

核电站安全壳预应力工程

龚振斌

摘要:简要介绍了核电站安全壳后张预应力工程的相关参数,主要设备和材料使用情况,孔道摩擦试验、灌浆试验、监测系统的安装和测试、安全壳强度和密封性试验,以及现场的施工组织和质量控制。提出了几点需要关注的议题。

关键词:核电站 安全壳 摩擦试验 灌浆试验 监测系统 密封性试验

核电站核反应堆厂房安全壳是在失水事故发生时防止放射性物质进入大气的最后一道屏障。安全壳必须能承受失水事故发生时在厂房内产生的高温高压蒸汽的压力,并具有抵御小型飞机撞击和小型导弹袭击的能力。安全壳筒身直径一般约40m,高60m,设有2~4个扶壁柱,混凝土强度为C50,通常设计为1m厚左右内衬钢板的后张预应力钢筋混凝土结构,有些特大型反应堆还设计了双安全壳结构,如正在施工中的江苏田湾核电站,安全壳筒身混凝土厚度为1.2m。由我公司施工的几个核电站的安全壳预应力系统均采用了法国FREYSSINET公司的后张群锚体系的产品,有K系列的19T16型和37T16型,及C系列的25C15、37C15和55C15型,相应的单束张拉力在4000kN~12300kN之间。安全壳预应力筋通常布置为垂直、水平和穹顶束三大部分,也有将垂直和穹顶束合为一体,成倒U形,锚固于筏基张拉廊道上,如江苏田湾核电站。

1 预应力材料及张拉设备

1.1 埋管

安全壳水平束成孔一般采用78×0.6镀锌钢板卷制的波纹管,如19T16型为内径 $\Phi 95 \times 0.6$ mm波纹管,55C15型为内径 $\Phi 160 \times 0.6$ mm波纹管,但在扶壁柱区域、闸门以及孔道曲率半径小于7m区段为 $\Phi 101.6 \times 2$ mm或 $\Phi 165 \times 2.9$ mm的钢管成孔。垂直束和穹顶束采用钢管成孔,如19T16型、37T16型、55C15型分别采用 $\Phi 101.6 \times$

2mm、 $\Phi 139.7 \times 2.9$ mm和 $\Phi 165 \times 2.9$ mm钢管成孔。而秦山核电站安全壳筒身是滑模施工的,其竖向垂直束利用滑模上的 $\Phi 146 \times 6.5$ mm预应力钢管滑杆对混凝土抽芯成孔。

加工波纹管的设备是德国产的SR200型卷管机,另配有弯管机,钟型扩管机,切管机等制管加工设备。

1.2 钢绞线及锚具

预应力筋采用直径 $\Phi 15.7$ 的低松弛钢绞线,截面积 150mm^2 ,抗拉强度分别为1770MPa和1860MPa。锚具由锚固块和三片式楔形夹片组成,钢绞线由夹片锚固在锚板的锥形孔中。锚具的机械性能、表面硬度、尺寸(锥度、牙型结构)、热处理方法等直接影响锚具本身性能及与钢绞线的匹配。

根据国际预应力混凝土协会(FIP)的《后张预应力体系的验收和应用建议》及设计院编制的《钢绞线锚具技术条件》的规定,必须做预应力束——锚具组件静载试验和动载试验。预应力束——锚具组件静载试验,锚具效率系数大于0.95,极限总应变大于2%。动载试验包括高周动载试验和低周动载试验,高周动载试验——承受50万次反复荷载而不破坏,应力变化幅度为钢束最小规定极限抗拉强度的60%~66%;低周动载试验——承受50次低周动力载荷而不破坏,应力变化幅度为钢束最小规定极限抗拉强度的40%~80%。

