

# 在役检查方法对 INCONEL-600 镍基合金焊缝 应力腐蚀裂纹的检出能力分析

夏炜铭<sup>1</sup>, 何子昂<sup>2</sup>, 许峰<sup>1</sup>, 孙军<sup>1</sup>

1. 中核核电运行管理有限公司, 浙江海盐, 314300; 2. 中国核动力研究设计院, 成都, 610213

**摘要:** 以秦山核电厂 300 MW 级核发电机组一回路主系统 INCONEL-600 镍基合金材料焊缝为研究对象, 分析秦山核电厂现用在役检查检验方法和检验频度在 INCONEL-600 合金材料焊缝应力腐蚀裂纹检出能力方面的不足, 提出针对一回路主系统 INCONEL-600 镍基合金材料焊缝检验的应对措施。

**关键词:** INCONEL-600 镍基合金; 焊缝; 在役检查; 应力腐蚀裂纹

**中图分类号:** TB37 **文献标志码:** A

## Analysis of In-Service Inspection Capability for SCC Cracks of INCONEL-600 Nickel-Base Alloy Welds

Xia Weiming<sup>1</sup>, He Ziang<sup>2</sup>, Xu Feng<sup>1</sup>, Sun Jun<sup>1</sup>

1. CNNP Nuclear Power Operations Management Co. Ltd., Haiyan, Zhejiang, 314300, China

2. Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

**Abstract:** Taking the weld inspection of Inconel-600 Ni-based alloy weld in Qingshan 300 MW NPP as an example, the disadvantages of current in-service inspection method and inspection frequency in the inspection of the SCC cracks of INCONEL-600 alloy welds are analyzed, and the corresponding solutions to Inconel-600 Ni-based alloy weld inspection are presented.

**Key words:** INCONEL-600 alloy, Weld, ISI Inspection, SCC

### 0 前言

INCONEL-600 镍基合金材料(简称 600 合金材料)是一种镍-铬-铁基固溶强化合金,具有非常强的抗氯化物应力裂变腐蚀能力,以及具有良好的耐高温腐蚀性和抗氧化性,在 20 世纪 60、70 年代被广泛用于核电厂一回路主系统的异种金属焊接和反应堆压力容器、稳压器的贯穿件中。但随着国际上 600 合金材料焊缝应力腐蚀裂纹(SCC)事件的多次发生,世界各国对此进行了大量研究,发现 600 合金材料焊缝本身具有一定的 SCC 敏感性,特别是在弱酸性的一回路水环境作用下易产生一回路水应力腐蚀裂纹(PWSCC)。为此,MRP-139 导则对 600 合金材料焊缝的检验方法、检验要求、缺陷判定及跟踪、堆焊修复设计进行了强制性规定,以降低使用 600 合金材料的在役核电厂的运行风险。

秦山核电厂 300 MW 级核发电机组是我国 20 世纪 80 年代初参照美国《锅炉及压力容器规范》(简称 ASME 规范)进行设计、建造和运行的核发电机组,一回路主系统主设备及接管焊缝等的设计均采用了当时国际上通用的 600 合金材料。因此,采取合适的在役检查方法、技术和在役检查频度,对这些一回路主系统内 600 合金材料焊缝运行后所产生的 SCC 的检出有着重大影响,对机组的安全运行有着重要意义。

### 1 600 合金材料焊缝腐蚀开裂风险分析

根据国外经验反馈,600 合金材料具有晶间应力腐蚀(IGSCC)敏感性,在一回路恶劣的运行工况下会产生 PWSCC。600 合金材料在一回路主冷却剂环境下产生应力腐蚀主要受镍含量影响,其产生的 PWSCC 的生长速度又受温度等环

境因素的影响。

### 1.1 镍含量影响

600 合金的应力腐蚀属于 IGSCC 类型,对晶间应力腐蚀敏感,对穿晶应力腐蚀不敏感。秦山核电站 300 MW 级核电机组所采用 600 合金材料其镍含量均在 72%左右,具有较高的晶间应力腐蚀倾向。

