



CPR1000核电核岛施工焊接质量控制

惠维山

【摘要】 本文主要介绍了CPR1000核电项目核岛施工主要焊接项目，总结了CPR1000核电焊接管理的特点和核电建造施工焊接质量控制的经验、方法和管理流程，以期对国内核电核岛施工的焊接质量控制提供借鉴，提高核电施工焊接质量水平。

关键词： 核岛；质量控制；焊接

1. 概述

由于核电在役运行具有高温、高压、放射、腐蚀以及系统不易检修等特点，所以对核电站建设特别是核岛安装过程中焊接产品质量的控制尤为重要。焊接过程在ISO9000：2008版标准中

被称为“需要确认的过程”。这一特殊过程需要在实施之前对焊接人员、焊接设备、焊接材料、焊接方法等预先确认，过程的实施和随后的检测和试验中要全面跟踪并都应留下可追溯的证实性材料；在HAF003中，也特别强

调了对焊接过程的工艺过程控制要求。焊接质量的优劣，直接影响核电工程的质量控制、进度控制及成本控制，关系到核电站优质、高效的建成和安全、经济地运行。

核电核岛施工的焊接质量控

表4 焊接接头和母材的拉伸力学性能

试样编号	规格/mm	抗拉强度/MPa	断裂部位
SP-108-C1	25.36 × 29.36	665	BM
SP-108-C2	25.19 × 29.52	670	BM
SP-108-C3	25.25 × 29.61	660	BM
SP-108-C4	25.26 × 29.24	660	BM

良好。

第三，弯曲试验压头尺寸为90mm，弯曲角度为180°。试验的8个试样均无裂纹，说明焊缝表面和根部的塑性良好。

第四，冲击试验在-20℃的条件下进行，在焊缝中心、熔合线、距熔合线2mm处和距熔合线5mm处共完成6组试验，冲击

吸收能量最小值大于170J，高于标准要求（最小值27J，平均值34J）。

5. 结语

通过在201船进行埋弧焊接试验及焊缝金属的各项性能试验结果的分析，可以得到以下结论。

（1）利用现场埋弧焊接试验，并对焊缝金属进行无损检

测及力学性能试验，结果表明焊缝表面、内部状况以及其拉伸性能、侧弯性能、硬度都满足工程使用要求。

（2）201船埋弧内焊机应用提高了辅线海管预制效率，降低了工人的劳动强度。

参考文献：

- [1] 杨昕.X80管线钢STT+药芯自保护焊接工艺研究[J]. 2008, 38（11）：7-8.

作者简介：杨晓飞等，海洋石油工程股份有限公司焊接实验室。

MW 20161130

制要求和实践经验方面较常规工业焊接质量控制有一定差异,本文主要对CPR1000核电核岛施工焊接质量控制的体系、方法、手段和流程做一介绍。

2. CPR1000核电核岛施工主要焊接项目

(1) 反应堆主回路和波动管的焊接 每台机组反应堆主回路有3个环路,每个环路有24个安装焊口,每台机组波动管有5个安装焊口。详细参数如表1所示。

(2) 压力容器顶盖控制棒驱动机构耐压壳和热电偶安装焊缝 每台机组有65个焊口。焊缝在顶盖上的分布如图1所示,接头形式如图2所示。

(3) 堆芯中子测量系统导向管安装 每台机组共有50根导向管,每根导向管有两个承压焊口,共计100个承压焊口,其中压力容器底部贯穿件与导向管材质分别为Inconel690和Z2CND1712。其接头形式如图3所示。

(4) 堆内构件螺栓锁紧装置焊接 其数量较多,结构简单,大部分为点固焊,但焊接质量要求高,要求熄弧部位不能处于焊缝边缘,对焊工技能要求高。典型焊接接头结构如图4所示。

(5) 辅助系统管道预制安装焊接 两台CPR1000核电机组辅助系统管道预制安装焊口约12万个。涉及碳钢、低合金钢、奥氏体不锈钢等类型材质。接头形式主要是对接接头和插套焊接头。

