



## 核级管道焊缝可检率优化研究

武相, 崔聪, 邬芝胜, 蔡鼎阳, 赵千里, 干依燃, 苏应斌, 肖韵菲

### Research on Detectable Rate Optimization of Nuclear Grade Pipe Welds

Wu Xiang, Cui Cong, Wu Zhisheng, Cai Dingyang, Zhao Qianli, Gan Yiran, Su Yingbin, and Xiao Yunfei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2024.06.0237>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 云计算在核级管道应力分析与优化设计中的应用研究

Application Study of Cloud Computing in Stress Analysis and Optimization Design of Nuclear Pipe

核动力工程. 2021, 42(S2): 150–153

#### 核级管道材料高温疲劳裂纹扩展行为实验研究

Experimental Investigation on Fatigue Crack Propagation Behavior of Nuclear Pipe at High Temperature

核动力工程. 2022, 43(S1): 142–145

#### 核级管道强动态载荷传递特性研究

Research on Strong Dynamic Load Transfer Characteristics of Nuclear Pipe

核动力工程. 2023, 44(S2): 98–103

#### LBB管道裂纹泄漏率计算软件PICLES验证研究

Verification and Research of LBB Pipe Crack Leakage Rate Calculation Software PICLES

核动力工程. 2022, 43(6): 168–173

#### 微波消解-原子吸收法应用于核级树脂锂型转型率的分析研究

Application of Microwave Digestion-Atomic Absorption Spectroscopy in Analysis of Lithium Conversion Rate in Nuclear Class Resin

核动力工程. 2020, 41(1): 176–179

#### 基于SOM聚类算法的核级管道支吊架根部智能选型研究

Study on Nuclear Class Piping Hanger and Support Root Intelligent Selection Based on SOM Clustering Algorithm

核动力工程. 2020, 41(3): 193–196



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2024)06-0237-05; DOI:10.13832/j.jnpe.2024.06.0237

# 核级管道焊缝可检率优化研究

武相<sup>1</sup>, 崔聪<sup>2\*</sup>, 邬芝胜<sup>1</sup>, 蔡鼎阳<sup>1</sup>, 赵千里<sup>1</sup>,  
干依燃<sup>1</sup>, 苏应斌<sup>1</sup>, 肖韵菲<sup>1</sup>

1. 中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610213; 2. 生态环境部核与辐射安全中心, 北京, 100082

**摘要:** 核级管道焊缝不可检问题不仅使焊缝抽检比例达不到现行标准要求, 而且影响焊缝全寿期内的状态监测, 不利于反应堆冷却剂系统运行安全。以浮动式核电站核级管道焊缝役前检查为例, 采用描述统计的方法, 对焊缝不可检问题进行详细原因分析。分析结果表明焊缝检测成像障碍是造成焊缝不可检的主要因素, 焊缝检测不可达因素次之; 形成原因涉及设计、安装、结构功能性和设备结构特性等多个方面。针对性提出的优化措施可将焊缝可检率由 65.5% 至少提升至 74%, 有效提高了焊缝可检率, 保障了系统运行安全。

**关键词:** 可检率; 核级管道焊缝; 成像障碍; 不可达

**中图分类号:** TL353 **文献标志码:** A

## Research on Detectable Rate Optimization of Nuclear Grade Pipe Welds

Wu Xiang<sup>1</sup>, Cui Cong<sup>2\*</sup>, Wu Zhisheng<sup>1</sup>, Cai Dingyang<sup>1</sup>, Zhao Qianli<sup>1</sup>, Gan Yiran<sup>1</sup>,  
Su Yingbin<sup>1</sup>, Xiao Yunfei<sup>1</sup>

1. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China;  
2. Nuclear and Radiation Safety Center, MEE, Beijing, 100082, China

**Abstract:** The problem of undetectable welds in nuclear grade pipelines not only makes the weld detectable rate fail to meet the requirements of current standards, but also affects the state monitoring of welds during their life cycle, which is not conducive to the safe operation of reactor coolant system. Taking the pre-service inspection of nuclear grade pipeline welds in floating nuclear power plants as an example, the reasons for the undetectable welds are analyzed in detail by using descriptive statistics. The analysis results show that the imaging obstacle of weld detection is the main factor causing the weld to be undetectable, followed by the inaccessible factor of weld detection. The reasons are related to design, installation, structural functionality and equipment structural characteristics. The proposed optimization measures can improve the weld detectable rate from 65.5% to not less than 74%, which effectively improves the weld detectable rate and ensures the safety of the system operation.

