

## 邦迪管 Ni 基钎料钎焊及焊缝组织分析

曹丽丽,祝邦文,郑 军,管爱枝,喻彩丽

(浙江科技学院 机械与汽车工程学院,杭州 310023)

**摘 要:** 以镍(Ni)基钎料代替价格较高的银(Ag)基钎料对邦迪管-低碳钢管进行氮气保护下的炉中钎焊试验,并对焊缝成形性及其组织结构进行了分析。结果显示,采用 Ni 基钎料可实现邦迪管-低碳钢管的焊接,焊缝饱满致密,无气孔、夹杂。焊缝两侧靠近基材过渡区为粗大的固溶体组织,中心区为 Ni 固溶体和细小的 Ni-P 共晶颗粒。邦迪管镀层 Cu 熔点低,与液态钎料的 Ni 原子互扩散形成固溶体组织,即钎料向母材扩散和母材向钎料溶解;而低碳钢一侧以 Ni 的扩散为主。

**关键词:** Ni 基钎料;炉中钎焊;邦迪管;组织结构

**中图分类号:** TG425.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-8798(2015)06-0504-04

## Analysis of Ni-based brazing filler metals and weld microstructure of Bundy pipe

CAO Lili, ZHU Bangwen, ZHENG Jun, GUAN Aizhi, YU Caili

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Zhejiang University of Science and Technology,  
Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** Bundy pipe-low carbon steel was welded with Ni-based brazing filler metals in furnace under nitrogen atmosphere, instead of expensive silver-based brazing filler metals. The weld formability and microstructure of the welded joint were analyzed. According to the results, a good pipe joint is achieved by Ni-based brazing filler metals, and the welded joint is full density, without pores and inclusions. For both sides of the welded joint, the transition zone closed to the base material is composed of bulky solid solution, while small Ni-P eutectic particles distributed in Ni solid solution in the center. The Cu coating of Bundy pipe has low melting point and Cu-Ni solid solution is formed due to the mutual diffusion of Cu and Ni atoms, namely the solder diffused to the parent metal and parent metal dissolved to brazing filler metals; and the diffusion of liquid Ni has priority from the welded joint to the base material.

**收稿日期:** 2015-05-19

**基金项目:** 浙江省重大科技专项计划项目(2013C01080)

**作者简介:** 曹丽丽(1980— ),女,山东省潍坊人,讲师,博士,主要从事焊接工艺及新材料研究。

**Key words:** Ni-based brazing filler metals; furnace brazing; Bundy pipe; microstructure

焊接技术是一项快速发展的金属连接技术,如采用不同热源的激光焊接<sup>[1]</sup>、等离子焊接<sup>[2]</sup>等,采用焊接工艺能有效利用材料,焊接产品比铆接件、铸件和锻件重量轻,密封性好,焊接已成为现代工业中不可缺少且日益重要的一种加工工艺方法。其中,钎焊工艺是采用熔点低于母材的合金作钎料,钎焊接头表面光洁,气密性好,形状和尺寸稳定;钎焊对母材的物理化学性能影响小,焊接应力和变形较小,可焊接性能差别较大的异种金属<sup>[3-4]</sup>。

目前,制冷行业中邦迪管的焊接,多采用银(Ag)基钎料,成本高,性能较好的还含有毒元素镉<sup>[5]</sup>;另外,焊后易在焊缝表面形成残渣,难清除<sup>[6]</sup>。镍(Ni)基钎料具有较高的强度,可以连接承受载荷的零件,抗氧化、耐腐蚀,特别适用于不锈钢、高温合金的感应钎焊和炉中钎焊等<sup>[7-8]</sup>,应用比较广泛。

本研究探索采用新型 Ni 基钎料,以替代价格较高的 Ag 基钎料,应用于邦迪管接头的焊接,进而研究钎焊接头及焊缝的组织结构和成分分布。

## 1 实验原料及成分

试验所用母材为 $\Phi 6\text{ mm}\times 0.7\text{ mm}$ 的邦迪管;管接头外部套管为低碳钢管,焊缝间隙 $0.1\sim 0.3\text{ mm}$ 。Ni 基钎料牌号为 ZYQL1,主要成分 Ni-P-Cu 系真空雾化合金粉末,不含 B 元素,其合金成分配比: Ni 余量, P 质量分数为 $10.0\%\sim 12.0\%$ , Cu 质量分数为 $13.0\%\sim 16.0\%$ 。

Ni 基粉末钎料配以凝胶状钎剂,按质量比 $10:1$ 调制成药状使用。邦迪管及其接头的表面、钎焊面采用酒精进行清理,然后取适量的已调制钎料放置在邦迪管/低碳钢接头的待焊处,并对管接头进行定位,如图 1 所示。钎料正置于管接头处,有利于钎料熔化后在毛细作用与重力的双重作用下流入间隙内,得到良好的焊缝。高纯氮气(99.9%)用作保护气氛,炉中钎焊:加热温度 $965\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,保温 $10\text{ min}$ ,随炉冷却至 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下取出试样。

