

大亚湾核电站反应堆安全壳预应力技术

王连文

摘要:大亚湾核电站反应堆安全壳预应力工程,采用法国标准的 Freyssinet Monogroup 体系,由 19 股或 36 股 T16 钢绞线组成钢束穿入刚性及半刚性导管中进行后张拉得到预应力。安全壳预应力分为水平、竖向和穹顶 3 个系统,水平方向采用 360°全周长布置,钢束张拉需严格按规定的先后张拉次序进行。为防止钢绞线锈蚀,张拉后导管内用缓凝水泥浆灌浆。

关键词:反应堆安全壳 预应力技术

为防止核辐射及事故情况下核放射性物质的泄漏,大亚湾核电站共设置 3 道屏障,反应堆安全壳为最外层屏障,其形状为一直径 38.8m,高 60.35m 的圆柱形筒体和近半球形穹顶组成,为现浇预应力(后张法)钢筋混凝土结构,采用法国标准的 Freyssinet 预应力体系,由 Freyssinet International 公司施工。

1 主要施工工序

Freyssinet 体系是由 19 股或 36 股 T16 钢绞线组成钢束放置在半刚性或刚性导管中进行后张拉而得到预应力,其主要施工工序为:在浇筑混凝土前先铺设刚性或半刚性导管,待混凝土达到设计强度后再穿入 19T16 或 36T16 钢绞线,然后对钢绞线进行张拉,达到预定压力及要求伸长度后锁定锚固,之后,对导管进行灌浆,填塞导管内空隙。

2 预应力钢束分布

安全壳预应力钢束分为水平、竖向和穹顶 3 个系统,如图 1~3 所示。

(1)水平系统:通常水平钢束布置有 1/2、2/3 周长和全周长等多种形式,大亚湾核电站采用 360°全周长布置,分内外 2 层铺设,内层轴线半径 19.03m,外层轴线半径 19.23m,整个筒体共铺设水平钢束 223 条,每条长 126m,采用内径为 95mm 的半刚性导管,内穿 19T16 钢绞线(见图 1)。

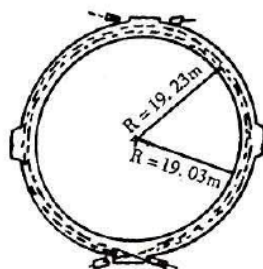


图 1 水平钢束示意

(2)竖向系统:竖向系统钢束,采用外径 139.7mm 的刚性导管,穿 36T16 钢绞线,沿半径 18.85m 处铺设,铺设间距 820mm,共 144 根,每条长 66m(见图 2)。

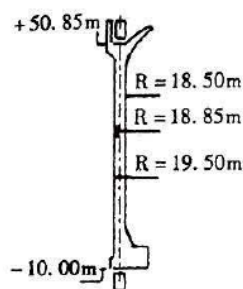


图 2 竖向钢束示意

(3)穹顶系统:穹顶钢束采用外径 101.6mm 的刚性导管和 19T16 钢绞线分 3 层铺设,每层相互交叉成 120°角,每层 58 条共计 174 条,每根长度由 26m 至 44m 不等(见图 3)。

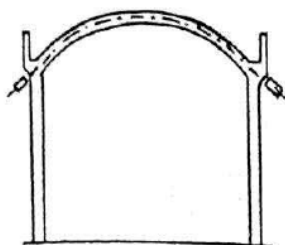


图3 穹顶钢束示意

3 钢绞线的穿插、锚固和张拉

按施工工序,浇注混凝土前先铺设导管,待混凝土达到设计强度后即进行钢绞线穿插。用穿线机将钢绞线通过锚固块圆孔逐根穿入,钢绞线送入端有锥形钢鞘套头保护,在穿线机压力滚轴的压力作用下,钢绞线被送入,到达另一锚固端后去掉锥形鞘套,留足固定在千斤顶内所需的长度后用三颚形锚具将钢绞线锚固,然后对每一根钢绞线进行张拉。

水平与穹顶 19T16 钢束均采用 K500F 型千斤顶从两端张拉,钢绞线固定在千斤顶内的长度为 0.42m,输出最大拉力为 5000kN,每根钢绞线施加 4300kN 预压力。

