

DOI: 10.19666/j.rlfed.202212217

T92 钢中 Laves 相在内压蠕变过程中析出特征和电化学响应行为研究

李季, 唐丽英, 周荣灿, 张红军, 李江
(西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

[摘要] 为了研究将电化学方法用于马氏体耐热钢蠕变损伤评估的可用性, 选取不同蠕变损伤程度的内压蠕变 T92 钢试样, 对其蠕变过程中的显微组织演变, 尤其是 Laves 相的析出行为进行系统的表征和分析, 同时对 Laves 相在碱性体系中的电化学响应行为开展系统研究。根据扫描电镜 (SEM)、透射电镜 (TEM)、电子探针 (EPMA) 等显微分析结果, T92 钢随内压蠕变过程出现了马氏体板条细碎化、晶内应变增大等特征, 同时 Laves 相迅速析出并长大, 其粒径和百分比均逐渐增大并出现团簇和元素偏聚。根据其在 NaOH 溶液中的动电位极化曲线可知, Laves 相可在浓强碱溶液中发生选择性溶解, 当 NaOH 浓度达到 8 mol/L 时, Laves 相选择性溶解的电流峰及对应电量值与蠕变损耗呈现较好的相关性。综上可知, T92 钢在强碱性溶液中的动电位极化曲线可以有效地反映 Laves 相的含量, 其电量值与 Laves 相含量变化一致, 并可进一步与试样老化程度等相关联, 有望作为一种无损检测技术用于现场管道的老化评估。

[关键词] T92 钢; Laves 相; 电化学响应; 极化电流; 蠕变损伤

[引用本文格式] 李季, 唐丽英, 周荣灿, 等. T92 钢中 Laves 相在内压蠕变过程中析出特征和电化学响应行为研究[J]. 热力发电, 2023, 52(8): 96-103. LI Ji, TANG Liying, ZHOU Rongcan, et al. Investigation on the precipitation characteristics and electrochemical responsibility of Laves phase during internal pressure creep test of T92[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(8): 96-103.

Investigation on the precipitation characteristics and electrochemical responsibility of Laves phase during internal pressure creep test of T92

LI Ji, TANG Liying, ZHOU Rongcan, ZHANG Hongjun, LI Jiang
(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to well evaluate the availability of electrochemical method using to detect the creep damage of martensitic heat resistant steel, a set of T92 internal pressure creep test samples with different creep damage degrees were selected. The microstructure evolution in the process of creep, especially the Laves phase precipitation behavior, was systematically characterized and analyzed; meanwhile, electrochemical response of Laves phase in alkaline were also investigated in detail. According to the scanning electron microscopy(SEM), transmission electron microscopy(TEM) and electron probe X-ray micro-analyzer(EPMA) results, the Laves phase in T92 precipitated and grew rapidly during the internal pressure creep process. Its particle size and area percentage gradually increased, clustered and with element segregated and redistributed. According to potentiodynamic polarization curve in NaOH solution, Laves phase can selectively dissolve in strong alkali solution. When the concentration of NaOH reaches 8 mol/L, the current peak and corresponding electric value of selective dissolution of Laves phase are well correlated with the internal pressure creep time. In conclusion, the potentiodynamic polarization curve of T92 in strongly alkaline solution can effectively reflect the content of Laves phase, varying in consistent with its electric quantity; and can further associate with creep life damage. It is promising to be used as

修回日期: 2022-12-28 网络首发日期: 2023-04-27

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2022JQ-400); 西安热工研究院有限公司自立科技项目 (TN-21-TYK24)

Supported by: Shaanxi Natural Science Basic Research Program (2022JQ-400); Independent Science and Technology Program of TPRI (TN-21-TYK24)

第一作者简介: 李季 (1985), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为火电、核电用金属材料性能, lij@tpri.com.cn.

a nondestructive testing technology for the creep life assessment of pipelines in the field.

Key words: T92 steel; Laves phase; electrochemical responsibility; polarization current; creep damage

T/P92 马氏体耐热钢 (T92 钢) 由于具有优异的力学性能, 在我国现有大容量、高参数超超临界燃煤发电机组中广泛应用, 是 600~620 °C 内高温承压部件的主要用材^[1-4]。

T92 钢在高温环境下长期服役过程中会析出 Laves 相, 其主要析出形式为 Fe₂Mo、Fe₂W 和 (Fe, Cr)₂(Mo, W), 并优先在 M₂₃C₆ 碳化物附近析出, 或单独以与晶粒保持共格的方式形核析出并以非共格的方式向相邻晶粒内部长大^[5-6]。Zhu 等人^[7]通过降低 N 和 C 的质量分数制备出仅含有 Laves 相的 Fe-9Cr-3Co-3W 合金来研究 Laves 相对于蠕变行为的影响, 研究表明, Laves 相的粗化会显著降低材料的蠕变断裂强度。Abe 等人^[8]系统研究了 9Cr-W 钢中 Fe₂W 型 Laves 相尺寸对蠕变速率的影响, 研究发现, 蠕变试验初期形成的细小 Fe₂W 会降低蠕变速率, 而蠕变后期 Fe₂W 会发生粗化, 增大了蠕变速率。由于 Laves 相具有较高的熟化速率、明显的“团簇”现象、且依附 M₂₃C₆ 碳化物析出的 Laves 相会与碳化物合并成为尺寸很大的析出相、诱发蠕变孔洞产生和 Z 相析出, 这均会导致部件材料力学性能劣化, 影响材料的强度和断裂敏感性^[9-10], 最终影响材料的蠕变寿命和部件的使用时间。因此, 及时获取马氏体耐热钢在高温服役过程中 Laves 相的析出行为和规律, 对于材料的强度预测、老化评估、寿命预测、部件安全性预测都具有重要意义。

