

重水堆重型设备开顶法吊装

The Open-top Lifting Method for Heavy Equipments in CANDU6 Project

刘本利

(中国核工业第二三建设公司秦山坎杜项目部, 浙江海盐, 314300)

摘要 介绍了开顶法吊装的先决条件、吊装方法及安全技术措施, 并与传统的吊装工艺进行了对比, 同时也指出了开顶法吊装中存在的问题, 对今后的核电施工有一定的借鉴意义。

关键词 核电站 大型设备 吊装

Abstract: This paper analyses the prerequisites, lifting method and safety measures for open-top lifting in CANDU6 project, and makes comparison between the open-top lifting method and the traditional method, points out some problems in this new technique. It is helpful for nuclear power plant constructions in the future.

Key words: Nuclear power plant Heavy equipment Lifting

1 概述

秦山三期是我国引进的第一座重水堆核电站, 每个反应堆厂房有主要工艺设备20余台, 如: 蒸汽发生器(简称蒸发器)、稳压器等。这些设备庞大笨重, 而反应堆厂房内空间有限, 如果它们不能迅速就位, 必将在拥挤的反应堆厂房内占用大量空间而妨碍其他专业施工; 此外, 蒸发器等设备处在电站建造计划的关键线路上, 其安装工期的长短将直接影响整个电站的建旌。淞S捐顼ANDU6型核电站反应堆厂房内没有特大桥式吊车, 常规施工一般是在反应堆厂房穹顶施工完后, 通过厂房筒体上预留的开口, 将设备水平运入厂房, 再用临时钢结构及卷扬机等设施吊装蒸发器等设备。这些临时吊装设施重达130余t, 制作、安装工期长, 机械化程度低, 而且主设备占用厂房内大量空间, 影响其他专业施工。而在秦山三期工程大型设备吊装中, 我们采用了新式吊装工艺--开顶法吊装: 即在厂房封顶之前, 利用一台650 t履带式起重机将蒸发器等大型设备从厂房顶部直接吊装就位。由于这种工艺施工机械化程度高, 缩短了主设备的吊装工期, 而且主设备不再占用反应堆厂房内狭窄的施工空间, 可以尽早安装慢化剂系统和管道、电气等系统。这样, 关键线路上原先因受空间限制而必须采用流水施工的工序改成了平行施工工序, 从而缩短了工期。据《核科学与工程》第21卷第2期介绍, 开顶法工艺有望使工期缩短6个月, 产生经济效益16亿元。这种工艺不仅在我国首次采用, 而且在世界CANDU6型核电站施工中也是首开先河。为指导施工, 我们研究开发了开顶法吊装的成套技术, 包含总体规划、施工组织、安全控制、专用机具设计制造与检验、CAD辅助设计应用等一系列处于国内或国际先进水平的技术。这些技术经过实践检验, 具有良好的安全性和可操作性, 它不仅可在CANDU6型重水堆核电站中直接采用, 而且对于其他核电站和民用工程建设也具有重大参考价值。

