

钎焊温度对 BNi-2 非晶钎料钎焊 1Cr18Ni9Ti 不锈钢 组织和性能的影响

田晓羽¹, 张志伟¹, 周晨¹, 赵连清¹, 田洋光¹, 付伟², 宋晓国^{2,3}

(1. 北京控制工程研究所, 北京, 100190; 2. 哈尔滨工业大学 材料结构精密焊接与连接全国重点实验室, 哈尔滨, 150001;
3. 山东船舶技术研究院, 威海, 264209)

摘要: 采用 BNi-2 非晶钎料成功钎焊了 1Cr18Ni9Ti 不锈钢, 通过扫描电子显微镜及能谱仪对不同钎焊温度下钎焊接头的界面微观组织进行了表征及分析, 并对钎焊接头的抗剪强度进行了测试, 探究了钎焊温度对接头界面组织及力学性能的影响。结果表明钎焊接头的界面微观组织从钎缝中心到母材可以被分为 3 个区域, 钎焊温度为 1050 °C 时钎缝区主要为 Ni 基固溶体 + Cr-B 相, 扩散区分布有 Fe-Ni 固溶体及细小条状的 σ -FeCr 相, 晶间渗入区中奥氏体晶间处分布着 σ -FeCr 相及 Cr-B 相。随着钎焊温度的升高, B 元素扩散速度不断加快, Cr-B 相的晶间渗入程度加剧; 钎缝中心的块状 Cr-B 相逐渐减小直至 1150 °C 时消失, 钎缝区组织均匀化。在温度的作用下, 钎缝宽度呈现先减小后增大的趋势。而接头的抗剪强度呈先上升后下降的趋势; 最大抗剪强度出现在 1050 °C 时, 约 265 MPa; 而接头的断裂形式主要以韧性断裂为主。利用阿伦尼乌斯方程得到了 B 原子的扩散活化能为 $8.18 \times 10^4 \times n \text{ J/mol}$, n 为时间指数。

创新点: (1) 采用非晶 BNi-2 钎料实现了 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的钎焊连接, 获得了良好的钎焊接头。

(2) 研究了钎焊温度对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢接头微观组织和力学性能的影响。

(3) 计算了 B 元素在 1Cr18Ni9Ti 中的扩散活化能。

关键词: 钎焊; 非晶钎料; 微观组织; 不锈钢; 扩散激活能

中图分类号: TG 454 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20230620001

Effect of brazing temperature on microstructure and properties of 1Cr18Ni9Ti stainless steel brazed by amorphous BNi-2 filler

TIAN Xiaoyu¹, ZHANG Zhiwei¹, ZHOU Chen¹, ZHAO Lianqing¹,
TIAN Yangguang¹, FU Wei², SONG Xiaoguo^{2,3}

(1. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing, 100190, China; 2. National Key Laboratory of Precision Welding & Joining of Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China; 3. Shandong Institute of Shipbuilding Technology, Weihai, 264209, China)

Abstract: 1Cr18Ni9Ti stainless steel was successfully brazed with BNi-2 amorphous filler. The interfacial microstructure of brazed joints at different brazing temperatures was characterized and analysed by scanning electron microscope and energy dispersive spectrometer, and the shear strength of brazed joints was tested. The effect of brazing temperatures on the interfacial microstructure and mechanical properties of the joints was investigated. The results showed that the interfacial microstructure of brazed joints could be divided into three regions from the brazing seam centre to the base material, when the brazing temperature was 1050 °C, the brazing seam region was mainly Ni-based solid solutions + Cr-B phases; the diffusion region was distributed with Fe-Ni solid solution and fine strips of σ -FeCr phase; and in the intergranular infiltration region, the austenite grain boundaries were distributed with the σ -FeCr phases and the Cr-B phases. As the brazing temperature increased, the diffusion rate of B element was accelerated and the intergranular infiltration of Cr-B phases was intensified; the massive Cr-B phases in the centre of the braze were gradually

reduced until they disappeared at 1150 °C, and the microstructure of the braze area was homogenised. Under the effect of temperature, the width of the brazed joints showed a tendency to decrease and then increase. And the shear strength of the joints showed a tendency of increasing and then decreasing; the maximum shear strength appeared at 1050 °C, about 265 MPa; and the fracture form of the joints was mainly dominated by ductile fracture. Using the Arrhenius equation the diffusion activation energy of the B atom was obtained as $8.18 \times 10^4 \times n$ J/mol, with n being the time index.

Highlights: (1) The brazed joints of 1Cr18Ni9Ti stainless steel were realized by using amorphous BNi-2 brazing material, and good brazed joints were obtained.

