

变形量对 690 合金在核电一回路水环境中 电化学腐蚀行为的影响

赵瑞涛¹, 李晓刚¹, 程学群¹, 李成涛², 马明娟³, 袁佳梅⁴

(1. 北京科技大学 新材料技术研究院, 北京 100083; 2. 苏州热工研究院 电站寿命管理
研究中心, 江苏 苏州 215004; 3. 宝山钢铁股份有限公司 特钢事业部, 上海 200940;
4. 阳江核电有限公司 仪控部, 广东 阳江 529500)

摘要: **目的** 研究变形量对 690 合金电化学行为的影响。**方法** 采用动电位极化、电化学阻抗和高温高压浸泡实验, 结合扫描电子显微镜 (SEM)、X 射线光谱仪 (EDX) 和 X 射线光电子能谱 (XPS), 研究不同变形量的 690 合金传热管在核电模拟液中的腐蚀行为。**结果** 在常温常压下, 50% 变形量试样的自腐蚀电位比 25% 变形量试样正 140 mV, 维钝电流密度显著降低, 阻抗模值高出约 10 倍。高温高压下浸泡后, XPS 分析显示, 50% 变形量试样表面腐蚀产物膜中的 Cr_2O_3 含量远高于 25% 变形量试样, 其富 Cr 内层致密, 氧化层更厚。**结论** 50% 变形量的 690 合金表面形成的钝化膜及腐蚀产物膜对基体的保护作用更强。

关键词: 690 合金; 高温高压; 变形量; 电化学; XPS

中图分类号: TG172.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)03-0001-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.03.001

Effect of Rolling Deformation on the Electrochemical Behavior of 690 Alloy in Primary Water of Nuclear Power Plant Environments

ZHAO Rui-tao¹, LI Xiao-gang¹, CHENG Xue-qun¹, LI Cheng-tao², MA Ming-juan³, YUAN Jia-mei⁴

(1. Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. Plant Life Management Research Center, Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou 215004, China;
3. Special Material Sales Marketing Department, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd, Shanghai 200940, China;
4. Maintenance Instrumentation Control Department, Yangjiang Nuclear Power Co., Ltd, Yangjiang 529500, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the effect of rolling deformation on the electrochemical behavior of 690 Alloy. **Methods** Potentiodynamic polarization, electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and high temperature and pressure immersion tests, combined with scanning electron microscopy (SEM), X-ray spectroscopy (EDX) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) techniques, were used to investigate the corrosion behavior of 690 alloy heat transfer tubes with different degrees of deformation in the nuclear simulation solution. **Results** Under the atmospheric pressure, the corrosion potential of 690 alloy with 50% deformation was

收稿日期: 2014-10-21; 修订日期: 2015-02-09

Received: 2014-10-21; Revised: 2015-02-09

基金项目: 国家自然科学基金(U1260201); 国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2014CB643300)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(U1260201) and the National Basic Research Program of China(973 Program, 2014CB643300)

通讯作者: 程学群(1977—), 男, 湖北人, 博士, 副教授, 主要从事耐蚀材料研究。

Corresponding author: CHENG Xue-qun(1977—), Male, from Hubei, Ph. D., Associate professor, Research focus: corrosion resistant materials.

140 mV larger than that of 690 alloy with 25% deformation. Furthermore, the passive current density of the former was significantly declined and the impedance modulus was 10 times higher. After soaking at high temperature and high pressure, XPS results showed that when the experiential materials were immersed for 200 h, 690 alloy with 50% deformation had a higher Cr_2O_3 content in the corrosion product film than 690 alloy with 25% deformation, and its dense inner layer of Cr-rich oxide film was much thicker.

Conclusion The passivation film and corrosion products layer formed on the surface of alloy 690 with 50% deformation had a better protective effect on the substrate.

KEY WORDS: 690 alloy; high temperature and high pressure; deformation; electrochemistry; XPS

690 合金是典型的镍基耐高温腐蚀材料,由于具有高温塑性低、变形区间窄、变形抗力大等特点,被广泛用于石油化工和核电工业^[1]。应用于核电蒸汽发生器的 690 合金 U 形传热管,是百万千瓦级核电机组蒸汽发生器使用的核一级关键部件,制造工艺复杂,尤其是热加工工艺要求苛刻^[2]。此前,我国核电站用传热管主要由法国、日本、瑞典 3 个国家制造。

有关 690 合金耐腐蚀性能的研究已有大量报道^[3-6]。杨武^[7]、Peng^[8-9]、刘飞华^[10]、Dan^[11]等人就铅元素和 pH 值对 690 合金应力腐蚀的行为影响,采用常温常压电化学方法开展了深入研究。韩恩厚研究团队^[12-13]深入研究了划伤对 690 合金在高温含氧水中的应力腐蚀裂纹萌生、局部腐蚀的影响。Martinez-Villafane^[14]探究了晶间碳化物存在时对 690 合金抗应力腐蚀开裂产生的影响。文献^[15]和^[16]研究了材料在核电模拟水环境中的电化学行为,并应用 EIS 和 Mott-Schottky 曲线认识膜的电化学和电子特性等。冷轧变形作为 690 合金管材制成成品管的最后轧制工艺,不可避免地会对管材基体组织结构、晶粒大小以及碳化物分布造成不同程度的影响,由此引起的合金电化学行为差异普遍存在,对此国内外尚无研究和报道,因此有必要研究变形量对 690 合金在模拟核电一回路中电化学腐蚀行为的影响。