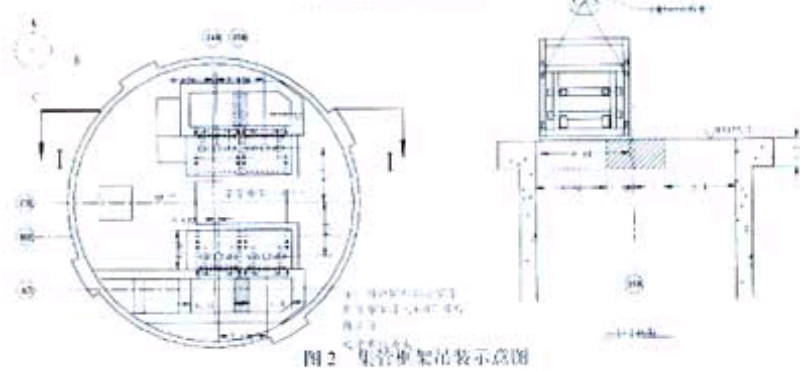
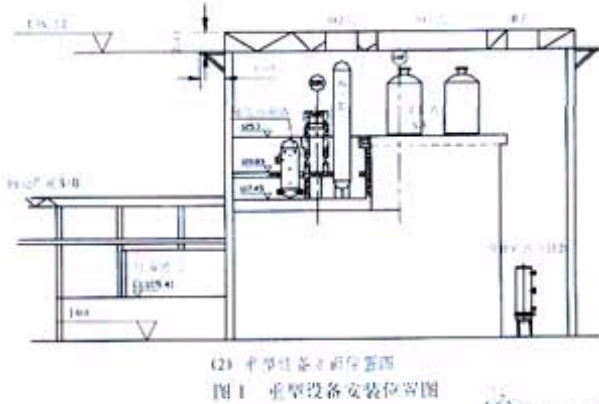
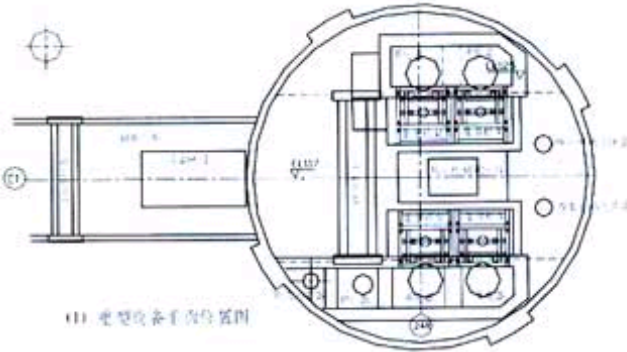
采用开顶法吊装的30 t以上主要工艺设备见表1, 设备安装位置见图1。

表1 开顶法吊装30 t以上设备清单(单堆)

设备名称	数量(台)	设备单重(t)	设备外型尺寸(m)
蒸汽发生器(简称蒸发器)	4	220	Ø3.9×19.3
除气冷凝器	1	49	Ø2.23×7.42

综 述
核 电 设 计
工 程 管 理
工 程 建 造
运 行 维 护
核 安 全
核 电 前 期
核 电 论 坛
核 电 经 济
核 电 国 产 化
质 量 保 证
核 电 信 息

60 t桥吊	1	63.61	21×6
稳压器	1	103	Ø2.13×16.15
设备闸门	1	130	Ø7×13
反应性机构平台	1	41	6.1×4.6×1.2
慢化剂热交换器	2	56	Ø1.93×10.37
给水集管框架	4	41	7.29×6.61×2.92
100 t桥吊	1	55	13.4×6.7×3.4
停堆冷却热交换器	2	30	Ø1.77×6.35



2 先决条件

2.1 场地及土建条件

- (1) 反应堆厂房施工到EL136.12 m（地面标高约EL100 m）。
- (2) 集管框架吊装前蒸发器室EL125.30 m隔墙不可浇筑，否则通道太小，难于就位（见图2）。
- (3) 除气冷凝器吊装推迟到临时顶盖拆除之后。
- (4) 吊装蒸发器B04时，妨碍LR1650吊车吊臂回转的部分滑模平台必须拆除。
- (5) 辅控室、重水提纯塔、应急供电室、ECC.HP. BUILDING等负挖处回填至EL100 m，并压实处理完毕。

(6) 吊车行走及回转范围内土建塔吊及其他障碍物已拆除，道路平整完毕。其中2号塔吊必须在2号堆蒸发器吊装前拆除。

(7) 地下设施已采取保护措施。

(8) 吊车第三站位点处电缆沟回填完毕，地面经过压实，满足吊装作业要求。

2.2 机具条件

现场需有一台650 t起重机（LR1650型履带起重机）。钢丝绳、蒸发器吊具、翻转支架、平衡梁等设计制造完毕，并经过检验，达到质量要求，其中蒸发器吊具及吊索、连接件需进行拉力试验。

2.3 人员及组织

参加施工的人员进行了培训，并培训合格；重型设备吊装前应建立相应的组织机构，统一指挥，明确分工，各负其责，保证吊装工作安全高效地进行。

2.4 其他条件

吊装的安全技术措施已经落实；各设备吊装程序及其他文件已经审批通过；天气条件：无雨、雾，风力小于5级（风速约8 m/s）。

3 机具及厂房参数

本方案选用的主要吊装机械为一台LR1650履带式起重机。下文提到的LR1650起重机站位次数、设备数量、安装时间等均按一个堆计，如未特别说明均以1号堆为例。

3.1 LR1650吊车参数

3.1.1 吊臂组合形式及吊车性能

本方案选用的吊臂组合形式为SDWB，其中S为吊车主臂，长49 m；D为后部桅杆，长42 m；W为副臂，长49 m；B为尾部悬挂配重，根据吊车工作状态决定其重量；主臂（S臂）仰角：84°。

