

# 堆芯中子通量测量系统指套管磨损分布规律 及处理准则优化研究

蔡振, 梅金娜, 王鹏, 遆文新

(苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004)

**摘要:** **目的** 分析堆芯中子通量测量系统指套管磨损分布规律, 提出处理准则优化建议。**方法** 统计了指套管在堆芯不同位置的磨损数量, 分析了指套管磨损分布规律。结合指套管和导向管的结构特点和视频检查结果, 分析了指套管的磨损原因, 并提出了指套管磨损处理准则优化建议。**结果** 指套管磨损位置主要集中在P1和P4两处, 其中P1位置磨损数量最多, 而P2、P3和P5位置磨损数量较少。P1和P4两处的指套管磨损形貌差异较大, 在P1位置, 由于指套管易发生方向随机的高频低振幅微动磨损行为, 导致产生较窄的环槽形缺陷; 在P4位置, 指套管则易发生低频高振幅的微动磨损行为, 导致产生较宽的楔形缺陷。**结论** 指套管和导向管的结构特性、冷却剂流场等因素均对指套管磨损有较大影响, 不同位置处指套管磨损缺陷形貌差异较大。有必要分别建立针对P1位置和P4位置的指套管磨损处理准则, 使得核电厂对于指套管的磨损处理更有针对性, 以有效延长指套管的服役寿命。

**关键词:** 核电站; 堆芯中子通量测量系统; 指套管; 磨损; 分布规律; 磨损原因

**中图分类号:** TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2022)01-0101-06

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2022.01.015

## Research on Wear Distribution and Wear Acceptance Criteria Optimization of In-core Neutron Flux Instrumentation System Thimble Tube

CAI Zhen, MEI Jin-na, WANG Peng, TI Wen-xin

(Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou 215004, China)

**ABSTRACT:** The purpose of this paper is to analyze the wear distribution of in-core neutron flux instrumentation system thimble tube and put forward suggestions for optimization of wear acceptance criteria. The research method in this paper is to analyze the wear distribution of thimble tube by counting the wear number of thimble tubes at different positions. And this paper

收稿日期: 2021-05-27; 修订日期: 2021-07-21

Received: 2021-05-27; Revised: 2021-07-21

基金项目: 国家科技重大专项(2019ZX06005003); 中国广核集团尖峰计划项目(3100099562)

Fund: National Science and Technology Major Project of China (2019ZX06005003), Scientific Research and Innovation Project of China General Nuclear Power Group (3100099562)

作者简介: 蔡振(1991—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为核电材料服役行为评价。

Biography: CAI Zhen (1991—), Male, Master, Engineer, Research focus: ageing behavior evaluation of nuclear materials.

通讯作者: 梅金娜(1981—), 女, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为核电材料服役行为评价。

Corresponding author: MEI Jin-na(1981—), Female, Doctor, Professorate senior engineer, Research focus: ageing behavior evaluation of nuclear materials.

引文格式: 蔡振, 梅金娜, 王鹏, 等. 堆芯中子通量测量系统指套管磨损分布规律及处理准则优化[J]. 装备环境工程, 2022, 19(1): 101-106.

CAI Zhen, MEI Jin-na, WANG Peng, et al. Research on Wear Distribution and Wear Acceptance Criteria Optimization of In-core Neutron Flux Instrumentation System Thimble Tube[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(1): 101-106.

analyzes wear causes of thimble tube by combined the design characteristics of thimble tube and guide card and video inspection results. Some suggestions of thimble tube wear acceptance criteria are given. There is obvious characteristics in wear distribution of thimble tube, which is the wear mainly concentrated in Point 1 and Point 4. And the wear at Point 1 is the most, while the wear at Point 2, Point 3 and Point 5 are less. The fretting wear behavior of high frequency and low amplitude with random direction is easy to occur at Point 1, which leads to narrow ring groove wear scars. The fretting wear behavior of low frequency and high amplitude is easy to occur at Point 4, which leads to wide wedge wear scars. The structural characteristics of thimble tube and guide card and reactor coolant flow field have a great influence on the thimble tube wear, and the wear defects of the thimble tube in different positions are greatly different. It is necessary to carry out related research to establish the wear acceptance criteria for the thimble tube at Point 1 and Point 4, respectively, so as to make the wear treatment of the thimble tube more targeted and prolong the service life of thimble tube.