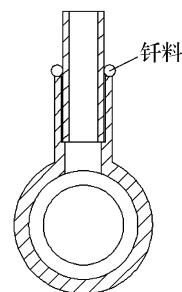


图 1 钎料放置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of filler metals

## 2 实验结果

### 2.1 钎焊接头宏观形貌

观察钎焊后邦迪管接头如图 2 所示,焊缝外观成形良好,饱满致密。由于氮气气氛保护,管件接头焊缝周围、邦迪管及套管表面保持了各自的金属光泽,无氧化现象,同时未见夹渣等残留,说明钎焊过程中钎剂也起到了清理和保护作用。焊缝剖面也未发现明显的气孔、夹渣等缺陷,两侧焊缝线条饱满,实现了管接头的钎焊连接。

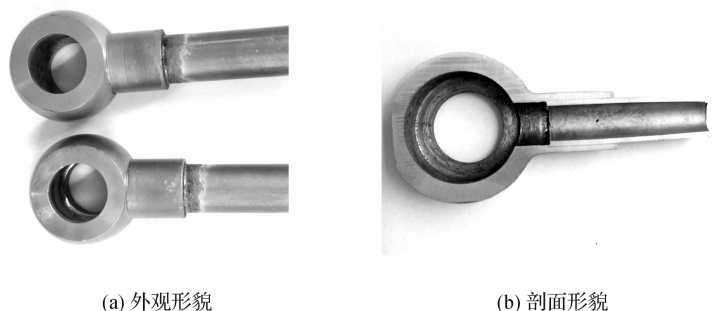


图 2 邦迪管钎焊接头焊缝的形貌

Fig. 2 Morphology of welded joint of Bundy pipes

## 2.2 焊缝组织结构设计分析

对图 2 中采用 Ni-P-Cu 钎料钎焊的邦迪管钎焊接头,光学显微镜下观察焊缝,由图 3 中可看到焊缝致密,组织均匀,实现了钎料与两侧基体的冶金结合。

在扫描电镜下进一步观察焊缝的显微组织结构及各元素的分布,焊缝的背散射电子像如图 4 所示。钎焊接头焊缝的显微组织可分为两部分:一是靠近两侧母材与焊缝界面相平行的固溶体组织,粗大的亮白色颗粒;二是焊缝中间均匀连续分布的共晶和固溶体组织,颗粒细小的白色共晶体颗粒相对均匀弥散分布在灰色的固溶体中。另外,由图 4(a)可看出,焊缝接近低碳钢套管一侧边界,固溶体颗粒与低碳钢中晶粒交互排列,这样的排列方式有利于提高焊缝的结合强度。

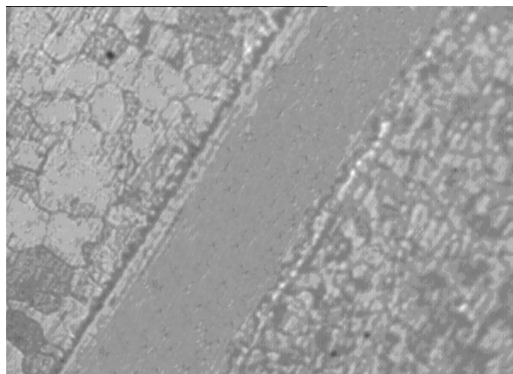
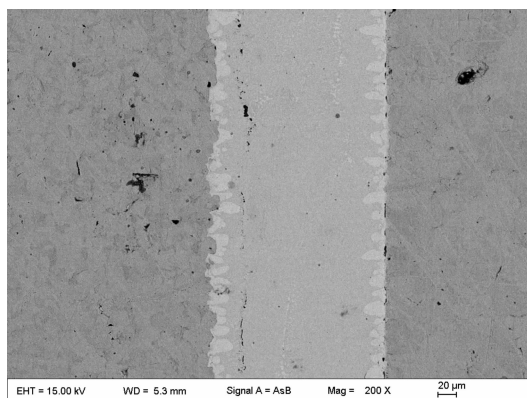
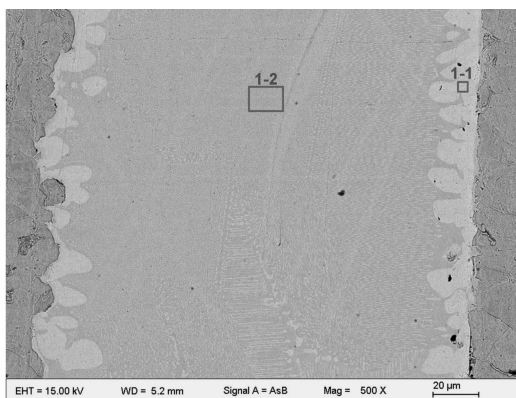


图 3 光学显微镜下观察的焊缝组织(100×)

Fig. 3 Microstructure of welded joint by optical microscope(100×)



(a)



(b)

图 4 扫描电镜观察焊缝的显微组织

Fig. 4 Microstructure of welded joint by SEM(scanning electron microscopy)

