

文章编号: 1001-3806(2018)02-0229-05

## 激光焊接工艺对 K418 与 0Cr18Ni9 焊接接头性能的影响

彭和思, 陈兵华, 唐景龙, 邓时累, 陈根余, 陈焱  
(大族激光智能装备集团 联合实验室, 深圳 518100)

**摘要:** 为了研究激光焊接工艺对 K418 与 0Cr18Ni9 异种金属焊接接头性能的影响, 采用金相显微镜对焊缝的金相组织和形貌进行了分析, 评价了焊缝及周边的硬度和强度。结果表明, 在激光焊接 K418 高温合金与 0Cr18Ni9 时由于母材热物性参量存在较大的差异, 为保证焊缝质量, 激光光斑应偏向 0Cr18Ni9 合金一侧; 为了防止热裂纹和液化裂纹的产生, 应该尽量延长熔池凝固时间同时减少热影响的热输入; 当保护气体流量为 12L/min 时, 对焊缝的保护效果最好, 与 Ar<sub>2</sub> 相比 N<sub>2</sub> 能有效减少焊缝中气孔的含量, 但也会降低焊缝性能; 焊缝的硬度值位于两母材硬度之间, 焊接接头的强度约为母材的 89%。采用合适的激光焊接工艺可以实现 K418 合金与 0Cr18Ni9 较好的焊接效果。

**关键词:** 激光技术; 激光焊接; 焊接工艺; 裂纹; 气孔; 力学性能

**中图分类号:** TG456.7

**文献标志码:** A

**doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.02.017

## Effect of laser welding technology on mechanical properties of K418 and 0Cr18Ni9 weld joints

PENG Hesi, CHEN Binghua, TANG Jinglong, DENG Shilei, CHEN Gengyu, CHEN Yan  
(Joint Laboratory, Han's Laser Technology Industry Group, Shenzhen 518100, China)

**Abstract:** In order to study effect of laser welding on the properties of dissimilar metal welding joints of K418 and 0Cr18Ni9, microstructure and morphology of the weld were analyzed by using a metallographic microscope. The hardness and strength of weld seams and their surrounding area were evaluated. The results show that when laser welding of K418 superalloy and 0Cr18Ni9, there are great differences in thermal parameters of the base metal. In order to guarantee weld quality, laser spot should be biased on the side of 0Cr18Ni9 alloy. In order to prevent thermal cracks and liquation cracks, coagulation time of the melted pool should be prolonged as far as possible and heat input with heat effect should be reduced simultaneously. The protection of weld seam is the best when protection gas flow rate is 12L/min. Compared with Ar<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> can effectively reduce the porosity in weld seams, and it also reduces the weld performance. The hardness of the weld is between the hardness of two base materials. The strength of the weld joint is about 89% of that of the base metal. Good welding quality of K418 alloy and 0Cr18Ni9 can be achieved by adopting suitable laser welding process.

**Key words:** laser technique; laser welding; welding process; crack; pore; mechanical property

### 引言

目前,带涡轮增压的发动机在汽车领域被广泛应用,在国民经济发展中占据重要地位。作为发动机的重要部件,涡轮增压器对发动机性能的改善具有显著的作用,其中放气阀作为涡轮增压器的重要组件,其质量对实现涡轮增压的功能具有很大的影响。放气阀的关键部位通常是由铸态高温合金与铁基合金焊接而成

的,这两种材料的热物性能相差很大,属于典型的异种材质焊接,且焊接形状为环形结构。目前该种焊接使用的方法主要有电子束焊和摩擦焊,但是电子束焊要求真空环境,所以焊接工件尺寸不能太大,焊接效率低、成本高,且电子束焊接过程中会产生对人体有害的 X 射线。摩擦焊的焊接接头质量差,经常会发生低温应力破坏。TOLLETT<sup>[1]</sup>等人对这 3 种焊接工艺进行了研究,发现与其它焊接相比,激光焊接对基体的热影响是最小的,而在高温合金的焊接中,热裂纹与焊接热输入和热影响区的范围有关。MONTAZERI<sup>[2]</sup>等人研究发现,在高温合金的焊接中,通过降低功率来减小热输入的方法可以有效地控制液化裂纹。

