

核级 304L 不锈钢钎焊接头组织及耐腐蚀性能研究

袁野¹, 李莎¹, 吕战鹏²

(1. 中核建中核燃料元件有限公司, 四川 宜宾 644000; 2. 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200072)

摘要:核级 304L 不锈钢与 BNi-7 钎料真空钎焊接头存在晶间腐蚀行为, 但工艺与钎缝耐腐蚀性能的关系尚未得到充分研究。为充分评估压水堆燃料组件结构件中不锈钢真空钎焊接头的晶间腐蚀和应力腐蚀敏感性, 降低腐蚀失效风险, 采用定量金相方法分析了钎缝中的化合物相含量, 采用硫酸-硫酸铁法和双环动电位再活化(DL-EPR)法评价了钎缝耐晶间腐蚀性能, 并采用高温高压水应力腐蚀裂纹扩展试验评价了钎缝的耐应力腐蚀性能。结果表明, 钎缝中化合物相含量越高, 耐晶间腐蚀性能越好。且钎缝在高温高压水中存在明显的应力腐蚀开裂行为, 但其与钎焊工艺的关系尚需进一步试验研究。

关键词:核级 304L 不锈钢; 真空钎焊; 晶间腐蚀; 应力腐蚀

中图分类号: TG454; TG174.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2022)07-1395-07

doi: 10. 7538/yzk. 2021. youxian. 0485

Structure and Corrosion Resistance of Brazed Joint of Nuclear Grade 304L Stainless Steel

YUAN Ye¹, LI Sha¹, LYU Zhanpeng²

(1. CNNC Jianzhong Nuclear Fuel Co., Ltd., Yibin 644000, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The vacuum brazed joints of nuclear grade 304L stainless steel and BNi-7 filler metal show obvious intergranular corrosion behavior, but the relationship between the brazing process and the corrosion resistance of the brazed joint was not fully studied. In order to fully evaluate the sensitivity of intergranular corrosion and stress corrosion of stainless steel vacuum brazed joints of the structural parts of PWR fuel assemblies, and reduce the risk of corrosion failure, many trials and studies were conducted. In this paper, the quantitative metallographic method was used to analyze the content of the compound phase content of brazed joints by different brazing processes. The sulfuric acid-ferrous sulfate test method and the double loop electrochemical potentiokinetic reaction (DL-EPR) test method were used to test the intergranular corrosion resistance. The high-temperature and high-pressure water stress corrosion crack growth tests were used to study the stress corrosion resistance of brazed joints, respectively. The results show that increasing the brazing temperature, prolonging the holding time and decreasing the clearance of the brazed joints can reduce the content of the compound phase content in the brazed joint. This might be related to the increase in diffusion of P element.

But meanwhile, with the reduction of the compound phase, the intergranular corrosion rate will also significantly increase. Metallographic photographs show that all the corruptions are caused in the nickel-based solid solution phase of the brazed joint. Both the sulfate-ferric sulfate test method and the DL-EPR test method show such a trend. Firstly, the stress corrosion cracking behavior in high-temperature and high-pressure water was also confirmed by the high-temperature and high-pressure water stress corrosion crack growth tests. But the relationship with the brazing process needs further experimental research. Therefore, under the condition of ensuring the strength of the brazed joint, the brazing temperature should be increased, the holding time should be extended and the clearance of the brazed joints should be reduced to reduce the compound phase content, thereby increasing the content of nickel-based solid solutions in the brazed joints and reducing the tendency to the intergranular corrosion. In addition, within the range of test parameters, the obvious tendency to intergranular corrosion in all the brazed joints was observed. The lower the compound phase content in the brazed joints, the more obvious the intergranular corrosion tendency, which is related to the fact that intergranular corrosion is mainly caused by the dissolution of the solid solution phase of the lean Cr. This study also confirmed that there is a stress corrosion tendency of brazed joints in the PWR water environment, and the area where stress corrosion is generated is mainly the solid solution phase. But the correlation between the degree of stress corrosion and the brazing process needs to be further studied.

