

长期服役 P91 钢蒸汽管道焊接接头显微组织及力学性能研究

田成川¹, 赵海^{1*}, 田妮², 刘杨², 郇晓慧³, 王巍麟¹

(1. 华电电力科学研究院有限公司东北分院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学材料各向异性与织构教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 3. 华电电力科学研究院有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要: P91 钢被广泛应用于大型电站的发电机组和蒸汽管道等关键部位。长期服役会导致 P91 钢蒸汽管道性能退化, 目前研究多关注长期服役对母材性能的影响, 而对焊接接头各部位的显微组织和力学性能缺乏系统研究。因此, 分别从未服役的 P91 钢蒸汽管道的母材(NBM)和已服役 74 000 h 的 P91 钢蒸汽管道焊接接头的母材(BM)、热影响区(HAZ)焊缝(WZ)取材, 利用金相显微镜、扫描电镜、透射电镜、硬度计和拉伸试验机, 研究长期服役对 P91 钢蒸汽管道焊接接头的显微组织和力学性能的影响。结果表明: 相比于 NBM, BM 和 WZ 的硬度和拉伸性能均未出现退化迹象, 而 HAZ 的拉伸性能在硬度基本未变的情况下显著退化, 表明硬度不能用于判断服役时间低于 74 000 h 的 P91 钢蒸汽管道焊接接头的寿命。焊接时高温热循环回火使 HAZ 的马氏体板条和碳化物发生粗化, 且碳化物沿马氏体板条界面连续析出分布, 对 HAZ 的拉伸性能已造成一定程度的损害。长期服役使本已老化的 HAZ 显微组织明显退化, 致使其拉伸性能显著下降, 断裂模式由韧窝断裂转变为韧窝和准解理复合断裂。

关键词: 长期服役 P91 钢; 焊接接头; 热影响区; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG454

文献标志码: A

文章编号: 1673-9981(2022)06-0920-08

引文格式: 田成川, 赵海, 田妮, 等. 长期服役 P91 钢蒸汽管道焊接接头显微组织及力学性能研究[J]. 材料研究与应用, 2022, 16(6):920-927.

TIAN Chengchuan, ZHAO Hai, TIAN Ni, et al. Study on Microstructure and Mechanical Properties of Long-Term Service P91 Steel Steam Pipe Welded Joint[J]. Materials Research and Application, 2022, 16(6):920-927.

19 世纪 80 年代初, 美国能源局在 9Cr1Mo 钢的基础上通过添加微合金化元素 V 和 Nb 并控制钢中 N 的质量分数, 获得了一种兼具优异力学性能和良好焊接性能的钢种, 即 P91 钢^[1-3]。该钢种在研制成功后的短短几年时间里, 就得到美国标准 ASTM 和 ASME 的高度认可^[4]。我国从 1987 年开始引进 P91 钢, 距今已有 30 多年历史, 目前已完全实现国产化。由于该钢种具有较低的热膨胀系数、良好的导热性和优异的高温持久强度, 因此在众多大型电站的发电机组和蒸汽管道等关键核心部位得到广泛应用^[5-7]。

P91 钢是典型的马氏体耐热钢, 经正火和回火热处理后得到回火马氏体组织^[8], 同时也在原奥氏体晶界和马氏体板条边界处析出细小弥散的碳化物颗粒以钉扎晶界与亚晶界, 从而达到稳定马氏体结构的目的^[9-10]。许多学者通过大量研究证明, 耐热钢蒸汽管道母材在长期高温服役过程中, 碳化物在外应力作用下不断发生粗化, 晶界、亚晶界和位错的钉扎效果逐渐减弱, 使显微组织出现明显老化, 进而造成力学性能的快速退化^[11-14]。然而, 前人的研究多关注于长期服役对耐热钢蒸汽管道母材的作用, 但在长期服役对耐热钢蒸汽管道焊接接头各部位的显微

收稿日期: 2022-07-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51871043)

作者简介: 田成川(1983-), 男, 辽宁大连人, 硕士, 高级工程师, 主要从事发电企业金属材料的研究、检测工作, E-mail: cc_tian@163.com。

通信作者: 赵海(1980-), 男, 辽宁铁岭人, 硕士, 工程师, 主要从事发电机组金属部件研究及技术监督工作, E-mail: zhaohai8029@163.com。

组织和力学性能的影响机制方面缺乏系统研究。

长期以来,硬度检测技术在判断大型电站蒸汽管道服役安全寿命方面一直发挥着重要作用^[15]。通常采用布氏硬度计或便携式里氏硬度计测定蒸汽管道焊接接头母材(BM)、热影响区(HAZ)和焊缝(WZ)等各部位的硬度,以判定焊接接头各部位的显微组织的老化程度和强度等级^[16-17]。布氏硬度计体积较大不便于携带,所以现场实际多使用便携式里氏硬度计测定蒸汽管道焊接接头各部位的硬度^[18]。尽管硬度测试在一定程度上可有效判定焊接接头显微组织明显老化部位的服役安全寿命,但对于硬度变化并不显著的接头其它部位的判定却显无力,其可行性也有待进一步探讨。

