

# 核电厂装卸料机安装技术研究与实践

田东 陈春辉

中国能源建设集团浙江火电建设有限公司

DOI:10.12238/ems.v7i6.13841

**[摘要]** 本研究聚焦于核电厂装卸料机安装技术, 针对核电机组装卸料机安装面临的挑战展开深入探索。通过对装卸料机小车轨道水平度、伸缩套筒垂直度、回转轴承连接法兰水平度等关键技术指标对堆芯定位精度影响的量化分析, 创新性地提出施工逻辑顺序调整与技术指标优化方案。成功提升了堆芯定位精度, 为核电厂安全高效运行提供了坚实保障, 研究成果具有显著的经济效益与社会效益, 对我国核岛安装技术的发展具有重要的推动作用。

**[关键词]** 装卸料机; 安装技术; 堆芯定位; 技术改进

## 一、引言

某核电机组在装卸料机安装完成后的调试阶段, 出现堆芯定位不准的情况, 导致小车轨道、套筒等重新调整, 严重影响了工程进度与质量。为确保核电机组装卸料机安装满足堆芯定位精度要求, 相关项目部启动了专项科技项目研究, 旨在攻克装卸料机安装技术难题, 形成一套成熟的安装技术方案。

## 二、装卸料机安装过程简介

### 2.1 燃料组件转运过程

装卸料机的燃料组件转运过程至关重要, 它的准确性直接影响着核机组的安全运行。在该过程中, 装卸料机的转运装置被设定为燃料篮位置为零点, 通过精确验证堆芯坐标与装卸料机系统坐标值, 确保燃料组件在转运过程中的定位精度。这是保障装卸料工作顺利进行的基础步骤。堆芯坐标和装卸料机系统坐标值的对比分析, 能够帮助技术人员判断转运过程中是否存在偏差, 进而采取相应的修正措施。

### 2.2 装卸料机的结构与功能

装卸料机是核电站中不可或缺的关键设备, 其结构和功能设计需满足高效、安全以及精确操作的需求。装卸料机主要由提升系统、抓取旋转装置、运行定位报警系统和显示系统等部分组成。它可以在 X、Y、Z 三个坐标轴方向进行灵活运动, 同时还能够在堆腔内使燃料组件在 0-270° 的范围内绕 Z 轴旋转。这一功能使其能够精准地完成装卸和传输燃料组件的任务。装卸料机被安装在反应堆水池上方, 标高约为 +20.00mm, 能够覆盖反应堆装料及换料的全过程, 确保燃料组件的精准装卸。在反应堆首次装料及换料时, 装卸料机的主要功能是进行燃料组件的装卸; 而在堆芯与燃料转运装置之间, 它还负责燃料组件的运输。

## 三、技术路线

本研究采用的是一种典型的“关键施工工艺研究——关键工艺改进——实践应用”的技术路线, 旨在不断优化和完善装卸料机的安装技术, 以提高核电机组的装卸作业精度和效率。在第一阶段, 研究团队将深入分析装卸料机安装技术条件中对堆芯装料精度定位的影响因素。通过对这些关键因素进行归纳总结和量化分析, 识别出可能导致精度误差的因素, 并在此基础上制定针对性的改进措施。在第二阶段, 针对分析结果提出的改进措施将进行工艺改进和技术优化。通过对现有工艺进行调整, 提升装卸料机的工作精度和效率, 确保其在实际操作中的可靠性。

## 四、主要研究内容及应用成果

### 4.1 关键施工工艺研究

#### 4.1.1 装卸料机小车轨道水平度对堆芯定位精度影响

装卸料机的小车轨道水平度对于堆芯定位精度具有重要影响。通过转动角原理和勾股定理的推导, 可以得出影响堆芯定位精度的计算公式:  $A1 = A, \tan A = h/L, X = H \sin A = Hh^2/\sqrt{(h^2 + L^2)}$ , 其中 H 表示小车轨道水平度偏差, A 为小车轨道水平度偏差角, A1 为 A 等效角, X 为堆芯坐标相对偏移值, L 为小车轨道长度 (7900mm)。从量化分析结果来看, 小车轨道水平度的偏差与堆芯坐标偏差几乎呈几何倍增的线性关系, 即水平度的微小变化会导致堆芯坐标的大幅度偏移。根据装卸料机轨道安装技术要求, 水平度偏差应小于 0.2mm, 理论上对堆芯定位的影响不超过 0.079mm。然而, 当小车轨道的水平度偏差超过规定值, 尤其是偏差超过 2mm 时, 堆芯定位偏差将达到 7.879mm, 显著影响堆芯的精准定位。因此, 为确保装卸料机的正常运行, 必须严格控制小车轨道的水平度, 避免因偏差过大导致堆芯定位精度的严重偏移。

