

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.05.030

采用 BNi-2 钎料真空钎焊 0Cr18Ni9 不锈钢管材

杨敏旋¹, 贾振东¹, 蔺晓超¹, 刘春风², 张杰², 冯聪²

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

摘要: 针对实际应用中常需要获得异型接头这一目的, 采用 BNi82CrSiB (BNi-2) 钎料钎焊套接 0Cr18Ni9 不锈钢管材, 研究了冷却方式、钎焊温度、保温时间和装配间隙对接头组织结构和力学性能的影响。结果表明: 管材套接的特殊结构, 填缝间隙对接头影响较大, 当间隙过小为 5~10 μm 时, 易出现填缝不足导致无法形成完整接头, 接头强度下降; 但间隙过大为 250~300 μm, 钎缝中形成大量脆性相并产生微裂纹; 冷却方式对组织影响较小, 但 15 °C/min 的冷却速度所得接头强度较低; 钎焊温度升高或保温时间延长, 最大间隙值增大, 母材出现溶蚀, 性能影响较小。钎焊温度为 1 050 °C, 保温时间为 10 min, 装配间隙为 20~50 μm, 随炉冷却所得钎焊接头显微组织结构中未出现共晶组织和金属间化合物, 接头性能最高。

关键词: 0Cr18Ni9 管; BNi-2; 真空钎焊; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG454

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2016)05-0184-05

Vacuum brazing 0Cr18Ni9 stainless steel pipe to itself with BNi-2 filler alloy

YANG Minxuan¹, JIA Zhendong¹, LIN Xiaochao¹, LIU Chunfeng², ZHANG Jie², FENG Cong²

(1. Beijing Power Machinery Institute, 10074 Beijing, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

Abstract: Focused on the application of special-shaped joints, 0Cr18Ni9 stainless steel pipes were brazed using BNi82CrSiB (BNi-2) as filler alloy to form a bell and spigot joint. Influences of cooling-down velocity, brazing temperature, holding time and fit-up gap on the microstructure and mechanical property of joints were investigated. Results indicated that the fit-up gap had a great effect on the joints due to the special structure of pipe joints, when the width of gap is only 5~10 μm, it is difficult to fill the lap to form a complete joint and the strength of joints is low, but if the gap is too large up to 250~300 μm, large amounts of brittle phases formed in the brazing seam as well as micro-cracks. Cooling velocity almost made no difference on the microstructure, while the joints cooled at 15 °C/min present lower strength than that furnace cooled. Increasing brazing temperature or prolonging holding time, the maximum gap increases and erosion of the matrix can be observed, but both parameters have few effects on mechanical property. When the two pipes with the fit-up gap of 20~50 μm were brazed at 1 050 °C for 10 min and furnace cooled, no eutectic phases and intermetallics appeared in the seam, and the strength of the joint reached the maximum.

Keywords: 0Cr18Ni9 pipe; BNi-2; vacuum brazing; microstructure; mechanical property

不锈钢钎焊技术广泛应用于航空航天、电子通讯、机械、能源等领域, 如蜂窝结构、火箭发动机燃烧室、换热器等^[1]。经长期研究与发展, 不锈钢钎焊中的诸多问题已基本解决, 包括不锈钢表面氧化膜去除^[2], 钎料的润湿和铺展^[3], 工艺参数对母材和接头性能的影响等^[4-5]。其中, 0Cr18Ni9 钢作为广泛使用的奥氏体不锈钢, 具有良好的冷、热加工性能, 良好的低温强度、抗晶间腐蚀性、耐热性, 良好的可

焊性, 焊后不易产生刀口状腐蚀, 采用合适的焊接工艺, 就容易得到优良的焊接接头。在众多钎料中, 镍基钎料通常应用在高温工作的部件的钎焊连接中, 其中 BNi-2 钎料 (BNi82CrSiB) 有很强的润湿性和较低的液相温度, 熔化温度间隔小, 具有良好的流动性, 与母材的作用较弱, 适合钎焊较薄的工件^[6-8]。此外, 针对实际应用, 常常需要获得异型接头, 如管材套接接头等, 而这方面的报道不多。因此, 本文选用 BNi-2 钎料粉末钎焊 0Cr18Ni9 管材, 研究冷却方式、钎焊温度、保温时间和装配间隙等工艺参数对钎焊接头的界面组织结构及力学性能的影响, 并对接头进行打压和气密性试验。

收稿日期: 2015-3-17.

