

引用格式: 刘刘, 朱成, 班子惠, 等. 超临界水反应器用 GH4169 合金服役后的微观组织和力学性能[J]. 材料工程, 2025, 53(11): 63-71.

LIU Yi, ZHU Cheng, BAN Zihui, et al. Microstructure and mechanical properties of superalloy GH4169 for supercritical water reactor after service[J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(11): 63-71.

超临界水反应器用 GH4169 合金 服役后的微观组织和力学性能

Microstructure and mechanical properties of
superalloy GH4169 for supercritical water
reactor after service

刘 刘¹, 朱 成^{2*}, 班子惠¹, 李应举², 冯亚鑫¹, 张振涛¹, 杨院生²

(1 中国原子能科学研究院, 北京 102413;

2 中国科学院金属研究所, 沈阳 100016)

LIU Yi¹, ZHU Cheng^{2*}, BAN Zihui¹, LI Yingju², FENG Yaxin¹,

ZHANG Zhentao¹, YANG Yuansheng²

(1 China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

2 Institute of Metal Research, Chinese Academy of

Sciences, Shenyang 110016, China)

摘要:研究了超临界水反应器运行 2000 h 后 GH4169 合金筒体及焊缝处的组织性能。结果表明: 高温高压及蔗糖混合溶液条件下 GH4169 合金筒体的耐蚀性良好, 其厚度尺寸损失速率在 0.005~0.255 $\mu\text{m}/\text{h}$ 之间, 腐蚀产物为金属元素的氧化物、磷酸盐。筒体与其他零件的焊接接头处是影响反应器残余寿命的薄弱环节。筒体与连接件处存在应力腐蚀开裂, 经计算其裂纹扩展速率为 5.25 $\mu\text{m}/\text{h}$, 裂纹仅需 762 h 即可贯穿连接件的筒壁; 筒体与不锈钢密封环的焊接接头在电偶腐蚀、缝隙腐蚀、应力集中的综合作用下发生严重断裂, 裂纹周向长度约为 1/4 圆周。此外, 服役 2000 h 后 GH4169 合金筒体的力学性能良好, 强度损失程度较小。

关键词:超临界水氧化; GH4169 合金; 腐蚀速率; 应力腐蚀开裂

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2024.000346 **CSTR:** 32421.14.j.issn.1001-4381.2024.000346

中图分类号: TG174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2025)11-0063-09

Abstract: Microstructures and mechanical properties of GH4169 alloy cylinder and its weld joints in a supercritical water reactor are studied after operating 2000 h. The results show that the GH4169 alloy cylinder exhibits good corrosion resistance under conditions of high temperature, high pressure, and sucrose mixed solution; the thickness loss rate of the cylinder is 0.005-0.255 $\mu\text{m}/\text{h}$; the corrosion products primarily consist of oxides and phosphates. However, the welded joints connecting the cylinder and other components represent a vulnerable point that significantly impacts the remaining lifespan of the reactor. The calculated crack propagation rate of the GH4169 alloy cylinder is 5.25 $\mu\text{m}/\text{h}$, indicating that it would only take 762 h for the crack to penetrate through the wall of the connector. Additionally, severe fracture occurs (the circumferential length of the crack is approximately 1/4 of the circumference) at the weld joint between cylinder and stainless-steel, resulting from the synergistic effects of galvanic corrosion, crevice corrosion, and concentrated stress. Despite these challenges, the strength loss of the cylinder is relatively small, which means that the cylinder maintains satisfactory mechanical properties.

Key words: supercritical water oxidation; GH4169 superalloy; corrosion rate; stress corrosion cracking

超临界水氧化法是处理有毒有害难溶废弃物最有效的方法之一, 在环境治理、核废料处理、有毒化学

物质治理中的应用较多。超临界水氧化技术指在水的超临界状态下(温度 ≥ 374.3 $^{\circ}\text{C}$, 压力 ≥ 22.1 MPa),

有机物与水完全互溶并且与氧化剂形成均一相,使有机物快速的发生氧化反应,生成 CO_2 、 H_2O 以及无机盐等,具有反应速率高、破坏率高、反应充分等优点^[1-3]。该技术的高温高压、高腐蚀性等工况特点对反应器材料提出了较高的要求。

超临界反应器的材料主要包括不锈钢和镍基高温合金等,镍基合金表面形成的富含 Cr_2O_3 的保护膜^[4-6]使其耐蚀性作用显著,并且镍基合金的高温力学性能突出。马姝丽等^[7]发现In718合金(GH4169)片状试样在 $650\text{ }^\circ\text{C}$ 、 25 MPa 下的中性水溶液中点蚀严重,而316L不锈钢表面的氧化膜已明显脱落。Teyseyre等^[8]的研究表明In625、In690合金在 $400\sim 550\text{ }^\circ\text{C}$ 时的高温力学性能显著高于316L、304等不锈钢。在超临界反应的苛刻环境下,镍基合金、不锈钢等还面临着应力腐蚀开裂问题,应力腐蚀断裂发生前没有征兆,一旦产生裂纹后果十分严重,其抗应力腐蚀性能应引起足够重视^[9]。Fournier等^[10]在 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 、 25 MPa 的恒拉伸速率实验时发现In718合金具有较强的晶间应力腐蚀敏感性。曾祥荣等^[11]在长时超临界水氧化环境服役的316L不锈钢的解剖组织研究中发现,本体存在多处晶间应力腐蚀裂纹;此外,超临界水氧化设备通常需要不同部件的焊接组装,他们还发现管道焊缝处发生比母材更为严重的腐蚀,并且焊缝外壁分布较明显的应力腐蚀裂纹。Thomas等^[12]在压水堆环境下测试实验时发现182合金与600合金焊接接头的焊缝根部易形成应力腐蚀裂纹。