基于上述分析,本研究从国内某大型电站未服役的P91钢蒸汽管道母材(NBM)和服役74 000 h的

P91钢蒸汽管道焊接接头各部位进行取材,利用金相显微镜、扫描电镜、透射电镜、里氏硬度计、室温和高温拉伸试验机对NBM、BM、HAZ和WZ的显微组织、碳化物、硬度、室温和高温拉伸性能进行系统研究,探究长期服役对P91钢蒸汽管道焊接接头各部位显微组织和力学性能的影响机制。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

国内某大型电站服役P91钢蒸汽管道焊接接头已在额定温度为541℃、额定压力为17.47 MPa的环境中累计运行近74 000 h,其宏观形貌如图1所示。从图1可见,接头区域由BM、HAZ和WZ三部分组成。

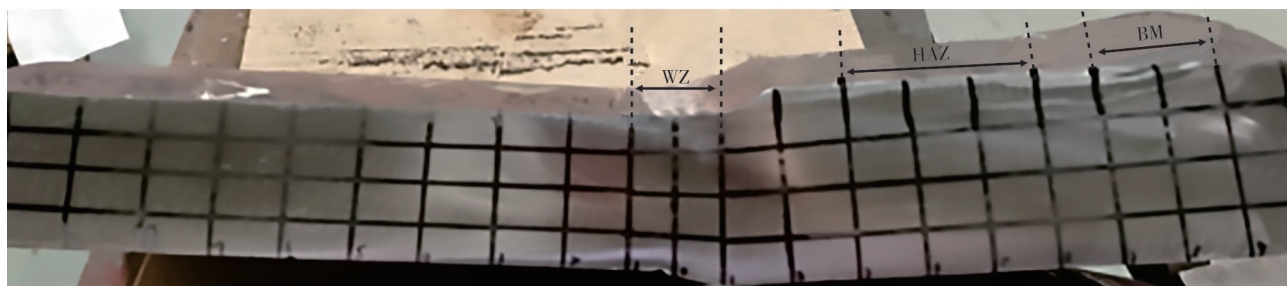


图1 P91钢蒸汽管道焊接接头宏观形貌

Figure 1 Macro-morphology of P91 steel steam pipe welded joint

1.2 实验方法

使用Equotip Bambino 2型里氏硬度计测定NBM、BM、HAZ和WZ的硬度,并从他们处分别切取金相试样及室温和高温拉伸试样。对于金相试样,首先在5%的硝酸酒精溶液腐蚀15 s,之后采用Olympus GX71型金相显微镜观察显微组织。对于拉伸试样,利用AG-X100kN型电子万能材料试验机,以4 mm·min⁻¹的拉伸速率检测各室温拉伸试样的抗拉强度、屈服强度和延伸率;采用AG-XPLUS100kN型电子万能材料试验机,在545℃的温度下以4 mm·min⁻¹的拉伸速率检测各高温拉伸试样的抗拉强度、屈服强度和延伸率。

首先使用JXA-8530F型扫描电镜观察室温和高温拉伸断口形貌,随后从拉伸试样平行段切取圆形薄片,经机械研磨后通过电解双喷(双喷液为7%的高氯酸酒精溶液,电压为10—15 mV,电流为50—60 mA)制备透射试样,最后采用JEM-2100F型透射电镜观察碳化物。

2 结果与讨论

2.1 显微组织分析

采用金相显微镜观察NBM、BM、HAZ和WZ的显微组织,结果如图2所示。从图2可以看出,P91钢蒸汽管道焊接接头各部位经长期服役后,其组织结构特征未发生改变,仍为回火马氏体组织。NBM(图2(a))的马氏体晶粒细小且均匀,与NBM相比,接头BM(图2(b))经长期服役后其马氏体板条未见明显粗化,马氏体晶粒同样细小均匀,然而BM处随机分布于晶界和晶内的碳化物数量却显著增加。WZ(图2(d))的马氏体晶粒尺寸较BM也未见明显变化。相比于BM和WZ,HAZ(图2(c))的马氏体晶粒尺寸明显增大,其均匀程度也有所下降。综合来看,P91蒸汽管道焊接接头经过长期的在高温高压环境中服役后,BM和WZ的显微组织均未表现出明显的老化迹象,而HAZ的显微组织老化较为严重。

