

# 堆焊 P92 对 P91 钢焊接接头显微组织和力学性能的影响

李勇<sup>1,2</sup>, 方一鸣<sup>3</sup>, 王万里<sup>1,2</sup>, 占先强<sup>1,2</sup>, 吴跃<sup>1,2</sup>, 汤文明<sup>3</sup>

(1. 大唐锅炉压力容器检验中心有限公司, 安徽 合肥 230088; 2. 中国大唐集团科学技术研究总院有限公司华东电力试验研究院, 安徽 合肥 230088; 3. 合肥工业大学材料科学与工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 针对 P91 钢焊接接头细晶区 (FGHAZ) 与部分相变区 (ICHAZ) 硬度偏低、易产生 IV 型裂纹的工程难题, 首先在 P91 钢坡口表面堆焊一层 6~8 mm 厚的高强度 P92 钢, 经 1060 °C 正火+750 °C 回火中间热处理后, 再采用常规 P91 钢焊接工艺制备焊接接头, 开展有无 P92 堆焊层的 P91 钢焊接接头显微组织与力学性能的对比研究。结果表明: 堆焊 P92 的 P91 钢焊接接头热影响区 (HAZ) 中的 FGHAZ 与 ICHAZ 位于 P92 堆焊层内, 其显微硬度较无 P92 堆焊层的 P91 钢常规焊接接头提升约 4.9%, 有效抑制了软化区形成, 显著提高了焊接接头的硬度均匀性; 堆焊 P92 的 P91 钢焊接接头的硬度、冲击韧性 with 室温、高温拉伸力学性能均符合相关标准要求, 且优于无 P92 堆焊层的 P91 钢常规焊接接头。

**关键词:** P92 钢; P91 钢焊接接头; 堆焊; 热影响区; 显微组织; 力学性能

**中图分类号:** TG455 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6264(2026)02-0245-10

## Effect of P92 overlaying on microstructure and mechanical properties of P91 steel welded joint

LI Yong<sup>1,2</sup>, FANG Yi-ming<sup>3</sup>, WANG Wan-li<sup>1,2</sup>, ZHAN Xian-qiang<sup>1,2</sup>,  
WU Yue<sup>1,2</sup>, TANG Wen-ming<sup>3</sup>

(1. Datang Boiler Pressure Vessel Inspection Center Co Ltd, Hefei 230088, China; 2. East China Electric Power Test and Research Institute, China Datang Corporation Science and Technology General Research Institute Ltd, Hefei 230088, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In response to the engineering problem of low hardness and easy occurrence of type IV cracks in the fine-grained heat-affected zone (FGHAZ) and inter-critical heat-affected zone (ICHAZ) of P91 steel welded joints, a layer of high-strength P92 steel with a thickness of 6-8 mm was first overlayed on the P91 steel grooves, followed by an intermediate heat treatment of 1060 °C normalizing and 750 °C tempering. Finally, a conventional P91 welding technique was employed to fabricate the P91 steel welded joint with P92 overlay, and a comparative study was conducted on the microstructure and mechanical properties of P91 steel welded joints with and without P92 overlay. The results show that the FGHAZ and ICHAZ in the heat-affected zone (HAZ) of the P91 steel welded joint with P92 overlay are located within the P92 overlay layer, and its microhardness is about 4.9% higher than that of the conventional welded joint without P92 overlay, effectively suppressing the formation of softening zones and significantly improving the hardness uniformity of the P91 steel welded joint with P92 overlay. The hardness, impact toughness, and tensile mechanical properties at both room and high temperature of the P91 steel welded joint with P92 overlay meet the relevant standard requirements, and are superior to those of the conventional P91 welded joint without P92 overlay.

**Keywords:** P92 steel; P91 steel welded joint; overlaying; heat-affected zone (HAZ); microstructure; mechanical property

P91 (10Cr9Mo1VNbN) 是一种 9%~12%Cr 型马氏体耐热钢, 以其优良的高温性能和抗氧化性能著

收稿日期: 2025-03-06 修订日期: 2025-05-27

作者简介: 李勇 (1991—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事电站耐热材料性能评估研究, E-mail: 550466882@qq.com.

通信作者: 汤文明 (1969—), 男, 教授, 博士, 主要从事材料失效分析及可靠性评估研究, E-mail: wmtang69@126.com.

引用格式: 李勇, 方一鸣, 王万里, 等. 堆焊 P92 对 P91 钢焊接接头显微组织和力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2026, 47(2):245-254.

LI Yong, FANG Yi-ming, WANG Wan-li, et al. Effect of P92 overlaying on microstructure and mechanical properties of P91 steel welded joint [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2026, 47(2):245-254.

称。该钢种广泛应用于超临界及超超临界发电机组的主蒸汽管道和再热蒸汽管道系统,尤其适用于主蒸汽温度高于 500 °C 的高温环境<sup>[1-2]</sup>。供货态 P91 钢的组织以回火马氏体为主<sup>[3]</sup>,具有较高的耐热性、抗氧化性和抗蠕变性能,且在高温和高压环境下保持力学性能稳定。P92(10Cr9MoW2VNbBN)钢是在 P91 钢的基础上,降低了 Mo 元素的含量,添加 W 元素及微量 B 元素而得到的新型马氏体耐热钢,与 P91 钢相比,P92 钢中 W 等合金成分更加稳定,室温、高温力学性能更为优异<sup>[4]</sup>。

