明<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 江西 南昌 330063)  
<sup>2</sup>中国南方航空工业(集团)有限公司, 湖南 株洲 412002)

**摘要** 采用精密脉冲激光对厚度为 0.2 mm 的 GH4169 高温合金进行焊接试验, 利用光学显微镜、电子精密拉伸机等分析测试手段, 研究了焊接工艺参数对焊缝形貌的影响, 并对接头的金相组织与性能进行了测试、分析。结果表明, 以氩气为保护气体, 在功率 12.8 W, 脉宽 2.7 ms, 脉冲频率 5.0 Hz 的工艺参数下, 以激光为热源可成功实现 0.2 mm 厚度 GH4169 的对接焊, 焊缝成形良好、接头抗拉强度高于母材。焊接接头显微组织由焊缝中心区的细小等轴晶和熔合线附近的柱状晶组成, 热影响存在晶间析出物导致腐蚀后有类似于裂纹的黑线生成。焊接接头的显微硬度高于母材。

**关键词** 激光技术; 激光微焊接; GH4169 高温合金; 组织; 性能

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0603008

## Microstructure and Properties of 0.2 mm Thick Sheet GH4169 by Laser Microwelding

Gong Weihuai<sup>1</sup> Chen Yuhua<sup>1</sup> Lü Zhen<sup>2</sup> Li Zhe<sup>2</sup> Ke Liming<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>National Defense Key Disciplines Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology,  
Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China)  
<sup>2</sup>China National South Aviation Industry Limited Company, Zhuzhou, Hunan 412002, China)

**Abstract** The laser welding experiments on weld 0.2 mm thickness of the superalloys GH4169 with micro-laser pulse is carried out, the impact of welding process parameters on joints forming is analyzed, and the microstructure and properties of joints are studied by making use of optical microscopy, electronic precision stretching machine, and other analysis and detection methods. The results show that using argon as a shielding gas, 0.2 mm thick GH4169 to the laser as heat source can be successful butt welding with process parameters of the power of 12.8 W, pulse width of 2.7 ms, pulse frequency of 5.0 Hz, and a good welded appearance is formed, and the joint tensile strength is higher than the base metal. The microstructure composed of welded joints is small equiaxed grains in the weld center and columnar grains near the fusion line, and in the heat-affected zone of the joints, there is a black line formation which is similar to the crack after corrosion because of the existence of grain boundary precipitates. Microhardness of welded joints is higher than that of the base metal.

**Key words** laser technique; microlaser welding; superalloys GH4169; microstructure; properties

**OCIS codes** 140.3390; 140.3538; 140.0140

## 1 引 言

GH4169 合金是一种镍基变形高温合金, 因其

在 650℃ 下具有较高的强度、塑性和良好的疲劳性能、断裂韧性而被广泛用于涡轮盘、压气机叶片、封

收稿日期: 2011-03-10; 收到修改稿日期: 2011-04-28

基金项目: “航空材料热加工技术”航空科技重点实验室开放基金(Zk201001001)资助课题。

作者简介: 龚伟怀(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光微细加工技术方面的研究。E-mail: gwh050211@126.com

导师简介: 陈玉华(1979—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事先进材料连接、材料连接新工艺、新方法等方面研究。

E-mail: chuyuhua@163.com

严环等航空部件上<sup>[1~3]</sup>。对于 GH4169 的焊接,国外的学者进行了较多的研究,认为采用激光焊焊接 GH4169 时因其相对缓慢的沉淀强化而表现出较好的焊接性,但在焊缝凝固的过程常伴随着析出一些高浓度的难熔元素,如 Nb、Mo 等,并在晶间析出一些富 Nb 的脆性金属间化合物而严重影响接头的拉伸性能和疲劳特性<sup>[3~5]</sup>。但目前的研究均局限于厚度在 1 mm 以上的 GH4169 板材的连接。0.2 mm 厚度的超薄片状 GH4169 是某型航空发动机关键部件所用材料,由于材料很薄,焊接难度较大,目前国外主要采用电子束焊接。电子束焊接 GH4169 薄板,具有热影响区窄,焊接变形小,合金元素烧损少,焊缝抗蚀性好等优点。但电子束焊接设备昂贵、操作复杂、对环境的要求严格导致了焊接成本很高。激光焊接不仅具有光束方向性好、能进行精密加工,