在以上组合状态下，吊车工作半径 $R=24\sim 52$ m，起重能力为330~153 t。

3.1.2 吊车索吊具参数

吊钩：选用起重能力为520 t的吊钩。吊钩及滑轮组自重12.1 t。

起重跑绳：穿绕2×9股，此时起升卷扬机最大起升能力为283.96 t。吊钩至地面的最小距离约为1.6 m（双卷扬机，每台卷扬机最大容绳量按980 m计）。

3.1.3 吊装蒸发器时吊车工作参数的选择

在几十台重型设备中，蒸发器吊装最为困难。蒸发器吊装就位时，应计入起重机械荷的重量有以下几部分：

- (1) 蒸发器重：220 t
- (2) 蒸发器专用吊具重：3.5 t
- (3) 520 t吊钩及滑轮组自重：12.1 t
- (4) 应计入的起重跑绳重：8.2 t

吊车总载荷为243.8 t，考虑到一些可变因素及起重机负重行走等不利条件，对吊车额定起重量及工作半径作以下要求：

(1) 蒸发器吊装就位时：吊车额定起重量应不小于266 t，此时吊车工作半径不大于36 m，但也不得小于24 m（吊车允许的最小工作半径）。

(2) 蒸发器起吊时：由于翻转竖立用的抱箍等设施尚未拆除，吊车受力大，故要求吊车额定起重量不小于277 t，此时吊车工作半径不大于35 m且不小于24 m。

蒸发器吊装时，应记录吊车载荷显示器上显示的数据，如果和以上数据相差过大则应中止作业。

3.2 反应堆厂房及临时顶盖参数

反应堆厂房及临时顶盖外型参数见图3，后文中提到的坐标值均以图中所示坐标系为准。

临时顶盖为钢结构件，重约190 t，顶面覆盖铁皮及防雨棚布，顶盖上有设备吊装孔。

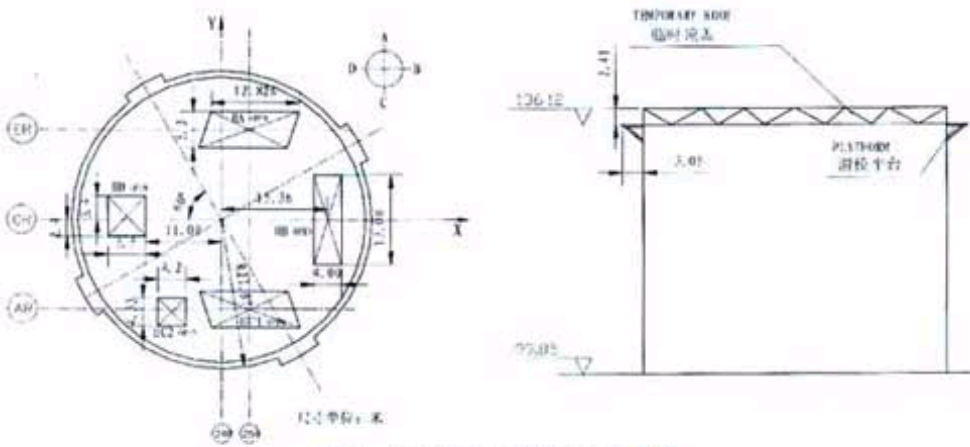


图3 反应堆厂房及临时顶盖示意图

3.3 吊装过程空间余量控制

为便于操作，对吊装空间余量有以下要求：

R1650吊车吊臂与厂房的最小距离：取1 m；

重与辅助厂房的最小距离：取1 m；

带与厂房的最小距离：3.7 m；

余情况空间余量：按《起重机械安全规程》规定，取400 mm。

4 吊装方法

4.1 概述

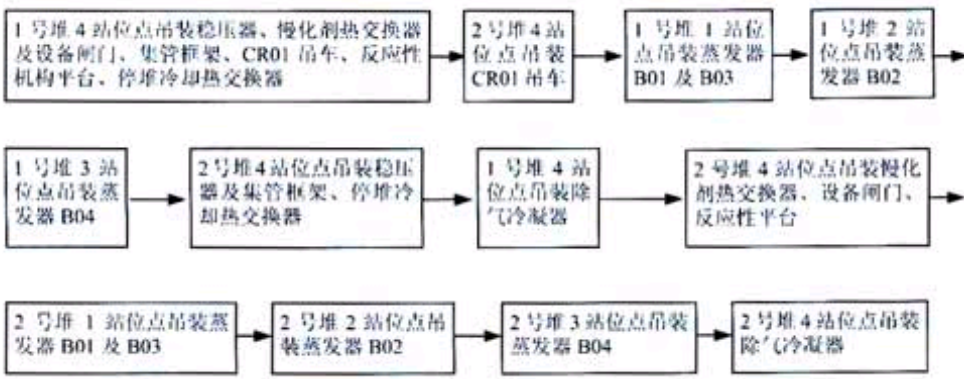
根据合同规定，在R/B（反应堆厂房）安装的主要机械设备必须采用开顶法安装，为适应该施工方法必须选用一台重型起重机（LR1650吊车）将设备吊起越过R/B环墙。

按吊装方法的不同，将这些设备分为直接吊装就位的设备16台和不能直接吊装就位的设备6台。

可直接吊装就位的设备如：蒸发器，稳压器，设备闸门，慢化剂热交换器，除气冷凝器。

不能直接吊装就位的设备如：集管框架，停堆冷却热交换器。

LR1650吊车在每个堆各有4个站点（零星吊装任务不计），它在各站点之间的调动情况见下图。



