

# 石油化工装置 P91 材质管道焊接工艺专项 监理实践与成效

余雪飞（上海协同工程咨询有限公司，上海 200001）

**摘要：**P91（10Cr9Mo1VNbN）马氏体耐热钢因其优异高温性能，在乙烯、高压蒸汽等管道中应用广泛，但其焊接冷裂纹敏感性强、工艺窗口窄。本文基于百万吨级乙烯工程监理实践，构建“事前预防、事中控制、事后闭环”的全流程专项监理体系。聚焦工艺评定、焊工资质、过程参数与热处理四大核心，融入冶金学原理与数字化监控。实践表明，该体系显著提升管道焊接质量，杜绝隐患，为同类工程提供可复制的系统管理方法。

**关键词：**P91；管道焊接；热处理；专项监理；数字化追溯；质量控制

**中图分类号：**TE973；TG457.6 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-5167（2026）012-0106-03

## Specialized Supervision Practices and Effectiveness of P91 Steel Pipe Welding Processes in Petrochemical Plants

Yu Xuefei (Shanghai TJU Engineering Consulting Co., Ltd., Shanghai 200001, China)

**Abstract:** P91 (10Cr9Mo1VNbN) martensitic heat-resistant steel is widely used in ethylene and high-pressure steam pipelines due to its good high-temperature performance. However, its welding has two major problems: high cold cracking sensitivity and narrow process window. Based on the supervision practice of a million-ton ethylene project, this paper establishes a full-process specialized supervision system following the principle of “prevention in advance, control during process, and closed-loop after completion.” The system focuses on four key aspects: procedure qualification, welder qualification, process parameters, and heat treatment. It combines metallurgical principles with digital monitoring. Practice shows that this system significantly improves pipeline welding quality and eliminates hidden dangers. It provides a reproducible systematic management method for similar projects.

**Keywords:** P91; pipeline welding; heat treatment; specialized supervision; digital traceability; quality control

### 1 P91 管道焊接——高风险工序与监理责任的聚焦

在现代化百万吨级乙烯装置中高温、高压的工艺条件对管道材料提出了极限要求。P91 作为一种典型的蠕变强度增强型铁素体合金钢，通过添加钒、铌、氮等微量元素进行微合金化与控轧控冷（TMCP）工艺获得细小板条马氏体组织，其应用是实现装置高效率、高参数运行的技术保障。然而其“高性能”伴随的是“难焊接”的严峻挑战：高铬含量导致的强空气淬硬性使其冷裂纹敏感性极高；狭窄的 Ac1 ~ Ac3 温度区间对焊接热输入、层间温度控制要求极为苛刻，易造成热影响区（HAZ）软化或晶粒异常长大；必须依赖精确的焊后热处理（PWHT）来完成必要的回火马氏体组织转变、消除高残余应力并恢复韧性。

传统“大而化之”的通用监理模式在此类工序面前往往力不从心。一道 P91 焊口的失效，可能导致非计划停工、介质泄漏乃至安全事故，造成巨额经济损失。因此，对 P91 管道焊接实施“专项监理”，是总监理工程师履行核心职责、保障工程本质安全的必然选择。这要求监理工作必须从常规的事后质量验收，升级为理论基础扎实、技术先行、全程介入、数据说

话的深度管控。本文旨在结合大型石化项目实践，系统性解析 P91 管道焊接专项监理的关键控制点、实施路径与管理成效。

### 2 P91 材质焊接特性分析与专项监理的理论基础

#### 2.1 冶金特性与焊接难点

P91 属于中合金马氏体耐热钢，其焊接性挑战主要源于三方面：①冷裂纹敏感性，因高碳当量和高淬透性使焊缝区易形成硬脆马氏体，结合氢侵入易引发延迟裂纹；②再热裂纹倾向，焊后热处理中因应力松弛及 Nb、V 碳氮化物析出，可能在粗晶区产生晶间裂纹；③焊缝韧性控制，焊接热过程及热处理制度对冲击韧性影响极为敏感。

