

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.06.20

亚临界锅炉T91钢/TP304H异种钢焊接接头 长时服役的性能研究

王庆¹, 孙震兆², 李泽芝², 郭晓轩², 杨云昊², 费丽伟², 赵平²

1. 四川广安发电有限责任公司, 四川 广安 638500
2. 青岛科技大学 材料科学与工程学院, 山东 青岛 266042

摘要: 针对已运行近9.3万小时的T91/TP304H亚临界锅炉过热器管道的异种钢焊接接头, 借助金相显微镜、维氏硬度计、万能试验机和扫描电镜等仪器设备, 系统开展了微观组织观察、力学性能测试和蠕变持久性能分析。研究发现, 经过长时间高温服役后, T91和TP304H钢管试样的组织均表现出显著的老化特征。具体而言, T91侧晶界析出了 $M_{23}C_6$ 相、Laves相和MX相, TP304H侧晶界析出富Cr的 $M_{23}C_6$ 相, 接头组织老化级别均为3~3.5级; 高温拉伸试验与蠕变持久试验断裂位置均在T91侧熔合线附近, 表明该区域为接头薄弱区。此外, 通过温度曲线推算法估算出T91侧预估剩余寿命为55 000 h, TP304H侧预估剩余寿命为50 500 h, 但接头整体性能已劣化, 安全运行可靠性下降。

关键词: T91/TP304H异种钢焊接接头; 长时服役; 微观组织老化; 力学性能衰退; 剩余寿命预测

中图分类号: TG457.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)06-0147-08

Performance evaluation of T91/TP304H steel welded joints in subcritical boilers after long-time operation

WANG Qing¹, SUN Zhenzhao², LI Zezhi², GUO Xiaoxuan², YANG Yunhao², FEI Liwei², ZHAO Ping²

1. Sichuan Guang'an Power Generation Co., Ltd., Guang'an 638500, China
2. Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China

Abstract: For the dissimilar steel welding joint of T91/TP304H subcritical boiler superheater pipes that have been in operation for nearly 93,000 hours, systematic microstructure observation, mechanical property testing, and creep rupture performance analysis were carried out using instruments and equipment such as metallographic microscope, Vickers hardness tester, universal testing machine, and scanning electron microscope. The study found that after long-term high-temperature service, the tissues of both T91 and TP304H steel pipe samples showed significant aging characteristics. Specifically, on the T91 side, $M_{23}C_6$ phase, Laves phase, and MX phase precipitated at the grain boundaries, while on the TP304H side, Cr-rich $M_{23}C_6$ phase precipitated at the grain boundaries. The aging levels of the joint tissues were both between 3 to 3.5. The fracture locations of the high-temperature tensile test and the creep rupture test were both near the fusion line on the T91 side, indicating that this area is the weak zone of the joint. Moreover, through the temperature curve extrapolation method, the estimated residual life of the T91 side was calculated to be 55,000 hours, while that of the TP304H side was 50,500 hours. However, the overall performance of the joint has deteriorated, and its reliability for safe operation has decreased.

Keywords: dissimilar steel joints; T91; TP304H; residual life

引用格式: 王庆, 孙震兆, 李泽芝, 等. 亚临界锅炉T91钢/TP304H异种钢焊接接头长时服役的性能研究[J]. 电焊机, 2025, 55(6): 147-154.

Citation: WANG Qing, SUN Zhenzhao, LI Zezhi, et al. Performance evaluation of T91/TP304H steel welded joints in subcritical boilers after long-time operation[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(6): 147-154.

收稿日期: 2025-01-26 修回日期: 2025-03-26

作者简介: 王庆(1970—), 男, 高级工程师, 主要从事焊接工艺相关研究。



第十六届电站焊接学术会议暨2025年电力焊接苏州论坛专刊

0 引言

亚临界锅炉技术凭借其成熟的工业化应用与长期运行经验积累,已成为电力行业中兼具可靠性与经济性的关键技术解决方案^[1-3]。尤其在 300 MW 至 600 MW 级的火电机组中,亚临界锅炉凭借其高效的热力循环效率与较低的运维成本,占据主导地位。作为锅炉核心承压部件的过热器与再热器,当长期高温高压工况下(受热面金属壁温超过 580 ℃),易发生材料显微组织老化现象^[4],这种老化若未能得到有效控制,将显著降低部件的服役寿命,甚至引发灾难性爆管事故,严重威胁机组安全运行^[4]。

针对因超温导致的受热面频繁爆管问题,机组开始逐步采用异种钢制备在高温高压环境下运行的承压部件,常用的材料有具备良好耐腐蚀性的奥氏体不锈钢(如 TP304H、TP347 等)和具有较好热稳定性的马氏体耐热钢(如 T91、T22 等),在亚临界锅炉中使用异种钢焊接接头的数量越来越多^[5-7]。然而,由于两者之间组织状态、化学成分等存在较大的差异,异种钢接头在长时间运行后易出现失效^[8]。