(6) 核岛储罐安装焊接 两

表 1

焊口描述	焊口编号	焊口规格/mm	母材材质	焊接位置
压力容器-主管道	C1	$\phi 873 \times 69$	Z2CND18.12N-Z3CN20.09M	5G1T
蒸发器-主管道50°弯头	C4	$\phi 976 \times 95.7$	Z2CND18.12N-Z3CN20.09M	6GT
主泵-主管道	F1	$\phi 832.5 \times 67$	Z3CN20.09M	5G1T
压力容器-主管道28°弯头	F4	$\phi 861.9 \times 81.7$	Z2CND18.12N-Z3CN20.09M	5G1T
蒸发器-主管道40°弯头	U1	$\phi 976 \times 95.7$	Z2CND18.12N-Z3CN20.09M	6GT
主管道-主管道40°弯头	U2	$\phi 939.4 \times 76$	Z3CN20.09M	2GT
主管道-主管道90°弯头	U4	$\phi 939.4 \times 76$	Z3CN20.09M	5G1T
主泵-主管道90°弯头	U6	$\phi 967.4 \times 90$	Z3CN20.09M	2GT
主管道热段-波动管段A	A	$\phi 355.6 \times 35.7$	Z2CND18.12N	5G1T
波动管段A-波动管段B	B	$\phi 355.6 \times 35.7$	Z2CND18.12N	5G1T
波动管段B-波动管段C	C	$\phi 355.6 \times 35.7$	Z2CND18.12N	5G1T
波动管段C-波动管段D	D	$\phi 355.6 \times 35.7$	Z2CND18.12N	5G1T
波动管段D-稳压器底部	E	$\phi 355.6 \times 35.7$	Z2CND18.12N	2GT

● 压力套管 61 个
 ◎ 热电偶法兰 4 个

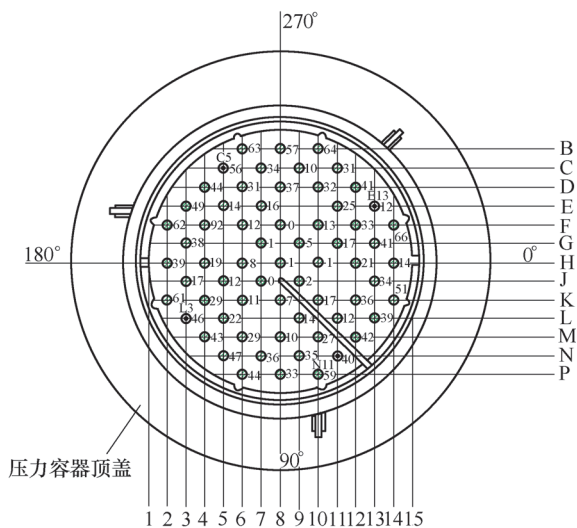


图1 CRDM及热电偶焊缝在压力容器顶盖上的分布

台机组共有大型储罐17台,焊缝长度约10 000m。涉及碳钢、低合金钢、奥氏体不锈钢等类型材质,有圆柱形储罐、方形储罐以及浮顶型储罐几种类型。其中PTR大罐为核安全2级不锈钢大

