

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.10.12

VVER-1000 核电机组主管道焊接施工工艺优化

郑倩倩¹, 宋纪煜¹, 孙彬彬¹, 于立学², 王铭秋¹, 雷世和¹, 王广业¹,
姜立伟¹, 郑日水¹

1. 江苏核电有限公司, 江苏 连云港 222042
2. 山东核电设备制造有限公司, 山东 烟台 265116
3. 上海中巽科技股份有限公司, 上海 201203

摘要: VVER-1000 堆型核电站主管道焊接是核岛安装工程的关键里程碑节点。主管道材料采用复合钢 10ГH 2MΦA、15X2HMΦA-A (压力容器接管嘴), 规格为 $\varnothing 990\text{ mm}\times 70\text{ mm}$ 、 $\varnothing 1\,000\text{ mm}\times 75\text{ mm}$, 材料属珠光体耐热钢, 焊接与热处理工艺复杂、施工难度大。原“依次施工”方案存在工期长(约 12 个月)、作业环境恶劣、冷裂纹与收缩变形控制难等问题。通过分析母材焊接性, 明确冷裂纹为重点防控对象, 制定 200 °C 预热、200~250 °C 后热(保温 12 h)、620 $\pm$ 20 °C 消应力热处理(保温 6.5 h)等参数; 优化焊材(选用 CB-08Г2C 等 4 类)、焊接方法(氩-电联合工艺)与坡口(双 V 形), 经 4 项工艺评定验证可行性; 将焊接顺序改为“平行法+搭接法”, 配合变形监测与无损检验。后续应用表明, 该工艺使主管道焊接一次合格率超 96.8%, 工期缩短约 2 个月, 改善作业环境与安全性, 属 VVER 堆型世界首创(已申请发明专利), 对同类机组及其他堆型主管道焊接有指导与推广价值。

关键词: 主管道; 焊接工艺; 焊接顺序; 收缩变形; 热处理

中图分类号: TG457.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)10-0106-08

Optimization of the welding Construction Process for the Main Pipeline of VVER-1000 Nuclear Power Unit

ZHENG Qianqian¹, SONG Jiyu¹, SUN Binbin¹, YU Lixue², WANG Mingqiu¹, LEI Shihe¹,
WANG Guangye¹, JIANG Liwei¹, ZHENG Rishui¹

1. Jiangsu Nuclear Power Co., Ltd., Lianyungang 222042, China
2. Shandong Nuclear Power Equipment Manufacturing Co., Ltd., Yantai 265116, China
3. Shanghai Zhongxun Technology Co., Ltd., Shanghai 201203, China

Abstract: The welding of the main pipeline of VVER-1000 type nuclear power plant is a key milestone in the installation of the nuclear island. The main pipeline materials are made of composite steels 10ГH2MΦA and 15X2HMΦA-A (vessel nozzles) with specifications of $\varnothing 990\text{ mm}\times 70\text{ mm}$ and $\varnothing 1000\text{ mm}\times 75\text{ mm}$. The materials belong to pearlite heat-resistant steel, and the welding and heat treatment processes are complex, making the construction challenging. The original "sequential construction" plan had issues such as a long duration (about 12 months), harsh working environment, and difficulties in controlling cold cracks and shrinkage deformation. By analyzing the weldability of the base metal, it was determined that cold cracks were the primary prevention target. Parameters such as preheating at 200 °C, post-heating at 200-250 °C (holding for 12 h), and stress-relieving heat treatment at 620 $\pm$ 20 °C (holding for 6.5 h) were established. The welding materials (selecting CB-08Г2C and other 4 types), welding methods (argon-electric combined technology), and groove design (double V-shaped) were optimized. The feasibility was verified through four process evaluations. Innovatively, the welding sequence was changed to "parallel method + lap method", combined with deformation monitoring and non-destructive testing. Subsequent applications showed that this process resulted in a primary qualification rate of over 96.8% for the main pipeline welding, shortened the construction period by about 2 months, improved the working environment and safety, and it is the world's

收稿日期: 2025-08-28

作者简介: 郑倩倩(1992—), 女, 学士, 工程师, 主要从事于核电厂焊接工艺研究、焊接管理和核安全经验反馈工作。E-mail: zhengqq@cnp.com.cn。

first for VVER-type reactors (patent application has been filed). It has guiding and promoting value for similar units and other reactor main pipeline weldings.