**作者简介:** 彭和思(1991-),男,硕士,工程师,主要从事高功率激光焊接的研究。

E-mail: phs0408@163.com

收稿日期: 2017-03-28; 收到修改稿日期: 2017-05-15

K418 是一种典型的沉淀强化型高温合金,这种合金在凝固过程中形成的  $\gamma$  奥氏体基体相,沉淀强化元素会形成二次强化相  $\gamma'$  来实现合金的强化。在国标中 K418 合金的沉淀强化 Al, Ti 含量分别达到了 6.0% 和 1%,其焊接难易程度根据焊接手册<sup>[3]</sup>可知。随着 Al, Ti 含量的增加,  $\gamma'$  相体积分数增加,甚至有人认为当其质量分数超过 0.06 为不可焊材料。所以综上所述, K418 合金的焊接难度较大。

虽然目前对激光焊接高温合金的报道已经很多<sup>[4-8]</sup>,但专门针对 K418 合金裂纹的研究还相对较少。本文中针对这一现象研究激光焊接工艺参量(焊接功率、焊接速率、离焦量、焊接路径的选择等)对焊缝质量、裂纹形成、焊缝熔深、力学性能等方面进行了研究,为激光焊接 K418 合金与不锈钢的异种金属的研究提供了一定的参考。

Table 1 Chemical composition of K418 alloy

elements	C	Cr	Mo	Al	Ti	Nb	Fe	Si	Ni
mass fraction	0.0008 ~ 0.0016	0.115 ~ 0.135	0.038 ~ 0.048	0.055 ~ 0.064	0.005 ~ 0.01	0.018 ~ 0.025	≤ 0.01	≤ 0.005	balance

Table 2 Chemical composition of 0Cr18Ni9 alloy

elements	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Fe
mass fraction	≤ 0.0008	≤ 0.01	≤ 0.02	≤ 0.0003	≤ 0.0005	0.18 ~ 0.20	0.082 ~ 0.105	balance

电镜观察断口形貌。

## 2 结果与分析

### 2.1 焊接工艺对焊缝形貌的影响

K418 高温合金和 0Cr18Ni9 激光焊接接头宏观形貌如图 1 所示。从图 1 中可以看出,通过控制合适的激光焊接工艺参量能获得外观质量较好的焊缝宏观形貌。



Fig. 1 Macromorphology of laser welded joint between K418 superalloy and 0Cr18Ni9

2.1.1 激光光斑偏离量对焊缝质量的影响 图 2 所示为激光光斑在不同偏移量下的焊缝截面图。图 2a 为激光光斑位于焊缝中间,图 2b 为激光光斑偏向

## 1 实验材料及方法

本实验中所使用的材料为  $\varnothing 8\text{mm}$  的圆柱形铸态镍基 K418 合金和轧制态的 0Cr18Ni9,厚度为 1.6mm,化学成分分别如表 1 和表 2 所示。实验中所使用的激光器为 IPG-4000 型光纤激光器,最大输出功率为 4000W。激光焊接头准直距离为 150mm,聚焦距离为 200mm,控制系统使用的是公司自主研发的 Page Admin (PA) 系统,保护气体为高纯氩气。工件配合间隙小于 0.03mm,焊接设备重复定位精度高于 0.02mm,焊接最高速率为 30m/min。利用线切割沿起弧收弧处和垂直于起弧收弧处进行焊缝截面取样,利用铣床铣去表面 1.1mm 进行层面取样。样品利用 100 目 ~ 2000 目的砂纸进行打磨后进行抛光,并利用王水进行腐蚀。通过光学显微镜观察焊缝宏观形貌,利用扫描

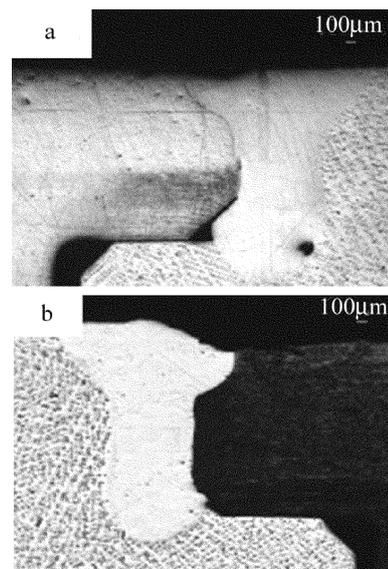


Fig. 2 Cross section of weld

a—spot in the middle b—spot biased 0Cr18Ni9 alloy side

0Cr18Ni9 一侧。从图中可以看出,当激光光斑位于焊缝正中间时 0Cr18Ni9 一侧会出现部分未融合的现象,这主要是因为 0Cr18Ni9 的熔点高于 K418 合金,而且 K418 合金的热导率比 0Cr18Ni9 的低很多,这就使得当激光光斑位于焊缝中间进行焊接时,0Cr18Ni9 一侧的热量散失大于 K418 合金一侧。所以在相同条件下 0Cr18Ni9 熔化所需的热量大于 K418 合金,为了保