文中采用电化学技术、高温高压浸泡实验以及高分辨物理检测手段,研究了不同变形量 690 合金在核电高温高压水模拟液中的腐蚀行为,初步探讨了不同变形量对电化学腐蚀过程和腐蚀机理的影响。研究结果可为新型 690 合金的研发提供设计依据,并为其服役安全性评估提供理论指导。

1 试验

1.1 材料

选用壁厚 1.08 mm、外径 19.05 mm 的 690 合金

管,其元素组成(以质量分数计)如下:C 0.02%, Si 0.06%, Mn 0.04%, P 0.007%, S 0.0005%, Fe 9.3%, N 0.008%, Cr 29.59%, Ni 余量。冷轧变形量分别为 25% 和 50%。

用线切割方法在 690 合金管材上截取 60 mm 长的圆管,经丙酮浸泡超声除油后,用 SiC 水砂纸将两端横切面研磨至金属光泽,再用酒精清洁,冷风吹干。之后,用管式加热炉在 1100 °C 固溶热处理 5 min,水淬,再经 715 °C 回火 10 h 并水淬(TT 处理),备用。

实验溶液模拟压水堆核电站一回路水环境,采用硼酸、一水氢氧化锂与超纯水配制成 B 和 Li 质量浓度分别为 1100 mg/L 和 2.5 mg/L 的水溶液。

1.2 试验方法

通过线切割从 TT 处理前后的 690 合金管材上截取 10 mm×5 mm×1.08 mm 的试样,镶样后,用水磨砂纸打磨至 2000[#],机械抛光至镜面。之后,经浓盐酸活化和甲醇清洗,用 2% 溴和 98% 甲醇(均为体积分数)的混合溶液浸蚀,利用光学显微镜观察金相组织。

电化学试样尺寸为 10 mm×5 mm×1.08 mm,点焊引出铜导线,用环氧树脂封样,露出 0.5 cm² 的工作表面。用 SiC 水砂纸逐级打磨至 1500[#],然后用酒精擦洗除油,去离子水清洗,冷风吹干,待用。电化学试验在 PARSTAT 2273 电化学工作站上进行,采用经典的三电极体系,辅助电极为铂电极,参比电极选用饱和甘汞电极(SCE)。待开路电位稳定后进行电化学阻抗谱测试,频率范围为 100 kHz ~ 10 mHz,激励电位为 10 mV,用 ZSimpWin 软件对抗阻参数进行拟合。两种变形量样片的动电位极化曲线以 1 mV/s 的扫描速率检测,电位扫描区间为 -0.3 ~ 1.3 V。

高温高压浸泡试样为高 100 mm 的圆环柱,经打磨抛光、盐酸活化和甲醇清洗后,待用。高温高压浸泡实验在容积 3 L 的静态高压釜中进行,实验温度为 325 °C,压力为 15 MPa,实验时间 200 h。浸泡结束后,待高压釜冷却,取出试样,用冷风吹干。利用 FEI

Quanta 250 型环境扫描电镜观察试样表面的腐蚀形貌,并用 Ametek Apollo-X 型 EDX 能谱分析仪分析腐蚀产物的元素组成。采用岛津 KRATOS AMICUS 型 X-射线光电子能谱仪,利用 AlK α ,在 50 eV 作用下检测两种变形量 690 合金试样的表面腐蚀产物膜。

2 结果与讨论

2.1 金相组织

两种变形量 690 合金的金相组织如图 1 所示。两种试样均为典型的奥氏体相,并有一定数量的孪晶。未经 TT 处理的两种试样能看到扁长状的晶粒组织,并且存在明显的带状偏析行为,这为 TT 处理再结晶形核提供了场所。TT 处理后,两种试样在晶界及晶内均分布着碳化物,但是 50% 变形量试样的碳化物分布较 25% 变形量试样更为均匀,并且晶粒细小。晶粒组织结构的变化以及碳化物的分布可能会影响材料的耐蚀性能^[17]。