**KEY WORDS:** NPP; in-core neutron flux instrumentation system; thimble tube; wear; distribution; wear cause

堆芯中子通量测量系统指套管是核电站反应堆堆芯中子通量测量系统的重要组成部分,是移动式微型裂变室的通道,其外壁与反应堆冷却剂直接接触,属于一回路压力边界<sup>[1-2]</sup>。指套管直径小且尺寸较长,导致刚度较低,在服役过程中,冷却剂诱发振动导致其与导向管管口之间产生摩擦,进而发生磨损乃至破损,带来一回路冷却剂泄漏的风险,影响核电站的安全运行。20世纪80年代起,美国、法国等国家的核电站相继出现了指套管泄漏问题。1988年3月,美国核管理委员会(NRC)发布87-44通告,指出美国西屋公司设计的核反应堆存在指套管磨损问题<sup>[3]</sup>。为应对该问题,NRC于1988年7月发布了88-09通告,要求各核电站建立并执行指套管检查大纲,对指套管进行周期性检查,确保指套管的完整性<sup>[4-6]</sup>。检查大纲需包括检查频率、检查方法、处理准则等内容。业界通常使用涡流检测方法检测指套管磨损深度<sup>[7-9]</sup>。我国核电站参考美国、法国等国的做法管理指套管磨损问题,定期检测指套管磨损状态<sup>[10-14]</sup>。近些年,我国核电站,尤其是自主建设的核电站指套管磨损问题日益凸显,指套管异常磨损事件频发。因此,有必要研究指套管磨损分布规律和磨损形貌特点,结合指套管导向管结构特点,分析指套管磨损原因,为优化指套管磨损处理准则提供指导。

## 1 堆芯中子通量测量系统<sup>[15-16]</sup>

堆芯中子通量测量系统包括控制监测柜、分配柜和测量通道设备等。该系统由驱动装置、组选择器和路选择器构成的机械组件驱动中子探头进行中子注量率测量;由安装在堆芯测量室的分配柜实现控制设备和机械组件之间的接口。在核反应堆正常运行期间,堆芯中子通量测量系统间断工作,至少每隔30个等效满功率天启用一次。

堆芯中子通量测量通道由50个通道组成,分成5组,每组10个通道,每组配备1只微型裂变室,共5只微型裂变室,各由1台驱动机构驱动。驱动机

构将微型裂变室从起点沿置于导向管内的指套管插入堆芯顶部,再均匀下降,与此同时,通量测量电路测出微型裂变室的输出电流。当微型裂变室达到堆芯底部时,测量停止。此时驱动机构再将微型裂变室抽回起点,接着将微型裂变室再插入第2个通道进行测量,直至全部测完该组10个通道为止。堆芯中子通量测量系统共有50根指套管,其长度为13~17 m不等。指套管外径为 $\Phi 8.6$  mm,内径为 $\Phi 5.2$  mm,最小壁厚为1.65 mm,材料为Z5CND17-12(加工硬化)。指套管导向通道布置如图1所示,核反应堆装料后,指套管依次经过自动阀、逆止阀、密封组件、手动阀、贯穿件后,沿导向通道进入反应堆压力容器。导向通道自下而上依次为堆芯中子通量测量导向管、反应堆压力容器导向管、堆内构件支撑柱组件导向管、燃料组件仪表导向管,如图2所示。