本文以已运行近 9.3 万小时的 T91/TP304H 亚临界锅炉过热器管道的异种钢焊接接头为研究对象,分析其长期高温服役后的微观组织演变及力学性能状况。研究采用金相显微镜、扫描电镜、高温

拉伸试验及蠕变持久试验等手段,定量评估接头的组织老化等级、持久强度及断裂行为,并基于试验数据构建剩余寿命预测模型。研究成果不仅可为异种钢焊接接头的失效机理研究提供理论支撑,还可为超临界/亚临界锅炉关键部件的寿命管理及安全评估提供科学依据。

1 试验材料与方法

亚临界锅炉为 600 MW 燃煤发电机组锅炉,于 2007 年 6 月投运,至今已经运行约 92 900 h。试验用 T91/TP304H 异种钢焊接接头取自锅炉屏式过热器,T91 与 TP304 的化学成分范围如表 1 所示。

对屏式过热器管道异种钢焊接接头进行取样,将焊接接头用不同目数的砂纸打磨,将抛光后的试样进行腐蚀,腐蚀液为 30% 浓度的氯化铁盐酸水溶液,腐蚀时间为 15s,并借助 ZEISSAxioLab.A1 型蔡司金相显微镜观察 T91/TP304H 异种钢焊接接头各区域的形貌。利用 GNT300 型万能材料试验机对 T91/TP304H 异种钢焊接接头进行拉伸试验,拉伸试样为标准弧形试样,加载位移速率为 2 mm/min;利用 GNT300 型万能材料试验机进行高温蠕变持久性能测试,应力加载方式为恒定工程应力,载荷误差 $\leq \pm 0.5\%$,借助 JSM-7900F 型扫描电镜对 T91/TP304H 异种钢焊接接头进行微观形貌观察。

表 1 T91/TP304H 的化学成分(质量分数,%)

Table 1 T91/TP304H chemical composition range(wt. %)

材料	C	Cr	Si	Ni	Mn	P	S	Mo	V	Nb	N
T91	0.08~0.12	8.0~9.0	0.2~0.5	≤ 0.4	0.3~0.6	≤ 0.02	≤ 0.01	0.85~1.05	0.16~0.27	0.05~0.11	0.035~0.070
TP304H	0.04~0.1	18.0~20.0	≤ 0.75	8.0~11.0	≤ 2.00	≤ 0.030	≤ 0.015	—	—	—	—

2 试验结果与分析

2.1 宏观形貌检测

对 T91/TP304H 异种钢钢管实施宏观检验与壁厚测量。结果显示,所有试样表面均保持完好,未出现裂纹、折叠、轧痕等明显缺陷,亦无锐利刻痕、压扁痕迹或严重腐蚀迹象。这表明在长达近 9.3 万小时的运行过程中,该异种钢焊接接头表现出良好的抗腐蚀和抗机械损伤能力。异种钢钢管宏观样

貌如图 1 所示。

管子外径和壁厚的实测数据结果如表 2 所示,所有测量值均满足 GB/T 5310—2023 要求的允许偏

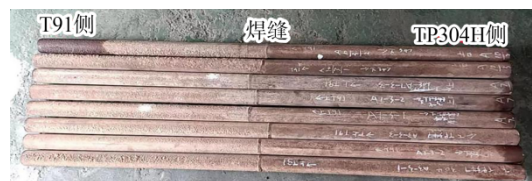


图 1 异种钢钢管宏观照片

Fig. 1 Macro photo of dissimilar steel pipe

差范围。壁厚测量结果表明:TP304H 侧实测平均壁厚为 7.19 mm,T91 侧实测平均壁厚为 7.50 mm,壁厚高于 TP304H 一侧,推测 TP304H 侧内壁氧化皮脱落程度严重,而 T91 一侧内壁氧化皮脱落程度轻。

对试样内壁氧化皮厚度进行测量,如图 2 所示,

其中 T91 侧氧化皮平均厚度为 129.072 μm ,TP304H 侧氧化皮平均厚度为 53.285 μm ,两侧氧化皮厚度存在明显的差距,证明在服役过程中管道内壁氧化皮存在脱落现象,且 TP304H 侧氧化皮脱落程度高于 T91 侧。

表 2 T91/TP304H 异种钢管子外径和壁厚(单位:mm)

Table 2 Outer diameter and wall thickness of T91/TP304H dissimilar steel tubes (unit:mm)

测点序号	测点位置	外径 1	外径 2	外径 3	外径 4	外径平均	壁厚 1	壁厚 2	壁厚 3	壁厚 4	壁厚平均
1	TP304H	44.76	44.58	44.58	44.65	44.64	7.55	7.47	7.47	7.51	7.50
2	T91	44.22	44.03	44.36	44.27	44.22	7.29	7.12	7.15	7.20	7.19