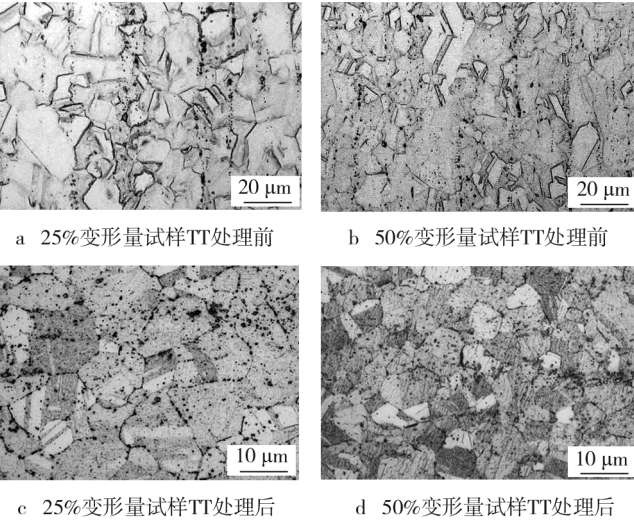


图 1 690 合金微观组织金相图

Fig. 1 Metallographic microstructure of 690 alloy: a) 25% deformation processing, before TT; b) 50% deformation processing, before TT; c) 25% deformation processing, after TT; d) 50% deformation processing, after TT

2.2 动电位极化

图 2 为两种变形量的 690 合金在核电一回路模拟水溶液中的极化曲线,表 1 为 Tafel 拟合结果。由表 1 数据可以看出,两种变形量的 690 合金试样点蚀电位非常接近,25% 变形量的 690 合金自然腐蚀电位相对更负。两种变形量的试样都存在明显的钝化区,

25% 变形量试样的维钝电流密度是 50% 变形量试样的 5 倍。

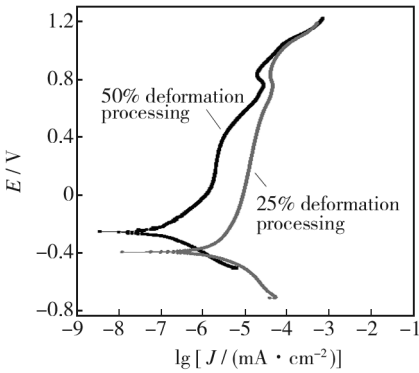


图 2 不同变形量的 690 合金在核电一回路水环境模拟液中的动电位极化曲线

Fig. 2 Potentiodynamic polarization curves of 690 alloy with different deformation in simulated solution for nuclear power circuit water environment

表 1 动电位极化曲线参数

Tab.1 The parameters of potentiodynamic polarization curves

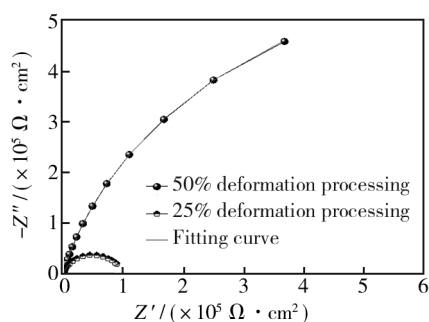
Material	E_{corr}/V	E_{b}/V	$J'_{\text{p}}/(\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$
25% deformation processing	-0.255	1.12	0.838
50% deformation processing	-0.399	1.10	4.19

2.3 电化学阻抗谱

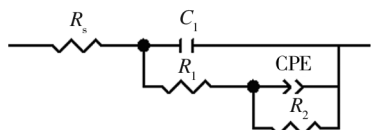
图 3a 是不同变形量的 690 合金在核电一回路水环境模拟液中的电化学阻抗谱。可以看出,两种变形量的 690 合金的阻抗谱相似,均由一个半圆弧组成,但是 50% 变形量试样的 Nyquist 曲线圆弧半径远大于 25% 变形量试样。采用如图 3b 所示的等效电路对 Nyquist 曲线进行拟合。其中, R_s 代表溶液欧姆电阻; C_1 和 R_1 分别代表表面钝化膜的电容和电阻; C_1 与钝化膜中的缺陷有关,其值越大表明钝化膜中的缺陷越多; R_2 表示界面电荷转移电阻,其值越大表明钝化膜的稳定性越好;CPE 是界面双电层电容,该参数与表面活跃区域面积有关,其值越小表明钝化膜中活跃的点越少^[18—19]。CPE 是考虑了弥散效应、表面粗糙度等而引入的常相位角元件^[20],在等效电路中用 CPE 来代替纯电容元件,其阻抗 Z_Q 可用式(1)计算。式中的 Y_0 和 n 为 CPE 常数, n 为弥散效应度, $0 < n < 1$ 。

$$Z_Q = (j\omega)^{-n}/Y_0 \tag{1}$$

电化学阻抗谱拟合曲线与实际阻抗谱有较好的



a 电化学阻抗谱



b 等效电路

图 3 不同变形量的 690 合金在模拟液中的电化学阻抗谱和等效电路

Fig. 3 Electrochemical impedance spectroscopy and equivalent circuit of 690 alloy with different deformation in simulated solution