超临界水反应下材料的组织性能研究大多在实验室运行,样品小、反应时间短(一般几十至几百小时),对实际工况下反应器本体、焊接接头等位置的组织性能演变反应不够明确,难以评价影响材料服役寿命的关键参数。本工作以服役 2000 h 的GH4169超临界反应器内筒组件为研究对象,通过组织成分表征研究材料的腐蚀、断裂等行为并分析其形成机制,通过力学性能检验、腐蚀速率测算、应力腐蚀断裂模型等评估其残余寿命,并为超临界设备的改进提供参考。

1 实验材料与方法

超临界水反应器筒体结构如图1(a)所示,主要由连接件、筒体、密封环、限位块、栅板等零件组成;不同部件之间采用焊接连接。其中,筒体与连接件为GH4169合金,其余为S316不锈钢。反应器内运行介质主要为蔗糖溶液、磷酸三丁酯、氧气等;运行温度为 $200\sim 626\text{ }^\circ\text{C}$ 、压力约为 24 MPa 、运行时间为 2000 h 。

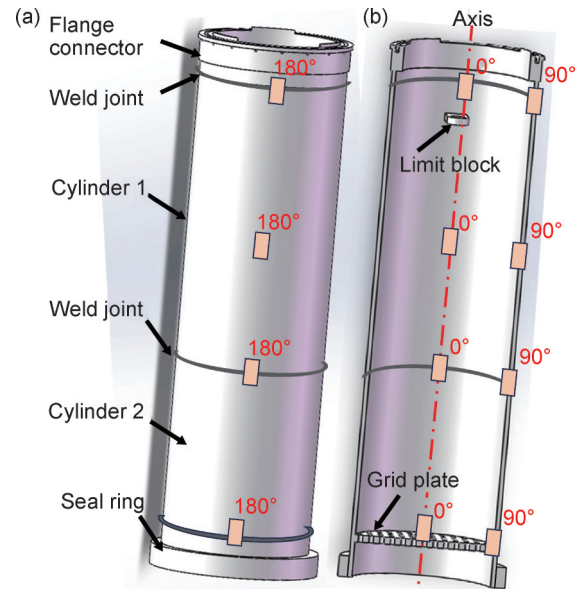


图1 超临界水反应器(a)及其取样位置示意图(b)

Fig.1 Schematic diagram of supercritical water reactor(a) and cutting positions of samples(b)

样品取样如图1(b)所示,以限位块底部所在轴线为基准沿筒体表面分别旋转 90° 、 180° ,然后不同焊接接头及筒体本体在轴线及不同旋转角度的基准线上分别截取3个样品。样品表面经砂纸磨平后机械抛光,然后用 5 g 的 CuCl_2 、 100 mL 的 HCl 、 100 mL 的 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 组成的混合溶液腐蚀,清洗吹干后用OLMPUS BX53光学显微镜(OM)、LSM700激光共聚焦显微镜(laser scanning confocal microscopy, LSCM)、Gemini SEM 460场发射扫描电子显微镜(SEM)观察其微观组织,用扫描电镜配备的能谱仪分析腐蚀产物的成分。腐蚀速率为筒体组件厚度方向服役前后的尺寸差与时间的比值。筒体和焊接接头的室温拉伸性能根据国家标准GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》用Z050万能试验机进行室温拉伸实验。

2 实验结果

2.1 筒体组件的表面形貌

超临界水反应器筒体组件的表面形貌如图2所示。筒体外表面腐蚀最严重处为限位板一侧约 $1/4$ 圆周区域,表层为绿色物质;紧邻氧化最严重部分两侧表面发黑;限位板对侧腐蚀程度最轻,可以观察到金属光泽。管道外表面焊缝完好,无明显缺陷。在栅板与筒体内表面的焊接处可以观察到一条周向长度约 155 mm 的裂缝;从裂缝背面观察,栅板与筒体之间存在宽度可达 2 mm 的缝隙。

