

# 浅谈秦山核电二期扩建4#反应堆穹顶 预应力张拉施工

杨倍铸

(中国核工业第二二建设有限公司 宜昌 443101)

**摘要:** 本文主要阐述秦山核电二期扩建4#反应堆穹顶预应力张拉施工工艺,介绍了该项目施工的特点以及主要技术创新情况。

**关键词:** 预应力 张拉力 压力值 分级张拉

## 引言

预应力混凝土结构提高了构件的抗裂能力和刚度,使构件在使用荷载作用下可以不出现裂缝或使裂缝大大减少,有效地改善构件的使用功能,提高了构件的刚度,增加了结构的耐久性。预应力混凝土结构在相同条件下,比普通混凝土构件截面小,重量轻,刚度大,抗裂性和耐久性好,能节约材料,降低造价,并能扩大预制装配化程度,可在一定范围内代替钢结构,节约大量钢材,降低成本。因此在预制构件和对抗裂有特殊要求结构的建筑工程中得到广泛应用。

秦山核电二期扩建4#反应堆由基础底板、筒身和穹顶三部分组成。基础底板为一下设环形预应力张拉廊道的圆形钢筋混凝土厚板。筒身为预应力混凝土筒体结构,内直径 $\phi = 37.0\text{m}$ ,壁厚 $0.9\text{m}$ 。在筒身外表面附有两个扶壁柱,其位置分别为 $45^\circ$ 和 $225^\circ$ ;穹顶为预应力球缺壳体,其内表面与筒身内表面由圆弧旋转曲面过渡。预应力钢束沿筒身和穹顶进行布置,分为竖向预应力系统、环向预应力系统和穹顶预应力系统,采用后张拉有粘结预应力体系。

## 1 概述

穹顶预应力系统包括174束 $\phi 102 \times 2$ 无缝钢管成孔预应力孔道和348个预应力锚头。其中174束预应力孔道分为1、2(2-1、2-3)、3共三组,每组58根,三组导管轴线之间夹角 $120^\circ$ ,每束预应力孔道又包括A、B、C三段,A段为弯曲半径相同的平面曲管,B段为直管,与灌浆连接管

相连,C段为双曲弯管,位于A段与B段之间。第1组、第2-1组预应力孔道的预应力锚头在环梁K段内,中心标高 $47.700\text{m}$ ,圆周半径 $R=19700\text{mm}$ ;第3组、第2-3组预应力孔道的预应力锚头在环梁J段内,中心标高 $46.390\text{m}$ ,圆周半径 $R=19700\text{mm}$ 。穹顶预应力孔道布置见图1。

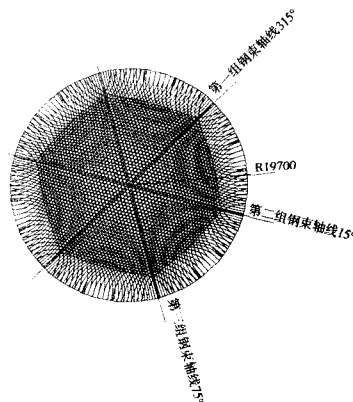


图1 穹顶预应力孔道平面布置图

## 2 材料与设备

### 2.1 材料

预应力钢绞线为低松弛高级钢绞线,必须符合BS5896-1980标准,

其性能如下:

- 钢绞线由7根钢丝组成,公称直径为 $15.7\text{mm}$ ,公称面积为 $150\text{mm}^2$
- 钢绞线为优质类,1770MPa级(极限抗拉强度)
- 抗拉强度保证值为: $265\text{kN}$ (最小破断力)
- 延伸率保证值: $4.0\%$

— 松弛保证值:  $F=0.6F_r$  1000h 1%

$F=0.7F_r$  1000h 2.5%

$F=0.8F_r$  1000h 4.5%

— 每延米的理论重量为1178g

— 钢绞线弹性模量应做到均匀。其保证率为95% (195±5GPa占95%以上, 其余5%以下应在195±10范围内)。

## 2.2 张拉设备

张拉设备采用法国Freyssinet公司生产的K500F千斤顶和配套的P6M油泵

### 2.2.1 K500F千斤顶特性

最大张拉力: 4095kN

最大行程: 250mm

闭合时千斤顶长度: 1016mm

主千斤顶直径: 565mm

主千斤顶重量: 970kg

连接千斤顶的钢束长度: 380mm

张拉油缸面积: 769cm<sup>2</sup>

回程油缸面积: 367cm<sup>2</sup>

锁闭油缸面积: 253cm<sup>2</sup>

### 2.2.2 P6M油泵特性

最大流量: 4L/min;