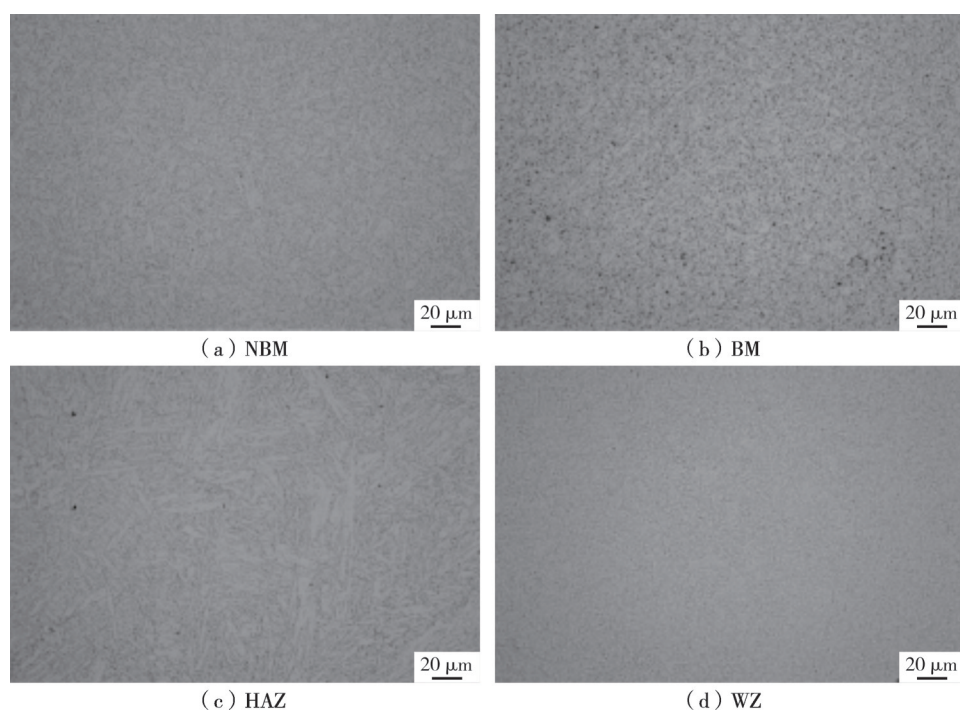


图2 金相显微组织

Figure 2 Metallographic microstructure

利用透射电镜观察NBM、BM、HAZ和WZ的碳化物,结果如图3所示。从图3可见:NBM的碳化物尺寸较小,呈椭球状多分布在晶内,这是由于P91钢蒸汽管道焊接接头长期在高温高压的环境中服役,各部位的碳化物出现不同程度的变化;相比于

NBM,BM的碳化物同样在晶界和晶内均有分布,数量未见显著变化,尺寸略有增加但其变化幅度不大;WZ的碳化物特征与BM较为相似,碳化物数量和分布较NBM同样未见显著变化,尺寸也略微增大;HAZ的碳化物数量多于BM和WZ,且该部位的

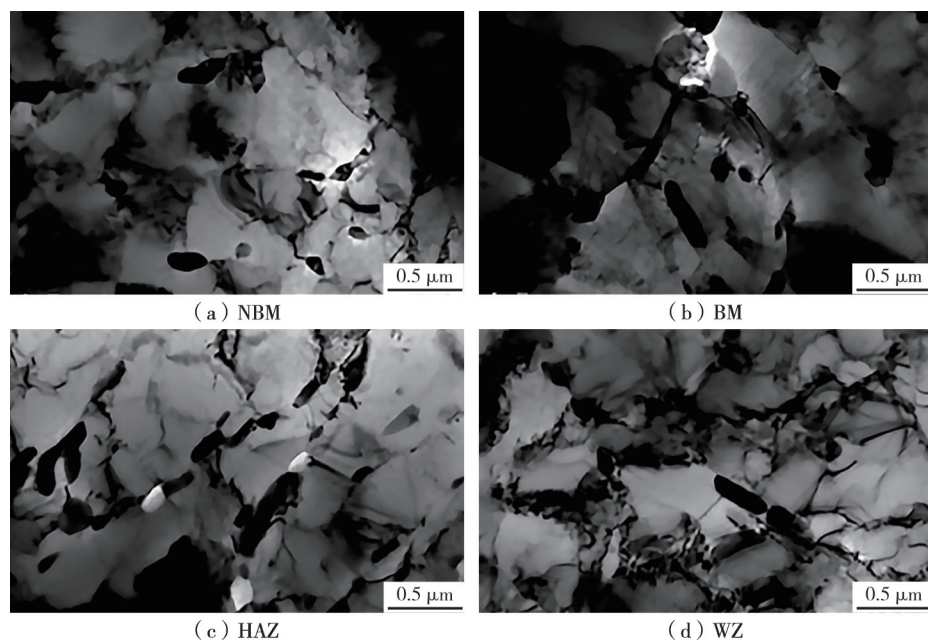


图3 透射电镜形貌

Figure 3 TEM morphology

碳化物沿着马氏体板条边界连续析出分布,这是由于焊接过程中HAZ遭受严重的高温热循环回火所致^[19-20]。从图3还可以看出,P91钢蒸汽管道焊接接头长期在高温高压的环境下服役后,BM和HAZ的位错密度出现不同程度的减小,其中HAZ的位错密度变化程度更大。

