

欧维姆核电预应力锚固系统在方家山核电的运用

李 军¹ 胡胜光² 朱万旭¹ 杨倍铸¹

(1 柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545005)

2 中国核电二二建设有限公司方家山项目部 浙江海盐 314300)

摘 要:我国核电发展已有二十多年,在2008年之前,我国核电安全壳预应力施工全部采用国外预应力锚固系统,为了推动核电预应力产品国产化,柳州欧维姆机械股份有限公司开发了核电预应力锚固系统,该系统已在方家山核电上正式使用。本文全面介绍了欧维姆核电预应力锚固系统在方家山核电的运用情况以及一些实际测量数据。

关键词:核电预应力锚固系统 方家山核电 运用

1 背景介绍

安全壳是核电站第三道安全屏障,也是最后一道安全屏障,它不仅要保证核电站内部设施的正常运转,防止各种放射性物质对外部的辐射,还要能够承受外部突发事件,如:地震、飞机撞击等对核电站的侵袭。预应力锚固系统是核安全壳结构重要的部件,除早期的一些堆型外,目前世界上建成和在建的成熟堆型,全部采用预应力锚固系统。

在方家山核电站之前,我国建好和在建的核电站全部采用国外预应力锚固系统,为实现我国核电预应力产品的国产化,欧维姆公司从2000年开始成立项目组进行专题研究,开发了适用于我国在建核电项目的K系列锚具,按照FIP标准以及国内预应力锚具的相关标准要求,K系列锚具做了大量的试验,试验时按照核电的特殊要求,增加了试验难度,各种试验结果表明欧维姆公司专为核电安全壳开发的K系列锚具的各项性能指标完全满足标准要求。

K系列锚具包括竖向束预应力锚固系统、水平束预应力锚固系统和穹顶束预应力锚固系统。

2 工程概况

方家山核电项目位于浙江省海盐县秦山镇,包括2个1百万千瓦的核反应堆,是秦山一期的扩建项目。方家山核电反应堆厂房安全壳采用后张

预应力混凝土结构,安全壳预应力钢束沿筒身和穹顶进行布置,采用后张有粘结预应力体系。安全壳预应力系统包括竖向、水平和穹顶预应力系统三部分。预应力系统钢束采用 $\phi 15.7\text{mm}$ 低松弛钢绞线,强度等级为1770MPa。预应力锚具全部采用柳州欧维姆机械股份有限公司K系列锚具。方家山核电是第一个采用国内预应力锚具进行预应力施工的核电项目。

3 竖向束预应力锚固系统施工过程

欧维姆核电竖向束预应力锚固系统采用37K型锚具,整个系统由锚固部分、承压部分和灌浆部分构成,锚固部分包括锚固块和夹片,承压部分包括承压板和喇叭口,灌浆部分包括灌浆连接器、灌浆帽和灌浆管组件。承压部分和灌浆部分除灌浆帽外都预埋在混凝土结构中。

方家山核电竖向束共用144束钢绞线,钢绞线束上端锚固在环梁顶部,标高+50.35m;下端锚固在底板廊道顶部,标高-10.28m。欧维姆核电竖向束预应力锚固系统在方家山核电安全壳上的施工包括穿束、张拉、灌浆三个阶段。

3.1 穿束

安全壳上端混凝土浇筑完毕达到强度要求,设备、人员、材料、资料准备完善,检查合格后即可进行钢绞线的穿束工作。

钢绞线盘卷放在平台后的环梁顶部,穿束流

程如下：钢绞线运至现场→钢绞线装入解线盘→解线盘支撑架安装→穿束机就位→钢绞线穿束→钢绞线切割→钢绞线外露端防护。

穿束时钢绞线通过预留孔道单根从上端往下进行，穿束前上端在承压板止口内放上锚固块，将钢绞线头套上导向套引入任一锥孔后，启动穿束机，钢绞线沿着孔道往下，出下端孔口一定长度后廊道下端人员通过对讲机通知上面人员，停止穿束，在钢绞线上端穿入夹片，将夹片推入锥孔内，留足张拉长度后用砂轮切割机切断钢绞线，按同样方法继续穿下一根，直至穿完36根（中心孔不穿）。