Keywords: main pipe; welding technology; welding sequence; shrinkage deformation; heat treatment

引用格式:郑倩倩,宋纪煜,孙彬彬,等. VVER-1000 核电机组主管道焊接施工工艺优化[J]. 电焊机,2025,55(10):106-113.

Citation:ZHENG Qianqian, SONG Jiyu, SUN Binbin, et al. Optimization of the welding Construction Process for the Main Pipeline of VVER-1000 Nuclear Power Unit[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(10): 106-113.

1 背景

一回路主冷却剂系统是核电站的“主动脉”。俄罗斯 VVER-1000 堆型主管道由 4 个环路对称组成,每台机组由 1 台反应堆压力容器、4 台卧式蒸汽发生器及 4 台主泵连接而成;每个环路包含热段、冷段和过渡段,单个环路设 9 道焊口,整台机组共 36 道焊缝。

VVER-1000 堆型主管道母材采用复合钢 10ГН2МΦА(主管道本体)、15Х2НМΦА-А(压力容器接管嘴),规格分别为 $\varnothing 990\text{ mm}\times 70\text{ mm}$ 、 $\varnothing 1\,000\text{ mm}\times 75\text{ mm}$ 。主管道总长度约为 134 m,总重约 252 t,施工量大。由于母材属于珠光体耐热钢,焊接过程中需采取预热、后热及焊后热处理等特殊措施,导致施工存在焊接量大、工艺复杂、作业环境恶劣、施焊难度大、工期长等问题。在原施工方案中,主管道焊接采用“依次施工”,即完成上一道焊口所有工序后再开展下一道焊口作业。为改善这一现状,通过工艺分析,创新提出了新的焊接顺序方案,该方案在拓展现场施工工作面的同时,经试验验证具备科学可靠性,已在实际工程中成功应用。该焊接工序改进属于世界 VVER 堆型首创“工法”,并已申请发明专利。

通过系统分析主管道安装过程可知,其焊接工艺对安装质量的影响主要集中在母材的焊接性能、焊接变形控制、焊接顺序三方面。下文将围绕这三方面展开详细的分析和论证。

2 母材焊接性分析

主管道需服役于高温、高压、高放射性运行环境,因此选用耐高温、耐高压的 10ГН2МΦА(主管道)与 15Х2НМΦА-А(压力容器接管嘴)珠光体钢,

且内壁堆焊耐腐蚀层以保障耐腐蚀性^[2]。两种材料焊接性相近,故以 10ГН2МΦА 为对象开展分析。

2.1 化学成分和机械性能

10ГН2МΦА 复合钢的化学成分和机械性能分别如表 1、表 2 所示。

表 1 母材化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of base metal(wt. %)

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V
0.10	0.22	0.73	0.23	0.51	1.87	0.003
Nb	S	P	Co	Cu	N	
—	0.004	0.009	—	0.08	—	

表 2 母材机械性能

Table 2 Mechanical properties of base metal

条件温度 /°C	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	延伸率 /%	断面收缩 率/%	$T_{K0}/^{\circ}\text{C}$
20	580	445	28	75	-10
350	525	375	25	74	—

2.2 焊接裂纹倾向评估

控制裂纹是焊接质量核心,10ГН2МΦА 各类裂纹倾向分析如下。

(1)热裂纹。采用抗热裂纹指数经验公式 $B=w(\text{Mn})/w(\text{S})$ 计算,得 $B=182.5$,远高于临界值;且含碳量低(为 0.1%)、S 含量极低,热裂纹风险小。

(2)再热裂纹。通过低合金钢再热裂纹敏感性指数公式计算: $\Delta G=w(\text{Cr})+3.3w(\text{Mo})+8.1w(\text{V})-2$, $\Delta G>0$ 时易裂; $\Delta G_1=w(\text{Cr})+3.3w(\text{Mo})+8.1w(\text{V})+10w(\text{C})-2$,当 $\Delta G_1>2$ 时易裂, $\Delta G_1<1.5$ 不易裂。