(2) The effect of brazing temperature on the microstructure and mechanical properties of 1Cr18Ni9Ti stainless steel joints was investigated.

(3) The diffusion activation energy of B element in 1Cr18Ni9Ti was calculated.

Key words: brazing; amorphous filler; microstructure; stainless steel; diffusion activation energy

0 序言

由于其高强度、良好的抗氧化性和耐腐蚀性, 不锈钢被广泛应用于能源、核电和化工等领域^[1-3]. 随着工业技术的快速发展, 为满足多元化的应用要求, 焊接技术被广泛用于制造复杂的不锈钢结构件, 如堆芯板、热交换器和航空发动机管路等^[4-6]. 传统的熔化焊热输入高, 会产生较大的热影响区, 降低母材力学性能. 钎焊是将母材和钎料 (低于母材的熔点) 一起加热到钎料的熔化温度, 通过液态钎料填充缝隙, 润湿被连接面并与之发生反应, 使母材连接在一起的焊接方法; 其对母材的性能影响较小, 适合于复杂细小结构件的连接^[7-8]. 关于不锈钢的钎焊已被广泛研究, Cu 基、Ag 基、Mn 基和 Ni 基钎料是钎焊不锈钢时常用的填充合金^[9]. 在这些钎料中, Ni 基钎料主要用于高温和耐腐蚀性的环境. 但其熔点较高, 为降低钎焊温度, 通常添加低熔点元素, 如 B 元素等. 研究表明, 元素的扩散与钎焊接头的强度有很大关系^[10].

Chen 等人^[11] 使用 Mn 基钎料钎焊了 1Cr18Ni9Ti 和 1Cr21Ni5Ti 不锈钢. 结果表明, 母材与钎料的化学反应形成了良好的界面结合. 然而 Mn 元素和 Cr 元素的扩散对接头质量有显著影响, 对两种元素在不锈钢中的扩散行为进行了分析, 说明了其对接头性能的影响规律. B 元素作为镍基钎料常用的降

熔元素, 其在奥氏体晶界的渗透能力较强, 易形成 Cr-B 析出物, 可能降低接头性能^[12]. 因此, 有必要研究 Cr-B 化合物对接头的影响规律, 及 B 原子在钎焊过程中的扩散行为.

采用 1Cr18Ni9Ti 不锈钢作为研究对象, 采用 BNi-2 非晶钎料对其进行真空钎焊. 对接头界面微观组织进行分析, 探究不同钎焊温度下钎焊接头微观组织和力学性能的演变规律. 依据阿伦尼乌斯方程, 计算了 B 原子在 1Cr18Ni9Ti 中的扩散活化能.

1 试验方法

试验采用的母材是 1Cr18Ni9Ti 不锈钢, 其化学成分如表 1 所示. 试验前, 使用线切割机将母材加工成 3 mm × 3 mm × 3 mm 和 20 mm × 10 mm × 3 mm 的块状试样. 箔状 BNi-2 非晶钎料尺寸为 4 mm × 4 mm × 0.05 mm, 其化学成分如表 2 所示. 在试验前, 依次采用 180 号 ~ 1200 号的 SiC 砂纸对试样表面进行打磨以去除氧化膜, 随后使用无水乙醇超声清洗 10 min 并风干. 钎焊装配及剪切试验装配示意图如图 1 所示, 试样按图 1(a) 所示进行装配. 设定钎焊温度为 1000 ~ 1150 °C, 保温时间为 10 min. 首先以 20 °C/min 的速率升至 900 °C, 保温 10 min 后以 10 °C/min 的速率升至钎焊温度, 经 10 min 保温后以 5 °C/min 的速率降至室温.

采用场发射扫描电子显微镜 (scanning electron

表 1 1Cr18Ni9Ti 不锈钢成分 (质量分数, %)
Table 1 Composition of 1Cr18Ni9Ti stainless steel

C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S	Fe
< 0.15	17 ~ 19	8 ~ 10	< 2.00	< 1	< 0.03	< 0.03	余量

表 2 BNi-2 非晶钎料成分 (质量分数, %)

Table 2 Composition of amorphous BNi-2 brazing alloy

Cr	Si	B	Fe	Ni
6.0~8.0	2.75~3.50	4.0~4.5	2.5~3.5	余量

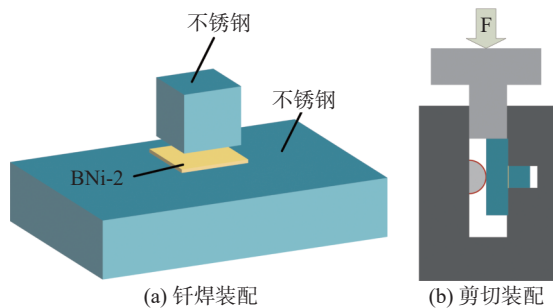


图 1 钎焊装配及剪切试验装配示意图

Fig. 1 Schematic diagram of brazing and shear test assembly. (a) brazing assembly; (b) shear test assembly

microscope, SEM) 分析钎焊接头的微观组织, 并利用能谱仪 (energy dispersive spectrometer, EDS) 分析其元素组成. 采用 Instron Model15967 电子万能试验机进行压剪测试, 示意图如图 1(b) 所示, 加载速率为 0.5mm/min, 且每个参数将取 5 个接头进行测试取平均值. 剪切测试完成后使用 SEM 对断口

形貌进行观察及分析.