并具有焊接热影响区小、焊接变形小,通过适当调整激光工艺参数就能够确保重复实现优良的焊缝成形、微小的热影响区等类似于电子束焊的优点<sup>[6,7]</sup>,而且相对电子束焊,激光焊接有气氛要求低、不需要真空环境<sup>[8]</sup>、不产生 X 射线的危害等特点。

本文采用精密脉冲激光对厚度为 0.2 mm GH4169 薄片进行了对接焊试验,观察焊缝横截面形貌,研究了接头的微观组织和性能,分析了晶间析出相物对接头性能的影响。

## 2 试验条件及方法

试验采用薄片对接焊的形式,试验材料选用尺寸为 30 mm × 20 mm × 0.2 mm,经退火处理的 GH4169 带材,其主要化学成分如表 1 所示。

表 1 GH4169 的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of GH4169 (mass fraction, %)

C	Si	Mn	Ni	Co	B	Cr	Al	Ti	Mo	Fe	S	P	Nb
0.056	0.31	0.26	51.96	<0.01	0.005	17.98	0.45	0.95	3.07	0	0.002	0.012	4.82

试验采用意大利 SYSMA 公司的 SL-80 型 Nd:YAG 脉冲激光焊机,平均功率为 80 W,其可调节参数有功率  $P$ 、脉冲宽度  $T$ 、脉冲频率  $F$  和光斑直径  $\Phi$ 。所有试验均在光斑直径  $\Phi$  为 0.2 mm 条件下施焊。为了保证装配精度,试样焊接面经过线切割加工,再用砂纸仔细打磨使焊接端面平直、光整、清洁无倒角和毛刺。施焊前,用丙酮溶液脱脂并用稀硝酸清洗焊接面,然后用清水清洗并用酒精吹干以去除施焊面的氧化膜。采用自制专用夹具将被焊试样两端固定在激光焊接工作台上进行焊接,采用氩气对施焊面进行保护,其流量为 5 L/min。

焊后垂直焊接方向截取接头横截面金相试样,在 4XB-TV 倒置金相显微镜上配合 Leica 图像分析仪观察焊缝表面、横截面宏观形貌和接头金相组织;采用 WT-401MVD 型显微硬度计测量焊缝横截面的显微硬度,标距 0.05 mm。因试样材料尺寸极小,不易加工成标准拉伸试样,拉伸试样加工成 60 mm × 3 mm × 0.2 mm 的非标准试样,在 Instron5543 拉伸试验机上进行静态拉伸试验。结合焊缝形貌、金相组织、显微硬度及拉伸结果分析 GH4169 薄片接头的组织及性能。

围,然后采用不同的工艺参数对试片进行对接焊,观察焊缝表面形貌和横截面形貌,获得焊缝成形良好的焊接工艺参数。

试验发现,激光功率对焊缝成形影响较大,功率较小变化都能引起焊缝横截面的改变,增大功率会增加熔宽和熔深,过大的功率导致焊缝表面凹陷,如图 1 所示,分析凹陷原因为温度过高使焊缝材料气化。在单脉冲能量不变的情况下,随着脉冲频率增大焊缝表面鱼鳞纹更加致密,随着脉冲频率的增加,焊缝热输入增大,熔宽也随之增加;但频率对熔深的影响较弱,频率从 2 Hz 增加到 8 Hz,焊缝熔深变化不大,如图 2 所示。脉宽对焊缝表面成形无明显影响,对熔宽及熔深有较大变化,焊缝宽度随脉宽的增大而增大。

