

核电厂乏燃料贮存格架水下吊装工具研制

偶建磊, 袁志敏, 吴 伟, 罗文广, 廖佳涛

Development of Underwater Lifting Tool for Spent Fuel Storage Rack in Nuclear Power Plants

Ou Jianlei, Yuan Zhimin, Wu Wei, Luo Wenguang, and Liao Jiatao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2021.04.0182>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

核电厂乏燃料贮存格架水下去污装置研制

Development of Underwater Decontamination Device for Spent Fuel Storage Rack in Nuclear Power Plants

核动力工程. 2019, 40(5): 146–149

海洋核动力平台乏燃料贮存格架设计及安全分析研究

Study on Design and Safety Analysis of Spent Fuel Storage Grid for Marine Nuclear Power Platform

核动力工程. 2021, 42(3): 177–183

基于超单元技术的乏燃料贮存格架多自由度非线性抗震分析

Multi-DOF Nonlinear Seismic Analysis of Spent Fuel Storage Grid Based on Super-Element Technology

核动力工程. 2020, 41(1): 79–82

基于机器视觉技术的乏燃料贮存格架自动定位试验方法研究与应用

Research and Application of Spent Fuel Storage Racks Positioning Test Method Based on Machine Vision

核动力工程. 2020, 41(6): 198–201

核电厂乏燃料组件厂内转运关键设备研制

Development of Key Equipment for In-Plant Spent Fuel Unloading from Cask

核动力工程. 2018, 39(3): 106–109

乏燃料密封容器开盖及其内容物回取技术研究

Study on Spent Fuel Storage Canister Cutting and Content Withdrawal Technologies

核动力工程. 2018, 39(4): 128–131



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2021)04-0182-04; doi:10.13832/j.jnpe.2021.04.0182

核电厂乏燃料贮存格架水下吊装工具研制

偶建磊, 袁志敏, 吴伟, 罗文广, 廖佳涛

中国核动力研究设计院, 成都, 610213

摘要: 针对某二代核电厂乏燃料贮存格架水下吊装的需求, 根据乏燃料贮存格架的水下布置特点, 对水下吊装接口安全性及操作便利性进行分析, 研制了一种通过抓放格架底板流水孔来实现格架水下自锁的兜底式格架吊装工具, 并详细介绍了此水下吊装工具的结构组成、使用操作及工作原理; 最后将此格架用于某二代核电厂 20 台格架的吊装作业。现场应用表明, 此吊装工具操作简便、结构可靠, 满足格架水下吊装需求。

关键词: 乏燃料贮存格架; 水下吊装; 核电厂; 吊装工具

中图分类号: TL93 **文献标志码:** A

Development of Underwater Lifting Tool for Spent Fuel Storage Rack in Nuclear Power Plants

Ou Jianlei, Yuan Zhimin, Wu Wei, Luo Wenguang, Liao Jiatao

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: In response to the requirement for the underwater lifting of spent fuel storage racks in a second-generation nuclear power plant, according to the current situation of the narrow underwater layout of spent fuel storage racks and the analysis of the safety and convenience of underwater lifting interfaces, a grab-and-release rack was developed. Bottom-bottom lattice lifting tool with underwater self-locking lattice is realized by running water holes on the bottom of the rack, and the structure, operation and working principle of this underwater lifting tool are introduced in detail. Finally, the lattice is used in a second-generation nuclear power plant for a lifting operation of 20 rack frames in the factory. The field application shows that the lifting tool is easy to operate and reliable in structure, which meets the requirements for the underwater lifting of the lattice frame.

Key words: Spent fuel storage rack, Underwater lifting, Nuclear power plant, Lifting tool

0 引言

对某二代在役核电厂乏燃料水池(简称乏池)进行扩容改造时,需将乏池内现有的部分 6×6 型格架更换为高密度贮存格架^[1],以减轻核电厂乏燃料贮存压力。因此,研制一套针对乏燃料贮存格架进行水下吊装的专用工具是本项目顺利实施的关键。

经调研,目前国内外核电厂针对乏燃料贮存格架吊装工具的设计均为干式安装设计,还未有

针对乏燃料贮存格架的水下吊装工具的设计及研究。本文通过对目前乏燃料贮存格架的水下布置、吊装接口分析及安全评价,研制了一套乏燃料贮存格架的水下吊装工具,并验证了其使用效果。

