

出 2 个自由电子),因此 KF 电压升高没有 MgF_2 明显. 而 CaF_2 属于非金属化合物(金属原子比非金属原子容易电离),其电压的升高也不如 MgF_2 活性剂明显.

BaF_2 活性剂电压降低了 2.21 V,原因是根部电弧的扩张使导电通道面积增大(图 2g),电压降低. 其它活性剂电压在 +0.01 ~ +0.04 V 之间变化,结合图 6 得到的结论,可以认为这些活性剂对电弧电压的影响不显著,甚至不会影响电弧电压. 因此,这类活性剂的添加并不会改变电弧力的大小.

综上所述可知: MgF_2 活性剂能增大 A-TIG 焊电弧力,而 BaF_2 活性剂可显著降低电弧力,其它活性剂对电弧力的影响不显著.

2.4 电弧温度

试验中观察到, LiF 电弧呈现微红色, NaF 电弧为亮黄色, KF 电弧为亮白色, MgF_2 电弧为亮蓝色, CaF_2 电弧为砖红色, BaF_2 电弧为微红色, KCl 电弧为蓝色, KBr 电弧为白色. 不同活性剂能发出不同颜色的弧光,是因为活性剂金属离子在电弧高温下产生了焰色反应缘故. 其中 NaF, KF, MgF_2 , CaF_2 , BaF_2 , KCl 活性剂的电弧的亮度相比传统 TIG 焊更加明亮. 电弧亮度与电弧温度密切相关. 说明这些活性剂的加入,可以不同程度影响到电弧温度,进而影响到传导到熔池的热量多少.

3 结 论

(1) LiF, KBr 活性剂不会影响 A-TIG 焊的电弧行为; KF 和 CaF_2 活性剂会显著收缩电弧,增加电弧温度,但不会影响电弧力; MgF_2 活性剂能显著收缩电弧,增加电弧温度,并能增大电弧力; BaF_2 活性剂不会影响电弧形态,但能增加电弧温度,减小电弧力; NaF, KCl 活性剂可以不同程度地收缩电弧(但相比 KF, CaF_2 , MgF_2 收缩程度较小),并能增加电弧温度,但不会影响电弧力大小.

(2) KN 型钾盐(KF, KCl, KBr) A-TIG 焊电弧行为研究结果表明,氟化物对电弧行为的影响作用要大于氯化物和溴化物, A-TIG 焊接 Ti6Al4V 应优先选用氟化物作为活性剂. 对 MF 型氟盐和 MF_2 型氟盐电弧行为的研究结果表明, MF 型氟盐(LiF, NaF,

KF) 中应优先选用 KF 活性剂, MF_2 型氟盐(MgF_2 , CaF_2 , BaF_2) 中应选 MgF_2 活性剂.

参考文献:

- [1] 高福祥, 廖志谦, 熊进辉, 等. 船用钛合金焊接接头精细组织表征[J]. 焊接学报, 2016, 37(4): 124-128.
Gao Fuyang, Liao Zhiqian, Xiong Jinhui, et al. Microstructure of TIG welded joint of marine titanium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(4): 124-128.
- [2] Niagaj J. The use of activating fluxes for the welding of high-alloy steels by A-TIG method[J]. Welding International, 2003, 17(4): 257-261.
- [3] Dey H C, Albert S K, Bhaduri A K, et al. Activated flux TIG welding of titanium[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 57(6): 903-912.
- [4] Nayee S G, Badheka V J. Effect of oxide-based fluxes on mechanical and metallurgical properties of dissimilar activating flux assisted-tungsten inert gas welds[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2014, 16(1): 137-143.
- [5] Li D, Lu S, Li D, et al. Principles giving high penetration under the double shielded TIG process[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2014, 30(2): 172-178.
- [6] 刘凤尧, 林三宝, 杨春利, 等. TIG 焊活性剂对焊缝成形的影响[J]. 焊接学报, 2002, 23(1): 1-4.
Liu Fengyao, Lin Sanbao, Yang Chunli, et al. Effect of activating fluxes on weld form in TIG welding of stainless steel and titanium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(1): 1-4.
- [7] 黄 勇, 樊 丁, 樊清华, 等. 表面活性剂对铝合金直流正接 A-TIG 焊熔深的影响[J]. 焊接学报, 2004, 25(5): 60-66.
Huang Yong, Fan Ding, Fan Qinghua, et al. Effect of surface activating flux on welding penetration of A-TIG welding with DCSP mode of aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(5): 60-66.
- [8] Lowke J J, Tanaka M, Ushio M. Mechanisms giving increased weld depth due to a flux[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2005, 38(18): 3438-3445.
- [9] Leconte S, Paillard P, Chapelle P, et al. Effects of flux containing fluorides on TIG welding process[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2007, 12(2): 120-126.