#### 2.2 专项监理的理论框架构建思路

P91 的焊接难点源于其冶金特性，因此监理工作的理论支撑需紧扣两大主线：一是热过程与氢的协同控制，二是显微组织的定向调控。热过程控制方面，关键在于通过严格的预热、层间温度管理及焊后缓冷，人为降低焊接接头的冷却速率，避免生成高硬度的淬硬马氏体，同时为氢的充分逸出创造热力条件。氢的来源则需从焊材烘干、环境湿度、保护气体纯度及坡

口清洁度等环节逐一设防，最大限度切断氢的侵入路径。组织性能调控方面，焊后热处理是核心手段——其作用不仅是消除残余应力，更重要的是驱动不稳定的淬硬马氏体向回火索氏体或回火马氏体转变，在维持强度的同时恢复接头的韧性与高温蠕变性能。

### 3 现场怎么控制：基于冶金学的全过程控制框架

项目总监理工程师在项目监理工作中，需要主持构建一套基于融合冶金学原理的 P91 管道焊接专项控制体系，并推动执行。该体系需遵循“源头控制、过程监管、结果追溯”的原则，其作用的基准框架与核心控制点如下：

#### 3.1 焊前准备阶段

目标是确保“人、机、料、法、环”基础条件 100% 合规，从源头杜绝氢源和工艺偏差。关键监理控制点包括：第一，焊工资质审核及技能验证性考试，监理方应遵循“先审资质，后考技能，不合格者禁入”的原则，若资质审核及技能验证性考试不合格者，不允许进场；第二，工艺评定（PQR）审查，审查其是否覆盖实际壁厚及所有焊接位置，验证其冲击韧性试验结果是否满足设计最低要求（ $\geq 41J @ 室温$ ），需组织 PQR 专项评审会，邀请焊接专家参与；第三，焊接工艺规程（WPS）细化，审查是否明确规定预热温度、层间温度上限、焊后至热处理的间隔时间；第四，焊材与母材管控，监督焊材按规范烘干，核查烘干记录及现场保温筒使用，100% 执行母材及焊材的光谱复验，防止错用，需配备光谱分析仪进行现场抽检。若 PQR 覆盖不全或 WPS 参数模糊，实行一票否决，严禁开工。

#### 3.2 焊接过程阶段

目标是确保焊接热循环严格受控，实现理想的熔池冶金与焊缝成形，防止淬硬与氢脆。关键监理控制点包括：一是热过程监控，旁站监督预热与层温，使用接触式测温仪多点测量，确保温度均匀且在窗口内；二是焊接参数精确控制，重点监控根焊（GTAW）的热输入，防止过大导致晶粒粗化，或过小导致熔合不良，监督记录电流、电压、焊速的匹配性；三是氢控制措施监督，检查防风防雨棚搭设效果，监测环境湿度（要求  $< 90%$ ），监督焊丝清理和气体保护效果。手段上需对关键焊口全过程旁站，同步采集焊接参数数据，定期抽测环境湿度。若发现层温超限，立即指令暂停焊接，重新加热或冷却至规定范围。

#### 3.3 焊后热处理阶段

目标是确保通过精确的热处理，完成必要的组织转变，获得最佳的强度、韧性与应力状态。关键监理控制点包括：首先，热处理工艺曲线（PWHT）监督，全

程监督升温速率、保温温度、保温时间、冷却速率；其次，温度均匀性与精度控制，核查加热带布置、热电偶绑扎位置与数量（不少于 2 对，对称布置），比对自动记录曲线与备用热电偶读数；最后，硬度验证，热处理后 24h 内，监督在焊缝、热影响区、母材三处进行布氏硬度（HB）测试，验收标准为 180–250HB。手段包括审查热处理自动记录曲线完整性，现场监督硬度测试过程。若曲线任一阶段超出允差，或硬度值不合格，判定热处理无效，要求编制专项返修方案重新处理。

