

BNi68CrWB 钎焊 GH648/K42 异种高温合金接头的组织与性能

杨敏旋<sup>1</sup>, 马 瑞<sup>1</sup>, 刘春风<sup>2</sup>, 张 杰<sup>2</sup>, 孙 妍<sup>2</sup>

(1. 北京动力机械研究所, 北京 100074; 2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 采用 BNi68CrWB 钎料粉末对 K24 和 GH648 异种高温合金进行钎焊连接, 分析了钎焊温度、保温时间、装配间隙等钎焊工艺参数对接头组织和性能的影响规律. 结果表明, 在钎焊接头可观察到三个特征组织区域: 共晶区、等温凝固区和扩散区; 钎焊温度过高, 接头内部 W-Cr-Ni 脆性相增多, 接头性能下降. 保温时间延长可以促进钎料与母材之间元素的扩散, 有利于获得均匀的固溶体组织, 接头强度提高, 但时间过长, 性能略有下降. 钎焊间隙在 0.05 ~ 0.15 mm 范围, 钎焊温度 1 150 ℃, 保温时间 30 min 所得接头性能较高, 约 600 MPa.

**关键词:** BNi68CrWB 钎料; GH648/K42 接头; 微观组织; 力学性能

**中图分类号:** TG 454      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0253-360X(2017)04-0107-04

0 序 言

镍基高温合金具有较高的比强度, 良好的热稳定性和热力学性能, 是应用最为广泛的一种高温合金. 其中, 铸造高温合金强度最高, 可精密铸造成小型承载构件, 如 K24 合金, 常用作发动机调节片或涡轮叶片等<sup>[1]</sup>; 变形高温合金强度高, 并具有一定塑性, 可加工成结构复杂构件, 如 GH648 合金, 可用于航空发动机的燃烧室材料等<sup>[2]</sup>. 实际使用中经常将两种不同的高温合金连接组并成一个复杂构件满足使用需要<sup>[3]</sup>, 但高温合金的塑性和可焊性较差, 焊接时易产生热裂纹, 一般的高温焊接方法难以实现其可靠连接. 目前常用的焊接技术有固相扩散连接<sup>[4,5]</sup>, 激光焊接<sup>[6]</sup>, 瞬时液相连接<sup>[7]</sup> 以及钎焊<sup>[1,3,8,9]</sup> 等. 其中, 钎焊技术可以在不施加压力条件下实现连接, 获得完整致密的焊接接头的同时又不会造成接头塑性变形, 且生产效率高, 成为高温合金实际构件连接的常用技术. 镍基钎料具有优异的高温性能, 是镍基高温合金最常用的钎料, 其中, BNi68CrWB 具有较低的硼含量, 较高的钨含量, 能够减少硼对母材晶间渗入并提高钨对钎料的强化效果, 提高钎料高温强度<sup>[10]</sup>.

文中选用 BNi68CrWB 钎料钎焊 K24 与 GH648 异种合金, 分析钎焊工艺参数 (钎焊温度、保温时间、钎焊间隙) 对接头组织以及力学性能的影响.

1 试验方法

将母材 GH648 和 K24 高温合金分别切割成 10 mm × 6 mm × 1.5 mm (组织用) 和 15 mm × 60 mm × 1.5 mm (性能用) 待接样品, 将待接面打磨并在丙酮中超声清洗 10 min 后吹干, 将 BNi68CrWB 钎料及控制间隙用的镍箔 (厚度 0.05, 0.10 和 0.15 mm) 按图 1 所示装配, 放置到 VAF-30 型真空钎焊炉中.

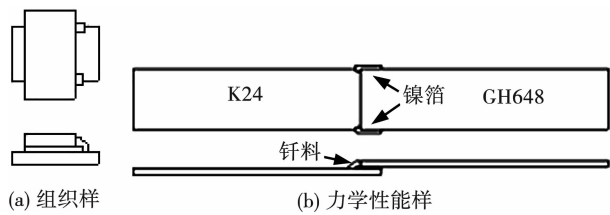


图 1 钎焊装配示意图  
Fig. 1 Schematic of brazing assembly

GH648 热处理制度 (1 140 ℃ × 1 h 空冷 (AC) + 900 ℃ × 16 h (AC)), K24 使用状态 (铸态或 (1210 ± 10) ℃ × 16 h (AC)), BNi68CrWB 钎料熔点 (970 ~ 1 095 ℃), 设计钎焊温度为 1 150 ~ 1 200 ℃, 保温 10 ~ 60 min. 首先以 10 ℃/min 的升温速率升高到 450 ℃ 保温 30 min, 使有机胶充分挥发; 继续升温到 950 ℃ 保温 30 min, 使整个试样受热均匀; 再升高到钎焊温度并保温不同时间, 进行钎焊, 钎焊结束后试样随炉冷却. 将焊后组织样垂直焊缝切开并用牙托

粉镶嵌后进行抛光、腐蚀,在 FEI Quanta200F 型扫描电镜下观察接头组织,并用其配备的 EDS 能谱仪进行成分分析. 在 Instron5569 万能试验机上进行接头的拉剪强度测试,每个参数测试 5 个样品取平均值.