2 试验结果与分析

2.1 钎焊接头组织分析

1050 °C 保温 10 min 条件下获得钎焊接头的显微组织以及元素分布如图 2 所示, 从图 2(a) 可以看出, 钎缝接头微观组织致密且连续, 没有出现明显的孔洞或裂纹缺陷. 图 2(b) 和图 2(c) 表明, 钎缝中的主要元素为 Ni、Si, 并向两侧母材中扩散, 钎缝中的块状黑色相为贫 Ni、Si 相. 由图 2(d) 可以观察到, 钎缝中的 Cr 元素主要聚集在块状黑色相中; 对于母材而言, 本身含有一定量的 Cr 元素, 焊后在靠近钎缝处的奥氏体晶界处出现 Cr 元素富集. 图 2(e) 和图 2(f) 表明, 部分 Fe 元素、Mn 元素从母材向钎缝内溶解, 同时可以观察到靠近钎缝区域的基体晶界处, Fe 元素含量相对较少. 根据元素分布结果可以初步推断, 钎缝的基体相为含 Si 元素的富 Ni 相; 钎缝中不连续的大块黑色相为 Cr 化合物; 钎缝和母材相邻的区域, 由于钎料扩散及母材溶解, Fe 元素和 Ni 元素发生了冶金反应; Cr 化合物也存在于奥氏体晶界处.

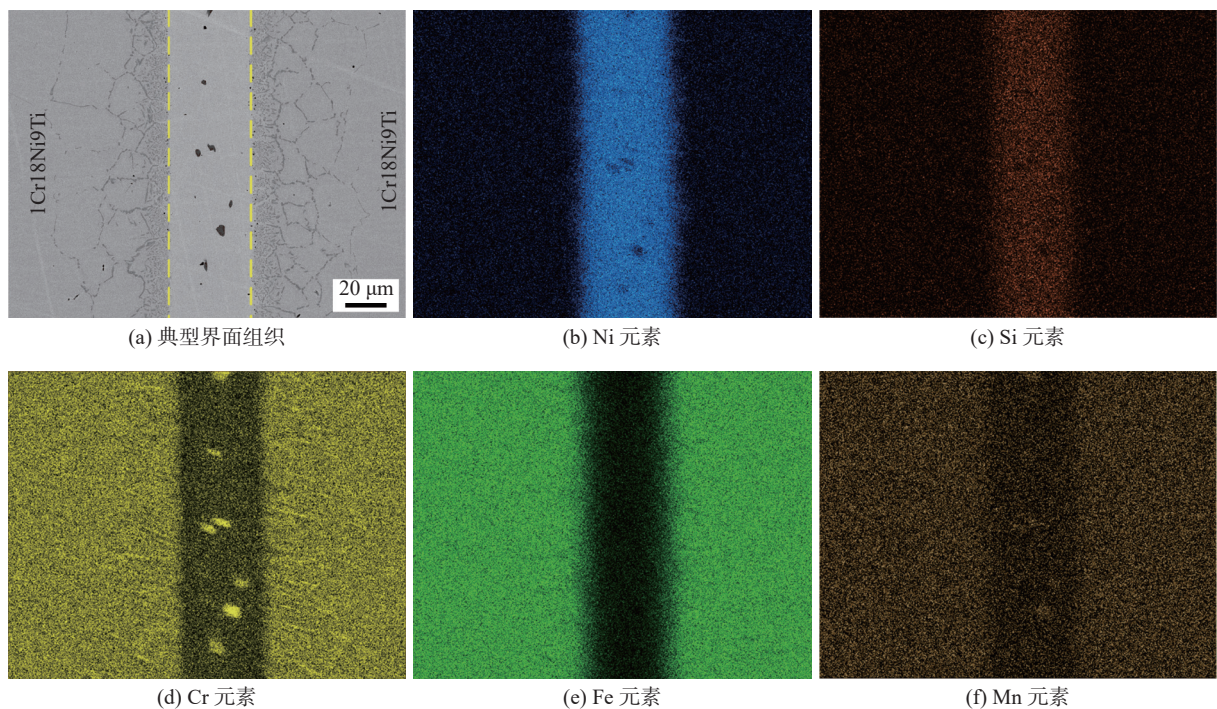


图 2 典型接头微观组织及面扫描结果

Fig. 2 Typical microstructure and map scanning results of the joint. (a) typical interface microstructure; (b) Ni element; (c) Si element; (d) Cr element; (e) Fe element; (f) Mn element