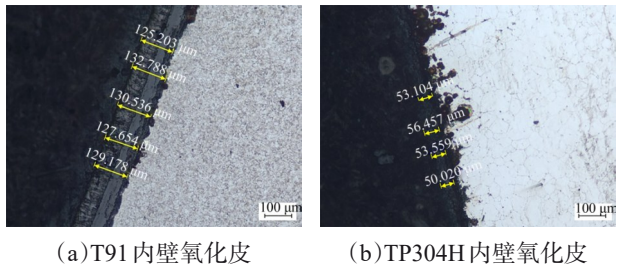


图 2 异种钢内壁氧化皮厚度

Fig. 2 Thickness of oxide skin on the inner wall of dissimilar steels

2.2 化学成分检测

依据 GB/T 223—2008 标准,采用光谱仪对长时服役的异种钢焊接接头母材进行化学成分分析,检

测结果如表 3 所示。对比表 1 可知,T91 和 TP304H 母材化学成分均满足 GB/T 5310—2023 所要求的标准值范围。

2.3 微观组织检测

对服役时间约为 9.3 万小时的 T91/TP304H 异种钢焊接接头进行微观形貌分析,其组织形貌如图 3 所示。分析结果表明,T91 钢和 TP304H 钢均出现不同程度的老化特征,依据 DL/T 884—2019 对显微组织进行评级,T91 侧老化等级为 3~3.5 级,TP304H 侧老化等级为 3~3.5 级。观察图 3b、图 3g,在焊接热循环的作用下,T91 钢和 TP304H 钢焊接接头两侧母

表 3 T91/TP304H 化学成分(质量分数,%)

Table 3 T91/TP304H chemical composition (wt. %)

牌号	C	Cr	Si	Ni	Mn	P	S	Mo	V	Nb	N
T91	0.10	9.06	0.28	0.048	0.54	0.014	<0.010	0.83	0.20	0.055	0.040
TP304H	0.061	19.20	0.43	9.39	1.15	0.027	<0.010	—	—	—	—

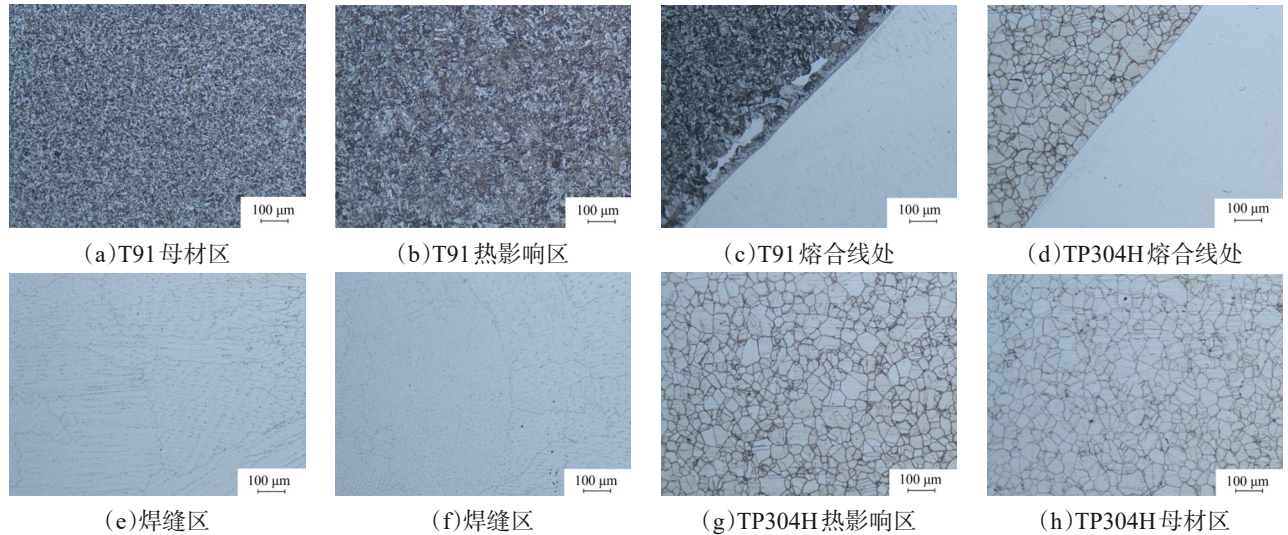


图 3 T91/TP304H 异种钢焊接接头组织形貌

Fig. 3 Histomorphology of welded joints of T91/TP304H dissimilar steels

材的组织形貌发生了显著变化。根据材料组织性能变化情况,可将 T91/TP304H 异种钢焊接接头分为 5 个区域: T91 母材区、T91 热影响区、焊缝区、TP304H 热影响区、TP304H 母材区。