2 试验结果

2.1 钎焊温度对钎焊接头组织结构的影响

图 2 是不同钎焊温度下保温 10 min、装配间隙为 0.05 mm 的钎焊接头界面组织结构,接头由钎缝和两侧母材界面扩散区构成. K24 一侧扩散区组织较细小,不易分辨;GH648 一侧扩散区则有明显黑色 Cr-Ni 析出相分布在母材晶界处. 钎缝内部主要由 A~D 相构成,各相成分见表 1, A 和 B 灰色相均为镍基固溶体,二者因元素含量不同造成衬度不同,分布于钎缝中间区域的深色相 B 的 Ni,Ti 元素含量比 A 相多,而其 Fe,Cr 元素含量比 A 相少,这是钎焊过程中,成分浓度梯度驱使钎料成分逐渐由中间向两侧扩散,而母材向钎料中溶解扩散所致. 黑色 C 相为 CrB<sub>2</sub>,白色 D 相为 W-Cr-Ni 化合物.

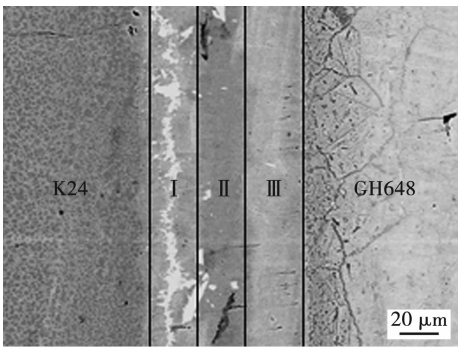
当钎焊温度为 1 100 ℃ 时(图 2a),钎缝中心出现镍基固溶体上连续分布 W-Cr-Ni 化合物的 I 区,Ti 元素含量较多的镍基固溶体且其上分布少量 Cr<sub>2</sub>B 相的 II 区,及镍基固溶体组成的 III 区. 钎焊温度升到 1 150 ℃ 时(图 2b),W-Cr-Ni 化合物呈块状分布在近 K24 侧钎缝的镍基固溶体上,钎缝中心 Ti 元素含量高的镍基固溶体比例增大. K24 中的 Ti 元素含量比钎料中的高,随钎焊温度升高,母材中的 Ti 元素向钎缝中心溶解扩散,使钎缝中 Ti 元素含量高的镍基固溶体增多. 钎焊温度 1 170 ℃ 时,逐渐增多的块状 W-Cr-Ni 化合物分布靠近 GH648 侧钎缝的镍基固溶体上,钎缝中心 Ti 元素含量高的镍基固溶体比例进一步增大,且出现细微的裂纹,见图 2c.

钎焊温度升高到 1 200 ℃ 时,块状 W-Cr-Ni 化合物逐渐长大成板条状(图 2d),分布于靠近 GH648 侧钎缝的镍基固溶体上和钎缝与 GH648 界面处,但钎缝中心 Ti 元素含量高的镍基固溶体比例小于钎焊温度 1 170 ℃ 时所得钎缝中,因高的钎焊温度使钎缝中元素扩散速度加快,Ti 元素在钎缝中分布更加均匀. 钎缝上仍存在细微裂纹,而且裂纹主要产生在 W-Cr-Ni 化合物和 CrB<sub>2</sub> 化合物周围.

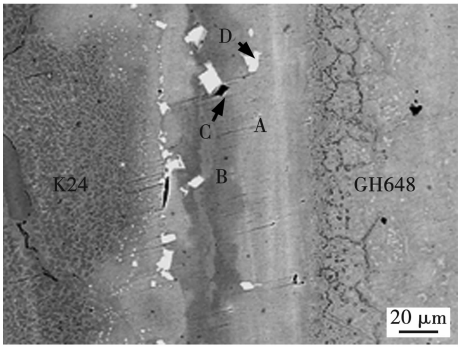
综上可知,钎焊温度过高易引起母材溶蚀及化合物增多,从而产生微裂纹. 因此,后续分析选取钎焊温度为 1 150 ℃.