作者简介: 高晓刚, 男, 1985 年出生, 博士研究生, 助理工程师. 主要从事焊接质量与控制研究. Email: nmgl025@126.com

通讯作者: 董俊慧, 男, 教授, 博士研究生导师. Email: jhdong@imut.edu.cn

HR3C/T91 异种耐热钢焊接接头界面蠕变失效有限元模拟

张建强， 张国栋， 郭嘉琳

(武汉大学 水射流理论与新技术湖北省重点实验室, 武汉 430072)

摘 要: 利用有限元方法对 HR3C/T91 接头在温度为 600 ℃、内压为 42.26 MPa 作用下的最大蠕变主应力、von Mises 等效应力和应力三轴度进行数值分析, 并采用温度—应力双参数加速试验对模拟结果进行验证. 结果表明, 最大主应力峰值位于管接头内表面焊缝/T91 界面附近区域, von Mises 等效应力峰值同样位于内表面焊缝/T91 界面附近区域, 因而焊缝/T91 界面区域内孔洞易于形核、扩张. 内表面应力三轴度峰值分别位于 HR3C/焊缝和焊缝/T91 界面处, 与两界面重合. 内表面焊缝/T91 界面处的应力三轴度数值较大, 而焊缝/T91 界面的蠕变强度较 HR3C/焊缝弱, 因此焊缝/T91 界面为接头的薄弱环节, 与加速试验结果一致.

关键词: 异种钢接头; 有限元; 最大主应力; 等效应力; 应力三轴度

中图分类号: TG 407 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20140906001

0 序 言

奥氏体不锈钢 HR3C 具有优异的高温强度以及抗烟气腐蚀和抗蒸汽氧化性能, 主要被用于超超临界 (ultra-super critical-USC) 火电机组过热器、再热器的高温部位^[1]. 而马氏体耐热钢 T91 则被应用于 USC 机组中温度较低的部位, 因而形成大量 HR3C/T91 异种钢焊接接头. 异种钢接头焊缝/T91 母材界面对早期蠕变失效十分敏感. 接头的使用寿命常常达不到设计要求, 经常导致设备发生非计划停机, 造成重大经济损失. 因此, 异种钢接头界面蠕变损伤与失效一直广受关注, 亟待解决^[2-4].

以国内 USC 火力发电机组中广泛采用的 HR3C/T91 异种钢接头的界面蠕变失效为分析对象, 探讨在运行过程中焊缝/T91 界面附近的蠕变最大主应力、von Mises 等效应力、应力三轴度的分布及变化特征; 并采用应力—温度双参数加速试验对模拟结果进行验证, 为合理选择焊接材料、制订工艺, 防止接头早期蠕变失效及寿命预测打下坚实基础.

1 计算模型

1.1 试验材料和焊接工艺

试验材料为奥氏体耐热钢 HR3C 小径管, 外径

为 57 mm、壁厚为 7.5 mm, 马氏体耐热钢 T91 小径管, 外径为 57 mm、壁厚为 9.35 mm. 焊前在 T91 一侧内壁坡口附近 20 mm 进行机械加工, 使 T91 内、外壁与 HR3C 平齐, 管接头形状及尺寸如图 1. 填充材料为 ERNiCr-3 镍基焊丝, 母材和焊丝的成分如表 1. 采用手工氩弧焊接工艺, 坡口形式为 V 形对接, 无钝边高度, 坡口角度为 65°, 根部不留间隙, 分 5 层 9 道焊接, 管接头外表面焊缝宽度为 12 mm、余高为 2 mm, 内表面焊缝宽度为 6 mm、余高为 1.5 mm. 焊前预热温度为 175 ℃, 焊后不进行热处理. 正面保护气体流量为 10 L/min, 背面第 1~2 层加保护气体, 其流量为 10 L/min, 焊接工艺参数如表 2 所示.