进一步对钎焊接头进行物相观察, 如图 3 所示, 并对物相进行成分分析, 图中标记点的元素组

成如表 3 所示. 依据组织结构的不同, 接头可以划分为 3 个区域: 钎缝区 (I 区)、扩散区 (II 区) 以及晶间渗入区 (III 区). 在 I 区中, 点 C 为浅灰色基体相, 点 D 为基体中分布的不连续的块状黑色相; 在 II 区中, 点 F 为扩散区基体相, 点 E 为黑色颗粒相, 点 G 为大量细小弥散的深灰色析出相; 而在 III 区中, 点 A 为 1Cr18Ni9Ti 母材, 点 B 为沿 1Cr18Ni9Ti 母材晶界分布的深灰色相. 由表 3 中的 EDS 结果可知, 沿奥氏体晶界析出的深灰色相中 Cr 元素含量较高, 根据文献 [12] 报道, 点 B 为 σ -FeCr 及 Cr-B 相. 而块状及颗粒黑色相含较高的 Cr 元素, 结合文献 [12-13] 可知点 D 及点 E 均为 Cr-B 相; 钎缝的基体相含有大量的 Ni, 表明点 C 为 Ni 基固溶体. 在扩散区与钎缝区界面处的点 F, Fe 元素的含量高于钎缝, 因此推测点 F 为 Fe-Ni 固溶体^[14]. 扩散区

分布的细小深灰色相主要由 Fe 元素、Cr 元素和 Ni 元素组成, 因此点 G 为 σ -FeCr 相^[14].

表 3 图 3 中标记点成分及可能相 (原子分数, %)
Table 3 Chemical composition and possible phases of spots marked in Fig. 3

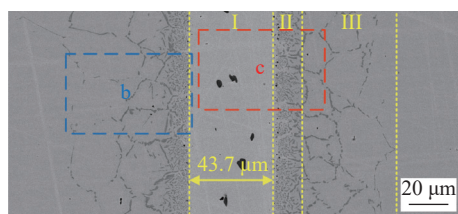
位置	Cr	Mn	Fe	Ni	Si	可能相
A	19.49	1.35	70.64	7.44	1.08	1Cr18Ni9Ti
B	22.12	1.59	67.69	7.56	1.04	σ -FeCr + CrB
C	9.33	0.54	8.65	71.86	9.62	Ni 基固溶体
D	94.50	—	0.58	3.98	0.94	Cr-B
E	19.94	0.53	34.01	43.69	1.83	Cr-B
F	12.94	1.04	36.72	45.62	3.68	Fe-Ni 固溶体
G	17.96	1.29	68.39	11.11	1.25	σ -FeCr

2.2 钎焊温度对接头微观组织的影响

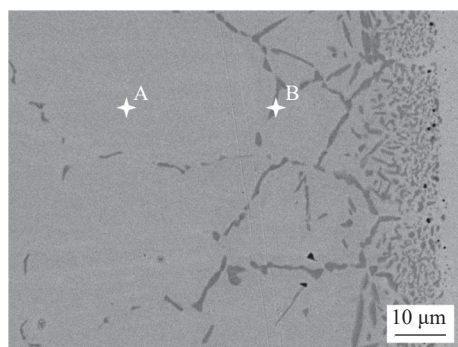
在不同钎焊温度下保温 10 min 获得的钎焊接头 SEM 照片如图 4 所示. 可以观察到, 在不同钎焊温度下, 均得到了可靠的钎焊接头, 界面处未发现裂纹、孔洞和未焊合等缺陷. 随钎焊温度的升高, 钎缝宽度呈现出先减小后增加的趋势; 由于温度的升高, 钎料流动性增大, 导致钎缝宽度减少; 当温度升高至 1150 °C 时, 钎料与母材的相互作用增强, 并且出现一定程度的成分均匀化, 使得扩散区宽度减少, 钎缝宽度增加. 当钎焊温度较低时, 钎缝中的块状 Cr-B 相尺寸较大且数量多, 并集中在钎缝中心分布; 随着钎焊温度的升高, 钎缝中心的大尺寸块状 Cr-B 相逐渐减少, 直至完全消失; 而在钎缝和母材的界面处细小的 Cr-B 相增加, 并逐渐融入钎缝区中; B 元素沿奥氏体晶界向母材的渗入程度也不断增强.