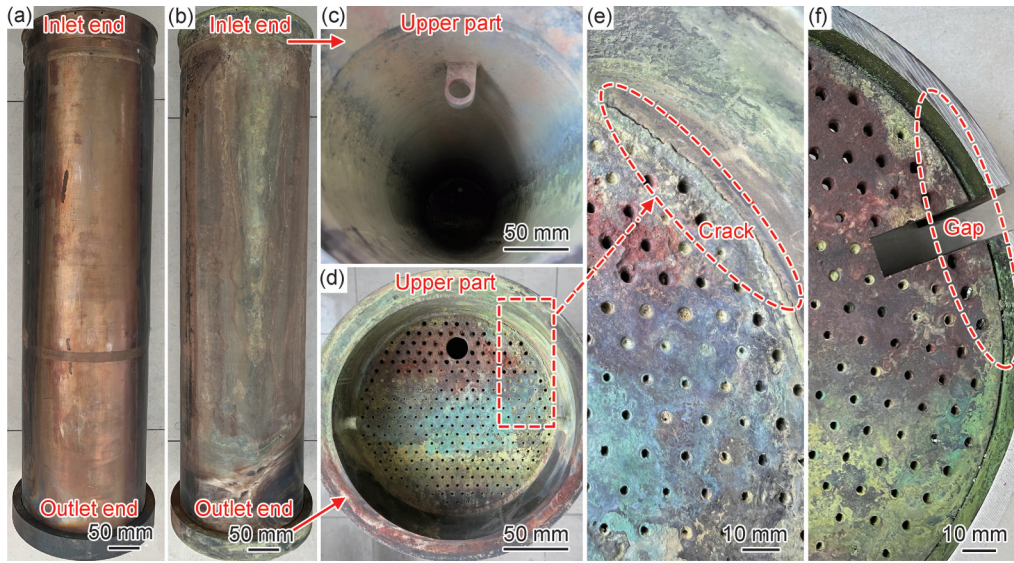


图2 超临界水反应器筒体组件的表面形貌

(a), (b)外表面; (c)进料端; (d)出料端; (e), (f)栅板

Fig.2 Surface morphology of cylinder components of supercritical water reactor

(a), (b)outer surface; (c)inlet end; (d)outlet end; (e), (f)grid plate

2.2 筒体本体与不同焊接接头的微观组织

筒体本体的微观组织如图3所示。经服役2000 h后,筒体不同部位晶粒尺寸均匀、无明显缺陷。

两段筒体焊接接头的微观组织如图4所示,从图中可知,该焊缝组织良好,无裂纹、孔洞等缺陷。

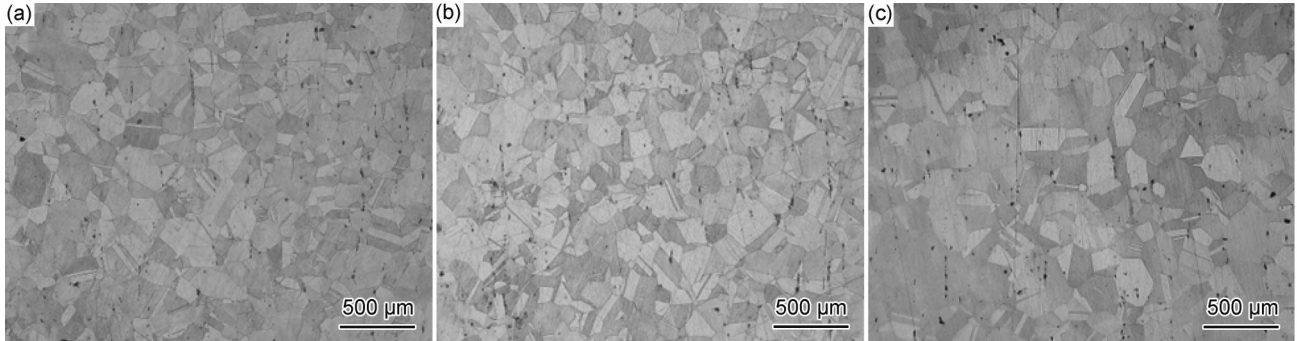


图3 筒体本体不同位置的微观组织 (a)0°;(b)90°;(c)180°

Fig.3 Microstructure at different positions of cylinder body (a)0°;(b)90°;(c)180°

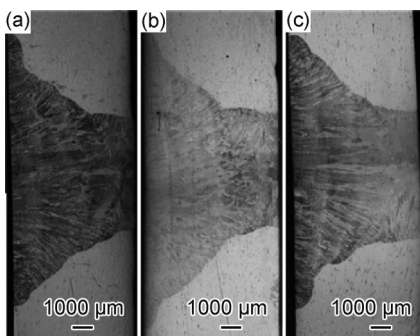


图4 筒体1与筒体2焊接接头不同位置的微观组织

(a)0°;(b)90°;(c)180°

Fig.4 Microstructure at different positions of welded joint between cylinder 1 and cylinder 2

(a)0°;(b)90°;(c)180°

筒体1与连接件焊接接头不同部位的微观组织如图5所示。图5(a)表明该焊缝两侧热影响区存在裂纹,裂纹为沿晶断裂并且呈树枝状,裂纹深度最深可达2.5 mm。图5(b)表明焊缝内存在未熔合的孔洞,该孔洞由于施工人员焊接时的操作不稳定所致。裂纹的扫描组织及其面扫描分析结果如图6所示。从图中可以看出,裂纹内的腐蚀产物主要为金属元素的氧化物或磷酸盐等,其中,Na元素的存在是因为残留溶液所致。图5及图6的结果表明焊缝热影响区附近的裂纹为典型的应力腐蚀裂纹。

筒体2与栅板焊接接头处的宏微观组织如图7所示。图7(a)表明筒体与栅板焊缝处部分区域已被裂

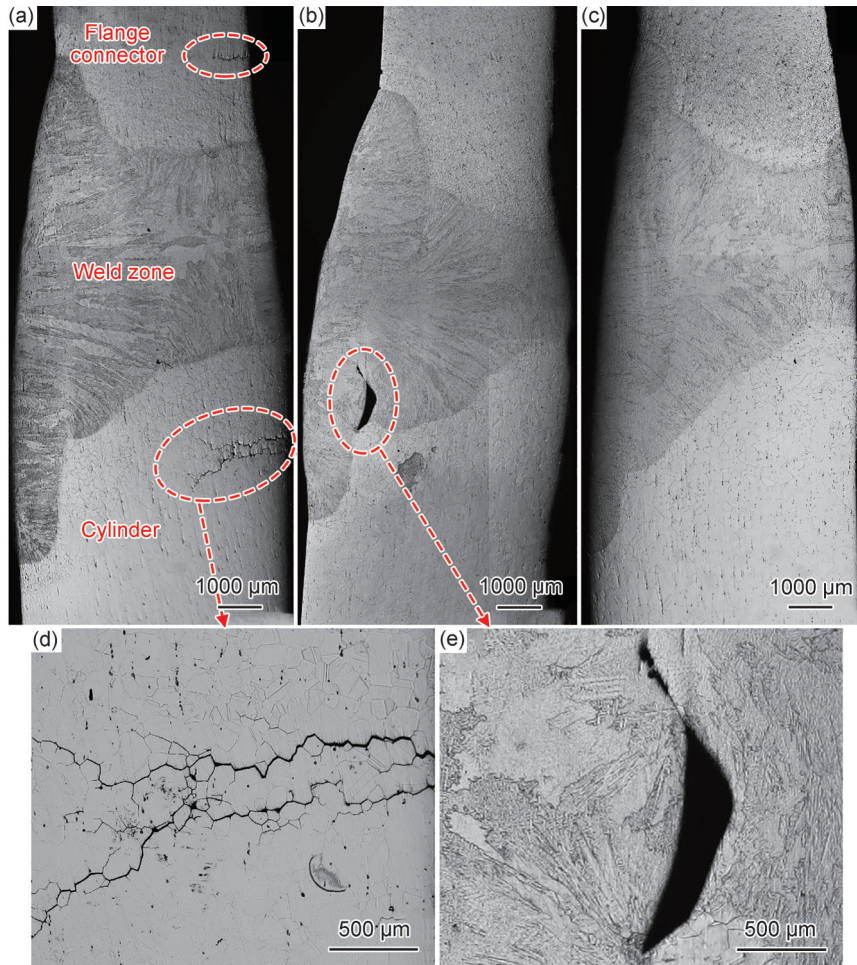


图5 筒体1与连接件焊接接头不同位置的微观组织

(a)0°;(b)90°;(c)180°;(d),(e)局部放大照片

Fig.5 Microstructure at different positions of welded joint between cylinder 1 and connector
(a)0°;(b)90°;(c)180°;(d),(e) partially enlarged photographs