1 吊装物项及环境介绍

本项目所需进行水下吊装的物项为 6×6 型乏燃料贮存格架,其主要材料为 00Cr19Ni10,总质量为 7982 kg,长、宽、高分别为 1840、1840、

收稿日期: 2020-06-22; 修回日期: 2021-01-13

作者简介: 偶建磊(1988—),男,工程师,现从事反应堆机械设计与维护, E-mail: oujianlei@163.com

4425 mm, 格架整体结构如图 1 所示。格架围板厚度为 10 mm, 其上部焊接有 4 个吊耳, 焊缝焊接高度为 8 mm, 吊耳的厚度为 15 mm, 每个吊耳上有 4 个 $\Phi 22$ mm 的通孔, 该吊耳为格架首次被干式安装于乏池时的吊装接口。

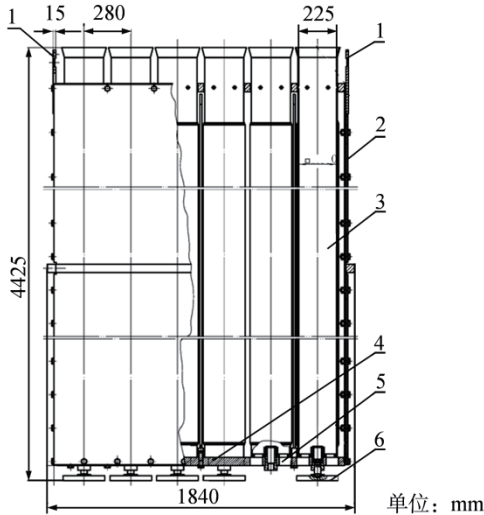


图 1 乏燃料贮存格架结构示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Spent Fuel Rack Storage Rack

1—吊耳；2—围板；3—贮存单元；4—底板；5—流水孔；6—支腿

此乏燃料贮存格架由 36 个贮存单元组成, 贮存单元的水平横截面为正方形 ($225 \text{ mm} \times 225 \text{ mm}$), 所用中子吸收体材料为镉 (Cd)。其中, 16 个贮存单元下部无支腿, 其余 20 个贮存单元下端布置圆形支腿。格架每个贮存单元均设置有流水孔, 每个贮存单元对应的底板 (厚 50 mm) 上设置有 M39 \times 3 的螺纹孔, 材质为 00Cr19Ni10, 格架底部流水孔结构如图 2 所示。

乏燃料贮存格架被安装于乏池底部的钢覆面上, 整个乏池内硼酸水的深度为 12 m。乏池大厅配置了由 10 t 重的主起升机构和 2 t 重的副起升机构组成的辅助吊车, 吊车起升高度为 7 m。

2 水下吊装方案设计

考虑到乏池内相邻的格架排列间距为 60 mm, 吊耳位于水面以下 7.5 m, 若采用 $\Phi 22$ mm 的通孔作为水下吊装接口, 则水下定位较难且操作空间较小。此外, 由于格架在硼酸水中浸泡约 20 a, 已无法对吊耳焊缝的可靠性进行安全评估, 因此

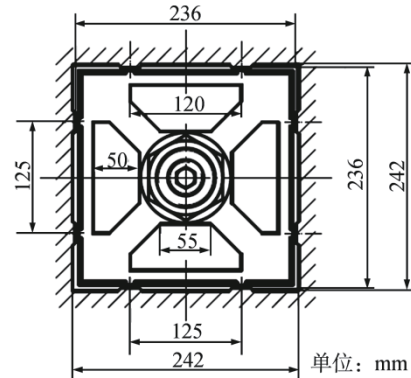


图 2 格架底部流水孔结构图

Fig. 2 Structure Drawing of Water Hole at the Bottom of Rack

吊耳通孔作为水下吊装接口被否定。

根据格架底板带有 M39 \times 3 螺纹孔的特点, 可考虑采用水下自锁的兜底式格架吊装工具来实现格架吊装。由于经过约 20 a 的乏燃料贮存, 底板螺纹孔内沉积有大量松散污染物及腐蚀剥落的金属杂质^[2], 若采用的螺栓孔通过螺纹副连接进行吊装, 存在螺纹副“咬死”的风险。

针对此情况, 本文设计了一种通过抓放格架底板流水孔来实现格架水下自锁的兜底式格架吊装工具, 既可保证完成格架的吊装功能, 又可保证水下吊装的安全性。根据格架结构及乏池运行标准, 乏燃料贮存格架水下吊装工具设计要求为:

- (1) 吊装工具 (含辅助吊具) 及格架吊装总高度不得超过 7 m。
- (2) 吊装工具的材质不得使用易锈蚀材料, 不对现场环境及水池水质造成不良影响。
- (3) 吊装工具具备足够的强度和刚度。
- (4) 吊装工具应结构可靠, 易于操作。