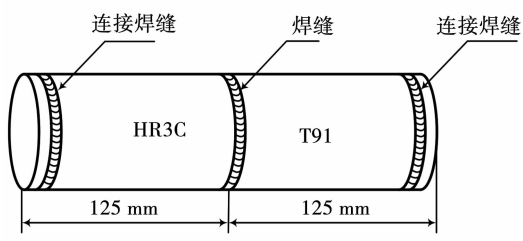


图 1 接头形状及尺寸
Fig. 1 Figuration and sizes of joint

1.2 网格划分

有限元模型与高温加速试验的试样的尺寸一致. 由于焊缝及界面附近应力应变梯度高, 因此焊缝及界面附近网格较密, 最小网格尺寸为 0.25 mm × 1 mm, 环向为 10°, 然后逐步加粗, 远离焊缝的试件

边缘的网格尺寸最大,为 2.2 mm × 1 mm,环向仍为 10°,模型的节点数为 25 140,单元数为 21 312,网格划分如图 2a 所示. 数据提取路径分别沿图 2b 所示外表面 A₁A₂、内表面 B₁B₂、焊缝/T91 界面 C₁C₂方向.

表 1 母材和焊丝的化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical compositions of base metals and filler metals

材料	C	Si	Mn	S	P	Cr
HR3C	0.06	0.40	1.2	—	—	25.0
T91	0.01	0.40	0.46	0.010	0.010	8.85
ERNiCr-3	0.04	0.40	2.80	0.010	0.010	20.0

材料	Mo	V	Nb	Ni	Al	N
HR3C	—	—	0.45	20.0	—	0.2
T91	0.93	0.21	0.09	0.01	0.003	0.038
ERNiCr-3	0.48	0.21	2.50	72.6	—	—

表 2 焊接工艺参数
Table 2 Welding parameters

焊层	焊道	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 v/(mm·min ⁻¹)
1	1	91	8~10	20
2	2,3	102	8~10	80
3	4,5	102	8~10	80
4	6,7	102	8~10	80
5	8,9	102	8~10	70

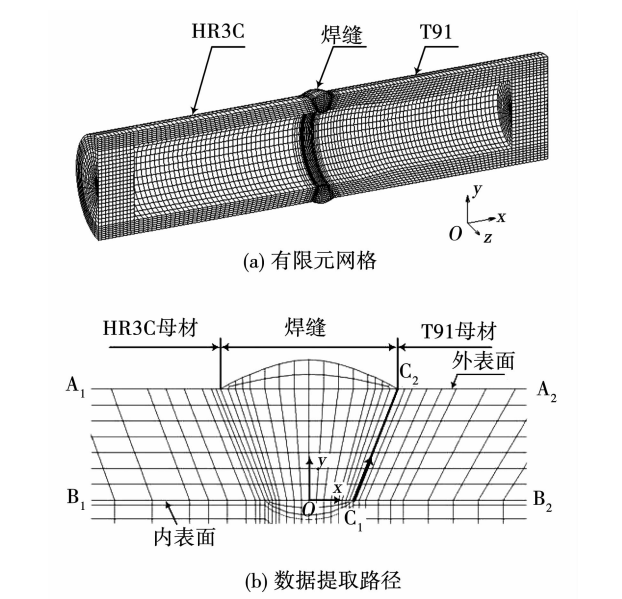


图 2 网格划分方案及数据提取路径
Fig. 2 Meshing scheme

1.3 边界条件

为了防止模型在计算过程中产生平移或转动,但又不至于影响模拟计算结果,将模型左端部分节

点进行 x, y, z 方向位移约束. 同时,为了防止在蠕变模拟过程中计算不收敛,但又不至于影响模拟计算结果,将模型右端部分节点 y, z 方向位移进行约束. 外载荷以面应力形式作用于管接头的内表面,内压为 42.26 MPa,温度为 600 °C,模拟蠕变时间为 200 000 h.