2.2 力学性能分析

2.2.1 硬度分析

利用便携式里氏硬度计检测NBM的硬度,发

现其硬度值在465—475 HL的范围内波动。采用相同方式对服役P91钢蒸汽管道焊接接头各部位的硬度进行检测,结果如图4所示。从图4可见:WZ和HAZ的硬度基本接近,稳定在460—470 HL的范围内,与NBM相比,这两个部位的硬度值没有发生变化,说明长期的高温高压服役未对WZ和HAZ的硬度产生影响;相比于NBM,BM的硬度值略有增大,但其变化幅度很小。综合看来,NBM、BM、HAZ和WZ四个部位的硬度值较为接近,未表现出明显的变化趋势。

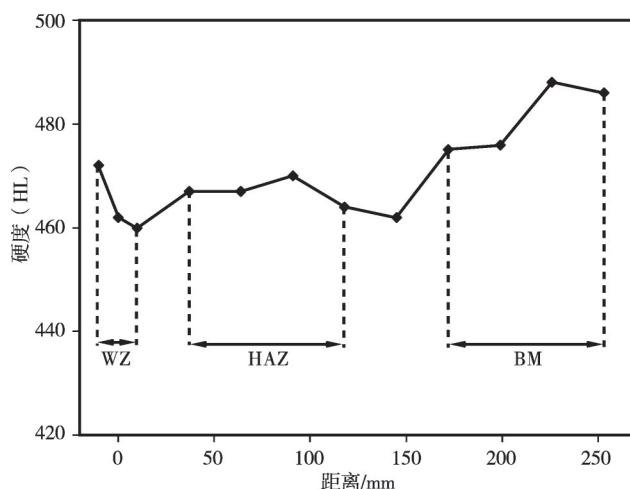


图4 服役P91钢蒸汽管道焊接接头的硬度分布

Figure 4 Hardness distribution of service P91 steel steam pipe welded joint

2.2.2 拉伸性能

图5为NBM、BM、HAZ和WZ的室温拉伸实验

结果。从图5可以看出:BM的抗拉强度和屈服强度与NBM较为接近,未见明显变化;与NBM相比,

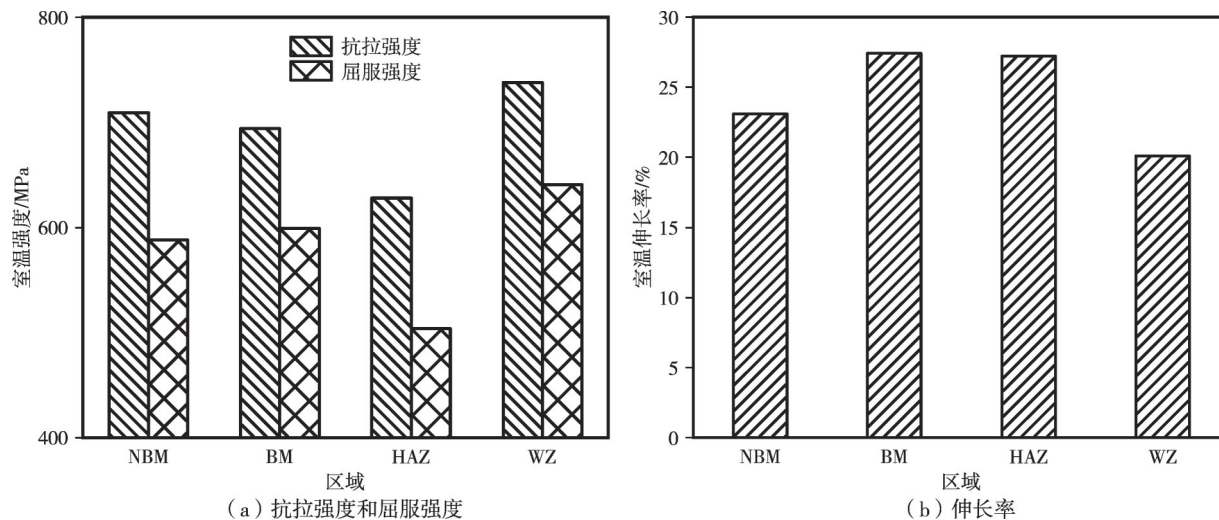


图5 NBM、BM、HAZ和WZ的室温拉伸性能

Figure 5 Room temperature tensile properties of NBM, BM, HAZ, and WZ

HAZ的抗拉强度及屈服强度分别下降了11.4%和14.3%;相比于NBM,WZ的抗拉强度及屈服强度出现上升趋势,分别增大了4.1%和9.0%;NBM、BM、HAZ和WZ四个部位的延伸率较为接近,变化幅度均不大。

图6为NBM、BM、HAZ和WZ的高温拉伸实验结果。从图6可见,BM和NBM的抗拉强度和屈服强度较为接近,与NBM相比,HAZ的抗拉强度和屈服强度均有所降低,WZ的抗拉强度和屈服强度却明显提升且分别增大了87和93 MPa。