罐,其安装焊接要求最高。现场场地狭小,操作空间小,对焊工技能水平要求高。

(7) 辅助系统管道、通风管道、电缆桥架等设备的支承件安装焊接 两台机组约3000t涉及

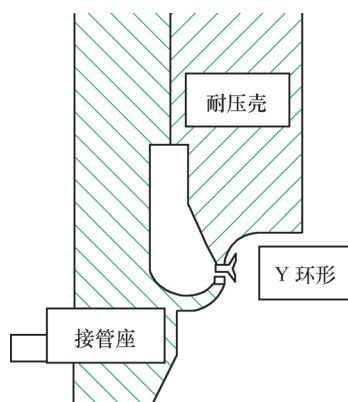


图2 焊缝接头形式

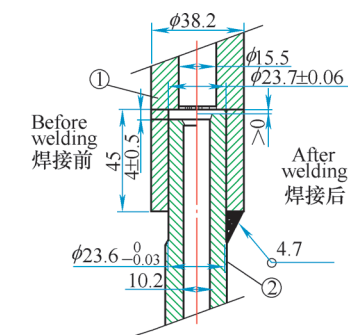


图3 导向管与压力容器底部封头贯穿件焊接接头形式

注: ①, ②为管道。

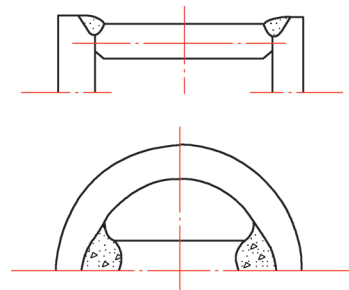


图4 典型锁紧焊接接头结构

材料主要为P265GH、P280GH等普通碳钢材料,对于核承压部件的支承件焊缝,如不能实施双面焊接时,焊接接头应开坡口全焊透。

(8) 反应堆安全壳钢衬里安装焊接 每台机组约使用P265GH钢材650t,焊缝长度约5800m。

(9) 不锈钢水池覆面安装焊接 包括换料水池、堆腔水

池、KX转运舱、装载井、集水坑及乏燃料水池,每台机组使用奥氏体不锈钢板约160t,约有焊缝1500m。其中乏燃料水池覆面焊缝焊后需进行射线检测,需射线检测的接头形式如图5所示。不进行射线检测的焊接接头形式如图6所示。

(10) 各类钢结构安装焊接 两台机组约2500t。主要是Q235、Q345等普通结构钢材。

3. 焊接管理体系的建立

核电站建设施工是一个复杂系统的工程项目,体现在焊接方面的特点是周期长、工程量大、质量要求高、质量级别分类多、涉及标准多,焊接部位分散于几乎所有3000多个房间,点多面广。因此施工过程中建立一整套焊接管理体系显得尤为重要。

具体焊接管理过程如下:

(1) 在焊接管理过程中实行全面的程序化管理 使所有焊接活动都纳入程序化管理之中,使参与焊接活动的每一个人都清

楚其工作目的、范围、内容、工作职责和质量要求,所有焊接活动有章可循,有法可依,有据可查;在常规工业中看似简单的工作,在核电施工中必须编制程序进行控制,如焊缝打磨、弧坑消除等。

重视焊接技术体系的建设和管理,必须明确技术管理是一切焊接活动的基础。焊接过程因其焊后不能通过无损检测的方式完全确认其质量,所以必须加强事前事中的控制,事前控制主要就是焊接技术管理工作,包括工艺评定项目拟定、工艺评定技术规程制定、各类检测项目及指标的规定、焊工考试项目拟定、焊接材料选用及验收等多个方面。据统计,两台CPR1000项目核电核岛施工需完成工艺评定约400余项,需考核的焊工资格项目约1200项。

(2) 计算机网络管理软件必不可少 核电核岛施工焊口数量多,数据繁杂,依靠手工统计各类数据需要投入大量人力,且难以做到准确,必须依靠计算机系统完成数据记录统计工作。目前开发的软件系统已能够实现焊接工艺、焊工资质项目和现场焊口的智能匹配、产品见证件制作预警、焊材库存预警及无损检测自动分批抽查等功能,使焊接工程的进度、焊材的管理、工艺评定、焊工资格、焊接质量状况、产品见证件等,得到实时的跟踪和监控。

(3) 焊接管理体系的建立必须满足精细化管理的要求 核电焊接不同于常规工程的质量管理要求就是精细化管理,具体地

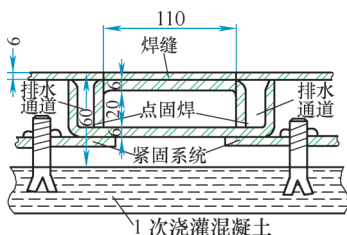


图5 乏燃料水池焊接接头形式

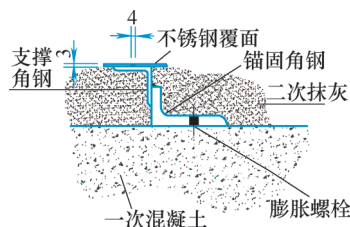


图6 不需进行射线检测的覆面焊接接头形式

说，对于核安全级别的焊缝，应细化到针对每一条焊缝、每一个焊口的过程控制，每一条焊缝、每一个焊口编制单独的过程质量控制文件。对于焊接材料，应对每一个品牌进行焊材评定，其中制造商应进行至少5批的试验，承包商应按照其焊接的产品的主要焊接因素进行评定，每一批焊材都必须复验，进行完整的性能试验。焊接管理体系至少包括图7中的内容。