Key words: nuclear grade 304L stainless steel; vacuum brazing; intergranular corrosion; stress corrosion

在压水堆燃料组件制造中,304L 不锈钢与 BNi-7 钎料钎焊工艺主要用于制造控制组件连接柄及新型压水堆燃料组件下管座^[1-2]。304L 不锈钢和 BNi-7 钎料有数十年的应用历史,其钎焊工艺^[3]、钎缝组织^[4-5]、力学性能^[6]等已有广泛研究。但燃料组件主要工作在一回路高温高压水环境下,水分子是极性分子,金属在水中有可能发生水合作用失去或得到电子,因此在不同金属间形成电位差和微电流导致阳极遭到溶解和腐蚀,尤其在水中存在 Cl^- 、 OH^- 等有害阴离子的情况下更会加剧腐蚀效应^[7]。而反应堆内的高温高压和辐射作用会使水的组分和活性发生很大变化,有可能形成局部腐蚀的环境。张维杰等^[8]对压水堆燃料元件不锈钢定位架不同钎料的钎焊接头在含氯介质中的应力腐蚀性能进行了试验,发现 Ni-Cr-P 系钎料有出现应力腐蚀的倾向,但较其他钎料抗应力腐蚀能力更好。姜虹等^[9]则对 Ni-Cr-B 系 BNi-2 钎料的局部腐蚀、晶间腐蚀和电化学腐蚀情况进行了研究,认为钎缝中的化合物和降温速率对

晶间腐蚀敏感性会产生一定影响,钎缝接头处存在电偶腐蚀。而最近有研究^[10]发现,304L 不锈钢与 BNi-7 钎料钎焊接头存在明显的晶间腐蚀行为,原因与钎缝的贫 Cr 镍基固溶体相有关。但关于钎缝耐晶间腐蚀性能与钎焊工艺及钎缝组织的关系,以及钎缝中是否存在其他腐蚀行为,尚无相关报道。因此,为充分评估压水堆燃料组件结构件中不锈钢真空钎焊接头的晶间腐蚀和应力腐蚀敏感性,降低腐蚀失效风险,本文针对国产核级 304L 不锈钢与 BNi-7 钎料真空钎焊工艺中最主要的钎焊温度、保温时间、接头间隙^[11]这 3 个工艺因素展开全面试验和测试,以研究钎焊工艺对钎缝组织、耐晶间腐蚀性能和耐应力腐蚀性能的影响规律,为工艺优化提供参考。

1 方法

1.1 试验材料及钎焊工艺参数

试验材料采用固溶态国产核级 304L 不锈钢锻件和国产 BNi-7 膏状钎焊料,其化学成分

列于表 1。

真空钎焊工艺设计中的 3 个关键因素钎焊温度、保温时间和接头间隙都有较大的取值范围,故选用全面试验设计方法,组合所有的可能

值进行试验,共进行 27 组试验,试验参数列于表 2。制备 1 个金相试样用于钎缝组织分析,3 个晶间腐蚀试样用于硫酸-硫酸铁法晶间腐蚀试验。

表 1 BNi-7 钎焊料及 304L 不锈钢成分

Table 1 Chemical composition of 304L stainless steel and BNi-7 filler metal

材料	质量分数/%								
	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	C	Fe	其他
304L	≤1.0	≤2.0	18.0~20.0	8.0~12.0	≤0.03	≤0.045	≤0.035	余量	—
BNi-7	—	—	13.0~15.0	余量	—	9.7~10.5	0.10	—	0.5

表 2 钎焊工艺试验参数

Table 2 Parameters of brazing process test

试验号	温度/℃	时间/min	间隙/μm
B11	950	30	50,100,150
B12	950	90	50,100,150
B13	950	150	50,100,150
B21	990	30	50,100,150
B22	990	90	50,100,150
B23	990	150	50,100,150
B31	1 030	30	50,100,150
B32	1 030	90	50,100,150
B33	1 030	150	50,100,150

挑选 3 组钎焊参数(S1 组,温度 950 ℃、时间 30 min、间隙 100 μm;S2 组,温度 990 ℃、时间 90 min、间隙 100 μm;S3 组,温度 1 030 ℃、时间 150 min、间隙 100 μm),每组各制备 1 个试样用于 DL-EPR 耐晶间腐蚀性能试验,2 个试样用于应力腐蚀开裂试验。

为精确控制钎缝间隙,设计专用钎焊试样,如图 1 所示,通过不同厚度的塞尺精确控制钎缝间隙。

1.2 钎缝组织分析

对钎缝组织分析试样使用图像分析法定量

测量钎缝中化合物的相含量。试样磨制并抛光后,使用 10% 草酸溶液,在 8 V 电压下电解约 8 s 显示钎缝组织,镍基固溶体受到严重腐蚀显示为黑色空洞,化合物相不受腐蚀。用 Zeiss Observer. 7m 金相显微镜对每个试样采集 3 幅钎缝金相照片,使用 Photoshop 分别选取化合物相区域和钎缝区域,并测量像素点数量,根据体视学原理,化合物区域像素点数量与钎缝区域像素点数量之比,即为化合物相的相含量。