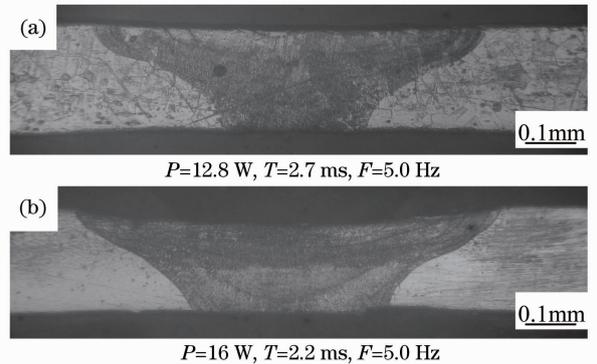


图 1 不同功率下的焊缝横截面

Fig. 1 Cross-section of weld at different power levels

## 3 结果与分析

### 3.1 工艺参数

先通过对母材自身平铺焊初步确定工艺参数范

GH4169 激光焊优化得到的一组参数为：功率 12.8 W, 脉宽 2.7 ms, 脉冲频率 5.0 Hz。

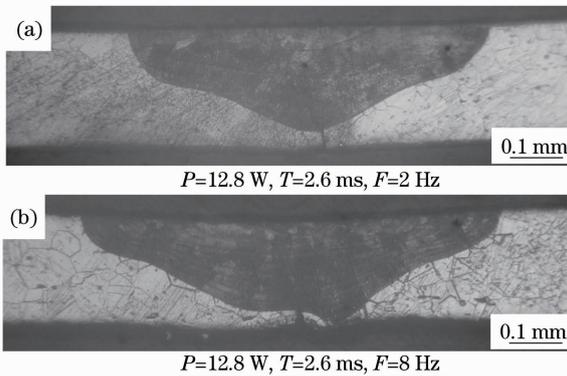


图 2 不同频率下的焊缝形貌

Fig. 2 Weld appearance at different frequency levels

### 3.2 接头组织

图 3 为低倍镜下焊接接头的显微组织, 接头成形良好。由图 3 可知, 以脉冲微激光为热源可以实现 0.2 mm 厚超薄片 GH4169 的连接, 焊缝无明显缺陷。从焊缝横截面可以看出, 焊缝呈上宽下窄, 以焊缝中心为基准的对称分布; 焊缝与周边母材基本无变形。从整体上观察, 焊缝底部及熔合线附近组织为柱状晶, 焊缝中央及上部为细小的等轴晶; 在母材与焊缝之间, 由一条熔合线隔开, 热影响区组织与母材相比无明显差别。从横截面可以明显看出焊缝组织呈层状分布, 这种层状分布是由于脉冲激光周期性的快速加热及冷却, 使得熔池金属来不及均匀化造成的。

母材及激光焊接头组织的微观如图 4 所示, 图 4(a) 为 GH4169 母材组织, 在大块的奥氏体基体晶粒中, 有球状和不规则状的小颗粒析出, 并在  $\gamma$  相基体中析出  $\gamma''$  ( $\text{Ni}_3\text{Nb}$ ) 和  $\gamma'$  [ $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ ] 强化相; 图 4(b) 为焊缝中心位置处组织, 从图中可以看出, 两边分布为柱状晶, 往焊缝中心方向晶粒过渡为细小的等轴晶; 在等轴晶区域, 晶粒尺寸也不全相同,

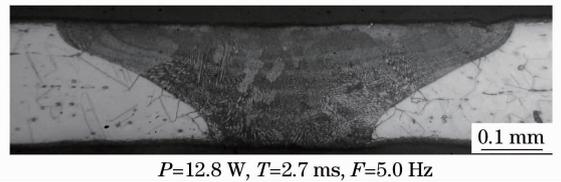


图 3 激光焊接接头横截面形貌

Fig. 3 Cross-section morphology of laser welded joints 四周的等轴晶粒尺寸相对较小, 在焊缝最中心的小部分区域, 晶粒尺寸比四周大, 即图 4(b) 中白色方框区域。造成如此晶粒分布原因为焊接时激光极高的能量密度, 可以瞬间使焊缝金属熔化, 这时熔池金属两边的母材温度尚未升高, 熔池金属刚接触母材时, 由于过冷度大, 可以大量地形核; 同时, 附近母材的温度也快速升高, 熔池金属散热变慢, 靠近母材的液体过冷度变小, 不足以独立形核, 随着凝固进行, 垂直于融合线方向的晶粒得到生长, 结果形成了联生生长的柱状晶粒; 而靠近焊缝中心的金属, 由于温度比较均匀, 过冷度较小, 形成细小的等轴晶, 中心区温度更高, 因而使晶粒相对粗化。图 4(c) 是熔合线附近的焊缝及热影响区组织, 可以清晰地看到, 柱状晶沿着熔合线联生生长。在腐蚀后的熔合线附近热影响区还能看到一些在电子束焊接 GH4169 时出现过的类似于裂纹的黑线<sup>[9]</sup>, 而金相试样腐蚀前的表面光亮、均匀, 无任何黑线或细小裂纹, 因此认为腐蚀后出现的黑线为腐蚀留下的晶界间细小沟槽, 而不是裂纹; 在靠近熔合线附近黑线较粗, 往母材方向黑线变细; 黑线产生的原因为焊接时热影响区承受的高温可能导致晶粒长大, 同时母材中含有为了增加材料的热塑性及减少脆性应力断裂而添加的少量硼元素, 经历了焊接高温后, 硼会在晶界偏聚, 并使熔碳化物润湿在晶界, 这将降低晶界耐腐蚀性及抗氧化性。