**Key words:** Detectable rate, Nuclear grade pipeline weld, Imaging obstacles, Inaccessible

## 0 引言

作为核动力装置重要组成部分, 系统管道不仅是实现装置功能的载体, 而且是反应堆冷却剂系统的承压边界, 是保障系统运行安全的关键一

环。焊缝作为系统管道的重要组成部分, 其在核动力装置寿期内的状态监测和运行维护质量对管路系统的安全稳定运行至关重要。

水上核动力装置系统管道焊缝检查一直存在

收稿日期: 2023-12-20; 修回日期: 2024-06-12

作者简介: 武相 (1984—), 男, 高级工程师, 现主要从事核动力装置设计研究, E-mail: 474527648@qq.com

\*通讯作者: 崔聪, E-mail: 1879036613@qq.com

不可检问题<sup>[1-2]</sup>，其可检率（可检焊缝数量与管道焊缝总数的比值）不高，甚至出现焊缝抽检比例达不到现行在役检查执行标准要求的情况；此外，还存在因焊缝缺陷问题扩大抽检比例的情况，焊缝的抽检比例更难以保证。这些问题直接影响管道焊缝寿期内的状态监测，给核动力装置的运行带来安全风险。

本研究以浮动式核电站系统管道焊缝役前检查为例，针对 359 道核级管道焊缝的检测情况，采用描述统计的方法，对不可检问题进行阐述；通过不可检焊缝的表现形式、分布规律及特点分析不可检问题形成的原因，并从设计、安装及外部协作等方面提出改进措施，提高管道焊缝可检率，从而更好地保障系统运行安全。

## 1 管道焊缝检验要求

水上核动力装置管道在役检查按照 GJB 844 系列的核动力装置在役检查导则、在役检查规程执行。标准中未明确或未尽事宜，可参考美国机械工程师协会（ASME）规范第 XI 卷《核电厂部件在役检查规则》或法国 RSE-M 规范《压水堆核岛机械设备在役检查规则》。

按照标准要求，核动力装置在投入运行前应进行役前检查，以提供初始状况的数据，作为与在役检查结果进行比较的依据；检查的方法、技术和设备等应尽可能与在役检查一致；检查范围需包含所有在役检查的设备，同时对承压焊缝的检验包含一定范围的母材部分。此外，对部分无法进行检验的情况，明确了替代检验要求。

依据现行标准要求，实际工程中典型核级管道焊缝抽检比例要求如下：

（1）核 1 级管道焊缝除特殊类型和关键部位的焊缝抽检比例为 100% 外，其余焊缝抽检比例不少于 50%，抽样检验的部位或区域应具有代表性。

（2）核 2、3 级管道焊缝除免检之外的焊缝，抽检比例不少于 20%，且选取的焊缝遵循相应的分配原则。

（3）免除体积检验和表面检验的焊缝，在定期的系统水压试验过程中要进行目视检验。

典型的核级管道焊缝检验物项及检验方法见表 1。

## 2 焊缝不可检问题分类与统计

相比陆上核电站，水上核动力装置系统管道设计在环境条件、设计、安装、运行等方面的条件更为苛刻，其特点如下：

（1）受装置总体尺度限制，管系布置空间狭小且复杂。

（2）管道运行环境恶劣，存在管道腐蚀等问题。

（3）系统运行方式更为复杂，管道热应力及疲劳应力问题突出。

（4）受空间、环境条件及结构变形等因素的影响，管系安装难度大，直接影响管道焊接质量控制。

基于上述特点，水上核动力装置系统管道焊缝在抽检过程中主要存在以下问题：

（1）焊缝检测不可达

主要是指检测人员及设备无法到达焊缝检测区域或焊缝所在区域不满足焊缝检测实施条件。

根据实际工程，该问题的表现形式主要包括

表 1 核级管道焊缝检验物项和检验方法分类表

Tab. 1 Classification of Inspection Items and Methods for Nuclear Grade Pipeline Welds