热影响区(HAZ)是焊接接头的重要组成部分,在很大程度上决定了焊接构件的质量和使用寿命。根据不同区域所经历的峰值温度、冷却速率等的不同,从焊缝(Weld)至母材(BM),HAZ 又可划分为粗晶区(CGHAZ)、细晶区(FGHAZ)、部分相变区(ICHAZ)与过回火区(OTHAZ)4 个具有特定微观结构和性能特征的区域<sup>[5]</sup>。在长期服役过程中,以 P91 钢焊接接头为代表的诸多马氏体耐热钢焊接接头可能发生 FGHAZ 和 IGH AZ 开裂,一般为 IV 型裂纹萌生与扩展所致<sup>[6-7]</sup>。Fabricius 等<sup>[8]</sup>报道了中国、美国等多个国家地区火电机组锅炉的多起 P91 钢焊接接头 IV 型裂纹开裂失效事件,均造成了巨大的经济损失。大量研究表明<sup>[9-11]</sup>,焊后热处理(PWHT)态 Cr-Mo 系马氏体耐热钢焊接接头在接近 BM 的 FGHAZ 和 IGH AZ 出现明显的硬度下降,称为软化区,是其高温服役过程中 IV 型裂纹萌生与扩展的关键部位。Pandey 等<sup>[12]</sup>进一步研究了 PWHT 对 P91 钢焊接接头蠕变断裂行为的影响,认为在 PWHT 及后续服役过程中,焊接接头软化区内 Laves 相和  $M_{23}C_6$  相颗粒的粗化促进了蠕变孔洞的形成,进而促进 IV 型裂纹的形成与扩展。可见,为延长 P91 钢焊接接头的高温服役寿命,减小 IV 型裂纹开裂的发生频率是关键所在。对此,迄今的大多数研究主要集中于合金元素对 P91 钢焊接接头蠕变断裂强度的影响上。Sato 等<sup>[13]</sup>研究了 650 °C 下不同合金元素对 P91 钢焊接接头蠕变断裂强度的影响。结果表明,添加 Sb、As 和 Sn 元素会在 P91 钢焊接接头焊接过程中抑制  $M_{23}C_6$  在 FGHAZ 处的溶解,在 PWHT 过程中, $M_{23}C_6$  颗粒的析出减少。这会导致在蠕变过程中,FGHAZ 易于发生回复和再结晶,形成蠕变空隙,降低焊接接头的蠕变寿命,因此应尽可能减少焊接接头中这些有害合金元素的含量。Kumar 等<sup>[14]</sup>报道指出,向 P91 钢中添加约  $100 \times 10^{-6}$  的 B 有助于提高 P91 钢焊接接头 HAZ

的抗蠕变裂纹扩展能力。此外,也有通过优化焊接工艺,抑制 P91 钢焊接接头 IV 型裂纹开裂的研究报道。Abe 等<sup>[15]</sup>研究发现,采用电子束焊接工艺可减小 P91 钢焊接接头 HAZ 的宽度,有效延长其蠕变寿命,但仍会发生 HAZ 早期断裂。黄飞<sup>[16]</sup>采用多次热处理工艺细化碳化物颗粒,提高 FGHAZ 的组织均匀性,缓解残余应力,提升 P91 钢焊接接头抗蠕变性能。综上,虽然优化合金成分或改进焊接工艺可在一定程度上降低 P91 钢焊接接头 IV 型裂纹开裂的发生频率,有助于延长焊接接头的高温服役寿命,但对 P91 钢焊接接头的显微结构及性能的改善效果有限,还需独辟蹊径,开发更加有效的技术方案,实现 P91 钢焊接接头高温服役性能的显著提升。

为了解决 P91 钢焊接接头 IV 型开裂的问题,本研究创新地在 P91 钢 BM 焊接面坡口处堆焊厚度约 7 mm 左右的 P92 层,再采用常规 P91 钢焊接工艺,形成堆焊 P92 的 P91 钢焊接接头。此时,该焊接接头的 FGHAZ 和 ICHAZ 正好落在合金成分更稳定,硬度与强度更高的 P92 堆焊层,由此减少 IV 型裂纹的发生,提高 P91 钢焊接接头的服役可靠性。为验证该新型焊接工艺的有效性,本文系统开展堆焊 P92 的 P91 钢焊接接头与无堆焊层的 P91 钢常规焊接接头显微组织结构、力学性能的对比研究。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 材料与焊接工艺

使用 DK7732 型电火花数控线切割机在国内某钢厂的热轧后经正火、回火处理的 P91 钢板材上切取 300 mm(长)×200 mm(宽)×20 mm(厚)的样块,采用 MAXO7-F 型直读光谱仪进行化学成分分析,结果列于表 1 中,该钢的化学成分符合 GB/T 5310—2023《高压锅炉用无缝钢管》的要求。焊接试验采用两种工艺方案,常规 P91 钢焊接时,选用与母材成分相匹配的 MTS3 焊材(表 1),先采用钨极氩弧焊(GTAW)打底,再用焊条电弧焊(SMAW)完成填充及盖面焊,焊后经 750 °C×2 h 热处理以消除残余应力。P91 钢堆焊 P92 选用与 P92 钢成分匹配的 MTS616 焊材(表 1)在 P91 钢板坡口表面 GTAW 分层堆焊 3 道次,控制单道厚度 2~3 mm,总堆焊层厚度 6~8 mm,随后进行 1060 °C×1 h 正火(空冷)+750 °C×1 h 回火(空冷)的中间热处理,再采用常规 P91 钢焊接工艺制备堆焊 P92 的 P91 钢焊接接头,该焊接接头的显微结构如图 1 所示。

表 1 供货态 P91 钢板材及两种焊材的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of the as-supplied P91 plate and two welding wires (mass fraction, %)

	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	V	Nb	Ni	W	Fe
P91	0.10	0.48	0.013	0.005	0.23	9.28	0.96	0.22	0.06	0.34	-	Bal.
MTS3	0.10	0.50	-	-	0.30	9.00	1.00	0.20	0.06	0.70	-	Bal.
MTS616	0.10	0.08	-	-	0.25	8.50	0.40	0.20	0.06	0.50	1.60	Bal.

