

Zr702 合金焊接接头在沸腾硝酸中的腐蚀行为研究

郭计增¹, 徐建平², 房菲¹, 刘承泽², 易全伟¹, 吴金平², 王丹丹¹, 张于胜²

(1. 中国核电工程有限公司, 北京 100840)

(2. 西安稀有金属材料研究院有限公司, 陕西 西安 710016)

摘要: 研究了采用钨极氩弧焊 (TIG) 焊接的 Zr702 合金焊接接头在 8 mol/L 沸腾硝酸中的应力腐蚀、电化学腐蚀、均匀腐蚀行为及其失效机理。结果表明: TIG 焊接后, Zr702 合金焊接接头熔合区和热影响区晶粒发生粗化; 热影响区产生残余拉应力, 平行于焊缝的残余应力达到 179.68 MPa, 垂直于焊缝的残余应力达到 134.94 MPa。Zr702 合金焊接接头的均匀腐蚀速率比母材高 50%, 这是由于组织内存在的残余应力会诱导合金溶解腐蚀。在拉应力的作用下, Zr702 合金焊接接头表面的钝化膜沿着垂直于拉应力方向开裂, 表现为明显的解理断裂特征, 导致接头的应力腐蚀敏感性升高, 存在应力腐蚀开裂的风险。

关键词: Zr702 合金; 焊接接头; 硝酸; 应力腐蚀开裂; 乏燃料后处理

中图分类号: TG457.19; TG146.4⁺14

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2024)03-029-06

Research on Corrosion Behavior of Zr702 Alloy Welded Joints in Boiling Nitric Acid

Guo Jizeng¹, Xu Jianping², Fang Fei¹, Liu Chengze², Yi Quanwei¹, Wu Jinping², Wang Dandan¹, Zhang Yusheng²

(1. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

(2. Xi'an Rare Metal Materials Institute Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract: The stress corrosion, electrochemical corrosion, uniform corrosion behaviors and failure mechanism of Zr702 alloy joints welded using tungsten inert gas (TIG) were investigated in 8 mol/L boiling nitric acid. The results show that the grains in the fusion zone and heat affected zone (HAZ) of Zr702 alloy welded joints undergo coarsening after welding. The residual tensile stress generates in HAZ, which is reaching 179.68 MPa and 134.94 MPa in parallel and perpendicular to the weld seam, correspondingly. The uniform corrosion rate of Zr702 alloy welded joint is 50% higher than the base material, because that the residual stress in HAZ can induce alloy dissolution corrosion. Under the action of tensile stress, the passive film on the surface of Zr702 alloy welded joint cracks along the direction perpendicular to tensile stress, exhibiting obvious cleavage fracture characteristics, resulting in increasing stress corrosion sensitivity of the joints and a risk of stress corrosion cracking.

Keywords: Zr702 alloy; welded joint; nitric acid; stress corrosion cracking; spent fuel reprocessing

在国家大力发展以核电为主的可持续清洁能源的背景下, 乏燃料后处理相关技术得到了快速发展, 后处理设备用耐蚀材料也得到了较高的关注。乏燃料水法后处理关键设备长期处于高温、高氧化性、高腐蚀性硝酸及高放射性的服役环境中, 对关键设备用耐蚀材料提出了更高的要求^[1-4]。

超低碳不锈钢在纯硝酸中具有优异的耐蚀性, 早期被应用于水法后处理溶解设备。然而, 其在高氧化性离子、高浓度硝酸环境中因存在晶界腐蚀而导致耐蚀性急剧下降, 限制了其进一步应用^[5-7]。钛合金与锆合金在硝酸腐蚀环境中均具有优异的耐蚀性能, 受到了研究人员的广泛关注并开展了大量的研发工作。

日本开发的 Ti-5Ta 合金及国内开发的 Ti35 合金, 在乏燃料后处理关键设备领域得到了应用。法国开发的 R60702 锆合金具有优异的耐蚀性、良好的力学性能及较低的热中子吸收截面, 被作为乏燃料后处理设备用关键材料^[8-12]。目前, 我国乏燃料后处理厂的溶解器等设备拟采用商用 Zr702 合金 (对应 R60702) 作