2.2 保温时间对钎焊接头组织结构的影响

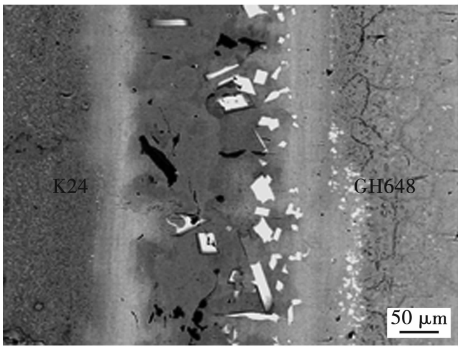
图 3 显示了 1 150 ℃ 保温不同时间、装配间隙



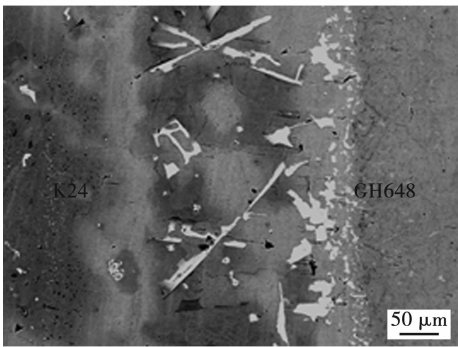
(a) 1 100 ℃



(b) 1 150 ℃



(c) 1 170 ℃



(d) 1 200 ℃

图 2 不同钎焊温度保温 10 min 所得接头界面组织  
Fig. 2 Interface microstructure of joints brazed at different temperatures for 10 min

为 0.05 mm 所得钎焊接头的界面组织结构. 图 3b 可看出,随保温时间延长,钎缝中除镍基固溶体、

W-Cr-Ni和 Cr<sub>2</sub>B 化合物外,在略靠近 K24 一侧还出现显著的共晶组织,这是因为保温时间延长,钎缝中的液相发生等温凝固而生成的,钎料与母材间元素相互扩散更加充分,化合物比例减小,钎缝中的镍基固溶体比例增加. 这一变化趋势对钎焊接头的应力释放,及接头强度的提高将是有利的. 继续延长保温时间,共晶区域减小.

表 1 钎缝中不同位置的 EDS 能谱分析(原子分数,%)

Table 1 EDS results of different places in brazing seam

| 成分 | Ni    | Cr    | W     | Si   | Ti   | B     | Fe   | 可能相              |
|----|-------|-------|-------|------|------|-------|------|------------------|
| A  | 72.43 | 9.31  | 0.98  | 6.16 | 0.89 | —     | 3.88 | (Ni)             |
| B  | 82.05 | 5.30  | —     | 1.68 | 3.97 | —     | 1.89 | (Ni)             |
| C  | 1.71  | 63.96 | 3.18  | 0.35 | 0.49 | 20.42 | 0.19 | CrB <sub>2</sub> |
| D  | 10.57 | 56.71 | 20.30 | 2.45 | 0.68 | —     | 1.21 | W-Cr-Ni          |

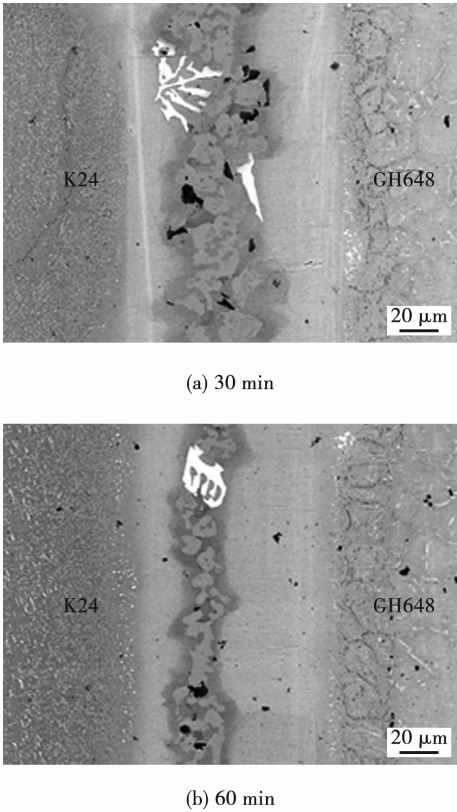


图 3 1 150 °C下保温不同时间所得接头界面组织

Fig. 3 Interface microstructure of joints brazed at 1 150 °C for different time

2.3 装配间隙对钎焊接头组织结构的影响

1 150 °C保温 30 min,装配间隙分别为 0,0.05 和 0.15 mm 的钎焊接头界面组织如图 4 所示. 当装配间隙为 0 时,见图 4a,钎缝全部由镍基固溶体组成,接头组织理想. 当装配间隙为 0.05 mm 时,见图 3a,除镍基固溶体外、钎缝中心区还出现共晶组

织及化合物. 当装配间隙继续增加到 0.15 mm 时(图 4c),钎缝中心分布的共晶组织和化合物区域进一步增宽. 这是因为装配间隙增大,相同钎焊温度和保温时间下,钎料中的元素无法充分向母材扩散,间隙越大,钎料扩散越不充分,故等温凝固时钎缝中形成的共晶组织、化合物越多,这将对钎焊接头强度是不利的.