最大供油压力: 700Bar。

## 3 张拉施工

### 3.1 张拉力的确定

#### 3.1.1 钢绞线理论张拉力的确定

预应力钢绞线的理论张拉力 $N_j$ , 按下式计算:

$$N_j = n \times \sigma_{con} \times A_p \quad (1)$$

式中:  $n$ — 穹顶单一孔道穿入钢绞线根数, 每个孔道穿入钢绞线根数为19根;

$\sigma_{con}$ — 预应力钢绞线的张拉控制力值, 取极限抗拉强度的80%;

$A_p$ — 预应力钢绞线的横截面积。

计算得出:  $N_j = 19 \times 1770 \times 80\% \times 150 = 4035.6\text{kN}$

#### 3.1.2 钢绞线张拉油压值的确定

1) 预应力钢绞线的理论压力值 $P_j$ , 通过下式计算:

$$P_j = N_j \div A_{张} \quad (2)$$

式中:  $A_{张}$ — K500F张拉油缸面积。

计算得出:  $P_j = 4035.6 \div 769 = 524.8\text{Bar}$

2) P6M油泵上装有张拉压力表, 量程0~1000Bar, 精度级数为1.5级, 用以直接读取张拉钢绞线压力值。实际施工中, 考虑到千斤顶本身的内阻力和工作锚夹片的内阻力, 实际压力值即P6M油泵压力表读数压力值控制应将千斤顶和工作锚夹片内阻系数一并考虑进去, 从而得到最终的油泵张拉压力表读数压力值。通过下式计算:

$$P_{油} = (1 + \text{内阻系数}) P_j \quad (3)$$

其中, 内阻系数在施工前由法方Freyssinet公司人员现场利用1500mm×750mm×750mm千斤顶张拉台座, 台座两端各布置一套千斤顶张拉设备, 张拉端定为主动端, 分级张拉, 通过精密压力表读数记录主被动端张拉力。采集的数据用线性回归方程计算得出内阻系数为3.45%, 锚块、夹片的内阻系数根据Fressinet公司规定为0.5%, 计算得出最终施工时油泵压力表读数压力值:

$$P_{油} = (1 + \text{内阻系数}) P_j = (1 + 3.45\% + 0.5\%) \times 524.8 = 545.5\text{Bar}$$

### 3.2 张拉顺序

穹顶钢束张拉顺序由设计给定, 一般遵循对称张拉的原则, 以防止应力过于集中, 造成穹顶变形和混凝土开裂。穹顶174束预应力钢束分为三个大的阶段施工。穹顶第一阶段张拉约20%的钢束, 第二阶段张拉约30%的钢束, 第三阶段张拉约50%的钢束。

### 3.3 千斤顶安装

在核电预应力工程施工中, 穹顶预应力张拉施工堪称难中之难, 主要是穹顶钢束呈不规则球面状布置, 张拉区域分布在半球面下端, 张拉点多而广, 无法搭设张拉专用移动平台。以往采用的方式主要分两种: 一种为利用塔吊吊装千斤顶进行千斤顶的安装; 一种为搭设密集脚手架, 在脚手架上安装工字钢进行吊装千斤顶安装。两种方法都存在有明显的弊端, 一是塔吊吊装千斤顶安装时, 由于塔吊移动的幅度较大, 千斤顶的安装精度要求高, 很难控制千斤顶吊至合适位置,

且人员在穹顶张拉平台上面接装千斤顶受塔吊摆动幅度的影响，危险性高。二是密集脚手架钢管间距太小，造成施工空间局限，人员在脚手架内走动，来回倒运千斤顶频繁被脚手架所阻挡，需要来回拆卸、恢复脚手架，移动千斤顶非常困难。

为解决以上两种方法存在的弊端，在此两种方法的基础上，经过现场勘查分析，在综合这两种方式的基础上，创新出了一套优于上述两种方式的施工方法：利用20#工字钢加工出能悬挂千斤顶的悬臂梁起重挂架（见图2）来吊装千斤顶，悬臂梁长度1.8m，挂架后面装载2t配重，用以平衡千斤顶的重量。