## 2 指套管磨损机理分析

指套管全长度范围内,仅在密封组件处有一处固定约束,其余位置均无固定约束。反应堆压力容器内部的导向通道由多个不连续段组成,导致指套管与反应堆冷却剂直接接触。在机组运行期间,反应堆冷却剂流经指套管外侧,诱发指套管产生数十微米振幅的流致振动。指套管在导向通道变径位置存在表面上的微凸体粘着,粘着点被小振幅振动剪断形成磨屑,磨屑在冷却剂作用下被腐蚀,形成腐蚀颗粒。腐蚀颗粒具有研磨性,在后续的往复运动中对基体材料持续产生磨损。基体材料发生磨损后露出的新表面又会受到冷却剂的腐蚀作用。在机械磨损和冷却剂腐蚀的共同作用下,指套管发生体积损失,最终形成磨损缺陷。

磨损的萌生和发展特征与导向通道位置,指套管与导向通道的间隙,流体的速度、方向等有关。磨损引起的材料损失会降低指套管的结构强度,当磨损到一定程度时,将不能满足指套管抗压强度设计要求,磨损处发生外压挤毁失效的概率大幅提升,进而导致指套管发生形变甚至泄漏。其中,形变会导致微型裂

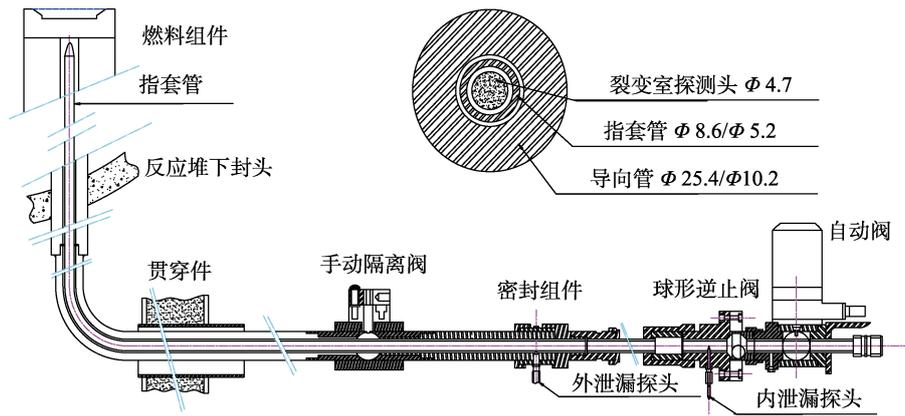


图 1 指套管导向通道布置  
Fig.1 Arrangement of thimble tube guide card

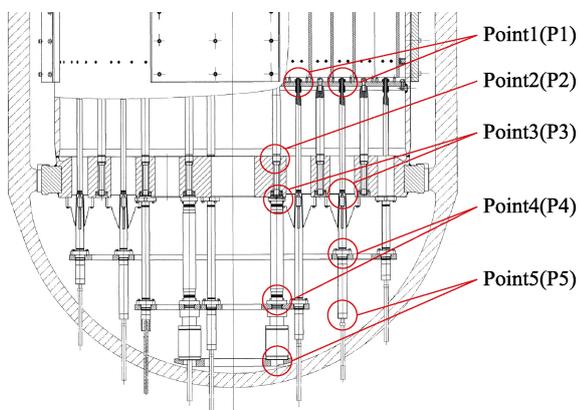


图 2 指套管磨损位置分布  
Fig.2 Distribution of thimble tube wear

变室无法通过指套管，造成相应的堆芯中子通量测量通道不可用；泄漏则会污染 10 路转换器，导致 10 路转换器及其所有相连的堆芯中子通量测量通道不可用。此外，若在流致振动作用下指套管在磨损处发生断裂，形成内部脱落件，将危及反应堆安全，导致核电站非计划停堆，造成重大损失<sup>[17]</sup>。