重合性。根据拟合的参数可知,两种变形量的 690 合金表面钝化膜的电阻 R_1 和 C_1 基本相当,这表明两种变形量试样表面钝化膜本身的抗腐蚀能力基本相当;但是 50% 变形量试样的 R_2 ($1470 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$) 和 n 值 (0.81) 都大于 25% 变形量试样 ($R_2 = 98.6 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$, $n = 0.75$)。有研究表明^[21], n 值和 R_2 与钝化膜致密性密切相关, n 值和 R_2 越大,则钝化膜越致密。由此认为,50% 变形量的 690 合金表面形成的钝化膜更加致密、均匀,钝化膜稳定性更好。这是因为随着变形量的增加,合金内部位错密度增大,新形成的晶粒更容易在原有的晶粒表面形核,再结晶晶粒长大的同时,有些孪晶把原始晶粒碎化成小晶粒,在孪晶处产生再结晶并且向晶内扩展;到一定程度后,开始在晶内形核,变形量越大,再结晶就越容易发生,得到的晶粒组织就越均匀^[22]。在常温常压环境下,本实验的结果说明 690 合金在较大的变形量下再结晶过程更加充分,得到的组织更加均匀,晶粒细小,并且形成的钝化膜也很致密,对基体起到了明显的保护作用。

2.4 高温高压浸泡实验

图 4 为不同变形量的 690 合金在高温高压核电模拟液中浸泡前和浸泡 200 h 后的形貌。浸泡 200 h 后,两种试样表面均生成了金黄色腐蚀产物薄层。

图 5 是两种变形量的 690 合金试样在高温高压

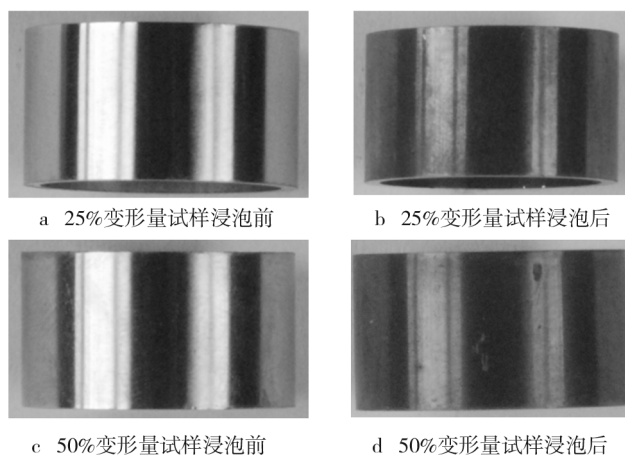
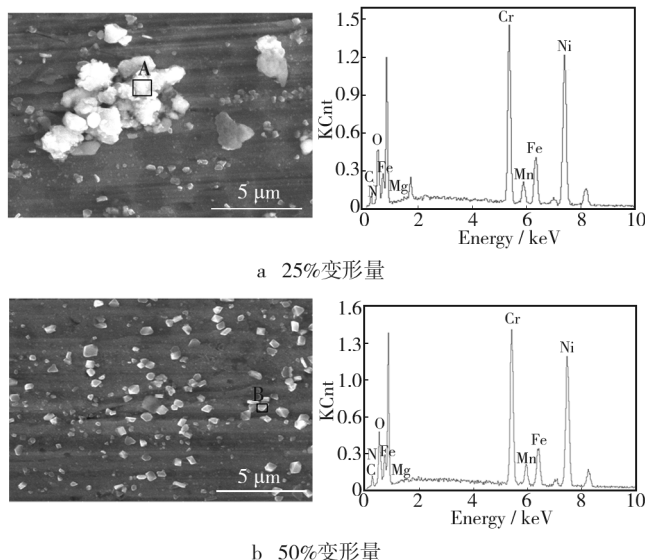


图 4 不同变形量 690 合金试样浸泡前后的形貌

Fig. 4 Morphology of 690 alloy specimens with different deformation before and after soaking: a) 25% deformation, before soaking; b) 25% deformation, after soaking; c) 50% deformation, before soaking; d) 50% deformation, after soaking

一回路模拟液水环境中浸泡 200 h 后的腐蚀形貌和 EDX 分析结果。两种变形量试样浸泡后,表面形成的腐蚀产物生长聚集状态有明显差异:25% 变形量试样表面的腐蚀产物有团簇现象,且颗粒粗大;50% 变形量试样表面的腐蚀产物分散均匀,且颗粒较小。EDX 能谱分析结果(见表 2)表明,两种变形量的 690 合金试样表面生成的腐蚀产物所含元素种类和含量都基本相同。表面的大颗粒疏松层主要是 Fe 和 Ni 的氧化物,内层致密层的细小颗粒主要是富 Cr 的氧化物^[23]。



b 50%变形量

图 5 试样浸泡后的 SEM 形貌与 EDX 能谱

Fig. 5 SEM topography and EDX analysis of specimen after soaking: a) 25% deformation; b) 25% deformation

表 2 EDX 能谱分析结果

Tab.2 Analysis results of the EDS spectra

Area	Element content/at%			
	O	Fe	Cr	Ni
A	13.22	8.01	24.30	42.39
B	12.78	9.04	23.89	41.92