代入表 1 成分计算得: $\Delta G=-0.06$, $\Delta G_1=0.94$,故 10ГН2МΦА 不易产生再热裂纹。

(3)层状撕裂。主管道的力学结构在 Z 向没有力的作用,所以无需考虑层状撕裂。

(4)冷裂纹。计算出 10ГН2МΦА 的 $C_{eq}=0.5\%$,处于 0.4%~0.6%的“焊接性较差”区间,且钢中 Ni、Mo 元素会增加奥氏体稳定性,冷却过程中易形成马氏体或贝氏体等硬脆组织,加之管道大壁厚特

4 主管道焊接工艺评定验证

4.1 工艺评定实施

按照俄标及设计技术条件,针对主管道现场安装的不同焊口类型,共设置 4 项工艺评定,覆盖 2GT、5G1T 两种焊接位置及中频、电阻两种加热方式,确保评定结果可全面指导现场施工。具体评定项目如表 5 所示。

表 5 主管道焊接工艺评定项目

Table 5 Qualification items for main pipe welding process

基材材质	母材规格	焊接位置	焊接方法	加热方式	覆盖焊口
10ГН2МΦА+1 5Х2НМΦА-А	∅990×70+ ∅1000×75	5G1T	TIG+SMAW	中频加热	N1、N4
10ГН2МΦА	∅990×70	2GT	TIG+SMAW	中频加热	N3、N9
10ГН2МΦА	∅990×70	5G1T	TIG+SMAW	电阻加热	N6、N2、 N5、N8
10ГН2МΦА	∅990×70	2GT	TIG+SMAW	电阻加热	N7

4.2 焊接变形控制

焊接过程中,热输入差异会导致管道各部位收缩不均,进而引发纵轴线角位移与轴线偏差,最终引起两个对接管件不在一个轴线上。

(1)角变形控制。在施焊焊口对应管段的自由端(远离焊口端),于 3、6、9、12 钟点位置各布置 2 个百分表,实时采集焊接过程中的角位移数据;根据监测数据,通过调整焊接顺序和热输入大小,及时修正变形趋势,避免角变形超标^[3]。

(2)收缩变形控制。在评定试件焊缝坡口两侧的管子周向,按 4 等份用样冲标出测量基准点(见图 2)。采用游标卡尺实时测量基准点间距离,记录横向收缩量。

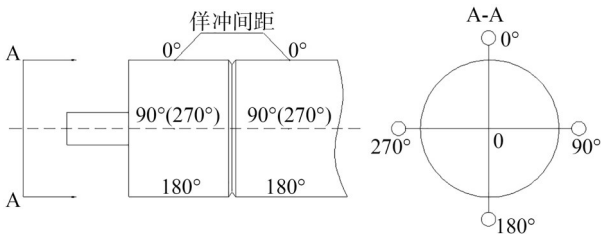


图 2 主管道样冲间距的测定示意

Fig. 2 Schematic diagram of the measurement of the main channel apparent impact spacing

根据焊接评定工艺焊缝收缩量实测数据(见表 6)分析可知,焊接变形量主要产生于基层母材焊接前期,前 50% 基层焊接完成时,收缩量已达总收缩量的 70%~80%;复合层(过渡层+不锈钢耐腐蚀堆焊层)焊接阶段,收缩量无明显变化,表明复合层焊接对整体变形无影响^[4]。为了确保焊接质量,基于保守决策,可得结论如下:基层母材焊接、最终热处理及无损检验完成后,主管道的变形量与残余应力值趋于稳定,对后续焊口焊接无影响,为“多焊口并行施工”提供了数据支撑。