2.3 钎焊温度对接头力学性能的影响

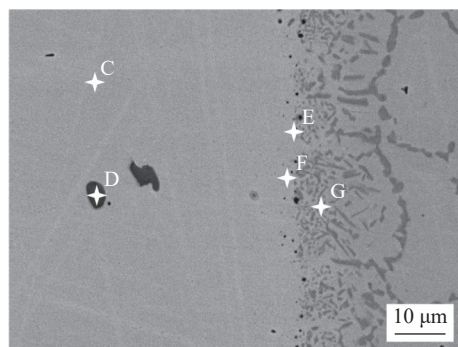
接头的抗剪强度随钎焊温度的变化如图 5 所示. 随着钎焊温度升高, 抗剪强度呈先上升后下降的趋势, 当钎焊温度为 1050 °C 时, 接头的抗剪强度达到最大值 265 MPa. 为分析接头的断裂行为, 对剪切后的断裂面进行观察, 如图 6 所示, 表 4 为断裂面的能谱结果. 随着钎焊温度升高, 断裂面中的韧窝逐渐增多, 说明由脆性断裂和韧性断裂的混合断裂模式向韧性断裂转变. 断裂位置由钎缝中的 Fe-Ni 固溶体层向不锈钢母材转变. 随钎焊温度升高, Fe-Ni 固溶体层的反应更加充分, 结合力增加, 当温度过高时, 大量 B 元素扩散到不锈钢母材中, 沿晶界生成大量 Cr-B 化合物, 其脆性较大, 在



(a) 钎焊接头界面组织



(b) 图 3(a) 中区域 b 局部放大



(c) 图 3(a) 中区域 c 局部放大

图 3 钎焊接头 SEM 高倍照片

Fig. 3 High magnification SEM images of brazed joint. (a) interface microstructure of brazed joint; (b) local enlargement of Area b in Fig. 3 (a); (c) local enlargement of area c in Fig.3 (a)

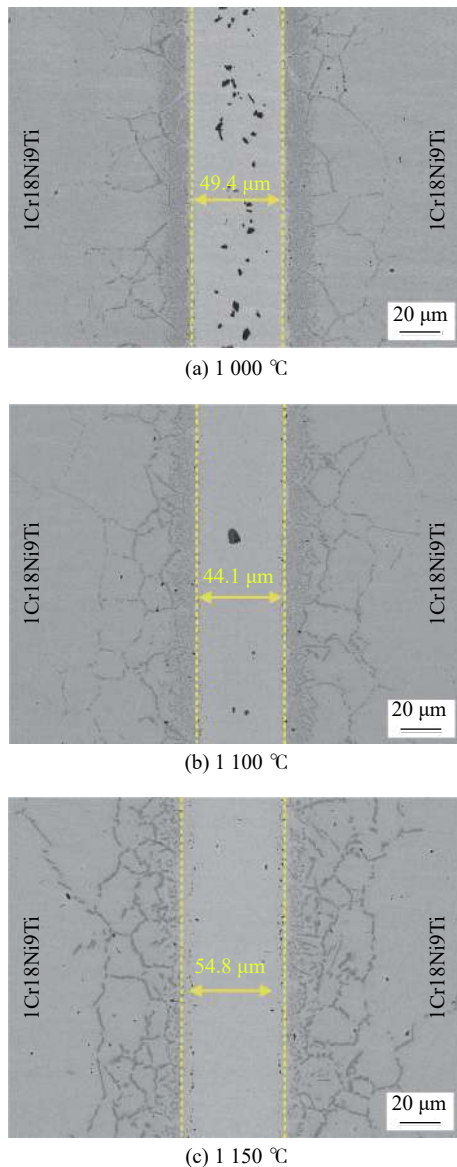


图 4 钎焊温度对接头界面微观组织的影响

Fig. 4 Interfacial microstructure of the brazing joints with different brazing temperatures. (a) 1000 °C; (b) 1100 °C; (c) 1150 °C

