

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.05.12

核电站主蒸汽超级管道单面焊双面成形质量控制

黄清辉, 项杰波, 朱从斌

中广核工程有限公司, 广东 深圳 518124

摘要: 针对核电站主蒸汽超级管道壁厚大、坡口深窄、焊接填充量大、检测要求高等特点, 分析其现场安装焊接施工难点, 从焊接工艺控制、焊工技能管控、作业环境控制、焊后处理及检验控制四个方面提出质量控制措施。焊接工艺方面, 采用细长喷嘴 GTAW 打底配合合理的操作与保护, 利用预留窗口监控焊缝背面成形; 焊工管控方面, 通过资格筛选、一次合格率考核、专项特训及绩效激励保障焊工技能水平; 环境控制方面, 加强防风与除湿措施; 焊后处理方面, 严格后热及消应力热处理工艺, 热处理前增加无损检验以提前识别缺陷。经上述控制措施, 某核电站主蒸汽超级管道安装焊接一次合格率达 100%, 可为类似厚壁管道现场安装焊接质量控制提供借鉴。

关键词: 核电站; 主蒸汽超级管道; 安装焊接; 质量控制; 氩电联焊

分类号: TG409 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)05-0102-06

Quality Control of Single-Side Welding with Double-Side Formation for Main Steam Super Pipeline in Nuclear Power Plant

HUANG Qinghui, XIANG Jiebo, ZHU Congbin

China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518124, China

Abstract: In view of the characteristics of the main steam super pipeline in nuclear power plants, such as large wall thickness, deep and narrow groove, large welding deposition volume and high inspection requirements, the difficulties of on-site installation welding construction were analyzed, and quality control measures were proposed from four aspects: welding process control, welder skill management, operating environment control, and post-weld treatment and inspection control. For welding process control, a slender nozzle was adopted for GTAW root pass with proper manipulation and shielding, and a reserved window was used to monitor the back-side formation of the weld. For welder skill management, welder qualification screening, primary qualification rate assessment, specialized training and performance-based incentive were implemented to ensure the welders' skill level. For operating environment control, wind shielding and dehumidification measures were strengthened. For post-weld treatment, post-heating and stress relief heat treatment processes were strictly controlled, and non-destructive testing was added before heat treatment for early defect identification. With the above control measures, the primary qualification rate of on-site installation welding for the main steam super pipeline in a nuclear power plant reached 100%, which can provide reference for quality control of on-site installation welding of similar thick-walled pipelines.

Keywords: nuclear power plant; main steam super pipeline; installation welding; quality control; GTAW+SMAW

引用格式: 黄清辉, 项杰波, 朱从斌. 核电站主蒸汽超级管道单面焊双面成形质量控制[J]. 电焊机, 2026, 56(5): 102-107.

Citation: HUANG Qinghui, XIANG Jiebo, ZHU Congbin. Quality Control of Single-Side Welding with Double-Side Formation for Main Steam Super Pipeline in Nuclear Power Plant[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(5): 102-107.

0 引言

主蒸汽超级管道是指反应堆安全壳外从主蒸

汽管线的安全壳机械贯穿件起, 至主蒸汽管道横向限制件下游第一道管道环焊缝止的一段管道^[1]。其与布置在安全壳外侧的主蒸汽隔离阀相连, 是核电

收稿日期: 2024-07-14 修回日期: 2024-08-12

作者简介: 黄清辉(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事工程材料、焊接及检测方面的研究与管理。E-mail: huangqinghui1101@126.com。

站主二回路的重要组成部分。运行期间,主蒸汽超级管道热工参数高、受力复杂,事故工况下所受冲击力大,管道的选材、制造、焊接、试验和验收等方面均具有更高的要求。主蒸汽超级管道壁厚约为通常主二回路管道壁厚的 1.6 倍,现场安装焊接具有组装难度大、焊接填充量大、检测要求高等特点,其焊接质量控制是核电站主二回路现场施工质量控制的重点和难点之一。