1.3 硫酸-硫酸铁法晶间腐蚀试验

将试样抛光后,按照 GB/T 15260—2016^[12] 中的硫酸-硫酸铁法进行晶间腐蚀试验。腐蚀液为 400 mL H₂O+236 mL H₂SO₄+25 g Fe₂(SO₄)₃。将试样置入盛有腐蚀液的试验装置中,加热并保持沸腾状态 12 h,然后自然冷却。使用 Metler ME204E 电子天平称量腐蚀前、后试样的质量。按式(1)计算钎缝腐蚀速率 v 。以每组 3 个试样腐蚀速率的平均值作为最终腐蚀速率。

$$v = \frac{\Delta m}{At} \tag{1}$$

式中:A 为试样的暴露面积,m²;Δm 为腐蚀失重(腐蚀前、后试样的质量差),g;t 为腐蚀试验时间,h。

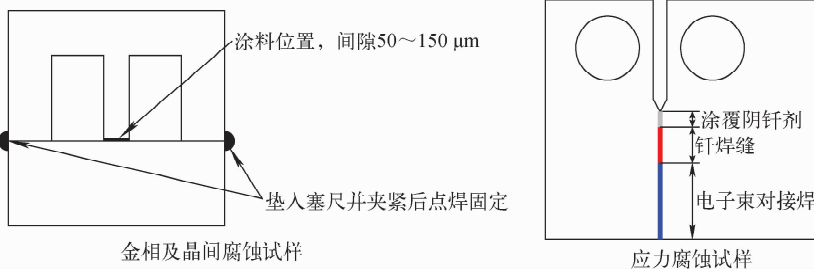


图 1 钎焊试样设计
Fig.1 Specimen design

1.4 DL-EPR 法晶间腐蚀试验

参照 GB/T 29088—2012^[13] 使用电化学工作站采用 DL-EPR 法进行耐晶间腐蚀性能测试,记录测试样品的再活化电流峰值(I_r)与活化电流峰值(I_p)的比值,即 EPR 敏化指数 Ra,获得耐晶间腐蚀性能的定量数据。试验条件如下:试验溶液为 0.5 mol/L H_2SO_4 + 0.01 mol/L KSCN 标准溶液;电极为三电极体系;扫描速率为 1.67 mV/s;极化范围为从腐蚀电位 E_{corr} (约 -400 mV) 扫描至 +580 mV;试验温度为 25 °C。每个试样重复测试 3 次,并与不锈钢母材测试结果进行比较。

1.5 高温高压水应力腐蚀开裂试验

高温高压水应力腐蚀试验参照《金属和合金的腐蚀应力腐蚀试验第 6 部分:预裂纹试样的制备和应用》(GB/T 15970.6—2007)^[14] 进行。应力腐蚀试样采用特殊设计的紧凑型拉伸试样结构(1/2 CT,图 1b),试验环境模拟压水堆一回路水环境:试验温度(325±10) °C、试验压力(18.6±1.4) MPa、硼酸含量(以 B 计) 1 200 mg/kg、LiOH 含量 2.2 mg/kg、氢含量 <0.30 mg/kg、氧含量 <0.005 mg/kg。

对 3 组应力腐蚀开裂试验,每组各制备 2 个试样,分别采用 1.4 kN 和 2.1 kN 的载荷进行试验,试验时间为 1 005 h。试验后使用疲劳试验机打开试样,采用扫描电镜观察断口形貌,分析应力腐蚀裂纹扩展速率。