4.2 吊装平面布置说明

在保证起重量满足吊装要求的前提下，LR1650吊车站位点的平面布置应遵循以下原则：

- (1) 尽量减少对土建承包商工作的影响，如：减少塔吊拆除工作及场地回填等工作。
- (2) 吊车站位点尽量避开负挖回填区并远离沟坑等危险区域。
- (3) 尽量减少吊车站位点数，安装时间相近的设备安排在一个站位点吊装，以减少吊车移动及地面处理工作量。
- (4) 为保证安全，便于操作，并减少地面处理等的工作量，应尽量避免吊车带载行驶及带载变幅操作；并尽量增大吊车与建筑物之间的距离。

经综合考虑，LR1650吊车在1~4站位点可将全部重型设备吊装就位（或吊入厂房）。

4个站位点的位置及可吊装的设备见表2。

表2 LR1650吊车吊装设备清单

站位点	吊车回转中心坐标 (m)	可吊装的设备		吊装结果
		名称	位号	
1	(29.37, 25.44)	蒸汽发生器	B01	直接就位
			B03	直接就位
			B04	起吊
2	(30.3, 15.1)	蒸汽发生器	B02	直接就位
3	(31, 6.3)	蒸汽发生器	B04	最终就位
4	(-3.13, 34.29)	稳压器	TK1	直接就位
		设备闸门	2160	直接就位
		慢化剂热交换器	3211HX1	直接就位
			3211HX2	直接就位
		除气冷凝器	TK2	临时顶盖拆除后直接就位
		集管框架 (4台)		经临时顶盖HA和HC孔吊入R/B
		CR01吊车		在临时顶盖上新开一孔后直接就位
		反应性机构平台		同CR01吊车
停堆冷却热交换器		经蒸发器室吊入R/B		

注：

- (a) 表中所用坐标系见图3。
- (b) B04蒸发器吊装时，LR1650吊车须吊着蒸发器由1站位点行驶到3站位点。由于辅助厂房地下室深约7m，为避免吊车倾覆危险，3站位点应尽量远离辅助厂房，经综合考虑，取3站位点坐标为(31, 6.3)，此处离辅助厂房较远，但地面处理量较大，吊车站位点处的电缆沟必须回填到EL100 m，并夯实。
- (c) LR1650吊车易于移动，故4站位点的坐标可按现场条件在小范围内作适当调整。

4.3 吊装方法简述

据上文分类，将这些设备吊装方法分述如下：

4.3.1 用LR1650吊车不能直接吊装就位的设备

由于临时顶盖或其他原因，致使部分设备用LR1650吊车不能直接吊装就位。现将这些设备的吊装方法简述如下：

4.3.1.1 集管框架

首先，将集管框架用LR1650吊车经蒸发器室（Boiler Box）吊入R/B厂房EL100层，然后参考韩国月城（Wolsong）核电站的施工经验，用4台20 t倒链将其吊装就位，具体方法如下：