通过对比发现,服役P91钢蒸汽管道焊接接头各部位的室温和高温拉伸性能呈现相同的变化规律,与NBM的室温和高温拉伸性能相比,BM的拉伸性能均未表现出明显变化,HAZ的拉伸性能均明

显降低,WZ的拉伸性能均呈上升趋势。尤力等^[21]研究了服役78 000 h的T91/G102异种钢焊接接头力学性能发现,对于T91钢一侧,各部位硬度和强度均呈现明显退化迹象,说明该服役时长下可通过硬度判定强度的波动及退化。王长才等^[22]研究表明,对于服役6 a的P91钢管焊接接头,其各部位硬度基本一致,而强度出现一定程度恶化,说明该服役时长下不能通过硬度判定强度的波动和退化。在本研究中,NBM、BM、HAZ和WZ部位的硬度基本一致,而HAZ的强度低于NBM、BM和WZ。由此可见,对于服役时间低于74 000 h、显微组织未见显著变化的P91钢蒸汽管道焊接接头,硬度测试不能用于判定接头各部位室温和高温拉伸性能波动及退化。

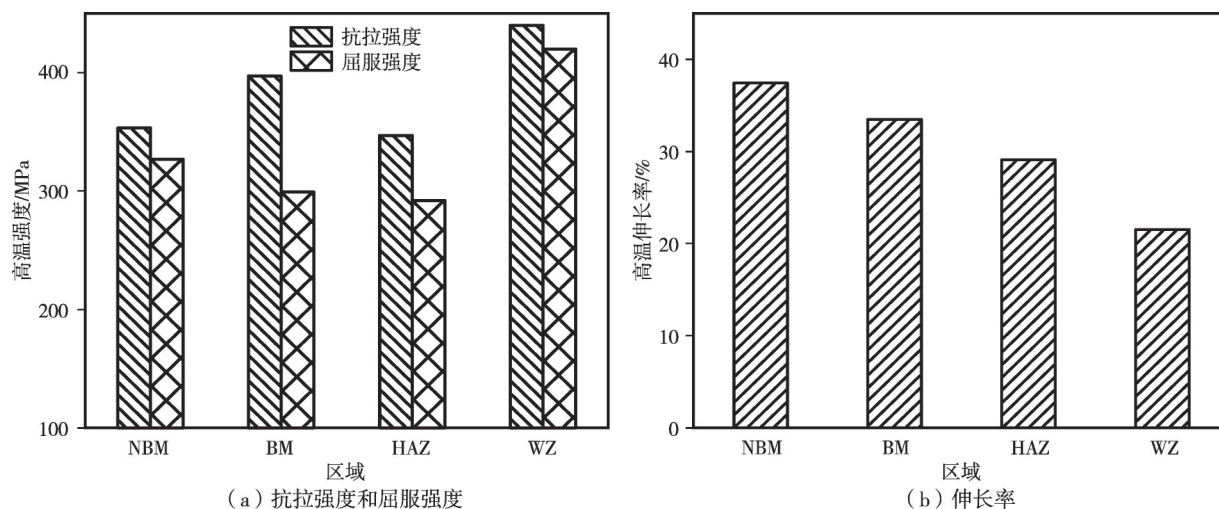


图6 NBM、BM、HAZ和WZ的高温拉伸性能

Figure 6 Elevated temperature tensile properties of NBM, BM, HAZ, and WZ

2.3 拉伸断裂特征分析

采用扫描电镜观察NBM、BM、HAZ和WZ的室温拉伸断口形貌,其结果如图7所示。从图7(a)可见,NBM的断裂面全部由韧窝组成,韧窝大而深,并且不均匀,其断裂模式为韧窝断裂。从图7(b)和图7(c)可见,P91钢蒸汽管道焊接接头经长期服役后,BM和HAZ的拉伸断裂模式由韧窝断裂转变为韧窝和准解理复合断裂,二者的断裂面均由韧窝和准解理组成,不同之处在于HAZ的断裂面上可以清楚地看到大量二次裂纹,说明HAZ的基体强度表现出明显下降。从图7(d)可见,相比于BM和HAZ,WZ的断裂模式未发生转变,仍为韧窝断裂,此处的

韧窝尺寸较小且比较均匀。

图8为NBM、BM、HAZ和WZ的高温拉伸断口形貌。从图8(a)可见,NBM的拉裂面上都是韧窝,其断裂模式均为韧窝断裂。从图8(b)和图8(c)可见,相比于NBM,BM和HAZ的断裂面上除韧窝外还存在部分准解理,他们的断裂模式为韧窝和准解理复合断裂,说明长期服役后的接头BM和HAZ的断裂模式由韧窝断裂转变为韧窝和准解理复合断裂。从图8(d)可见,相比于BM和HAZ,WZ的拉裂面上都是韧窝,说明P91钢蒸汽管道焊接接头经长期服役后,WZ的断裂形式未发生转变,仍为韧窝断裂。