3 格架水下吊装工具设计

对称选取 4 个贮存单元作为吊装接口, 相邻吊装接口的中心距离为 840 mm。选取的格架吊装单元位置如图 3 所示。

3.1 吊装工具主体结构设计

每台格架吊装工具主体结构由 4 根吊装长杆和 1 个吊装横梁组成。相邻吊装长杆间的中心距为 840 mm, 每个吊装长杆底部设置 4 个吊装抓头与格架底板的吊装接口配合, 用于对格架进行兜底式抓取, 格架水下吊装工具的主体结构如图 4 所示。

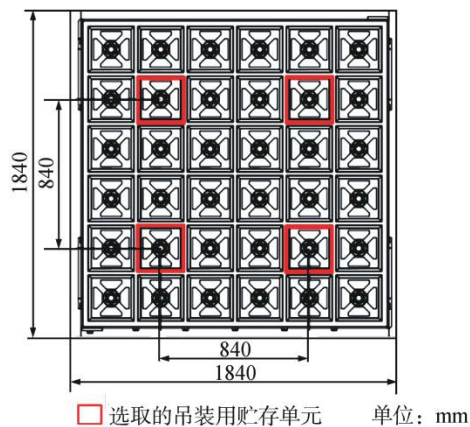


图3 格架水下吊装接口示意图

Fig. 3 Schematic Diagram of Lattice Underwater Lifting Interface

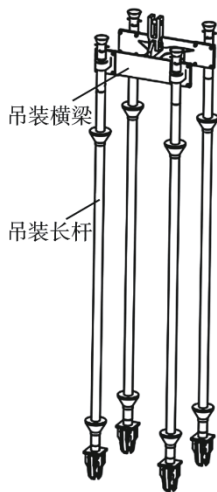


图4 格架水下吊装工具主体结构

Fig. 4 Main Structure of Lattice Underwater Lifting Tool

3.1.1 吊装长杆结构设计 吊装长杆主要用于对贮存单元底板流水孔进行水下抓取。吊装长杆主要由锥形管、推杆、吊装横梁连接盘、上部连接杆、弹簧导槽、弹簧、外管、底部连接杆、导向块、底部导槽、芯杆前端顶块、销轴、抓头组

成, 其结构如图5所示。

为保证吊装长杆在水下能顺利插入至贮存单元的流水孔内, 在每根吊装长杆的外管顶部和底部分别设置2块外径为224 mm的聚乙烯材质的锥形导向块。每个吊装长杆底部设置有4个抓头, 4个抓头呈90°分布, 每个抓头通过销轴固定。在操作时, 通过推杆和弹簧带动底部连接杆上下移动, 使芯杆的前端顶块带动与其接触的抓头围绕安装在底部导槽内的销轴进行小范围转动^[3], 以实现抓头的张开与抓紧。抓头材料为1Cr17Ni2不锈钢锻件, 芯杆前端顶块和销轴材料均为2Cr13不锈钢锻件, 吊装长杆的其余材料为316L不锈钢。

在组装吊装长杆时, 需要通过推杆使弹簧在弹簧导槽内压缩一定距离, 在克服底部连接杆及芯杆前端顶块自重的同时, 还具有使上部连接杆能在推杆滑槽内锁紧的弹力。

3.1.2 吊装横梁结构设计 吊装横梁作用为固定4根吊装长杆, 使相邻吊装长杆间的中心距控制在 $840\text{ mm}\pm 1\text{ mm}$, 并提供格架水下吊装工具与乏池辅助吊车的连接接口。

吊装横梁主要由吊装长杆固定槽、固定板、加强筋、支撑板、吊装板、吊装工装等组成, 其结构如图6所示。4根吊装长杆与吊装横梁通过吊装横梁连接盘和吊装长杆固定槽的螺栓孔进行螺纹连接。吊装横梁的所有材料均为316L不锈钢锻件。

3.2 格架水下吊装工具的辅助工具

格架水下吊装工具的辅助工具包括长杆转动工具和短杆转动工具, 其作用为配合完成吊装工具的水下锁紧及水上解锁操作。2种转动工具上端均设置有手柄, 下端设置有与吊装工具推杆匹配的凹槽, 可实现推杆的下压及转动。

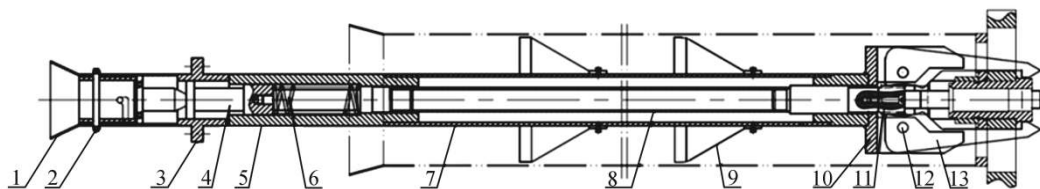


图5 吊装长杆结构图

Fig. 5 Structural Drawing of Lifting Long Rod

1—锥形管; 2—推杆; 3—吊装横梁连接盘; 4—上部连接杆; 5—弹簧导槽; 6—弹簧; 7—外管; 8—底部连接杆; 9—导向块; 10—底部导槽; 11—芯杆前端顶块; 12—销轴; 13—抓头