表1 安全壳预应力系统主要参数汇总表

核电站	预应力束种类	预应力产品系列	钢绞线强度 (MPa)	千斤顶型号	锚固位置	预应力	张拉力 (kN)	成孔材料
大亚湾岭澳	水平	K 系列 19T16	1770	K500F	成 360°包角锚固于扶壁柱	223	4000	Φ95 × 0.6mm 波纹管
	垂直	K 系列 37T16	1770	K1000	环梁顶和筏基张拉廊道	144	8000	Φ139.7 × 2.9mm 钢管
	穹顶	K 系列 19T16	1770	K500F	分三族互成 120°锚固于环梁段	174	4000	Φ101.6 × 2mm 钢管
恰希玛	水平	K 系列 19T16	1770	K500F	成 240°包角锚固于扶壁柱	206	4000	Φ95 × 0.6mm 波纹管
	垂直	K 系列 37T16	1770	K500F	环梁顶和筏基张拉廊道	144	4000	Φ101.6 × 2mm 钢管
	穹顶	K 系列 19T16	1770	K500F	分三族互成 120°锚固于环梁段	111	4000	Φ101.6 × 2mm 钢管
秦山	底板	C 系列 37C15	1860	C1000F	分三层互成 120°, 底板顶部和底部	126	8300	Φ139.7 × 2.9mm 钢管
	水平	C 系列 25C15	1860	K700C	成 120°或 240°包角锚固于扶壁柱	162	5600	Φ110 × 0.6mm 波纹管
	垂直	C 系列 37C15	1860	K1000F	环梁顶和筏基张拉廊道	124	8300	注 1
	穹顶	C 系列 25C15	1860	K700C	分三族互成 120°锚固于环梁段	141	5600	Φ114.3 × 2.6mm 钢管
田湾	水平	C 系列 55C15	1860	C1500F	成 360°包角锚固于扶壁柱	50	12300	Φ160 × 0.6mm 波纹管
	垂直穹顶	C 系列 55C15	1860	C1500F	成倒 U 型锚固于筏基张拉廊道	70	12300	Φ165 × 2.9mm 钢管

注:秦山核电站安全壳筒身为滑模施工,利用滑模上的 Φ146 × 6.5mm 预应力钢管杆对混凝土抽芯成孔。

1.3 穿束机

FREYSSINET 公司 81 型双速电动穿束机,有 0.60 m/s 和 2.40 m/s 两档穿束速度,将单根钢绞线穿入孔道内,自重 600kg。

1.4 千斤顶

张拉 K 系列或 C 系列的液压千斤顶为双向穿心式结构,配以 P6M 型油泵,其主要性能参数见表 2。另外,配备了 M23 - SC2/180BH 型单根钢绞线张拉千斤顶,可与 P6M 油泵配套使用,也可以配手动油泵。其最大拉力 212kN,最大油缸行程 180mm,重 17kg,可用于钢绞线滑丝时的补张拉,以及解除已张拉钢绞线的应力。

1.5 主要灌浆设备

泵送缓凝浆:法国产灌浆泵 PH125,最大压力 11MPa,泵送量 14m³/h;

泵送膨胀浆:法国产灌浆泵 P2001,最大压力 3MPa,泵送量 3m³/h;

密封性试验及孔道灌浆堵塞时的应急处理:空压机 6m³/min。

表2 张拉千斤顶主要参数表

千斤顶型号	最大工作压力 (MPa)	最大张拉力 (kN)	最大行程 (mm)	拉伸活赛面积 (cm ²)	回缩活赛面积 (cm ²)	外径尺寸 (mm)	重量 (kg)	插入钢绞线长度 (mm)
K500F	65.0	4900	250	769	367	Φ565 × 1016	970	420
K1000	62.5	8800	250	1431	724	Φ720 × 783	1723	1000
K700C	62.5	6100	250	980	589	Φ640 × 1225	1300	1220
C1000F	70.0	9400	300	1349	210	Φ582 × 1283	1150	1120
C1500F	70.0	14000	500	2006	369	Φ707 × 1714	2500	1000

1.6 水泥浆搅拌站

专业生产预应力孔道灌浆用的搅拌站一座,主要设备有:水泥、水、外加剂自动称量系统,J7 型螺旋搅拌器,水泥螺旋输送机等,生产能力为 3.6m³/h。

1.7 预应力操作平台

用于张拉、灌浆操作平台一套。水平束张拉平台悬挂于安全壳筒壁上,通过卷扬机控制上下运行,筒身上埋设轨道,有防坠落、超载限位装置。油泵置于平台上,千斤顶悬挂于平台钢梁上。穹顶束张拉平台可沿穹顶自由旋转。