1.4 材料本构关系

模拟过程中采用 Bailey-Norton 定律描述接头的蠕变行为,其关系式为

$$\dot{\epsilon}^c = A\sigma^n \tag{1}$$

式中: $\dot{\epsilon}^c$ 为最小蠕变应变速率; σ 为应力; A, n 为给定温度下材料的蠕变系数和蠕变指数,表 3 为 600 °C 下材料的力学性能和蠕变参数.

表 3 600 °C 时材料的力学性能和蠕变参数
Table 3 Material properties and creep parameters at 600 °C

材料	屈服强度 R_{eL}/MPa	弹性模量 E/GPa	蠕变系数 $A(10^{-30})$	蠕变指数 n
HR3C	480	190	26	8.1
T91	458	185	251	9.1
ERNiCr-3	478	190	7.9	8.2

2 数值模拟结果

2.1 最大主应力模拟结果

金属材料的蠕变失效是晶界孔洞形核及孔洞扩展的结果,而蠕变孔洞形核受最大主应力控制^[5-6]. 在 42.26 MPa 内压作用下,模拟运行不同时间后沿接头的外表面 A₁A₂、内表面 B₁B₂ 及界面 C₁C₂ 方向提取焊缝中心两侧附近及焊缝/T91 界面处的最大主应力分布,分别如图 3 ~ 图 5 所示. 根据图 3,随模拟时间的增加,接头外表面 HR3C/焊缝附近区域的最大主应力略有下降,而焊缝/T91 一侧的最大主应力不断增加. $t = 5\,511\text{ h}$ 时,HR3C/焊缝界面附近 ($x = -6.31\text{ mm}$) 的最大主应力为 95.2 MPa,而界面处 ($x = -6\text{ mm}$) 的最大主应力为 89.2 MPa. 焊缝/T91 界面附近 ($x = 5.5\text{ mm}$) 的最大主应力为 106.9 MPa,界面处 ($x = 6\text{ mm}$) 的最大主应力为 99.5 MPa. $t = 200\,000\text{ h}$ 时,HR3C/焊缝附近区域和界面的最大主应力分别为 88.4 和 82.1 MPa. 此时焊缝/T91 界面附近和界面处的应力分别增加到 138.2 和 122.9 MPa. 根据图 4,随时间的增加,内表面 HR3C/焊缝和焊缝/T91 附近区域最大主应力均上升. $t = 5\,511\text{ h}$ 时,HR3C/焊缝界面附近 ($x = -3.32\text{ mm}$) 和界面处 ($x = -3\text{ mm}$) 的最大主应力分别为 156 和 155.5 MPa. 焊缝/T91 界面附近 ($x = 2.75\text{ mm}$) 和界面处

($x = 3\text{ mm}$) 的最大主应力分别为 167.6 和 148.2 MPa. $t = 200\,000\text{ h}$ 时,HR3C/焊缝界面附近和界面处的最大主应力分别为 165.5 和 174.9 MPa. 焊缝/T91 界面附近($x = 2.75\text{ mm}$)的最大主应力为 209.3 MPa,而界面处($x = 3\text{ mm}$)的最大主应力为 165.2 MPa. 根据图 5,随着模拟时间增加,焊缝/T91 界面处最大主应力增加,但内、外表面增加的幅度不同,分别为 17 和 23.4 MPa. 由此可见,在运行过程中内表面焊缝/T91 界面附近应力较大、弱化严重,孔洞易于形核. 因此内表面焊缝/T91 界面为接头的薄弱环节.

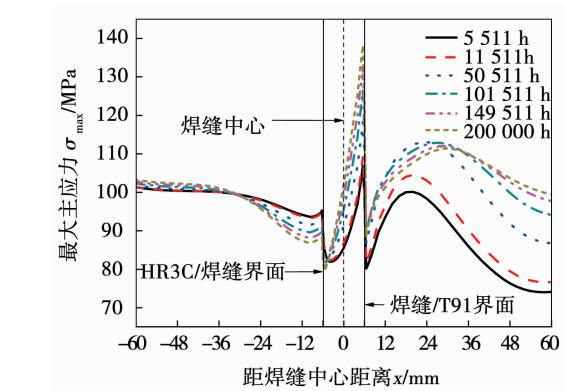


图 3 沿外表面 A_1A_2 方向最大主应力分布
Fig. 3 Distributions of the maximum principal stress(A_1A_2)