### 1.2 温度影响

对裂纹生长速度的研究发现,裂纹的生长速度与温度有关。当温度为 343 时,其 SCC 的生长速度是 290 下的 13 倍。秦山 300 MW 机组一回路主系统稳压器的设计温度为 370、工作温度为 343,其余主设备的设计温度均为 350,工作温度为 315~288。故 600 合金材料一旦产生 SCC 可能会导致部分裂纹生长速度较快。

### 1.3 环境影响

根据反应堆各种运行工况的需要,需向主冷剂中加入适量的硼、LiOH 等物质对一回路主系统进行反应性调节。此外,反应堆在运行过程中会产生一定量的 O、H 原子等,在这些物质的共同作用下,能够进一步促进 SCC 的生长速度。

### 1.4 其他

设备与接管焊接(异种金属焊接)过程中,不可避免的会存在一定的焊接残余应力,一回路主设备在高温、高压作用下运行,随运行工况的变化会受到一定的冷热冲击,从而产生热应力。

## 2 在役检查检验方法对 PWSCC 缺陷检出能力的分析

### 2.1 检验方法分析

ASEM IWA-2200 规定,核电站在役期间采用 3 类检测方法:目视检测、表面检测和体积检测。本文对 ASEM 规定的检验方法进行分析和比较。

2.1.1 目视检验(VT) 目视检验是对裸露材料表面实施的一种直接或间接的、通过观察和判断进行的检验,根据受检表面不同,可划分为外表面目视检验和内表面目视检验。对焊缝外表面进行检验时,主要检验外表面产生的缺陷和焊缝中存在的贯穿性缺陷。对一回路主系统的外表面实施检验时,可根据观察焊缝表面是否存在有硼结晶来判断是否有贯穿性缺陷;对设备、管道等内表面实施检验时,由于不可接近检验区域,主

要通过已标定的视频检查系统进行观察,以判定焊缝或母材上是否存在缺陷或开裂。

根据 PWSCC 裂纹的产生机理,其裂纹主要产生于焊缝内表面。当采用内表面视频检验时,约可检测出裂纹宽度大于 0.8 mm 的裂纹(0.8 mm 为 ASEM 规范规定的视频检验系统的标定灵敏度),无法检出紧密贴合的初始裂纹;采用外表面目视检验时,只能在此类裂纹贯穿后方可检出。

2.1.2 表面检验 在役检查采用的表面检验方法主要有液体渗透检验(PT)、涡流检验(ET)、磁粉检验(MT)。由于 MT 只能用于铁磁性材料表面及近表面检验,ET 主要用于蒸汽发生器传热管和部分螺栓的检查,因此适用于奥氏体不锈钢焊缝和异种金属焊缝的表面检验方法仅有 PT。PT 是针对贯穿性缺陷和表面开口缺陷采取的一种检验。该检测方法只能用于可接近的表面和无其他介质覆盖的表面,该检测不能发现表面以下未开口裂纹,在役检查期间核电站一回路设备及管道的内表面一般无法直接接触,仅当 PWSCC 裂纹从内表面扩展至外表面时,液体渗透检查才能发现。

2.1.3 体积检验 体积检验主要用以检测设备或管道焊缝内存在的内部不连续性缺陷;体积检验方法包括了射线检验(RT)、超声波检验(UT)和涡流检验。由于涡流检验主要用于薄壁的非铁磁性材料,故在实际运用中一般不用于设备及管道焊缝的体积检验。