一束36根钢绞线全部穿入孔道后，将下端锚固块推进承压板止口用夹片固定。

图1为竖向束穿束照片。

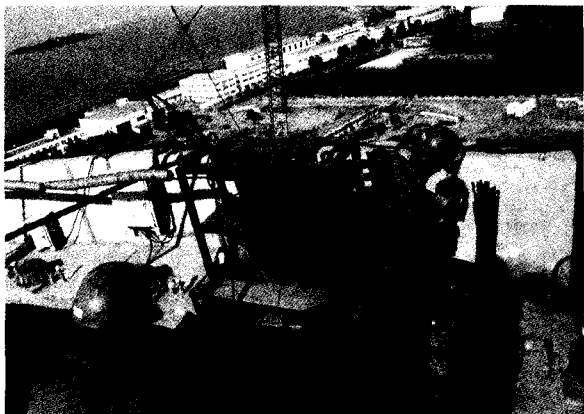


图1 竖向束穿束

3.2 张拉

竖向钢绞线束一般只在上端张拉，对于设计指定的人员闸门、设备闸门等洞口附近的弯曲钢束，则先在上端张拉，然后在下端补张拉。

张拉伸长值计算

一直线预应力筋的张拉伸长值不考虑孔道摩擦系数的影响：

$$\Delta L = N_j L / A_p E_s$$

其中： N_j —张拉端的拉力（N）；
 A_p —预应力筋的截面面积（ mm^2 ）；
 E_s —预应力筋的弹性模量；（ N/mm^2 ）；
 L —预应力筋的长度（mm）。

一曲线预应力筋的张拉伸长值有两种计算方法：精确计算法和简化计算法。

$$\text{精确计算法：} \Delta L = \frac{N_j L}{A_p E_s} \left(\frac{1 - e^{-(kx + \mu\theta)}}{kx + \mu\theta} \right)$$

ΔL —钢绞线张拉伸长值

N_j —张拉力（kN）

L —张拉端至钢绞线计算0点长度（mm），

A_p —钢绞线截面积（ mm^2 ）

E_s —钢绞线弹性模量（MPa）；

x —钢绞线段计算长度（m）；

k —管道偏差摩擦系数；

μ —摩擦系数；

θ —从张拉端至计算点曲线孔道部分切线夹角之和

简化计算法：曲线预应力孔道摩擦损失的指数曲线简化为直线。对两端张拉的曲线束，预应力筋的平均张拉力取张拉端拉力与跨中孔道摩擦损失后拉力的平均值。 $\Delta L = N_{\text{平均}} L / A_p E_s$ ；其中， $N_{\text{平均}} = N_j [1 - (KL + \mu\theta) / 2]$

一对多曲线段组成的曲线束，或一直线段一曲线段组成的混合束，可分段进行计算，然后叠加，曲线束两端张拉时，伸长值 ΔL 一般按公式算至跨中处加倍得出。

预应力钢绞线的张拉力 N_j ，由设计给出，竖向束： $N_j = 7630 \text{ kN}$

张拉设备采用欧维姆公司专为核电竖向束施工设计的YCW1000H-250千斤顶和国外P6M高压油泵。

穿束检查合格后进行限位板、工具锚等的安装，安装顺序如下：

安装限位板 → 安装导向板 → 安装千斤顶 → 安装工具锚板及工具夹片

导向板随限位板一起安装，安装好千斤顶后，将导向板从限位板处拉到千斤顶尾部，对好孔后再安装工具锚板及工具夹片，保证钢绞线在千斤顶内没有相互交叉。

图2为竖向束装工具锚板照片。

安装完成后，用高压油管将千斤顶与油泵相连，检查合格后开始张拉：

— 压力加到50bar，停止加压，检查锚固块、夹片、千斤顶等是否正常；



图2 竖向束工具锚的安装

- 压力加到100bar, 测量、记录钢绞线初始值;
- 压力加到200bar, 测量、记录钢绞线伸长值;
- 油泵卸压, 千斤顶回程;
- 压力加到300bar, 测量、记录钢绞线伸长值;
- 压力加到400bar, 测量、记录钢绞线伸长值;
- 压力加到最终要求压力, 测量、记录钢绞

线伸长值;

— 压力卸到50bar, 测量、记录钢绞线伸长值。

钢绞线伸长值 L 在以下范围内合格: $0.95L_0 \leq L \leq 1.08L_0$, L_0 为理论伸长值。

图3为竖向束张拉时照片。

实际测量值均在合格范围内, 表1为部分竖向束钢绞线实际测量伸长值与理论伸长值的对比以及钢绞线实际回缩量:

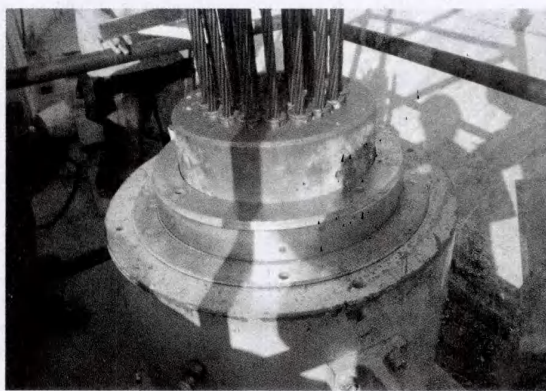


图3 竖向束张拉

表1 竖向束部分测量数据

竖向束编号	理论伸长值 L_0 (mm)	实际伸长值 L (mm)	$(L-L_0)/L_0 \cdot 100\%$ (%)	钢绞线回缩量范围 (mm)	实际钢绞线回缩量 (mm)
38	445.2	442.3	-0.65		6
107	433.6	427.5	-1.40	5~8	6
68	439.2	440.2	0.23		6
99	442	430.5	-2.60		6

3.3 灌浆

3.3.1 灌浆前的准备

砂轮切割机切断锚固块端部钢绞线, 留约30mm长, 安装灌浆帽;

检查灌浆泵, 将安全减压阀调到18bar。

3.3.2 灌浆过程

竖向灌浆主要有三个阶段, 即第一阶段灌注下部灌浆帽, 第二阶段灌注孔道, 第三阶段灌注上部灌浆帽及重力补浆装置。

图4为竖向灌浆装置。

具体操作如下:

— 各开孔的初始状况: A_2 、 A_3 关闭, A_1 、

A_4 、 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 均打开。

— 灌浆:

检测浆体流动度合格时接好 A_1 、 A_2 ;

从 A_1 泵入缓凝浆, 直至 A_4 处有浆溢出, 关闭 A_4 ;

继续压浆约5s打开 A_2 , 以平常泵速(10~14m/min)同时向 A_1 、 A_2 泵浆;

B_6 有浆流出时, 取样测流动度泵送灌浆继续。流动度合格后关闭 B_6 ;

继续泵浆至灌满整个补浆斗;

如测 B_6 浆体流动度不合格, 则继续泵送浆体, 再次取样测流动度直至流动度合格为止;

关闭 A_1 和 A_2 。

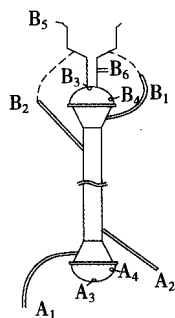


图4 竖向灌浆装置

4 水平束预应力锚固系统施工过程

欧维姆核电水平束预应力锚固系统采用19K2型锚具，整个体系由锚固部分、承压部分和灌浆部分构成，锚固部分包括锚固块和夹片，承压部分包括承压板和喇叭口，灌浆部分包括灌浆帽和灌浆管组件。

方家山核电水平束共用223束，每束由19根长约120米的钢绞线组成。欧维姆核电水平束预应力锚固系统在方家山核电安全壳上的施工包括穿束、张拉、灌浆三个阶段。

4.1 穿束

方家山1号反应堆安全壳共有4个扶壁柱，每束钢绞线的张拉端和固定端都在同一个扶壁柱上。

竖向束张拉完46束后，设备、人员、材料、资料准备完善，检查合格后即可进行钢绞线的穿束工作。

穿束流程如下：钢绞线运至现场→钢绞线装入解线盘→解线盘支撑架安装→穿束机就位→钢绞线穿束→钢绞线切割→钢绞线外露端防护。

穿束时钢绞线通过扶壁柱预留孔道单根从一端穿入，穿入前将钢绞线头套上导向套，启动穿束机，钢绞线从同一扶壁柱另一侧孔出来一定长度后，停止穿束，穿入端钢绞线留足张拉长度后用砂轮切割机切断钢绞线，按同样方法继续穿下一根，直至穿完19根。