作者简介: 杨敏旋 (1981-), 女, 博士, 高级工程师;

张杰 (1963-), 女, 教授, 博士生导师.

通信作者: 刘春风, lcfeng@hit.edu.cn.

1 试验

采用0Cr18Ni9不锈钢管为待接母材,粒度150目的BNi82CrSiB(BNi-2)粉末为钎料,分别将 $\phi 15 \times 60 \text{ mm}^2$ 热轧圆钢与 $\phi 10 \times 1 \times 80 \text{ mm}^3$ 冷拔钢管、 $\phi 15 \times 13 \text{ mm}^2$ 冷轧圆钢与 $\phi 10 \times 1 \times 20 \text{ mm}^3$ 冷拔钢管套接作为力学性能和组织试样见图1.钎焊前,将打磨好的待接样放置在丙酮中超声波清洗10 min后取出吹干,将内管与外管按图1套接,并将混有粘结

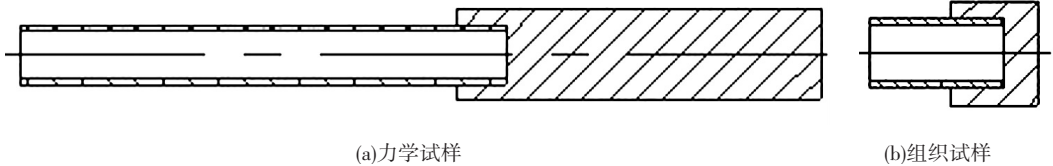


图1 待接件装配示意

剂将钎焊后的组织样品沿垂直于钎缝面的方向切开,用砂纸打磨平整后使用 $0.5 \mu\text{m}$ 的金刚石抛光剂抛亮,然后在OLYMPUS PEM-3金相显微镜下观察钎焊接头形貌,并使用FEI Quanta 200F型扫描电镜观察接头组织(背散射电子成像),并采用EDS能谱仪分析接头各相成分.利用Instron5569万能试验机对套接管材样品进行拉伸测试,分析接头的力学性能.

2 结果与分析

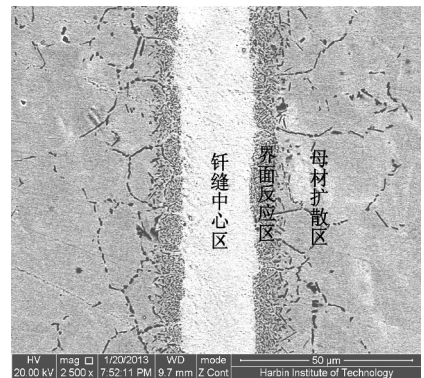
2.1 冷却方式对接头组织结构的影响

钎焊温度 $1050 \text{ }^\circ\text{C}$,保温10 min,间隙 $20 \sim 50 \mu\text{m}$,分别以 $15 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 冷至 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 后随炉冷和 $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ 保温后直接随炉冷所得钎焊接头的界面组织结构相同(见图2),均由3个区域组成:母材扩散区、钎缝界面反应区和钎缝中心等凝固区.母材扩散区由钎料中的B和少量Si向母材扩散而成,其中B原子直径小,主要表现为晶间渗入,分布在母材晶界处,扩散速度快,在整个接头分布都较均匀;Si原子直径大,主要表现为晶内扩散,扩散速度慢,因此该区域主要为扩散原子沿母材晶界的移动与累积^[9].

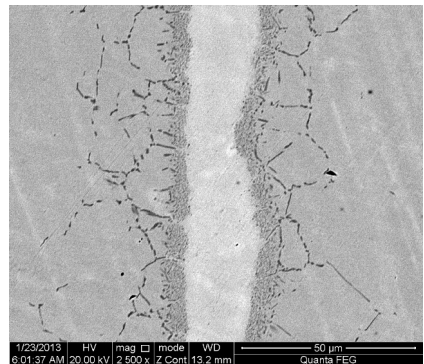
而钎缝界面反应区则由母材向钎料溶解冷却后生成,主要是固溶体和金属间化合物.钎缝区的EDS分析结果 $75\text{Ni}, 6.70\text{Fe}, 5.93\text{Cr}, 12.37\text{Si}$ (at.%),可知钎缝中心区是主要由Ni, Cr, Si等互溶而成的Ni基固溶体组织,没有生成脆性共晶组织或金属间化合物,说明等温凝固过程满足固溶体均匀从界面向钎缝中心区生长,使整个钎缝区均由固溶体构成,此接头即微结构观察角度的“理想接头”.由钎焊接头界面组织结构分析可知两种冷却方式均可采用,结合接头的性能(2.5中详述)及设备利用率,后续研究

