



关于提高核岛主设备稳压器电加热器元件焊接合格率

徐佳

【摘要】 稳压器是核电厂的主要设备之一，其主要作用是将一回路的压力维持在整定值上，为核电站在特殊工况下提供超压保护，对核安全有着重要的意义。电加热器元件作为稳压器设备的组成部分，其焊接质量对稳压器设备至关重要，本文主要针对如何提高电加热器元件一次焊接合格率进行了介绍。

关键词： 稳压器；电加热器元件；熔化环

1. 概述

压水堆核电站一回路系统为一个封闭回路，当系统中的冷却剂产生温度变化致使容积波动时，将引起系统压力产生相应的变化，如果系统压力超过设计压力，将导致系统和设备破坏。如果压力下降太低，又会造成堆芯局部沸腾或体积沸腾，引起堆芯烧毁，从而引发严重的安全问题。

因此，为了压水堆核电站安全可靠地运行，必须对反应堆一回路系统的压力进行控制和保护。当一回路系统压力出现负波动时，通过稳压器内冷却剂的闪蒸和电加热器元件的自动接通加热产生的蒸汽，使反应堆冷却剂系统的压力维持在反应堆紧急停堆的低压整定值以上。因此稳压器是压力安全系统的主要设备，是一回路系统压力边界重要组成部分。

2. 稳压器电加热器元件

CPR1000压水堆核电站稳压器中设置了63根电加热器元件，电加热器元件采用直接浸入式结构、垂直布置。电加热器元件由顶部端塞、外包壳、填充物、电热丝、电缆、连接件等组成（见图1和图2）。

3. 电加热器元件与套管焊接结构特点

为保证核电厂在运行期间更换故障电加热器元件，电加热器

元件采用与下封头上的电加热器套管焊接连接结构，每条焊缝都属于反应堆冷却剂系统压力边界，其焊接结构由电加热器元件（连接件）+熔化环（焊接材料）+电加热器套管组成（见图3），属于不开坡口的小直径管对接接头。管子外径32.5mm，壁厚3.25mm，填充金属是套管与连接件之间预置尺寸为外径32.5mm×内径26mm×0.5mm的熔化环。

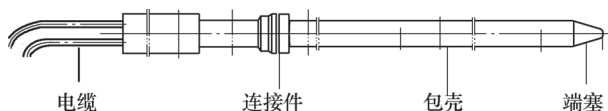


图1 电加热器元件结构

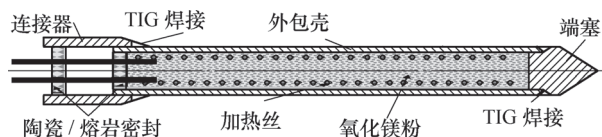


图2 电加热器元件解剖示意

4. 电加热器元件与套管焊接失败案例及原因分析

岭澳二期三号机组稳压器在电加热器元件与连接件焊接完成后,探伤发现18根电加热器元件与套管焊缝存在缺陷,焊接合格率只有71.4%(共63条焊缝)。焊缝缺陷种类包括未焊透、未熔合、成形不良、焊缝氧化及组合缺陷,其中未焊透缺陷占到所有缺陷焊缝的72%,焊缝缺陷种类分布如图4所示。

上述电加热器元件与套管缺

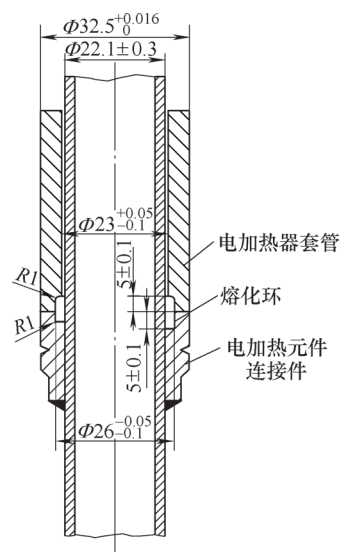


图3 电加热元件焊接接头形式

焊缝缺陷种类分布情况
■未焊透 ■未熔合 ■成形不良 ■焊缝氧化 ■组合缺陷

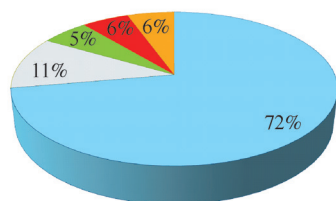


图4 焊缝缺陷种类分布

陷焊缝最终确定割开,更换电加热器元件后再次进行焊接,本次更换电加热器元件造成如下影响:①增加制造周期。18根电加热器元件更换周期约1个月。②提高产品制造成本。18根电加热器元件、熔化环及增补的焊接间接成本约100万人民币。③减少稳压器核电厂在役期间的电加热器元件的更换次数。