收稿日期: 2024-04-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52203383, 12205242); 中国博士后科学基金面上资助项目 (2023M742821); 陕西省创新能力支撑计划项目 (2023KJXX-095); 陕西省博士后科研项目 (2023BSHGZZHGYXMZZ24)

通信作者: 郭计增 (1975—), 男, 高级工程师。

为主要耐蚀材料。然而, 钎合金焊接接头处的组织变化与残余应力会诱导合金腐蚀^[13-14], 使其在硝酸中易发生应力腐蚀开裂 (SCC) 现象, 限制了其在乏燃料后处理领域的进一步应用^[15-18]。

目前, 针对 Zr702 合金焊接接头在沸腾硝酸中腐蚀行为的研究鲜有报道。因此, 系统研究了钨极氩弧焊接 (TIG) Zr702 合金焊接接头的组织以及接头残余应力对其在沸腾硝酸中均匀腐蚀、电化学腐蚀和应力腐蚀行为的影响, 并分析其失效机理, 以期为乏燃料后处理用钎合金选材提供实验数据和理论指导。

1 实验

焊接母材为 3 mm 厚的退火态国产 Zr702 合金板材, 配套焊丝为符合 YS/T 887—2013 标准要求的 ERZr2 焊丝 ($\phi 2.4$ mm), 母材及焊丝化学成分如表 1 所示。焊接试样采用机械加工 60° 的坡口, 打磨平整后用丙酮清洗干净。焊接设备为钨极氩弧焊自动焊接小车, 焊接电流为 100~110 A, 焊接电压为 10~15 V。焊接过程中, 采用 99.999% 的高纯氩气进行背保、拖罩和喷嘴的三重氩气保护, 气体流量为 20~30 L/min。

表 1 Zr702 合金母材及配套焊丝 ERZr2 化学成分 (w%)

Table 1 Chemical composition of Zr702 alloy base material and supporting welding wire ERZr2

	Zr	Hf	Fe+Cr	C	H	O	N
Zr702	Bal.	1.94	0.044	0.006	0.0013	0.131	0.017
ERZr-2	Bal.	0.96	0.121	0.014	0.0011	0.144	0.004

采用 HF、HNO₃ 和 H₂O 体积比为 2:9:9 的混合酸液刻蚀 Zr702 合金样品, 然后用光学显微镜 (SOPTOP ICX41M) 对样品进行显微组织观察。残余应力测量仪器为博纳 (BN-SM200) 应力应变检测系统。拉伸试样尺寸为 205 mm×20 mm×3 mm, 标距段为 20 mm。采用万能拉伸试验机 (UMT-510X) 进行室温拉伸性能测试。分别在高温大气 (112 °C) 和 8 mol/L 沸腾硝酸中, 采用慢应变速率拉伸机 (SSRT) 测试试样的应力腐蚀敏感性, 应力加载方向与轧制方向平行, 并与焊缝垂直, 应变速率为 10⁻⁵ s⁻¹。采用扫描电子显微镜 (Hitachi SU3500) 观察断口形貌。

电化学测试设备为 CorrTestTM CS300 电化学工作站, 选用三电极体系, 其中试样、铂电极和 Ag/AgCl (浸在饱和 KCl 溶液中) 分别作为工作电极、对电极和参比电极, 工作电极的暴露表面积为 1 cm²。全浸腐蚀试验方法及腐蚀速率的测量计算按照 GB/T 1034—2008 标准进行, 腐蚀试样尺寸为 24 mm×

18 mm×3 mm, 腐蚀介质为 8 mol/L 沸腾硝酸溶液, 温度为 (110±1) °C。腐蚀速率计算公式如下:

$$R = (8.76 \times 10^4 \Delta W) / (A \times T \times D)$$

式中: R 为腐蚀速率, mm/a; ΔW 为试样腐蚀前后质量之差, g; A 为试样的总面积, cm²; T 为试验时间, h; D 为 Zr702 合金密度, 6.51 g/cm³。腐蚀速率计算结果保留 2 位有效数字。