2 摩擦试验

2.1 试验方法

采用精密压力表法测量孔道摩擦损失。在预应力筋的两端各安装一台千斤顶,在主动端分级施加应力,记录被动端的相应压力表读数,经对千斤顶和锚固件装置上的摩擦力修正后,得到实际的预应力筋两端的应力,该两端应力的差值即为孔道的摩擦损失值。

对于不同压力使用相应的压力表测读:5MPa~15MPa 低压使用量程0~25MPa的压力表,精度 $\pm 1\%$;15~45MPa 中压使用量程0~60MPa的压力表,精度 $\pm 0.5\%$;45MPa以上的高压使用量程0~100MPa的压力表,精度 $\pm 0.5\%$ 。

垂直和水平孔道选择无任何偏斜、轻微偏斜和严重偏斜孔道各1根,并准备1根轻微偏斜孔道备用。穹顶孔道试验只取1根。

在主动端千斤顶和被动端千斤顶安装就位后,每根预应力筋的张拉分两个阶段进行。第一阶段:主动端千斤顶以5MPa的增量进行张拉,对每个增量及其最终压力时记录主动和被动端的油压表读数和相应的钢绞线伸长值。第二阶段:拆除被动端千斤顶上的特殊闭锁弹簧,分级张拉至最终压力,记录相应的被动端伸长值。

2.2 试验结论

每束试验完成后,分别作第一阶段被动端压力和钢绞线伸长值随主动端压力变化的曲线,以初步直观地判断实测值与理论值之差距。并对所测数据按以往工程所测得的实际值以及按理论计算得到的数据进行对比分析,判断其是否偏离理论范围,从而决定其试验成果是否可用。

每束试验测量数据必须满足如下三个条件,方可用于计算摩擦系数。

(1)第一阶段被动端千斤顶的测量压力值介于0.85~1.20倍被动千斤顶的理论压力值之间;

(2)第一阶段的钢绞线测量伸长值介于0.95~1.08倍第一阶段理论伸长值之间;

(3)总的钢绞线测量伸长值(第一加第二阶段)介于0.95~1.08倍总的理论伸长值(第一加第二阶段)之间。

田湾核电站钢绞线测量伸长值必须满足介于0.95~1.05倍理论伸长值之间。

3 灌浆试验

根据不同类型的预应力孔道,灌入的浆体类型也各不相同,标准浆——用于起拱不大于1.2米的水平孔道;缓凝浆——用于所有预应力孔道;膨胀浆——用于穹顶和起拱大于1.2米需二次灌浆部位。灌浆试验主要经历了室内浆体配合比试验、现场接收试验和全比例模拟试验三个阶段,以选择满足技术要求的浆体配合比和灌浆工艺,检查实体孔道内浆体的填充度。

3.1 室内浆体配合比试验

室内浆体配合比试验,主要是根据技术条件的要求,针对浆体的流动度、泌水率、膨胀率、凝结时间、有害化学成份含量、强度、孔隙率、空气中收缩与水中膨胀、毛细吸水等指标展开。

首先是选择外加剂,对拟选用的外加剂分别作同一掺量与多个水灰比及一个水灰比与多个外加剂掺量进行交叉对比,选出最合适的外加剂;同时将出机温度为15,20,25,30,35℃的五种浆体分别存放在5,10,15,20,25,30,35,40,45℃的环境中,测定其流动度随时间的变化、泌水率和凝结时间等的变化,通过这些交叉对比试验,找出其主要控制指标的变化规律,并确定最佳的水泥浆体配合比。

按技术条件要求,灌浆时环境温度应控制在5~35℃之间。而核电站位于江苏、浙江、广东等地,施工时的环境温度不能完全满足技术条件要求,特别是在巴基斯坦恰希玛核电站,气候炎热,夏季最高温度达50℃左右,晚间的气温在30℃以上。在恰希玛和岭澳核电站,分别做了1200组(2000次)的试验,解决了使用环境温度的限制,保证了灌浆的正常施工。