本文针对核电站主蒸汽超级管道安装施工流程开展重难点分析,识别出焊接工艺控制、焊工技能管控、作业环境控制、焊后处理及检验控制等安装施工重点工序,结合工程实践提出针对性的质量控制措施,为核电站类似厚壁管道现场安装焊接质量控制提供借鉴。

1 工程简介

某核电站主蒸汽超级管道每个环路由 1 台主蒸汽隔离阀和 2~4 个管段组成,总长度约 10 m,管道内径约为 750 mm,壁厚 60 mm。主蒸汽超级管道各管段均在工厂制作,通过现场组焊、安装完成。由设计文件可知,现场安装焊缝接头形式为对接,坡口形式为 U 型,坡口侧为管道外侧,坡口尺寸如图 1 所示。图 1a 为主蒸汽超级管道之间或超级管道与隔离阀之间连接焊缝的坡口,图 1b 为主蒸汽超级管道与上下游非超级管道之间连接焊缝的坡口。

管道材质为 P280GH,壁厚 $\delta=60\text{ mm}$;材料制造、检验及验收应满足 RCC-M M1144 相关要求^[2],主要化学成分指标如表 1 所示。

管道材料须根据 RCC-M M151 相关规定进行消应力热处理($610\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温 3 h)后,按照 RCC-M MC1000 和 M1144 相关规定进行力学性能取样及试验,力学性能指标如表 2 所示。

根据标准规范及设计要求, $\delta\geq 50\text{ mm}$ 的 RCC-M 2 级对接接头焊后须进行 100% 目视检验(VT)、100% 磁粉检验(MT)或渗透检验(PT)、100% 射线检验(RT)、100% 超声检验(UT),验收标准须满足 RCC-M 2 级焊缝要求。与非超级管道的一般主二回路蒸汽管道相比,超级管道焊缝在 100%VT、100%MT 或 PT、100%RT 的基础上增加了 100%UT

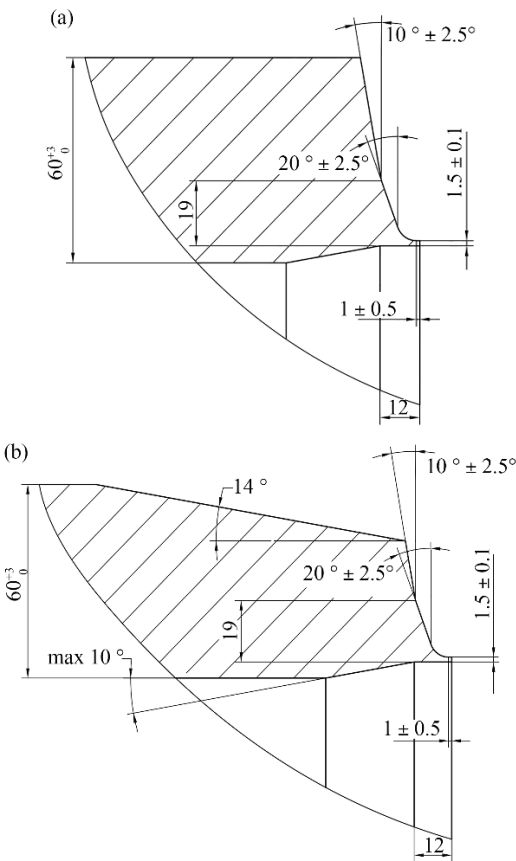


图 1 某核电站主蒸汽超级管道安装坡口示意
Fig. 1 Schematic diagram of the groove of the main steam super pipeline of a nuclear power plant

表 1 管道材料 P280GH($\delta=60\text{ mm}$)化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical composition of pipeline material P280GH ($\delta=60\text{ mm}$) (wt. %)

C	S	P	Si	Mn	Ni
≤ 0.22	≤ 0.02	≤ 0.025	0.10~0.40	0.80~1.60	≤ 0.50
Cu	Sn	Cr	Mo	Al	C _{eq}
≤ 0.25	≤ 0.30	≤ 0.25	≤ 0.10	0.02~0.05	≤ 0.48