### 3 指套管磨损分布规律分析

某核电站某机组指套管磨损分布 3D 散点图如图 3 所示，表明了指套管磨损位置在三维空间的分布。三维坐标代表磨损位置，Z 轴自上而下依次代表 P1—P5 的 5 个磨损位置，如图 2 所示。P1 为下堆芯板上表面位置，P2 为堆芯支撑板上表面位置，P3 为堆芯支撑板下表面位置，P4 为堆芯支撑柱与格架板连接处，P5 为堆芯支撑柱与反应堆压力容器测量管座连接处；X 轴和 Y 轴代表指套管对应的堆芯位置编码；散点颜色代表磨损深度。可以看出，指套管磨损发生在导向通道内径改变处<sup>[1]</sup>，主要集中在 P1 和 P4 两处，其中 P1 位置磨损数量最多，P4 位置磨损次数次之，P2、P3 和 P5 位置磨损数量较少。国内数十台机组百余次大修指套管 P1—P5 位置磨损涡流检

查次数统计结果见表 1<sup>[18-19]</sup>，进一步验证了上述结论。进一步观察发现，磨损位置对应的堆芯坐标分散，散点颜色在堆芯位置内随机分布，说明磨损位置和深度在指套管堆芯位置上无明显分布规律。

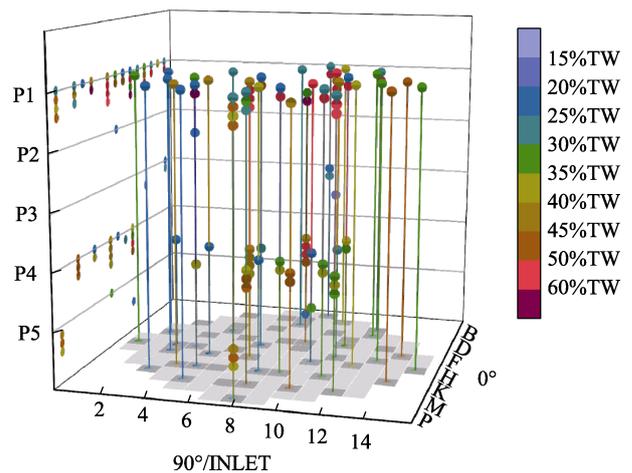


图 3 某机组指套管磨损分布 3D 散点图  
Fig.3 3D scatterplot of thimble tube wear distribution of a unit

表 1 P1—P5 位置指套管磨损涡流检查结果

Tab.1 Wear numbers of thimble tube at Point 1—Point 5

机组	磨损总次数	P1—P5 位置磨损次数				
		P1	P2	P3	P4	P5
国内机组共 123 次大修	819	486	14	27	229	63
国内机组共 36 次大修 <sup>[18]</sup>	558	448	12	7	140	58
国内某机组 <sup>[19]</sup>	34	12	0	0	18	4

相较于磨损次数，因磨损导致的指套管维修次数更能反映出指套管磨损对于核电站运维的影响，此处维修是指指套管割管移位、堵管或更换等大修期间执行的维修活动。国内某些机组共 123 次大修中实施指套管维修的次数统计如图 4 所示，共计 238 次，主要集中在 P1 位置，占比高达 76.9%，P4 位置次之，占