纹贯穿,且观察到显著的腐蚀痕迹;图7(b)表明服役2000 h后焊缝的腐蚀厚度可达到1500 μm ;图7(c)与图7(d)表明焊缝处的裂纹可能起源于筒体侧的根部区域。筒体2与栅板焊接接头的断口组织如图8所示,从图中可以看出,焊接接头断口面凹凸不平,未表现出冲蚀特征。

2.3 筒体典型位置处的腐蚀组织

筒体内表面的CLSM和SEM微观组织图9所示。可以看出,筒体内表面存在比较光滑的腐蚀孔,统计孔深范围在0.1~0.5 mm之间。为进一步分析腐蚀层的厚度与成分,对其进行扫描及能谱分析如图10所示。结果表明,筒体表层存在厚度10~35 μm 之间且富含O、P的腐蚀层,腐蚀产物可能为 Cr_2O_3 、 NiCr_2O_4 或磷酸盐^[13-14]。计算了筒体不同位置处的厚度尺寸损失速率,其结果在0.005~0.255 $\mu\text{m}/\text{h}$ 之间。

2.4 筒体及筒体焊接接头的力学性能

GH4169筒体原材料、服役后筒体、服役后筒体1

与筒体2焊接处的拉伸性能结果如图11所示。筒体原材料的抗拉强度、屈服强度、伸长率分别为1308、1167 MPa、18.5%;服役2000 h后,筒体本体的抗拉强度、屈服强度、伸长率分别为1147、995 MPa、24.8%,计算结果表明抗拉强度下降了12.3%,屈服强度下降了14.7%。服役后筒体焊接接头处的抗拉强度、屈服强度、伸长率分别为1087、853 MPa、22%,焊接接头处的抗拉强度达到筒体本体的94.8%。

3 分析与讨论

超临界水反应器在高温高压、复杂介质等较苛刻的环境下服役,长时间运行后面临腐蚀、微裂纹等制约设备服役寿命的重要因素,并且高温作用下材料的强度有所软化。因此,筒体的组织性能评价主要包括其腐蚀行为、断裂过程、力学性能损失等方面。