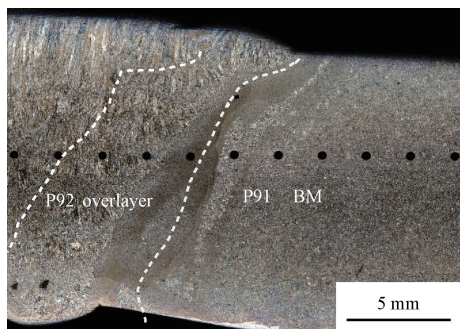


图 1 堆焊 P92 的 P91 钢焊接接头结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the P91 steel welded joint with P92 overlay

## 1.2 性能测试

采用线切割,在 P91 钢常规焊接接头(No. 1 试样)及堆焊 P92 的 P91 钢焊接接头(No. 2 试样)上以焊缝为中心截取 80 mm(长)×20 mm(高)×10 mm(厚)的试样,确保取样范围涵盖完整焊缝、双侧 HAZ 及邻近 BM。试样经 80~1500 目 SiC 砂纸逐级研磨后,采用 0.5 μm 金刚石抛光膏抛光,并利用盐酸-硝酸水溶液(浓盐酸:浓硝酸:水的体积比为 1:1:1)进行腐蚀。采用 MR-3000 型光学显微镜(OM)和 JSM-6490 型扫描电镜(SEM)观察接头微观形貌, Oxford INCA 型能谱仪(EDS)测试微区成分。

对该焊接接头截面试样的上下表面进行研磨,采用 HBV-30A 型布氏硬度计测试其布氏硬度,加载载荷为 294 N,保压 10 s。从试样一侧的 BM 开始,间隔 2 mm 向另一侧依次打点测量。为进一步确定焊接接头截面上各微区的硬度分布,对焊接接头截面试样的盖面层、中间层和打底层分别进行显微硬度测试,显微硬度测试在 402MVD 型显微维氏硬度计上进行,加载载荷为 1.96 N,保压 10 s。每一层的测试均从焊缝的中心处开始,向一侧的 BM 打点,根据显微硬度及微观组织的变化,标定 HAZ 各微区的宽度范围。参照 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》及 GB/T 228.2—2015《金属材料 拉伸试验 第 2 部分:高温试验方法》,采用线切割,在两种焊接接头上以焊缝为中心分别切取室温、高温矩形截面拉伸试样,高温拉伸试样尺寸如图 2 所

示,室温拉伸试样尺寸相同,但夹持端无圆孔。在 CMT5105 型电子万能试验机上进行室温、高温拉伸力学性能测试,室温拉伸横梁位移速率为 2 mm/min;高温拉伸时,待试验机附带电阻炉以 10 °C/min 升温至 600 °C 后,把试样悬挂于试验机拉杆的挂具上,放入电阻炉内加热,待炉温再次达到 600 °C,保温 10 min 后加载,横梁位移速率为 0.6 mm/min。根据 GB/T 229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》,分别以焊缝和 HAZ 中心为缺口位置切取 55 mm×10 mm×5 mm 的非标 V 型缺口试样,在 NI300C 型仪器化金属摆锤冲击试验机上测试冲击韧性。上述所有力学性能测试均至少重复测试 3 次,取平均值。

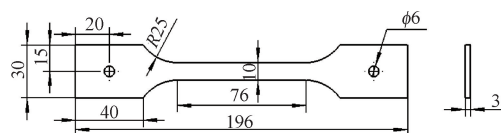


图 2 高温拉伸试样的尺寸示意图(mm)

Fig. 2 Dimensional diagram of the high-temperature tensile specimen (mm)

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 显微组织与硬度分布

图 3 为 No. 2 试样不同微区的光学显微组织。如图 3 所示, No. 2 试样的整个焊接接头由焊缝、HAZ 及 BM 组成,其中 HAZ 又由 CGHAZ、FGHAZ、ICHAZ 以及 OTHAZ 4 个微区组成。焊缝在焊接时经历了高温熔化、快速冷却等冶金过程,形成铸态组织<sup>[17]</sup>,由板条马氏体和残留奥氏体组成(图 3a)。CGHAZ 靠近熔合线,较高的焊接峰值温度使其中的析出相都重新溶入 P92 钢基体内,奥氏体晶粒失去析出相颗粒的钉扎,快速长大,冷却后形成具有一定取向特征的粗大板条马氏体(图 3b)。与 CGHAZ 相比,FGHAZ 中的晶粒尺寸更小、数目更多(图 3c)。这是因为该区域的焊接峰值温度较低,不足以让析出相都重新溶入 P92 钢基体,残存的析出相颗粒成为奥氏体晶粒的形核位,并抑制其长大,该区域内的奥氏体晶粒细小而均匀<sup>[18]</sup>,冷却后转变为 FGHAZ。ICHAZ 介于 FGHAZ 和 OTHAZ 之间,由一定比例的细晶粒和板条马氏体组成(图 3d)。

OTHAZ 与 BM 组织无明显差异,均为典型的回火马氏体,原奥氏体晶内的马氏体板条清晰可见,位向明显(图 3e)。No. 1 试样焊接接头同样由焊缝、HAZ(CGHAZ+FGHAZ+ICHAZ+OTHAZ)及 BM 组成,由于 P92 和 P91

同为马氏体耐热钢且成分相近,显微组织结构并无明显变化,因此在 P91 板材坡口处堆焊 P92 并未导致 P91 钢焊接接头各区域的显微组织发生明显改变。考虑到篇幅因素,No. 1 试样的显微组织照片省略。