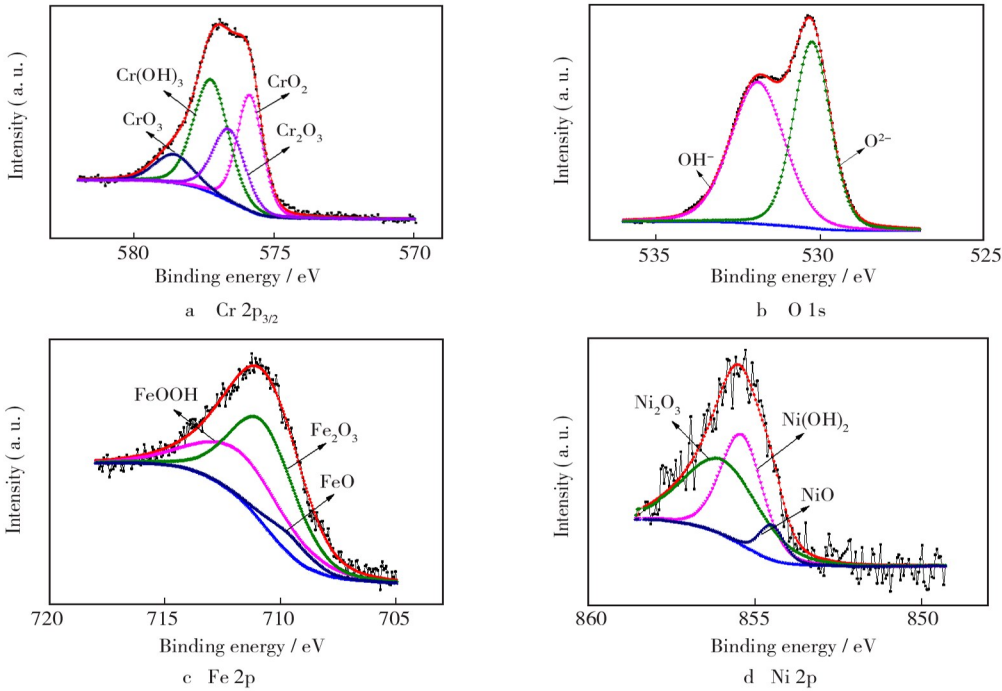


图 6 25% 变形量 690 合金浸泡 200 h 后的腐蚀产物 XPS 分析

Fig.6 XPS analysis of corrosion products of 690 alloy with 25% deformation after soaking for 200 h

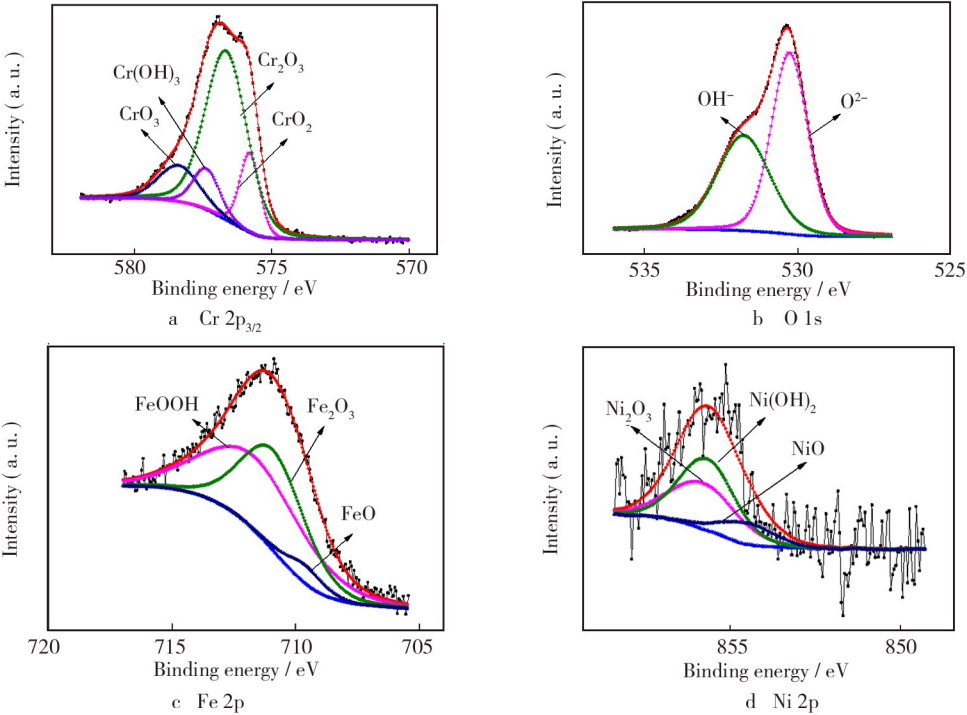


图 7 50% 变形量 690 合金浸泡 200 h 后的腐蚀产物 XPS 分析

Fig.7 XPS analysis of corrosion products of 690 alloy with 50% deformation after soaking for 200 h