目前 Laves 相尺寸及含量检测基本依赖于扫描电子显微镜或透射电子显微镜, 步骤复杂、耗时长, 需破坏待检部件进行取样。有研究表明, 9%~12%Cr 钢中的 Laves 相具有较好的电化学特性^[9-12], 这为利用电化学方法检测合金的老化程度和蠕变寿命提供了可能性。相对而言, 电化学检测以待测管样表面 (约 1 cm×1 cm 范围) 作为工作电极, 现场安装检测容器并连接电化学工作站, 具有测试速度快、不破坏部件等特点, 且电化学设备尺寸小、方便携带, 适用于现场检测。为揭示蠕变寿命损耗与极化电流密度间的响应关系, 本研究拟以 Laves 相质量分数为桥梁, 开展系统的研究和测试, 认识 Laves 相发生选择性溶解时的过程和机理。为电化学方法应用于 Laves 相的现场检测奠定理论基础, 并为准确地评估 9%~12%Cr 钢的老化状态提供一种新方法, 其有望大大节约机组检修的时间及经济成本。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

本文所用材料为 T92 (10Cr9MoW2VNbBN) 锅炉管, 规格为 $\Phi 76.0$ mm×12.0 mm, 热处理工艺为正火+回火, 实测化学成分见表 1, 均满足标准 ASME SA-213—2019 对 T92 新管的要求。

表 1 T92 钢的化学成分 w/%
Tab.1 Chemical composition of T92

元素	实测含量	ASME SA-213	元素	实测含量	ASME SA-213
C	0.098 0	0.07~0.13	Al	0.007 10	≤0.02
Mn	0.460 0	0.30~0.60	W	1.980 00	1.50~2.00
P	0.018 0	≤0.02	Ti	<0.005 00	≤0.01
S	0.005 3	≤0.01	Zr	<0.005 00	≤0.01
Si	0.280 0	≤0.50	H	0.000 36	n.s. ^①
Ni	0.190 0	≤0.40	O	0.007 40	n.s. ^①
Cr	8.590 0	8.50~9.50	Pb	<0.000 10	n.s. ^①
Mo	0.390 0	0.30~0.60	Sn	0.001 40	n.s. ^①
V	0.180 0	0.15~0.25	As	0.003 50	n.s. ^①
Nb	0.055 0	0.04~0.09	Sb	0.000 30	n.s. ^①
N	0.044 0	0.03~0.07	Bi	<0.000 01	n.s. ^①

①为 not specified (未指定)。

根据《电站锅炉管内压蠕变试验方法》(DL/T 369—2010) 的要求对上述管样展开内压蠕变试验, 内压蠕变试验温度为 600 °C、气体内压为 59 MPa、折算周向压力为 130 MPa。内压蠕变试验的 T92 钢试样共包括 6 组: 1 组为原始管样 (供货态), 1 组为蠕变爆破试样, 其余 4 组为蠕变中断试样。将相同温度和应力条件下蠕变爆破试样的寿命损耗定为 100.00%, 供货态试样定为 0, 对 4 组蠕变中断试样的蠕变寿命进行损耗折算, 试验时间和对应的蠕变寿命损耗信息见表 2, 管样编号依次为 S0—S5。

表 2 T92 钢内压蠕变试样信息
Tab.2 Information of the internal pressure creep test specimens

试样编号	试样状态	试验时间/h	蠕变寿命损耗%
S0	原始管样	0	0
S1	蠕变中断试样	1 699.5	7.07
S2	蠕变中断试样	5 000.0	20.80
S3	蠕变中断试样	12 776.5	53.14
S4	蠕变中断试样	18 659.5	77.61
S5	蠕变爆破试样	24 042.5	100.00

为了准确对比显微组织特征和电化学性能,在管样上取样时避开距管样两端 100 mm 内及爆口附近区域,避免管端约束和爆口处过度变形可能对材料蠕变损伤量的影响。

1.2 试验方法

分别使用激光共聚焦显微镜、扫描电子显微镜、透射电子显微镜、电子探针等对 T92 钢开展显微组织特征的研究;同时,采用电化学工作站对试样进行动电位极化试验,开展 T92 钢的极化行为研究。

电化学试验采用 T92 钢作为工作电极,将试样切成 10 mm×10 mm×5 mm 的块状,冷镶后保留 1 cm² 的测试面,逐级打磨至细度为 6.5 μm (2000 目),经清洗、干燥后用紫外固化胶对试样和镶料的缝隙处进行密封以防发生缝隙腐蚀,并用图像处理软件计算试样的实际面积。

采用 CHI 660 电化学工作站进行 T92 钢试样动电位极化曲线的测试,并在测试前进行 30 min 的开路电位 (OCP) 采集待电位稳定。开展动电位极化曲线测试时,电位扫描范围从 OCP 开始至析氧电位,扫描速率为 0.5 mV/s;恒电位极化实验设置在 -0.55 V (Ag/AgCl 电极,下同) 极化 8 h。所有试验均在室温下进行,每个试验重复至少 2 次。试验所采用的溶液为不同浓度的 NaOH 溶液,所有的溶液均由分析纯试剂和蒸馏水制得。