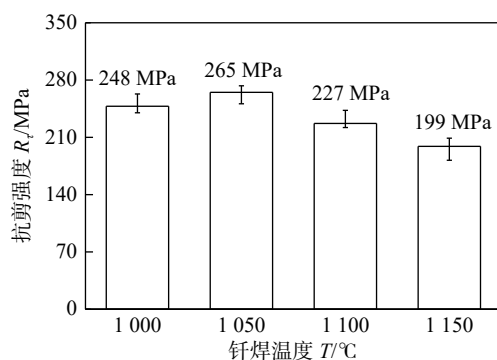


图 5 钎焊温度对接头抗剪强度的影响

Fig. 5 Shear strength of brazing joints with different brazing temperatures

剪切过程中作为裂纹源开裂, 导致接头性能降低。

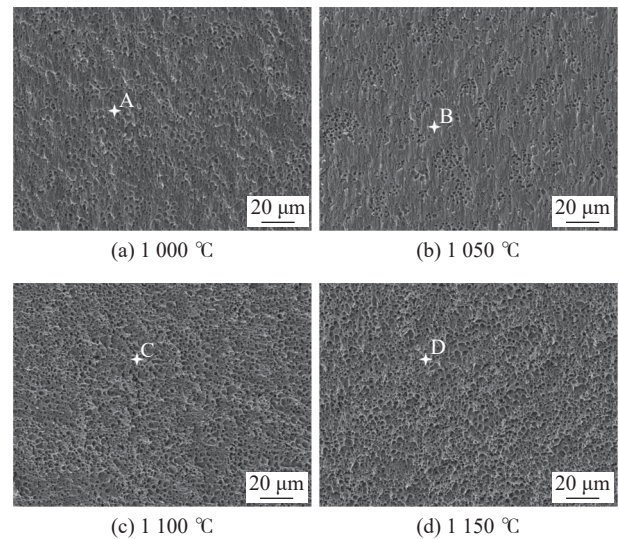


图 6 钎焊温度对钎焊接头断面形貌的影响

Fig. 6 Fracture microstructure of brazing joints with various brazing temperatures. (a) 1000 °C; (b) 1050 °C; (c) 1100 °C; (d) 1150 °C

表 4 图 6 中标记点成分及可能相 (原子分数, %)

Table 4 Chemical composition and possible phases of spots marked in Fig. 6

位置	Cr	Fe	Mn	Ni	Si	可能相
A	9.54	34.47	0.90	51.47	3.62	Fe-Ni固溶体
B	12.93	38.78	0.84	44.98	2.47	Fe-Ni固溶体
C	3.07	93.85	1.46	1.12	0.50	Fe
D	6.41	90.16	1.02	1.01	1.40	Fe

2.4 B 元素的扩散行为

B 元素是影响钎焊接头性能的主要元素. 因此, 有必要研究其在钎焊接头中的扩散. 由于 EDS 尚不能对 B 元素进行定量分析, 所以以晶界渗入的距离代替 B 原子的扩散距离. 可以计算出相应扩散活化能, 以更好地控制钎焊工艺参数. 根据经验公式, 元素的扩散距离 δ 和时间 t 之间的关系^[11] 为

$$\delta^n = Dt \quad (1)$$

式中: δ 为 B 原子的平均扩散距离 (m); n 为时间指数 (无量纲, 与时间有关); D 为扩散系数 (m^2/s); t 为试验的保持时间 (s).

关于扩散系数 D 、扩散激活能 Q 和温度 T 的关系, 用阿伦尼乌斯方程^[15-16] 表示为

$$D = D_0 e^{-Q/RT} \quad (2)$$

式中: D_0 为指数前因子 (m^2/s); 只受元素本身的影响; Q 为扩散活化能 (J/mol); 可以被视为钎焊温度

范围内的常数; 气体常数 R 为 $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为钎焊温度 (K).

结合式 (1) 及式 (2), 得到

$$\ln \delta = -Q/RTn + (\ln D_0 t)/n \quad (3)$$

在不同温度下保温 10 min 后, B 原子在 1Cr18Ni9Ti 不锈钢中扩散距离如图 7 所示. 随着温度的升高, B 原子在母材中的扩散距离增加. 当时间恒定时, $\ln \delta$ 和 $1/T$ 为线性关系, 直线斜率为 $-Q/Rn$, 截距为 $(\ln D_0 t)/n$. 以 $1/T$ 作为横坐标, $\ln \delta$ 为纵坐标进行线性拟合, 结果如图 8 所示. 通过计算, B 原子在 1Cr18Ni9Ti 中的指数前因子和扩散活化能分别为 $D_0(\text{B}) = (1.81 \times 10^{-4})^{1/n} \text{ m}^2/\text{s}$ 和 $Q(\text{B}) = 8.18 \times 10^4 \times n \text{ J/mol}$, n 为时间指数. 该计算结果将为调控 Cr-B 化合物进而调控接头性能提供理论支撑.