按照图 1 所示, 采用盲孔法测量焊缝热影响区的残余应力。测量时, 首先在工件待测热影响区位置贴应变花, 然后在应变花中心对工件钻一小孔, 孔周围由于去掉了原来的拘束部分会产生一定的应变, 引起电阻丝形状发生改变, 使得分布在电阻丝上的电压发生改变, 从而将应变以电压信号输出。测试 0°、45° 和 90° 3 个方向的应变, 其中应变花 0° 方向平行于焊缝, 45° 及 90° 方向沿着 0° 方向顺时针旋转。应力应变测试仪器将接收的电信号转换为应变数据, 并根据相关弹性力学原理计算出工件产生的残余应力等相关数据^[19-20]。

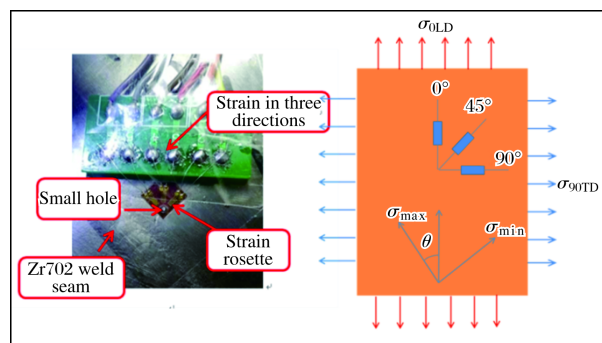


图 1 盲孔法测定 Zr702 合金焊接接头热影响区残余应力测试实物图及示意图

Fig.1 Actual photo and schematic diagram of measuring residual stress in heat affected zone of Zr702 alloy welded joint using blind hole method

2 结果与讨论

2.1 焊接接头组织与成分变化

采用 TIG 焊接的 Zr702 合金焊接接头横截面显微组织如图 2 所示。中心部位为焊缝熔合区 (WM), 晶粒尺寸相对于两侧热影响区 (HAZ) 明显增大, 这是由于焊接过程中焊缝处的热输入量最高, 且钎合金自身导热性差, 焊接热量长时间驻留引起晶粒长大。而边缘的母材 (BM) 为等轴组织, 晶粒尺寸最小。焊接后 Zr702 合金焊接接头的化学成分如表 2 所示。与母材及焊丝原材料成分 (表 1) 相比, C、H、O、N 等元素含量基本无变化, 表明焊接过程中氩气保护良好, 避免了气体杂质对后续接头性能分析的影响。

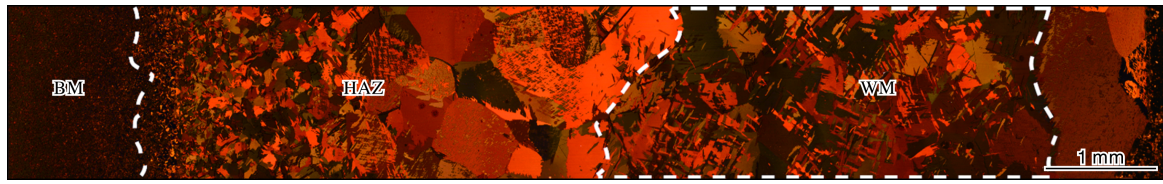


图2 Zr702 合金焊接接头横截面显微组织

Fig.2 Microstructure of Zr702 alloy welded joint cross section

表2 Zr702 合金焊接接头化学成分 (w/%)

Table 2 Chemical composition of Zr702 alloy welded joint						
Zr	Hf	Fe+Cr	C	H	O	N
Bal.	1.68	0.086	0.008	0.0015	0.132	0.022

2.2 焊接接头残余应力分布

诱发应力腐蚀开裂的残余应力包括焊接应力、加工形变残余应力、外加应力以及其他因素引发的应力。为了明确 Zr702 合金焊接后焊缝处残余应力的性质及大小分布,首先利用公式(1)、(2)计算得到释放系数 $A=-0.561$, 释放系数 $B=-1.468$ (Zr702 合金弹性模量 $E=100$ GPa, 泊松比 $\mu=0.35$); 随后应力应变测试仪器根据接收的电信号转换为 0° 、 45° 、 90° 方向的应变数据,并根据相关弹性力学原理及公式(3)、(4)计算主应力及 $\sigma_{\max}$ 与 0° 位置的夹角,结果如表3所示;最后,利用公式(5)、(6)计算出平行于焊缝的 HAZ 处纵向残余应力达到 179.68 MPa,垂直于焊缝的 HAZ 处横向残余应力达到 134.94 MPa,应力性质为拉应力。这主要是因为焊接加热时,焊缝处金属热膨胀受构件刚性及周围冷态金属的拘束,产生了热应力;而冷却时,随着温度降低,HAZ 周围金属阻碍焊缝收缩,结果使 HAZ 处产生拉应力。