注: $C_{eq}=C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Ni+Cu)/15$ 。

表 2 管道材料 P280GH($\delta=60\text{ mm}$)力学性能
Table 2 Mechanical properties of pipeline material P280GH ($\delta=60\text{ mm}$)

试验项目	试验温度/ $^{\circ}\text{C}$	性能参数	规定值
拉伸试验	室温	$R_{p0.2}$	$\geq 275\text{ MPa}$
		R_m	470~570 MPa
		A	$\geq 21\%$
	310	$R_{p0.2}$	$\geq 186\text{ MPa}$
		R_m	$\geq 243\text{ MPa}$
冲击试验	0	KV2 平均值	$\geq 60\text{ J}$
		KV2 最小值	$\geq 40\text{ J}$

注: 冲击试验三个试样中,最多允许一个试样试验结果低于最小平均值。

检验,具有更高的无损检验要求。

2 施工难点分析

2.1 焊接工艺方案

主蒸汽超级管道现场安装采用氩电联焊工艺:手工钨极氩弧焊(GTAW)打底+焊条电弧焊(SMAW)填充及盖面,单面焊双面成形。因主蒸汽超级管段长度通常为3~5 m,横跨主蒸汽隔离阀,管道现场安装焊缝无法进行背面打磨及焊接作业,故采用管道外侧单面焊双面成形方式。焊接工艺评定依据RCC-M S3000(2007版)相关要求开展,焊接接头形式如图2所示。

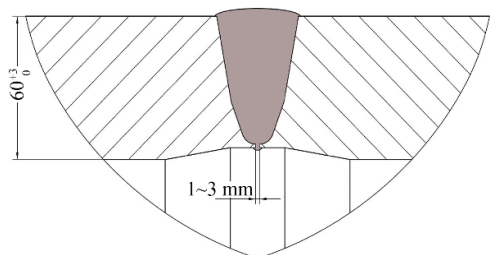


图2 焊接接头形式示意

Fig. 2 Schematic diagram of welded joints

GTAW 打底选用 AWS ER70S-3 核级焊丝,规格 $\phi 1.6$ mm; SMAW 填充及盖面选用 AWS E380B 核级焊条,规格 $\phi 3.2/4.0$ mm。焊材熔敷金属化学成分要求如表3所示。

表3 核级焊材熔敷金属化学成分(质量分数,%)

Table 3 Chemical composition of nuclear-grade welding filler materials (wt. %)

焊材	C	Si	Mn	S	P
ER70S-3	0.06~0.15	0.45~0.75	0.90~1.40	≤ 0.025	≤ 0.030
E380B	≤ 0.10	≤ 0.90	≤ 1.40	≤ 0.025	≤ 0.030
焊材	Ni	Cr	Mo	Cu	V
ER70S-3	≤ 0.15	≤ 0.15	≤ 0.15	≤ 0.50	—
E380B	≤ 0.30	≤ 0.20	≤ 0.30	—	≤ 0.04

2.2 焊接难点

主蒸汽超级管道现场安装焊接难点主要体现在以下方面:

(1)根部成形控制难。主蒸汽超级管道焊缝坡口宽度较窄且深度超过50 mm,限制了根部焊道施焊过程中焊枪的摆动操作和观察,管道内侧打底焊道背面成形难度大,易产生背面成形不良及根部焊

接缺陷。

(2)焊接质量不易保证。就手工焊而言,焊工技能水平很大程度地决定了焊接质量的优劣^[3]。大厚壁管道 SMAW 全位置焊工培训的周期较长,对焊工技能依赖较高。根据管道现场安装坡口尺寸,主蒸汽超级管道焊缝 SMAW 填充量大,施焊角度受限,道间清理较难,操作控制不当易出现气孔、夹渣、未熔合等焊接缺陷^[4]。

(3)焊接位置不利。主蒸汽超级管道现场安装主要为各管段或管件间的管道水平固定焊(5GT)或管道横焊(2GT)焊缝,与平焊位相比,熔池受重力影响不易控制,对焊工操作技能依赖更高。