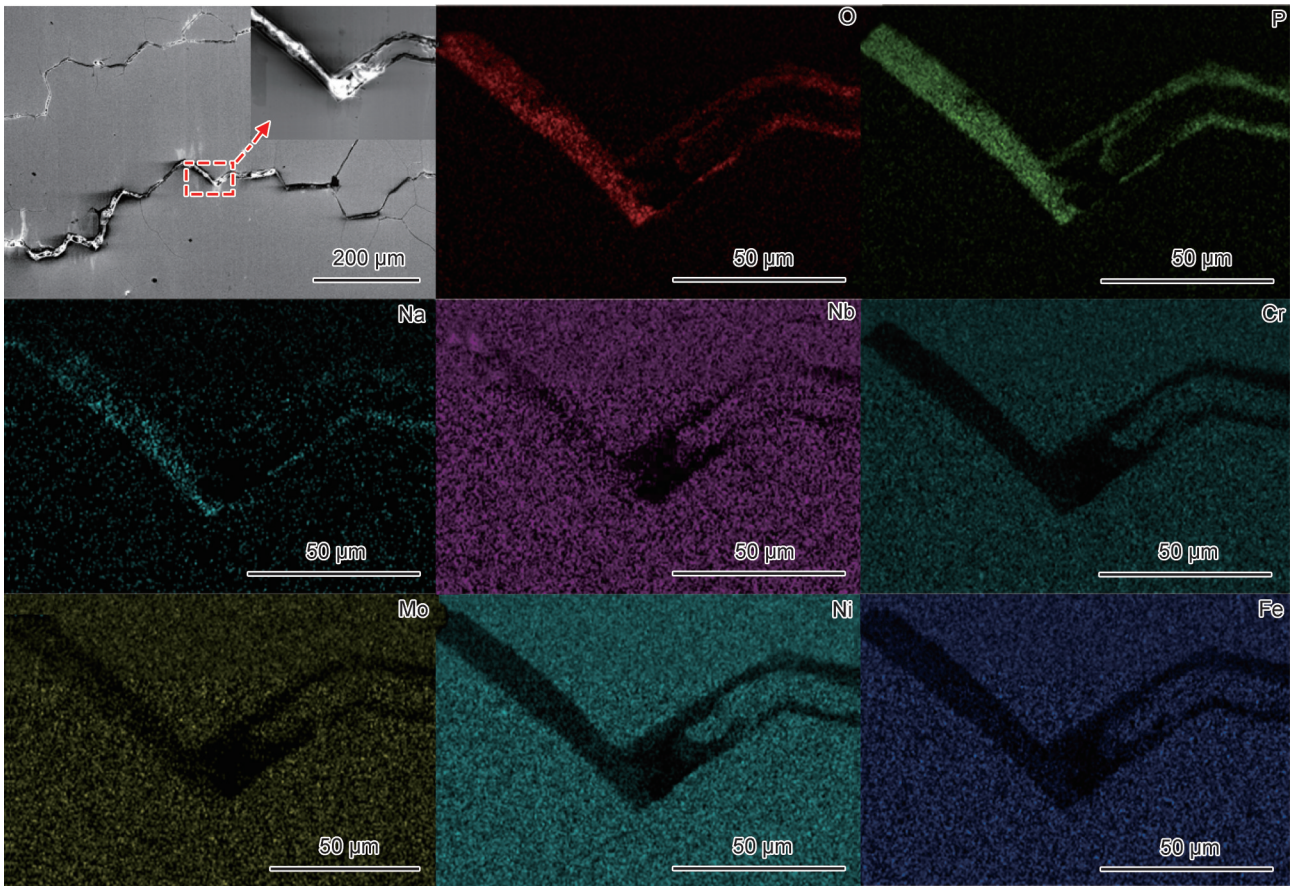


图 6 筒体 1 与连接件焊接接头处裂纹的形貌及面扫描结果

Fig.6 Morphology and area scan results of cracks at welded joint between cylinder 1 and connector

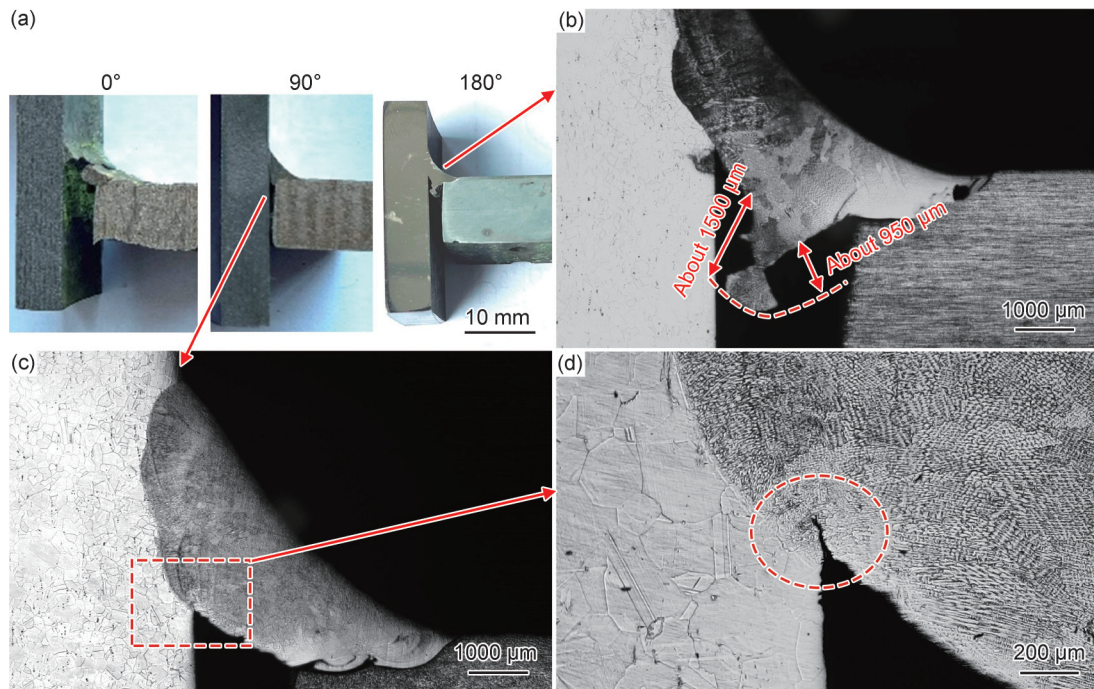


图 7 筒体 2 与栅板焊接接头不同位置的宏、微观形貌

(a)宏观形貌;(b)90°;(c)180°;(d)局部放大照片

Fig.7 Macro- and micro-morphology at different positions of welded joint between cylinder 2 and grid plate

(a)macro-morphology;(b)90°;(c)180°;(d)partially enlarged photograph

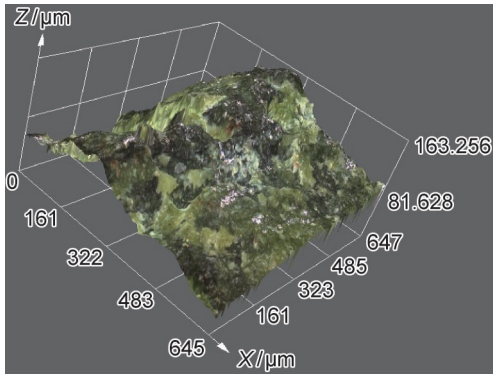


图8 筒体2与栅板焊接接头处的断口组织
Fig.8 Fracture morphology of welded joint between cylinder 2 and grid plate

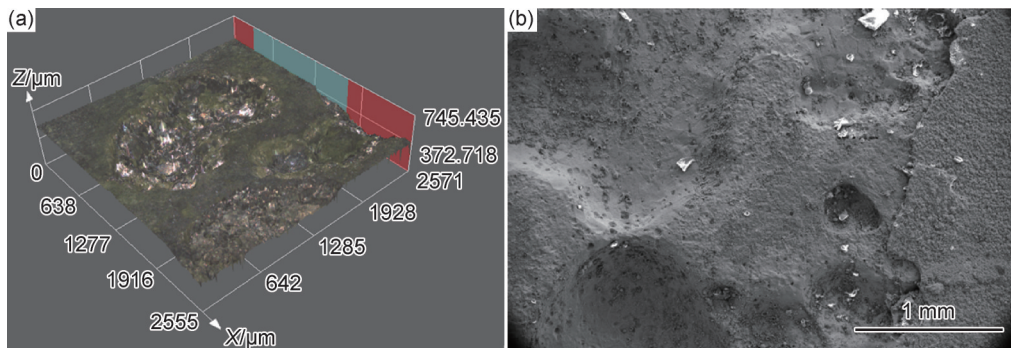


图9 筒体内表面的CLSM(a)和SEM(b)微观组织
Fig.9 CLSM(a) and SEM(b) microstructures on inner surface of the cylinder body