释放系数计算公式^[19]:

$$A = -\frac{1+\mu}{2E} \left(\frac{1}{R} \right)^2 \quad (1)$$

$$B = -\frac{1+\mu}{2E} \left[\frac{4}{1+\mu} \left(\frac{1}{R} \right)^2 - 3 \left(\frac{1}{R} \right)^4 \right] \quad (2)$$

式中, E 为杨氏模量, μ 为泊松比, R 为应变花敏感栅中心到孔中心的距离与孔的半径之比。

主应力及角度计算公式^[19]:

$$\sigma_{\max, \min} = E \left[\frac{\varepsilon_{90} + \varepsilon_0}{4A} \pm \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\varepsilon_{90} - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_0)^2} \right] \quad (3)$$

$$\tan 2\theta = \frac{\varepsilon_0 - 2\varepsilon_{45} + \varepsilon_{90}}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}} \quad (4)$$

式中, ε_0 、 ε_{45} 、 ε_{90} 分别为 0° 、 45° 、 90° 方向应变花的应变值, θ 为 $\sigma_{\max}$ 与 0° 位置的夹角。

纵向 (0°) 及横向 (90°) 残余应力计算公式^[19]:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} + \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \cos 2\theta \quad (5)$$

$$\sigma_{90} = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} - \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \cos 2\theta \quad (6)$$

表3 焊缝 HAZ 处的应力、应变及 θ 角计算结果Table 3 Calculation results of stress, strain and θ angle at the HAZ of weld seam

ε_0	ε_{45}	ε_{90}	$\sigma_{\min}/\text{MPa}$	$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	$\theta/(^\circ)$
-257	-147	-96	128.11	186.51	20.13

2.3 焊接接头力学性能与断口形貌

许多研究表明,采用钨极氩弧焊获得的锆材焊接接头,其抗拉强度相比母材显著提高,主要是由于焊接过程中采取了高纯氩气 (99.999%) 保护,喷嘴、拖罩、背保三重氩气保护使得在较小热输入焊接过程中整个焊道及热影响区都处于高质量的保护气氛之中,杜绝了空气中杂质元素的影响^[21]。同样地,本研究中所制备的 Zr702 合金焊接接头在焊接过程中也有效避免了杂质元素的影响。图3为 Zr702 合金母材及焊接接头的室温拉伸曲线。由图3可以看出, Zr702 合金母材的抗拉强度约为 400 MPa,延伸率超过 37.0%。相比于母材, Zr702 合金焊接接头的极限抗拉强度有所提升,约为 436 MPa,而延伸率有所下降,约为 30%。

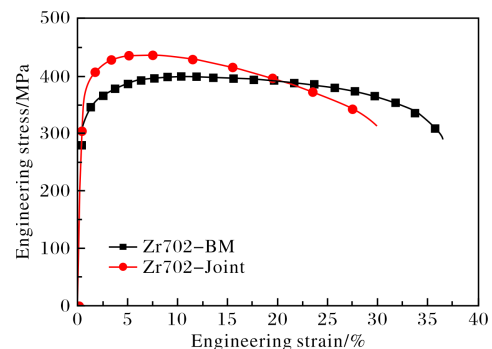


图3 Zr702 合金母材及焊接接头的室温拉伸曲线

Fig.3 Room temperature tensile curves of base material and welded joint of Zr702 alloy

图4为Zr702合金TIG焊接接头拉伸断裂试样照片和断口微观形貌。从图4a可以看出,拉伸试样的断裂发生于热影响区,且有明显的“双颈缩”特征。从断口微观形貌(图4b)可以看出,Zr702合金焊接接头断口表现出典型的韧性断裂特征。