项目	序号	检验物项	检验方法
核 1 级管道	1	对接焊缝	公称直径 $\geq 30$ mm 的管道
			公称直径 $< 30$ mm 的管道
	2	支管焊缝	公称直径 $\geq 30$ mm 的支管
			公称直径 $< 30$ mm 的支管
核 2、3 级管道	3	公称直径 $\geq 30$ mm，且公称壁厚 $\geq 3$ mm 的管道对接焊缝	
	4	公称直径 $> 10$ mm 的支管焊缝	
	5	螺栓和双头螺柱	
	6	管道连接法兰	
	7	管道连接螺纹	

焊缝遮蔽、空间狭小和结构死区 3 类。

### (2) 焊缝检测成像障碍

管道焊缝在检查过程中,受焊缝区域检测条件的约束,在检测完成后,焊缝位置无法成像或成像清晰度不足,无法满足检测方法的评判要求。

根据实际工程,该问题主要表现为焊缝表面水膜阻碍或水干扰,其中水干扰包括焊缝所在管道截面满水、底部积水 2 类。

以浮动式核电站 359 道核级管道焊缝实际检验情况为例,对抽检过程中出现的焊缝不可检情况按照管道所属的系统、安全等级及规格进行分

类统计,详见表 2。由表 2 可知,系统 1~4 中总焊缝数量 359 道,实际不可检焊缝 124 道,可检焊缝 235 道,焊缝可检率 65.5%。采用描述统计的方法,针对焊缝检测不可达、焊缝检测成像障碍两类问题,按照表现形式分别统计了焊缝数量、占比、分布规律和特点,详见表 3 和表 4。

## 3 焊缝不可检原因分析

根据表 3 和表 4 中不可检焊缝在管道上的分布规律与特点,对出现各类不可检问题的直接原因进行了分析、整理和汇总,详见表 5。表 5 还列出了实际工程中应用的临时解决措施。

表 2 管道焊缝抽样检测信息汇总

Tab. 2 Summary of Smpling Inspection Information of Pipeline Weld

系统名称	管道规格	安全等级	焊缝总数/道	应抽检数量/道	焊缝检测不可达数量/道	成像清晰度不足/道	备注
系统1	DN100	1级	6	6	0	0	
	DN50	1级	11	6	6	6	5道焊缝“不可达+清晰度不足”
	DN32	1级	12	6	0	0	
	DN40	1级	18	9	0	18	
	DN25	1级	4	2	1	0	
系统2	DN60	1级	14	8	0	0	
	DN60	2级	58	12	6	12	
系统3	DN40	2级	118	27	1	32	
系统4	DN60	1级	17	12	0	1	
	DN60	2级	37	10	2	1	
	DN80	2级	29	4	1	26	
	DN50	2级	22	8	0	1	
	DN25	2级	13		2	13	按抽检原则未作为抽检焊缝

表 3 焊缝检测不可达信息统计表

Tab. 3 Statistics on Inaccessible Weld Detection

表现形式	焊缝数量/道	比例/%	分布规律	特点
焊缝遮蔽	4	1.1	①阀门及管路附件两侧; ②设备底部接管嘴附近管道; ③靠近铺板、电缆托架等结构的管道	①局部载荷较为集中,设置有支吊架; ②存在接管的设备封头等位置,包敷有保温层; ③管路贴近结构、铺板布置,需设置支承及预留人员通行空间
空间狭小	10	2.8	位于装置底端且靠近结构的管道	靠近设备基座及装置结构,管系布置复杂,人员通行困难
结构死区	5	1.4	位于设备屏蔽及基座区域的管道	多为管道与设备接口连接区域,被基座屏蔽等结构包络