由于焊接接头处的组织与本体存在较大的差异性,且存在一定焊接应力,在超临界反应工况下极易发生应力腐蚀开裂。应力腐蚀开裂包括微裂纹的萌生、裂纹扩展期、裂纹快速断裂期共三个阶段,裂纹萌生期所受应力影响小,时间长约占断裂总时间的90%,后两个阶段时间相对较短,约占总断裂时间的10%^[15]。本研究中筒体与连接件焊缝两侧皆有应力腐蚀裂纹的形成(图5),并且沿晶裂纹中存在大量的氧化物(图6)。根据氧化膜开裂下的应力腐蚀模型^[16]:合金在特定腐蚀介质中沿晶界择优形成脆弱且很薄的氧化膜;在应力的作用下容易被撕裂然后露出新的合金基体;晶界在应力作用下张开,更多的溶液进入裂纹并在前段再次形成脆性氧化膜;周而复始导致应力腐蚀裂纹沿晶界扩展。此外,需要重视的是,当裂纹贯穿零件侧壁时可能会导致设备、人员等的损失伤害。因而,对应力腐蚀裂纹扩展速率(CGR)的评估尤为重要,本文采用公式(1)模型进行计算^[17-18]。

$$\text{CGR} = 1.66 \times 10^{-8} \times K_I^{0.38} \times W_C^{0.38} \times \text{pH}^{1.67} \times \exp[-44479/(R \times T)] \quad (1)$$

研究的超临界水反应器为卧式结构,在运行时间内筒组件圆截面上部面临高温高压下气体的腐蚀,腐蚀程度最深;圆截面下部为流动的混合溶液,腐蚀程度较浅。因此,筒体表面不同位置处的腐蚀程度不同。图10表明筒体表面腐蚀层内的Ni、Cr、Fe等元素的含量显著小于试样内侧基体内元素的含量。这意味着反应器运行时的高温腐蚀过程主要为Ni、Cr、Fe等元素的外流以及O、P等元素的侵入,最终形成了金属元素的氧化物或磷酸盐等。反应器筒体的厚度约6 mm,在厚度尺寸损失速率0.005~0.255 μm/h的情况下,腐蚀穿透筒壁最少约23529 h。

式中: K_I 为应力强度因子; W_C 为冷加工量; R 为气体常数8.3145 J/(mol·K); T 为热力学温度;pH为酸碱度。结合相关文献与实际工况拟定 K_I 为38 MPa·m^{1/2}, W_C 为25%,pH为7,温度为823 K。计算可得CGR为5.25×10⁻³ mm/h。根据该模型计算,图5中连接件侧的裂纹经762 h贯穿连接件侧壁,经895 h后筒体侧的裂纹贯穿筒体侧壁。

此外,筒体与栅板焊接接头处发生严重的断裂,该处的腐蚀及裂纹形成过程如图12所示。筒体与栅板为不同的合金,二者之间形成电偶腐蚀,由于不锈钢的腐蚀电位高于镍基合金,因而不锈钢处作为阳极并且腐蚀相对较重;由于筒体与栅板之间为特别小的缝隙,缝隙内的腐蚀介质处于停留状态,加剧缝隙内金属的腐蚀,促使栅板与筒体内侧的间隙快速增大。然后焊缝区暴露在溶液中被多个方向的溶液进一步腐蚀,焊缝组织被迅速腐蚀掉。由于焊缝根部为应力集中区,在靠近筒体侧焊缝根部出现裂纹,随后裂纹在超临界工况时的高温高压作用下迅速扩展直至贯穿。

GH4169合金中的沉淀强化相为 γ'' (Ni₃Nb)和 γ'