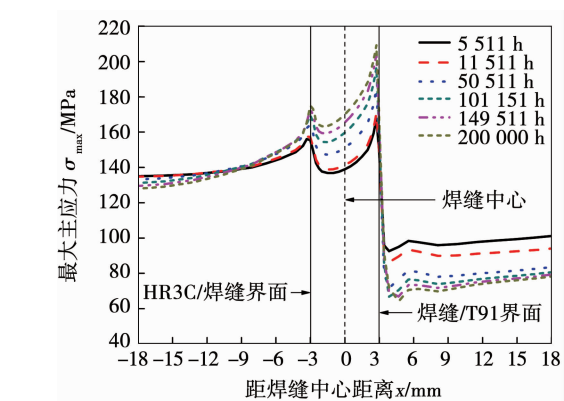


图 4 沿内表面 B_1B_2 方向最大主应力分布
Fig. 4 Distributions of the maximum principal stress(B_1B_2)

2.2 von Mises 等效应力

模拟不同时间后,接头的外表面 A_1A_2 、内表面 B_1B_2 及界面 C_1C_2 方向的 von Mises 等效应力分布如图 6 ~ 图 8 所示. 根据图 6, $t = 5\,511\text{ h}$ 时,外表面 HR3C/焊缝附近 von Mises 等效应力峰值位于 $x = -6.31\text{ mm}$ 处,为 83.6 MPa,界面处($x = -6\text{ mm}$)的等效应力为 78.4 MPa. 焊缝/T91 界面附近峰值为 96.5 MPa,位于 $x = 5.5\text{ mm}$ 处,界面处的等效应力为

86.9 MPa. $t = 200\,000\text{ h}$ 时,HR3C/焊缝附近 von Mises 等效应力峰值位于 $x = -6.31\text{ mm}$ 处,为 89 MPa,界面处($x = -6\text{ mm}$)的峰值为 85.3 MPa. 而焊缝/T91 界面附近峰值为 139.9 MPa,位于 $x = 5.5\text{ mm}$ 处,界面处等效应力为 121.7 MPa. 根据图 7, $t = 5\,511\text{ h}$ 时,内表面 HR3C/焊缝附近 von Mises 等效应力峰值位于 $x = -3.32\text{ mm}$ 处,为 166.3 MPa,界面处($x = -6\text{ mm}$)的等效应力为 165.6 MPa. 焊缝/T91 界面附近峰值为 167.3 MPa,位于 $x = 2.75\text{ mm}$ 处,界面处的等效应力为 154.4 MPa. $t = 200\,000\text{ h}$ 时,HR3C/焊缝附近 von Mises 等效应力峰值位于 $x = 3\text{ mm}$ 处,为 185.5 MPa. 焊缝/T91 界面附近峰值为 204 MPa,位于 $x = 2.75\text{ mm}$ 处,界面处的等效应力为 174 MPa. 根据图 8,随着模拟时间的增加,焊缝/T91 界面处等效应力增加,但内、外表面增加的幅度不同. 内表面增加幅度为 19.7 MPa,外表面增加幅度为 34.8 MPa. 在模拟过程中焊缝/T91 界面区域等效应力数值较大,孔洞易于扩展. 因此,焊缝/T91 界面仍为接头的薄弱环节.

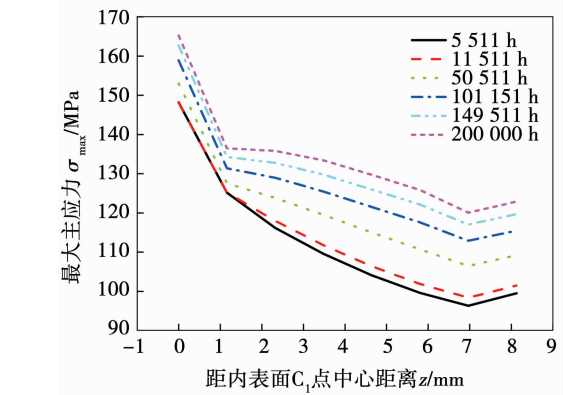


图 5 沿焊缝/T91 界面 C_1C_2 方向最大主应力分布
Fig. 5 Distributions of the maximum principal stress(C_1C_2)