比为 19.8%，P2、P3 和 P5 位置维修次数较少，合计占比仅为 3.3%。

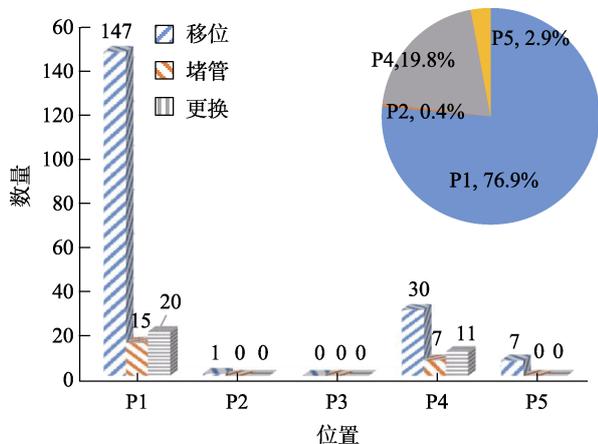


图 4 国内机组指套管维修次数  
Fig.4 Repair times of thimble tube of China NPPs

### 4 指套管磨损原因分析

上述分析结果显示，指套管磨损区域主要集中在 P1 和 P4 位置，因此重点对 P1 和 P4 处的磨损原因进行分析。

指套管经过 P1 位置示意如图 5 所示，P1 位置位于下堆芯板上表面，为燃料组件支撑板指套管出口处。该位置有部分指套管暴露在反应堆冷却剂中（见图 5 中圆圈位置处），将直接受到反应堆冷却剂强烈的垂直于轴向的横向流冲刷作用。燃料组件仪表导向管的内径为 12.45 mm，略小于二次支撑及仪表套管组件在靠近冲刷位置的内径 13.84 mm，即该位置导向通道存在变径。指套管与燃料组件仪表导向管的单边缝隙仅为 1.93 mm，小于其与二次支撑及仪表套管组件在靠近冲刷位置的单边间隙 2.62 mm。因此，磨损位置理论上应靠近燃料组件仪表导向管出口处。由于冷却剂的冲刷方向垂直于指套管轴向，且指套管受冲刷面积较小，因此指套管在此处发生方向随机的高频低幅振动，与燃料组件仪表导向管内壁发生摩擦磨损。典型的 P1 位置处指套管磨损视频检查结果见图 6，呈现出宽度约几毫米的环槽形磨损特征。

指套管经过 P4 位置示意图见图 7，P4 位置位于堆芯支撑柱与格架板连接处，为二次支撑柱指套管入口处节点。该位置呈现明显的变径特征，指套管在此处通过时，形成悬臂梁结构，容易在流体扰动作用下与导向通道发生碰磨。同时，该处几何结构类似于喷嘴，根据流体力学节流原理，冷却剂流经此处时流速变化快，流场变化复杂，加剧了指套管流体诱发振动的现象。与 P1 位置不同，P4 位置的冷却剂冲刷方向并非垂直于指套管的轴向，而是与指套管轴向形成较小的角度（ $< 45^\circ$ ），且指套管受冲刷的面积较大，因

此产生的冲刷应力在理论上较 P1 位置小。由于 P4 位置导向管内径（15.24~50.80 mm）显著大于 P1 位置的导向管内径（12.45 mm），因此，指套管有更大的变形空间，易发生低频高振幅的振动，导致指套管在较长轴向长度范围内发生磨损。典型的 P4 位置处指套管磨损视频检查结果如图 8 所示，呈现出宽度约数十毫米的楔形磨痕特征，磨痕宽度显著大于 P1 位置。