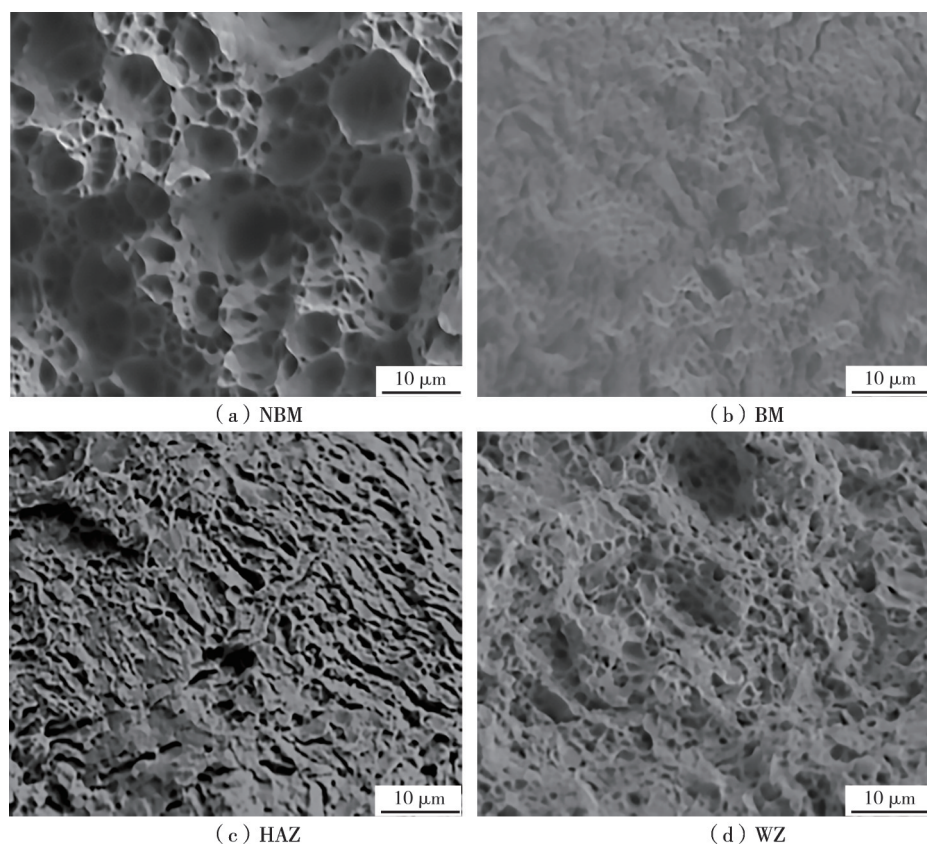


图 7 室温拉伸断口形貌

Figure 7 Tensile fracture morphology at room temperature

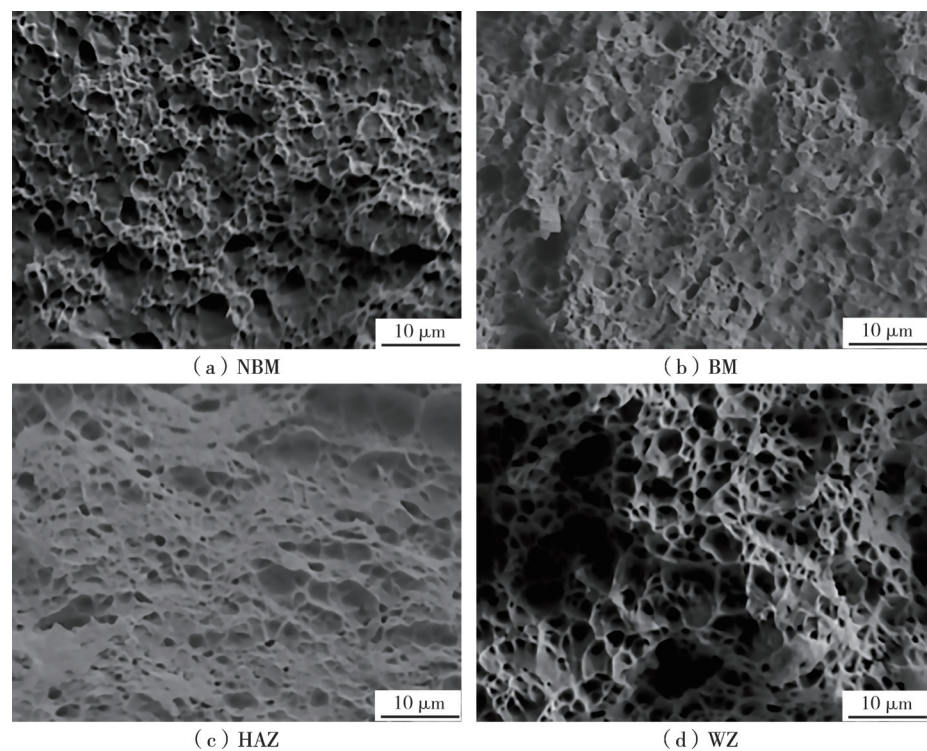


图 8 高温拉伸断口形貌

Figure 8 Tensile fracture morphology at elevated temperature

2.4 HAZ拉伸性能退化机理

综上所述,相比于NBM,长期服役P91钢蒸汽管道焊接接头BM和WZ的显微组织未见老化,拉伸性能也没有表现出退化趋势,然而HAZ的显微组织却出现明显老化,其拉伸性能也在硬度基本与NBM相似的情况下显著退化。在P91钢蒸汽管道建造过程中焊接产生的高温热循环回火,使HAZ区域的显微组织相对于接头其它区域已发生一定程度的老化^[23],主要体现在马氏体晶粒和碳化物发生粗化,同时碳化物沿马氏体板条界面连续析出。马氏体板条粗化使位错密度大幅减小,导致位错强化对强度的贡献值下降,进而造成拉伸性能显著退化^[24-25]。碳化物在高温热循环回火的作用下沿马氏体板条界面快速析出并长大,析出强化对强度的作用效果减弱,而且碳化物在马氏体板条界面析出并长大的过程中要消耗马氏体晶粒内部的Cr、Mo、Fe等固溶元素,使固溶强化作用降低^[26-28]。尽管HAZ焊后检验合格,但长时间在高温高压的环境中服役使其显微组织老化加重,拉伸性能快速退化,成为P91钢蒸汽管道的最薄弱部位。

3 结论

(1)对于服役时间不超过74 000 h、显微组织老化不明显的P91钢蒸汽管道焊接接头,硬度测试无法有效判断接头各部位室温和高温拉伸性能的波动及退化。

(2)P91钢蒸汽管道焊接接头经74 000 h服役后,各部位硬度与NBM硬度较为接近,没有表现出明显变化。BM和WZ的室温和高温拉伸性能均未见明显退化,而HAZ的室温和高温拉伸性能却显著退化,其拉伸断裂模式由韧窝断裂转变为韧窝和准解理复合断裂,同时在其断裂面上可清晰看到大量二次裂纹。

(3)焊接过程中的高温热循环回火使HAZ的马氏体板条和碳化物发生粗化,且碳化物沿马氏体板条界面连续析出,对HAZ的室温和高温拉伸性能造成一定程度伤害。长期在高温高压的环境中服役,使本已老化的HAZ显微组织进一步退化,造成了室温和高温拉伸性能显著下降。

参考文献:

- [1] JONES W B, HILLS C R, POLONIS D H. Microstructural evolution of modified 9Cr-1Mo steel[J]. Metallurgical Transactions A, 1991, 22(5): 1049-1058.
- [2] 刘省. T/P91-92耐热钢相参量和性能的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [3] PANDEY C, MAHAPATRA M M, KUMAR P, et al. Some studies on P91 steel and their weldments [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 743: 332-364.
- [4] 束国刚. 超临界锅炉用T/P91钢的组织性能与工程应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2006.
- [5] 王敬忠, 刘正东, 包汉生, 等. 中国超超临界电站锅炉关键材料用钢及合金的研究现状[J]. 钢铁, 2015, 50(8): 1-10.
- [6] 张敏, 周小华, 李继红. 不同组配P91钢焊接接头断裂性能分析[J]. 铸造技术, 2007, 28(7): 961-964.
- [7] 陈宇. 长期服役T/P91耐热钢的微观组织结构与失效机理的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [8] 吴术全, 韩涛, 姜世凯, 等. 某超临界机组用P91钢的强度退化行为[J]. 机械工程材料, 2021, 45(1): 28-33.