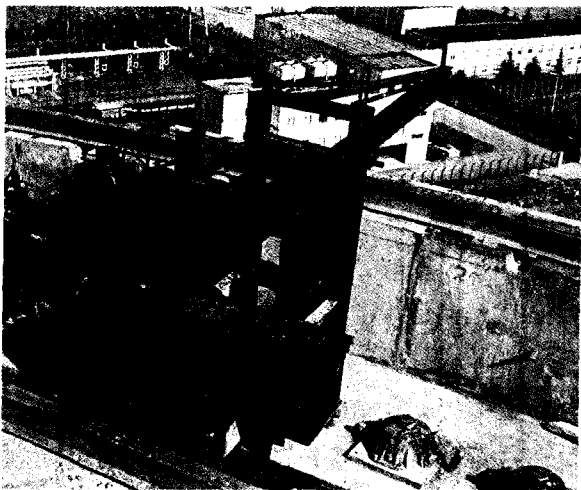


图2 千斤顶起重挂架

起重挂架安全性验算：

1) K500F千斤顶重970kg，处于悬臂梁最远端时产生的力矩为

$$M = F \times L = 0.97 \times 10 \times 1.8 = 17.46 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

2) 20#工字钢悬臂梁属于单向受弯，受弯构件强度为：

$$M_{\max} = r_x \times W_x \times f = 1 \times 237 \text{ cm}^3 \times 205 \text{ N/mm}^2 = 48.585 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

3) 20#工字钢的整体稳定性计算：

$$M_{\max} = \sigma_b \times W_x \times f \quad (4)$$

$$\sigma_b = \beta_b \times \frac{4320}{\lambda_y^2} \times \frac{Ah}{W_x} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda_y l_1}{4.4h} \right)^2} + \eta_b \right] \frac{235}{f_y}$$

$$\text{其中：} \xi = \frac{l_1 t}{bh} = \frac{1800 \times 11.4}{100 \times 200} = 1.026$$

$$\beta_b = 0.21 + 0.67 \times \xi = 0.89742$$

$$\lambda_y = l_1 / i_y = 1800 \text{ mm} / 21.2 \text{ mm} = 84.9$$

$$\sigma_b = 0.89742 \times 0.5993 \times 3 \times 1.4865 \times 1 = 2.4 \text{ N/mm}^2$$

$$M_{\max} = 2.4 \text{ N/mm}^2 \times 237 \text{ cm}^3 \times 205 = 116.604 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

4) 工字钢的挠度计算，吊运千斤顶时，工字钢自由端受集中荷载，自由端最大挠度为：

$$Y_{\max} = 1PL^3/3EI \quad (5)$$

式中P—为各个集中荷载标准值之和（kN）。

E—为钢的弹性模量，对于工程用结构钢，

$$E = 2100000 \text{ N/mm}^2$$

I—为钢的截面惯矩，可在型钢表中查得（mm<sup>4</sup>）

$$Y_{\max} = 1 \times 9.7 \text{ kN} \times 1.8^3 \text{ m} \div (2100 \text{ kN/mm}^2 \times 157.9 \text{ cm}^4) \approx 17 \text{ mm}$$

5) 挠度：悬臂端的长度=17：1800=1：105.88

按照设计规范要求，悬臂端的挠度值不应超过悬臂长度的1/200，制作起重挂架时在悬臂端上部采用加角钢三角支架解决。

起重挂架搁置在穹顶L层上，悬臂结构梁从女儿墙上向外伸出，梁上安装单轨吊，单轨吊上配置导链，施工时，先用塔吊将起重挂架吊至需要位置，千斤顶吊至起重挂架下方，利用悬臂梁下的倒链和单轨吊吊装上下左右来回移动千斤顶，一举解决了塔吊直接吊运安装千斤顶的不准确性和危险性及密集脚手架所造成的施工不便，极大地提高了施工的安全和效率，在国内同类型的施工中尚属首次采用。

### 3.4 分级张拉

#### 3.4.1 K500F千斤顶组装

K500F千斤顶包括承压盘、锁定盘、摩擦环、定位盘和千斤顶主体五个部分组成，每根钢束张拉前将此五部分一次组装在张拉钢束锚固块后。组装时保证千斤顶垂直中心线上的导引标记垂直和千斤顶完全对准承压盘中心。