2 试验结果

2.1 显微组织分析

2.1.1 显微组织特征

图 1 为供货态 T92 钢试样的拼接三维电子背散射衍射 (electron backscattered diffraction, EBSD) 大面积 (600 μm×600 μm) 显微组织照片。

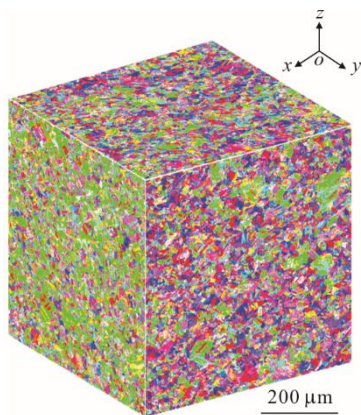


图 1 T92-S0 试样的 EBSD 三维照片
Fig.1 3D EBSD microstructure of T92-S0

由图 1 可见,供货态 T92 钢在各个方向的晶粒度基本相当,具有较好的均匀性,但晶粒的择优取向略有差异,在锅炉管外壁纵向面 (y 方向) 上的择优取向为<111>方向。

图 2 为 T92 钢试样在激光共聚焦显微镜下的组织形貌。从图 2 可见:供货态 T92 钢板条清晰,析出物较少;内压蠕变试验开始后,晶界和晶内的析出物开始出现,并随着蠕变时间的增加的进一步增加,颗粒物的尺寸也逐渐增大;在蠕变的后期,组织出现明显的细碎化,但即使是发生爆破的管样,依然显示出一定的马氏体板条特征,在所取试样中未观察到蠕变孔洞存在。

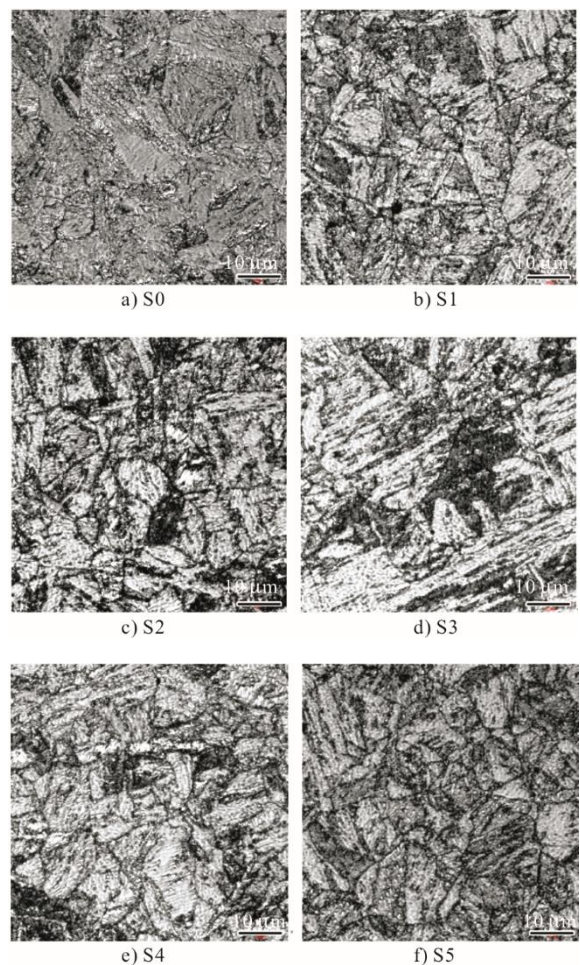


图 2 不同内压蠕变时间的激光共聚焦显微组织
Fig.2 Microstructure images of laser confocal microscope after internal pressure creep test

图 3 为 T92 钢试样的晶粒参照取向偏差角分布图,可显示晶粒的平均取向差及变形情况。由图 3 可见:随内压蠕变试验时间的延长,图中 S0—S4 试样的绿色高亮区域缓慢变多;在 S4、S5 中,高亮的绿色与蓝色区域之间可见大量浅绿色或黄绿色细

小区域，表明合金中存在大量微小变形区。在蠕变爆破试样 S5 中，浅绿色区域的分布最弥散均匀，表明此时的试样局部变形程度显著大于其他试样。

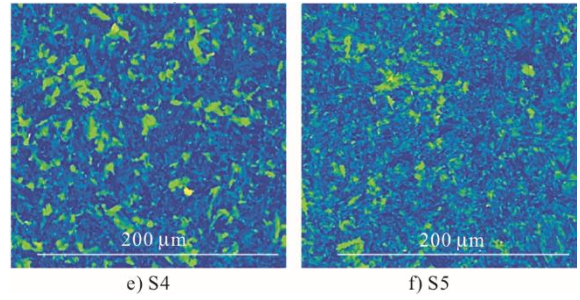
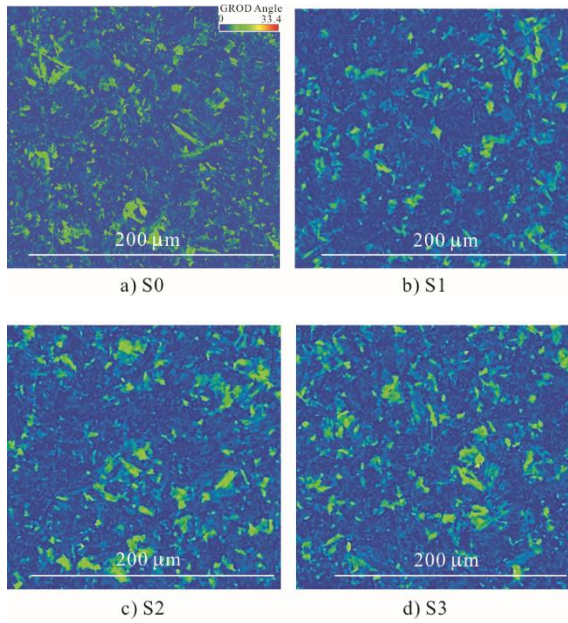
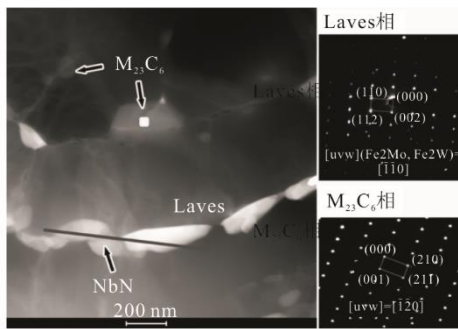