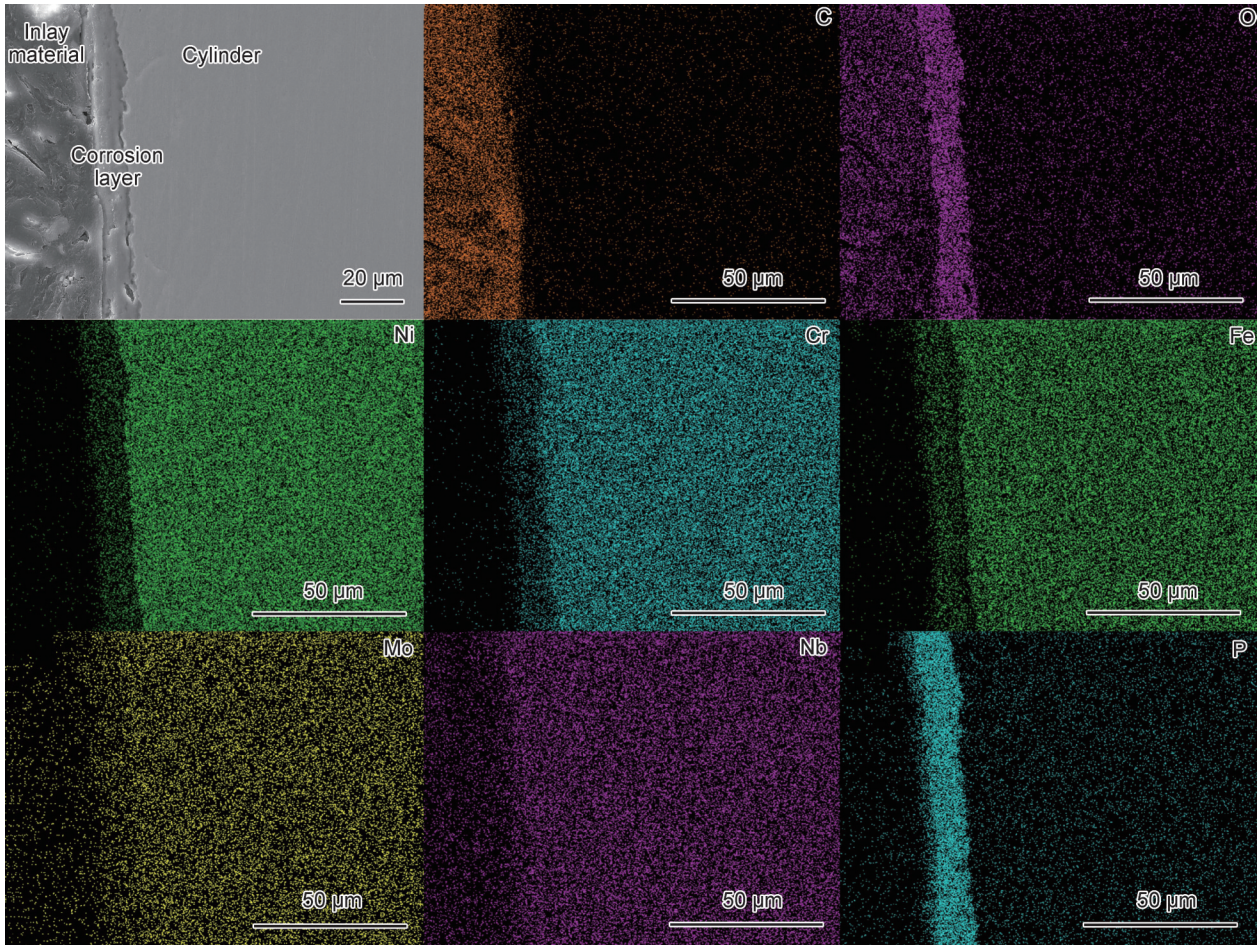


图 10 筒体内表面腐蚀层的微观组织及面扫描结果

Fig.10 Microstructure and area scan results of corrosion layer on the inner surface of cylinder body

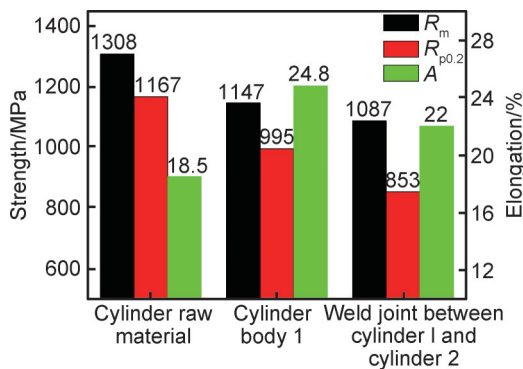


图 11 筒体原材料、服役后筒体 1、筒体 1 与筒体 2 焊接接头处的拉伸性能结果

Fig.11 Tensile properties results of cylinder raw materials, cylinder body 1, and welded joint between cylinder 1 and cylinder 2

(Ni₃(Al, Ti))相, 这些相的尺寸、数量等决定了合金的力学性能水平。当 GH4169 合金在 650 °C 下长期应用时, γ'' 相会集聚、粗化, 并向 δ 相(同样为 Ni₃Nb 相, 但晶体结构与 γ'' 相不同)转变, 材料强度随之降低^[19-20]。本研究中反应器的使用温度范围基本上在

626 °C 以内, 因而其筒体的力学性能损失程度较低。

4 结论

(1) GH4169 合金筒体运行时的腐蚀过程主要为 Ni、Cr、Fe 等元素的外流以及 O、P 等元素的侵入, 腐蚀产物为金属元素的氧化物、磷酸盐等; 筒体厚度尺寸损失速率在 0.005~0.255 $\mu\text{m}/\text{h}$ 之间。

(2) 筒体与连接件焊接接头处存在应力腐蚀开裂, 经计算裂纹扩展速率为 $5.25 \times 10^{-3} \text{ mm}/\text{h}$, 连接件侧的裂纹经 762 h 贯穿连接件侧壁, 经 895 h 后筒体侧的裂纹贯穿筒体侧壁。

(3) GH4169 合金筒体与不锈钢栅板焊接接头处裂纹的形成与不同合金之间的电偶腐蚀、缝隙腐蚀以及焊缝根部应力集中有关。

(4) GH4169 合金筒体在 200~626 °C 区间蔗糖混合溶液下运行 2000 h 后, 其抗拉强度、屈服强度、伸长率由使用前的 1308、1167 MPa、18.5% 分别转变为 1147、995 MPa、24.8%, 强度损失较小。

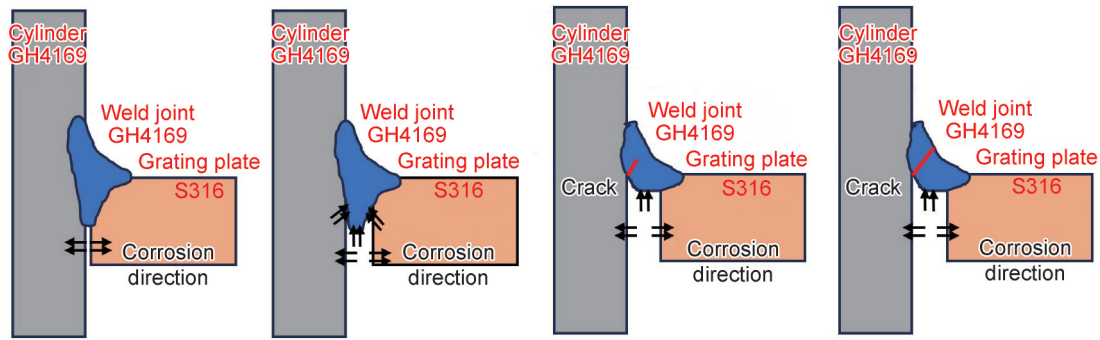


图12 筒体与栅板焊接接头处裂纹形成过程示意图

Fig.12 Schematic diagram of crack formation process at welding joint between cylinder body and grid plate