(1) 射线检验:射线检验主要用于检测具有体积型特征的缺陷。对于裂纹类面状缺陷的检出主要取决于裂纹自身特性以及射线透照的方向和角度。当裂纹本身具有一定的宽度和足够的高度时容易在射线底片上产生黑度差,容易被检出;当裂纹产生初期本身结合比较紧密且较小时,由于在射线底片上影像比较细小且黑度差值小,故往往会漏判而造成漏检现象。另外,射线检验时采用的透照角度与裂纹的检出也有重要关系。当所采用的透照方向与裂纹开裂方向一致时最易被检出,当透照方向垂直于裂纹或倾斜时容易造成漏检。由于 PWSCC 具有裂纹开口小、沿晶界腐蚀开裂(具有开裂方向不定性)等特点,采用射线检验方法对 PWSCC 裂纹进行检查容易造成漏检,特别是 PWSCC 裂纹生长初期很难被射线检验检出。

(2) 超声波检验:超声波检验主要检测平面

型缺陷,其对裂纹类缺陷的检出受裂纹尺寸、检测工艺、材料微观组织、被检部件几何特征等因素影响,同时从内壁进行检验和从外壁进行检验的检测结果也存在差异。由于超声波检验存在有诸多的不确定性,且在20世纪80年代初美国多个核电厂出现很多经超声波检验通过但不久后发生管道泄漏的问题,故美国机械工程学会自1985年在ASME 附录8中开始提出对超声检测系统进行性能验证,以保证缺陷能有效地被检出和对缺陷进行精确地定位和定量。

对于600合金材料焊缝,由于其材料组织的特殊性和超声波检验技术对裂纹类缺陷检出的不确定性,ASME 1989版第 卷附录8中明确规定了对异种金属焊缝超声检测需进行性能验证,经验证通过后所采用的超声波检验才被认为是有效的。通过ASME规范附录8规定的性能验证后,所采用的超声波检验技术一般可检出高度大于等于3mm的内表面裂纹;如采用尖端衍射法(TOFD)或其他先进工艺如相控阵技术时其检出率将有所提高。由于PWSCC初生裂纹其高度值很小且裂纹数量较多,往往会被本底噪声所淹没而无法检出,但随裂纹的生长在制定合理的检查计划后,超声波检验方法可适用于PWSCC裂纹中后期的检查和跟踪。超声波检验对裂纹类面积型缺陷的检出较敏感,故采用超声波检验比采用射线检验更易检出PWSCC裂纹。

## 2.2 PWSCC 裂纹检出率比较

各类在役检验方法对600合金焊缝PWSCC裂纹具有不同的检出和跟踪能力(表1)。从表1可以看出,对于PWSCC裂纹的检出,较有效的检验方法为内表面目视检查加超声波检查;对于PWSCC裂纹生长过程中的跟踪检查,较有效的方法为超声波检验方法。

## 3 秦山核电厂300MW级核电厂中600合金材料的运用现状

### 3.1 在一回路主系统中的分布

秦山核电厂300MW级核电厂是参考美国ASME 1983版规范进行设计和建造的,在一回路主系统的主设备及异种金属焊缝中均采用了600合金材料(表2)。

### 3.2 采用的检验方法及检验频率

依据ASME规范第XI要求,秦山核电厂

表1 各在役检验方法检出和跟踪PWSCC裂纹的能力  
Table 1 Capabilities of Various In-Service Inspection Methods in Detecting and Tracking PWSCC Cracks

检验方法		PWSCC裂纹生长期					
		初期		中期		末期	
		检查	跟踪	检查	跟踪	检查	跟踪
目视 检验	外表面	●	●	●	●	○	●
	内表面	●	●	○	●	○	●
液体渗透检验 (外表面)		●	●	●	●	○	●
超声波检验				○	○	○	○
射线 检验	内部 曝光	●	●		●	○	●
	外部 曝光	●	●		●	○	●

注: —不可检出或不可跟踪; —可检出或可跟踪; —可检出率低(取决于检查技术)

300MW级核电厂一回路主系统600合金材料焊缝属于在役检验监督内容,所使用的600合金材料焊缝检查方法、检查频率均采用ASME卷IWB-2500和IWB-240规定的检验方法和检验频率,其具体规定见表2。