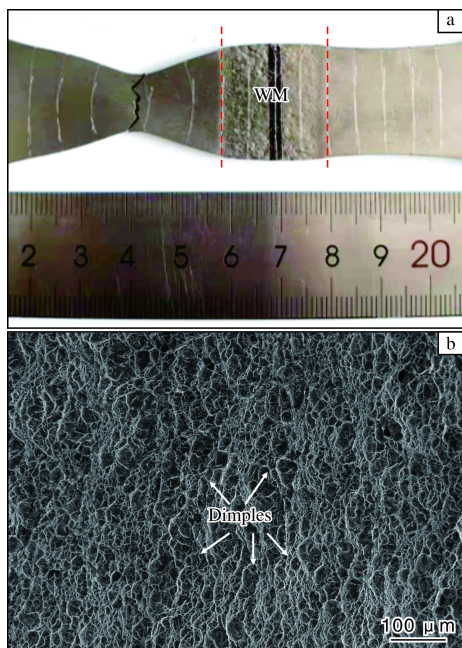


图4 Zr702合金焊接接头拉伸断裂试样照片和断口微观形貌

Fig.4 Photo of tensile fracture specimen (a) and fracture micro-morphology (b) of Zr702 alloy welded joint

2.4 焊接接头均匀腐蚀性能

将Zr702合金母材及焊接接头放入8 mol/L沸腾硝酸中进行240 h的全浸腐蚀试验,每48 h记录质量变化并计算其腐蚀速率,结果如图5所示。由图5可以看出,Zr702合金焊接接头的耐蚀性比母材差,均匀腐蚀速率相比母材增加了50%。主要是由于Zr702合金焊接

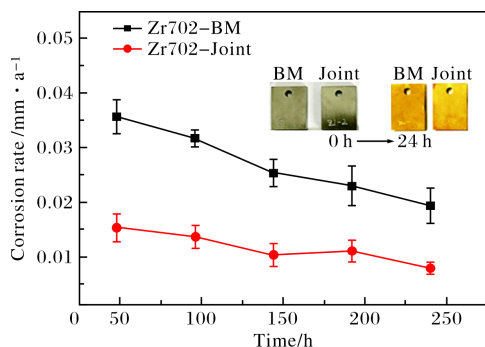


图5 Zr702合金母材及焊接接头在沸腾硝酸中的均匀腐蚀速率

Fig.5 Uniform corrosion rate of base material and welded joint of Zr702 alloy in boiling nitric acid

接头在焊缝熔合区、热影响区的晶粒发生长大,组织内存在的残余应力会诱导合金溶解腐蚀^[1]。此外,随着腐蚀时间的延长,Zr702合金母材及其焊接接头的腐蚀速率逐渐趋于稳定,且腐蚀外观由银白的金属光泽色逐渐变为金黄色,意味着合金表面形成了腐蚀钝化膜。该钝化膜可以阻碍腐蚀介质与锆基体的相互作用,使得腐蚀速率随着腐蚀时间的延长而下降,最终逐渐趋于稳定。

2.5 焊接接头应力腐蚀性能与断口形貌

通过动电位极化法测试了Zr702合金母材及焊接接头在8 mol/L沸腾硝酸中的电化学性能,结果如图6所示。相比于母材,Zr702合金焊接接头的腐蚀电位较负,意味着在沸腾硝酸中发生腐蚀的倾向更大;焊接接头的稳定钝化电流密度较大,意味着表面钝化膜的稳定性相对较差,所以焊接接头的耐蚀性比母材差。此外,当外加电位位于腐蚀电位与1.65 V之间时,腐蚀电流密度相对稳定,合金处于钝化区,表面形成稳定的钝化膜;当外加电位超过1.65 V时,腐蚀电流密度急剧增加,表面钝化膜遭到破坏,形成过钝化。在后处理服役环境中,当外加电位超过1.65 V时,钝化膜会沿着垂直于应力的方向发生开裂,因而Zr702合金焊接接头在沸腾硝酸环境中存在应力腐蚀开裂的风险。