剂的BNi2钎料粉末涂抹接口处.然后将装配好的待接试样水平放置在VAF-30型真空钎焊炉中进行钎焊.首先以 $15 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温至 $450 \text{ }^\circ\text{C}$,保温30 min,以使钎料中的粘结剂完全挥发,再以 $20 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温至 $900 \text{ }^\circ\text{C}$,保温30 min,使试样受热均匀,之后以 $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速度升温至钎焊温度,保温要求时间,最后以 $15 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 速度冷却或随炉冷却,钎焊时的真空度为 $6 \times 10^{-3} \text{ Pa}$.

均选定随炉冷却方式.



(a) $15 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 速度冷却



(b) 随炉冷却

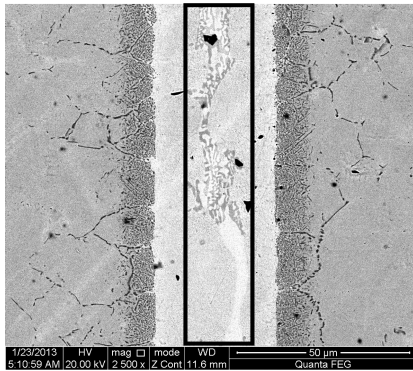
图2 $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ 保温10 min后以不同速度冷却后的接头照片

2.2 钎焊温度对接头组织结构的影响

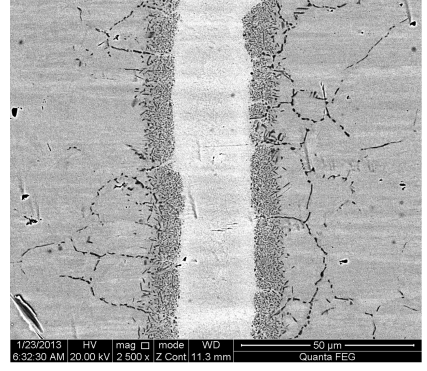
图3为不同钎焊温度下保温10 min,装配间隙 $20 \sim 50 \mu\text{m}$ 钎焊接头的界面组织照片.从中可见,当钎焊温度为 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,钎缝中心区出现大块状的金属间化合物和共晶组织.这是钎焊温度过低,不利于钎缝中的低熔点元素向两侧母材扩散造成的,对比图3中各钎缝两侧母材中的晶间渗入程度也可证实.当钎焊温度升至 1020 和 $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,钎缝中心区的金属间化合物和共晶组织逐渐消失.

当钎焊温度升至 1 100 ℃ 时,钎缝中心区除灰色区域 B 外,还出现灰白色带状区域 A,见图 3(d). EDS 能谱分析显示,A 区主要元素为 Ni,只含少量 Cr 元素,不含 Si 元素,B 区则 Ni、Cr、Si 元素均存在.这也再次证明钎焊温度的升高,利于钎缝内的元素向母材两侧扩散,即使是只发生晶内扩散的 Si 元素.同时,随钎焊温度升高,母材两侧向钎料的溶解扩散量增大,母材与钎缝界面处易出现溶蚀缺陷,见图 3(d).而且,当钎焊温度超过 1 100 ℃ 时,母材不

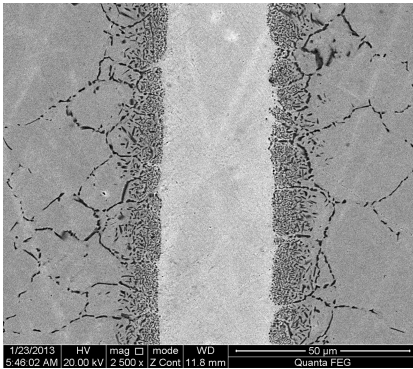
锈钢的晶粒长大剧烈,使母材性能大幅降低.另外,对比图 3 所示不同钎焊温度下钎缝不出现脆性相的间隙值,即最大间隙值(MBC),可知钎焊温度不高于 1 020 ℃ 时,MBC ≈ 20 μm;钎焊温度为 1050 ℃ 时,MBC ≈ 30 μm;钎焊温度为 1100 ℃ 时,MBC ≈ 60 μm.由此可见,随钎焊温度升高,最大间隙值增大.但为避免因钎焊温度过高引起的母材溶蚀,最终选定钎焊温度 1 050 ℃ 进行其它参数的试验.