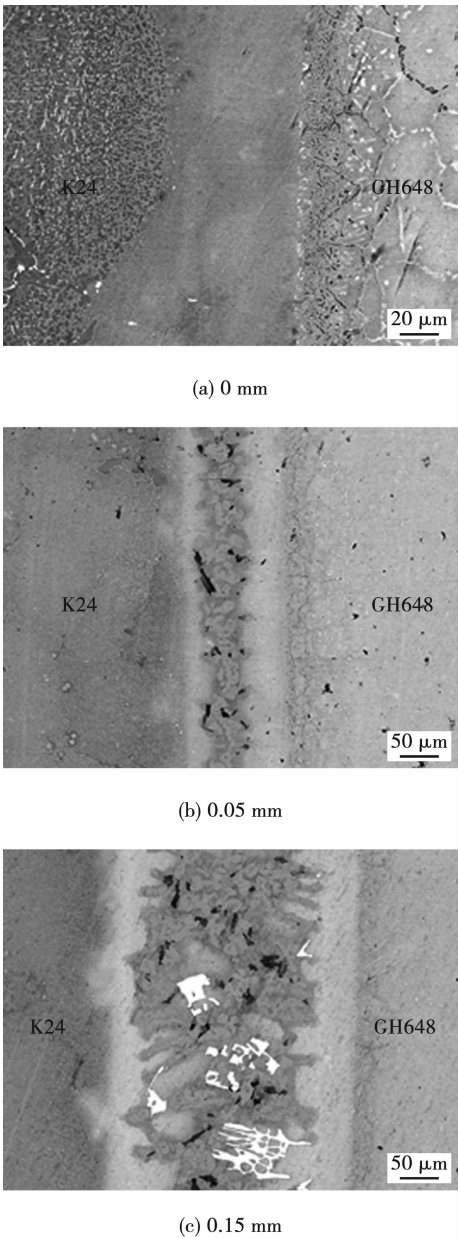


图 4 1 150 °C保温 30 min 不同装配间隙接头界面组织

Fig. 4 Interface microstructure of joints brazed at 1 150 °C for 30min with different fit-up gap

2.4 钎焊工艺参数对接头力学性能的影响

钎焊接头力学性能与接头界面组织结构密切相关. 表 2 列出了不同钎焊工艺下所得试验件的抗拉强度.

表 2 不同钎焊工艺参数下接头抗拉强度  
Table 2 Tension-shear strength of joints brazed at different processing parameters

| 试样编号 | 钎焊温度<br><i>T</i> /℃ | 保温时间<br><i>t</i> /min | 装配间隙<br><i>w</i> /mm | 抗拉强度<br><i>R<sub>m</sub></i> /MPa |
|------|---------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------------------|
| 1    | 1 100               | 10                    | 0.05                 | 126                               |
| 2    | 1 150               | 10                    | 0.05                 | 140                               |
| 3    | 1 170               | 10                    | 0.05                 | 575                               |
| 4    | 1 200               | 10                    | 0.05                 | 520                               |
| 5    | 1 150               | 30                    | 0.05                 | 600                               |
| 6    | 1 150               | 60                    | 0.05                 | 561                               |
| 7    | 1 150               | 30                    | 0                    | 593                               |
| 8    | 1 150               | 30                    | 0.10                 | 600                               |
| 9    | 1 150               | 30                    | 0.15                 | 582                               |

接头抗拉强度受钎焊温度和保温时间的影响较大. 当钎焊温度为 1 100 ℃ 和 1 150 ℃ 时保温 10 min 时,接头性能很低,断裂发生在钎缝处. 断口观察显示钎缝中存在未钎满现象,说明低温不仅使钎料流动性下降,也使钎料与母材间的反应减弱,从而钎焊接头抗剪强度降低. 改变钎焊工艺后,试验件的断裂位置均发生在靠近钎缝的 K24 合金一侧,说明随钎焊温度升高和保温时间延长,钎料与母材反应充分,钎焊接头抗剪强度增大. 但当钎焊温度升至 1 200 ℃ ,或保温时间延至 60 min 时,接头抗拉剪强度下降,说明过高钎焊温度,或过长保温时间一方面将会恶化母材性能,另一方面钎料对母材的溶蚀作用也将加剧,从而使得断裂强度降低,比较可知,钎焊温度升高引起的性能降低更显著. 装配间隙对接头性能影响不明显,较小装配间隙形成的钎缝组织较好,接头性能最高,间隙过小易导致钎缝未填满,而间隙过大易在钎缝中心形成金属间化合物、共晶等脆性相,都可能影响到接头的性能. 在 1 150 ℃ 保温 30 min 条件下,装配间隙 0 ~ 0.15 mm 范围内,接头抗拉剪试验均断在 K24 母材处,表明接头连接可靠,这与钎缝及与母材界面组织内无明显缺陷有关.