5. 电加热器元件与套管焊接技术分析

经分析,稳压器电加热元件与套管焊接结构主要技术难点如下:①该焊缝为全焊透的结构设计,需满足RCC-M规范I级焊缝要求,焊后要求100%RT检测合格。②为保证焊缝成形质量,需保证电加热元件、套管、熔化环三者的精确对中。③全焊透的同时要求严格控制焊缝成形。④此焊缝需要在横焊位置进行焊接,操作空间狭小,焊接难度大。⑤受产品结构限制无法从背面充气进行背面保护,一旦出现缺陷将无法进行返修,只能更换新的电加热元件进行焊接,因此必须力争一次性焊接合格。

6. 电加热器元件与套管焊接试验

首先对岭澳二期三号机组稳压器电加热器元件与套管焊缝各类缺陷,从设备、人员、工艺、

环境几个方面进行排查,并对排查后“枝干”潜在因素进行逐一筛查以确定主因,如图5所示。

经分析,导致岭澳二期三号机组稳压器电加热器元件与套管焊缝缺陷的主因如下:①工艺措施不完善,工艺稳定性差。②焊接操作工技能差,责任心不强。③焊接过程中钨极清洁、更换不及时。④待焊坡口及焊接操作场地清洁度不符合标准要求。

通过上述原因分析制定如下措施:①设立《电加热器元件与套管自动钨极惰性气体保护焊接》专项课题,结合自动钨极惰性气体保护焊焊接过程稳定,焊缝成形美观,易于实现单面焊双面成形等特点,确定施焊技术方案。②订购专用焊接设备,焊接机头实现精确装夹定位。③为确保焊接保护气体进入焊缝背面起到良好保护作用,对填充金属熔化环进行结构改造,以获得良好的背面成形。④设计了专用工装用于电加热元件套管、连接件、熔化环装配定位,保证装配精度,如图6所示。

7. 电加热器元件与套管焊接保证措施及落实

为确保电加热器元件与套管焊接试验专项成果在实际应用中落实到位,特组织成立了焊接专项监查组,根据焊缝缺陷主因制

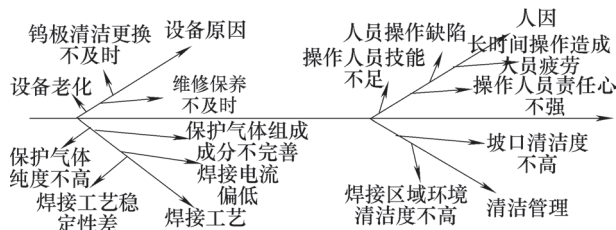


图5 焊缝缺陷分析鱼刺图

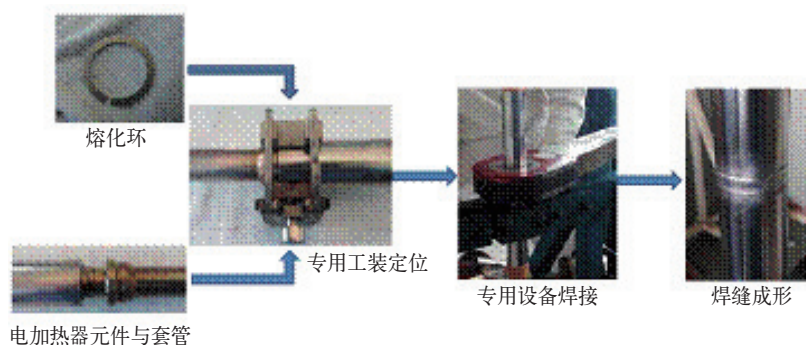


图6 电加热器元件与套管焊接试验流程

定监查对策，附表所示。

(1) 主因要素1保证措施落实情况 第一，电加热器套管开孔加工精度控制：经过充分的工艺试验，制定了详细的套管孔加工工艺要求及工艺措施。

加工工艺要求：加工定位孔→钻孔→扩孔钻扩孔→镗孔→精镗孔。

工艺措施：每个套管孔在每个加工过程均要进行自检，按工艺要求及时更换刀片，控制精镗孔加工参数，如图7所示。

第二，电加热器套管焊接变形控制：电加热元件套管为 $\phi 28.6 \times 2.8\text{mm}$ 的不锈钢管，且与下封头堆焊层焊接坡口形状不规则，焊接过程中控制不当极易引起变形或焊穿。若套管发生变形将影响后续电加热元件的装配精度，从而影响电加热元件与套管的焊接质量。

对策实施：①中心线两侧对称焊接防止变形，如图8所示。

②采用水循环冷却，防止接管温度过高引起变形，如图9所示。

③严格控制道间温度，确保产品在较低温度进行焊接，以有利于控制焊接变形。

第三，焊前要求操作人员依据《工序风险质量控制计划》逐项检查并复核，其中包括：①套管焊后尺寸检查报告。②材料出库单等。③待焊区域清洁度。④待焊电加热器元件状态及验收报告。

(2) 主因要素2保证措施落实情况 焊前对焊接操作人员进行专项培训，包括理论培训和实际操作练习。培训结束后进行理论考试和操作考试，考试合格后颁发上岗证。

(3) 主因要素3保证措施落实情况 划定电加热器元件焊接

专用区域，并设定清洁度要求标准，对焊接环境及操作人员均提出具体要求，如图10所示。

(4) 主因要素4保证措施落实情况 制定电加热器元件焊接专项规程，要求焊接用钨极端部应保持磨好的锥形，且在每次焊接前对钨极进行检查，如观察钨极端部的形状和颜色发黑、局部变细或有瘤状物变化，应立即进行更换。