证焊接最佳效果,激光光斑应偏向 0Cr18Ni9 一侧。

2.1.2 焊接裂纹的形成及防治 高温合金特别是沉淀强化高温合金焊接时产生裂纹的倾向很大<sup>[9]</sup>,焊接过程中产生的裂纹以热裂纹为主,主要有凝固裂纹和液化裂纹,同时 K418 合金在焊后处理过程中还容易产生时效应变裂纹<sup>[10-11]</sup>。图 3 所示为典型的凝固热裂纹。形成该类裂纹的主要原因是焊缝液态金属在凝固过程中,当固相含量达到一定百分比时,形成的固相骨架将未凝固的液态金属分离开来,限制了液态金属的流动,使其凝固得不到充分的补缩<sup>[12]</sup>。焊接过程中激光具有明显的集中热输入,而焊缝外温度较低,这样会形成较大的温度梯度,在这种作用下材料内部的热应力显著,在应力作用下会将未得到补缩的枝晶拉断形成凝固热裂纹,同时焊接过程中的热输入会使得焊缝处晶粒组织变得粗大从而降低了材料的塑性,这也会导致凝固热裂纹的产生。为了防止这种热裂纹的发生,应该尽量地延长焊缝的凝固时间,使得液态金属在凝固过程中能得到充分的补缩,所以从这方面来说应尽量减小焊接速率,延迟凝固时间。

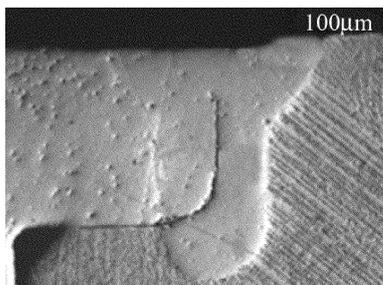


Fig. 3 Hot crack of weld

图 4 所示为焊接时产生的液化裂纹。这种裂纹是高温合金焊接时发生在热影响区的一种主要形式的裂纹,所以也叫做热影响区裂纹。这种裂纹具有沿晶开裂,从融合线向母材扩展的特性<sup>[13]</sup>。在 K418 合金中晶界处聚集了少量的碳化物和 Al, Ti 形成的低熔点化合物,这些相存在熔点低的共性,在进行激光焊接时热影响区的温度达到其熔点,在晶界会形成一层液态薄膜,造成晶界液化。当这种晶界的液化薄膜承受不住材料的拉应力时会被拉裂形成液化裂纹。研究发现:在高温合金中,Al, Ti 等  $\gamma'$  相形成元素和 C 含量越高,液化裂纹形成倾向约严重<sup>[14-15]</sup>。为了尽量减少焊缝处  $\gamma'$  的析出,可以通过上述的将光斑偏向激光光斑应偏向 0Cr18Ni9 一侧,这样能有效地稀释焊缝中  $\gamma'$  相形成元素的浓度,另一方面应该尽量地减少热影响区的范围和热量,使得热影响区的温度不超过低熔点化合物的熔点,在实际生产中应该控制光斑直径,将激光能

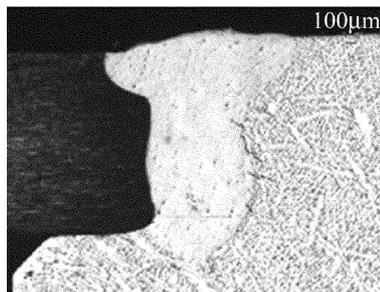


Fig. 4 Liquefaction cracks

量束集中在熔池中间,以减少周边热输入。

2.1.3 保护气体对焊接质量的影响 在激光焊接中特别是快速激光焊接中气孔是一种非常常见的问题。在激光焊接中侧吹保护气能对焊缝起到保护的效果,同时能够一定程度地吹散等离子气体,在本实验过程中发现保护气的选择、吹气方向、气流量等因素都会对焊缝质量产生明显的影响。实验表明,焊接过程中保护气体的流量控制至关重要,当气流量过小时无法吹散等离子体,同时对焊缝表面的保护效果也很差,当气流量过大时,对熔池产生较大的扰动,甚至会将液态金属吹离熔池,很容易产生气孔等缺陷。实验中发现,气流量约为 12L/min 时能达到较理想的焊接效果。