进一步对两种变形量试样经高温高压浸泡后的表面腐蚀产物膜进行 XPS 分析,结果分别见图 6 和图 7,分峰拟合数据见表 3。由表 3 数据可见,50% 变形量试样的腐蚀产物膜中的 Cr₂O₃ 含量远高于 25% 变形量试样,而 Fe₂O₃ 含量低于 25% 变形量试样。根据 Robertson^[24—25] 从高温蒸汽和高温水中氧化物生长相

表 3 XPS 分峰数据
Tab.3 Data of the XPS peaks

Spectrum	Ingredient	Peak value /eV	25% deformation processing		50% deformation processing	
			Peak area	Proportion/%	Peak area	Proportion/%
Cr 2p _{3/2}	CrO ₂	576.3	8990.83	28.87	8294.8	14.08
	Cr ₂ O ₃	576.8	6969.36	22.38	37 067.2	62.92
	CrO ₃	578.2	3326.28	10.68	7777.7	14.08
	Cr(OH) ₃	577.3	11 851.48	38.06	5767.7	9.79
Fe 2p	FeOOH	711.8	7698.77	37.53	12 980.1	52.22
	Fe ₂ O ₃	710.9	11 414.32	55.64	10 784.4	43.38
	FeO	709.4	1402.84	6.84	1093.5	4.40
Ni 2p	Ni ₂ O ₃	855.8	3685.34	41.35	1159.5	37.86
	Ni(OH) ₂	855.6	2994.51	50.89	1478.1	48.26
	NiO	854.3	562.53	7.77	425.3	13.89
O 1s	O ²⁻	530.3	44 282.71	47.21	64 402.0	56.49
	OH ⁻	531.8	49 525.44	52.79	49 600.7	43.51

似性推理的模型,不锈钢表面氧化膜内层的生长是由于水穿氧化物微孔的作用导致,根据尖晶石点阵中金属离子的扩散速率,Cr 和 Ni 比 Fe 的迁移慢,因而在内层富集;外层的生长则主要通过铁离子沿氧化物晶界向外扩散实现。韩恩厚等人的研究已证明^[26],690TT 合金在模拟一回路高温高压水环境中浸泡后,氧化膜由外层、中间层和内层构成:外层是分散的尖晶石结构大颗粒氧化物,富含 Ni 和 Fe;中间层是致密的尖晶石结构小颗粒氧化物,富含 Cr;内层是均匀连续的氧化物,富含 Cr。因此,中间层和内层的氧化物才能对基体起到良好的保护作用。

3 结论

- 1) 经过 TT 处理后,50% 变形量 690 合金试样的晶粒比 25% 变形量的更细小、均匀,碳化物分布也较为均匀。
- 2) 在常温常压模拟一回路水环境中, 50% 变形量 690 合金的维钝电流密度比 25% 变形量试样小,电荷转移电阻较大,表明其表面形成的钝化膜更致密,对基体的保护作用更强。
- 3) XPS 分析结果显示,50% 变形量 690 合金在高温高压环境下生成的表面腐蚀产物 Cr₂O₃ 含量比 25% 变形量试样更高,腐蚀产物膜内层颗粒细小且均匀,紧密层较厚。

参考文献

[1] THUVANDER M,STILLER K. Microstructure of a Boron Con-

taining High Purity Nickel-based Alloy 690 [J]. Materials Science and Engineering: A,2000,281(1):96—103.

[2] 罗坤杰,张麦仓,王宝顺,等. Hastelloy G-3 合金热变形特性研究[J]. 稀有金属材料与工程,2011,40(4):605—609.

LUO K J,ZHANG M C,WANG B S,et al. Research on Hot Deformation Behavior of Hastelloy G-3 Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering,2011,40(4):605—609.

[3] CHEN Y Y,CHOU L B,SHIH H C. Factors Affecting the Electrochemical Behavior and Stress Corrosion Cracking of Alloy 690 in Chloride Environments[J]. Materials Chemistry and Physics,2006,97(1):37—49.

[4] FRED H H,RAUL B R. The Role of Hydrogen and Creep in Intergranular Stress Corrosion Cracking of Alloy 600 and Alloy 690 in PWR Primary Water Environments—A Review [C]//Proc 2nd Int Conf on Environment-induced Cracking of Metals. Holland:Elsevier,2004.

[5] AHN S J,RAO V S,KON H S,et al. Effects of PbO on the Repassivation Kinetics of Alloy 690[J]. Corrosion Science,2006(48):1137—1153.

[6] 孙荣鹏,王俭秋,韩恩厚. 乙醇胺 ETA 浓度对核电站二回路碳钢和镍基合金 690 腐蚀的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报,2013,33(2):97—103.

SUN R P,WANG J Q,HAN E H. Effects of ETA Concentration on Corrosion of Carbon Steel and Nickel Based Alloy 690 in Nuclear Power Plant on Secondary Side[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection,2013,33(2):97—103.