### 3.3 接头力学性能

图 5 为接头的显微硬度分布曲线。由图可见,

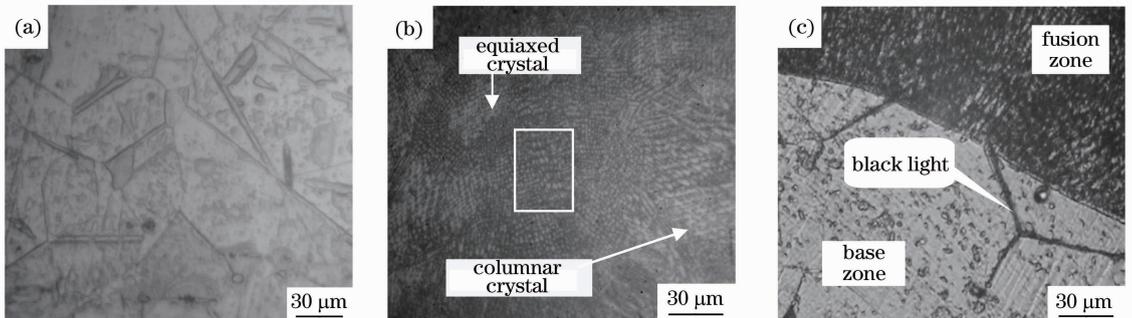


图 4 焊接接头的金相组织。(a) 母材, (b) 焊缝中心区, (c) 熔合区

Fig. 4 Organization of base metal and weld center. (a) base metal, (b) weld center, (c) fusion zone

整个接头的硬度分布极不均匀,与母材相比,焊缝区的硬度明显升高。通过对比焊缝区及母材的组织可知,经激光加热局部熔化重结晶后形成的焊缝组织明显细化,导致焊缝区硬度较母材显著升高。焊缝区的硬度分布也有差异,焊缝区的整体硬度分布类似于英文字母 M,从熔合线到焊缝中心显微硬度先上升后下降,在中心位置处有一个相对低值。这主要是因为焊接时熔池中心的液体散热比旁边的液体缓慢,金属过冷度小,所以结晶时焊缝中心晶粒尺寸比两边稍大,因此在硬度上表现出焊缝最中心区域的硬度略低于两边。热影响区硬度介于母材与焊缝区之间,热影响区硬度增强的主要原因为母材中  $\gamma'$  和  $\gamma'$  强化相在焊接冷却过程中重新沉淀析出,形成沉淀强化。从硬度的分布上可以看出,接头热影响区宽度约为 0.2 mm,分析热影响区的硬度高于母材的原因为,脉冲激光周期性地加热,有利于母材中合金元素的析出,在晶界形成强化。

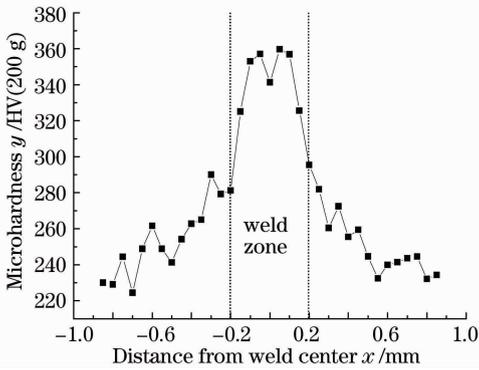


图 5 接头显微硬度分布曲线

Fig. 5 Microhardness distribution curve fitting

对接头成形较好的试样截取拉伸试样,静态拉伸结果发现,在一定的单脉冲能量范围内(2.8~3.5 J),拉伸试样均断裂在母材上,即接头的最大抗拉强度大于母材。拉伸断裂位置如图 6(a)所示,从图中可以看出,拉伸试样的拉伸区因塑性变形而变窄。拉伸试样在拉伸后于接头处出现明显的“竹节”现象,如图 6(b)所示。试样接头高于母材的抗拉强度可能与以下因素有关:1) 在脉冲激光快速的加热和冷却条件下,焊缝的晶粒得到显著细化;2) 在焊接过程中,快速的冷却及材料中的合金元素引入了更多的晶体缺陷,阻碍了位错的运动;同时,快速冷却使接头处并未大量形成 laves 相。因拉伸试样均断裂于母材,焊缝有高于母材的抗拉强度,同时也证明图 4(c)中的黑线为晶界腐蚀后的黑沟,而非微裂纹,如焊后就存在的微裂纹,拉伸时巨大的拉力必定