由图 3a 可知, T91 侧母材呈现出回火马氏体组织特征, 其晶粒呈规则多边形, 晶界与亚晶界界限分明。在异种钢焊接过程中, 由于相变行为的发生, T91 钢热影响区由靠近焊接区域的细晶区和靠近母材的粗晶区组成。由图 3b、3c 可知, T91 钢热影响区为板条马氏体组织, T91 钢侧粗晶区马氏体板条束位向清晰, 但晶粒形状不规则, 在靠近熔合线附近存在尺寸较大的块状 δ 铁素体, 其存在会显著降低焊接接头的高温蠕变性能。推测其形成原因为焊接过程中在高温作用下 C、Ni、Mn 等奥氏体化元素向焊缝区扩散, 导致焊接熔合区 T91 钢一侧奥氏体化不足, 促使块状 δ 铁素体形成^[9]。由图 3e、3f 可知, 焊缝区主要是粗大的奥氏体枝晶组织, 在奥氏体晶界与枝晶上存在颗粒状的析出相; 焊缝熔合良好, 未见气孔、裂纹、未熔合等焊接缺陷。由图 3g、3h 可以看出, TP304H 钢一侧热影响区组织主要由奥氏体组成, 近熔合区处的奥氏体晶粒尺寸与母材区奥氏体晶粒尺寸相近, 平均晶粒度等级为 5~6 级, 但熔合区附近的奥氏体晶粒中存在更多的孪晶组织, 这是由于热影响区距离焊缝最近, 在焊接过程中, 由于不同区域冷却速度不一致, 产生的热应力和机械应力共同作用会诱导位错运动, 促进孪晶的产生^[10]。同时观察到奥氏体晶粒内部存在大量孪晶结构, 其中一些孪晶贯穿整个晶粒, 构成了共格孪晶界。

利用扫描电镜对 T91/TP304H 异种钢焊接接头进行微观观察和能谱分析, 结果如图 4 所示。观察图 4a 发现, 碳化物主要沿晶界析出, 奥氏体晶胞内部存在孪晶组织。由图 4b 可以看出, 在 T91 钢一侧, 晶粒内的马氏体呈现板条状形貌。由图 4c、4d 可知, 在热影响区内, 晶界处析出的碳化物数量增多, 同时 T91 侧晶粒之间的间距明显增大, 晶粒分布较为离散, 而 TP304H 侧并没有发生这一现象, 这导致在后续高温拉伸试验和蠕变持久拉伸试验中, 断裂失效现象基本发生在 T91 侧近熔合线位置。继续观察图 4e、4f 发现, 在熔合线附近, 碳化物集中在晶

界处析出, 这是因为在焊接过程中, 熔合线区域和热影响区会经历快速加热到高温再快速冷却的热循环, 在这个过程中, 距离焊接热源的不同位置会达到不同的峰值温度, 虽然峰值温度停留的时间较短, 但足以使晶界处的碳化物溶解或使 C、Cr 等合金元素发生扩散和重新分布。随后在快速冷却过程中, C 原子没有充分的时间扩散到晶粒内部, 而优先在晶界处形成碳化物^[11]。

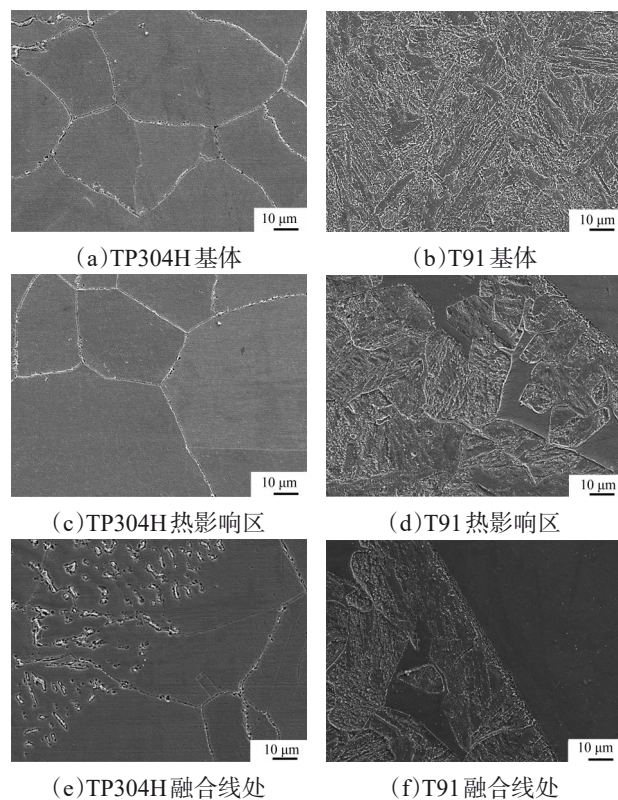


图4 T91/TP304H 异种钢焊接接头微观组织形貌

Fig. 4 Microstructure and morphology of T91/TP304H dissimilar steel welded joints