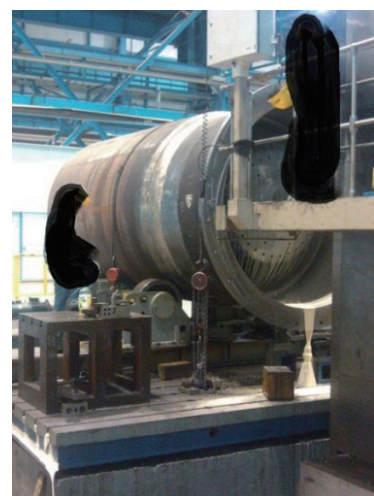


图7 电加热器套管孔加工

焊缝缺陷主因监查对策及保证措施

序号	对策	具体保证措施
主因1	1.建立风险点控制机制 2.通过工艺试验，优化工艺参数	1.电加热器套管开孔加工精度控制 2.电加热器套管焊接变形控制 3.焊前要求操作人员对风险控制项逐项检查并复核
主因2	1.制定焊接操作人员培训与考核机制	焊前对焊接操作人员进行专项培训，包括理论培训和实际操作练习，培训结束后进行理论考试和操作考试，考试合格后颁发上岗证，准许进行产品焊接
主因3	1.制定清洁度规程	1.划定电加热器元件焊接专用区域，并设定清洁度要求标准
主因4	1.焊接专用规程中制定明确要求	1.确定钨极使用要求 2.焊前加强操作人员培训

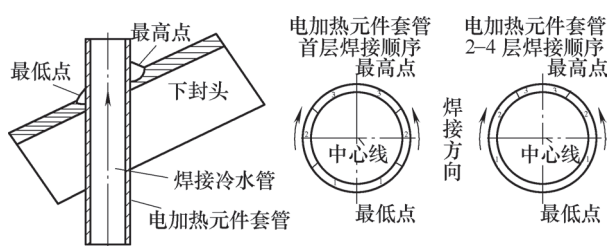


图8 电加热器套管与下封头对称焊接



图9 电加热器套管与下封头焊接冷却装置



图10 焊接场地及操作人员

8. 结语

经过上述保证措施的落实，供应商承制的阳江3[#]、4[#]、宁德

3[#]、4[#]机组四台稳压器电加热器元件共252条焊缝探伤均一次合格，合格率100%。

通过以上对电加热器元件焊接质量的控制，不仅为后续核电项目主设备稳压器电加热器元件焊接提供了良好经验，而且能够在技术上消除电加热器元件焊接的重大质量风险，保证了焊缝质量一次合格率，实现了以质量促进度、以安全增效益的目标。

作者简介：徐佳，华龙国际核电技术有限公司。

MW 20170719

(上接第71页)

失效部件化学成分（质量分数） (%)

待测元素	Al	Mo	V	Cr	Fe
标准含量	2.5~3.5	4.7~5.7	4.7~5.7	7.5~8.5	0.30
实测含量	2.58	4.84	4.97	8.29	0.094
待测元素	C	N	H	O	—
标准含量	0.05	0.04	0.015	0.15	—
实测含量	0.0096	0.037	0.011	0.12	—

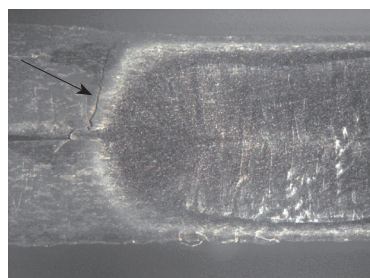


图8 3[#]焊点截面上裂纹

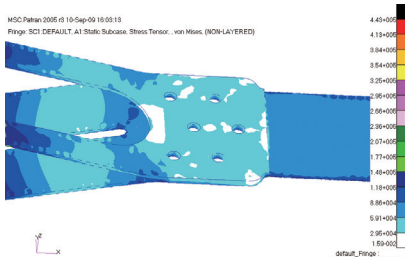


图9 部件力学模拟截图

次用于力学试验的情况综合分析，可见焊点边缘热影响区相对

薄弱，而1[#]、3[#]点焊点附近受力相对集中。在以往多次力学试验

过程中，该部位所承受的试验载荷均较大，在点焊点外缘形成较大应力集中，且多次试验形成循环载荷，从而形成损伤累积，直至发生疲劳断裂失效。

4. 结语

(1) TB2钛合金部件的断裂性质为疲劳断裂，断裂起源于点焊点外缘处的内面一侧。

(2) 多次力学试验在相对薄弱的点焊点边缘处造成的累积损伤是导致疲劳断裂的直接原因。

作者简介：李晶等，中国空间技术研究院北京卫星制造厂。

MW 20170719