2 结果及讨论

2.1 钎缝组织分析

BNi-7 钎料与 304L 不锈钢钎焊缝中心区主要由 Ni(Fe,Cr)固溶体和 P 化合物相组成,有研究^[4]认为,化合物相的形成是钎缝中心的钎料发生非等温凝固时所析出的共晶组织,主要包括 Ni_2P 和 $(Fe,Ni)_3P$ 两种共晶化合物。不同温度与时间组合时钎缝间隙与化合物相含量的关系示于图 2。可看出,在不同试验参数下,钎缝中化合物相含量均随钎缝间隙的增大而明显增大,而且增大趋势大致相当,其拟合曲线具有接近一致的斜率。由于钎缝化合物相主要为 P 化合物,因此化合物相的含量与钎缝中心区 P 含量直接相关。在钎焊扩散过程中,钎料中的 P 向母材的扩散量可用 Fick 扩散定律^[15]计算:

$$dp = -DS \frac{dc}{dx} dt \quad (2)$$

式中: dp 为钎料中 P 的扩散量; D 为扩散系数; S 为扩散面积; dc/dx 为扩散浓度梯度; dt 为扩散时间。

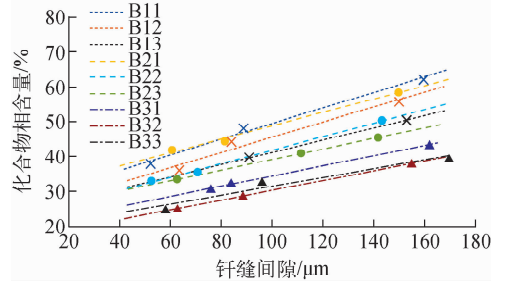


图 2 不同试验参数下钎缝间隙与化合物相含量的关系
Fig. 2 Relationship between brazing gap and compound phase content under different test parameters

当母材与钎料成分一定时,浓度梯度基本固定;当钎焊温度与保温时间一定时,即 D 与 dt 为固定,此时,P 的扩散量主要受扩散面积影响。对于平行钎缝,也可认为 P 的扩散量与扩散距离呈正比,扩散距离则主要由钎缝间隙决定。因此从图 2 可观察到钎缝中化合物相的含量随钎缝间隙的增长呈近似线性增长。同理,当扩散距离与钎焊温度一定时,理论上钎缝中化合物相含量与保温时间亦呈正比,图 2 中拟合曲线的位移显示了这一趋势。

钎焊温度主要影响扩散系数 D ,二者的关系由 Arrhenius 公式表达:

$$D = D_0 e^{-Q/RT} \quad (3)$$

式中: D_0 为扩散常数,主要由晶体点阵类型决定; R 为气体常数; T 为扩散时的热力学温度; Q 为扩散激活能。

可见,在扩散距离和扩散时间一定的情况下,随着扩散温度的提高,扩散系数增大,使得 P 元素的扩散量增大,从而钎缝凝固时共晶析出的化合物含量降低,这也与图 2 试验结果相吻合。

不同化合物相含量时典型的钎缝组织金相照片示于图 3。可看出,当钎缝化合物相含量最高时,钎缝中的化合物相几乎充满整个钎缝,甚至母材界面直接相交(图 3a)。无论是钎缝中心区还是圆角区,化合物相均呈现连续的板状共晶组织结构,虽然中间也有部分大颗粒

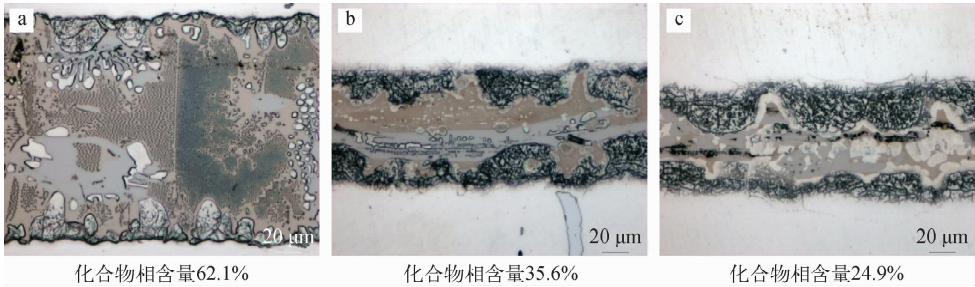


图 3 不同化合物相含量时钎缝的显微组织

Fig. 3 Microstructure of brazed joints with different compound phase contents

状固溶体和微孔状固溶体分布,但没有影响化合物相的连续性。而当钎缝化合物相含量最低时(图 3c),化合物相则分散分布于钎缝中心区,且化合物相被低铬固溶体^[10]包裹,正常情况下具有相对较好的力学性能,但一旦固溶体受到腐蚀,化合物相也易失去支撑而脱落。