表 4 焊缝检测成像障碍信息统计表

Tab. 4 Statistics on Imaging Obstacles in Weld Detection

表现形式	焊缝数量/道	比例/%	分布规律	特点
管道截面满水	55	15.3	①未设置放水点的管道; ②管道布置存在“U型弯”; ③存在止回阀、截止阀的管道	①多为分支管路和并联管路; ②管路附近结构、设备、阀门较多,管道变向较多; ③存在止回阀、截止阀且管道垂直布置
管道底部积水	55	15.3	①长距离水平管道; ②含阀门、管路附件等多而集中的水平管道	①未考虑安装坡度,管道直段较长且管路上支架较少,易形成局部挠度; ②设备间预留空间较小,管路行程较短,阀门、管路附件等布置较为集中

表5 管道焊缝不可检原因汇总

Tab. 5 Summary of Causes of Undetectable Pipeline Weld

表现形式	原因分析		临时措施
焊缝遮蔽	支承遮蔽	①阀门、管路附件实际尺寸与设计尺寸存在偏差； ②支承结构、阀门建模精细度不足； ③安装误差	拆除支吊架，检测后复装
	结构遮蔽	①建模精细度不足； ②建模不充分、不全面； ③外部输入参数变化； ④安装误差	拆除结构，检测后复装
	保温层遮蔽	保温层安装时机不合理	拆除保温层，检测后复装
空间狭小	①建模精细度不足； ②建模不充分、不全面； ③外部接口参数变化		申请免检，更换附近其他代表性焊缝进行检测
结构死区	结构功能性设计要求，结构局部位位置形成不可达区域		申请免检，更换附近其他代表性焊缝进行检测
管道截面满水	①疏水点设置不足； ②管道布置变向较多，形成“U型弯”布置； ③止回阀、截止阀功能特性	①更换附近其他代表性焊缝进行检测； ②借助其他通道（仪表、测量）接口排水； ③中压空气吹除	
管道底部积水	①管道集中载荷或安装误差导致管道微弯或倒倾斜； ②阀门、管路附件、管道流通截面差异	①更换附近其他代表性焊缝进行检测； ②中压空气吹除	

复查管系的设计、生产、安装、试验等过程，对导致焊缝不可检问题直接原因追踪溯源，得出根本原因主要为7类，下面分别进行分析。

### 3.1 模型设计问题

此类问题与模型设计的精细化程度相关。在模型设计过程中，为合理利用计算机软硬件资源，结构、设备、阀门及管路附件等物项采用了简化模型，其与真实的设备外形存在一定偏差。此外，阀门、管路附件等物项的采购均在布置设计完成之后进行，其实际技术参数与设计时采用的参数存在偏差。上述偏差均能导致模型设计与实际物项不符。

### 3.2 外部输入和接口问题

此类问题与外部输入和接口变化相关。核动力装置布置设计涉及多个专业和多家单位，且系统接口多、分工复杂、涉及范围广。在实际的设计过程中，布置设计在完成多单位跨专业综合协调后，其后续产生的设计变更通常不能及时完整地反映在最终的模型设计结果中。此外，部分空间占比较小，由于设计状态的固化处于设计阶段的末期，未在模型设计结果中得到反映，如仪表接管、阀门电装接线等。上述因素导致模型设计不充分、不全面。

### 3.3 安装误差问题

此类问题与实际设备安装过程和结构变形相关。布置设计中设备定位均以反应堆中心或结构中心为定位基准。在实际设备安装过程中，上述定位基准难于找寻和明确，除大型设备外，通常

采用就近原则，选取附近的结构壁面或支承表面作为参考基准，使得设备安装存在偏差。此外，设备安装后，装置结构存在较大变形量，导致设备、管道安装定位与理论设计值存在偏差。

### 3.4 安装工序与检测时机问题

此类问题与焊缝检测的实施阶段相关。出于经济性的考虑，焊缝的役前检查通常不会根据安装进度及实施条件分批次进行，常采用统一的时间窗口开展检查。因此，常出现检查时焊缝已经被其他物项遮蔽的情况，如结构、保温层等。

### 3.5 管道布置设计问题

此类问题与管道疏水的设置相关。由于装置布置空间的限制严苛，管路设计时常出现“U型弯”和疏水点设置困难的情况，管道无法实现正常疏水，导致该处焊缝不可检。

### 3.6 结构功能性设计问题

此类问题与结构设计的功能完整性相关。在装置结构设计过程中，为满足结构的功能性要求和力学性能要求，通常需要保证结构的封闭性和完整性。因此，在结构设计过程中常出现局部结构包络管道及焊缝的情况，主要出现在管道与设备相连接的位置。