EL114.63 m集管安装用吊架上设临时滑轨，集管框架吊起后可在此滑轨上水平移动（见图2）；

滑轨上设4台20 t倒链（起升高度12 m）；

倒链将集管框架吊起，直至其底部高于排管容器顶部；

两台5 t倒链水平拖拉集管框架，使其平移到就位点（由于受排管容器的影响，集管框架不能直接吊装就位，必须水平移动，见图2）。

由于集管框架须经蒸发器室吊入R/B厂房EL100 m层，而且集管框架外型尺寸较大（7.29×6.61×2.92 m），蒸发器室顶部尺寸较小（6.54×4.68 m），故集管框架吊入前蒸发器室隔墙不可浇筑（见图3）。集管框架必须竖直吊入蒸发器室，因而需特别注意：集管框架竖直吊装时，吊耳的受力方向与原设计的受力方向不同，因而吊装前必须重新设计、焊接吊耳，以免发生危险。

4.3.1.2 停堆冷却热交换器

用LR1650吊车将停堆冷却热交换器经蒸发器室吊入R/B，然后平移就位，由于停堆冷却热交换器安装平台位于蒸发器室墙体侧面，故吊装前须对此平台采取临时措施。

4.3.2 可用LR1650吊车直接吊装就位的设备

4.3.2.1 蒸发器

蒸发器为立式安装的设备，吊装前需先将其翻转至竖直状态。首先在蒸发器底部用翻转套环箍紧，注意安装套环时必须贴近设备上焊接的剪力块（止挡块），以防套环滑动（此套环不靠摩擦力工作，沿蒸发器轴线方向的力由蒸发器上焊的剪力块承受，故此套环设计较为小巧，总重约为3.5 t，连接螺栓的预紧力矩也仅为1627 Nm）。然后将套环转轴置于A形翻转支架的凹槽内。而A形翻转支架事先固定在平板拖车上。蒸发器翻转立时LR1650起重机吊住顶部缓慢起升，同时拖车水平移动，逐步将蒸发器翻转到竖直状态。再通过LR1650起重机的起升、变幅、回转、负重行驶等动作将4台蒸发器通过临时顶盖HA及HC1孔吊装就位。

4.3.2.2 设备闸门、稳压器、慢化剂热交换器

设备闸门位于辅助厂房和主厂房交界处，根据施工进度计划，设备闸门吊装时厂房尚未封顶，故也可用开顶法直接吊装就位。

稳压器也为立式安装的设备，吊装前也需先翻转至竖直状态。由于稳压器重量仅有103 t，故可采用LR1650吊车与现场已有的120 t吊车抬吊翻转。稳压器翻转前先装好吊装用套环。套环安装于设备重心上，贴紧设备上的剪力块，以防滑动。用LR1650吊车吊住套环，120 t吊车吊住设备底部，两台吊车同时起升一定距离后，LR1650吊车停止起升，120 t吊车逐渐降钩，将稳压器翻转至竖直状态，然后用LR1650吊车通过临时顶盖HC2孔将稳压器吊装就位。

慢化剂热交换器吊装过程与稳压器相似，它通过临时顶盖HB孔吊装就位。

4.3.2.3 除气冷凝器

根据施工进度计划，1号堆除气冷凝器吊装时间应为2000年9月15日，临时顶盖拆除时间为2000年9月18日至24日，因而必须调整施工计划，除气冷凝器吊装推迟到临时顶盖拆除之后，这样可用LR1650吊车将除

气冷凝器直接吊装就位。除气冷凝器也为立式安装的设备，吊装前也需先翻转至竖直状态，翻转竖立方法与稳压器相似。

4.3.2.4 CR01吊车、反应性机构平台

CR01吊车：由于临时顶盖顶部开孔尺寸较小（最长的HB孔尺寸为 13×4 m，而CR01吊车大梁长21.6 m），故需在临时顶盖上新增一个开孔（ 24×3.7 m），否则不但CR01吊车吊装困难，而且反应性机构平台也难以就位。