#### 3.4 检验、追溯与闭环阶段

目标是确保无损检测结论真实、准确，缺陷得到科学处理，并形成完整的数字化质量档案。关键监理控制点包括：第一，无损检测（NDT）深度审查，对厚壁管焊口，除 RT 外，增加相控阵超声（PAUT），提高面积型缺陷检出率，审查检测工艺卡和人员资质；第二，缺陷处理与工艺溯源，任何返修必须基于缺陷性质分析，修订 WPS 形成返修工艺卡，并执行更严格的预热和热处理，返修后检测比例加倍；第三，全生命周期数据归档，建立基于二维码的焊口数字档案，关联 WPS、焊工信息、焊接参数、热处理曲线、NDT 报告、硬度报告、外观检查照片。手段上监理需配备 NDT 监理工程师，独立审核所有 NDT 报告，对返修焊口实施升级旁站，推动使用项目协同平台管理焊口数据包。若连续出现同类缺陷（如未熔合），启动系统性工艺评审，而非仅处理单个焊口。

### 4 总监理工程师的工作实践：从体系构建到现场决胜

总监的职责不止于审核文件，更在于主动谋划、统筹资源并对最终结果负责。在 P91 焊接专项监理中，这一角色定位具体通过三个层面的实践来体现。

#### 4.1 组建专业团队，把策划做在前面

总监接手项目后，第一件事是搭班子：从管道、焊接、无损检测专业挑人，组建“焊接与无损检测专项监理小组”。班子搭起来，牵头编制《管道焊接施工监理实施细则》，把那些理论上的控制点，转化成现场用得上的检查清单和作业指导。光有文件还不够，还得组织几轮专项培训，让团队成员把 P91 的焊接特性、容易出什么问题、该怎么盯，都吃透。这些基础打牢了，后续的全程管控才有底气。

#### 4.2 多方协调，把资源用到刀刃上

P91 管道焊接往往存在与安装复杂、设备连接、建筑结构的交叉施工的难题，且焊接过程还需热处理设备等资源。这就要求总监需利用工程例会和专题会进行前瞻性协调。如，在 P91 主管线的焊接与热处理时，需综合考虑设备布置位置备电力负荷及对现有设备设

施（仪表、防腐层）的影响，督促施工单位制定详尽的作业计划与隔离防护方案。

### 4.3 实时监控与缺陷预防的创新

在裂解气出口及超高压蒸汽等关键管线施工中，监理团队将 P91 材质的焊口设为核心质量控制节点，必须由总监或资深专员实施从预热到热处理完毕的全周期跟踪。实践中，为强化管控效能，项目引入焊接参数远程监控系统。该系统可实时采集并回传电流、电压及层间温度等动态数据，即便总监身处其他作业面，也能通过移动端随时核验焊口参数曲线。曾有焊道因电流异常波动触发系统预警，监理随即远程协调现场人员排查，发现症结为焊机接地故障。及时处置后，有效规避了因参数失稳可能引发的内凹或未熔合缺陷。这种驻场监督与远程智控并行的模式，显著拓展了质量管控的纵深。

## 5 案例实证：百万乙烯项目高压蒸汽管线的 P91 焊接管控实践

以某百万吨级乙烯装置的超高压蒸汽管线为例，该管线采用 A335 P91 材质，最大壁厚 46.02mm，设计压力 22.4MPa、运行温度 580℃。面对严苛工况，监理部围绕焊接难点，推行了覆盖焊前准备、过程监控及后热处理的穿透式管理，具体实施路径与成效如下：

**系统性焊前策划：**监理部会同业主组织召开了为期两天的 P91 焊接专题研讨会，特别邀请了设计院设计工程师、第三方检测专家及施工方焊工班组长参与会议。会议不仅审查了设计文件、技术文件，更针对厚壁管焊道易出现冷裂纹的难题，研讨决定在 WPS 中增加“焊接完成后应立即进行 DHT 消氢处理，消氢处理完成后缓冷至 80 ~ 100℃、保温 2h，进行马氏体转变，马氏体转变完成后可冷却至室温贮存或直接进行焊后热处理”的强制要求，并将此写入施工方案。