参考文献

- [1] 张丽, 韩恩厚, 关辉, 等. 超临界水氧化环境中材料腐蚀的研究现状[J]. 材料导报, 2001, 15(5): 8-10.
ZHANG L, HAN E H, GUAN H, et al. Corrosion of materials in supercritical water oxidation conditions [J]. Materials Reports, 2001, 15(5): 8-10.
- [2] FAUVEL E, JOUSSOT-DUBIEN C, GUICHARDON P, et al. A double-wall reactor for hydrothermal oxidation with supercritical water flow across the inner porous tube [J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2004, 28(1): 47-56.
- [3] 刘云帆, 雷贤良, 苟灵通, 等. 金属材料在超临界水中动态腐蚀特性[J]. 材料工程, 2023, 51(11): 61-70.
LIU Y F, LEI X L, GOU L T, et al. Dynamic corrosion characteristics of metal materials in supercritical water [J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(11): 61-70.
- [4] GUO S W, XU D H, LI Y H, et al. Corrosion characteristics and mechanisms of typical Ni-based corrosion-resistant alloys in sub- and supercritical water [J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2021, 170(1): 105138.
- [5] ROBERTSON J. The mechanism of high temperature aqueous corrosion of stainless steels [J]. Corrosion Science, 1991, 32(4): 443-465.
- [6] GUO S, XU D, LIANG Y, et al. Corrosion characteristics of typical Ni-Cr alloys and Ni-Cr-Mo alloys in supercritical water: a review [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(42): 18727-18739.
- [7] 马姝丽, 罗英, 张强, 等. 候选材料在 650 °C 超临界水中的腐蚀行为研究 [J]. 原子能科学技术, 2014, 48(3): 416-421.
MA S L, LUO Y, ZHANG Q, et al. Study on corrosion behavior of candidate materials in 650 °C supercritical water [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(3): 416-421.
- [8] TEYSSEYRE S, WAS G S. Stress corrosion cracking of austenitic alloys in supercritical water [J]. Corrosion, 2006, 62(12): 1100-1116.
- [9] 张乃强, 岳国强, 吕法彬, 等. Inconel 625 合金在高温水蒸气环境中应力腐蚀开裂裂纹扩展速率研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2017, 37(1): 9-15.
ZHANG N Q, YUE G Q, LYU F B, et al. Crack growth rate of stress corrosion cracking of Inconel625 in high temperature steam [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2017, 37(1): 9-15.
- [10] FOURNIER L, DELAFOSSE D D, BOSCH C, et al. Stress corrosion cracking of nickel base superalloys in aerated supercritical water [C] //2001 NACE Corrosion Conference. Houston: NACE International, 2001: 01361.
- [11] 曾祥荣, 廖传华, 王常青, 等. 在超临界水氧化系统中长期服役后 316L 不锈钢的微观形貌 [J]. 腐蚀与防护, 2022, 43(11): 13-16.
ZENG X R, LIAO C H, WANG C Q, et al. Micro morphology of 316L stainless steel after long-term service in supercritical water oxidation system [J]. Corrosion & Protection, 2022, 43(11): 13-16.
- [12] THOMAS L E, OLSZTA M J, JOHNSON B R, et al. Microstructural characterization of primary water stress-corrosion cracks in alloy 182 welds from PWR components and laboratory tests [C] //Proceedings of the 14th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-water Reactor, 2009.
- [13] 王琳琳, 侯坤磊, 查向东, 等. 几种合金在 450 °C/23 MPa 超临界水氧化环境中腐蚀行为研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(1): 204-214.
WANG L L, HOU K L, ZHA X D, et al. Corrosion behavior of several alloys in supercritical water oxidation environment at 450 °C/23 MPa [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024, 53(1): 204-214.
- [14] RODRIGUEZ D, MERWIN A, KARMIOŁ Z, et al. Surface chemistry and corrosion behavior of Inconel 625 and 718 in subcritical, supercritical, and ultrasupercritical water [J]. Applied Surface Science, 2017, 404: 443-451.
- [15] 岳国强. 超临界水环境中电站锅炉管材料应力腐蚀开裂行为研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
YUE G Q. Stress corrosion cracking behavior in supercritical water for the materials of boiler tube in power plant [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [16] 褚武扬, 乔利杰, 李金许等. 氢脆和应力腐蚀 [M]. 北京: 科学出

- 出版社, 2013.
- CHU W Y, QIAO L J, LI J X, et al. Hydrogen embrittlement and stress corrosion cracking[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [17] 但体纯, 吕战鹏, 王俭秋, 等. 690 合金在高温水中的应力腐蚀裂纹扩展行为[J]. 金属学报, 2010, 46(10): 1267-1274.
- DAN T C, LYU Z P, WANG J Q, et al. Crack growth behavior for stress corrosion cracking of 690 alloy in high temperature water [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(10): 1267-1274.
- [18] REBAK R B, SZKLARSKA-SMIALOWSKA Z. The mechanism of stress corrosion cracking of alloy 600 in high temperature water[J]. Corrosion Science, 1996, 38(6): 971-988.
- [19] LU X D, DU J H, DENG Q. High temperature structure stability of GH4169 superalloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 559: 623-628.
- [20] DU J, LU X, DENG Q, et al. Progress in the research and manufacture of GH4169 alloy [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2015, 22(8): 657-663.
-
- 基金项目:**辽宁省应用基础研究计划项目(2023JH2/101300142);国家自然科学基金核技术创新联合基金(U226720033)
- 收稿日期:**2024-05-14; **录用日期:**2024-10-15
- 通讯作者:**朱成(1994—),男,助理研究员,博士,研究方向为高温合金的腐蚀与防护、轻质合金凝固技术,联系地址:沈阳市沈河区文化路72号师昌绪楼(110016),E-mail:zhucheng@imr.ac.cn
- (本文责编:张宝玲)