## 4 秦山核电厂300MW级核电厂中600合金材料焊缝PWSCC检出能力分析

ASEM规定了对容器接管-安全端异种金属焊缝必须进行100%检查,检查周期是每10年检查一次。由于600合金材料焊缝的本质都是低合金钢或碳钢管道与不锈钢管道连接的异种金属焊缝,因此,600合金材料对接焊缝应根据管道名义尺寸的大小,根据ASME卷IWB-2500的检查要求进行目视、表面或体积检查。根据ASEM检查方法的规定,在役检查所采用的检查方式有:

(1) 目视检查(VT): 用于无法接近或无成熟检验手段的焊缝检查。主要有反应堆压力容器、中子注量率测量管套管与底封头连接焊缝和稳压器下封头与电加热器套管座连接焊缝。

(2) 超声波检验与液体渗透检验相结合的检查方式。采用此类检验的异种金属焊缝有反应堆压力容器进、出口接管安全端焊缝。

(3) 射线检验与液体渗透检验相结合的检查方式,是秦山核电厂300MW级核电厂针对异种金属焊缝普遍采用的检验方式。

### 4.1 主要设备检出能力分析

#### 4.1.1 反应堆压力容器 反应堆压力容器采用

表2 600合金材料焊缝分布、检验方法与频度  
Table 2 Welds Distribution, Inspection Methods and Frequency for 600 Alloy Material

设备名称	焊缝(位置)	数量(条)	现用检验方法	现检验频度	评价结果	拟用检验方法	调整后频度
反应堆压力容器	接管与安全端对接焊缝	4	UT+PT	1次/10 a	不完全满足	UT+PT+VT	1次/10 a
	通量测量管套管与底封头连接焊缝	30	内部 VT	1次/10 a	不完全满足	UT+VT	1次/10 a
蒸汽发生器	蒸汽发生器 A 进口接管安全端连接焊缝	1	RT+PT	1次/10 a	不完全满足	RT+PT+ UT+VT	1次/2 循环
	蒸汽发生器 A 出水口接管安全端连接焊缝	1	RT+PT	1次/10 a	不完全满足	RT+PT+ UT+VT	1次/2 循环
	蒸汽发生器 B 进口接管安全端连接焊缝	1	RT+PT	1次/10 a	不完全满足	RT+PT+ UT+VT	1次/2 循环
	蒸汽发生器 B 出水口接管安全端连接焊缝	1	RT+PT	1次/10 a	不完全满足	RT+PT+ UT+VT	1次/2 循环
稳压器	稳压器与波动管的接管安全端焊缝	1	RT+PT	1次/10 a	不完全满足	RT+PT+UT	1次/1 循环
	稳压器与喷雾管的接管安全端焊缝	1	RT+PT	1次/10 a	不完全满足	RT+PT+UT	1次/1 循环
	稳压器与安全管的接管安全端焊缝(A列)	1	RT+PT	1次/10 a	不完全满足	RT+PT+UT	1次/1 循环
	稳压器与安全管的接管安全端焊缝(B列)	1	RT+PT	1次/10 a	不完全满足	RT+PT+UT	1次/1 循环
	稳压器与卸压管的接管安全端焊缝	1	RT+PT	1次/10 a	不完全满足	RT+PT+UT	1次/1 循环
	稳压器下封头与电加热器套管座连接焊缝	90	VT	1次/10 a	不适用	VT	1次/1 循环
主冷却剂泵	主冷却剂泵 A 进水口接管安全端连接焊缝	1	RT+PT	1次/10 a	不完全满足	RT+PT+VT	1次/10 a
						UT	1次/2 循环
	主冷却剂泵 A 出水口接管安全端连接焊缝	1	RT+PT	1次/10 a	不完全满足	RT+PT+VT	1次/10 a
						UT	1次/2 循环
	主冷却剂泵 B 进水口接管安全端连接焊缝	1	RT+PT	1次/10 a	不完全满足	RT+PT+VT	1次/10 a
						UT	1次/2 循环
	主冷却剂泵 B 出水口接管安全端连接焊缝	1	RT+PT	1次/10 a	不完全满足	RT+PT+VT	1次/10 a
						UT	1次/2 循环