**过程精细化管控：**监理部安排 1 名专职焊接监理工程师、1 名辅助焊接监理工程师全面负责 P91 管道焊接质量管控，严格按照 P91 管道焊接专项监理关键控制点体系，设置旁站点，辅以专项检查、例行检查，确保各控制阶段、各控制点的控制措施得到有效落实。监理部还要求所有焊口的焊接参数打印条必须作为档案附件，通过随机比对打印数据与手工记录，有效确保了过程数据的真实可靠，杜绝了造假。

**焊后热处理数字化验收：**所有焊口的热处理曲线均需上传至项目数字化管理平台。监理工程师不仅看最终曲线，更可以利用软件的“曲线比对分析”功能，将每条实际曲线与批准的基准曲线进行重叠比对，自动计算并标出升温段、保温段、冷却段的温度-时间偏差值。对于一道因热电偶松动导致保温阶段温度记

录波动的焊口，系统判定为“过程控制不连续”。尽管最终硬度合格，监理仍基于“过程不可靠”的原则，要求对该焊口增加 PAUT 检测，在确认无异后才予以验收，树立了“过程与结果并重”的严格标准。

## 6 成效总结、局限改进与未来展望

依托冶金原理实施 P91 管道焊接专项监理，成效主要体现在三方面。

其一，监理团队角色转变：从侧重合规检查转向深度介入技术过程，在现场管控中建立起专业话语权，技术权威性显著增强。

其二，质量风险前置管控：监督关口前移至工艺评定与热循环控制，焊接参数异常波动及时捕捉预警，返修频次与工期损失有效控制，避免了“焊完再检、不合格再返”的被动局面。

其三，过程数据沉淀为可复用资产：全流程采集的焊接参数、热处理曲线、检测报告等结构化信息，不仅支撑当下验收交付，更为后续装置状态评估、寿命预测及预防性维护提供高保真原始数据，质量档案从“存证备查”向“赋能应用”延伸。

**局限与改进方向。**本次实践仍有短板：焊工操作水平评判依赖现场观察，缺乏量化手段；焊接残余应力检测未纳入常规流程，制约应力腐蚀风险精准预判。后续需引入便携式应力测试装备与数值模拟工具，建立焊后应力场的量化评价与调控能力。

**未来展望。**数字孪生与人工智能为焊接监理开辟新路径：构建工艺数字孪生模型，可预先模拟热循环、优化焊接工艺规程；借助机器学习挖掘历史数据，建立缺陷类型与工艺参数的关联模型，实现缺陷风险智能预警；结合实时采集的温度、电流等参数驱动模型动态演进，在线预测焊缝组织性能，为工艺动态修正提供决策依据。这一模式将推动监理从“事后检测”向“事前预测”跨越，迈向智能化、精准化新高度。

### 参考文献：

- [1] 李为卫, 陈怀宁, 霍春勇, 等. P91 钢焊接冷裂纹敏感性研究 [J]. 焊接学报, 2002, 23(2): 57-60.
- [2] 杨富, 章应霖, 任永宁, 等. 新型耐热钢焊接 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [3] 戈兆文, 张文杨. P91 钢焊接工艺及质量控制 [J]. 电焊机, 2010, 40(6): 1-5.
- [4] 陈祝年. 焊接工程师手册 (第 3 版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [5] 刘持森, 崔树国. P91 钢的焊接性及其焊接工艺 [J]. 焊接技术, 2022, 51(01): 60-63.
- [6] 周海, 王文达, 张岩. P91 钢管道现场施工焊接工艺及监督检验建议 [J]. 焊接技术, 2022, 51(12): 52-55.