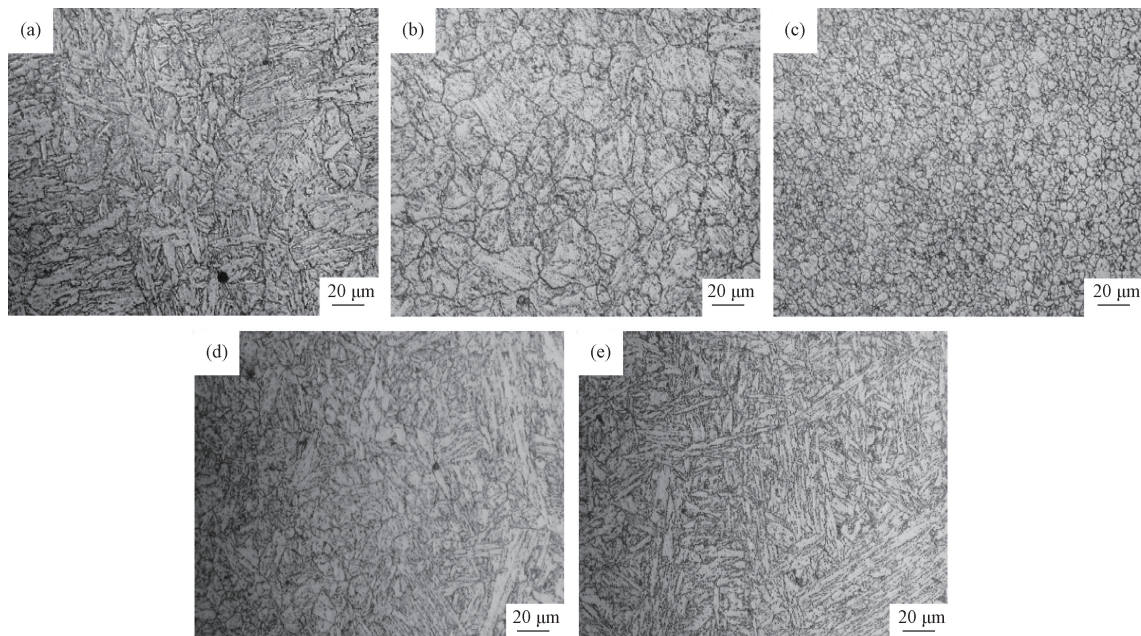


图3 No. 2 试样不同微区的光学显微组织

(a) 焊缝; (b) CGHAZ; (c) FGHAZ; (d) ICHAZ; (e) OTHAZ 和 BM

Fig. 3 OM images showing microstructure of the different micro-areas of the No. 2 sample

(a) weld; (b) CGHAZ; (c) FGHAZ; (d) ICHAZ; (e) OTHAZ and BM

图4是No. 2试样和No. 1试样的布氏硬度分布图。两种焊接接头的焊缝处硬度最高, BM 次之, HAZ 硬度最低。但很明显, No. 2 试样 HAZ 的硬度已经十分接近 BM(图 4a), 而不像 No. 1 试样那样, 在 HAZ 出现硬度极低的软化区(图 4b), 整体焊接接头的布氏硬度与 BM 相匹配, 达到了预期的硬度均匀化效果。为进一步探究堆焊 P92 的 P91 钢焊接接头 HAZ 各微区硬度分布规律, 对焊接接头横截面不同位置进行显微硬度测试, 结果如图 5 所示。将不同层相同区域的显微硬度求平均值后, No. 2 试样(图 5a~5c)的焊缝: 242.7 HV0.2, CGHAZ: 263.9 HV0.2, FGHAZ: 236.6 HV0.2, ICHAZ: 227.8 HV0.2, OTHAZ 及 BM: 232.7 HV0.2; No. 1 试样(图 5d~5f)的焊缝: 237.0 HV0.2, CGHAZ: 250.3 HV0.2, FGHAZ: 228.6 HV0.2, ICHAZ: 210.6 HV0.2, OTHAZ 及 BM: 226.5 HV0.2。可以看出, 相对于 No. 1 试样, No. 2 试样 HAZ 中的 CGHAZ、FGHAZ、ICHAZ 的显微硬度均有提高。尤其是 ICHAZ, 其显微硬度较 No. 1 试样的提升约 8%, 该区与 FGHAZ、OTHAZ 及 BM 的硬度差值

也由 No. 1 试样的 17.0 HV0.2 降至 6.8 HV0.2。No. 2 试样 HAZ 的平均显微硬度为 240.3 HV0.2, 与 No. 1 试样 HAZ 的平均显微硬度(229.0 HV0.2)相比, 提升了约 4.9%。

相对于 P91 钢, P92 钢的 Mo 当量( $M_o+0.5W$ )和 B 含量较高, 显著增强了析出相的稳定性。P92 钢中的 W 元素一方面可以促进 MX 相的形成与稳定化, 弥散分布的细小 MX 相颗粒可以有效地钉扎位错和晶界<sup>[19-20]</sup>; 另一方面可以抑制  $M_{23}C_6$  向  $M_6C$  的转变及碳化物颗粒的熟化, 提高 P92 钢的组织稳定性<sup>[14,21]</sup>。而 B 元素富集于晶界处, 抑制  $M_{23}C_6$  颗粒粗化, 同时 W 还会对 P92 钢基体起到固溶强化的作用, 提高热强性<sup>[14,22]</sup>。因此, P92 钢相较于 P91 钢具有更高的硬度和强度。通过堆焊 P92 将 P91 钢焊接接头 HAZ 中的 FGHAZ 和 ICHAZ 转移至 P92 堆焊层中, 这也是 No. 2 试样显微硬度均匀性得到明显提高的重要原因<sup>[23]</sup>。此外, 在 ICHAZ 中尺寸较小的原奥氏体晶粒(PAG)内的马氏体在 PWHT 过程中具有更快的回复与再结晶速率, 形成低硬度的铁素体。

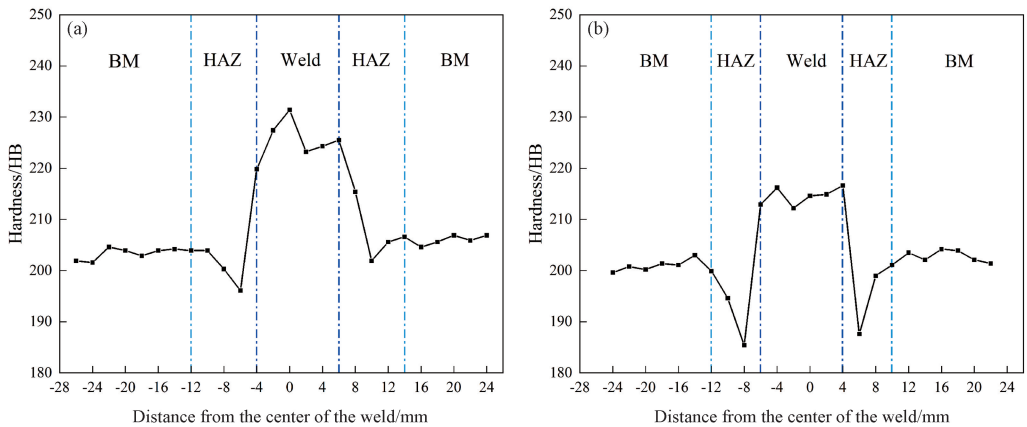


图 4 两种 P91 钢焊接接头的布氏硬度分布 (a) No. 2 试样; (b) No. 1 试样

Fig. 4 Brinell hardness distributions of two P91 steel welded joints (a) No. 2 sample; (b) No. 1 sample