注：依据IWB-240规定，秦山30万千瓦机组采用ASEM规范中A计划，即采用均匀分布检查，每检查间隔期为10 a；表中“拟用检验方法”中的VT为内表面视频检查方法；表中“调整后频度”中“循环”指换料循环，1个换料循环约为1.5 a

600 合金材料的焊缝共计 34 条。其中，4 条容器与主管道连接的进、出水口安全端焊缝；30 条底部中子注量率测量管套管贯穿件 J 型焊缝。对于主管道进、出水口安全端焊缝，现采用的检查手段为：在反应堆压力容器内部构件全部取出后通过“反应堆压力容器检查专用装置”对主管道进、出水口安全端焊缝进行内部超声波检验，同时在管道外侧进行液体渗透检验。由于超声检验对生长初期的 PWSCC 存在很大的不确定性，外表面液体渗透又无法检测出内表面缺陷，故现用检查方法无法保证 PWSCC 缺陷在初生后被较早检测出。对于底部中子注量率测量管套管贯穿件 J 型焊缝，现采用的检查方法为从容器内侧进行水下视频检查。在容器内表面 PWSCC 缺陷开裂到一定宽度后，该检查方法能发现裂纹，但无法对裂纹进行缺陷高度判定和跟踪。

4.1.2 蒸汽发生器 一回路主系统共有 2 台蒸汽发生器，每台蒸汽发生器分布有与主管道连接的一进一出安全端焊缝各 1 条。现采用的检验方法均为管道内部中心曝光射线检验方法和外部液体

渗透检验方法。由于射线检验方法对 PWSCC 初生缺陷的检出存在困难，且不能对 PWSCC 缺陷进行定量和跟踪，故无法完全满足对 PWSCC 的检验要求。

4.1.3 稳压器 稳压器共有 600 合金材料焊缝 95 条。其中，稳压器上封头分布有与安全管、喷雾管、卸压管连接的安全端焊缝共 4 条；稳压器下封头包含 1 条与波动管连接的安全端焊缝和 90 条与电加热器套管连接的贯穿件焊缝。现用检验方法为管道外侧双壁单影射线检查方法和管道外侧液体渗透检验方法。由于外壁射线透照对内壁微小裂纹的检出率极低，且无法对缺陷进行定量和跟踪，同时外部液体渗透检验无法检测出内表面缺陷，故现采用的检验方法不能满足对 PWSCC 的检出要求。

稳压器与电加热器套管连接的贯穿件焊缝密布于直径 2.1 m 的稳压器下封头半球体上。稳压器内部下部区域为固定电加热器的上下隔板，人员和设备均无法接近；稳压器下部中心区域为波动管，周围为电加热器，最外侧为裙座。对于这

90 条焊缝目前采用外表面目视检验,由于空间位置的局限,其他检验方法均无法实现,故虽无法有效检出 PWSCC,但也只能按现有检验方法进行检测。

4.1.4 主冷却剂泵 一回路主系统共有 2 台主冷却剂泵,每台泵体上分布有与主管道连接的一进一出安全端焊缝各 1 条。现采用的检验方法为在主泵拆除并取出内部构件后进行的中心曝光射线检验方法和外部液体渗透检验方法。考虑到射线检验方法对 PWSCC 初生缺陷的检出和对缺陷定量及跟踪的不足,以及管道外壁液体渗透对 PWSCC 初生缺陷无法检出,故现使用的检验方法无法完全满足对 PWSCC 的检验要求。

综上所述,秦山核电厂 300 MW 级核电机组现用检验方法在对 600 合金材料焊缝 PWSCC 裂纹检出上还存在检出困难或无法检出的问题,具体评价结果见表 2。