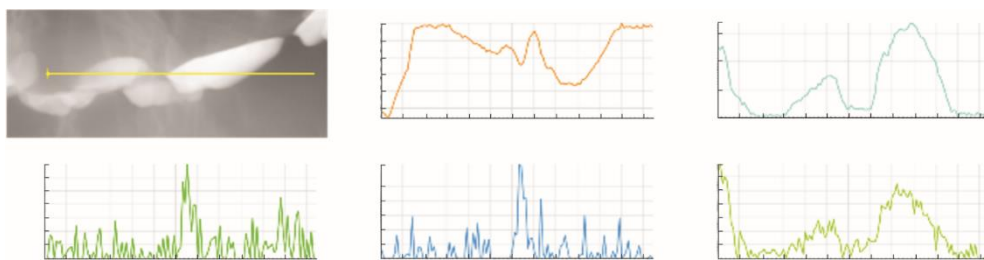
图 3 T92 钢试样的晶粒参照取向偏差统计
Fig.3 The grain reference orientation deviation statistical chart of T92

2.1.2 主要析出相鉴定

图 4 为 S1 中主要析出相的显微组织特征。结合图 4 所示的明场像照片、选区电子衍射照片和能谱线扫图谱可知，T92-S1 中的主要析出相包括初生氮化物 NbN、二次碳化物 $M_{23}C_6$ (M 主要为 Fe、Cr 或 Mo) 以及 Laves 相 (主要成分为 Fe_2Mo 、 Fe_2W)。其中，Laves 相在内压蠕变后开始析出，其尺寸、数量、分布特征等均是后续试验过程中值得关注的特征参数。



a) 析出相的明场像照片及对应的选区电子衍射花样



b) 析出相线扫的元素分布

图 4 T92-S1 中主要析出相
Fig.4 Main precipitates identification of T92-S1

2.1.3 Laves 相的显微组织特征

由于 Laves 相富含的 W 和 Mo 等元素原子序数较高，其背散射系数和背散射强度均较大，在背散射照片中为亮白色颗粒。在背散射模式下对不同蠕变阶段的 T92 钢试样中的析出相进行观察，如图 5

所示。由图 5 可见：未蠕变的样品表面没有白色颗粒析出 (图 5a)；在内压蠕变前期，Laves 相主要沿原奥氏体晶界析出 (图 5b)、图 5c)；随着内压蠕变时间的延长，多边形轮廓逐渐消失，Laves 相颗粒逐渐往孪晶界、板条界形核，析出范围进一步扩大。

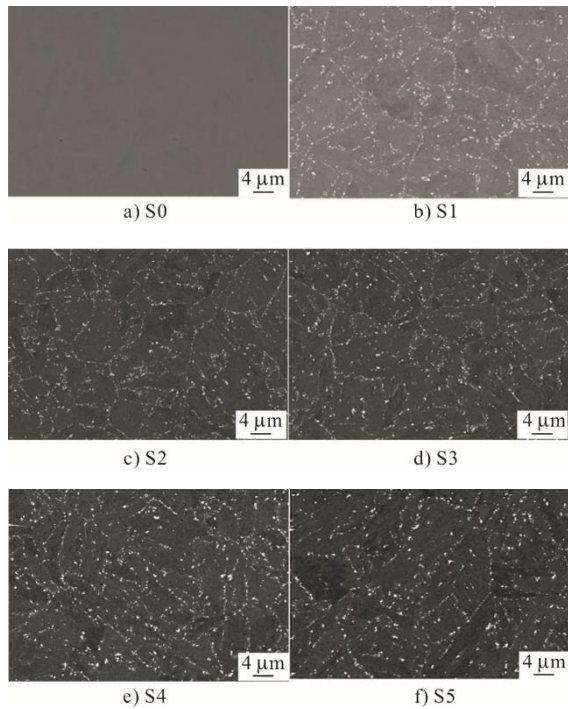


图 5 S0—S5 在 SEM 背散射模式下的微观形貌
Fig.5 The microstructure of S0—S5 in BSE mode

对每个样品随机选取 20 个不同位置拍摄 SEM 图像，并统计样品中 Laves 相颗粒的粒径大小，如图 6 所示。由图 6 可见，Laves 相颗粒的平均粒径在蠕变前期增长缓慢，中后期则迅速增大。这种粒径的增大一方面来自于内压蠕变试验过程中，Laves 相的长大和粗化；另一方面也与 Laves 相在后期出现“团簇”，而扫描电镜 2000× 视野中无法将单个颗粒加以区分有关。