[7] 华惠中,黄春波. 800,600 和 690 合金的铅致应力腐蚀破裂[J]. 腐蚀与防护,2001,22(11):483—488.

HUA H Z, HUANG C B. Lead-induced Stress Corrosion

- Cracking of Alloys 800, 600 and 690 [J]. Corrosion and Protection, 2001, 22(11): 483—488.
- [8] PENG B, LU B T, LUO J L, et al. Investigation of Passive Films on Nickel Alloy 690 in Lead-containing Environments [J]. Journal of Nuclear Materials, 2008, 378(3): 333—340.
- [9] LU B T, LUO J L, PENG B, et al. Condition for Lead-induced Corrosion of Alloy 690 in an Alkaline Steam Generator Crevice Solution [J]. Corrosion, 2009, 65(9): 601—610.
- [10] 刘飞华, 李成涛, 张新, 等. 690合金的Pb致应力腐蚀行为[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(8): 1034—1039.
- LIU F H, LI C T, ZHANG X, et al. Lead-induced Stress Corrosion Behavior of Alloy 690 [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(8): 1034—1039.
- [11] DAN T, SHOJI T, LU Z, et al. Effects of Hydrogen on the Anodic Behavior of Alloy 690 at 60 °C [J]. Corrosion Science, 2010, 52(4): 1228—1236.
- [12] 孟凡江, 王俭秋, 韩恩厚, 等. 划伤690TT合金在高温含氧水中的应力腐蚀裂纹萌生研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2013, 33(5): 413—418.
- MENG F J, WANG J Q, HAN E H, et al. Study of Stress Corrosion Crack Initiation for Scratched Alloy 690TT in Oxygenated High Temperature Water [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2013, 33(5): 413—418.
- [13] MENG F J, HAN E H, WANG J Q, et al. Localized Corrosion Behavior of Scratches on Nickel-base Alloy 690TT [J]. Electrochimica Acta, 2011, 56(4): 1781—1785.
- [14] CASALES M, SALINAS-BRAVO V M, MARTINEZ-VILLAFANE A, et al. Effect of Heat Treatment on the Stress Corrosion Cracking of Alloy 690 [J]. Materials Science and Engineering: A, 2002, 332(1): 223—230.
- [15] 黄军波, 吴欣强, 韩恩厚, 等. 材料在高温高压水溶液中的电化学行为研究现状与进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2008, 28(6): 374—380.
- HUANG J B, WU X Q, HAN E H, et al. The Research Status and Progress of Electrochemical Behavior of Materials in High Temperature and High Pressure Aqueous Solution [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2008, 28(6): 374—380.
- [16] 韩恩厚, 吴欣强, 孙华, 等. 304不锈钢在模拟核电高温高压水中的电化学行为研究[C]//2010年全国腐蚀电化学及测试方法学术会议摘要集. 杭州: 中国腐蚀与防护学会腐蚀电化学及测试方法专业委员会, 2010.
- HAN E H, WU X Q, SUN H, et al. Research of Electrochemical Behavior of 304 Stainless Steel in Simulated Nuclear Power of High Temperature and High Pressure Water [C]//The 2010 National Conference Abstract Set on Corrosion Electrochemical and Test Method. Hangzhou: Professional Committee of Corrosion Electrochemical and Test Method of Chinese Corrosion and Protection Institute, 2010.
- [17] XIA S, ZHOU B X, CHEN W J. Grain Cluster Microstructure and Grain Boundary Character Distribution in Alloy 690 [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2009, 40A(12): 3016—3030.
- [18] 酆晓慧, 王俭秋, 韩恩厚, 等. 核级商用690合金和800合金在模拟压水堆核电站一回路高温高压水中的腐蚀行为研究[J]. 金属学报, 2012(8): 941—950.
- LI X H, WANG J Q, HAN E H, et al. Corrosion Behavior of Nuclear Grade Alloys 690 and 800 in Simulated High Temperature and High Pressure Primary Water of Pressurized Water Reactor [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012(8): 941—950.
- [19] 骆鸿, 李晓刚, 肖葵, 等. 304不锈钢在西沙海洋大气环境中的腐蚀行为[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(3): 332—338.
- LUO H, LI X G, XIAO K, et al. Corrosion Behavior of 304 Stainless Steel in the Marine Atmospheric Environment of Xisha Islands [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(3): 332—338.
- [20] JONSCHEER A K. Physical Basis of Dielectric Loss [J]. Nature, 1975, 253: 717—719.
- [21] 慕立俊, 张军, 赵文珍, 等. 气液两相流条件下 HCO_3^- 对J55钢腐蚀行为的影响[J]. 天然气工业, 2009, 29(7): 102—105.
- MU L J, ZHANG J, ZHAO W Z, et al. The Effect of HCO_3^- on the Corrosion Behavior of Steel J55 under the State of Gas-Liquid Two-phase Flow [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(7): 102—105.
- [22] 谭化超, 董建新, 张麦仓, 等. 690合金高温连续变形动态再结晶行为[J]. 北京科技大学学报, 2013(12): 12.
- TAN H C, DONG J X, ZHANG M C, et al. Dynamic Recrystallization Behavior of Inconel 690 during Hot Continuous Deformation [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013(12): 12.
- [23] 张志明, 王俭秋, 韩恩厚, 等. 打磨态690TT合金经不同时间浸泡后表面氧化膜结构分析[J]. 金属学报, 2011, 47(7): 823—830.
- ZHANG Z M, WANG J Q, HAN E H, et al. Analyses of Surface Oxide Films on Ground Alloy 690TT after Immersion for Different Times [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(7): 823—830.
- [24] STELLWAGS B. The Mechanism of Oxide Film Formation on Austenitic Stainless Steels in High Temperature Water