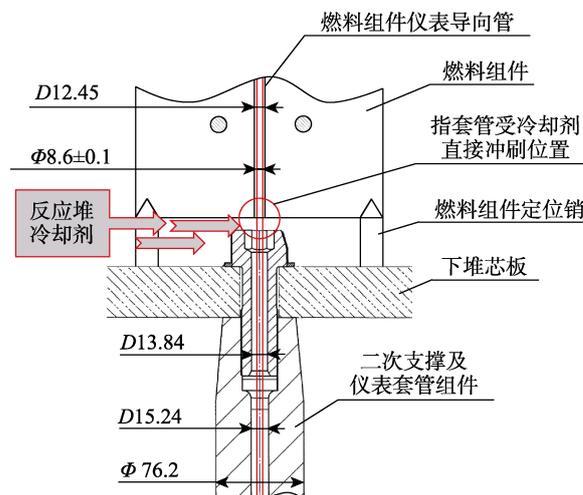


图 5 指套管经过 P1 位置示意  
Fig.5 Darwing of thimble tube at Point 1



图 6 指套管在 P1 位置的磨损形貌  
Fig.6 Wear profile of thimble tube at Point 1

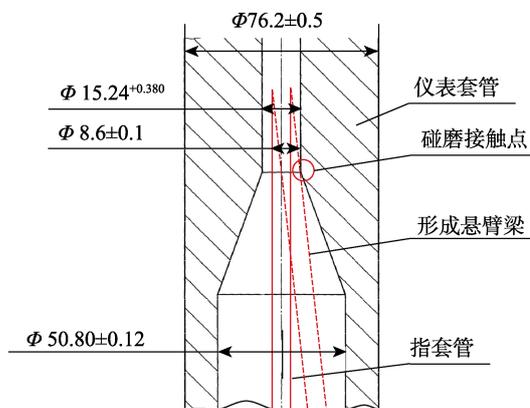


图 7 指套管经过 P4 位置示意  
Fig.7 Darwing of thimble tube at Point 4



图 8 指套管在 P4 位置的磨损形貌  
Fig.8 Wear profile of thimble tube at Point 4

## 5 指套管磨损处理准则优化建议

国内机组针对指套管磨损问题的处理，一直参考国外做法，国内电厂使用的典型的指套管磨损处理准则见表 2。以涡流检测指套管磨损深度为标准<sup>[20-21]</sup>，当磨损深度达到[0%，50%]，为记录缺陷，无需采取纠正行动；当磨损深度达到(50%，100%]，为超标缺陷，需根据磨损深度采取不同的行动。磨损深度达到(50%，65%]时，进行割管移位处理，每次移位长度为 40~45 mm；当割管移位 2 次或磨损深度达到(65%，100%]进行通道封堵或更换。

表 2 指套管磨损处理准则  
Tab.2 Wear criterion of thimble tube

分类	行动	磨损深度（壁厚百分比）
记录缺陷	无需采取纠正行动	[0%，50%]
超标缺陷	割管移位处理	(50%，65%]
	堵管或更换	(65%，100%]

目前采用的磨损处理准则只将磨损深度作为依据，尚未将磨损缺陷宽度考虑在内，也没有区分磨损位置。文中通过分析磨损分布规律和磨损形貌发现，P1 位置和 P4 位置指套管磨损最为严重，且磨痕的几何形态存在显著差别，分别为几毫米宽的环槽形磨痕和数十毫米宽的楔形磨痕。目前业界已开展了针对指套管磨损缺陷长度分析的相关研究工作<sup>[22-25]</sup>，初步具备了针对两类磨损缺陷分别建立相应处理准则的基本条件，后续有必要进一步开展深入的研究，建立区分 P1 位置和 P4 位置的磨损处理准则，使指套管的磨损维修处理更有针对性，保证指套管服役安全，并延长指套管的服役寿命，提高电厂运行的经济性。