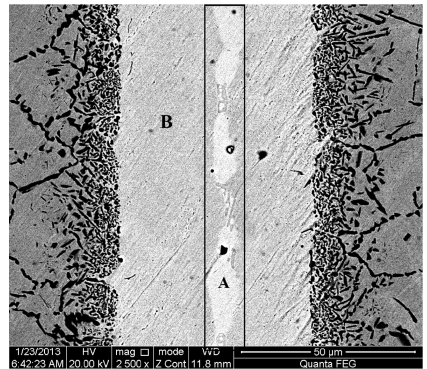
(a) 1 000 ℃



(b) 1 020 ℃



(c) 1 050 ℃



(d) 1 100 ℃

图 3 不同钎焊温度保温 10 min 所得接头界面组织

2.3 保温时间对接头组织结构的影响

图 4 为钎焊温度 1 050 ℃,保温时间分别为 30 和 60 min,装配间隙 20~50 μm 的钎焊接头界面组织照片.由图 4 和图 3(c)可看出,保温时间延长引起的钎焊接头界面组织结构变化趋势与随钎焊温度升高产生的变化趋势一致.随保温时间延长,钎缝中元素向母材扩散量增大,钎缝组织成分更加均匀,最大钎缝间隙增大,当保温时间 60 min 时,MBC ≈ 70 μm.然而,这也说明保温时间延长,母材向钎料溶解量增大,钎缝宽度逐渐增大,最终导致钎缝界面反应区产生溶蚀.

2.4 装配间隙对接头组织结构的影响

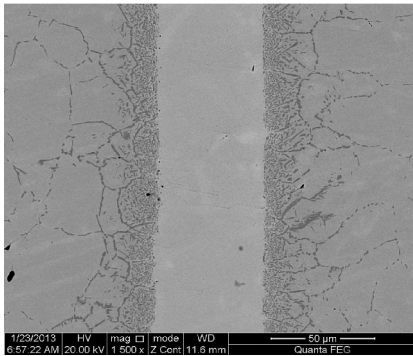
BNi-2 钎料对 0Cr18Ni9 不锈钢的填缝能力试验表明其最大填缝间隙可达 1.5 mm,但实际上钎缝

间隙的大小对母材的溶蚀、组织以及接头性能都有很大影响.

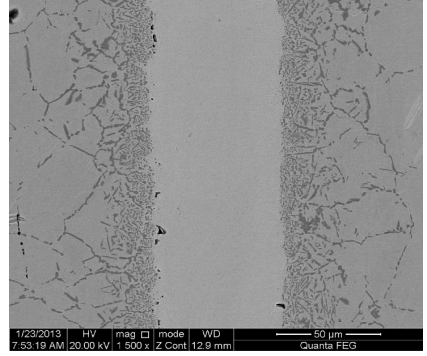
图 5 显示了钎焊温度 1 050 ℃,保温时间 10 min,装配间隙分别为 5~10 μm 和 250~300 μm 钎焊接头显微组织.当装配间隙为 5~10 μm 时,见图 5(a)和(b),管的装配插接需借助外力完成,而在外力作用下引起的装配间隙不均匀,使得最终无法保证钎料填满整个间隙.当钎料能较好地填缝时,其钎缝组织结构见图 5(a),钎缝中心区由 Ni 基固溶体组成,接头组织理想.但当钎料无法填缝时,见图 5(b),则无法形成致密完整的钎缝,钎缝中挤满装配时产生的母材碎屑.适当增大装配间隙至 20~50 μm 时,能形成良好的接头,如图 3、4 所示.进一步增大装配间隙达到 250~300 μm 时,接头组织如图 5(c)和(d)所

示. 不同于装配间隙 $5\sim 10\ \mu\text{m}$ 和 $20\sim 50\ \mu\text{m}$ 时的钎焊接头界面组织结构, 在装配间隙为 $250\sim 300\ \mu\text{m}$ 的接头中 (见图 5(c)), 靠近母材处生成连续相 (A), 钎缝中心处生成大量灰白色网状相 (B) 和黑色块状相 (C), 并且在钎缝中出现大量微裂纹, 这与金属间化合物或共晶组织等脆性相在钎缝中形成有

关. 结合 Ni-Cr-Si 和 Ni-Cr-B 三元相图对 A、B 和 C 相进行 EDS 能谱分析, 结果见表 1, 这些相也通常形成于其他不锈钢接头中^[10]. 由此可见, 钎焊过程选择合理的装配间隙并控制, 对提高钎焊质量至关重要.