### 3.7 设备功能及结构特性问题

此类问题主要与阀门的安装要求和流通截面差异性相关。例如根据升降式止回阀功能特性，阀门垂直安装后，阀后的竖直段管道积水无法排出。此外，由于功能及结构特性的关系，部分类

型的阀门及管路附件流通截面并不与管道流通截面保持一致，导致所在管道疏水不畅。上述问题均会导致焊缝所在位置的管道截面满水或者底部积水。

#### 4 优化措施

根据核级管道焊缝在抽检过程中出现的典型

问题及原因分析结果，进行改进优化，具体措施和实施难易度详见表6。

根据上述优化措施及实现的难易程度，对浮动式核电站核级管道中存在的管道焊缝检测问题进行评估，预测其优化后的效果，详见表7。初步估计，至少可消除34道不可检焊缝，焊缝的可检率至少提升至74%。

表6 优化措施汇总

Tab. 6 Summary of Optimization Measures

原因分析结果	改进优化措施	实施难度
模型设计问题	①提升与外部协作单位、生产单位合作机制，获取较为全面的设计输入资料； ②开展精细化设计，建立完善的三维模型数据； ③收集已有工程的相关设计资料，建立较为完善的资料库，为布置设计提供参考	低
外部输入及接口问题	①提升与外部协作单位的技术沟通渠道； ②信息传递合理化、规范化； ③加强设计阶段、安装阶段的设计复查	低
安装误差问题	①加强安装阶段的质量控制； ②加强安装前的设计状态复查	中
安装工序及检测时机问题	合理规划施工工序，并根据计划合理安排检查时机	低
管道布置设计问题	①减少“U型弯”布置形式，合理规划疏水点设置； ②合理规划焊缝分布，对焊缝可检性进行充分评估； ③安装阶段，对管系疏水进行功能性排查、整改，并进行等轴测图的编制和焊缝数据库的创建	低
结构功能性设计问题	优化结构设计	高
设备功能及结构特性问题	①止回阀、截止阀所在管路尽量水平布置，且在阀门两侧管道考虑疏水点设置； ②管道设置一定的安装坡度（坡度 $\sim 0.2\%$ ），以保证管道的自然疏水	中

表7 优化效果评估

Tab. 7 Evaluation of Optimization Effect

表现形式	焊缝数量/道	优化效果	备注
焊缝遮蔽	4	完全消除	
空间狭小	10	改善	理论上可以完全消除
结构死区	5	不能消除	申请免检
管道截面满水	55	改善	除垂直安装的正回阀出口管道焊缝不能消除外，其余焊缝均可消除，约30道焊缝
管道底部积水	55	改善	理论上可以完全消除

#### 5 结论

本研究以核级管道焊缝役前检查的工程实例为基础，对焊缝不可检问题进行了原因分析，得出如下结论：

(1) 焊缝检测成像障碍是管道焊缝不可检的主要因素，占比为30.6%；焊缝检测不可达是次要因素，占比为5.3%。

(2) 主要原因是由模型设计、外部输入及接口变化、安装误差、检测时机、管道布置设计、结构功能性、设备结构特性等问题引起，其中设备功能及结构特性和管道布置设计影响最大。

此外，本研究根据引起焊缝不可检问题的原因，有针对性地提出优化措施，并对实际效果进行评估。评估结果表明，优化措施可将焊缝可检率由65.5%至少提升至74%，有效提高了核级管道焊缝可检率。建议优化措施应用于后续的工程产品设计，以期更好地保障核动力装置运行安全。

#### 参考文献：

- [1] 于毅. AP1000核级管道焊缝在役检查分析[J]. 科技资讯, 2015, 13(28): 59-60, 95.
- [2] 蒋伟锋, 章维. 核电厂无损检测空间分析工具开发与应用[J]. 中国电力, 2016, 49(9): 109-113.

(责任编辑: 刘 君)