- [9] PANDEY C, GRIR A, MAHAPATRA M M. Effect of normalizing temperature on microstructural stability and mechanical properties of creep strength enhanced ferritic P91 steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 657: 173-184.
- [10] PANDEY C, GRIR A, MAHAPATRA M M. Evolution of phases in P91 steel in various heat treatment conditions and their effect on microstructure stability and mechanical properties [J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 664: 58-74.
- [11] PANAIT C G, LIPIEC A Z, KOZIEL T, et al. Evolution of dislocation density, size of subgrains and MX-type precipitates in a P91 steel during creep and during thermal ageing at 600 °C for more than 100 000 h [J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527: 4062-4069.
- [12] ZIELINSKI A, DOBRZANSKI J, PURZYNSKA H, et al. Changes in properties and microstructure of high-chromium 9-12%Cr steels due to long-term exposure at elevated temperature [J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2016, 61(2): 957-964.
- [13] PANAIT C G, BENDICK W, FUCHSMANN A, et al. Study of the microstructure of the grade 91 steel after more than 100000h of creep exposure at 600 °C [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2010, 87(6): 326-335.
- [14] PENG Z F, LIU S, YANG C, et al. The effect of phase parameter variation on hardness of P91 components after service exposures at 530—550 °C[J]. Acta Materialia, 2017, 143: 141-155.
- [15] 范德良, 王志武, 句光宇. P91钢管道异常低硬度部位的组织和性能[J]. 金属热处理, 2020, 45(3): 1-6.
- [16] 吕永红. 电站锅炉检验中硬度检测技术的应用探究[J]. 锅炉制造, 2019(1): 62-64.
- [17] 杨超, 汤淳坡, 龚宏强, 等. 低硬度P91管件的安全性评价及寿命预测[J]. 中国电力, 2017, 50(8): 82-86.
- [18] 黄浩. 硬度检测技术及其在电站锅炉检验中的应用研究[J]. 科技与企业, 2014(15): 398.