#### 3.4.2 K500F千斤顶行程

K500F张拉油缸最大行程250mm，在施工中应注意，一旦施工不慎，张拉油缸行程超过千斤

顶油缸最大行程,张拉油缸将产生损坏,不能回复原位,导致千斤顶的损坏和张拉的钢绞线出现质量事故。为避免此类情况发生,施工中要求操作人员保证千斤顶张拉油缸最大行程不能超过240mm,并在千斤顶行程超过150mm后,时刻注意油缸行程情况。

### 3.4.3 张拉油压表校验

P6M油泵张拉油压表是用来控制张拉钢绞线的张拉力的直接读数装置,所以,施工中必须保证张拉压力表的准确性。张拉压力表每两星期或张拉75次(取其短者)必须送至有相关资质的检测单位进行标定使用;施工中如张拉出现异常情况、必须重新标定千斤顶。

### 3.4.4 张拉控制

每个孔道的钢绞线张拉伸长值由设计给定,张拉油压表压力值 $P_{油}$ 前面计算已经得出,在张拉时既要保证油压表读数又得保证实际伸长值在设计规定的 $0.95\Delta L_{设} \leq \Delta L_{实} \leq 1.08\Delta L_{设}$ 范围内。

$\Delta L_{设}$ —设计规定钢绞线张拉伸长值

$\Delta L_{实}$ —钢绞线实际张拉伸长值

穹顶钢束采用两端同时张拉(为加以区分,采用A端和B端来表示),即钢束两端各安装一台千斤顶,分成五级逐级进行张拉,五级 $P_{油}$ 读数分别为100Bar、200Bar、300Bar、400Bar及最终压力值545.5 Bar,张拉至每一级时都暂停张拉,测量张拉钢绞线伸长值后再行进行下一级张拉。直至张拉至最终张拉力,两端先后将工作锚夹片锚固。

根据测量数据计算:

$$\Delta L_{实} = (\Delta L1 + \Delta L1') + (\Delta L2 + \Delta L2') - (\Delta L3 + \Delta L3') \quad (6)$$

式中: $\Delta L1$ —A端油泵压力值显示为100Bar~545.5Bar钢绞线伸长值;

$\Delta L1'$ —B端油泵压力值显示为100Bar~545.5Bar钢绞线伸长值;

$\Delta L2$ —A端油泵压力值显示为0Bar~100Bar钢绞线伸长值;千斤顶安装之初没有受力,千斤顶前端无法跟承压板紧密咬合,因此伸长值无法通

过直接测量得出。所以 $\Delta L2$ 通过取压力值读数100Bar~400Bar的伸长值除以3作为0Bar~100Bar钢绞线的推算伸长值;

$\Delta L2'$ —B端油泵压力值显示为0Bar~100Bar钢绞线伸长值;计算方法同 $\Delta L2$

$\Delta L3$ —A端千斤顶内钢绞线的弹性回缩值,取固定值2.3mm;

$\Delta L3'$ —B端千斤顶内钢绞线的弹性回缩值,取固定值2.3mm;

表1为钢绞线张拉伸长值计算,图3为现场测量。

表1 钢绞线张拉伸长值计算

A端油泵压力值 (Bar)	A端钢绞线伸长值 (mm)	B端油泵压力值 (Bar)	B端钢绞线伸长值 (mm)	$\Delta L1$ (mm)	$\Delta L1'$ (mm)	$\Delta L2$ (mm)	$\Delta L2'$ (mm)
100	a	100	f				
200	b	200	g				
300	c	300	h	e-a	j-f	$\frac{d-a}{3}$	$\frac{i-f}{3}$
400	d	400	i				
545.5	e	545.5	j				
总伸长值 $\Delta L_{实}$ (mm)				[(e-a)+(j-f)] + ( $\frac{d-a}{3} + \frac{i-f}{3}$ ) - (2.3+2.3)			