对特征区域进行选区能谱分析, 选择区域及能谱结果如图 5 所示。可见主要成分为 Fe、Mo、Cr 等元素。结合 SEM 与 EDS 结果综合分析表明, 焊接接头 T91 侧主要析出相包括 $M_{23}C_6$ 相、Laves 相和 MX 相等硬质相^[12]。其中, $M_{23}C_6$ 相和 Laves 相主要分布在晶界处, 而 MX 相则主要在基体中析出。因硬质相与基体的弹性模量和热膨胀系数存在较大的差异, 在界面处易发生应力集中现象, 特别是在晶界处分布的粗大的 $M_{23}C_6$ 相和 Laves 相存在成为裂纹源的可能, 导致材料韧性降低, 加速断裂发生。在 TP304H 钢靠近焊缝一侧, 在晶界处有球状或链状

碳化物析出,对其进行EDS能谱检测发现此处Cr元素含量较基体组织高,推测此处析出碳化物为富铬的 $M_{23}C_6$ 。

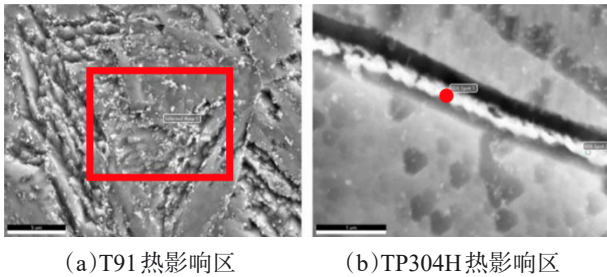


图 5 T91/TP304H 热影响区能谱图

Fig. 5 Energy spectrum of heat affected zone of T91/TP304H

2.4 力学性能检测

利用显微维氏硬度计对 T91/TP304H 异种钢焊接接头进行显微硬度测试,测试结果如表 4 所示。由表可知,焊缝区硬度较高,平均硬度为 221.2 HV; T91 钢一侧母材平均硬度为 202.6 HV,热影响区平均硬度值为 278.2 HV,母材区与热影响区硬度值差距较大,这是因为 T91 热影响区中存在 $M_{23}C_6$ 相、Laves 相、MX 相,而这些相属于硬质相,硬质相的存在能够提高材料的硬度和强度^[13]。

表 4 T91/TP304H 异种钢焊接接头显微硬度 (HV)

Table 4 Microhardness of T91/TP304H dissimilar steel welded joints

序号	T91 侧	T91 侧热影响区	焊缝区	TP304H 侧热影响区	TP304H 侧
1	200.4	275	218.7	180.7	180.3
2	199.8	269.3	224.5	174.3	178.9
3	203.4	283	218.9	177.5	163.4
4	207.1	285.4	222.5	168.3	169.7
平均值	202.6	278.2	221.2	175.2	173.1

焊接接头高温拉伸性能试验结果如表 5 所示。580 °C 高温拉伸的平均抗拉强度为 296.5 MPa,平均屈服强度为 166 MPa,平均延伸率为 21%。尽管焊接接头的屈服强度可以满足 TP304H 的标准值(≥ 102 MPa),但未能达到 T91 的标准值(≥ 235 MPa)。所有试样的断裂位置均位于 T91 侧母材处,表明 T91 侧焊缝及母材处的抗拉强度衰退较为显著。

表 5 T91/TP304H 异种钢焊接接头高温下拉伸

Table 5 T91/TP304H dissimilar steel welded joints tensile at high

temperature				
编号	抗拉强度 /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	延伸率 $A/\%$	断裂位置
1	290	175	15.5	T91 侧热影响区
2	303	157	26.5	T91 侧热影响区
平均值	296.5	166	21	—
标准值	—	T91 ≥ 235 TP304H ≥ 102	—	—

2.5 蠕变持久试验及寿命预测

使用 T91/TP304H 异种钢管道制备标准持久试验试样,并利用 GNT300 万能试验机进行高温蠕变持久试验。试验参数及蠕变持久试验结果如表 6 所示,蠕变持久曲线如图 6 所示,断裂试样宏观照片如图 7 所示。

表 6 蠕变持久试验结果

Table 6 Creep endurance test results

样品编号	材料牌号	试验温度/°C	试验应力/MPa	实际断裂时间/h	断裂位置
1	T91/TP304H	580	110	3 000(未断)	—
2	T91/TP304H	580	120	2 657.1	T91 侧热影响区
3	T91/TP304H	580	130	1 925	T91 侧热影响区
4	T91/TP304H	580	140	724.24	T91 侧热影响区
5	T91/TP304H	580	150	696.01	T91 侧热影响区
6	T91/TP304H	580	165	445.58	T91 侧热影响区
7	T91/TP304H	580	170	330.45	T91 侧热影响区

对于高温部件的蠕变寿命评估,国内外进行了大量相关研究并提出了多种试验和理论方法,主要包括持久性强度测试法、短时持久性强度测试法、时间-温度参数法等,这些方法可用于计算材料的高温蠕变寿命^[14]。本文使用温度曲线推算法对焊接接头所在管道的剩余寿命进行估算。