- [19] JUNEK M, SVOBODOVA M, HORVATH J, et al. The effect of long-term ageing on microstructural properties and Laves phase precipitation of welded P91 and P92 steels[J]. Steel Research International, 2022, 93(2): 2100311.
- [20] 梁志芳, 王迎娜, 李午申, 等. 20MnSi控冷钢筋焊接软化区宽度[J]. 焊接学报, 2008, 29(12): 46-48.
- [21] 尤力, 宋西平. 高温长时运行后 T91/G102 异种钢焊接接头的性能及剩余寿命[J]. 机械工程材料, 2012, 36(10): 8-11.
- [22] 王长才, 侯德彬, 邓英林, 等. P91耐热钢焊接接头服役组织与性能研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(9): 245-247.
- [23] AKHTAR M, KHAJURIA A, SAHU J K, et al. Phase transformations and numerical modelling in simulated HAZ of nanostructured P91B steel for high temperature applications [J]. Applied Nanoscience, 2018, 8(7): 1669-1685.
- [24] LI H J, MITCHELL D. Microstructural characterization of P91 steel in the virgin, service exposed and post-service re-normalized conditions [J]. Steel Research International, 2013, 84(12): 1302-1308.
- [25] WANG S S, CHANG L, WANG L, et al. Microstructural stability and short-term creep properties of 12Cr-W-Mo-Co steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 622: 204-211.
- [26] PANDEY C, MAHAPATRA M M, KUMAR P, et al. Homogenization of P91 weldments using varying normalizing and tempering treatment [J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 710: 86-101.
- [27] 彭志方, 蔡黎胜, 彭芳芳, 等. P92钢625℃持久性能分段特征与各段中 $M_{23}C_6$ 及Laves相相参数的定量变化研究[J]. 金属学报, 2010, 46(4): 429-434.
- [28] ZHOU X S, LIU C X, YU L M, et al. Phase transformation behavior and microstructural control of high-Cr martensitic/ferritic heat-resistant steels for power and nuclear plants: a review[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2015, 31(3): 235-242.

Study on Microstructure and Mechanical Properties of Long-Term Service P91 Steel Steam Pipe Welded Joint

TIAN Chengchuan¹, ZHAO Hai^{1*}, TIAN Ni², LIU Yang², LI Xiaohui³, WANG Weilin¹

(1. Northeast Branch, Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110819, China; 2. Key Lab for Anisotropy and Texture of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310012, China)

Abstract: P91 steel is widely used in the key parts such as generator sets and steam pipelines in large power stations. Long-term service will lead to performance degradation of P91 steel steam pipelines. However, the current research mainly focuses on the effect of long-term service on the base metal, and there is a lack of systematic research on the microstructure and mechanical properties of P91 steel steam pipeline welded joint. In this paper, samples were obtained from the base metal of non-service P91 steel steam pipelines (NBM) as well as the base material (BM), heat affected zone (HAZ), and welded zone (WZ) of P91 steel steam pipeline welded joint in service for 74000 h. The microstructure and mechanical properties of long-term service P91 steel steam pipeline welded joint were studied by metallographic microscope, scanning electron microscope, transmission electron microscope, hardness tester, and tensile testing machine. The results show that compared with NBM, the hardness and tensile properties of BM and WZ show no signs of degradation, while the tensile properties of HAZ are significantly degraded when the hardness is basically unchanged. This indicates that hardness cannot be used to determine the service life of P91 steel steam pipeline welded joint with service time lower than 74000 h. The high temperature thermal cycle tempering during welding roughens the martensitic laths and carbides of HAZ, and the carbides are continuously precipitated and distributed along the interface of martensitic laths, which has caused a certain degree of damage to the tensile properties of HAZ. Long-term service will significantly degrade the already-aged microstructure of HAZ, resulting in a significant decrease in its tensile properties, and the fracture mode changes from dimple fracture to mixed fracture of dimple and quasi-cleavage.

Keywords: long-term service P91 steel; welded joint; heat affected zone; microstructure; mechanical property

(学术编辑: 褚欣)