- [J]. Corrosion Science, 1998, 40(2): 337—370.
- [25] TERACHI T, FUJII K, ARIOKA K. Microstructural Characterization of SCC Crack Tip and Oxide Film for SUS 316 Stainless Steel in Simulated PWR Primary Water at 320 °C [J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2005, 42(2): 225—232.
- [26] 张志明, 王俭秋, 韩恩厚, 等. 电解抛光态 690TT 合金经

不同时间浸泡后表面氧化膜结构分析[J]. 金属学报, 2011, 47(7): 831—838.

ZHANG Z M, WANG J Q, HAN E H, et al. Analyses of Surface Oxide Films on Electro-polished Alloy 690TT after Immersion for Different Times [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(7): 831—838.

2015 广州国际表面处理展 5 月巨献

第十一届国际(广州)表面处理、电镀、涂装展览会(简称:SF EXPO 2015)将于2015年5月11—13日在广州保利世贸博览馆盛大举行,届时,表面处理行业年度盛典将再次聚焦业内所有人的目光。

SF EXPO 由中国表面工程协会电镀分会、中国表面工程协会涂装分会、广东省电镀行业协会及广东智展展览有限公司共同主办,是表面工程两大国家级协会唯一联合主办的国际表面处理展。十多年来,展会一直致力于推动表面处理科技创新和行业发展,为各会员企业及表面工程上下游企业搭建了一座贸易交流的稳固桥梁,成为表面处理技术工程师、采购商最青睐的交流平台。2012年,SF EXPO 通过国际展览业协会(UFI)认证,成为国际表面处理行业唯一通过UFI认证的行业盛会,展会的权威性和国际影响力得到全球公认。

SF EXPO 2015 亮点之一:参展企业

2015年企业报名参展踊跃,目前已有安美特、瓦格纳尔、固瑞克、诺里尔斯克、赛德克、亿鸿、普德、森吉斯玛泰等近200家国内外优秀表面处理供应商选择参展或预订展位。

SF EXPO 2015 亮点之二:同期会议

本届展会筹划并落实了多场行业高峰论坛和专题研讨会,重要同期会议包括:

1) 第三届国际表面处理发展高峰论坛; 2) 2015 汽车腐蚀防护质量控制体系说明暨研讨会

SF EXPO 2015 亮点之三:宣传推广

展会已与国内外的200多家行业媒体进行了深入合作,如:MFN、IPCM、WOMag、Engineering Review、THE INDUSTRIAL COATING 以及《表面技术》、《中国电镀》、《汽车防腐蚀》、《电镀与精饰》、《材料保护》、《电镀与涂饰》、《现代涂料与涂装》、中国涂装设备网等几乎所有国内专业媒体。同时,主办方还加强了专业报刊和新媒体的开发及应用,随着展会官方微信、Twitter、Facebook、Linkedin 的同步推进,SF EXPO 2015 取得了显著的宣传效果。

SF EXPO 2015 亮点之四:专业观众

本届展会的专业观众数量及质量将创历史新高,已注册参观的重点观众包括:中航工业第一集团、中国重汽集团、奇瑞汽车、上海大众汽车、比亚迪、东风汽车、长安汽车、TCL 集团、美的电器、格力电器、荣事达、大洋摩托及全国各地知名电镀加工园区和五金基地,截止发稿日,已有2000多家企业共计6000余人进行了参观预登记。

SF EXPO 2015 亮点之五:资源整合

展会将继续秉承开放合作的姿态,聚集众多优势资源,助推行业发展。在两大国家级协会的牵头主办下,各地方表面处理协会给予展会大力支持,积极带动会员企业前来参展参观。与此同时,展会还特别加强了同表面处理应用产业基地的合作,目前已与广东省汽车行业协会、佛山市南海区铝型材行业协会、佛山市门窗行业协会、广州花都汽车产业基地及广东省内10多家电镀工业园区建立了合作关系,全面组织地方优势产业赴会参观采购。

关注展会最新进展,请登录官方网站:www.sf-expo.cn,或拨打主办方热线电话:020-29193588,咨询了解。