按技术条件规定,制浆工艺为先掺减水剂搅拌,再将浆体静置45min,然后再加缓凝剂进行二次搅拌。在岭澳核电站,采用直接加缓凝型减水剂,无须静置45min和二次搅拌,使制浆工艺得以简化。

以岭澳核电站为例,技术条件要求与实际结果对照见表3。

3.2 现场接收试验

现场接收试验:模拟现场施工条件,按正式施工条件下的生产程度和搅拌设备,验证生产出的浆体是否具有试验室相同的特性,并对其配合比

进行修正、确认。

3.3 全比例灌浆模拟试验

为能真实地反映出灌浆后孔道内浆体的充实程度和制定出切实可行的灌浆工艺,选择了五根具代表性、灌浆难度最大的孔道穿入钢绞线但不张拉做全比例灌浆模拟试验。在浆体硬化后,对孔道每5m开一截面,每2m开一窗口,在各拐点

均开窗口,以检查浆体填充的密实程度。根据技术条件的要求,月牙形空隙高度小于5mm为合格。以岭澳核电站为例,共检查了151个截面。月牙型空隙主要出现在拐点附近,高度在3~5mm之间的占10%,0~3mm的占20%,完全水平段和竖向束基本无空隙。

表3 岭澳核电站浆体技术条件要求与实际结果对照表

浆体类型	指 标	流动度随时间变化(s)			凝结时间(h)		泌水率(%)		28d强度(MPa)		孔隙率(%)	毛细吸水 g/cm ²	空气中收缩 μm/m
		出机	6h	10h	初凝	终凝	3h	24h	抗折	抗压			
缓凝浆	技术要求	9~13	<14	<25	<50	<80	≤2	≤2	>4	>30	<40	<1.5	<3500
	试验结果	9.2	11.4	12.2	35	37	0.1	0	7.8	88.4	35.9	0.71	1860
	现场检查	9.3	13.2	15.3	25	27	0	0	9.6	91.7			
膨胀浆	技术要求	制备与使用时均为14~26			<50	<80	3h的膨胀率>泌水率且≥6%		>4	>30	<40	<1.5	<3500
	实测结果	制备时20.1s,用完(30min)22.6s			14	15	3h膨胀率5%泌水率0.7%		9.3	62	35.2	0.62	1547

4 施工组织

安全壳是核电站防止核泄漏事故的重要屏障,预应力工程的施工是按核安全一级和质保一级来严格控制的,基于预应力工程专业性较强,公司组织了一支50人左右相对稳定的专业施工队伍。

核电站的施工有一套完整的质量保证体系,作为质量控制重点之一的预应力工程,同样也制定了一系列的工作程序,包括具体的施工作业方法,材料检验保存,质量记录等。

施工人员上岗前必须培训,由技术员或法国专家主讲,内容包括预应力基本知识,作业程序、设备操作步骤,安全知识,并在现场实地模拟操作,经考核合格后持证上岗。

4.1 埋管控制

埋管阶段定位放线由专业测量员和放线工负责,其精度要求是:

竖向孔道:径向≤±15mm,相对于相邻孔道≤±25mm,相对于基准线≤±50mm。

水平孔道:径向≤±15mm,水平面的理论位置≤±25mm。

穹顶孔道:相对于基准线≤±30mm

4.2 张拉灌浆控制

根据技术条件的要求,必须编制好张拉施工顺序分组表,其基本原则是施加应力要均匀对称。

竖向束围绕筒壁以三个千斤顶每120°同时在环梁顶对称张拉。环向束以每两个千斤顶为一组,自扶壁柱的两边同时张拉,穹顶从三组钢束的中间部位开始,在束的两端同时均衡交替向两边张拉。对绕过闸门附近的钢束,应从紧挨闸门的钢束对称向外张拉。

岭澳核电站张拉顺序为:竖向束张拉33%→水平束张拉至设备闸门→竖向束张拉至100%→穹顶束张拉20%→外圈水平束张拉至100%→穹顶束张拉至50%→内圈水平束张拉至100%→穹顶束张拉至100%。