对于幂率蠕变耐热钢材料,在给定 580 °C 温度试验工况下,应力 τ 和断裂时间 σ 之间的关系可通过经验公式(1)拟合^[15]

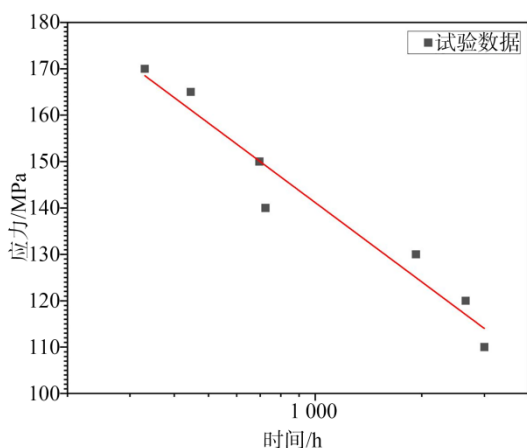


图6 蠕变持久曲线

Fig. 6 Creep persistence curve



图7 断裂试样宏观照片

Fig. 7 Macroscopic photograph of fractured specimen

$$\tau = A\sigma^{-B} \quad (1)$$

对公式进行数学变换,将式(1)简化为标准直线方程 $y=a+bx$ 。依据表6蠕变持久试验结果,采用最小二乘法进行拟合,得到外推趋势线方程为:

$$y = -47.670\,01x + 283.771\,45 \quad (2)$$

根据温度曲线推算法可推导出管道最小断裂时间 t_r ,其推导式^[16]为:

$$\lg \frac{t_r}{10^4} = \frac{\lg \frac{n\sigma_\theta}{\sigma'_{10^4}}}{\lg \frac{\sigma'_{10^5}}{\sigma'_{10^4}}} \quad (3)$$

式中 σ'_{10^4} 、 σ'_{10^5} 分别为温度 T 下 10^4 h和 10^5 h的持久强度(93.09 MPa, 45.42 MPa); n 为应力系数取1.2; σ_θ 为内压折算应力,其计算公式为^[17]:

$$\sigma_\theta = \frac{p(D_0 - S)}{2S} \quad (4)$$

式中 p 为受热面设计压力(单位:MPa); D_0 为管子外径(单位:mm); S 为管子壁厚(单位:mm)。

环向应力计算结果如表7所示。通过拟合的曲线方程,可以计算出在工况下工作1万小时和10万小时的持久强度分别为93.09 MPa和45.42 MPa。将计算所得数据代入式(3),可以得出焊接接头T91侧预估剩余寿命为55 000 h,TP304H侧预估剩余寿

表7 环向应力计算结果

Table 7 Calculated results of circumferential stress

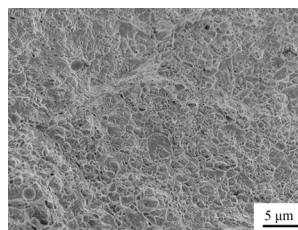
牌号	外径/mm	最小实测壁厚/mm	环向应力/MPa
TP304H	44.64	7.47	46.53
T91	44.22	7.12	50.04

命为50 500 h。

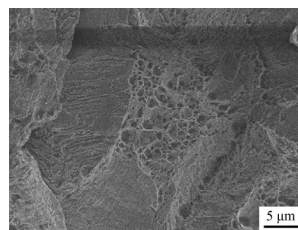
3 断口分析

使用DK7735电火花线切割机处理蠕变持久试验的试样,以获得断口。断口经酒精冲洗并干燥后,采用扫描电子显微镜观察断口形貌。

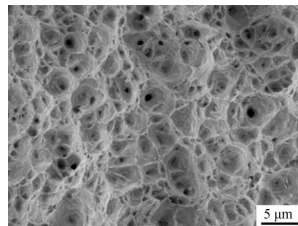
TP304H和T91母材在室温及580℃高温下的拉伸断口SEM形貌如图8所示。对于T91母材,室温下的拉伸断口(见图8a)显示了大量的小韧窝,这表明T91在室温下主要发生塑性断裂。当温度升高至580℃时(见图8c),T91的断口韧窝变得更大更深,并伴有显著的高温氧化损伤及众多空洞,这些空洞可能是由于拉伸过程中氧化物和碳化物的脱落造成的。通过对比韧窝类型图谱,可以确认在高温条件下,T91母材形成的韧窝为等轴韧窝。在室温条件下,TP304H母材的断口(见图8b)既有解理断裂特有的河流花样也有塑性断裂特征的韧窝,这表明TP304H在室温拉伸过程中经历了多种断裂机制。而在580℃的高温环境下(见图8d),TP304H