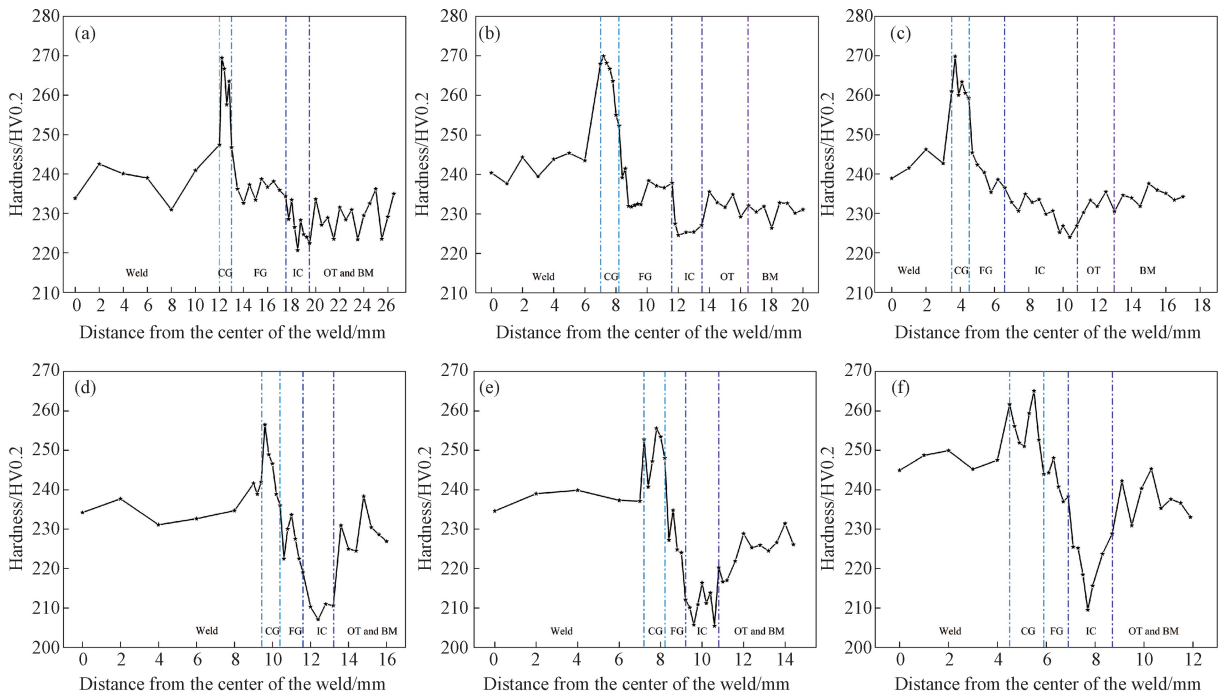


图 5 (a~c) No. 2 试样和(d~f) No. 1 试样焊接接头横截面不同层的显微硬度分布

(a, d) 盖面层; (b, e) 中间层; (c, f) 打底层

Fig. 5 Microhardness distributions at different layers of the cross-sections of (a-c) the No. 2 sample and (d-f) the No. 1 sample welded joints (a, d) the cover layer; (b, e) the middle layer; (c, f) the bottom layer

在 P91 钢 BM 表面堆焊 P92 钢后的正火加回火热处理可以提高 ICHAZ 中 PAG 的尺寸<sup>[24]</sup>, 增加马氏体的回火稳定性, 有助于形成更多的回火马氏体组织, 有助于提高该区域的硬度, 防止形成软化区<sup>[25-26]</sup>。

No. 2 试样不同区域的 SEM 图像如图 6 所示, 接头不同区域(图 6f)的微区 EDS 成分测试结果列于表 2 中。焊缝快速冷却形成铸态的柱状晶组织, 存在  $\delta$ -铁素体和粗大的 Laves 相颗粒, MX 相和  $M_{23}C_6$  分布不均(图 6a)。焊缝的成分为 P91, 但在靠近熔合线

一侧(点 1、2)的焊缝中均含有少量的 W 成分, 说明在 P91 钢焊接过程中, P92 堆焊层与焊缝间有少量的原子扩散。CGHAZ 的晶粒粗大, 其内部是具有一定位向分布的马氏体板条, 第二相颗粒沿原奥氏体晶界和马氏体板条界连续或半连续分布(图 6b)。FGHAZ 中的 PAG 尺寸远小于 CGHAZ, 其内部是细小的回火马氏体, 马氏体板条界难以分辨, MX 相颗粒在 PAG 晶内部弥散分布, 而  $M_{23}C_6$  颗粒主要在 PAG 晶界聚集(图 6c)。在焊接过程中, ICHAZ 经历的峰值温度

较低,仅发生部分奥氏体化,PWHT后得到由未奥氏体化转变的残留马氏体和新生的细小马氏体组成的混合组织,析出相颗粒分布不均(图6d)。表2中点3~5的EDS测试结果表明,该试样CGHAZ、FGHAZ和ICHAZ中的W、Mo等元素含量均符合P92钢的成分(表1),是P92堆焊层的主体区域。如图6(e)所示,ICHAZ和OTHAZ交界处ICHAZ一侧(点6)仍含有少量的W成分,但在OTHAZ一侧

(点7)则完全无W成分。根据W元素含量的多少,可判断P92钢堆焊主体区域的厚度为6~8mm,包括CGHAZ、FGHAZ和绝大多数的ICHAZ,如图6(f)中的灰色区域所示。图6(f)中的斜线区域则是P92钢堆焊区的边界,分别为P91钢焊缝、BM和P92堆焊层的熔合区(过渡区),宽度小于1mm。在该过渡区内,P92钢的含量随着其向BM或焊缝靠近,而呈现递减的趋势。