秦山核电站张拉顺序为:底板束张拉24%→水平束张拉34%→底板束张拉至100%→水平束张拉至100%→环梁水平束张拉→竖向束张拉→穹顶束张拉。

田湾核电站张拉顺序为:竖向穹顶束与水平束分三个阶段交叉进行,竖向穹顶束13根

(26%)→水平束18根(26%)→竖向穹顶束24根(至74%)→水平束18根(至52%)→竖向穹顶束13根(至100%)→水平束34根(至100%)。

预应力钢束张拉采用应力控制,钢绞线伸长值校核的双控措施。钢绞线测量伸长值必须介于0.95~1.08(1.05)倍的理论伸长值之间。

穿束后应尽快张拉,一般限定在7天之内,特殊情况下自穿束起至张拉、灌浆结束总时限不超过一个月。为避免张拉预应力时因结构弹性变形对浆体凝固的影响,灌浆束与张拉束之间的平行距离一般不应小于5米,在灌浆强度已达到70%或结硬7天后,不受此范围的限制。

现场的施工条件能保证穿束、张拉、灌浆工序互相衔接,形成流水作业,且满足技术条件中对相关工作间时间间隔的要求。张拉和灌浆时必须要有业主和质检人员在场共同监督记录,发现异常必须报告后方可处理。张拉过程中油泵均匀加压,分级张拉,测量钢绞线的伸长值并与理论值校核。当伸长值超出理论伸长值范围时,应先查明原因,再做处理。每次张拉完,首先校核钢绞线伸长值,确认无误后,再退出千斤顶并切割钢绞线。检查锚具内缩量是否在8mm以内,若超过8mm,应重新张拉至最后一级,并测量内缩量。灌浆压力不得超过规定,发现堵管或发生灌浆泵故障等建成灌浆中断时,应立即用压缩气体从灌浆端的反方向将浆体吹出,压力水冲洗。对于需二次灌浆的孔道应掌握好吹浆时机,以保证二次灌浆顺畅密实。

5 监测系统与安全壳强度泄漏试验

为监测核电站在役其间预应力的松弛损失情况,布置了一定数量的监测束,以定期或在发生意外事故后进行松弛监测,评估安全壳强度及安全度。以岭澳核电站为例,设有4根竖向预应力监测束,相互间隔90°,因孔道近乎直线,故每束只在一端设测力传感器。测力传感设备包括:1个插在锚固件承压板和锚头之间的可伸缩传力套筒,4个TELEMAC CV8型测力传感器(包括其电气系统),2台液压千斤顶,1套PC-6型手摆式读数仪。监测束使用TRACTA 1391型油脂进行防腐保护,罐注方法同灌缓凝浆类似,将油脂加热

到100~110℃时自筏基张拉廊道锚固端灌入,环梁端流出的油脂温度必须大于70℃,否则重灌。

测力传感器的读数在张拉后6、9、15、30、45分钟,及1、2、4、8、24、48、72、96、120、144、500、1000、1500、2000、2500和3000小时时测读。每次测读时测定外界大气的温度。参见岭澳核电站预应力监测束应力松弛实测曲线示意图。

在核电站装入核燃料正式开始运行以前,都要进行安全壳强度和密封性试验。即用压缩空气将安全壳内的压力升至设计压力的1.15倍,检查安全壳强度、密封性、外墙裂缝、内部缺陷等。以岭澳核电站为例,试验结果是(1)安全壳密封性能良好,泄漏率低于设计值;(2)结构性能符合设计要求,变形量和应力状况具有良好的可回复性,最大变形发生在10m高安全壳筒身处,平均最大变形小于大亚湾核电站,而弹性模量大于大亚湾核电站。(3)安全壳外观无异常裂缝,且数量较少;试验期间裂缝扩展非常小(发生在设备闸门外),并具有良好的可回复性。(4)安全壳内观检查,试验前后钢衬里无明显变化。

6 有待研究的问题

以下是作者在施工过程中遇到或希望解决的一些问题,供参考:

(1) 预应力系统材料和设备国产化

目前核电站安全壳预应力系统的材料和张拉设备均为进口产品,笔者认为,这几年国内的技术研究和生产水平迅猛发展,完全有能力实现自主设计、生产和施工。希望国内的研究机构、设计院、生产厂家、施工单位联合起来,通过相关的试验论证,实现国产化。

(2) 千斤顶配套校验

国标《混凝土结构工程施工及验收规范(GB50204-92)》规定,张拉设备应配套校验,其期限不宜超过半年。千斤顶和油泵本身笨重,能作千吨级张拉设备配套校验的地方也不多,运输途中有可能对千斤顶产生不利的影响,如何更好地解决这个问题?