4.2 张拉

水平束钢绞线束是在两端同时张拉。

预应力钢绞线的张拉力 N_j ，由设计给出，水平束： $N_j = 4027\text{kN}$

张拉设备采用欧维姆公司专为核电竖向束施工设计的YCW500H-250千斤顶和国外高压油

泵P6M。

穿束完成检查合格后进行锚固块等的安装，安装顺序如下：

安装锚固块及夹片 → 安装限位板 → 安装导向板 → 安装千斤顶 → 安装工具锚板及工具夹片

导向板随限位板一起安装，将导向板从限位板处拉到钢绞线尾部，安装好千斤顶后对好孔后再安装工具锚板及工具夹片，保证钢绞线在千斤顶内没有相互交叉。

图5为导向板的安装。



图5 导向板安装

水平束实际测量值均在合格范围内，表2为部分水平束钢绞线实际测量伸长值与理论伸长值的对比以及钢绞线实际回缩量。

图6为水平束张拉照片。

4.3 灌浆

4.3.1 灌浆前的准备

砂轮切割机切断锚固块端部钢绞线，留约30mm长，安装灌浆帽。

检查灌浆泵将安全减压法调到10bar。

4.3.2 灌浆过程

环向水平束的灌浆可区分为三类，即：

水平或微弯的钢束：从一端灌注缓凝浆。

往下弯曲的大垂度钢束（>1.2m）：从最低点向两端灌注缓凝浆。

往上弯曲的大拱度钢束（>1.2m）：分两次灌注，先从一端灌入，再从另一端向高处灌注，最后泌水集中在高处。4小时后用压缩空气将中段浆体排空，第二次灌膨胀浆。

表2 部分水平束张拉数据

水平束 编号	理论伸长值 L_0 (mm)	实际伸长值 L (mm)	$(L-L_0)/L_0 \cdot 100\%$ (%)	钢绞线回缩量范围 (mm)	实际钢绞线回缩量 (mm)	
					A端	B端
193	681.6	712.8	4.58	5~8	6	5
201	681.6	699.2	2.58		7	5
3	681.6	677.1	-0.66		5	5
33	672.3	696	3.53		7	7



图6 水平束张拉

5 穹顶束预应力锚固系统施工过程

欧维姆核电穹顶束预应力锚固系统采用19K1型锚具，整个体系由锚固部分、承压部分和灌浆部分构成，锚固部分包括锚固块和夹片，承压部分包括承压板和喇叭口，灌浆部分包括灌浆帽、灌浆连接器和灌浆管组件。