(4)作业环境受限。主蒸汽超级管道现场焊缝在临时脚手架平台上焊接,焊工活动空间受限,焊接操作位置较困难。由于我国核电站选址主要分布在沿海地区,相对湿度较高,现场焊接局部区域湿度控制难度较大。

3 质量控制措施

3.1 一般施工流程

结合施工方案和工程经验,某核电站主蒸汽超级管道安装焊接施工一般流程为:超级管道待焊坡口及两侧25 mm区域清理→待焊表面无损检测→管道或管件吊装就位→固定措施、组对→打底焊接→填充及盖面焊接→焊缝余高去除及表面清理→后热及热处理→焊缝表面清理→热处理后焊缝无损检验(VT/PT/RT/UT)。

3.2 焊接工艺控制

现场焊接采用管道外侧氩电联焊单面焊双面成形方式,根部焊缝采用 GTAW 打底,填充及盖面采用 SMAW,主要焊接参数如表4所示。为防止阀门闸板在焊接过程中变形,主蒸汽隔离阀上下游焊缝焊接前需将阀门全部关闭之后才能开始焊接,且焊接电流不经过阀门。

(1)坡口保护与组对。因超级管道长度较长且绑扎固定困难^[5],吊装过程中应做好成品保护,尤其是坡口保护。现场采用圆棒卡块焊接固定的方式进行焊缝组对,避免焊缝根部点焊组对方式引起打底焊道成形不良。

表 4 氩电联焊焊接工艺参数
Table 4 Process parameters of GTAW + SMAW

焊接位置	焊道	焊材	极性	焊接电流/A	线能量/(kJ·mm ⁻¹)	保护气体
2GT	打底 GTAW	ER70S-3, Ø1.6 mm	直流正接	70~135	0.25~1.20	99.99%Ar, 流量>13.5 L/min
	填充/盖面 SMAW	E380B, Ø3.2 mm	直流反接	85~135	0.90~3.05	—
		E380B, Ø4.0 mm	直流反接	130~180	1.40~3.20	—
5GT	打底 GTAW	ER70S-3, Ø1.6 mm	直流正接	85~190	0.25~2.00	99.99%Ar, 流量>13.5 L/min
	填充/盖面 SMAW	E380B, Ø3.2 mm	直流反接	90~140	1.50~5.60	—
		E380B, Ø4.0 mm	直流反接	135~185	2.30~6.00	—

注: 预热温度大于 125 ℃, 层间温度控制范围 125~250 ℃, 后热温度控制范围 200~350 ℃。

(2)根部焊缝成形控制。因主蒸汽超级管道焊缝坡口较窄而深,焊枪选用细长型陶瓷喷嘴,提升氩气对根部熔池的保护效果。施焊过程中,手工钨极电弧在坡口一侧略作停留后快速摆动过渡至坡口另一侧,通过熔池控制实现打底焊缝背面的成形质量。

坡口组对间隙对根部缺欠影响较大^[6],现场通过严控焊前组对间隙的方式提升根部焊道的焊接质量。由于采用单面焊双面成形,打底焊道背面(管道内侧)的成形监控难度较大。现场预留一段 100~200 mm 的坡口长度,通过坡口组对 1~3 mm 的间隙窗口进行背面成形监控,如图 3 所示。通常选取易于操作的焊接位置作为预留段,待打底焊道监控完成后最后进行预留段的打底焊接。