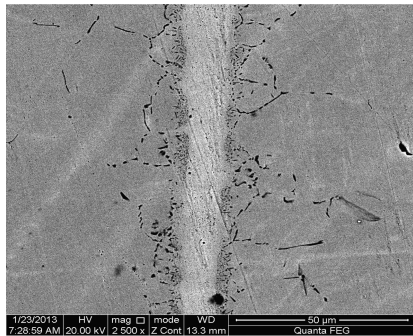


(a) 30 min

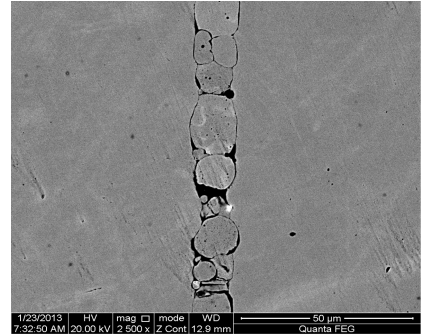


(b) 60 min

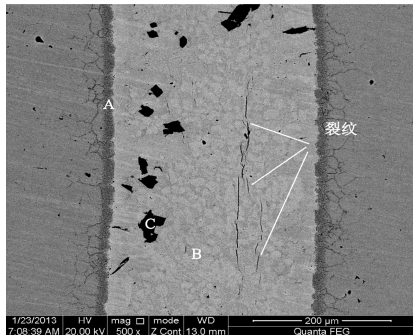
图 4 保温不同时间所得钎焊接头界面组织



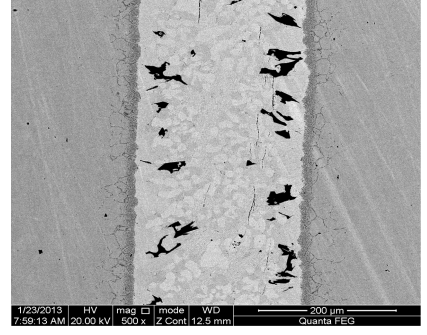
(a) $5\sim 10\ \mu\text{m}$



(b) $5\sim 10\ \mu\text{m}$



(c) $250\sim 300\ \mu\text{m}$



(d) $250\sim 300\ \mu\text{m}$

图 5 不同间隙的钎焊接头界面组织

表 1 装配间隙为 $250\sim 300\ \mu\text{m}$ 的接头内不同位置处的元素含量

位置	Ni	Cr	Si	B	Fe	可能相
A	73.28	7.06	10.03	—	9.63	Ni(Cr/Si) 固溶体
B	70.31	1.44	27.04	—	1.21	Ni_3Si
C	20.76	57.06	0.61	20.69	0.88	$\text{CrB}+\text{CrNi}$

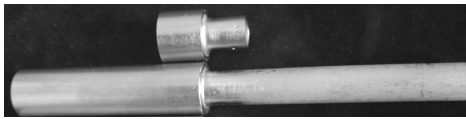
2.5 钎焊工艺参数对接头力学性能的影响

钎焊接头的力学性能与其接头的界面组织结构密切相关, 钎缝中是否仅含固溶体对接头性能影响

很大^[11]. 表 2 列出不同钎焊工艺下所得接头试样的抗拉强度, 可看出, 接头抗拉强度受焊后冷却方式、钎焊温度和保温时间的影响并不明显, 而且断裂位置均发生在两钢管连接端部及钎角结合处, 见图 6(b). 这是因为 BNi-2 钎料与 0Cr18Ni9 不锈钢母材的力学性能不匹配, 在钎焊接头中产生较大残余应力, 钎角处应力集中且状态复杂, 故成为最薄弱环节, 最终断裂发生在此处^[12]. 只是当钎焊温度为 $1\ 100\ \text{℃}$ 和采用小间隙钎焊时, 钎焊接头的抗拉强

度较低. 钎焊接头抗拉强度与其组织结构变化一致, 间隙过小时, 接头中未钎着率较大, 且钎缝较薄, 加工硬化严重, 变形困难, 残余应力难以释放, 从而导致接头抗拉强度减小. 钎焊温度过高时, 一方面接头界面反应区出现溶蚀缺陷, 另一方面在 1 100 ℃ 时母材晶粒发生长大, 性能恶化, 从而也导致钎焊接头抗拉强度降低.