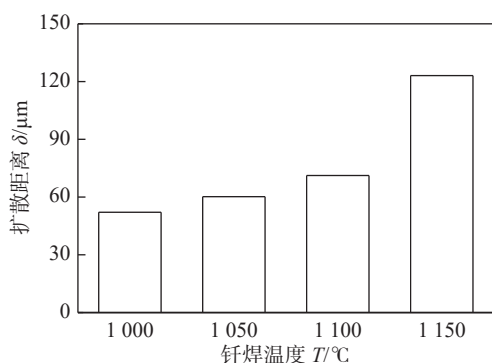


图 7 不同钎焊温度下 B 原子在 1Cr18Ni9Ti 中的扩散距离
Fig. 7 Diffusion distances of B atom in 1Cr18Ni9Ti at different brazing temperatures

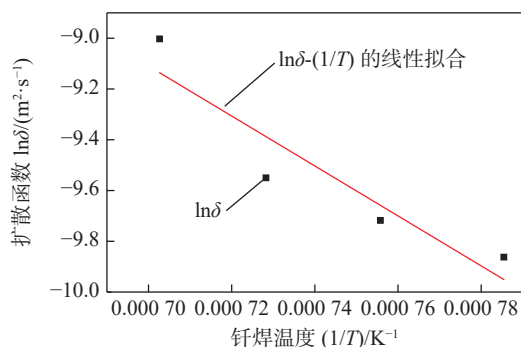


图 8 1Cr18Ni9Ti 中 B 原子扩散距离的拟合 $\ln \delta-(1/T)$ 曲线
Fig. 8 Fitted $\ln \delta-(1/T)$ curves of diffusion distances of B atomic in 1Cr18Ni9Ti

3 结论

(1) 采用 BNi-2 非晶钎料在 1000 ~ 1150 °C 实现了 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的钎焊连接, 接头无孔洞

及裂纹. 接头中的典型微观结构分为 3 个区域: σ -FeCr + Cr-B + γ -Fe/ σ -FeCr + Fe-Ni 固溶体/Ni 基固溶体 + Cr-B. 随着钎焊温度的提高, 钎缝宽度先减小后增大, 钎缝中的 CrB 相由大块状变得细小, 直至 1150 °C 时, 完全消失, Cr-B 相的晶间渗入程度加剧.

(2) 随着钎焊温度的提高, 接头抗剪强度呈现先上升后下降的趋势, 当钎焊温度为 1050 °C 时获得的接头强度最高, 抗剪强度的最大值为 265 MPa. 钎焊温度超过 1050 °C 时, 断裂形式由韧性断裂转变为混合断裂.

(3) 元素浓度差异是 B 元素扩散的主要驱动力. B 原子在 1Cr18Ni9Ti 中的扩散活化能为 $8.18 \times 10^4 \times n \text{ J/mol}$, n 为时间指数.

参考文献

- [1] 张志强, 张宇航, 张宏伟, 等. UNS S32750 超级双相不锈钢激光焊接头微观组织与耐蚀性能 [J]. 焊接学报, 2023, 44(4): 14 - 20.
Zhang Zhiqiang, Zhang Yuhang, Zhang Hongwei, *et al.* Microstructure and corrosion resistance of UNS S32750 super duplex stainless steel laser welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(4): 14 - 20.
- [2] 韩文倩, 董红刚, 马月婷, 李鹏, 等. Ti43.76Zr12.50Cu37.49-xNi6.25Co_x 非晶钎料真空钎焊 TC4 钛合金/316L 不锈钢 [J]. 焊接学报, 2024, 45(1): 47 - 57.
Han Wenqian, Dong Honggang, Ma Yueting, *et al.* Vacuum brazing TC4 titanium alloy/316L stainless steel with Ti43.76Zr12.50Cu37.49-xNi6.25Co_x amorphous filler metals[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(1): 47 - 57.
- [3] Mu G Q, Qu W Q, Zhang Y H, *et al.* Effect of Ni on the wetting and brazing characterization of 304 stainless steel by Ag-Cu alloy[J]. Journal of Materials Science, 2023, 58(14): 6297 - 6312.
- [4] Xu Z Y, Chen H Q, Qu Z Y, *et al.* Nondestructive testing of local incomplete brazing defect in stainless steel core panel using pulsed eddy current[J]. Materials, 2022, 15(16): 5689.
- [5] Kim M, Jeong H, Awais A A, *et al.* Experimental and numerical study on the thermal and hydraulic characteristics of porous-media heat exchangers in cryogenic conditions[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 216: 119095.
- [6] Zhou L C, Zhao T X, Yu Y Q, *et al.* Effect of laser shock peening on high-cycle fatigue performance of 1Cr18Ni9Ti/GH1140 weld[J]. Metals, 2022(12): 1495.
- [7] Li Z L, Shi H C, Zhang P L, *et al.* Progress, applications, and per-