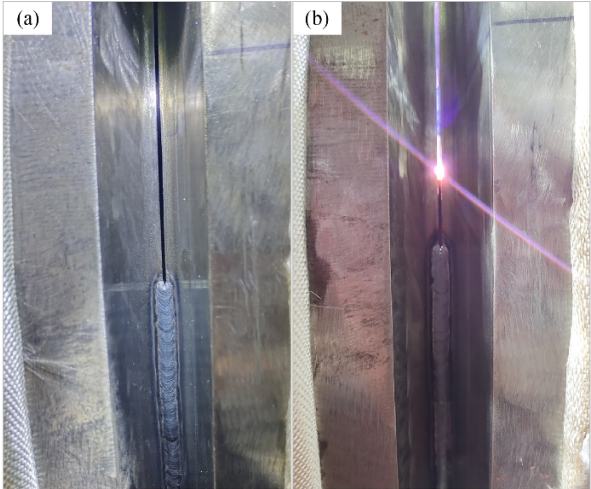
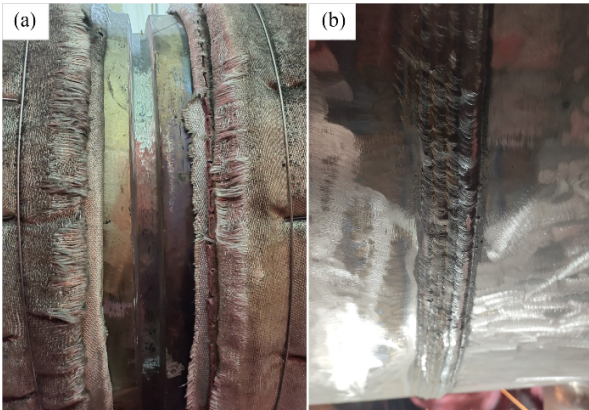


图 3 巧用预留段进行背面成形监控
Fig. 3 Clever use of reserved sections for back-forming monitoring.

(3)焊道间质量控制。SMAW 填充焊接过程中,焊工对每一焊道进行自检,通过焊道间的清渣和适当修磨,确保前一焊道中的焊渣、尖角、毛刺、表面气孔、铁屑等不利于后续填充焊接的因素得到及时纠正处理,如图 4 所示。由于起弧和收弧阶段

易于出现夹渣或气孔类缺陷,通过焊道回熔或机械打磨方式去除引弧和收弧位置未及时溢出的夹渣或气孔缺陷。



(a)填充焊道清渣及修磨 (b)盖面焊道成形效果

图 4 焊接过程控制

Fig. 4 Welding process control

(4)临时附件去除。吊装、组对及矫形等焊接的临时附件,在安装焊接完成后应严格控制磨除工序。附件磨除过程中预留不小于 5 mm 的打磨余量,避免因直接敲击去除导致焊缝或母材撕裂,以及打磨切割不当导致的机械损伤。在临时焊接附件磨除后,采用 MT 检验方法对附件磨除后表面及周边 15 mm 区域进行检测,按照 RCC-M02 级验收标准进行验收。

3.3 焊工技能管控

新版《民用核安全设备焊接人员资格管理规定》2020 年 1 月正式实施,将 2 万余项资格缩减至 7 类焊接方法资格,极大地简化了行政许可管理要求,进一步压实聘用单位的焊工技能培养主体责任^[7]。主蒸汽超级管道现场焊接采用氩电联焊工艺 (GTAW+SMAW),手工焊焊接工艺受焊工技能的影响较大。首先,基于材料、焊接方法、接头形式、填

充厚度、焊接位置等因素,进行现场焊工队伍的焊工资格证覆盖范围梳理,筛选出焊工资格满足要求的储备焊工。其次,通过主蒸汽、主给水管道近期现场焊接一次合格率统计分析,对筛选出的储备焊工进行焊接技能水平甄别:一次合格率不低于95%且现场焊接量不低于20道主焊缝的,可直接入选主蒸汽超级管道合格焊工清单;一次合格率在85%~95%之间,或焊接一次合格率不低于95%但现场焊接量不满足要求的,作为主蒸汽超级管道备选焊工。

现场焊接施工前,组织备选焊工开展超级管道焊接专项技能特训,选派高水平焊工教练指导,最终模拟焊接考核合格后可增选入超级管道合格焊工清单。为了保持良好焊接操作手感,合格焊工清单中的焊工也需定期参加主蒸汽超级管道模拟焊接训练及考核。同时,基于主蒸汽超级管道模拟焊接训练和现场焊接施工经验,组织焊工开展超级管道现场焊接技术交流,对常见焊接缺陷类型进行原因分析,并制定相应的预防或应对措施。