2.2 晶间腐蚀性分析

试样在硫酸-硫酸铁溶液中的晶间腐蚀试验结果如图 4 所示。可看出,钎缝腐蚀速率随钎焊温度、保温时间和接头间隙的变化规律与图 2 中化合物相含量的变化规律相反,即钎缝温度越高、钎焊时间越长,钎缝接头间隙越小,钎缝的腐蚀速率越高。

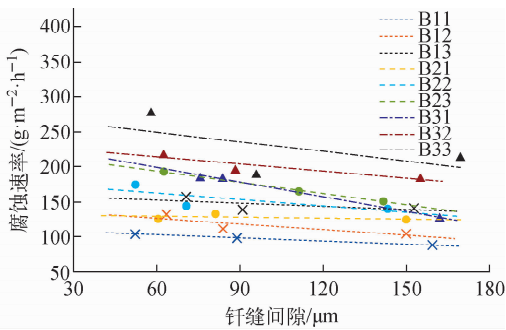


图 4 不同试验参数下钎缝间隙与腐蚀速率的关系
Fig. 4 Relationship between brazing gap and corrosion rate under different test parameters

DL-EPR 测试结果如图 5 所示。由图 5 可见,304L 不锈钢母材的 EPR 敏化指数 R_a 仅为 6×10^{-4} 。S1 组试样的 R_a 约是 304L 不锈钢母材的 6 倍。S2 组试样的 R_a 偏离较大,最大值与最小值的比值大于 10,提示该试样的制备条件对钎缝的影响较大。S3 组试样的 R_a 明显大于其他 2 组。总体结果表明,钎缝试样

的 R_a 显著高于不锈钢母材,且与钎焊层制备工艺有明确的相关性:S3 组试样的 R_a 明显大于其他 2 组的,表明钎缝温度越高、钎焊时间越长,钎缝接头间隙越小,钎缝的晶间腐蚀倾向越显著,与硫酸-硫酸铁法试验结果(图 4)基本一致。

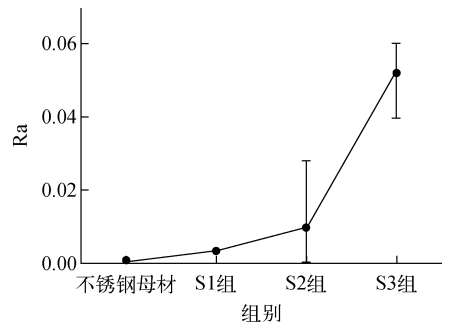


图 5 钎焊参数与 EPR 敏化指数关系
Fig. 5 Relationship between brazing parameter and EPR sensitization index

硫酸-硫酸铁法晶间腐蚀试验后样品的显微组织示于图 6。可看出,腐蚀区域出现在钎缝中心区和母材扩散区,腐蚀程度较严重。等温凝固区基本得到了完整保留,但钎缝中心区的固溶体几乎完全消失,仅残留了化合物的骨

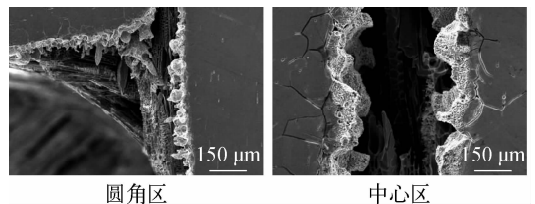


图 6 硫酸-硫酸铁法晶间腐蚀试验后的显微组织
Fig. 6 Microstructure after sulfuric acid-ferric sulfate test

架,可明显看出板状化合物的鱼骨状形貌,因此化合物并未受腐蚀影响,只是支撑化合物的“韧性桥”固溶体^[16]整体被腐蚀溶解后,覆盖的小片化合物整体脱落。此外,受到钎料影响的母材扩散区晶界也出现了明显的晶间腐蚀裂纹,但远离钎缝的母材没有任何腐蚀迹象。相关研究^[10]认为,BNi-7钎料与304不锈钢钎缝的镍基固溶体相中存在大量贫Cr区,Cr含量低于10%,与周围P化合物相优先结合Cr有关。可见受到腐蚀的主要是部分固溶体组织,而钎缝中化合物相占比越小,固溶体相的占比就越大,故钎缝腐蚀规律与化合物相的形成规律恰

好相反。不过,由于硫酸-硫酸铁法晶间腐蚀试验的腐蚀程度较严重,腐蚀失重的贡献不仅有镍基固溶体,也包括脱落的化合物碎片,因此腐蚀速率离散性较大,DL-EPR法更适用于钎焊缝晶间腐蚀速率的定量测试。