- spectives of titanium-based braze filler metal: a review[J]. *Journal of Materials Science*, 2023, 58(38): 14945 – 14996.
- [8] Cui B, Song L Y, Liu Z W, *et al.* Study of the morphology and properties of diamond joints brazed with carbide-reinforced Cu-Sn-Ti filler metal[J]. *China Welding*, 2022, 31(3): 53 – 60.
- [9] 姜虹, 张礼敬, 杨静. 不锈钢真空钎焊 [C]//中国真空学会真空冶金专业委员会. 2004' 全国真空冶金与表面工程学术研讨会论文集. 沈阳, 2004: 102 – 106.
- Jiang Hong, Zhang Lijing, Yang Jing. Vacuum brazing of stainless steel[C]// Vacuum Metallurgy Committee of China Vacuum Society. Proceedings of 2004 National Symposium on Vacuum Metallurgy and Surface Engineering. Shenyang, 2004: 102 – 106.
- [10] Ma H Y, Liu Z P, Zhou G Y, *et al.* Study on element diffusion behaviour of vacuum-furnace brazing 316L/BNi-2 joints based on boltzmann-matano model[J]. *Welding in the World*, 2021, 65: 2239 – 2246.
- [11] Chen L, Chen H Z, Yang W P, *et al.* Interfacial microstructure and mechanical properties of 1Cr18Ni9Ti/1Cr21Ni5Ti stainless steel joints brazed with Mn-based brazing filler[J]. *Materials*, 2022, 15(19): 7021.
- [12] Roy R K, Panda A K, Das S K, *et al.* Development of a copper-based filler alloy for brazing stainless steels[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2009, 523(1-2): 312 – 315.
- [13] 胡胜鹏, 李文强, 付伟, 等. BNi-2 非晶钎料钎焊高钒 TiAl 合金与 GH3536 合金接头组织与性能 [J]. *航空学报*, 2021, 42(3): 417 – 428.
- Hu Shengpeng, Li Wenqiang, Fu Wei, *et al.* Interfacial microstructure and mechanical properties of high Nb containing TiAl alloy and GH3536 superalloy brazed using amorphous BNi-2 filler[J]. *Acta Aeronauticae Astronautica Sinica*, 2021, 42(3): 417 – 428.
- [14] 14, Min M, Mao Y W, Deng Q R, *et al.* Vacuum brazing of Mo to 316L stainless steel using BNi-2 paste and Cu interlayer[J]. *Vacuum*, 2020, 175: 109282.
- [15] Yong D, Chang Y A, Huang B Y, *et al.* Diffusion coefficients of some solutes in fcc and liquid Al: critical evaluation and correlation[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, 363(1-2): 140 – 151.
- [16] 李扬, 李晓延, 姚鹏. 空位对 Cu/Sn 无铅焊点界面元素扩散的影响 [J]. *焊接学报*, 2018, 39(12): 25 – 30.
- Li Yang, Li Xiaoyan, Yao Peng. Effect of vacancy on the elements diffusion in Cu/Sn lead-free solder joints[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2018, 39(12): 25 – 30.
-
- 第一作者: 田晓羽, 男, 1985 年出生, 博士; 主要从事真空钎焊方面研究; Email: hittianxiaoyu@163.com
- 通信作者: 付伟, 博士; 副教授; Email: wei.fu@hit.edu.cn

(编辑: 汤明日)

[上接第 60 页]

- [8] Roshan R, Kumar N A, Kumar S K, *et al.* Effect of welding speed and wire feed rate on arc characteristics, weld bead and microstructure in standard and pulsed gas metal arc welding[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2023, 37(21/24): 3297 – 3314.
- [9] Hong H T, Han Y Q, Lu Y, *et al.* Approximate entropy analysis of arc stability in VPPA-GMAW hybrid welding[J]. *China Welding*, 2022, 31(3): 35 – 41.
- [10] Wu K Y, Chen Z W, Huang H, *et al.* Intelligent control of arc stability and arc length in aluminum alloy pulsed GMAW[J]. *Welding in the World*, 2022, 66(7): 1357 – 1368.
- [11] Kim S, Hwang I, Kim D Y, *et al.* Weld-quality prediction algorithm based on multiple models using process signals in resistance spot welding[J]. *Metals*, 2021, 11(9): 1459.
- [12] 张鸿博, 刘琰, 阙永彬, 等. 一种输气管道环焊缝缺陷自身高度精准预测模型 [J]. *天然气工业*, 2022, 42(7): 101 – 109.
- Zhang Hongbo, Liu Yan, Que Yongbin, *et al.* A high-accuracy prediction model for self height of girth weld defect in gas pipelines[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(7): 101 – 109.
-
- 第一作者: 刘文吉, 博士; 高级实验师; 主要研究方向为焊接自动化, 焊接过程质量控制; Email: Liuwenji1981@126.com

(编辑: 汤明日)