焊接施工过程中,及时开展完工焊缝的无损检验,定期监控焊工的焊接一次合格率,及时掌握现场焊工技能水平。制定焊工绩效考核办法,采用“底薪+焊接合格量薪点-焊接一次不合格薪点扣除-返修不合格薪点扣除”的薪金分配方式,全面激励焊工提升焊接质量的主观能动性。根据现场焊接合格率考评结果,对焊接质量控制表现突出的焊接人员进行正向激励,在项目范围内评选优秀个人进行光荣榜公示。

3.4 作业环境控制

主蒸汽超级管道现场焊缝在临时脚手架平台上焊接,焊工活动空间受限,焊接操作位置较困难。根据焊工操作要求优化临时脚手架作业平台与施焊位置的相对高度,或在平台上配置专用三步梯,确保焊工可调整至舒适的作业姿态。搭设焊接作业防风棚加强焊接位置及周边的防风措施,施焊过程中严禁风扇直吹焊接及周边位置,避免周边风速超标导致焊接缺陷的产生。

我国核电站选址主要分布在沿海地区,相对湿度较高,长期维持在70%~90%之间,现场焊接局部区域湿度控制难度较大。研究表明,焊接及周边区

域空气相对湿度的增加直接促使焊缝气孔类缺陷的产生^[8]。焊接位置及周边空气相对湿度较大时,在无有效控制措施时应避免焊接作业。焊接前,对待焊表面进行火焰烘烤,去除待焊表面水分,确保预热温度满足要求,可有效降低气孔类缺陷的发生几率。由于待焊表面的铁锈及氧化皮在熔池的作用下易于产生气孔类缺陷^[9],焊接施工前应避免待焊表面的长期暴露放置,并仔细清理待焊位置及周边的铁锈和氧化皮。

3.5 后热及热处理

为使氢扩散逸出并避免氢致冷裂风险^[10],应在焊缝焊后冷却到预热温度前进行焊后后热,后热采用与预热相同的设备和措施。主蒸汽超级管道焊缝后热处理温度范围控制在200~350℃,保持时间不小于1h,必须达到规定温度的加热区域不小于焊缝两侧60mm。

后热处理完成后,应通过机械方式对焊缝可达的内外表面进行打磨,去除焊缝余高,保证焊缝UT检验的可达性。根据工程经验^[11],适当的焊后消应力热处理工艺可有效提升焊接接头的综合力学性能。考虑超级管道焊缝规格,消应力热处理温度范围为595~625℃,保温时间1~2h,加热速度和冷却速度均控制在55~86℃/h,必须达到规定温度的加热区域应不小于焊缝两侧60mm。消应力热处理采用电阻丝加热,加热设备、热电偶和记录器用电设备等须使用专用电源。热处理期间需确保保温层的包裹效果,并应避免管道内部穿膛风对温度的影响。为了避免同一管线多道焊缝同步热处理的热膨胀量累积过大,出现拉裂刚性约束部件的风险,原则上同一管线每道焊缝的消应力热处理应单独实施。

3.6 无损检验及返修

无损检验实施前,应对焊缝及两侧临近可达表面进行机械抛磨,确保焊缝表面成形质量符合焊缝外观尺寸验收要求及满足VT/PT/RT/UT等无损检验条件。根据规范及设计要求,针对焊缝及两侧可达表面先后依次实施100%VT、100%PT、100%RT、100%UT。根据RCCM S7700相关规定,VT、PT表面检验的范围应包括熔敷金属及两侧15mm区域,RT和UT体积检验的范围为熔敷金属及两侧10mm区域。UT检验探头角度包括0°、45°、60°、70°,采用

单面双侧或双面双侧(如可达)扫查方式。待检焊缝余高需磨平,待检表面焊缝两侧分别应修磨至少250 mm的扫查区域。

为了避免焊缝返修后重新开展焊后热处理的风险,现场增加焊后消应力热处理前的VT/PT/RT/UT等无损检验,提前识别并返修焊接接头的相关缺陷。

如无损检验发现超标缺陷时,应根据规范及设计要求开展焊缝返修。返修过程中需通过机械挖凿方式有效去除缺陷,必要时可通过挖凿后RT检验验证。由于缺陷及多次重熔对焊缝接头疲劳性能的不利影响^[12],现场需严控焊缝返修合格率和返修次数。