图 5 所示为不同保护气体对焊缝形貌的影响。从图中可以看出,用  $N_2$  做保护气体比 Ar 做保护气体能有效地减少气孔的产生,这主要是因为惰性气体 Ar 在高温下与母材不会发生反应,当焊缝金属凝固时卷入熔池中的气体来不及溢出会形成如图 5a 所示的气孔。而在高温下  $N_2$  能与 0Cr18Ni9 发生反应,所以焊缝内残留的气孔较少。

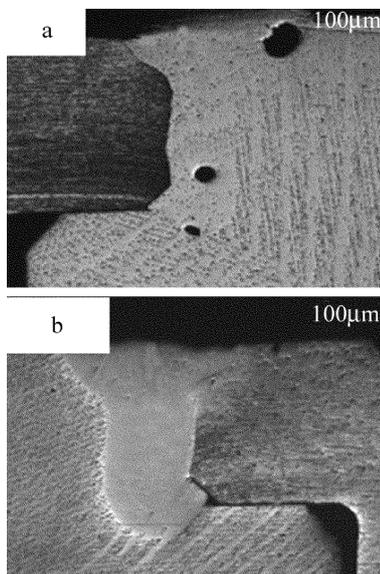


Fig. 5 Effect of different protective gases on weld morphology  
a—Ar<sub>2</sub> b—N<sub>2</sub>

## 2.2 焊缝力学性能

图6所示为焊缝周边材料的硬度。从图中可以看出,依次从0Cr18Ni9侧到焊缝再到K418侧,硬度出现了先增大后减小再增大的现象,0Cr18Ni9的热影响区硬度高于母材,而K418的热影响区硬度变化不明显,焊缝的硬度值位于两者之间。这主要是因为激光焊接热影响区小,冷却速率极快,使得热影响区域出现一定的淬火硬化现象。焊缝的硬度低于K418合金母材的硬度是因为在激光焊接中快速熔化的0Cr18Ni9对K418合金起到了稀释的作用,从而减少了焊缝区域内的强化相 $\gamma'$ 相的浓度,导致其硬度下降<sup>[16-18]</sup>。对焊缝进行拉伸试验结果表明,焊缝约为0Cr18Ni9母材的89%,采用扫描电镜对断口进行观察,其结果如图7所示。从图7中可以看出,焊缝区域存在一定数量的韧窝,说明焊缝具有良好的韧性。

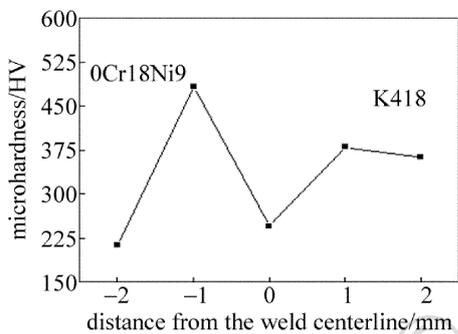


Fig. 6 Micro hardness of laser welding joint

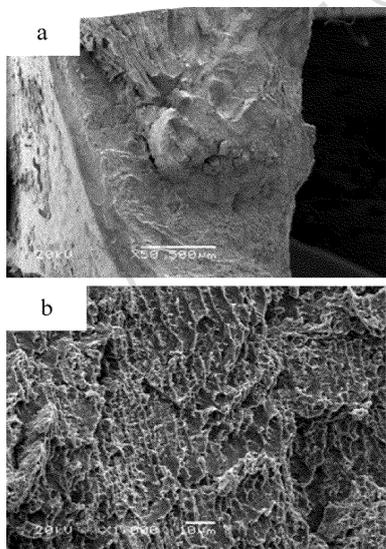


Fig. 7 Micromorphology of fracture surface  
a—50 $\times$  b—1000 $\times$

## 3 结论

(1)在利用激光对0Cr18Ni9与K418高温合金进行焊接过程中,由于两者的热物性参量的区别,焊接时

为了保证焊接最佳效果,激光光斑应偏向0Cr18Ni9一侧。

(2)为了防止焊接过程中裂纹的产生,焊接时尽量使热影响区的温度不超过低熔点化合物的熔点,在实际生产中应该控制光斑直径,将激光能量束集中在熔池中间,以减少周边热输入。