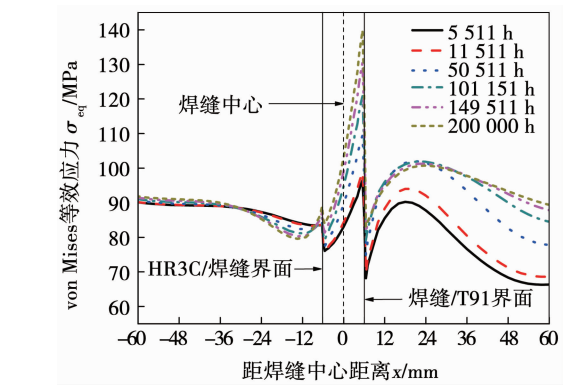


图 6 沿外表面 A_1A_2 方向 von Mises 等效应力分布
Fig. 6 Distributions of von Mises equivalent stress(A_1A_2)

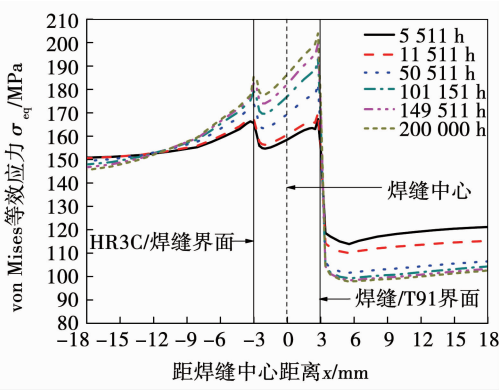


图 7 沿内表面 B₁B₂ 方向 von Mises 等效应力分布
Fig. 7 Distributions of von Mises equivalent stress(B₁B₂)

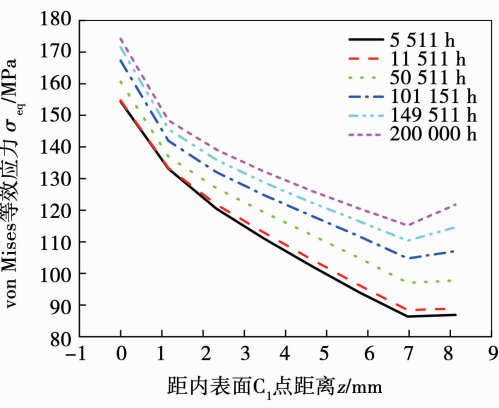


图 8 沿焊缝/T91 界面 C₁C₂ 方向 von Mises 等效应力分布
Fig. 8 Distributions of von Mises equivalent stress(C₁C₂)

2.3 应力三轴度

应力三轴度因子 R_σ 可以表示为

$$R_\sigma = \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \tag{2}$$

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \tag{3}$$

$$\sigma_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

式中: σ_m 为平均应力; σ_{eq} 为等效应力; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为第一、第二、第三主应力。

模拟不同时间后,外表面 A₁A₂、内表面 B₁B₂ 及界面 C₁C₂ 方向的应力三轴度分布如图 9 ~ 图 11。根据图 9,外表面 HR3C/焊缝、焊缝区应力三轴度 R_σ 较小,而焊缝/T91 界面附近区域 R_σ 较高。随着模拟时间的增加,HR3C/焊缝和焊缝/T91 界面的 R_σ 均下降。 $t=5\,511\text{ h}$ 时,分别为 0.533 和 0.561。此时,焊缝/T91 附近 R_σ 的峰值位于临近界面 ($x=6.5\text{ mm}$) 的 T91 热影响区,数值为 0.655。 $t=200\,000\text{ h}$ 时,两

界面的 R_σ 分别减小到 0.31 和 0.364。根据图 10,内表面应力三轴度 R_σ 的峰值分别位于 HR3C/焊缝和焊缝/T91 界面处,与两界面完全重合,焊缝和 T91 一侧区域的应力三轴度数值相对较低。 $t=5\,511\text{ h}$ 时,HR3C/焊缝界面处的应力三轴度为 0.468, $t=200\,000\text{ h}$ 时,为 0.527。而焊缝/T91 界面的应力三轴度分别为 0.485,0.519。因此,在模拟过程中,两