表 6 焊接工艺评定收缩量

Table 6 Welding process evaluation shrinkage

工艺评定编号	施焊阶段	方位			
		0°	90°	180°	270°
LYG-PQR-1073 (压力容器端)	氩弧焊接	3.56	3.66	2.30	2.72
	基层 30% 焊接	5.66	6.40	5.58	5.48
	基层 50%~60% 焊接	6.36	6.80	6.40	6.78
	基层 80% 焊接	7.50	7.36	7.18	7.44
	基层 100% 焊接	8.18	7.60	7.78	6.90
	最终热处理完成	6.94	5.92	5.00	5.10
	复合层焊接完成	6.94	5.92	5.00	5.10
LYG-PQR-1071 (蒸汽发生器端)	氩弧焊接	3.68	3.74	2.90	2.44
	基层 30% 焊接	4.26	4.70	3.94	4.06
	基层 50%~60% 焊接	5.60	5.68	5.08	5.10
	基层 80% 焊接	6.12	6.06	5.76	5.24
	基层 100% 焊接	6.26	6.16	5.90	5.36
	最终热处理完成	5.88	5.84	5.26	4.86
	复合层焊接完成	5.88	5.84	5.26	4.86
LYG-PQR-1072 (主管道与主管道、主管道与主泵 5G1T)	氩弧焊接	2.94	2.56	2.28	2.66
	基层 30% 焊接	5.16	4.78	4.26	5.12
	基层 50%~60% 焊接	5.32	4.80	4.28	5.16
	基层 80% 焊接	5.72	5.16	4.64	5.36
	基层 100% 焊接	5.84	5.26	4.68	5.48
	最终热处理完成	6.32	5.82	4.77	5.56
	复合层焊接完成	6.32	5.82	4.77	5.56
LYG-PQR-1074 (主管道与主泵 2GT)	氩弧焊接	3.08	2.60	2.80	2.64
	基层 30% 焊接	3.54	3.42	3.72	3.66
	基层 50%~60% 焊接	4.20	4.48	4.42	4.10
	基层 80% 焊接	4.76	4.68	4.58	4.48
	基层 100% 焊接	4.90	4.76	4.74	4.72
	最终热处理完成	3.92	3.44	4.00	3.24
	复合层焊接完成	3.92	3.44	4.00	3.24

收缩率变化曲线如图 3 所示。分析可知:氩弧打底层完成、基层焊接至 1/3 截面、基层焊接至 2/3 截面是调整焊接变形的最佳时机。

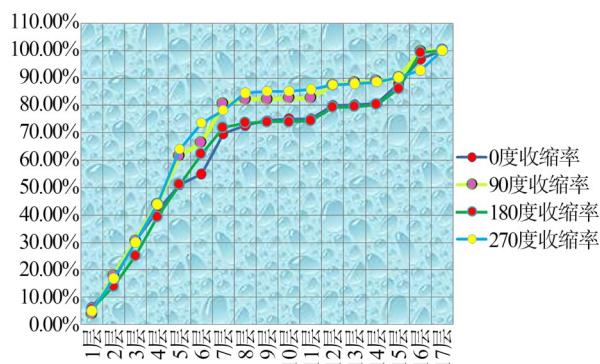


图3 实测各点收缩率变化

Fig. 3 Measured Shrinkage Rate Changes at Various Points

4.3 热处理参数验证

结合前文 2.3 节冷裂纹防控理论分析,评定过程中验证并确认关键热处理参数,确保与工艺要求一致:预热温度控制在 200 ± 10 °C,确保层间温度不低于预热温度;后热温度 $200 \sim 250$ °C,保温 $12 \text{ h}^{[5]}$,消除扩散氢以防控冷裂纹;焊后消应力热处理保温温度 620 ± 20 °C,保温时间 6.5 h ,充分释放焊接残余应力。

4.4 工艺评定结论

4项焊接工艺评定试件经外观检验、无损检验和理化试验结果均满足标准和技术条件要求,验证了主管道焊工艺的可行性。具体结论如下:

(1)所选 4 类母材的机械性能指标与母材机械性能指标相匹配;(2)焊接过程中,预热、层间及后热温度需控制在 200 °C 以上,防止冷裂纹产生;(3)基层母材焊接、最终热处理及无损检验完成后,主管道焊接变形量及残余应力对于后续焊口焊接无干扰,支持多焊口并行施工;(4)氩弧打底层完成、基层焊接至 $1/3$ 截面、基层焊接至 $2/3$ 截面,是调整焊接变形的最佳时机;(5)焊后消应力热处理需保证至少 6.5 h 保温时间,且温度控制在 620 ± 20 °C,才能充分释放残余应力。