(3) 有关浆体的技术指标

国标《混凝土结构工程施工及验收规范》GB50204-92中对预应力孔道灌浆用浆体无具体指标要求,而法国《90万千瓦压水堆核电站土建

设计和建造规则(RCC-G)》(80版)和美国《混凝土反应堆容器和安全壳规范》ACI359-89版对预应力孔道灌浆用浆体的技术要求比较具体、全面。比如,除考虑了施工的可操作性、浆体强度、环境条件外,还考虑了浆体中有害成份对钢绞线的腐蚀问题,但法国 RCC-G 对此显得比较笼统,而美国 ACI359-89 对浆体中有害成份比较明确, $\text{Cl}^- < 150\text{ppm}$, $\text{NO}_3^- \leq 150\text{ppm}$,特别是针对核电站安全壳预应力孔道灌浆,作为补充的 R.G 导则 1.107“安全壳预应力束水泥灌浆的鉴定”中更是明确: $\text{Cl}^- \leq 100\text{ppm}$ 或 200ppm (如果 $\text{PH} \leq 12$), $\text{NO}_3^- \leq 100\text{ppm}$, $\text{SO}_4^{2-} \leq 250\text{ppm}$, $\text{S}^{2-} \leq 2\text{ppm}$ 。

浆体的稠度以流动度指标来测定,也即 1 升浆体通过流锥的秒数来表达,比较精确直观。

(3)灌浆时的泵送压力控制对保证孔道灌浆

密实作用较大。灌浆泵送压力是综合考虑了孔道类型、浆体性能等多种因素,并在反复试验的基础上确定的,应严格按程序要求操作。二次灌浆孔道的吹风时机掌握和压力控制对保证其孔道畅通,使膨胀浆浇灌密实有重大意义。

(4)钢绞线滑丝:在张拉过程中,应注意是否有异常现象,如响声,油压表指针抖动等,张拉完成后检查钢绞线上夹片留下的咬痕,以便及时判断是否钢绞线的滑丝。如出现滑丝,可利用单根张拉千斤顶对该根钢绞线进行补张拉。

(5)设计与施工加强协作,一般在锚固区域的结构受力复杂,布置较多的受力及加强钢筋,需综合考虑该区域的结构设计,必须确保重要构件的设计位置,同时兼顾该处现场施工的可能性,以最终保证工程的质量。

(上接第 23 页)

5、封锚

无粘结预应力筋张拉完毕后,整理张拉记录,在实测伸长值符合规范要求的情况下,对张拉端部外露的钢绞线进行切割,预留长度距离工作夹片外口不少于 30mm。

在张拉端部封锚前,对张拉槽进行凿毛,用清水湿润,用 C40 细石混凝土捣振封裹。

6、结语

1、煤仓在贮煤料侧压力的作用下,仓壁环向截面处于受拉状态。采用预应力混凝土结构,环向的拉力基本上由高强预应力钢材承担,仓壁混凝土经常处于拉应力很低的状态,不会引起仓壁混凝土开裂。这对结构的长期安全可靠使用具有

重要意义。

2、钢绞线经涂裹建筑油脂和外包聚乙烯套管后,具有很好的防锈性能;加之设在筒壁截面内、外有混凝土保护。张拉端部封锚的混凝土有 150mm 厚,锚具有很好的密封保护,有利于提高高强钢材的耐久性。

3、通过预应力损失测试结果可知,无粘结预应力钢束的摩擦损失比理论少约 10%,这对以后设计类似预应力结构具有参考价值。

4、预应力摩阻损失测试,主拉端及被拉端都采用测力传感器测力,使测试结果更可靠,同时采用 2 台以上的千斤顶串联一次性测试完成,减少了退锚的麻烦,具有推广应用的意义。

5、预应力高强钢材的使用,可节省钢材及混凝土约 20%,具有很大的经济意义。