4. 焊接技术文件管理

焊接技术文件管理应符合质量保证大纲的文件管理要求，针对焊接专业的特点，核岛施工一般编制的焊接文件的类别主要有以下几类。

(1) 管理程序 主要是描述参与焊接活动的各部门和/或个人的工作范围及其职责。

(2) 工作程序 主要描述的是某一焊接活动的实施方法。包括工艺评定技术规程、焊材验收技术规程、产品见证件制作技术规程、产品焊接工艺规程（焊接数据包）。

第一，焊接工艺规程（焊接数据包）。汇集了现场某一设备或某一类焊缝焊接操作所需要的基本信息，依据工艺评定报告有关参数条件制定，是指导焊工从事产品焊接的依据。对于核级承

压设备，焊接工艺规程（焊接数据包）中应规定产品见证件的制作类型和数量。

第二，各类技术规程（包括焊材的验收、焊接工艺评定、产品见证件）。是所有焊接活动的基础，在焊接初始阶段，技术规程作为作业指示书，在最终阶段作为报告。

第三，质量跟踪文件。在焊接质量控制过程中主要使用两类文件，一是质量计划，二是焊接控制单。

质量计划在初始阶段是按照相关活动发生的先后顺序列出所有的操作步骤；在跟踪阶段随着上述各项操作的实施，由操作者来完成质量跟踪文件的执行，包括填写所使用的规程、程序、标准及它们相应的版本，以及由于各项检测和试验所得到的报告的编号；在最终阶段，完成的质量跟踪文件成为制造完工报告的一部分。焊接控制单是针对核安全级承压设备每一条焊缝、每一个焊口编制的质量计划，其信息量较质量计划更多，工序更为细化。

第四，采购技术规范。采购技术规范主要是描述对要采购的物项的技术要求。焊接所需要的消耗性材料如焊接材料、保护气体、打磨用砂轮片及标记用的

记号笔等都需要编制采购技术规范。

5. 焊接填充材料管理

(1) 焊材的选用 核电核岛施工涉及设备数量，母材类别、焊缝核安全级别等较多，涉及的焊材类别也就相应多，一般情况下焊材类别有以下两种选择方案。

一是尽量减少焊接材料的类别和规格，以降低管理难度和误用风险。通常在符合标准要求的前提下，以高质量等级焊材代替低质量等级焊材，以较高强度级别替代较低强度级别，尽量统一焊条、焊丝的规格，如在CPR1000核电施工中，针对管道焊缝分布较广，材质较多的特点，将316L和304L两类不锈钢母材的焊条和焊丝统一为E316L和ER316L，将现场低碳钢和低合金钢的焊条和焊丝统一为E7018（其技术条件不同于AWS A5.5），对于非核安全级承压设备、各类支承件和储罐统一为核安全级设备焊材。此方案优点是焊材类别少，可以采购较大批量，复验批次相应减少，焊材管理方便，误用风险低；缺点是核安全级焊材的成本较非核安全级焊材高。

二是按设备核安全级别、材料类别分别选用相对应的适宜的焊材类型。这种焊材选用方案在设备支承件、储罐中可以使用RCCM标准H篇焊材，非核安全级的设备及其支承件上可以使用符合设计要求的常规工业标准焊材。此方案可以降低焊接材料采购成本，但由于焊接材料分类复杂，现场各类设备混杂，在焊材

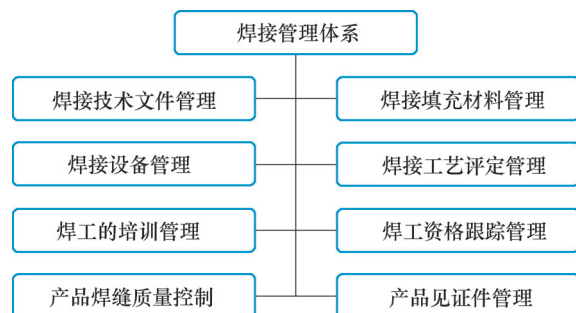


图7 焊接管理体系



管理、焊接计划安排方面存在较多困难。

(2) 焊材技术要求和常规工业标准技术要求的差异 核安全级设备使用的焊材技术要求相比于常规工业标准主要有以下几点:

第一, 需要进行焊材评定, 焊材评定有两部分内容: 一是焊材供应商所进行的未被稀释的熔敷金属的试验以及焊接参数、焊接位置、层间温度等主要因素的范围试验; 二是使用方所进行的标准试件的试验, 标准试件的试验可以在工艺评定试件上进行, 其参数的覆盖范围和工艺评定要求一致, 但必须保证各个位置能够进行一整套完整的试验。

第二, 焊材熔敷金属中S、P等杂质的含量要求值更低, 保证和安全级设备所使用的焊接材料是优质材料, 进一步降低焊接缺陷发生的概率, 降低熔敷金属中Cu元素的含量, 以提高焊缝抗辐照脆化能力, 提高产品的使用寿命。

第三, 对Co等辐照条件下易活化且半衰期长的元素含量要求值更低, 避免在辐照环境下这些元素发生活化具有放射性。

第四, 需进行350°高温拉伸试验, 此要求除考虑正常运行条件外还需考虑事故工况下的高温运行条件。

第五, 如设备有热处理要求, 验收时则需进行热处理态的性能试验。

6. 焊接工艺评定管理

核电核岛施工焊接工艺评定流程和常规工业焊接工艺评定流程相似, 所不同的是核电每项

工艺评定的过程必须编制质量计划, 按步骤实施, 过程工序应接受质量检查人员、监理和业主的检查。CPR1000核电施工的焊接工艺评定文件称为“焊接工艺评定的技术规程”或“焊接工艺指导书”, 在这份评定报告中有以下内容: ①焊接材料(母材与填充材料)材质合格证。材质合格证应包括以下内容: 材料名称、型号、批号、力学性能、化学成分、填充材料还应注明有效期。核安全级设备的工艺评定母材必须是按RCCM要求生产的材料。②每层每道焊缝焊接参数记录。③焊接电流、焊接方法。④焊接因素的有效性覆盖范围。⑤母材、填充材料、保护气体、用材形状与尺寸、焊接接头型式、焊接位置和焊接方向、焊接工艺和参数。⑥和设备要求一致的无损检测报告, 通常有目视检测、液体渗透检测(磁粉检测)、射线检测(超声波检测)。⑦破坏性试验报告, 通常包括横向拉伸、纵向常温拉伸、纵向高温拉伸、弯曲、冲击、硬度、宏观和微观金相、化学分析等试验。

在实施过程中, 通常将焊接工艺评定技术规程和焊接工艺评定报告融合为一份文件, 这份文件在初始阶段最为指导书, 在工艺评定后续过程中作为工艺评定报告, 更进一步简化了文件的类型和数量。

7. 过程质量控制

(1) 过程质量跟踪文件的使用 施工过程的工序质量控制主要是通过质量跟踪文件的使用来实现的。

基本使用的要求如下:

使用质量跟踪文件在于验证核岛的施工过程中影响质量的各项活动与程序、规范、图样等技术文件的一致性, 以确保工程质量所必须的每一项重要的作业步骤都得到检查, 实现了对工艺过程的控制。

质量跟踪文件中注明施工依据的技术文件号或施工图号, 施工作业的操作步骤及负责执行操作的组织, 应进行的检查和试验操作步骤, 每项操作适用的技术文件号, 内、外部组织的通知放行点以及要发布的报告等。

质量跟踪文件的使用, 通过在质量跟踪文件中记录操作者、检查者姓名和日期, 且作为竣工文件永久保存。达到强调和提高施工人员、检查人员的工作责任心的目的。

控制点的管理, 通过关键控制点的多级控制, 设置多重屏障, 避免质量问题带入下一工序。CPR1000核电核岛施工过程质量控制为3级QC(质量检查)模式, 其中承包商2级QC, 总承包商1级QC。

(2) 产品焊缝的过程质量控制 对于重要焊接项目, 焊接技术人员按技术要求给焊工交底, QC人员负责监督施焊工艺是否正确, 以及焊工资格的有效性。焊后操作者自检, 发现缺陷及时消除, QC1人员对焊缝作100%的外观检查, 并将检查结果记在“日记录单”内, 焊工班长按要求填写好“焊工日报”。