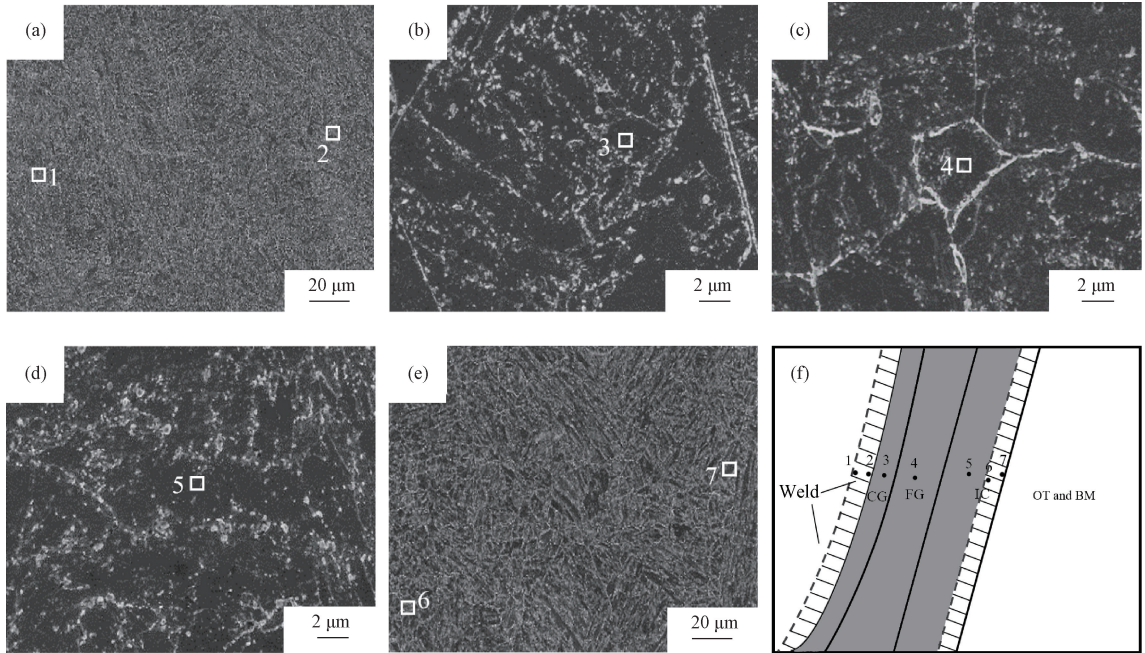


图6 No.2试样不同区域的(a~e)SEM照片及(f)结构示意图

(a) 焊缝; (b) CGHAZ; (c) FGHAZ; (d) ICHAZ; (e) ICHAZ和OTHAZ

Fig. 6 (a-e) SEM images of different areas and (f) structural schematic diagram of the No. 2 sample

(a) weld; (b) CGHAZ; (c) FGHAZ; (d) ICHAZ; (e) ICHAZ and OTHAZ

表2 图6中各点的EDS成分分析结果(质量分数,%)

Table 2 EDS component analysis results of each point marked in Fig. 6 (mass fraction, %)

Point	Fe	Si	V	Cr	W	Mn	Mo
1	86.63	0.34	0.40	10.03	0.09	0.96	1.55
2	86.86	0.35	0.27	9.85	0.39	0.85	1.43
3	86.77	0.38	0.35	9.19	1.78	0.88	0.65
4	87.01	0.27	0.28	8.84	1.76	0.91	0.73
5	87.02	0.48	0.24	9.16	1.49	0.84	0.77
6	87.72	0.33	0.41	9.29	0.42	1.05	0.78
7	87.45	0.16	0.11	9.64	-	1.02	1.62

综上所述,No.2试样各区域结构致密,特征明显,没有发现裂纹、疏松、过烧等焊接缺陷。P92堆焊层包含P91钢焊接接头HAZ中的CGHAZ、FGHAZ和绝大部分的ICHAZ,显著提高其硬度均匀性,达到预期效果。

## 2.2 力学性能

### 2.2.1 室温拉伸

No.1试样和No.2试样的室温拉伸力学性能列于表3中,拉伸断裂位置均位于P91钢BM。两种试样的屈服强度( $R_{p0.2}$ )、抗拉强度( $R_m$ )均符合GB/T 5310—2023的要求。No.2试样的 $R_{p0.2}$ 和 $R_m$ 均高于No.1试样,但断后伸长率( $A$ )略低。

表3 No.1试样和No.2试样的室温拉伸力学性能

Table 3 Room-temperature tensile mechanical properties of the No.1 and No.2 samples

Sample	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%
No.1	640.3	505.8	16.3
No.2	677.3	528.6	15.8
GB/T 5310—2023	≥585	≥415	/

注:“/”不作要求。

图 7(a, b) 及 7(c, d) 分别为 No. 1 和 No. 2 试样室温拉伸断口形貌及焊缝断口附近的 SEM 显微组织。由图 7(a, b) 可见, No. 1 和 No. 2 试样的断口形貌均呈现韧窝聚集型韧性断裂特征, 但 No. 2 试样断口上的韧窝尺寸较大, 沿原奥氏体晶界分布的大尺寸

$M_{23}C_6$  颗粒(图 7a 中箭头所示) 导致试样拉伸时的塑性变形均匀性降低,  $A$  值减小。由图 7(c, d) 可见, 相比于 No. 1 试样, No. 2 试样焊缝断口附近组织中第二相颗粒聚集长大的程度小, 弥散度高, 分布更均匀, 因而其强度也较高。