5 主管道现场焊接验证

基于前文焊接工艺评定结果,修正并制定一回路主冷却剂系统主管道焊接方案,通过针对性的质量控制、变形管控及热处理工艺执行,确保现场焊接质量达标,具体实施内容如下。

5.1 主管道焊接质量控制

现场焊接质量控制以“单道焊口单独质量计划”为核心,通过全工序节点把关,实现每道焊口质量可追溯、工艺有效性可验证。焊接施工工序示意及焊接质量控制如图 4 所示。

结合母材焊接性能分析,重点在对焊接变形、焊接缺陷特别是冷裂纹产生进行控制。

5.2 焊接收缩变形控制

(1)变形控制基础要求。

a. 作业人员需经专项培训,熟练掌握组对、装配、打底焊、填充层、盖面层和热处理及 NDE 全工序流程,对关键工序进行有效控制。

b. 以工艺评定试验积累的变形数据为依据,指导现场焊接过程中的变形量控制。

c. 测量人员需具备丰富经验,实时采集变形偏差数据并开展有效性分析。

d. 现场设置焊接变形控制装置。

(2)测量仪器仪表布置。

在焊接管段的非施焊端,沿 X、Y、Z 轴方向布置 6 个百分表,其中 4 个百分表分别与管道的 3、6、9、12 点钟位置的管壁良好接触,用于检测管段的挠曲变形。剩余 2 个百分表接触管端部 12 点、6 点位置,用于监测管道轴向变形。所有百分表安装后记录初始读数,作为变形量计算的基准。

(3)焊接变形过程监测。

考虑到主管道现场安装时两端设备及接管管口角度固定,需通过严格监测与工艺调整保障安装精度。按俄方方案要求,在焊缝非施焊端的管道外壁 X、Y 轴方向各设 1 个百分表,实时检测焊接变形,通过调整焊接顺序控制主管道中心线不偏移;在焊缝两端主管道外侧的母材上,以焊缝为中心,向两侧 100 mm 处的 3、6、9、12 点钟位置打样冲眼,作为收缩变形测量的定位基准;在氩弧打底完成、基层焊接至 $50\% \sim 60\%$ 、基层焊接至 100% 、最终热处理完成、内侧不锈钢堆焊层完成等关键节点,分别测量样冲眼间距离,记录收缩与变形量;全程严格控制线能量。