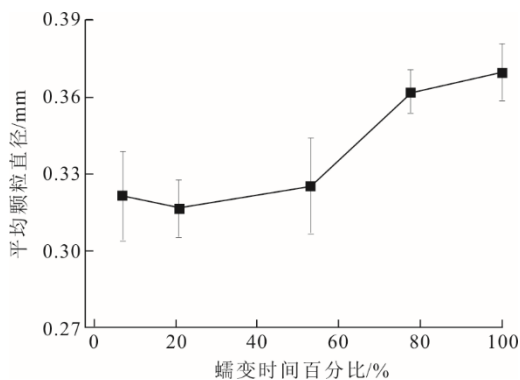


图 6 T92 钢试样中 Laves 相的颗粒平均直径变化
Fig.6 The mean particle diameter variation of Laves phase in T92

图 7 为采用电子探针 X 射线显微分析仪 (electron probe X-ray micro-analyzer, EPMA) 对 S0、S3、S5 试样表面的元素分布进行分析和成像。由图 7 可见：S0 试样由于未进行内压蠕变试验，从

SEM 图中未见表面白色颗粒析出，说明此时无 Laves 相；S3 和 S5 均能明显观察到白色析出物颗粒，且该析出相中富含 Fe、W 和 Mo，与图 4 中能谱线扫的结果一致；另外，Cr 元素主要在晶界、孪晶界、板条界等析出，且较为连续，主要为析出的 $M_{23}C_6$ (M 为 Cr、Fe)。从图 7 中 Mo、W 等元素的分布情况可以看出，Laves 相颗粒尺寸随内压蠕变时间延长增大明显，与图 6 中的变化趋势一致，团簇现象变得更为明显。

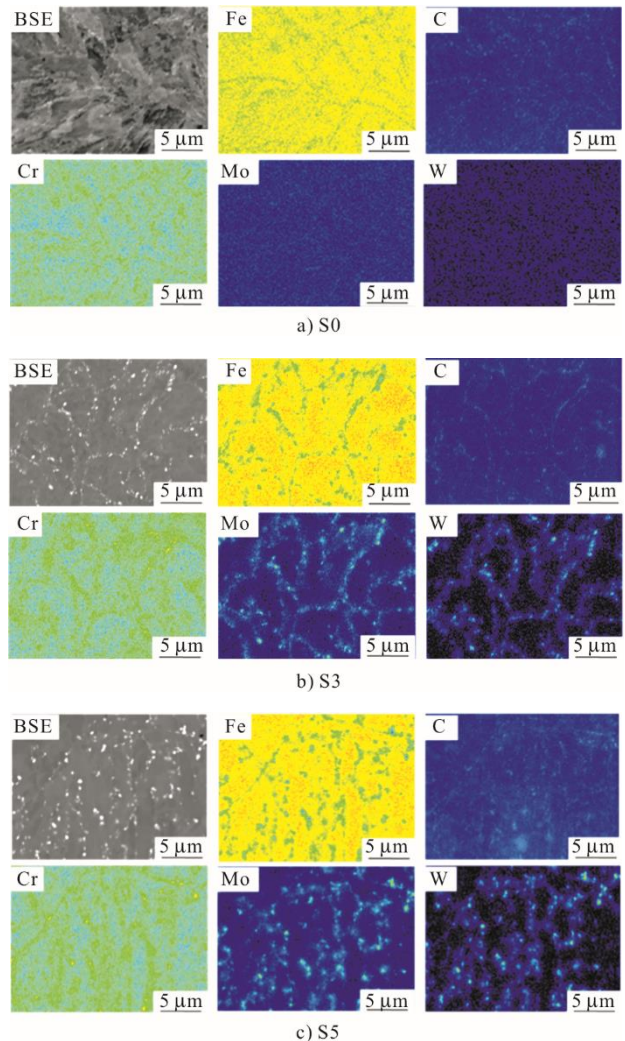


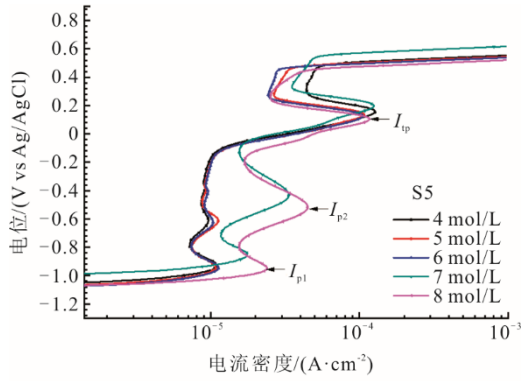
图 7 S0、S3、S5 表面微观形貌的 SEM 图及元素分布
Fig.7 The SEM images and the corresponding element distribution of S0, S3 and S5