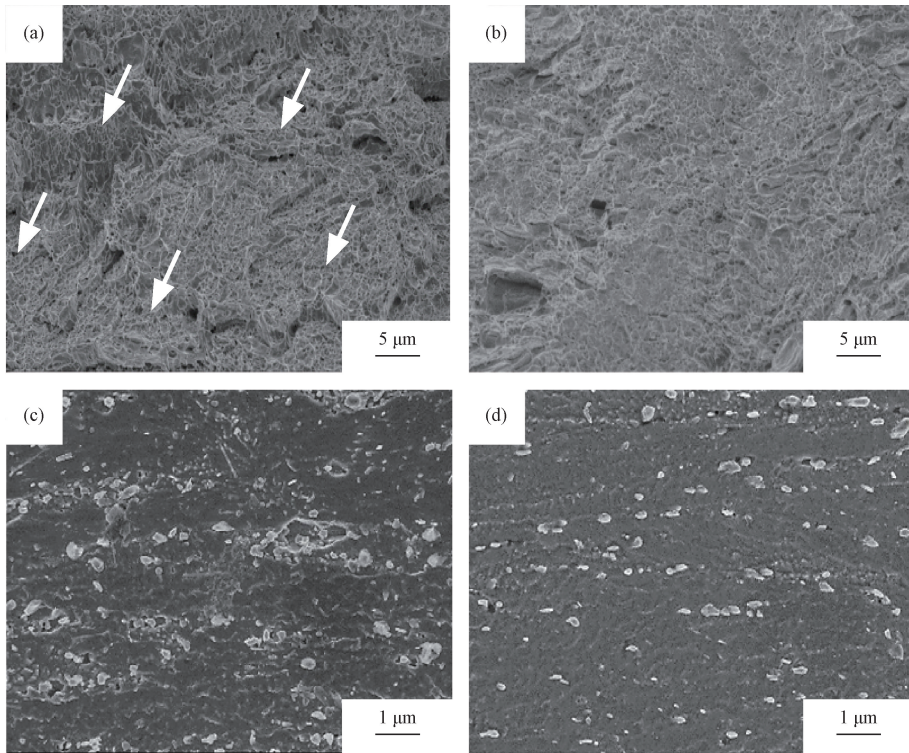


图 7 两种 P91 钢焊接接头室温拉伸断口 SEM 形貌(a, b) 及焊缝断口附近的显微组织(c, d)  
(a, c) No. 2 试样; (b, d) No. 1 试样

Fig. 7 SEM images of room-temperature tensile fracture surface (a, b) and microstructure near the weld side fracture surface (c, d) of two P91 welded joints (a, c) No. 2 sample; (b, d) No. 1 sample

No. 2 试样中的 P91 钢 BM 组织经历了在其坡口处堆焊 P92 及随后的正火+回火中间热处理过程。在 1060 °C 正火过程中, P91 钢中的 BM 完全奥氏体化, 促进原有碳化物及部分 MX 相重新溶入钢基体, 在随后的空冷过程中, 重新析出纳米级 MX 相颗粒, 并均匀且弥散地分布于马氏体板条中。而在后续 750 °C 回火过程中, 马氏体中的 Cr 和 Mo 元素向原奥氏体晶界及板条马氏体间迁移, 析出  $M_{23}C_6$  型碳化物颗粒。这些析出相能够有效抑制位错运动, 发挥强烈的弥散强化效应, 从而显著提高 P91 钢 BM 的力学性能<sup>[27-29]</sup>。堆焊 P92 层的 P91 钢 BM 在随后的常规 P91 钢焊接过程时, 其所经受的热冲击低于 No. 1 试样中的 P91 钢 BM, 因此对内部组织结构的影响较小, 第二相颗粒仍保持较高弥散度, 因而其强度得到显著提升。

## 2. 2. 2 高温拉伸

No. 1 试样和 No. 2 试样 600 °C 高温拉伸力学性能列于表 4 中, 两者的  $R_{p0.2}$  均符合标准要求, 断裂位置也均位于 P91 钢 BM。No. 2 试样的  $R_{p0.2}$ 、 $R_m$  和  $A$  均高于 No. 1 试样。No. 1 试样和 No. 2 试样高温拉伸断口形貌及断口附近的显微组织特征与其室温拉伸试样时的基本相同, 在此不再赘述。

表 4 No. 1 试样和 No. 2 试样的 600 °C 拉伸力学性能  
Table 4 600 °C tensile mechanical properties of the No. 1 and No. 2 samples

Sample	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ / %
No. 1	280.7	251.3	18.8
No. 2	303.2	279.7	24.9
GB/T 5310—2023	/	$\geq 198(600\text{ }^\circ\text{C})$	/

## 2. 2. 3 冲击韧性

No. 1 试样和 No. 2 试样的冲击韧性( $a_{KV}$ ) 测试结

果列于表5中,均高于DL/T 869—2021《火力发电厂焊接技术规程》的要求。缺口位于焊缝处的No. 1试样和No. 2试样的 $a_{KV}$ 相当,但缺口位于HAZ的No. 2试样的 $a_{KV}$ 明显优于No. 1试样,主要归因于P92堆焊层的高强韧性。

表5 No. 1试样和No. 2试样的冲击韧性

Table 5 Impact toughness of the No. 1 and No. 2 samples

Sample	Notch location	$a_{KV}/(J/cm^2)$
No. 1	Weld	91.0
No. 1	HAZ	128.6
No. 2	Weld	90.4
No. 2	HAZ	156.0
DL/T 869—2021	/	≥40

综上,No. 1试样和No. 2试样的室温、高温拉伸力学性能及冲击韧性均符合相关标准的要求。但堆焊P92的P91钢焊接接头(No. 2试样)的力学性能总体高于无堆焊P92的P91钢常规焊接接头(No. 1

试样),优势明显。

### 3 结论

1) 在P91钢板材坡口处堆焊一层P92并进行中间热处理后,再采用常规P91钢焊接与PWHT工艺,所得堆焊P92的P91钢焊接接头的HAZ由CGHAZ、FGHAZ、ICHAZ以及OTHAZ四部分组成,各区域的组织均匀,特征明显;

2) 在堆焊P92的P91钢焊接接头中,FGHAZ和ICHAZ均位于P92堆焊层,其与FGHAZ、OTHAZ以及BM之间的硬度差由未堆焊状态下的17.0 HV0.2降至堆焊后的6.8 HV0.2,硬度分布均匀性得到明显提高,与P91钢BM的硬度更加匹配;