图3 钢绞线张拉伸长值测量

## 4 体会

### 4.1 张拉伸长值偏差解决

张拉穹顶钢束时,设计给定伸长值 $\Delta L_{设}$ 根据计算得出,计算时所取的孔道摩擦系数为0.16,实际施工时发现由于导管安装时间较久,成孔无

缝钢管里面出现生锈现象,以及导管安装弧度跟设计理论值存在有误差,致使成孔弧度的顺畅程度与设计理论值存在差异,造成实际孔道摩擦系数大于设计理论摩擦系数,所以张拉穹顶导管时,出现钢绞线实际张拉伸长值 $\Delta L_{实} < 0.95 \Delta L_{设}$ 的情况。后经过与设计单位沟通,采取在孔道内加入200g以下石墨和适量钢绞线专用水溶性油的方法改善孔道状态,使摩擦系数满足设计要求。最终钢绞线张拉伸长值达到设计规定范围。

#### 4.2 钢绞线张拉滑丝

施工时必须定期检查千斤顶内工具锚夹片内齿磨损情况,如发现工具夹片内齿磨损严重,需要及时更换。以免在张拉时工具锚夹片不能有效咬合全部张拉钢绞线束,在张拉至最终张拉力时,导致未能有效咬合的钢绞线出现局部滑丝,伸长值明显小于设计规定值,而其他钢绞线伸长值则大于设计规定值。如果出现此种情况,证明在整体张拉力达到设计规定后,未能咬合钢绞线

单根受力明显小于本该承受的平均拉力,其它钢绞线单根受力则明显大于本该承受的平均张拉力,情况严重的将导致其它钢绞线超张拉断裂,产生安全事故和严重的质量事故。

#### 5 结论

秦山核电二期扩建4#反应堆穹顶预应力施工直接关系到核电后期反应堆过渡区和穹顶避雷装置安装施工能否按时介入,与核电如期并网发电息息相关。施工工期紧,任务重。在采用先进工艺和相关施工人员的密切配合下,最终出现一例安全事故和一例质量事故,提前一个月完成了穹顶预应力张拉施工任务,倍受业主单位好评,为以后类似施工积累了宝贵经验和打下了坚实基础。

#### 参考文献

- [1] 压水堆核电站预应力混凝土安全壳建造规范[S]. 中国核工业总公司. 1996.
- [2] 后张有粘结预应力施工技术若干问题的探讨[J]. 山东建筑工程学院学报, 2002, 02.
- [3] 后张预应力混凝土施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999

(上接第24页)

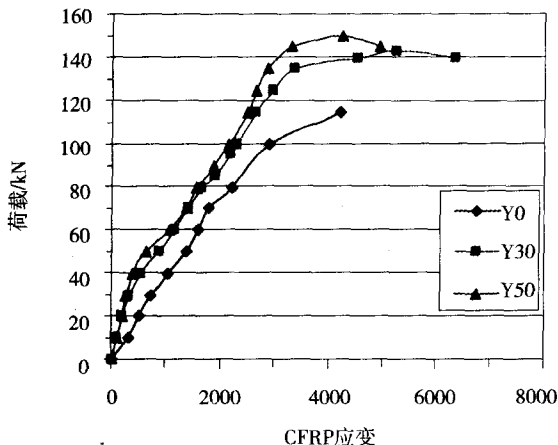


图7 CFRP的应变-荷载曲线

#### 4 结论

从本文试验结果,可以得出如下结论:

(1) 对于二次受力的构件进行碳纤维板加固,与非预应力碳纤维板加固相比,预应力碳纤维板加固可极大地提高受弯构件的开裂荷载,显著提高受弯构件的屈服荷载和极限荷载。

(2) 预应力碳纤维板材加固技术可在提高

试件刚度的同时减小试件的变形,对梁的延性有较大影响,延性有降低的趋势。

(3) 对碳纤维板施加预应力可以更好的发挥碳纤维板高强的优势,提高受弯构件使用阶段内碳纤维板强度的利用效率,利用率随初始应力增大而提高。

(4) 在试验过程中所使用柳州欧维姆机械股份有限公司的预应力碳纤维板专用锚具结构简单,易于操作,非常适用于实际工程,可大大提高施工的效率。

#### 参考文献

- [1] 侯发亮. FRP加固混凝土结构二次受力分析[J]. 工业建筑, 2004, 增刊
- [2] 曾磊. 预应力CFRP板加固混凝土梁实验与理论研究[D]. 上海:同济大学, 2005
- [3] 彭晖, 尚守平. 预应力碳纤维板加固受弯构件的试验研究[J]. 工程力学, 2008, 25(5):142-151
- [4] 金勇俊. 预应力碳纤维板加固混凝土受弯构件的试验研究[D]. 长沙:湖南大学, 2007