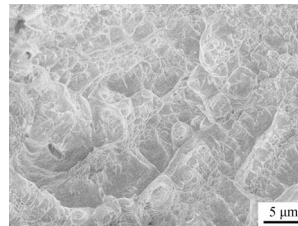
(a) T91 室温拉伸断口



(b) TP304H 室温拉伸断口



(c) T91 高温拉伸断口



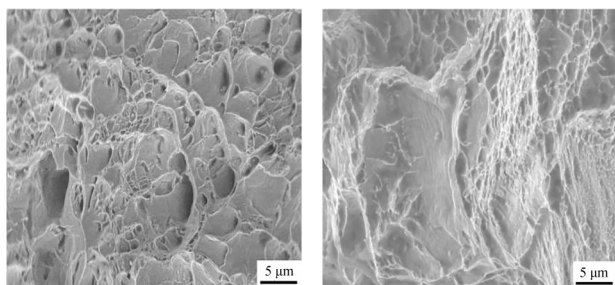
(d) TP304H 高温拉伸断口

图8 T91和TP304H高温拉伸断口SEM形貌

Fig. 8 SEM morphology of T91 and TP304H high temperature tensile fracture

的断口韧窝数量增多且尺寸增大,河流花样消失,表明其断裂模式转变为以塑性断裂为主。

T91/TP304H异种钢接头在不同应力条件下持久拉伸试验的断口SEM形貌如图9所示。图9a呈现在170 MPa条件下断裂时间为330.45 h的蠕变持久拉伸断口,该区域内分布着大量的浅韧窝和空洞,韧窝底部能观察到第二相粒子。图9b显示在120 MPa条件下、断裂时间为12 633.08 h的蠕变持久拉伸断口,该视场内分布的韧窝数量密集且普遍较深,几乎没有浅韧窝的存在,同样存在大量的空洞。从图9a可以看出,空洞的形成是由于在拉伸过程中碳化物和氧化物的脱落所造成的。对比图9a、图9b可以发现,在相同温度条件下,低应力有助于材料的塑性变形过程进展充分,从而使得断口韧窝尺寸增大,深度增加,而高应力会导致金属内部的位错密度增加,位错运动加快,使金属更容易发生塑性变形,并且变形速度更快。同时,高应力还可能导致金属内部出现更多的滑移系统,进一步促进塑性变形的发生。因此,在高应力作用下,金属材料的塑性变形过程会缩短。



(a) 330.45 h断裂断口

(b) 12 633.08 h断裂断口

图9 T91/TP304H异种钢焊接接头持久试验断口SEM形貌
Fig. 9 SEM morphology of T91/TP304H dissimilar steel joint persistence test fracture

4 结论

本文对亚临界锅炉中已运行近9.3万小时的T91/TP304H异种钢焊接接头进行了系统的性能评估,主要结论如下:

(1)长期服役的T91/TP304H异种钢焊接接头,在T91侧的主要组成为回火马氏体,且T91热影响区组织中存在较多的碳化物相,导致焊接接头抗氧

化性能和抗断裂性能下降,其可靠性降低;TP304H侧母材处和热影响区的主要组成为孪晶奥氏体,其晶粒细小;接头母材及焊缝各部分都发生了不同程度的老化。

(2)长期服役T91/TP304H异种钢焊接接头试样拉伸的T91侧屈服强度低于标准中要求的最低值,在高温条件下材料的抗拉伸性能下降,其力学性能存在较大程度的衰退。

(3)焊接接头T91侧预估剩余寿命为55 000 h,TP304H侧预估剩余寿命为50 500 h。但焊缝、T91与TP304H母材性能已发生劣化,其安全运行的可靠性下降。

参考文献:

- [1] 吴思明,庄庆佐.某660MW亚临界锅炉过热器包墙管吹灰孔让管泄漏故障分析[J].电气技术与经济,2024(09):249-251.
WU S M, ZHUANG Q Z. Analysis of Leakage Failure in the Blowdown Hole of the Superheater Envelope Tubes of a 660MW Subcritical Boiler [J]. Electrical Technology and Economy, 2024(09):249-251.
- [2] 洪卫林.某300 MW亚临界锅炉高温再热器泄漏原因分析[J].流体测量与控制,2024,5(03):32-35.
HONG W L. Analysis of Leakage Reasons for High-Temperature Reheaters in a 300 MW Subcritical Boiler [J]. Fluid Measurement and Control, 2024, 5 (03): 32-35.
- [3] 胡莹,赵阳,宋扬.300 MW亚临界参数锅炉燃烧优化试验研究[J].东北电力技术,2024,45(05):41-44.
HU Y, ZHAO Y, SONG Y. Combustion Optimization Test Research on 300 MW Subcritical Parameter Boilers [J]. Northeast Electric Power Technology, 2024, 45 (05):41-44.
- [4] 张乾乾,张建伟.350MW亚临界锅炉低温再热器失效分析[J].电焊机,2024,54(04):71-76+97.
ZHANG Q Q, ZHANG J W. Failure Analysis of Low-Temperature Reheaters in a 350MW Subcritical Boiler [J]. Electric Welding Machine, 2024, 54 (04): 71-76+97.
- [5] 何朋非,张仁魁,周梦保.经长时服役的超临界锅炉T91/TP347H异种钢接头性能分析[J].热加工工艺,2024,53(09):87-90.
HE P F, ZHANG R K, ZHOU M B. Performance Analysis of T91/TP347H Dissimilar Steel Joints in Supercritical



cal Boilers After Long-Term Service[J]. Hot Working Technology, 2024, 53(09): 87-90.