2.3 应力腐蚀性能分析

应力腐蚀试验后的钎缝断口形貌示于图7。从图7可看出,2个载荷下6个试样均出现了较明显的开裂痕迹,断口上可清晰地观察到裂纹扩展氧化痕迹,且裂纹扩散区主要为韧窝形貌,应是钎缝内固溶体组织韧性开裂,可认为钎缝在高温高压水中出现了应力腐蚀开裂。

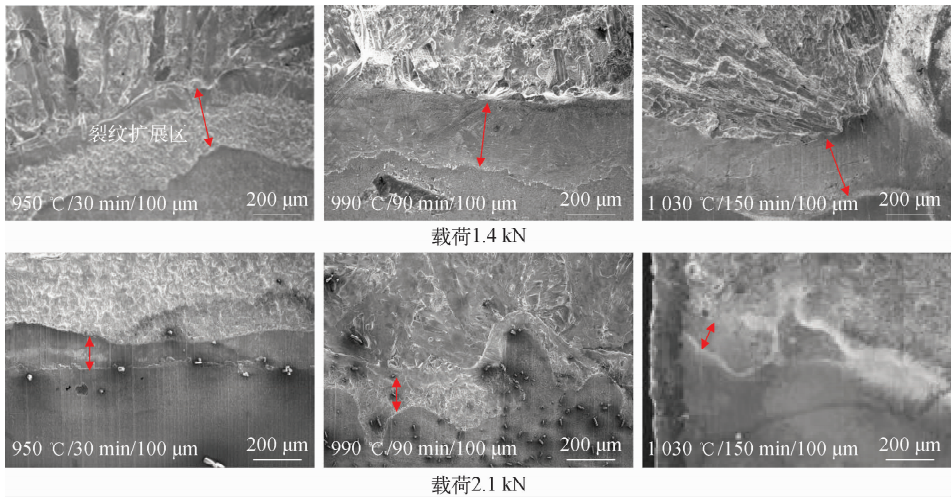


图7 应力腐蚀试验后钎缝断口形貌

Fig. 7 Fracture morphology of brazed joint after stress corrosion test

根据应力腐蚀裂纹扩展试验结果计算平均应力腐蚀开裂扩展速率(裂纹扩展长度/SCC试验时间),结果列于表3,其中 K_1 、 K_2 分别为试验开始和结束时的应力强度因子。因为每个试样的样本数有限,很难对不同条件下钎焊层的应力腐蚀开裂扩展速率进行确切的比较,但大部分条件下制备的试样应力腐蚀开裂扩展速率均较高,显示出某些试样具备较高的应力腐蚀开裂敏感性。此外,S2组和S3组试样在2.1 kN载荷下 K 变化较大,试样断口上观察到的氧化区域可能包含了钎焊层的氧化而不完全是应力腐蚀开裂,可能是钎焊层之间有空隙所致,所以相应的裂纹扩展速率的分析也需要考虑这种可能性。因此,要准确分析工艺因素对应力腐蚀速率的影响仍需进一步试验与分析。

表3 应力腐蚀裂纹扩展速率

Table 3 Growth rate of stress corrosion crack

组别	载荷/ kN	K_1 /(MPa· $m^{-1/2}$)	K_2 /(MPa· $m^{-1/2}$)	裂纹扩展速率/ ($nm \cdot s^{-1}$)
S1组	1.4	4.64	5.25	0.337 0
S2组	1.4	4.14	4.20	0.387 0
S3组	1.4	4.48	4.57	0.058 0
S1组	2.1	6.83	7.43	0.226 6
S2组	2.1	6.28	>15.41	>2.023 0
S3组	2.1	6.38	>16.46	>2.090 0

3 结论

通过对核级304L不锈钢与BNi-7钎料不同钎焊工艺接头的组织、耐晶间腐蚀性能、耐应力腐蚀性能进行试验分析,得到以下结论:

1) 在保证钎缝强度的条件下,应提高钎焊温度、延长保温时间和减小钎缝间隙,以减少钎

缝中化合物相含量,从而增加钎缝镍基固溶体含量,减少晶间腐蚀速率;

2) 试验参数范围内钎缝均出现了较明显的晶间腐蚀倾向,钎缝中化合物相含量越低,晶间腐蚀倾向越明显,这与晶间腐蚀主要是由贫Cr的固溶体相溶解有关;

3) 试验参数范围内钎缝均出现了较明显的应力腐蚀倾向,产生应力腐蚀的区域主要是钎缝中的固溶体相,但应力腐蚀程度和钎焊工艺的相关性还有待进一步研究。

参考文献:

[1] 焦拥军,肖忠,李云,等. “华龙一号”燃料组件设计研究及验证[J]. 中国核电, 2017, 10(4): 478-482.
JIAO Yongjun, XIAO Zhong, LI Yun, et al. R&D and validation of HPR1000 fuel assembly [J]. China Nuclear Power, 2017, 10(4): 478-482(in Chinese).