2.2 电化学测试分析

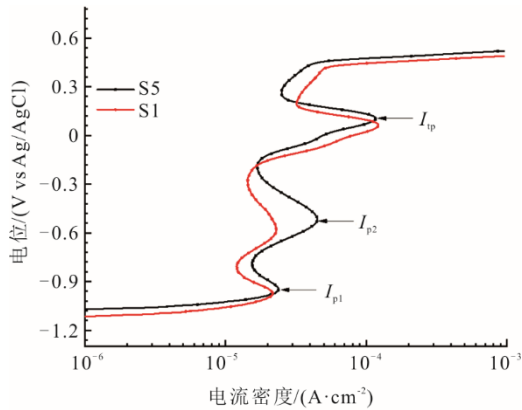
2.2.1 溶液体系的选择研究

由于 T92 钢对酸性介质较为敏感，易诱发电蚀、晶间腐蚀等其他局部腐蚀行为，且其选择性溶解过程易与腐蚀行为相耦合，因此本文选择碱性体系开展研究。

图 8 为 T92 钢试样在 NaOH 溶液中的动电位极化曲线。分别在 4~8 mol/L 的 NaOH 溶液中进行动电位阳极极化, 观察极化曲线中阳极电流峰的峰位和峰高的关系。由图 8 可见, T92 钢样品在不同浓度的 NaOH 溶液中均出现了 3 个溶解峰, 其中电位在 $-1.0 \sim -0.8 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$ 的电流峰为基体的溶解峰 I_{p1} , 电位在 $-0.8 \sim -0.2 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$ 的电流峰为 Laves 相的溶解峰 I_{p2} , 而极化曲线在 $0 \sim 0.3 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$ 内出现的电流峰 I_{tp} 对应基体的过钝化和碳化物的溶解峰。



a) S5 在 4~8 mol/L NaOH 溶液中



b) S1 和 S5 在 8 mol/L NaOH 溶液中

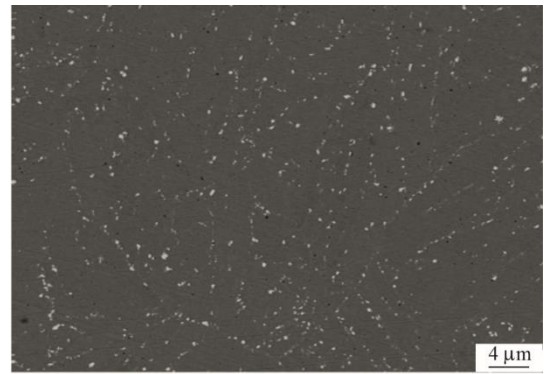
图 8 T92 钢在 NaOH 溶液中的动电位极化曲线

Fig.8 Dynamic polarization curves of T92 in NaOH solution

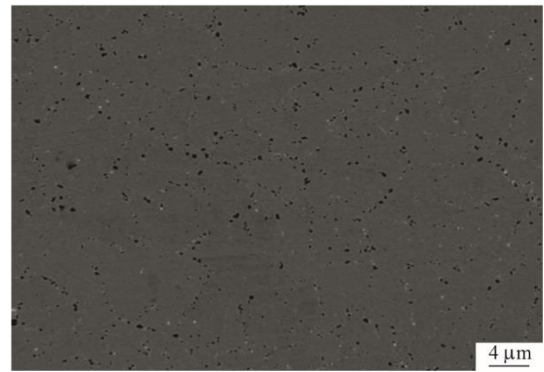
图 8a) 为 S5 在不同浓度的 NaOH 溶液中动电位极化曲线。由图 8a) 可见: 在较低浓度的 NaOH 溶液中, 极化曲线几乎重合, Laves 相不能完全溶解; 随浓度的增加, Laves 相溶解峰增大, 至 8 mol/L 时, I_{p2} 峰达到最大值, 可促进 Laves 相充分溶解。图 8b) 为 S1 和 S5 在 8 mol/L 的 NaOH 溶液中的动电位极化曲线。由图 8b) 可见, 该浓度下 S1 和 S5 的 Laves 相溶解峰出现了显著差异, 表明 Laves 相在 8 mol/L NaOH 溶液中的溶解量存在较大区别, 8 mol/L NaOH 溶液可以作为选择性溶解 Laves 相的目标溶液。

对图 8b) 中 8 mol/L NaOH 溶液中极化前后的 S5

试样进行 SEM 观察, SEM 形貌如图 9 所示。由图 9 可见, 极化前后, 试样表面的亮白色颗粒由弥散分布至基本消失, 并在原位置观察到溶解孔洞, 表明此时试样表面的 Laves 相已经发生了选择性溶解。



a) 极化前



b) 极化后

图 9 S5 极化前后的 SEM 形貌照片

Fig.9 SEM image of T92-S5 before and after polarization

2.2.2 8 mol/L NaOH 中 Laves 相的选择性溶解

图 10 为不同蠕变时间的 T92 钢试样在 8 mol/L NaOH 溶液中的动电位极化曲线。

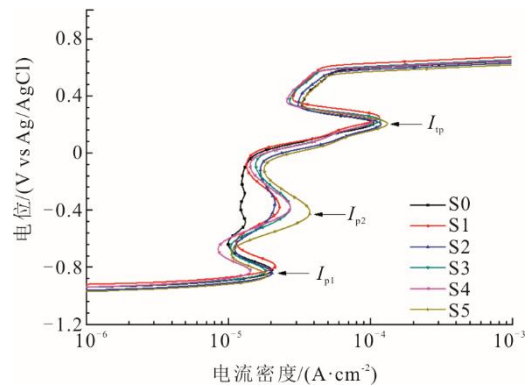


图 10 S0—S5 在 8 mol/L NaOH 溶液中的动电位极化曲线及 Laves 相电流峰曲线

Fig.10 Dynamic polarization curves and the Laves current peaks of S0—S5 in 8 mol/L NaOH solution

由图 10 可见, 随蠕变时间的增加, 极化曲线中代表基体溶解的第 1 个阳极电流峰 I_{p1} 和代表碳化物溶解及基体钝化电流的 I_p 无显著变化, 但代表 Laves 相溶解的第 2 电流峰 I_{p2} 表现出逐渐增大的趋势。