## 6 结论

1) 指套管磨损位置主要集中在 P1 位置和 P4 位置，由特殊的流场分布和结构设计导致。

2) 指套管在 P1 位置发生高频低振幅的微动磨损行为，易产生较窄的环槽形磨损缺陷；在 P4 位置发生低频高振幅的微动磨损行为，易产生较宽的楔形磨损缺陷。

3) 有必要分别建立针对 P1 位置和 P4 位置的磨损处理准则，使指套管的磨损维修处理更有针对性，提升电厂运行的安全性和经济性。

## 参考文献：

- [1] 柳正钧. 堆芯指套管磨损、堵塞机理与预防性维修策略[J]. 核动力工程, 2004, 25(3): 264-266.  
LIU Zheng-jun. Abrasion and Blockage Mechanism of In-core Flux Thimble and Preventive Maintenance Strategy[J]. Nuclear Power Engineering, 2004, 25(3): 264-266.
- [2] 郑超雄, 方松利. 大亚湾核电站堆芯中子通量测量指形套管在役检查实施与管理[C]//全国第三届核反应堆用核仪器学术会议论文集. 北京: 中国核学会, 2003: 63-65.  
ZHENG Chao-xiong, FANG Song-li. Implementation and Management of Daya Bay Nuclear Power Plant In-core Flux Thimble Tube In-service Inspection[C]// Proceedings of National Conference on Nuclear Reactor Instrument. Beijing: Chinese Nuclear Society, 2003: 63-65.
- [3] NRC. Information Notice No. 87-44: Thimble Tube Thinning in Westinghouse Reactors[EB/OL]. 1987.
- [4] NRC. Bulletin 88-09: Thimble Tube Thinning in Westinghouse Reactors[EB/OL]. 1988.
- [5] NRC. Suppls 891102 Response to NRC Bulletin 89-008, "Thimble Tube Thinning in Westinghouse Reactors." Detected Wear for Thimble Tube Locations J-14 & L-10 Below 20% (First Action Level for Thimble Tube Wear) [EB/OL]. Washington: NRC, 1991.
- [6] NRC. Responds to NRC Bulletin 88-009, "Thimble Tube Thinning in Westinghouse Reactors." Thimble Tube Inspection Program Implemented [EB/OL]. Washington: NRC, 1988.
- [7] 赵汝翮, 徐清国, 林戈, 等. 核电站中子通量仪表指套管涡流检测专用探头: 中国, CN103063740B[P]. 2016-02-03.  
ZHAO Ru-xuan, XU Qing-guo, LIN Ge, et al. Probe Special for Performing Eddy Current Testing on Thimble Tube of Neutron Flux Instrument Used by Nuclear Power Plant: China, CN103063740B[P]. 2016-02-03.
- [8] PARK S S, JANG Y Y, YIM C J, et al. Development of Eddy Current Technique for Reactor In-core Flux Thimble Wear[J]. Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, 1990, 10(2): 15-22.
- [9] 张玮, 袁骊, 刘婷, 等. 核电厂指套管涡流检测技术现状与发展趋势[J]. 核电子学与探测技术, 2017, 37(10): 969-973.  
ZHANG Wei, YUAN Li, LIU Ting, et al. The Status and Development Trend of Eddy Current Testing Technology