反应性机构平台：反应性机构平台由HD孔及新增的开孔可直接吊装就位，由于反应性机构平台外形尺寸为 $6.1 \times 4.6 \times 1.2$ m，而HD孔的尺寸仅为 5.5×5.8 m，新增开孔尺寸为 24×3.4 m，因而不能将反应性机构平台水平吊入R/B厂房，必须事先用两台20 t倒链将其调成倾斜状态，倾斜角度约 40° 后用LR1650吊车将其吊入R/B厂房117 m层放平，然后LR1650吊车松钩，吊钩越过临时顶盖上的钢梁从新增开孔一侧重新落到117 m层上方，此时反应性机构平台已经水平拖运2 m，重心已越过临时顶盖上的钢梁投影，可以用LR1650吊车重新起吊，直接就位。需注意的是，由于反应性机构平台上原有的吊耳仅能承受竖直拉力，而我们吊装时，设备必须倾斜，故吊装前必须重新设计、焊接吊耳。

5 安全技术措施

5.1 总体布置

(1) LR1650吊车站位点及行走所经过的区域按各设备吊装程序的要求处理妥善，必要时应使用路基板或垫以钢板；根据现场条件，LR1650吊车进行适当的模拟试车，以验证吊车性能、地面承压能力、机具可靠性、空间尺寸、指挥与操作者配合的协调性等。

(2) 指挥点应设在便于观察联系的地方。现场设急救点和警戒线。

(3) 为减少吊车负重行走次数，设备起吊前放在辅控室回填区，为防地面沉陷，必须将设备存放处夯实或垫钢板（路基板）。

5.2 吊装安全注意事项

(1) 吊装前进行详细的安全检查，并作出记录。

(2) 蒸发器吊装全过程中应密切注意吊车载荷显示器上所显示的数据，并应作记录，如果和方案中所列数据相差过大，则应中止作业。

(3) 设备正式吊装前必须试吊。先将设备吊离地面约200 mm，静止观察，进行详细的安全检查，确认无误后，才可正式起吊，检查结果应有文字记录。

(4) 吊装过程中空间距离紧张的地方，（如吊车配重与辅助厂房之间、S臂与反应堆厂房滑模之间）设专人监视，用对讲机与指挥员联络。并设人监视吊车工作状态，发现异常及时报告。

(5) 吊装过程中起升、回转、行走、变幅等动作应缓慢平稳，避免紧急起吊、制动；一般不得同时进行两个或两个以上的动作，以防给吊车增加不必要的动载荷；吊车带载行驶及吊装过程中应用拉绳防止设备晃动。

(6) 进入现场的各有关人员按规定使用劳保用品。

(7) 吊装过程中起重指挥、吊车司机和其他操作人员、监视人员应各司其职。指挥信号含义明确，动作规范。操作人员应严格执行指挥的命令，但信号不清或命令错误时应拒绝执行。各监视人员应及时向指挥反映情况，不得擅离岗位。

5.3 人员资质要求

(1) 参加吊装的人员事先应经过安全培训及工作程序培训，并培训合格。重要岗位（如吊装指挥），应取得相应的上岗资格。

(2) 所有参与吊装的人员均应熟悉中核二三公司坎杜项目部《安全手册》及国家有关安全生产的法规和其他安全规定。

5.4 工机具及材料安全要求

重要工机具及材料应事先经过检验/标定, 标识齐全, 有合格证明和其他证件, 索吊具和连接件的使用应符合安全技术法规的规定。自制的重要吊具必须进行吊重试验。

6 本方案的执行情况

为顺利实现开顶法吊装, 我们设计了吊装工作程序约20份, 特措计划约10份, 设计制作临时吊具、吊梁、加工件等10余件, 吊装试验检验10余次。由于实践前进行了详细的理论和技术准备, 吊装进展较为顺利, 到2001年7月9日为止, 采用开顶法吊装的大型设备全部吊装就位。方案执行情况较好, 吊装顺利、安全而且工期短, 无须制作安装各种临时设施, 显示了开顶法吊装的优势。以泰山三期核电站2号反应堆主设备安装为例, 蒸发器、稳压器、除汽冷凝器三者安装绝对工期(净工作时间)约34天, 而韩国月城(CANDU6型)电站3号反应堆用常规法安装同样的设备, 绝对工期却为170天, 由此可见仅单个反应堆一小部分主设备安装即可节约4个月工期。