经上述控制措施,某核电站主蒸汽超级管道安装焊接一次合格率达100%。

4 结论

(1)主蒸汽超级管道壁厚60 mm、U型坡口深窄,现场采用GTAW打底+SMAW填充盖面的氩电联焊单面焊双面成形工艺。选用细长型陶瓷喷嘴提升根部保护效果,配合预留100~200 mm坡口段进行背面成形监控,可有效解决管道内侧打底焊道成形监控难题。

(2)通过焊工资格覆盖范围梳理、一次合格率($\geq 95\%$ 且 ≥ 20 道主焊缝)筛选、专项模拟焊接特训及定期考核,建立合格焊工清单;同时采用绩效激励方式提升焊工主观能动性,保障了厚壁管道全位置焊接的焊缝质量。

(3)针对沿海核电站高湿环境(相对湿度70%~90%),采取防风棚、火焰烘烤待焊表面除湿、清理铁锈及氧化皮等措施,降低了气孔类缺陷的产生风险。

(4)焊后严格实施后热(200~350 °C, ≥ 1 h)及消应力热处理(595~625 °C, 1~2 h),且在消应力热处理前增加无损检验以提前识别缺陷,避免了返修后重新热处理的风险。同一管线各焊缝消应力热处理单独实施,防止热膨胀累积导致拉裂。

(5)经有效的焊前、焊接过程、焊后处理及检测控制,某核电站主蒸汽超级管道安装焊接一次合格

率达100%,可为核电站主二回路及类似管道现场安装焊接施工质量控制提供借鉴。

参考文献:

- [1] 杜艳梅,赵伟星,孟建涛,等. 核电主蒸汽超级管道研制现状及各种工艺分析[J]. 锻压装备与制造技术, 2016,51(3):103-106.
DU Y M, ZHAO W X, MENG J T, et al. Research status and various process analysis of main steam super pipeline for nuclear power [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2016, 51(3): 103-106.
- [2] French Society for Design, Construction and In-service Inspection Rules for Nuclear Island Components. Design and Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands (RCC-M) [S]. FRANCE: AFCEN, 2007.
- [3] 赵志强. 全面质量管理在焊工培训中的应用[J]. 金属加工(热加工), 2019(6):53-55.
ZHAO Z Q. The application of total quality management in welder training [J]. MW Metal Forming, 2019 (6):53-55.
- [4] 黄清辉. 氩电联焊应用于核岛钢衬里穹顶拼装的可行性研究[J]. 焊接技术, 2019,48(05):54-58.
HUANG Q H. Feasibility study on TIG-SMAW welding applied in nuclear island steel lining dome welding [J]. Welding Technology, 2019,48(05):54-58.
- [5] 赵文刚. 压水堆核电站主蒸汽系统超级管道吊装技术[J]. 安装, 2021(8):42-48.
ZHAO W G. Lifting technology for super pipes of main steam system in pressurized water reactor nuclear power plant [J]. Installation, 2021(8):42-48.
- [6] 刘晟,常云峰,白海明,等. 焊接工艺参数对Q690D高强钢多层多道焊缝缺欠的影响[J]. 电焊机, 2023, 53(10):36-44.
LIU S, CHANG Y F, BAI H M, et al. Effect of Process Parameters on Welding Imperfection of Multi-pass Welding for Q690D High Strength Steel [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(10):36-44.
- [7] 袁喆. 民用核安全设备焊接人员资格管理发展及建议[J]. 电焊机, 2023, 53(10):132-135.
YUAN Z. Civil Nuclear Safety Equipment Welding Personnel Qualification Management Development and Suggestions [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(10):132-135.
- [8] 李亚江,王娟. 焊接缺陷分析与对策[M]. 北京:化学