- of Nuclear Power Plant In-core Flux Thimble Tube[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2017, 37(10): 969-973.
- [10] 赵永明. 秦山核电方家山 1#机组指套管移位焊接修复[J]. 焊接技术, 2016, 45(11): 87-89.  
ZHAO Yong-ming. Thimble Tube Displacement Welding Repair of Fangjiashan Unit1 of Qinshan Nuclear Power Plant[J]. Welding Technology, 2016, 45(11): 87-89.
- [11] 代巍巍, 侯志华, 陈红卫, 等. 秦山第二核电厂堆芯指套管维修[J]. 中国机械, 2014(13): 253-254.  
DAI Wei-wei, HOU Zhi-hua, CHEN Hong-wei, et al. In-core Flux Thimble Tube Maintenance of Qinshan No.2 Nuclear Power Plant[J]. Machine China, 2014(13): 253-254.
- [12] 张杰, 熊伟. 核电站堆芯中子注量率测量系统辐照后指套管抽拔机设计[J]. 科技视界, 2016(15): 236-237.  
ZHANG Jie, XIONG Wei. Thimble Tube Extractor Design of Nuclear Power Plant In-core Instrument Thimble Assembly After Irradiation[J]. Science & Technology Vision, 2016(15): 236-237.
- [13] 江浩仁, 邓鹏辉, 黄成龙. M310 堆型的核电指套管堵管工艺[J]. 山东工业技术, 2019(12): 201.  
JIANG Hao-ren, DENG Peng-hui, HUANG Cheng-long. In-core Flux Thimble Tube Plugging Technology of M310 [J]. Shandong Industrial Technology, 2019(12): 201.
- [14] 周森, 杨海双, 卢冰, 等. 指套管废料存储容器转运装置: 中国, CN103871533A[P]. 2014-06-18.  
ZHOU Miao, YANG Hai-shuang, LU Bing, et al. Finger Casing Pipe Waste Storage Container Transfer Device: China, CN103871533A[P]. 2014-06-18.
- [15] 杜晓光, 王铭涛, 汪明珠, 等. 移动式堆芯中子注量率测量系统概述[J]. 中国核电, 2010, 3(4): 367-373.  
DU Xiao-guang, WANG Ming-tao, WANG Ming-zhu, et al. Introduction to the Movable In-Core Neutron Flux Instrumentation System[J]. China Nuclear Power, 2010, 3(4): 367-373.
- [16] HEIBEL M D, KISTLER D P, CARVAJAL J V. In-core Instrument Thimble Assembly: US, US10438708[P]. 2019-10-08.
- [17] 胡建荣, 罗婷, 简捷, 等. 防城港核电站堆内中子通量测量系统指套管碰磨分析[J]. 核科学与工程, 2017, 37(5): 750-755.  
HU Jian-rong, LUO Ting, JIAN Jie, et al. Impact Analysis of Thimble Tube of Neutron Flux Measurement System in Fang Cheng Gang Power Station[J]. Nuclear Science and Engineering, 2017, 37(5): 750-755.
- [18] 张明乾, 黄美良, 付月明, 等. 堆芯中子注量率测量系统指套管磨损现象分析[J]. 核动力工程, 2018, 39(6): 96-100.  
ZHANG Ming-qian, HUANG Mei-liang, FU Yue-ming, et al. Assessment on Wear of In-core Flux Thimble in a Typical Pressurized Water Reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2018, 39(6): 96-100.
- [19] 陈松, 王玉彬, 张精干, 等. 核电站指套管减薄根本原因分析[J]. 设备管理与维修, 2018(22): 65-67.  
CHEN Song, WANG Yu-bin, ZHANG Jing-gan, et al. Root Cause Analysis of Thimble Tube Thinning in Nuclear Power Plant[J]. Plant Maintenance Engineering, 2018(22): 65-67.
- [20] 张磊, 刘武军, 解社娟, 等. 核电站指套管磨损缺陷的扫频涡流检测及创新型特征提取[J]. 中国机械工程, 2021, 32(1): 18-25.  
ZHANG Lei, LIU Wu-jun, XIE She-juan, et al. Swept-Frequency ET and Innovative Feature Extraction of Abrasion Defects for Thimble Tubes in Nuclear Power Plants[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(1): 18-25.
- [21] 马强, 陈骋, 李平仁, 等. 核电厂指套管磨损涡流检查深度定量的影响因素研究[J]. 核动力工程, 2020, 41(5): 150-154.  
MA Qiang, CHEN Cheng, LI Ping-ren, et al. Research on Impact Factors of Depth Quantification in Eddy Current Test for Thimble Tubes Wear of Nuclear Power Plants[J]. Nuclear Power Engineering, 2020, 41(5): 150-154.
- [22] 李庆顺, 王小刚, 尹基林, 等. 反应堆中子通量测量系统指套管微振磨损长度的测量[J]. 无损检测, 2018, 40(11): 25-28.  
LI Qing-shun, WANG Xiao-gang, YIN Ji-lin, et al. Measurement of Thimble Tube Fretting Wear Length of Nuclear Reactor Neutron Flux Measuring System[J]. Nondestructive Testing Technology, 2018, 40(11): 25-28.
- [23] 于鹏跃, 张涛, 王东, 等. 核电站指套管磨损信号分析与应用[J]. 中小企业管理与科技(下旬刊), 2019(8): 149-150.  
YU Peng-yue, ZHANG Tao, WANG Dong, et al. Analysis and Application of Thimble Tubes Wear Signal in Nuclear Power Station[J]. Management & Technology of SME, 2019(8): 149-150.
- [24] 朱志斌, 李庆顺, 尹基林. 核反应堆中子通量测量指套管磨损涡流检测[C]//2017 远东无损检测新技术论坛论文集. 西安, 2017: 317-322.  
ZHU Zhi-bin, LI Qing-shun, YI Ji-lin. Eddy Current Inspection for Thimble Tube Wear of Nuclear Reactor Neutron Flux Measurement[C]// Proceedings of 2017 Far East NDT. Xian, 2017:312-317.
- [25] MENG De, TING Liu, YUAN Li, et al. The Study for Technology Application Status and Problems of Thimble Tube Eddy Current Testing[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 394: 042045.