3 分析讨论

T92 钢的主要强化机制之一是通过 W、Mo 原子的固溶强化, 抑制高温蠕变过程中位错和亚晶界的迁移, 从而保证合金和部件的强度。但 T92 钢在高温下会发生第二相粒子的聚集粗化、固溶体中元素的析出, 以 Fe_2Mo 、 Fe_2W 为主要成分的 Laves 相在析出过程中会大量消耗 W 和 Mo 的固溶体, 导致固溶强化的效果减弱。在本文图 5 所示的 SEM 照片和图 7 所示的 EPMA 照片中可见: Laves 相在长大的同时, W 和 Mo 等元素在内压蠕变过程中发生了明显的扩散和元素再分配。根据王伟等^[11]的有关报道, Laves 相的形成和粗化会使 T92 钢材料强度和硬度的下降等力学性能劣化。因此, Laves 相的增多和粗化与组织老化程度、蠕变寿命消耗等关系最为紧密, 密切关注 Laves 相的生长动力学行为, 是判断其蠕变损伤程度变化的重要指标。

由于 Laves 相的析出在微观上伴随着合金元素贫乏化、不耐蚀阳极相的生成等现象, 这些材料异质性改变均会引起电化学反应中阳极相和阴极相的比例和/或组成发生变化, 从而导致电化学参数产生波动^[12-13]。因此, 通过选择恰当的溶液体系, 测试试样表面特征电化学参数的变化, 建立起电化学参数与显微组织、析出相状态的关系具有一定的可行性。

将图 10 中各极化曲线上 Laves 相电流峰对极化时间进行积分, 把测量的钝化电流密度作为背景电流密度从积分中减去, 再除以试样面积, 得到 S0—S5 样品中 Laves 相的溶解电荷量 Q , 如图 11 所示。

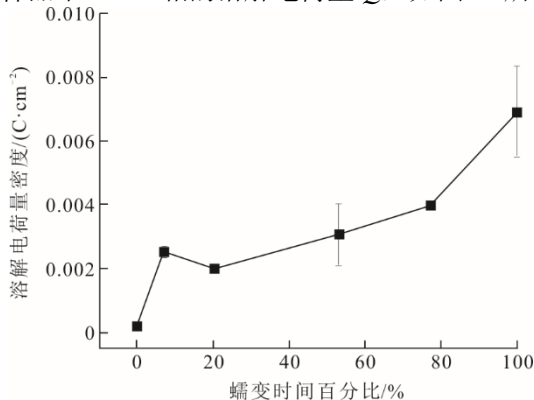


图 11 T92 钢中 Laves 相在 8 mol/L NaOH 溶液中溶解电量随时间的变化

Fig.11 The variation of dissolved electric quantity of Laves phase in T92 with time fraction in 8 mol/L NaOH solution

由图 11 可见, 随内压蠕变时间的延长, Laves 相对应的溶解电荷量 Q 也随之增加, 与图 6 中 SEM 下的统计规律基本一致, 二者均表明 T92 钢中的 Laves 相在内压蠕变过程中不断析出。由此可见, 电化学方法中极化电流峰对应的溶解电荷量可以较为准确地反映出试样表面 Laves 相颗粒的数量和尺寸的变化。

Laves 相在一定浓度的 NaOH 溶液中极化时会在一定的电位区间中发生溶解, 但同时合金基体和 $M_{23}C_6$ 、MX 等相在该电位区间内并未溶解, 这是一种选择性溶解过程, 这与 Laves 相中的主要元素的动力学过程相关。在 NaOH 或 KOH 等碱性溶液中, 纯 Fe 和纯 Cr 都表现出钝化行为, 纯 W 和纯 Mo 则表现出活性溶解行为^[14], 而 Fe_2Mo 的极化电流显著高于纯 Fe 和纯 Mo, 表明溶解过程中 Fe 原子与 Mo 原子间发生了某种反应, 从而促进了选择性溶解过程的进行。

基于电化学的合金老化评估涉及多种溶液体系, 既可在酸性体系^[13,15-18]中, 通过监测合金过钝化区的电流指标来反映过钝化溶解过程^[19], 也可以选择碱性体系。由于不锈钢对酸性介质较为敏感, 易诱发表面点蚀、晶间腐蚀等其他局部腐蚀行为, 其选择性溶解的机理易与腐蚀行为相耦合, 研究上存在较大难度, 且技术应用时易对服役材料产生不利影响。因此, 碱性介质下建立的研究体系相对更为优越。电化学方法有望应用于 Laves 相的现场检测, 作为准确评估 9%~12%Cr 钢的老化状态的有效手段。

4 结 论

本文通过对 600 °C 条件下内压蠕变试验过程中, 不同蠕变损伤程度的 T92 钢试样进行显微组织分析和腐蚀电化学研究, 得出如下结论:

1) 在 600 °C/内压 59 MPa 的内压蠕变试验中, 随时间的延长 T92 钢的显微组织表现出马氏体板条细碎化、局部变形程度显著增大、Laves 相颗粒逐渐增多变大等特征。

2) 随蠕变时间的增加, T92 钢中 W 和 Mo 元素出现了明显的聚集和再分配, 引起材料析出相特征的变化, 同时也为电化学方法的应用提供了可能性。

3) Laves 相可在浓强碱溶液中发生选择性溶解, 当 NaOH 浓度达到 8 mol/L 时, Laves 相选择性溶解的电流峰及对应电量值与内压蠕变时间均呈现较好的相关性。