- [6] 王康年, 王冬春. 42CrMo 与 06Cr19Ni10 异种钢焊接工艺研究[J]. 现代制造技术与装备, 2024, 60(09): 146-149.

WANG K N, WANG D C. Study on Welding Process of 42CrMo and 06Cr19Ni10 Dissimilar Steels[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2024, 60(09): 146-149.

- [7] 李途岩, 吴斌, 王钰珏, 等. SUPER304/T92 异种钢焊接件热老化的涡流检测[J]. 无损检测, 2024, 46(09): 1-6.

LI T Y, WU B, WANG Y J, et al. Eddy Current Testing of Thermal Aging in SUPER304/T92 Dissimilar Steel Welded Parts[J]. Nondestructive Testing, 2024, 46(09): 1-6.

- [8] 黄应红, 李春桂, 梁泽宁, 等. T91+TP347H 异种钢焊接接头失效分析[J]. 电焊机, 2024, 54(07): 138-143.

HUANG Y H, LI C G, LIANG Z N, et al. Failure Analysis of T91+TP347H Dissimilar Steel Welded Joints[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(07): 138-143.

- [9] 李腾. 火电厂铁素体/奥氏体钢焊接接头在使用过程中的显微组织演变研究[J]. 电气技术与经济, 2024, (06): 119-122.

LI T. Microstructure Evolution Study of Ferrite/Austenite Steel Welded Joints in Thermal Power Plants[J]. Electrical Technology and Economy, 2024(06): 119-122.

- [10] 胡涛麟, 刘静, 刘宏扬, 等. 奥氏体化温度对改良型 T23 铁素体耐热钢微观组织与力学性能的影响[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024(6): 594-602.

HU T L, LIU J, LIU H Y, et al. Influence of Austenitizing Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of Modified T23 Ferritic Heat-Resistant Steel[J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science Edition), 2024(6): 594-602.

- [11] 王炬晋. 焊接及焊后热处理过程中 P92 压力容器钢焊接热影响区微观组织和力学性能的变化[D]. 辽宁: 东北大学, 2021.

WANG J J. Changes in Microstructure and Mechanical

Properties of the Weld Heat Affected Zone of P92 Pressure Vessel Steel During Welding and Post-Weld Heat Treatment[D]. Liaoning: Northeastern University, 2021.

- [12] 吴跃, 柴付方卓, 王家庆, 等. 高温软化和轧制对 Super304H 耐热钢晶粒长大的影响机理[J]. 热加工工艺, 2025(05): 96-100+104.

WU Y, Chai F F Z, WANG J Q, et al. Mechanism of Grain Growth in Super304H Heat-Resistant Steel Induced by High-Temperature Softening and Rolling[J]. Hot Working Technology, 2025(05): 96-100+104.

- [13] 林崇龙. 珠江发电厂 1 号炉再热器 T91 与 TP304H 异种钢的焊接[J]. 广东电力, 1998(01): 53-55.

LIN C L. Welding of T91 and TP304H Dissimilar Steels in the Reheater of No. 1 Boiler at Pearl River Power Plant[J]. Guangdong Electric Power, 1998(01): 53-55.

- [14] 刘佳伟, 宋少平, 郑坊平. 高温再热器管蠕变剩余寿命和材质状态评估[J]. 电工技术, 2024(16): 168-170.

LIU J W, SONG S P, ZHENG F P. Creep Rupture Life and Material State Assessment of High-Temperature Reheater Tubes[J]. Electric Engineering, 2024(16): 168-170.

- [15] 马天一. 高温炉管的状态分析和剩余寿命评估[D]. 辽宁: 大连海洋大学, 2024.

MA T Y. State Analysis and Residual Life Assessment of High-Temperature Furnace Tubes[D]. Liaoning: Dalian Ocean University, 2024.

- [16] 王峥, 王延峰, 张作贵. 12Cr1MoV 钢受热面管的剩余寿命研究[J]. 动力工程学报, 2023, 43(10): 1254-1259.

WANG Z, WANG Y F, ZHANG Z G. Study on Residual Life of 12Cr1MoV Steel Heated Surface Tubes[J]. Journal of Power Engineering, 2023, 43(10): 1254-1259.

- [17] 魏壮. 轨道车辆车轮疲劳强度分析及剩余寿命评估[D]. 辽宁: 大连交通大学, 2023.

WEI Z. Fatigue Strength Analysis and Residual Life Assessment of Railway Vehicle Wheels[D]. Liaoning: Dalian Jiaotong University, 2023.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