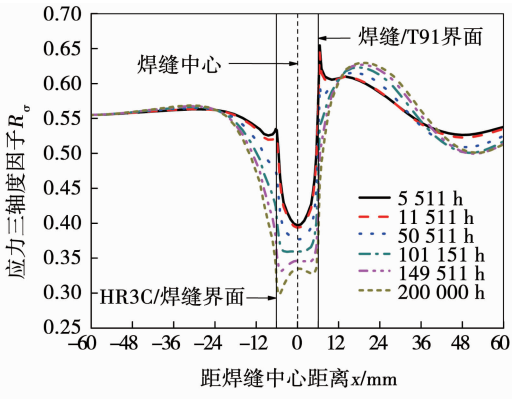


图 9 沿外表面 A₁A₂ 方向应力三轴度分布
Fig. 9 Distributions of stress triaxiality(A₁A₂)

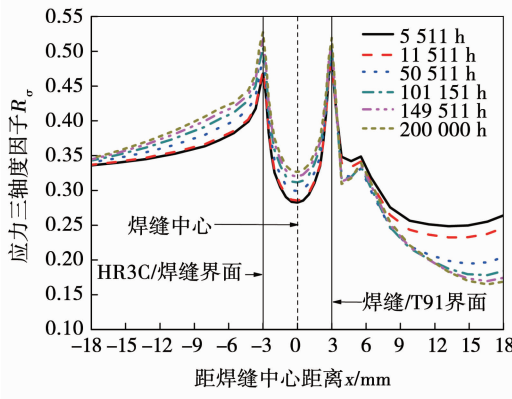


图 10 沿内表面 B₁B₂ 方向应力三轴度分布
Fig. 10 Distributions of stress triaxiality(B₁B₂)

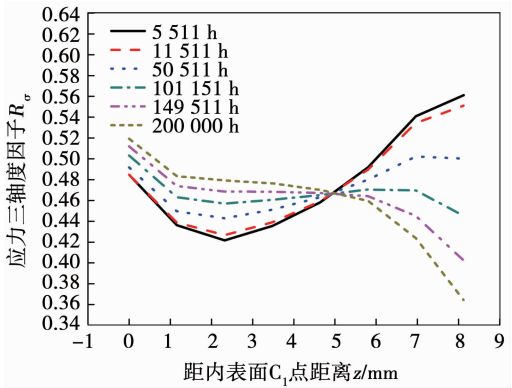


图 11 沿焊缝/T91 界面 C₁C₂ 方向应力三轴度分布
Fig. 11 Distributions of stress triaxiality(C₁C₂)

界面处的应力三轴度 R_σ 随时间而增加. $t = 5\,511\text{ h}$ 时,焊缝/T91 界面的 R_σ 较 HR3C/焊缝界面略高,最后两者数值基本趋于一致. 根据图 11,随着时间的增加,内表面焊缝/T91 界面的 R_σ 增加,而外表面焊缝/T91 界面的 R_σ 下降,距离 C_1 点 4.9 mm 位置, R_σ 保持不变. 因此,距离 C_1 点 4.9 mm 以内的区域在模拟过程中焊缝/T91 界面不断劣化,而距离 C_1 点 4.9 mm 以外的区域焊缝/T91 界面劣化过程减弱. 由此可见,焊缝/T91 界面的薄弱环节位于内表面区域.

3 加速试验

加速试验温度为 $670\text{ }^\circ\text{C}$,内压为 42.26 MPa . 加速试验 $5\,012\text{ h}$ 后,内表面焊缝/T91 界面发生开裂,宏观形貌如图 12 所示,靠近 T91 一侧 HAZ 均存在强烈的蠕变拘束,主要是焊缝与 T91 母材的蠕变强度不匹配导致而成. 裂纹起始于内表面,由内表面沿管接头环向和径向扩展,最终导致接头失效. 加速模拟试验 $5\,012\text{ h}$ 后,焊缝/T91 界面附近区域的蠕变裂纹、孔洞分布及断口形貌如图 13 所示,裂纹主要由蠕变孔洞连接而成,为沿晶粒边界破坏. 因此,加速试验后,焊缝/T91 界面蠕变损伤严重,形成了早期界面蠕变失效,试验结果与模拟结果一致. 因此,焊缝/T91 为 HR3C/T91 异种钢接头的薄弱环节.