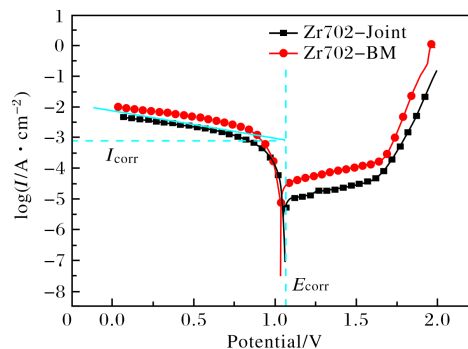


图6 Zr702合金焊接接头的电化学腐蚀极化曲线

Fig.6 Electrochemical corrosion polarization curves of Zr702 alloy welded joint

为了评价Zr702合金母材及焊接接头在沸腾硝酸中的应力腐蚀行为,采用慢速率拉伸试验机测试其应力腐蚀敏感性,结果如图7所示。按照抗拉强度损失数据计算Zr702合金的应力腐蚀敏感性因子 S_{scc} ,计算公式如下^[22]:

$$S_{scc} = \frac{\sigma_{air} - \sigma_{HNO_3}}{\sigma_{air}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: σ_{air} 为高温大气环境中材料的抗拉强度,MPa; σ_{HNO_3} 为硝酸环境中材料的抗拉强度,MPa。

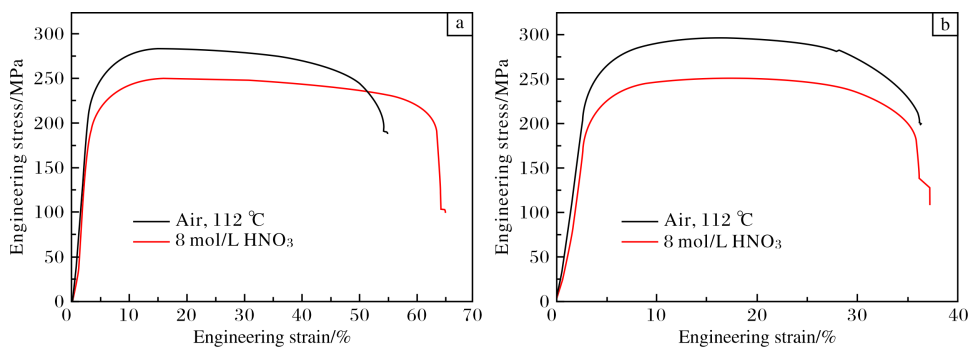


图7 Zr702 合金母材及焊接接头的慢速率拉伸曲线

Fig.7 Slow rate tensile curves of base material (a) and welded joint (b) of Zr702 alloy

由图7可知,Zr702合金母材在高温大气和沸腾硝酸环境中的抗拉强度分别为284.74、251.42 MPa(图7a),按照公式(7)计算可知,Zr702合金母材的应力腐蚀敏感性因子为11.7%。同理,Zr702合金焊接接头在高温大气中的抗拉强度接近300 MPa,而在沸腾硝酸环境中的抗拉强度则为254.41 MPa(图7b),其应力腐蚀敏感性因子为15.2%,相比母材增加了30%,表明焊接接头在沸腾硝酸环境中易发生应力腐蚀开裂。此外,在高温大气中慢速率拉伸结果与常温拉伸结果一致,即接头抗拉强度相比母材有所提升;而在沸腾硝酸腐蚀环境中,由于焊接接头的耐蚀性比母材差,且接头存在较大残余应力(表现为平行于焊缝HAZ处纵向的残余应力达到179.68 MPa,垂直于焊缝HAZ处横向的

残余应力达到134.94 MPa,且纵向及横向应力均为拉应力),所以焊接接头的抗拉强度相比母材下降幅度更大,即应力腐蚀敏感性因子值更大。综上,Zr702合金焊接接头受组织和残余拉应力的影响,使得其在沸腾硝酸中相比母材更易发生应力腐蚀开裂。

为了进一步分析Zr702合金焊接接头在沸腾硝酸中的应力腐蚀失效机理,对其拉伸断口进行SEM分析,结果如图8所示。从宏观形貌上看,断裂依然发生于焊接接头热影响区,具体位置与室温拉伸试样(图4a)一致。在高温大气中,断口边缘均有大量韧窝(图8b),呈韧性断裂特征。在硝酸腐蚀环境中,断口心部的微观形貌以韧性断裂为主(图8c),但韧窝深度和分布相比于未经腐蚀的拉伸试样断口(图4b)更浅、更稀