#### 4.2 检验频度分析

按美国 ASEM 规范规定,秦山核电厂 300 MW 级核电机组一回路主系统除主泵 4 条 600 合金材料焊缝随主泵解体检修一同进行检查外,其余所有 600 合金焊缝材料均遵循 10 年为 1 个检查间隔的检验频度。国外 600 合金 PWSCC 裂纹产生事件分析表明,机组运行 20 年后是核电厂中 600 合金材料焊缝 PWSCC 裂纹主要频发期,秦山 300 MW 机组现正处于该时期。按 PWSCC 生成后的发展速率计算,如继续采用 10 年一次的检验频度对这些 600 合金材料焊缝实施检验,已不能完全满足对 PWSCC 缺陷的检出和跟踪要求。

### 5 应对措施

为保证一回路主系统的完整性和机组的安全运行,尽早检出和跟踪 PWSCC 缺陷,秦山核电厂 300 MW 级核电机组必须对现用检验方法及频度进行相应的增补和修正。

#### 5.1 检验方法的增补

由表 1 所示,内表面液体渗透检验或内表面目视检查与超声波检查的叠加检查对 PWSCC 缺陷检出率较高,且对缺陷的跟踪较为有效;液体渗透的检测灵敏度远高于目视检测的灵敏度,故最佳的检验方法应为内表面液体渗透检验与超声波检查的叠加检查。由于反应堆压力容器、蒸汽

发生器、稳压器、主泵均为核电厂一回路主系统设备,其内部具有高放射性,人员无法直接接触容器内表面实施液体渗透检验,故针对这些一回路主设备 600 合金材料焊缝的 PWSCC 缺陷,有效的检验方法只能是内表面目视检验和超声波检查的叠加检查。考虑到各检验部位现场条件、工艺参数以及检验技术等不同,如对所有焊缝增加内表面目视检验和超声波检查具有不可操作性,故针对秦山核电厂 300 MW 级核电机组 600 合金材料焊缝需根据各自的具体情况进行检验方法的增补,以加强 PWSCC 产生初期被检测出的能力。经过增补后拟采用的检验方法见表 2。

#### 5.2 检验频度修正

一回路主系统中涉及 600 合金材料焊缝的设备由于运行工况、检验环境各有差异,如采用同一检验频度对这些焊缝实施检验并不合理。考虑到一回路主系统中稳压器的运行工况最为恶劣,是 PWSCC 缺陷最易产生的区域,故将稳压器设备上的 600 合金材料焊缝检验频度由每 10 a 1 次调整为每一个换料循环 1 次,以保证机组在出现 PWSCC 缺陷后能及时检出和跟踪,同时也可通过检查结果辅助判定其他 600 合金焊缝设备的运行现状,对于运行工况好于稳压器的蒸汽发生器、主泵,建议将检验频度由 10 年 1 次调整为 2 个换料循环 1 次,若稳压器焊缝上已发现 PWSCC 缺陷,可将该检验频度调整为每一换料循环检查 1 次;由于反应堆压力容器在实施检验时必须取出容器内的堆内构件,并运用专用检验装置进行检查,故建议暂时按原每 10 年 1 次的检查频度实施检查(约 6 个换料循环),如稳压器 600 合金材料焊缝发现 PWSCC 问题,则在 PWSCC 问题产生后再进行频度调整。经过修正后拟采用的检验频度见表 2。

### 6 结束语

秦山核电厂 300 MW 级核电机组所采用的在役检查方法满足 ASME 规范要求及核电厂在役检查(HAD 103/07)的相关要求,但对 600 合金材料焊缝 PWSCC 缺陷的检出和跟踪还存在有薄弱环节,本文提出了应对措施,后续还需对应对措施的实施效果进行验证和调整,以彻底降低 PWSCC 缺陷对机组造成泄漏的风险。

(责任编辑:孙 凯)