7 开顶法与传统吊装方法的比较

7.1 传统施工方法简介

以蒸发器、稳压器为例, 韩国等的传统施工方法是在反应堆厂房B侧100 m标高(地面)开一个洞口, 将设备水平拖运到反应堆厂房内, 然后利用125 m层墙体上安装的临时钢结构及卷扬机将设备吊装就位。

7.2 开顶法施工的优势

与传统施工方法相比, 开顶法施工具有明显的优势, 这主要体现在以下几个方面:

(1) 无需制作安装钢结构及卷扬机等临时设施。韩国月城等CANDU6核电站所采用的传统施工方法, 制作的临时钢结构重达130余t, 制作安装时间达一个多月。而开顶法施工无需设计制作临时钢结构, 也无需卷扬机、滑轮组等机具, 施工安全而简洁。

(2) 施工场地开阔, 易于操作。传统吊装方法, 蒸发器必须在反应堆厂房内翻转竖立, 由于设备尺寸庞大, 空间狭窄, 在厂房内反复调整蒸发器的位置极为困难, 而且易碰伤蒸发器, 存在较大的安全隐患。而用开顶法吊装, 蒸发器可以在反应堆厂房外翻转竖立, 场地开阔, 易于操作, 便于保护设备。

(3) 部分土建工序与主设备安装平行进行, 工作面易于展开, 避免了相互影响, 缩短了工期。例如: 开顶法施工的反应堆穹顶可在地面制作, 在穹顶制作的同时, 可以安装蒸发器等主设备, 穹顶制作完后, 用LR1650吊车直接吊装就位。主设备提前就位后, 主系统和辅助系统的安装工作可以提前展开。而常规法施工是在反应堆筒体施工完后接着开始施工穹顶及堆内土建结构, 土建施工达不到一定程度就难于开始安装主设备。

(4) 开顶法吊装无需在反应堆厂房筒体上预留B开口, 提高了厂房土建结构的完整性。

(5) 缩短工期: 仅单个反应堆一小部分主设备安装即可比传统工艺缩短4个月工期。对于有2-3个反应堆, 几十台主设备的核电站来说, 开顶法施工缩短的工期是相当惊人的。而且, 开顶法施工的优点不止表现在缩短主设备安装工地上, 更重要的是它能为其他工作提前腾出工作面, 从而减少建造总工期, 常规法从厂房基板施工到反应堆达到临界需用58个月, 而泰山三期计划工期只为52个月。按目前情况保守估计, 它对压缩工期的贡献至少为4-6个月。

7.3 泰山三期开顶法施工中存在的问题

任何施工方法都不是十全十美的, 开顶法施工同样存在一些问题, 主要表现在以下方面:

(1) 施工现场必须有一台大型起重机。起重机购置需要一定费用, 以LR1650型履带式起重机(二手设备)为例, 购置、改装费约为420万美元, 约合人民币3400万元。为防雨, 必须在反应堆厂房上安装临时顶盖, 此顶盖重190 t, 制作、安装费估计为200万元人民币。以上两项费用合计约为3600万元人民币, 但与十几亿人民币的收益相比, 以上投资是很有必要的, 而且泰山三期施工完后, 大吊车仍可用于其它工程施工, 会源源不断地产生巨大的经济效益。临时顶盖所用钢材也可回收利用。

(2) 由于开顶法施工是首次在CANDU6核电站中采用, 设计、计划、协调等经验不足, 致使施工过程中产生了一些问题, 比如临时顶盖上原先只设计了5个吊装孔, 未考虑CR01吊车、反应性平台等大型设备的吊装问题, 后来应安装单位的要求临时增加了一个24×3.7 m的吊装孔(见本文4.3.2.4所述); 再比如: 主泵电机重达46 t, 且外形尺寸较大, 最好在正式穹顶施工前利用开顶法吊装就位, 但由于受多种条件

制约，无法利用开顶法吊装，类似问题限制了开顶法优势的发挥。

尽管存在某些不足，开顶法吊装仍不失为一种先进的施工方法，经总结完善后，值得在核电施工中推广应用。

[版权声明](#) | [联系我们](#) | [欢迎投稿](#)

Copyright 2003-2004 nuc-power .com Incorporated. All rights reserved.