4) T92 钢在强碱性溶液中的动电位极化曲线可

以有效地反映 Laves 相的含量,其电量值与 Laves 相含量变化一致,并可进一步与蠕变寿命损伤相关联,有希望作为一种无损检测技术用于现场管道的老化评估。

致谢

感谢中山大学徐健副教授、郭琦博士、袁随博士在试验测试、数据分析方面对本论文的帮助。

参考文献

- [1] VAILLANT J C, VANDENBERGHE B, HAHN B, et al. T/P23, 24, 911 and 92: new grades for advanced coal-fired power plants—properties and experience[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2008, 85 (1-2): 38-46.
- [2] 张红军, 周荣灿, 唐丽英, 等. P92 钢 650 °C 时效的组织性能研究[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(增刊 1): 174-177.
ZHANG Hongjun, ZHOU Rongcan, TANG Liying, et al. Study on microstructure and mechanical properties of P92 steel aged at 650 °C [J]. *Proceedings of CSEE*, 2009, 29(Suppl.1): 174-177.
- [3] 孙献斌. 700 °C 超超临界循环流化床锅炉方案设计研究[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34 (23): 3977-3982.
SUN Xianbin. Plan design and research of 700 °C ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. *Proceedings of CSEE*, 2014, 34(23): 3977-3982.
- [4] 凌文, 吕俊复, 周托, 等. 660 MW 超超临界循环流化床锅炉研究开发进展[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(9): 2515-2523.
LING Wen, LYU Junfu, ZHOU Tuo, et al. Research and development progress of the 660 MW ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. *Proceedings of CSEE*, 2019, 39(9): 2515-2523.
- [5] CODURI M, MAURI S, BIFFI C A, et al. A new method for simple quantification of Laves phases and precipitates in TiCr2 alloys[J]. *Intermetallics*, 2019, 109: 110-122.
- [6] 史志刚, 熊伟, 张红军, 等. P92 钢长期高温服役后组织性能试验分析[J]. *热力发电*, 2019, 48(6): 121-127.
SHI Zhigang, XIONG Wei, ZHANG Hongjun, et al. Experimental analysis on microstructure and properties of P92 steel after long-term service at high temperatures[J]. *Thermal Power Generation*, 2019, 48(6): 121-127.
- [7] ZHU S, YANG M, SONG X L, et al. Characterisation of Laves phase precipitation and its correlation to creep rupture strength of ferritic steels[J]. *Materials Characterization*, 2014, 98: 60-65.
- [8] ABE F. Effect of fine precipitation and subsequent coarsening of Fe₂W laves phase on the creep deformation behavior of tempered martensitic 9Cr-W steels[J]. *Metallurgical and Materials Transactions a-Physical Metallurgy and Materials Science*, 2005, 36a(2): 321-332.
- [9] 林琳, 周荣灿, 郭岩, 等. 应力与温度对 P92 钢中 Laves 相析出行为的影响[J]. *热力发电*, 2012, 41(5): 56-60.
LIN Lin, ZHOU Rongcan, GUO Yan, et al. Influence of stress and temperature upon precipitation behavior of Laves -phase in P92 steel[J]. *Thermal Power Generation*, 2012, 41(5): 56-60.
- [10] KORCAKOVA L, HALD J, SOMERS M A J. Quantification of Laves phase particle size in 9CrW steel[J]. *Materials Characterization*, 2001, 47: 111-117.
- [11] 王伟, 唐丽英, 李文胜, 等. T92 钢内压蠕变试验组织性能老化规律[J]. *热力发电*, 2016, 45(9): 1-6.
WANG Wei, TANG Liying, LI Wensheng, et al. Microstructure and properties evolution of T92 steel used for boiler tube during internal pressure creep test[J]. *Thermal Power Generation*, 2016, 45(9): 1-6.
- [12] SHINICHI K, SHIGEO K, TETSUO S, et al. Thermal aging embrittlement of tungsten-alloyed 9% Cr ferritic steels and electrochemical evaluation[J]. *Materials Science Research International*, 2003, 9(1): 42-49.
- [13] LAURENT B, GRUET N, GWINNER B, et al. The kinetics of transpassive dissolution chemistry of stainless steels in nitric acid: the impact of Si[J]. *Electrochimica Acta*, 2017, 258: 653-661.
- [14] WU Y, YUAN S, YAN J, et al. Dissolution behaviour of Laves phase in P92 high alloy steel in alkaline solutions[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2021, 168(3): 1-9.
- [15] BETOVA I, BOJINOV M, TZVETKOFF T. Oxidative dissolution and anion-assisted solubilisation in the transpassive state of nickel-chromium alloys[J]. *Electrochimica Acta*, 2004, 49(14): 2295-2306.
- [16] BETOVA I, BOJINOV M, LAITINEN T, et al. The transpassive dissolution mechanism of highly alloyed stainless steels. II. Effect of pH and solution anion on the kinetics[J]. *Corrosion Science*, 2002, 44(12): 2699-2723.
- [17] RAPOUCH J, BYSTRIANSKÝ J. Behaviour of creep-resistant steels in a transpassive zone[J]. *Koroze a Ochrana Materiálu*, 2012, 56 (2):31-37.
- [18] ABSTOSS K G, SCHMIGALLA S, SCHULTZE S, et al. Microstructural changes during creep and aging of a heat resistant MARBN steel and their effect on the electrochemical behaviour[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 743: 233-242.
- [19] BETOVA I, BOJINOV M, LAITINEN T, et al. The transpassive dissolution mechanism of highly alloyed stainless steels I. experimental results and modelling procedure[J]. *Corrosion Science*, 2002, 44: 2675-2697.

(责任编辑 邓玲惠)