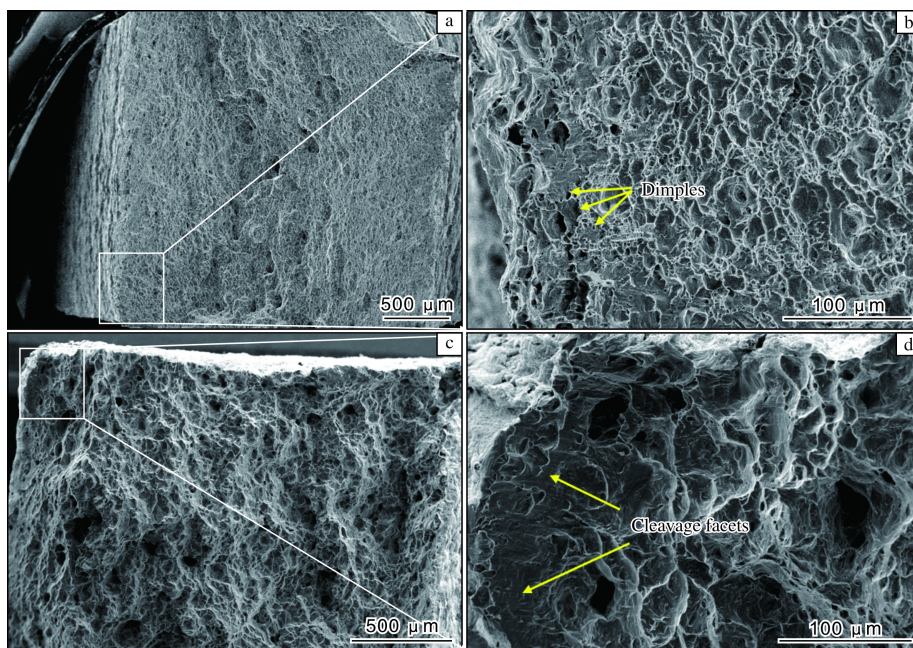


图8 Zr702 合金焊接接头在不同环境中慢速率拉伸试样的断口形貌

Fig.8 Slow rate tensile fracture morphologies of Zr702 alloy welded joint in different environments:
(a, b) high temperature air; (c, d) boiling nitric acid

疏。断口边缘微观形貌呈现出解理断裂特征(图 8d)。这是因为在硝酸环境中, Zr702 合金表面会形成钝化膜, 在残余拉应力的作用下, 钝化膜沿着垂直于拉应力方向开裂, 即表现出明显的解理断裂特征。局部钝化膜破裂后会使裸露出的基体与腐蚀介质直接接触, 加速合金的腐蚀; 合金表面会形成裂纹源, 在拉应力的作用下裂纹扩展, 降低了合金在沸腾硝酸环境中的抗拉强度^[21], 导致 Zr702 合金在沸腾硝酸中的应力腐蚀敏感性因子增加, 即存在应力腐蚀开裂的风险。为了防止应力腐蚀开裂的发生, 一方面可以对 Zr702 合金成分进行优化, 控制杂质元素含量, 将应力腐蚀敏感性降到最低; 另一方面, 利用表面处理的方法, 如微弧氧化和水蒸气预膜处理等, 在钎合金表面形成致密氧化膜, 以提升其抗应力腐蚀性能。