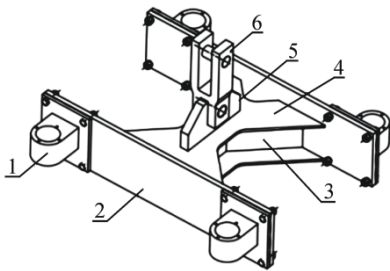


图6 吊装横梁结构图

Fig. 6 Structural Drawing of Lifting Beam

1—吊装长杆固定槽；2—固定板；3—加强筋；4—支撑板；5—吊装板；6—吊装工装

4 格架水下吊装工具使用及工作原理

4.1 抓头放开操作及工作原理

使用短杆转动工具下压推杆，使推杆从固定槽上限位沿推杆滑槽下降到达L型滑槽底部，然后将推杆顺时针转动90°后释放，此时推杆受到弹簧向上弹力作用（317 N）而向上回弹10 mm至下限位固定槽内，保证抓头始终处于打开状态。

其工作原理为：推杆下压→上部连接杆下移→弹簧压缩→底部连接杆下移→芯杆前端顶块下移→抓头绕轴打开。

4.2 抓头抓紧操作及工作原理

当吊装工具的抓头呈打开状态且进入格架吊装用贮存单元直至吊装横梁底部接触到格架顶部后（此时抓头进入流水孔），使用长杆转动工具下压推杆至L型滑槽底部，将推杆逆时针转动90°后释放推杆，此时推杆由于受到弹簧向上弹力作用（317 N）而向上回弹50 mm至上限位固定槽内，保持抓头始终处于抓紧状态。

其工作原理为：推杆上移→弹簧复原回弹→上部连接杆上移→底部连接杆上移→芯杆前端顶块上移→抓头绕轴抓紧。

图7为抓头张开及抓紧推杆的操作示意图，抓头抓紧后，由于弹簧的弹力使得推杆保持在固定槽上限位处，最终使抓头保持在抓紧状态不变。

5 设计校核及使用效果

使用ANSYS15.0软件对格架水下吊装工具进行受力分析，并依据GB 3811—2008《起重机设计规范》对抓头、销轴、吊装长杆、吊装横梁进行了力学校核及评价，结果表明，此设计满足规范要求。

在吊装工具出厂试验时，使用格架模拟件及



图7 抓头张开与抓紧时推杆操作示意图

Fig. 7 Schematic Diagram of Push Rod Operation when Grab Head Opened And Grasped

配重块进行了静载荷试验及动载荷试验，结果表明，各部件无变形，焊缝质量完好。为验证吊装工具的设计安全系数，结合格架底板变形时可能出现只有对角吊杆受力的情况，出厂试验增加了只使用2根吊杆（对角吊杆）吊装格架的动静载荷试验，结果表明，各部件无变形，焊缝质量完好。

在历时2 a的某二代核电厂2个机组的乏池改造中，共使用该水下吊装工具吊装格架20台。现场经验反馈，此吊装工具的抓头抓取及张开灵活，可根据推杆的方位有效掌握吊具的锁紧状态。在吊装工具每次入水吊装作业前，需通过目视检查吊装工具主要焊缝及抓头，确认焊缝无裂纹、吊杆无变形。在完成20台格架吊装作业后，对关键焊缝进行了渗透（PT）检查，检查结果表明，焊缝无裂纹，结构完好。

6 结论

本文所设计的乏燃料贮存格架水下吊装工具采用了水下导向定位及兜底抓取技术，具有操作方便、结构合理、安全可靠等特点。通过使用该工具完成对20台格架的水下吊装作业，证明该吊装工完全满足水下吊装需求。乏燃料贮存格架水下吊装工具的研制，是本次乏池扩容改造工作顺利完成的關鍵，此吊装工具可推广应用于国内其他二代核电厂乏池扩容改造或格架退役项目中。

参考文献：

- [1] 赵登山, 谢小明, 李福春, 等. 乏燃料水池贮存格架水下安装工艺研究[J]. 核安全, 2019, 8(3): 25-30.
- [2] 罗文广, 偶建磊. 核电厂乏燃料贮存格架水下去污装置研制[J]. 核动力工程, 2019, 40(5): 146-149.
- [3] 王立德. HFETR堆内燃料元件吊装万向工具研制[J]. 核动力工程, 1999, 20(4): 369-372.

（责任编辑：周茂）