质量管理主要采用“焊接控制单”或“焊接记录单”的形式进行控制。焊接控制单或焊接记录单提供了焊缝的详细信息, 主

要内容包括适用的质量计划号、等轴图号、焊缝号、管道材质与规格以及可供选择的焊接工艺、施工操作顺序、焊接检查和射线检测的信息等；要求必须填写的焊工代号、焊工资格号、实际焊接位置及焊材批号；确定了管道安装焊接期间按时间顺序执行的一系列施工操作和检查操作，它对每项操作明确了负责的人员、适用的工作程序、要发布的QA记录以及要见证的通知点。

管工、焊工及检查员按确定的顺序一步步地实施操作。每完成一步操作时，负责操作的管工班长、焊工班长和检查员注明日期并签字，确认该操作已按指明的“适用文件”实施完毕。

对于焊接控制单上指明的“H”点（停工点）或“W”点（见证点），承包商必须提前相关见证方。

当施工现场焊接工作按照施工程序规定的步骤完成后，对完成的焊缝进行质量检测；相比于常规工业，核电产品的无损检测比例要求高，检测的方法要求多，某些设备还需在焊前对坡口进行检测，焊接过程中进行层间检测，如所有核安全3级管道对接焊缝除进行20%比例的射线检测外，还需进行100%的液体渗透或磁粉检测；母材厚度大于10mm时需进行坡口的液体渗透检测。这些要求大大增加现场无损检测的工作量，两台CPR1000核电机组核岛施工最终射线检测底片数量约10万余张。

（3）焊接过程监督检查 焊接过程监督是过程控制的重点。三级QC人员、QA人员既有焊接

控制单或焊接记录单，针对某焊缝的见证监督，也有定期和不定期的巡回监督。发现问题后，以质量问题通知单、观察意见通知、不符合项报告、纠正措施报告及停工通知等书面形式来处理；监督的项目可分为执行程序 and 工程实体两类，涉及焊接工艺及施焊结果的各个方面，如焊接控制单的使用、工作程序版本、焊接参数、焊条保温筒温度、焊机地线夹位置、焊工资格、施焊环境、焊接填充材料、焊缝外观尺寸及管线上的弧伤等。

定期对过程监督发现的质量缺陷进行统计分析，评价监督的有效性 & 现场质量趋势，以确定进一步的监督重点和频率。分析结果若显示某方面质量缺陷有较高的重复性，则质保部门就正式地要求有关部门，采取纠正行动直至停工整改。

8. 产品见证件管理

核承压设备在施焊期间，需要制作产品见证件，对于非管道类设备焊缝，每台设备每种工艺需制作一个见证件。对于管道焊缝，其见证件制作数量和时机与管道焊口数量或焊口长度有关，对于使用每个工艺评定所焊接的焊口，通过计算机软件统计其数量和焊缝长度，达到产品见证件制作时机时预警提醒。从制造开始起，对于每一对接焊缝焊接工艺评定每年至少焊接一个、至多焊接两个产品见证件，直到现场不再使用该工艺评定为止。产品见证件的试件、焊材、焊工、焊接参数及设备等均与现场实施条件一致，制作产品见证件的目的是为验证核级设备焊缝的现场焊

接质量。

产品见证件制作时需编制产品见证件技术规程/报告、产品见证件质量计划。焊接过程中以质量计划进行质量控制，焊接完成后需进行无损检测和破坏性试验，破坏性试验的项目和要求和工艺评定一致。产品见证件一般要求从开始焊接之日起两个月内完成，形成产品见证件报告。

9. 焊接完工报告

焊接完工报告分为两部分，一部分是通用类文件记录，将这类记录编制一个通用文件包，包括焊接工艺评定清单、焊接工艺评定质量跟踪文件、焊工资格评定清单、焊接填充材料清单、焊接填充材料验收试验质量跟踪文件及报告、产品见证件清单、产品见证件质量跟踪文件及报告。另一部分为和系统相关的文件记录，这部分记录归纳至系统竣工文件中，包括焊接控制单、质量计划、热处理记录、无损检测报告等。

10. 结语

总之，在核电施工焊接质量控制过程中，我们应始终秉承核安全高于一切的理念，始终认识到焊接工作也是核安全，参与者都需要敬畏核安全，守护核安全。焊接工作必须按照“四个凡是”的要求坚持蓝色透明文化，实施精细化管理，确保这一“特殊过程”始终处于受控状态，确保质量控制体系覆盖至每一条焊缝，保证设备安全运行。

作者简介：惠维山，中广核工程有限公司。

MW 20161130