方家山核电水平束共用174束，每束由19根钢绞线组成。欧维姆核电穹顶束预应力锚固系统在方家山核电安全壳上的施工包括穿束、张拉、灌浆三个阶段。

5.1 穿束

按照张拉顺序，在环向水平束张拉完成187束，竖向束张拉完成140束后，设备、人员、材料、资料准备完善，检查合格后即可进行穹顶束钢绞线的穿束工作。

穿束流程如下：钢绞线运至现场→钢绞线装入解线盘→解线盘支撑架安装→穿束机就位→钢绞线穿束→钢绞线切割→钢绞线外露端防护。

穿束前将钢绞线头套上导向套，启动穿束机，钢绞线从预留孔道中穿入，从另一侧孔出来达到一定长度后，停止穿束，穿入端钢绞线留足

张拉长度后用砂轮切割机切断钢绞线，按同样方法继续穿下一根，直至穿完19根。

5.2 张拉

穹顶束钢绞线束是在两端同时张拉。

预应力钢绞线的张拉力 N_j ，由设计给出，穹顶束： $N_j = 4027\text{kN}$

张拉设备采用欧维姆公司专为核电竖向束施工设计的YCW500H-250千斤顶和国外高压油泵P6M。

穿完19根钢绞线检查合格后进行锚固块等的安装，安装顺序如下：

安装锚固块及夹片 → 安装限位板 → 安装导向板 → 安装千斤顶 → 安装工具锚板及工具夹片。

导向板随限位板一起安装，将导向板从限位板处拉到钢绞线尾部，安装好千斤顶后，对好孔再安装工具锚板及工具夹片，保证钢绞线在千斤顶内没有相互交叉。

穹顶束实际测量值均在合格范围内，表3为部分穹顶束钢绞线实际测量伸长值与理论伸长值的对比以及钢绞线实际回缩量：

图7为穹顶束张拉照片。

5.3 灌浆

5.3.1 灌浆前的准备

砂轮切割机切断锚固块端部钢绞线，留约30mm长，安装灌浆帽；

检查灌浆泵将安全减压法调到10bar。

5.3.2 灌浆方法

(1) 初次灌浆

浆体为缓凝浆。图8为穹顶束灌浆示意图。

各开孔初始状态：除 A_1 、 A_4 、 B_4 外全部关闭。

灌浆：

表3 部分穹顶束张拉数据

穹顶束编号	理论伸长值 L_0 (mm)	实际伸长值 L (mm)	$(L-L_0)/L_0 \cdot 100\%$ (%)	钢绞线回缩量范围 (mm)	实际钢绞线回缩量 (mm)	
					A端	B端
(1) 03A	315.8	307.7	-2.58		6	6
(1) 06A	311.6	314.5	0.93	5~8	6	5
(1) 03B	315.8	313.7	-0.66		7	5
(2) 03A	322.4	318.8	-1.12		5	7



图7 穹顶束张拉

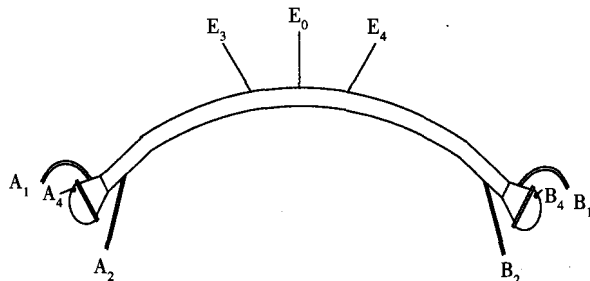


图8 穹顶束灌浆示意图

· 从A向B泵浆，排净管中积水，浆泵调至最低输出，取样测流动度10~14s合格。

· 接通 A_1 （同时从B端有两个输浆管在 B_1 、 B_2 附近候用），从低输出从 A_1 开始泵浆，至 A_4 有浆溢出，关闭 A_4 。

· 打开 A_2 ，同时从 A_1 、 A_2 处以3~8m/min的速度泵浆，并开始计时。

· 当 B_4 处有浆冒出时，关闭 B_4 及 A_1 、 A_2 并停止泵浆和计时。

· A端灌浆完成后10min，从B端向A泵浆，将输浆管接于 B_1 、 B_2 ，打开 E_3 ，并以低输出从 B_1 泵浆5s。

· 打开 B_2 并将泵速调至3~8m/min。

· 当 E_3 有浆溢出，取样测流动度合格（10~14s）时停止泵浆。

(2) 二次灌浆

· 吹气：初次灌浆3~5小时内，在 E_2 与 E_4 之间用 0.3×10^5 Pa的压缩空气吹气，先从 E_3 向 E_4 吹，再从 E_4 向 E_3 吹，保持 E_3 与 E_4 开孔之间畅通。

· 二次灌浆：在初次灌浆一周内，进行二次灌浆（浆体为膨胀浆）。 E_0 、 E_3 、 E_4 孔均打开，从 E_3 （ E_4 ）处开始泵膨胀浆，当 E_4 （ E_3 ）有均质浆溢出时，流动度10~26s，关闭 E_4 （ E_3 ）（也可从此处设置补浆装置，高度与 E_0 处的补浆装置平）。继续泵浆，当 E_0 有均质浆冒出时，测流动度合格，泵满补斗，关闭 E_3 （ E_4 ），停止压浆。过5分钟后，重复以上灌浆步骤再进行一次，使出口处冒出均质的浓浆为止。

6 结束语

作为第一个采用国内预应力锚具进行张拉施工的核电项目，方家山核电1号机组核安全壳的竖向束、水平束和穹顶束都进行了穿束、张拉、灌浆，从使用情况来看，所采用的竖向束预应力锚固系统、水平束预应力锚固系统、穹顶束预应力锚固系统是成功的，它不但完全满足各项试验要求，而且在施工过程中该锚固系统表现出了良好的锚固性能。

随着我国设计、机加工、检测水平的逐步提高，我国预应力技术的发展也迈上了一个新的台阶，欧维姆锚具在方家山核电1号机组的成功运用，表明我国预应力锚具完全能够替代进口产品，为我国的核安全壳服务。

参考文献

- [1] 《方家山核电工程预应力系统后张拉和灌浆施工方案》. 2011年4月
- [2] 宋玉普. 预应力混凝土特种结构[M]. 机械工业出版社. 2008年4月
- [3] 《压水堆核电站预应力混凝土安全壳建造规范》. 中国核工业总公司. EJ/T998-96