竖向 36T16 钢束用 K1000 型千斤顶从一端张拉(对于设备孔洞附近钢束,由于形状变弯,考虑张拉摩擦力损失增加而采用上下两端张拉),钢绞线固定在千斤顶内的长度为 1.0m,输出最大拉力为 8940kN,每根钢绞线施加预压力约 8100kN。

4 预应力钢束管道灌浆

为防止空气、水分等进入管道而腐蚀钢绞线,在完成张拉后两周内,要对预应力管道进行灌浆,用水泥浆将预应力钢绞线裹住。

灌浆材料主要为缓凝水泥浆,用于所有预应力钢束灌浆,另外还有部分膨胀水泥浆用于水平预应力钢束起拱部位和穹顶钢束的二次灌浆,两种浆体的性能如表 1。

表1 浆体性能要求

试验项目	缓凝灰浆	膨胀灰浆
流动度/s	10~14	14~26
浆体温度/℃	10~32	<25
流动度变化	在 6h 时 <14s 在 10h 时 <25s	

试验项目	缓凝灰浆	膨胀灰浆
渗出	在 3h 渗出与初始高度之比 < 2%, 24h 后水分基本被吸收	同缓凝灰浆, 24h 后水分逐渐被吸收
膨胀和析水		3h 时测量, 膨胀 > 析水, 并且膨胀 < 6%。
凝结时间/h	初凝 < 50 终凝 < 80 (+ 5℃ 时)	
28d 抗压强度/MPa 28d 抗弯强度/MPa	> 30 > 4	> 30 > 4
干容量孔隙率/%	< 40	< 40
毛细作用/(g · cm ⁻²)	< 1.5	< 1.5
干缩率/(m · m ⁻¹)	< 0.0035	< 0.0035

5 钢绞线及其导管的规格和性能参数

(1) 钢绞线规格: 水平及穹顶钢束为 19 股 T16 钢绞线, 竖向钢束为 36 股 T16 钢绞线, T16 钢绞线由 7 根钢丝组成, 每股钢绞线直径为 15.7mm。

钢绞线性能参数: 标定横截面积 150mm²; 每米长度理论质量 1.176kg; 弹性模量 $E = 1.9 \times 10^5$ MPa; 常规屈服强度 $F_{tg} = 1573.3$ MPa; 极限抗拉强度 $F_{tg} = 1766.7$ MPa; 在拉伸操作中最大应力为 $0.8F_{tg} = 1413$ MPa; 伸长度保证值 3.5%; 面积缩小率保证值 25%; 松弛保证值: 在 $F = 0.6F_t$ 时, 1000h 为 1.0%; 在 $F = 0.7F_t$ 时, 1000h 为 2.5%; 在 $F = 0.8F_t$ 时, 1000h 为 4.5%。

(2) 钢束导管: 钢束导管分为刚性钢管导管和半刚性钢板导管(波纹管)2 种。

刚性钢管导管: 刚性钢管导管用于穹顶系统和竖向系统, 由于两系统所用钢索规格不同, 刚性导管也相应分为 2 种规格: 管外径为 101.6mm、管壁厚 2mm 的用于穹顶系统; 管外径 139.7mm、管壁厚 2.6mm 的用于竖向系统。

半刚性钢板导管: 半刚性钢板导管用于水平系统, 它是由 0.6mm 厚的带有波形皱纹的钢板螺旋绕制而成, 管内径为 95mm, 其波形皱纹可加劲性密封导管, 并可使导管与套管进行螺旋连接。

6 钢绞线导管的连接

(1) 刚性导管间的连接

将一根钢管的一端用液压钟形扩口千斤顶冷压成钟形口, 再将另一根钢管一端装入该钟形口

(下转第 35 页)