(3)焊接过程中保护气体的流量控制至关重要,当气流量约为12L/min时能起到较理想的保护效果。从焊接气孔来看,使用 $N_2$ 可以降低气孔的生成,但是 $N_2$ 在高温下能与母材发生反应降低焊接接头的力学性能。

(4)激光焊接热影响区小,冷却速率极快,使得热影响区域出现一定的淬火硬化现象,而焊缝的硬度值位于两母材硬度之间,焊接接头的强度约为母材的89%。

## 参考文献

- [1] TOLLETT B. Welding with laser powder fusion and plasma wire feed systems [J]. Engine Yearbook, 2003, 10(3):84-89.
- [2] MONTAZERI M, GHAINI F M. The liquation cracking behavior of In738LC superalloy during low power Nd:YAG pulsed laser welding [J]. Materials Characterization, 2012, 67(6):65-73.
- [3] GAO X L. Welding process manual [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1992:42-43 (in Chinese).
- [4] AO S S, LUO Zh, SHAN P. Microstructure of inconel 601 nickel-based superalloy laser welded joint [J]. The Chinese Journal of Non-ferrous Metals 2015, 25(8):2099-2107 (in Chinese).
- [5] GUO L, WANG F, ZHANG Q M, et al. Research of techniques of laser-MIG hybrid welding of 304 stainless steel [J]. Laser Technology, 2013, 37(6):781-785 (in Chinese).
- [6] WANG D D, YU Sh F, LIU Y. Effect of laser power on performance of dissimilar joints between Cu-Ni coated low carbon steel and stainless steel [J]. Laser Technology, 2016, 40(6):806-809 (in Chinese).
- [7] LEI Zh L, DONG Zh J, CHEN Y B, et al. Effect of heat input on the microstructures and mechanical properties of laser welded  $Ti_2AlNb$  alloys [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(3):579-584 (in Chinese).
- [8] YAN F, WANG Ch M, HU X Y. Study of the process of laser welding for low expansion superalloy GH909 [J]. Electric Welding Machine, 2014, 44(9):6-9 (in Chinese).
- [9] KELLY T J. Welding metallurgy of investment cast nickel-based superalloy [C]//Proceedings from Weldability of Materials Conference. New York, USA: ACM Press, 1990: 151-157.
- [10] LINGENFELTER A C. Welding metallurgy of nickel alloys in gas turbine components [C]//Proceedings from Materials Solutions '97 on Joining and Repair of Gas Turbine Components. New York, USA: IEEE, 1997: 3-6.
- [11] HENDERSON M B, ARRELL D, LARSSON R, et al. Nickel based superalloy welding practices for industrial gas turbine applications [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2004, 9(1): 13-21.

- [12] DYE D, HUNZIKER O, REED R C. Numerical analysis of the weldability of superalloys [J]. *Acta Materialia*, 2001, 49(4): 683-697.
- [13] OJO O A, CHATURVEDI M C. On the role of liquated  $\gamma'$  precipitates in weld heat affected zone microfissuring of a nickel-based superalloy [J]. *Materials Science and Engineering*, 2005, A403(1/2): 77-86.
- [14] OJO O A, RICHARDS N L, CHATURVEDI M C. Liquation of various phases in HAZ during welding of cast Inconel 738LC [J]. *Materials Science and Technology*, 2004, 20(8): 1027-1034.
- [15] OJO O A, RICHARDS N L, CHATURVEDI M C. Contribution of constitutional liquation of gamma prime precipitate to weld HAZ cracking of cast Inconel 738 superalloy [J]. *Scripta Materialia*, 2004, 50(5): 641-646.
- [16] PANG M, YU G, WANG H H, *et al.* Microstructure and mechanical properties of K418 and 42CrMo dissimilar metal laser welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, 29(2): 85-88 (in Chinese).
- [17] SEKHAR N C, REED R C. Power beam welding of thick section nickelbase superalloys [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2002, 7(2): 77-87.
- [18] LIU X B, YU G, PANG M, *et al.* Laser welding of superalloy K418 to 42CrMo steel [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(3): 444-448 (in Chinese).

版权所有 © 《激光技术》编辑部

版权所有 ©