导致裂纹的扩展,从而引起焊接接头或热影响区处的断裂。

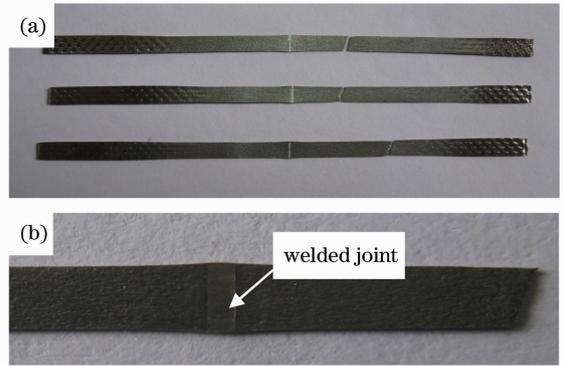


图 6 拉伸试样。(a)拉伸试样全貌,(b)局部放大  
Fig. 6 Tensile specimens. (a) picture of tensile specimen (b) drawing of partial enlargement

拉伸试样均断裂于母材,分析认为在脉冲激光快速地加热和冷却条件下,并无如传统熔焊时在晶界大量析出难熔的 Nb、Mo 等元素的脆性化合物。拉伸后接头成“竹节”状,说明接头强度、硬度高于母材,塑性低于母材。

## 4 结 论

1) 采用精密脉冲激光可以实现 GH4169 薄片的对接焊,焊缝及热影响区的硬度都高于母材;接头抗拉强度高于母材,拉伸试样均断裂于母材,拉伸后接头突出成“竹节”状,塑性低于母材。

2) 焊接接头的组织分布不均匀,母材主要以大块奥氏体为基体,并在基体中析出强化相,焊缝组织经重熔后晶粒显著细化,由靠近熔合线的柱状晶及焊缝中心的等轴晶组成。热影响区晶粒尺寸与母材相比变化不大,在热影响区有类似裂纹的黑线生成,为晶界析出物腐蚀后的沟槽。

## 参 考 文 献

- Huang Qian Yao, Li Hankang. Superalloys [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000  
黄乾尧,李汉康. 高温合金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000
- Kong Yonghua, Li Long, Chen Guosheng *et al.*. Influence of microstructure and properties of GH4169 in different heat treatments [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2010, **39**(Z1): 472~475  
孔永华,李 龙,陈国胜 等. 不同热处理工艺对 GH4169 合金组织及性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2010, **39**(Z1): 472~475
- G. D. Janaki Ram, A. Venugopal Reddy, K. Prasad Rao *et al.*. Microstructure and tensile properties of inconel 718 pulsed Nd: YAG laser welds [J]. *J. Mater. Processing Technol.*, 2005, **167**(1): 73~82
- H. Qi, M. Azer, A. Ritter. Studies of standard heat treatment

- effects on microstructure and mechanical properties of laser net shape manufactured inconel 718 [J]. *Metall. Mater. Trans.*, 2009, **40**(10): 2410~2422
- 5 J. K. Hong, J. H. Park, N. K. Park *et al.*. Microstructures and mechanical properties of inconel 718 welds by CO<sub>2</sub> laser welding [J]. *J. Mater. Processing Technol.*, 2008, **201**(1-3): 515~520
- 6 Mu Xiaohong, Niu Xu, Hui Wen. Investigative of the principle of laser welding and its application [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2009, (8): 5  
母晓红, 牛旭, 惠文. 激光焊的原理及其应用研究 [J]. *科技创新导报*, 2009, (8): 5
- 7 Wang Wei, Chen Li, Zhao Xingke *et al.*. Effect of welding parameters formation of welds during laser welding of TiNi shape memory alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 291~296  
王蔚, 陈俐, 赵兴科等. 激光焊接工艺参数对 TiNi 形状记忆合金焊缝形成的影响 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 291~296
- 8 Yu Gang, Zhao Shusen, Zhang Yongjie *et al.*. Research on key issues of laser welding of dissimilar metal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 261~268  
虞钢, 赵树森, 张永杰等. 异种金属激光焊接关键问题研究 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 261~268
- 9 Liu Yuping, Cui Fumian. Investigative of electron beam welding GH4169 of black line organization [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2003, (s1): 211~212  
刘玉萍, 崔福绵. GH4169 电子束焊黑线组织研究 [J]. *材料工程*, 2003, (s1): 211~212