3 结 论

- (1) 钎焊温度对接头影响显著,当保温 10 min 较短时间时,钎焊温度升高,有利于钎料扩散,接头性能提高,但过高又会引起母材向钎料溶蚀加剧,接头内脆性相 W-Cr-Ni 含量增大,并产生微裂纹,接头性能下降. 温度过低,填缝不完全导致接头强度低.
- (2) 在 1 150 ℃ 延长保温时间可增大钎缝中镍基固溶体的比例,减小化合物的生成,共晶组织增

多,接头强度升高,但保温时间过长,共晶组织又逐渐减少,母材向钎料的溶蚀加剧,性能略有下降.

(3) 装配间隙在 0 ~ 0.15 mm 范围对接头影响不明显,除了 1 100 ℃ 和 1 150 ℃ 保温 10 min 外,钎焊接头拉剪后全部断在 K24 母材处.

参考文献:

[1] 张丽霞,冯吉才. K24 镍基合金钎焊接头热应力的有限元模拟[J]. 焊接学报,2009,30(9):29-33.  
Zhang Lixia, Feng Jicai. Finite element simulation of thermal stress on brazed K24 nickel-based joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(9): 29-33.

[2] 周轶群,马惠萍,鞠 泉,等. 三种热处理制度对 GH648 合金组织和性能的影响[J]. 钢铁研究学报,2007,19(12):45-48.  
Zhou Yiqun, Ma Huiping, Ju Quan, *et al.* Effects of three kinds of heat treatment on microstructure and mechanical properties of alloy GH648[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2007, 19(12): 45-48.

[3] 韩 峰,王 斌,孔庆吉,等. K465 合金及 K465 与 GH3039 异种合金的钎焊[J]. 焊接技术,2011,40(5):26-29.  
Han Feng, Wang Bin, Kong Qingji, *et al.* Brazing of K465 to itself and to GH3039 alloy[J]. Welding Technology, 2011, 40(5): 26-29.

[4] Liu J, Cao J, Lin X, *et al.* Microstructure and mechanical properties of diffusion bonded single crystal to polycrystalline Ni-based superalloys joint[J]. Materials & Design, 2013, 49: 622-626.

[5] Guoge Z, Chandel R S, Pheow S H, *et al.* Effect of bonding temperature on the precipitation of  $\delta$  phase in diffusion bonded inconel 718 joints[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2006, 21(5): 453-457

[6] 冯威琦,张云丰,陶 汪,等. 高温合金/不锈钢异种材料 T 型接头激光穿透焊工艺研究[J]. 中国激光,2013,39(10):40-46.  
Feng Weiqi, Zhang Yunfeng, Tao Wang, *et al.* Dissimilar metals combination of superalloy/stainless steel in T-shape by laser penetration welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 39(10): 40-46.

[7] Pouranvari M, Ekrami A, Kokabi A H. Microstructure development during transient liquid phase bonding of GTD-111 nickel-based superalloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 461(1): 641-647.

[8] Wu X W, Chandel R S, Seow H P, *et al.* Wide gap brazing of stainless steel to nickel-based superalloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 113(1-3): 215-221.

[9] 刘文慧,郭绍庆,叶 雷,等. 采用 BNi68CrWB 钎料钎焊 GH783 的接头组织与性能[J]. 材料工程,2010(6):73-77.  
Liu Wenhui, Guo Shaoqing, Ye Lei, *et al.* Microstructure and property of the GH783 joint brazed with BNi68CrWB[J]. Journal of Materials Engineering, 2010(6): 73-77.

[10] 张启运,庄鸿寿. 钎焊手册[M]. 北京:机械工业出版社,2008.

作者简介: 杨敏旋,女,1985 年出生,博士,高级工程师. 主要从事合金的钎焊研究. 已发表论文 11 篇. Email: jzhhit@163.com.  
通讯作者: 刘春风,女,博士,副教授. Email: lcfeng@hit.edu.cn