5.3 热处理工艺控制

通过预热、后热、高温回火等热处理工艺,最大限度消除焊接残余应力,避免焊缝裂纹产生。依据

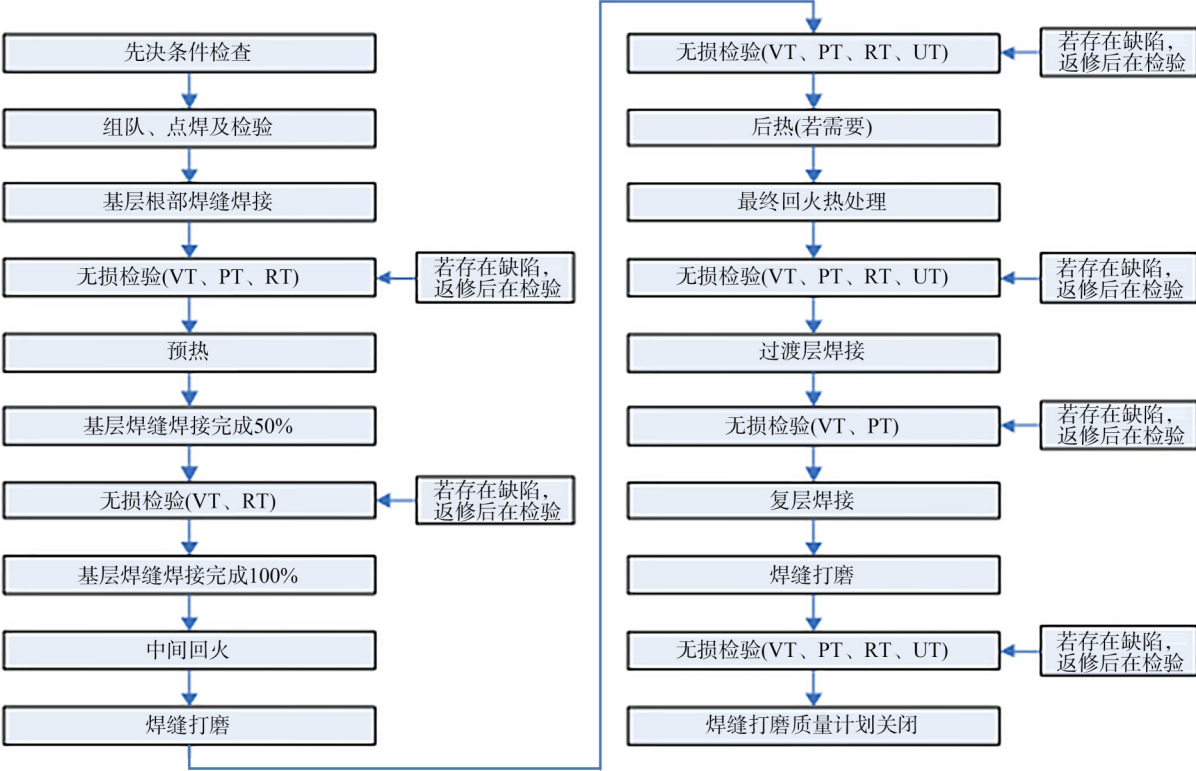


图 4 焊接施工工序示意及焊接质量控制

Fig. 4 Schematic Diagram of Welding Construction Process and Welding Quality Control

焊接工艺评定结论,制定主管道焊接热处理工艺,如表 7 所示。

同时,在焊接全流程中配合无损检验手段,及时发现焊缝内部质量缺陷,在确保焊接质量的同时,实现对焊接变形、应力裂纹及内部质量的有效控制。

6 主管道焊接顺序优化

原一回路主冷却剂主管道焊接采用保守的“依次施工”工艺(在焊接下一道焊口之前,要全部完成上一道焊口的所有焊接及无损检测工作,包括每道焊缝的基层母材焊缝和内侧的不锈钢耐腐蚀层堆

焊层及无损检验),如图 5 所示。该工艺虽以控制焊接应力与变形为目标,但存在明显局限:主管道焊接是核岛安装关键路径,工期长短直接影响一、二回路重要设备安装进度;原工艺需三班倒连续作业,现场环境恶劣、人员疲劳强度高。为提升焊接质量、提高施工效率、改善作业环境,需对单机组主管道焊接顺序进行优化。

6.1 焊接顺序优化分析

由俄方主导的“依次施工”焊接顺序,是为了避免焊接收缩导致的管道位移对下一道焊口产生的影响。根据相关核电经验、文献以及三维模拟计算,得出结论:厚壁管件焊接存在明显的轴向变形,焊接初期是轴向收缩的主要阶段,当焊接量达到了

表 7 主管道焊口热处理工艺参数要求

Table 7 Requirements for heat treatment process parameters of main pipe welds

焊口 编号	预热	后热		热处理	
	温度/升温速度	温度/保温时间	中间回火	最终回火	
N2、N5、N6、N7、N8	200±10 °C/≤ 250 °C/h	200~250 °C/12 h	N/A	620±20 °C, 保温 6.5 h	
				升温速度: <500 °C 时, ≤100 °C/h; =500 °C 时, 持续 0.5 h; >500 °C 时, ≤50 °C/h。	
				冷却速度: ≥300 °C 时, ≤50 °C/h; <300 °C 时, 在保温层下自然冷却到 100 °C。	

注:①只有当基层母材焊缝中间回火热处理后进行无损检验,发现超标缺陷需进行返修,在消除缺陷并补焊结束,检验合格后进行后热。

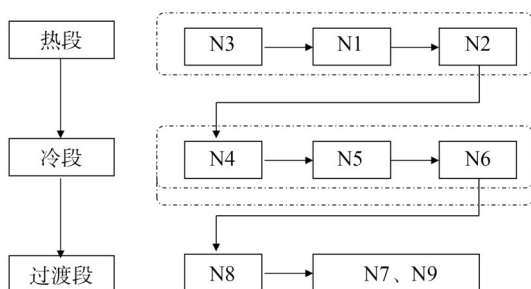


图5 单环路“依次施工”流程示意

Fig. 5 Schematic diagram of the single-loop "Sequence Construction" process

20 mm左右时,轴向收缩量逐步变缓^[6]。分析其原因:焊接前期,管道刚性较低,焊缝金属几乎自由收缩,轴向变形量大;焊接中期,管道刚性逐渐增大,变形为焊缝收缩与管道热胀冷缩的综合结果,收缩减缓;焊接后期,管道刚性高,变形以热胀冷缩为主,收缩量趋于稳定。