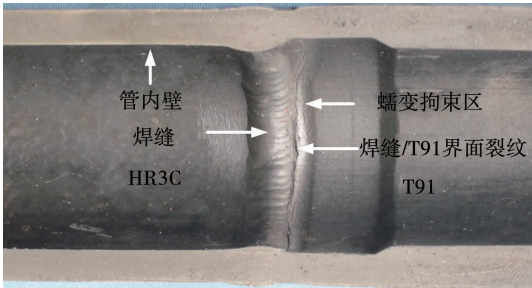


图 12 接头内表面 HR3C/T91 界面裂纹宏观形貌
Fig. 12 Appearance of interfacial creep crack of weld/T91

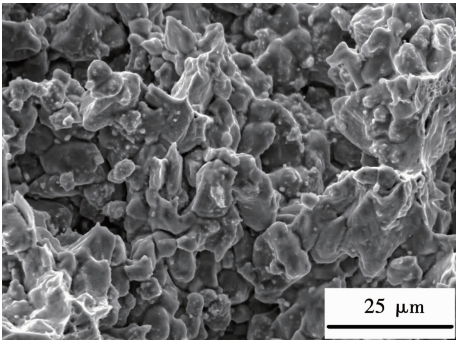


图 13 焊缝/T91 界面蠕变开裂断口形貌
Fig. 13 Fracture appearance of interfacial creep crack of weld/T91

4 结 论

- (1) 对于 HR3C/T91 接头,最大主应力峰值位于焊缝/T91 界面附近区域,而内表面焊缝/T91 界面附近的最大主应力峰值很高,为 209.3 MPa . 因此,蠕变孔洞易于在内表面焊缝/T91 界面区域形成.
- (2) von Mises 等效应力峰值始终位于焊缝/T91 界面附近区域,内表面焊缝/T91 界面附近峰值为 204 MPa ,因而,孔洞易于扩张.
- (3) 应力三轴度峰值分别位于 HR3C/焊缝和焊缝/T91 界面处,与界面完全重合,数值相近. 焊缝/T91 界面蠕变强度较 HR3C/焊缝弱,焊缝/T91 界面为接头的薄弱环节,与加速试验结果一致. 因此,采用应力三轴度表征 HR3C/T91 接头界面蠕变孔洞扩张及裂纹扩展特性较为精准.

参考文献:

[1] 杨 富,章应霖,任永宁,等. 新型耐热钢焊接[M]. 北京:中国电力工业出版社,2006.

[2] 郑 楷,徐德生,张雪莲,等. 超(超)临界火电机组 T91 和 TP347H 焊接性分析[J]. 焊接学报,2010,31(6):53-60. Zheng Kai, Xu Desheng, Zhang Xuelian, et al. Welding performance analysis of ultra(ultra) supercritical thermal power units T91 and TP347H[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(6): 53-60.

[3] 葛利玲,刘 阳,井晓天,等. 加速时效对 T91/T23 异种钢 TLP 接头组织与性能的影响[J]. 焊接学报,2010,31(8):89-92. Ge Liling, Liu Yang, Jing Xiaotian, et al. Effect of accelerating ageing on microstructure and properties of TLP joint of T91/T23 dissimilar steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(8): 89-92.

[4] Lundin C D. Dissimilar metal welds - transition joints literature review[J]. Welding Journal, 1982, 61(s2):58-63.

[5] 史春元,田锡唐,陈子刚. 异种钢接头沿界面蠕变脆断的力学控制参量[J]. 焊接学报,1995,16(4):185-189. Shi Chunyuan, Tian Xitang, Chen Zigang, et al. Research on the controlling parameters of interfacial creep fracture of dissimilar metal welds[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1995, 16(4): 185-189.

[6] Cane B J. Mechanistic control regimes for intergranular cavity growth in 2.25 Cr - 1Mo steel under various stresses and stress states[J]. Metal Science, 1981, 15(7):302-310.

作者简介: 张建强,男,1964 年出生,博士,副教授. 主要从事焊接结构强度与断裂、异种钢焊接、焊接过程数值模拟等方面的教学和研究工作. 发表论文 100 余篇. Email: zhangjq123456@163.com

通讯作者: 张国栋,男,博士,副教授. Email: gdzhang128@163.com