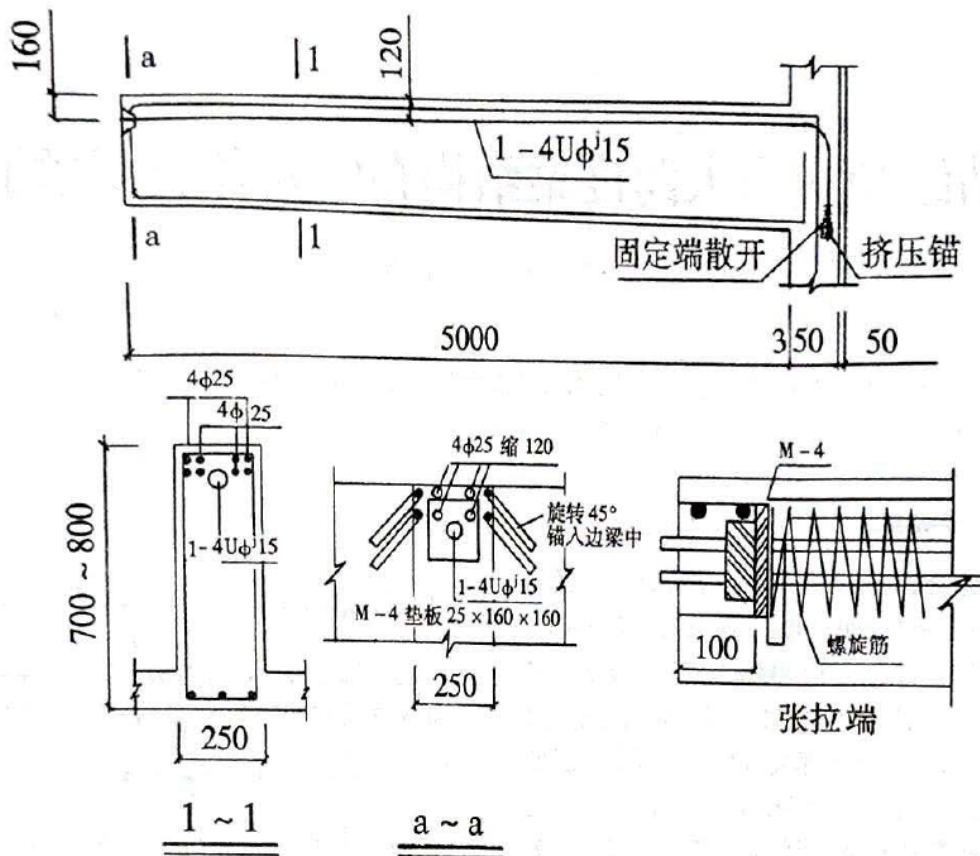


图3 雨蓬反梁节点处理方式

(上接第31页)

内,为保证其接头密封性,在钟形口内施加环氧树脂,再用一根遇热可伸缩性套管将接口处套牢,如图4所示。

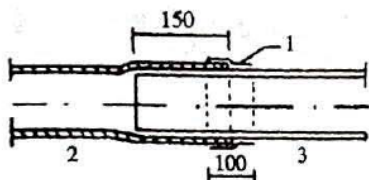


图4 刚性导管间的连接

- 1 - 热伸缩套管; 2 - 刚性导管有钟形扩口的一端;
3 - 刚性导管无钟形扩口的一端

(2) 半刚性导管间的连接

用配套的半刚性导管接头套管,将两根半刚性导管直接拧入接头套管内,然后在接头套管两端接口处用2个热伸缩性套管套牢,如图5所示。

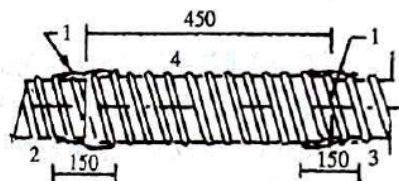


图5 半刚性导管间的连接

- 1 - 热伸缩套管; 2 - 第一阶段半刚性导管;
3 - 第二阶段半刚性导管; 4 - 套管

7 预应力张拉次序

为避免钢绞线张拉过程中因局部受力不均而引起混凝土开裂甚至损坏,安全壳预应力张拉应严格遵循一定的张拉顺序。本工程预应力张拉顺序为:1/3 垂直钢束→部分外圈水平钢束→部分内圈水平钢束→剩余垂直钢束→1/5 穹顶钢束→全部剩余水平钢束→全部剩余穹顶钢束。