由此,提出优化设想:当前一道焊口焊接至变形基本稳定时,即可启动下一道焊缝焊接,将原“依次施工法”调整为采用“平行法+搭接法”施工,完成焊接工序的优化。

6.2 焊接顺序优化方案

经分析验证,优化方案在现场工程中可落地实施。主管道焊接施工方案优化措施如图6所示。

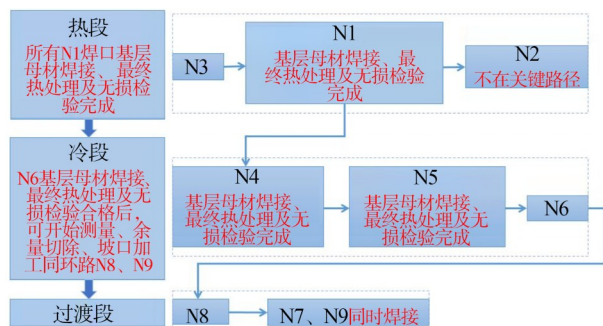


图6 主管道焊接顺序优化

Fig. 6 Optimization of main pipe welding sequence

按“热段→冷段→过渡段”的逻辑划分施工区域,各环路焊接接头的焊接启动顺序如下。热段: N3→N1(基层母材焊接、最终热处理及无损检验完成)→N2(不在关键路径);冷段: N4(基层母材焊接、最终热处理及无损检验完成)→N5(基层母材焊接、最终热处理及无损检验完成)→N6;过渡段: N8→N7、N9(同时焊接)。

通过该主管道焊接施工方案可以实现:

(1)热段与冷段之间“平行法”施工(N2、N4同时焊接),拓展焊工工作面,人员可实行长白班,无需三班倒,大幅降低疲劳强度;夜间时间可用于无损检验,作业环境显著改善;(2)冷段与过渡段之间“搭接法”施工,保持稳定的白班作业面,避免工序中断;(3)现场一、三环路和二、四环路对称施焊。

此工序的调整得到俄罗斯中央材料院的批准,属于VVER堆型世界首创。

6.3 焊接现场的再现性验证

通过数据模拟、现场试验及实试验验证(以各环路第一道焊缝为对象,表8为实测收缩量数据),结合保守决策原则,可得结论如下:基层母材焊接、最终热处理及无损检验完成后,主管道焊接变形量及应力值对于下一焊口的焊接没有影响。

表8 主管道焊缝实测收缩量

Table 8 Measured shrinkage of main pipe welds

焊口号/ 方位	氩弧 焊接 完成	基层填充 50%~60% 厚度	基层 焊接 完成	后热 完成	最终热 处理 完成	复合层 焊接 完成
1N3	0°	2.22	5.64	5.36	4.78	4.78
	90°	2.74	4.28	4.12	3.46	3.46
	180°	2.60	5.62	5.40	4.58	4.58
	270°	2.50	4.68	4.70	4.26	4.26
2N3	0°	1.88	5.12	4.26	4.20	4.20
	90°	3.08	5.66	5.52	5.26	5.26
	180°	2.98	5.34	5.40	5.16	5.16
	270°	2.86	5.26	5.26	4.86	4.86
3N3	0°	1.64	5.60	5.70	5.62	5.62
	90°	2.18	5.22	5.70	5.48	5.48
	180°	2.12	5.84	6.22	6.04	6.04
	270°	2.08	6.00	6.56	6.64	6.64
4N3	0°	3.24	5.62	5.72	5.32	5.32
	90°	3.52	5.30	5.9	5.10	5.10
	180°	3.12	5.18	5.34	6.28	6.28
	270°	3.08	5.20	6.10	5.40	5.40

以4N3横向收缩量(见图8)为例进行分析。由图8可知,焊缝总收缩量约6 mm,其中基层焊接50%前收缩量约为5.5 mm(占比超90%),50%后收缩量仅0.5~1.0 mm;基层焊接60%~70%时收缩量趋于稳定,且复合层(过渡层、不锈钢堆焊层)焊接对焊口变形无影响,证明了优化方案的安全性与可行性。

6.4 焊接顺序优化的成果

优化方案在后续机组主管道焊接中成功应用。X号机组主管道焊接一次合格率为96.8%,Y号机组

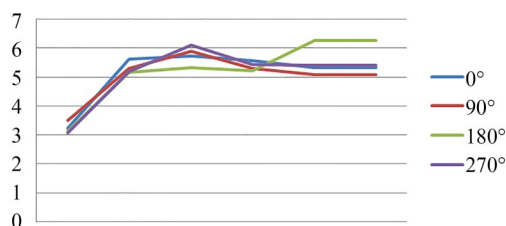


图 7 4N3 横向收缩量示意

Fig. 7 Schematic of Transverse Shrinkage for 4N3

为 96.9%, 均优于一期工程原方案的焊接合格率。在保证质量的同时, 主管道焊接总工期缩短约 2 个月, 为其他专业的施工创造了条件, 有力支撑核岛冲堆目标实现。