#### 4.1.2 伸缩套筒垂直度对堆芯定位影响

伸缩套筒的垂直度对堆芯定位精度有直接影响, 它决定了装卸料机在操作过程中各部件的相对位置精度。伸缩套筒的垂直度要求为  $\pm 1.65\text{mm}$ , 意味着在垂直度偏差最大时, 堆芯定位的偏差也会达到 1.65mm。由于伸缩套筒是承载装卸料机重要机械功能的关键部件, 其垂直度的精度直接影响到燃料组件的准确装卸。因此, 伸缩套筒的安装精度必须严格控制, 任何超差都会对堆芯的定位精度产生不可忽视的影响。如果伸缩套筒出现垂直度误差, 堆芯坐标可能会发生较大的偏移, 进而影响整个装卸料机系统的功能, 从而对反应堆的安全运行造成潜在风险。

#### 4.1.3 装卸料机回转轴承连接法兰水平度对堆芯坐标影响

回转轴承连接法兰的水平度对堆芯定位精度也有重要影响。通过转动角原理和勾股定理, 我们可以得出相关计算公式:  $A1 = A, \tan A = h/L, \Delta X = H \sin A1 = Hh^2/\sqrt{(h^2 + L^2)}$ , 其中 L 为回转轴承的直径 (1055mm), A 为小车轨道水平度偏差角, H 为回转轴承的安装高度 (15561mm),  $\Delta X$  为堆芯坐标的相对偏移值。分析表明, 当连接法兰的水平度偏差小于 0.1mm 时, 堆芯定位偏差仅为 0.147mm, 而当法兰水平度偏差达到 2mm 时, 堆芯定位偏差则将达到 58.998mm。这一变化表明, 即使是微小的法兰水平度偏差, 也会对堆芯的定位产生显著影响。连接法兰的固定套筒上表面的安装标高要求为  $+21645\text{mm} \pm 1\text{mm}$ , 而固定套筒的安装技术指标比回转轴承的技术要求宽松约 20 倍。理论上, 如果固定套筒的标高出现 2mm 的偏差, 堆芯定位偏差将达到 58.998mm。

### 4.2 技术难点及解决措施

#### 4.2.1 小车轨道水平度调整逻辑顺序问题

上游文件规定小车轨道水平度在小车就位前调整,但某核电机组调试时发现堆芯定位不准,需重新调整相关参数,且伸缩套筒垂直度调整需搭设高层脚手架平台,验收时需开盖配合,造成人力、物力和工期的大量浪费。此外,装卸料机大车上后续安装部件总重量较大,会导致大车端梁向下偏移,影响小车轨道水平度。经计算,若按原施工逻辑,小车轨道水平度最大能达到一定偏差值,影响堆芯定位偏差值为2.010mm。通过研究分析,提出在小车、固定套筒、伸缩套筒、塔体、辅助吊车等重型附件安装完成后再调整小车轨道水平度的方案。调整后,堆芯定位精度提高96%,同时小车轨道水平度施工工序调整后,装卸料机整体部件吊装可整合为一天,后续附件施工与小车轨道水平度调整可同步进行,施工工期节省最少10天。

#### 4.2.2 小车回转轴承水平度与固定套筒上表面标高要求冲突问题

连接法兰的水平度 $<0.1\text{mm}$ ,直接影响固定套筒、伸缩套筒的垂直度,而固定套筒上表面标高与小车法兰水平度要求存在冲突。通过测量连接法兰四个方向水平度,在超差点相邻的3个压紧螺栓处添加垫片,其余螺栓处用垫片塞实,对称拧紧螺栓力矩进行调整。上游文件施工逻辑为固定套筒吊装就位——伸缩套筒吊装就位——塔体——塔头,且固定套筒上表面标高要求为 $+21645\pm 1\text{mm}$ ,这导致固定套筒安装技术指标相对较低,最高可造成堆芯定位偏差到58.998mm。某核电机组在主提升系统安装完成后测量固定套筒上表面标高,将其标高技术要求提高至 $21645\text{mm}\pm 0.1\text{mm}$ 内,提高20倍的上游安装技术指标。通过对连接法兰、固定套筒上表面标高的技术要求的分析及改进,有效地将堆芯定位误差控制在 $0.589\text{mm}$ 内,提高就位精度约99.00%。