[2] 林峰. AFA3G 控制组件连接柄钎焊变形分析 [C]//2012 年全国地方机械工程学会学术年会论文集. 成都:四川省机械工程学会, 2012.

[3] 任耀文. 真空钎焊工艺[M]. 北京:机械工业出版社, 1993.

[4] 陈建民,朱长福. 真空钎焊不锈钢接头的钎缝组织和相组成特征[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 1999, 15(2): 66-68.
CHEN Jianmin, ZHU Changfu. Investigation of the microstructure of stainless steel joint brazed in vacuum[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 1999, 15(2): 66-68(in Chinese).

[5] 经敬楠,于治水,袁文龙,等. BNi7 镍基钎料真空钎焊 316L 不锈钢接头钎缝的显微组织和显微硬度[J]. 机械工程材料, 2013, 37(1): 10-13.
JING Jingnan, YU Zhishui, CHANG Wenlong, et al. Microstructure and microhardness of 316L stainless steel joint seam vacuum brazed by BNi7 Ni-based filler metal[J]. Materials for Mechanical and Engineering, 2013, 37(1): 10-13(in Chinese).

[6] 陈芙蓉,刘军,董俊慧,等. 不锈钢真空钎焊焊接头的组织和力学性能[J]. 焊接, 2004(6): 18-21.
CHEN Furong, LIU Jun, DONG Junhui, et al. Microstructure and mechanical properties of vacuum brazed joints of 1Cr18Ni9Ti stainless steel[J]. Welding & Joining, 2004(6): 18-21(in Chinese).

[7] 许维钧,白新德. 核电材料老化与延寿[M]. 北京:化学工业出版社, 2015.

[8] 张维杰,李文清. 压水堆燃料元件定位架钎焊接头在含氯介质中的应力腐蚀性能[J]. 核动力工程, 1985(5): 16-19.
ZHANG Weijie, LI Wenqing. The stress-corrosion behavior in water media containing chlorine of the brazing joint of grids for PWR fuel element [J]. Nuclear Power Engineering, 1985, 6(5): 14-17(in Chinese).

[9] 姜虹. 不锈钢钎焊接头腐蚀评价[D]. 南京:南京工业大学, 2004.

[10] 袁野,周希,李莎. 304L 不锈钢真空钎焊接头晶间腐蚀性能试验研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(11): 63-66.
YUAN Ye, ZHOU Xi, LI Sha. Experimental study on intergranular corrosion resistance of 304L stainless steel vacuum brazed joints[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(11): 63-66 (in Chinese).

[11] 毕华,方平. 真空钎焊焊接工艺评定因素的确定 [J]. 热加工工艺, 2011, 40(11): 132-135.
BI Hua, FANG Ping. Determination of factors of welding procedure qualification of vacuum brazing [J]. Hot Working Technology, 2011, 40(11): 132-135(in Chinese).

[12] GB/T 15260—2016 金属和合金的腐蚀镍合金晶间腐蚀试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2016.

[13] GB/T 29088—2012 金属和合金的腐蚀 双环电化学动电位再活化测量方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2013.

[14] GB/T 15970.6—2007 金属和合金的腐蚀应力腐蚀试验第 6 部分:预裂纹试样的制备和应用 [S]. 北京:中国标准出版社, 2007.

[15] 何龙庆,林继成,石冰. 菲克定律与扩散的热力学理论[J]. 安庆师范学院学报:自然科学版, 2006, 12(4): 41-42.
HE Longqing, LIN Jicheng, SHI Bing. Fick law and the diffusion's thermodynamics theory[J]. Journal of Anqing Normal University: Natural Science Edition, 2006, 12(4): 41-42 (in Chinese).

[16] PHILIPS N R, LEVI C G, EVANS A G. Mechanical of microstructure evolution in an austenitic stainless steel bond generated using a quaternary braze alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2008, 39(1): 142-149.