3) 堆焊P92的P91钢焊接接头硬度及其力学性能指标均符合相关标准要求,且明显优于无堆焊的P91钢常规焊接接头。

### 参 考 文 献

- [1] Dak G, Pandey C. A critical review on dissimilar welds joint between martensitic and austenitic steel for power plant application [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 58: 377–406.
- [2] Codd D, McCrink J, Lach T, et al. Creep performance and microstructure of grade 91 steel weldments with integrated welding and thermal processing [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2025, 145: 34–45.
- [3] 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.  
WU Shu-quan, HAN Tao, JIANG Shi-kai, et al. Strength degradation behavior of P91 steel for a supercritical unit [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2021, 45(1): 28–33.
- [4] 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.
- [5] Lanzutti A, Andreatta F, Lekka M, et al. Microstructural and local electrochemical characterisation of Gr. 91 steel-welded joints as function of post-weld heat treatments [J]. Corrosion Science, 2019, 148: 407–417.
- [6] Guo Y, Ma C, Luo X, et al. Creep behavior analysis on ruptured welds of heat-resistant steels with two different failure modes [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2023, 206: 105036.
- [7] Wang Y, Li L, Kannan R. Transition from type IV to type I cracking in heat-treated grade 91 steel weldments [J]. Materials Science and Engineering A, 2018, 714: 1–13.
- [8] Fabricius A, Jackson P S. Premature Grade 91 failures-worldwide plant operational experiences [J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 66: 398–406.
- [9] 高秋志, 刘永长, 汪应玲, 等. 焊后热处理对高Cr铁素体耐热钢焊接接头的影响 [J]. 材料热处理学报, 2014, 35(3): 91–96.  
GAO Qiu-zhi, LIU Yong-chang, WANG Ying-ling, et al. Influence of post-weld heat treatment on welded joint of high Cr ferritic heat-resistant steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(3): 91–96.
- [10] 刘鸿国, 李生志, 熊伟, 等. 马氏体耐热钢中Laves相的析出行为 [J]. 材料热处理学报, 2015, 36(9): 109–113.  
LIU Hong-guo, LI Sheng-zhi, XIONG Wei, et al. Precipitation behavior and influence of Laves phase in martensitic heat resistant

- steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(9): 109-113.
- [11] 王延锬, 刘子昀, 马庆爽, 等. 高 Cr 马氏体耐热钢焊接接头 IV 型蠕变断裂研究进展[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(10): 1-17.  
WANG Yan-kun, LIU Zi-yun, MA Qing-shuang, et al. Research progress on type IV creep cracking of welded joint of high Cr martensitic heat resistant steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42(10): 1-17.
- [12] Pandey C, Mahapatra M M, Kumar P. Effect of post weld heat treatments on fracture frontier and type IV cracking nature of the crept P91 welded sample[J]. Materials Science and Engineering A, 2018, 731: 249-265.
- [13] Sato K, Mitsuhashi M, Nagata K, et al. Effect of impurity elements on the creep rupture strength of Gr. 91 steel welded joints at 650 °C [J]. Materials Science and Engineering A, 2024, 903: 146669.
- [14] Kumar Y, Dash M K, Moitra A, et al. Experimental investigation of creep crack growth behavior in the heat affected zone of boron added modified 9Cr-1Mo steel weld [J]. Materials Science and Engineering A, 2021, 814: 141180.
- [15] Abe F, Tabuchi M. Microstructure and creep strength of welds in advanced ferritic power plant steels[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2004, 9(1): 22-30.
- [16] 黄飞. P91 钢厚壁管多次热处理和性能研究[J]. 冶金设备, 2016(S1): 35-38.  
HUANG Fei. Study on the multiple heat treatment and properties of P91 thick walled pipes [J]. Metallurgical Equipment, 2016 (S1): 35-38.
- [17] 王建桥. 长期服役国产 P91 钢焊接接头组织性能及其热处理模拟研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2023.  
WANG Jian-qiao. Microstructure, properties and heat treatment simulation of domestic P91 steel welded joints for long-term service [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2023.
- [18] 宋逸思, 李传维, 李克, 等. 0Cr16Ni5Mo1 马氏体不锈钢奥氏体晶粒生长行为[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(12): 136-143.  
SONG Yi-si, LI Chuan-wei, LI Ke, et al. Growth behaviour of austenite grain of 0Cr16Ni5Mo1 martensitic stainless steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(12): 136-143.
- [19] 马崇. P92 钢焊接接头 IV 型蠕变开裂机理及预测方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.  
MA Chong. Investigation on type IV creep cracking and its prediction method for P92 steel welded joints [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [20] Choudhary B K, Christopher J. Influence of temperature and strain rate on tensile deformation and fracture behaviour of boron added P91 steel[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2019, 171: 153-161.
- [21] Sonar T, Ivanov M, Trofimov E, et al. A critical review on dissimilar welding of ferritic-martensitic steel and austenitic stainless steel using gas tungsten arc welding process: Weldability issues, processing, and performance characteristics of joints[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2025, 133: 811-864.
- [22] 赵勇桃. 超超临界锅炉用 P92 钢的组织性能及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015.
- [23] 何晓梅, 罗昌福, 刘漫博. 超超临界火电机组的选材及国产化进程[J]. 热加工工艺, 2012, 41(22): 116-119.  
HE Xiao-mei, LUO Chang-fu, LIU Man-bo. Material selection and localization of heat-resistant steel for ultra-supercritical pressure generating units [J]. Hot Working Technology, 2012, 41(22): 116-119.
- [24] Gu Z, Zhong M, Wang C. Eliminating the soft zone for grade 91 steel weldment via enhancing prior austenite grain size of the intercritical heat-affected zone[J]. Materials Characterization, 2024, 216: 114318.
- [25] Pandey C, Giri A, Mahapatra 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.
- [26] Pandey C, Giri 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.
- [27] 王建桥, 要玉宏, 金耀华, 等. 10Cr9Mo1VNb 钢焊接接头热处理模拟研究[J]. 热加工工艺, 2025, 54(11): 1-7.

- WANG Jian-qiao, YAO Yu-hong, JIN Yao-hua, et al. Research on heat treatment simulation of 10Cr9Mo1VNb steel welded joint [J]. *Hot Working Technology*, 2025, 54(11): 1-7.
- [28] 张路, 王正品, 刘江南, 等. 回火对国产 P91 钢组织和性能的影响[J]. *铸造技术*, 2003, 24(6): 537-539.
- ZHANG Lu, WANG Zheng-pin, LIU Jiang-nan, et al. Effect of tempering process on the microstructure and mechanical property of domestic P91 steel[J]. *Foundry Technology*, 2003, 24(6): 537-539.
- [29] Bhanu V, Gupta K, Saravanakumar R, et al. Influence of buttering layers on the microstructural evolution and mechanical behavior of Incoloy 800HT and P91 steel welded joint[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2024, 24(4): 233.