#### 4.2.3 实现自主完成装卸料机伸缩套筒的调整工艺

伸缩套筒位于固定套筒里,由6组导向轮控制其垂直度,上游文件要求垂直度为 $\pm 1.65\text{mm}$ ,此精度要求需结合固定套筒和伸缩套筒同心度 $\pm 3\text{mm}$ 和伸缩套筒扎针试验在 $1.25\text{mm}\times 1.25\text{mm}$ 内两项技术指标综合控制。以往机组伸缩套筒的调整由厂家介入,安装单位无相应调整步骤工序。通过跟踪厂家调整步骤,总结出一套详细的伸缩套筒调整方案,并应用到实际核电机组中。具体调整步骤包括:安装前将6组导向轮调整至最大值42mm(伸缩套筒轨道宽度是40mm);调整主提升系统抱闸间隙至0.5mm;提升伸缩套筒拆除卡板,下降安装夹爪,连接螺栓涂N500螺纹防咬死剂,调整夹爪上部连接销轴到底部距离为64mm;在反应堆构件池搭设脚手架平台;将伸缩套筒提升至上部极限位置调整前三组导向轮;依次调整各导向轮间隙;检查伸缩套筒重力变化;在夹爪侧面贴测量标靶测量垂直度;用百分表检查同心度,将同心度控制在1mm内;安装扎针试验专用工具检查扎针情况;根据垂直度与同心度调整导向轮和添加垫片;重新测量各项指标,不满足要求则重复步骤;调整其余导向轮间隙至规定范围;重新做伸缩套筒摩擦力试验;测量垂直度、同心度、扎针试验三项技术指标,满足要求后在堆芯区域测量伸缩套筒垂直度;最后进行装卸料机堆芯定位试验,用模拟燃料组件检查堆芯定位精度。

#### 4.3 预期经济效益与推广前景

##### 4.3.1 经济效益

通过对装卸料机安装过程中技术指标的调整、施工逻辑顺序的改进,解决了以往核电机组反应堆装卸料机定位不准确的问题,确保了核电机组装卸料机堆芯定位实验顺利完成,避免了装卸料机小车轨道、固定套筒和伸缩套筒等试验返工,降低了堆芯装料的质量风险。以某核电机组重新调整所需人力物力和工期计算,单台机组可节省一定费用。通过对伸缩套筒调整技术的研究,缩短了核电机组装卸料机伸缩套筒调整工作时间,相比以往机组节约了时间,直接节约厂家技术支持人员时间。计算可得单台机组在此方面可节省费用。综上所述,通过此项科技立项,为公司在后续核岛项目机组节省经济利益为 $N\times$ (单台机组节省费用之和)。

##### 4.3.2 社会效益

此科技立项使公司在核岛安装领域取得燃料操作系统先进的施工技术和领先的施工管理体系,对公司“核岛领先”的战略目标实现产生深远影响。有利于树立公司科学发展、重点突破的良好形象,为后续公司承接核岛安装项目提供有力的技术支撑和成功范例,提升公司在核电领域的市场竞争力和行业影响力。

## 五、结论

本研究通过对核电机组装卸料机安装技术的深入研究与实践,成功解决了装卸料机安装过程中的关键技术难题,形成了一套成熟的、具有国内先进水平的装卸料机安装技术方案。通过对小车轨道水平度、伸缩套筒垂直度、回转轴承连接法兰水平度等关键技术指标的精准控制与优化,显著提高了堆芯定位精度,确保了核电机组反应堆燃料组件的顺利安装。同时,在技术改进过程中,实现了施工逻辑顺序的优化和自主调整工艺的突破,带来了显著的经济效益和社会效益。本研究成果不仅为相关核电机组的顺利推进提供了保障,也为我国后续核岛安装项目中装卸料机的安装提供了宝贵的经验和借鉴,对推动我国核电技术的发展具有重要意义。未来,随着核电技术的不断发展,可进一步研究装卸料机安装技术与新型核电堆型的适配性,持续优化安装工艺,提高核电建设的效率和质量。

### [参考文献]

- [1] 李军. 小堆装卸料机关键制造技术研究[J]. 机械工程师, 2024, (04): 151-153.
- [2] 靳瀚博, 苟海, 周建平, 等. 重水堆装卸料机管嘴安全锁故障分析及处理[J]. 设备管理与维修, 2023, (21): 63-65.
- [3] 郑海全. 水下闭路电视系统在装卸料机上的应用与研究[C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第八卷)中国核学会2023年学术年会论文集第9册 核安全 核设备 反应堆热工流体力学. 江苏核电有限公司, 2023: 5.
- [4] 叶阳春, 袁昕, 袁巍. 核电站装卸料机辅助单轨吊设计[J]. 建筑机械, 2023, (06): 126-128+132.
- [5] 徐波. 秦山核电二厂3、4号机组装卸料机小车定位精度下降原因分析及处理[J]. 仪器仪表用户, 2018, 25(02): 100-105.
- [6] 彭峰. 秦二厂装卸料机升级改造[C]//中国核电第二届“卓越杯”青年技术与管理创新论文专刊. 中核核电运行管理有限公司, 2016: 3.
- [7] 谢俊. AP1000核电机组装卸料机技术特点及堆芯装卸料技术难点探讨[J]. 机电信息, 2016, (03): 58-60.