3 结 论

(1) Zr702 合金焊接接头热影响区存在残余拉应力, 平行于焊缝的残余应力达到 179.68 MPa, 垂直于焊缝的残余应力达到 134.94 MPa。

(2) Zr702 合金焊接接头在 8 mol/L 沸腾硝酸中的均匀腐蚀速率相比母材增加了 50%。

(3) Zr702 合金焊接接头的应力腐蚀敏感性因子相比母材增加了 30%, 存在应力腐蚀开裂风险。

(4) 在残余拉应力的作用下, Zr702 合金焊接接头表面的钝化膜沿着垂直于拉应力方向开裂, 表现出明显的解理断裂特征。

参考文献 References

- [1] Xu J P, Liu C Z, Wu J P, et al. New insight into the role of microscale residual stresses on initial corrosion behavior of Ti35 alloy[J]. *Corrosion Science*, 2022, 206: 110491.
- [2] Sano Y, Takeuchi M, Nakajima Y, et al. Effect of metal ions in a heated nitric acid solution on the corrosion behavior of a titanium-5% tantalum alloy in the hot nitric acid condensate[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2013, 432(1/2/3): 475-481.
- [3] 王德鹏, 李毅丰, 梁雪, 等. 压水堆燃料包壳钎合金中第二相的腐蚀行为研究进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2023, 52(2): 753-762.
- [4] Xu J P, Liu C Z, Wu J P, et al. Orientation dependence of corrosion resistance of a near-alpha Ti35 alloy applied in nuclear industry[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2022, 568: 153873.
- [5] Ueno F, Uchiyama Y, Yamamoto M, et al. Application of cathodic protection of stainless steel for components in fuel reprocessing plant[J]. *Journal of the Atomic Energy Society of Japan*, 2010, 9(3): 279-287.
- [6] 李文生, 邢健, 张杰, 等. 温压烧结 316L 不锈钢组织和耐 3.5%NaCl 腐蚀行为[J]. *稀有金属材料与工程*, 2022, 51(12): 4714-4725.
- [7] Xu J P, Su H B, Guo D Z, et al. Electrochemical corrosion behavior of Ti35 alloy in 6 M nitric acid containing fluoride ions[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2019, 48(4): 1124-1129.
- [8] Xu J P, Li H, Zhao X, et al. Zirconium based neutron absorption material with outstanding corrosion resistance and mechanical properties[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2022, 567: 153763.
- [9] 张海芹, 王旭峰, 刘海明, 等. 基于 DOE 的钎合金包壳管冷轧质量分析及改善[J]. *钛工业进展*, 2023, 40(2): 35-39.
- [10] 吴金平, 杨英丽, 奚正平, 等. Ti35 合金焊接接头在高温硝酸中的腐蚀性能研究[J]. *钛工业进展*, 2012, 29(1): 22-25.
- [11] Fredrickson G L, Patterson M N, Vaden D E, et al. History and status of spent fuel treatment at the INL Fuel Conditioning Facility[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2022, 143: 104037.
- [12] Xu J P, Liu C Z, Wu J P, et al. Three-dimensional microstructure and texture evolution of Ti35 alloy applied in nuclear industry during plastic deformation at various temperatures[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2021, 819: 141508.
- [13] Yau, T L. SCC of zirconium and its alloys in nitric acid[J]. *Corrosion*, 1983, 39(5): 167-174.
- [14] Qi B Y, Liu C Z, Yang Q H, et al. Stress corrosion cracking behavior of commercial Zr702 in boiling nitric acid solutions for spent nuclear fuel reprocessing[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2022, 51(12): 4483-4487.
- [15] Nagano H, Kajimura H. The stress corrosion cracking performance of pure zirconium and zirconium alloys in highly oxidizing nitric acid[J]. *Corrosion Science*, 1996, 38(5): 781-791.
- [16] Li Y S, Ge C C, Liu Y H, et al. Influencing factors and mechanism of iodine-induced stress corrosion cracking of zirconium alloy cladding: a review[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2022, 29(4): 586-598.
- [17] 凌堃, 王正东. TIG 焊对工业纯钎 R60702 接头腐蚀性能的影响[J]. *核动力工程*, 2013(3): 37-41.
- [18] 李春雷, 王丽红, 白晓琳, 等. R60702 钎极氩弧焊焊接工艺评定[J]. *金属加工(热加工)*, 2011(18): 41-43.
- [19] 张小鹏, 王娜. 基于大型炉体焊接残余应力测试的盲孔法研究[J]. *力学与实践*, 2007, 29(3): 45-49.
- [20] 王维容. 关于焊接残余应力测试方法的研究[J]. *焊接学报*, 1989, 10(3): 181-187.
- [21] 褚武扬, 乔利杰, 李金许, 等. 氢脆和应力腐蚀—基础部分[M]. 北京: 科学出版社, 2013.