6.5 后续机组焊接工艺优化建议

(1) 堆焊层灵活安排。基层焊接、热处理及无损检验完成后, 即可组对、施焊下一道焊口, 不锈钢耐腐蚀堆焊层可根据现场进度灵活调整。

(2) 引入激光测量 3D 建模。该技术已在 AP1000 堆型成熟应用, 测量精度达 0.005 mm/5 m, 可实现热段、冷段焊缝同步焊接, 进一步优化工艺。

(3) 后续机组可以开展自动焊工作, 降低人工劳动强度、提高焊接质量与施工效率, 缩短工期。

(4) 优化冷段的焊接顺序为 N6→N4→N5, 此焊接顺序可以满足程序规定的 2 个限制条件: ①所有 N1 焊缝基层母材焊接、最终热处理及无损检验完成; ②N1/N4 相邻焊缝不同步施焊, 使冷、热段间推行平行施工。更为有利的是, 无需在主泵上部端面增加 20~60 t 配重块, 减少辅助设施工作量, 降低焊接拘束度与冷裂纹风险。

7 结论

通过对本工程的实践及验证, 该堆型主管道焊接工艺的研究及实践成果不仅能够在本项目工程建设实践中具有实际指导意义, 而且对同类机组特别是对已引进的俄罗斯 VVER-1200 机组的主管道焊接、工艺优化、工期优化具有良好的借鉴意义及推广价值, 具体结论如下:

(1) 通过对主管道母材 10ГН2МΦА (主管道本体) 与 15Х2НМΦА-А (压力容器接管嘴) 的焊接性分析, 确定冷裂纹防控、焊接收缩变形控制为焊接

质量保障的关键要点。

(2) 结合理论计算与试验论证, 优化确定预热 (200 °C)、后热 (200~250 °C, 保温 12 h)、消应力热处理 (620±20 °C, 保温 6.5 h) 等关键参数, 匹配 CB-08Г2С 等 4 类焊材, 采用氩-电联合焊接工艺与双 V 形坡口, 并通过 4 项覆盖不同焊接位置、加热方式的工艺评定验证方案可行性; 最终将主管道焊接一次合格率提升至 96.8% 以上, 显著提高一回路主管道焊接质量。

(3) 创新将原“依次施工”焊接顺序优化为“平行法+搭接法”(热段与冷段平行施焊、冷段与过渡段搭接施工), 无需三班倒连续作业, 大幅优化现场施工环境, 降低人员疲劳强度, 提升施工安全性。

(4) 优化工艺使主管道施工工期缩短约 2 个月, 为核岛后续设备安装与冲堆节点创造有利条件; 其中焊接顺序优化工序属 VVER-1000 堆型世界首创 (已申请发明专利), 不仅对本项目具有直接指导意义, 更可为同类 VVER 堆型 (如 VVER-1200) 及其他堆型核电站主管道焊接工艺优化提供重要借鉴, 具备广泛推广价值。

参考文献:

- [1] 徐井伟, 马尚国, 王丽思, 等. VVER-1000 主管道焊接工艺性分析[J]. 电焊机, 2021, 51(2): 83-87.
XU J W, MA S G, WANG L S. VVER-1000 Main Pipeline Welding Process Analysis[J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(2): 83-87.
- [2] 刘斌, 寇斌达, 卢夏, 等. VVER-1000 机组主管道焊接接头冲击性能影响因素分析[J]. 热力发电, 2021, 50(7): 130-136.
LIU B, KOU B D, LU X, et al. Analysis of Impact Performance Factors of VVER-1000 Unit Main Pipeline Welded Joints[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(7): 130-136.
- [3] 陈祝年, 焊接工程师手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [4] 中国机械工程学会. 焊接手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [5] 田锡唐, 焊接结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [6] 张文钺, 焊接冶金学(基本原理)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [7] 才福胜, SA387Gr11CL2 和 SA387Gr22CL2 珠光体耐热钢的焊接[J]. 石油化工设备, 2011, 40(6): 67-70.