## 3 焊缝组织形成过程分析

钎料与基材实现冶金结合,根据扫描电镜观察的背散射电子像,其结构如图 5 所示。图中所示焊缝过渡区 2 为焊缝两侧固溶体组织区域,粗大亮白色颗粒,尺寸为  $10\sim 18\ \mu\text{m}$ ,形状不规则,靠近基材侧。与该区域形成明显对比的是焊缝中间的细颗粒共晶组织,即焊缝中心区。两区域之间是 Ni 基钎料熔融后得到的 Ni 固溶体,即图中所示焊缝过渡区 1。

粗大固溶体组织的形成与钎焊过程中 Ni 基钎料的组分向两侧母材的扩散及母材组分向钎料的溶解密切相关。熔融钎料凝固时,与液态钎料接触的母材界面是焊缝中液态钎料凝固现成的结晶晶核,液态的 Ni-P-Cu 钎料依附于母材以非均匀形核方式结晶。但是,由于钎料同外部低碳钢套管和内部邦迪管的成分、熔点有很大差别,因此,左右两侧焊缝界面的颗粒形态和分布也存在差别,靠近邦迪管一侧界面处颗粒彼此连接,连续分布。

这是由于邦迪管外层的镀层 Cu 熔点较低,且 Ni-Cu 在  $628\sim 1358\ \text{K}$  温度区间的整个组分范围内可

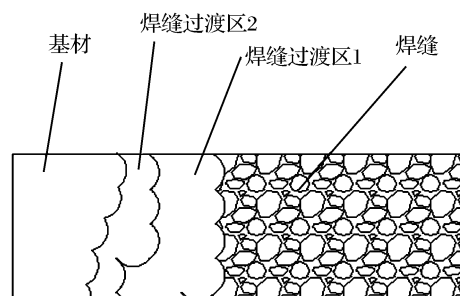


图 5 焊缝的显微组织示意图

Fig. 5 Schematic diagram of microstructure of welded joint

形成面心立方结构的置换型无限固溶体  $\alpha$  相<sup>[5]</sup>。因此,液态钎料中的 Ni 原子可以扩散方式进入 Cu 相中,Cu 原子也可通过 Ni/Cu 相界面向 Ni 侧扩散,即母材向钎料中的溶解过程,从而在靠近邦迪管一侧的焊缝界面处固溶体组织连续分布。固溶体组织具有良好的强度和塑性,这有利于提高接头性能。靠近低碳钢套管一侧界面处颗粒相对分散,焊缝与套管一侧的界面为非平直界面,这表明该侧界面钎料中元素的扩散和母材中元素向钎料的溶解程度高于另一侧界面。

焊缝中心区以白色细小的共晶体颗粒为主,也存在部分长径比较大的颗粒,共晶颗粒弥散分布于连续的灰色相中,结合体系成分及配比,分析认为该组织主要为 Ni+Ni<sub>3</sub>P。焊缝与两侧母材的界面处共晶体颗粒减少。在钎焊过程中,钎料中的元素扩散到母材,而靠近母材的焊缝区,扩散路程短,各元素扩散比例较焊缝中心高,因此,该区域共晶体颗粒含量少或无,以固溶体颗粒为主。

#### 4 结 语

采用 Ni 基钎料(Ni-P-Cu)代替 Ag 基钎料,氮气保护炉中钎焊工艺可实现邦迪管/低碳钢管接头的焊接,且焊缝成形性好、致密饱满。钎料与基体呈冶金结合,靠近两侧基材为粗大的固溶体组织,焊缝中心区主要为细小的 Ni-P 共晶体颗粒均匀分布在 Ni 固溶体中。邦迪管外侧的镀铜层 Cu 元素相对熔点较低,与液态钎料中的 Ni 原子互扩散形成连续分布的固溶体组织,实现了钎料向母材的扩散和母材向钎料的溶解;低碳钢套管一侧以钎料中 Ni 原子向母材的扩散为主。

#### 参考文献:

- [1] 游德勇,高向东. 激光焊接技术的研究现状与展望[J]. 焊接技术,2008(4):5-9.
- [2] 王海燕,陈强,孙振国,等. 等离子焊接熔池小孔尺寸的电弧信号检测[J]. 焊接学报,2000,21(3):24-26.
- [3] 宋建岭,林三宝,杨春利. 镍基合金/不锈钢 TIG 熔-钎焊工艺的研究[J]. 焊接,2008(5):37-40,71.
- [4] 高莹,李德富,胡捷. TB2 钛合金/不锈钢钎焊钎料及真空钎焊工艺的试验研究[J]. 热加工工艺,2007,36(15):22-24.
- [5] 李卓然,矫宁,冯吉才,等. 合金元素对 AgCuZn 系钎料合金组织与性能的影响[J]. 焊接学报,2008,29(3):65-68,156.
- [6] 薛松柏. 铜基与银基钎料用膏状钎剂的研究[J]. 焊接,1995(9):7-10.
- [7] 王轶,马光,郑晶,等. 镍基钎料钎焊不锈钢的钎缝组织及工艺的研究[J]. 热加工工艺,2008,37(23):93-95.
- [8] Zaharinie T, Yusof F, Hamdi M, et al. Effect of brazing temperature on the shear strength of inconel 600 joint[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73(5/6/7/8):1133-1140.