另外, 为验证试验件的接头强度是否满足实际需要, 对套接管材进行打压和气密性试验. 分别经 4 MPa 水压和 2 MPa 气压保压 5 min, 钎焊接头均满足使用强度. 进一步对接头进行 30 MPa 的水压试验, 保压 20 min 后发现钎焊接头仍完好. 表明各种工艺参数下的 20~50 μm 装配间隙得到的钎焊接头强度和密封性均能满足使用要求. 而 250~300 μm 间隙的接头因为微裂纹的存在可能会影响其长期使用性能.



(a) 原始接头试样



(b) 断裂后样品形貌

图 6 钎焊接头及断裂后实物图

表 2 不同钎焊工艺参数的接头抗拉强度

冷却方式	钎焊温度/℃	保温时间/min	装配间隙/μm	抗弯强度/MPa
15 ℃/min	1 050	10	20~50	1 143.5 ± 2.3
随炉冷	1 050	10	20~50	1 465.4 ± 3.0
随炉冷	1 000	10	20~50	1 460.3 ± 1.7
随炉冷	1 020	10	20~50	1 443.4 ± 4.3
随炉冷	1 100	10	20~50	1 381.1 ± 0.6
随炉冷	1 050	30	20~50	1 431.6 ± 3.0
随炉冷	1 050	60	20~50	1 448.5 ± 3.0
随炉冷	1 050	10	5~10	1 263.2 ± 0.5
随炉冷	1 050	10	250~300	1 494.0 ± 1.7

3 结 论

1) 钎焊温度升高, 有利于钎缝内的元素向母材两侧扩散, 但钎焊温度过高达到 1 100 ℃ 时, 易引起母材向钎料大量溶蚀. 保温时间延长可增大钎缝最大间隙, 不至因钎缝过宽产生裂纹, 但保温时间过长

易引起母材向钎料的溶蚀. 冷却速度对接头组织影响不大.

2) 装配间隙对于管套接接头的影响较大, 当间隙小于 10 μm 时, 无法保证钎料充分填满间隙, 装配间隙大于 250 μm 时, 钎缝内出现裂纹和大量脆性相.

3) BNi-2 钎焊 0Cr18Ni9 不锈钢管最佳工艺: 装配间隙 20~50 μm、1 050 ℃ 保温 10 min 随炉冷却.

参 考 文 献

- [1] 张洪涛, 陈怀宁, 吴昌忠, 等. 不锈钢及其板翅结构式换热器钎焊技术[J]. 宇航材料工艺, 2005, 35(4): 12-18.
- [2] 何鹏, 郑岩松, 李军, 等. 不锈钢低真空加热过程去膜机理分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(8): 93-96, 117, 118.
- [3] OU C L, SHIUE R K. Microstructural evolution of brazing 422 stainless steel using the BNi-3 braze alloy [J]. Journal of Materials Science, 2003, 38(11): 2337-2346.
- [4] JIANG W C, GONG J M, TU S T. Effect of holding time on vacuum brazing for a stainless steel plate-fin structure [J]. Materials and Design, 2010, 31: 2157-2162.
- [5] CHEN W S, SHIUE R K. Microstructural evolution of brazing 304 stainless steel using an amorphous (Ni, Fe)-based foil [J]. ISIJ International, 2012, 52(5): 939-941.
- [6] YU Z S, SHI K, YAN Z, et al. Microstructure evolution during vacuum brazing of 316L stainless steel using nickel-based filler metal [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(S2): 342-346.
- [7] OU C L, LIAW D W, DU Y C, et al. Brazing of 422 stainless steel using the AWS classification BNi-2 braze alloy [J]. Journal of Materials Science, 2006, 44: 6353-6361.
- [8] ROY R K, BAPRI H, PANDA A K, et al. Development of high strength stainless steel brazed joints using rapidly solidified filler alloys [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2013, 18(3): 216-221.
- [9] 竺国荣, 陈虎, 祝金丹, 等. SS304/BNi-2/SS304 高温钎焊对接接头微观结构特征[J]. 焊接技术, 2011, 40(6): 4-9.
- [10] 张启运, 庄鸿寿. 钎焊手册[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [11] PHILIPS N R, LEVI C G, EVANS A G. Mechanisms of microstructure evolution in an austenitic stainless steel bond generated using a quaternary braze alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2007, 39(1): 142-149.
- [12] 蒋文春, 巩建鸣, 陈虎, 等. 不锈钢板翅结构钎焊残余应力及其影响因素[J]. 金属学报, 2008, 44(1): 105-111.

(编辑 王小唯 苗秀芝)