

# 核电厂安全壳预应力摩擦及锚固损失分析

董占发 赵超超

(中广核工程设计有限公司 深圳 518124)

**摘要:**在核电站安全壳的研究中, 预应力的分析计算是十分重要的一部分。安全壳预应力筋分布密集、复杂, 特别是在闸门洞口这个敏感部位更是出现了三维空间曲线形状, 加大了摩擦损失, 必须予以考虑。本文通过对CPR1000堆型安全壳预应力的摩擦及锚固损失分析, 给出了反向摩擦影响长度的简单计算方法和安全壳标准段, 闸门洞口附近以及安全壳穹顶预应力筋沿长度方向的应力变化曲线, 供工程设计人员参考。

**关键词:**CPR1000 安全壳 预应力 摩擦损失 锚固损失 空间曲线

## 1 引言

预应力技术在核电站安全壳的建设中得到广泛应用, 预应力在安全壳中的分布状况、损失规律直接影响到安全壳的设计和安全性。本文基于CPR1000压水堆安全壳, 研究计算了安全壳中预应力的摩擦及锚固损失, 供工程设计人员参考。

预应力孔道摩擦理论认为, 预应力筋与孔道间的摩擦损失  $\sigma_{l1}$  由两部分组成: 1) 由于孔道位置偏差、内壁粗糙及预应力筋表面粗糙等引起的摩擦损失, 它与孔道长度成正比; 2) 由于曲线管道壁对预应力筋产生正压力而引起的摩擦损失。

## 2 预应力摩擦损失的计算公式

关于预应力摩擦引起的损失, 我国规范和欧洲规范<sup>[1-3]</sup>均采用了相同的公式:

$$\sigma_{l1}(x) = \sigma [1 - e^{-(\mu\theta + kx)}] \quad (1)$$

$\sigma_{l1}(x)$  — 摩擦引起的预应力损失

$x$  — 张拉端至计算截面的孔道长度 (m)

$\theta$  — 张拉端至计算截面曲线孔道部分切线的夹角

$\mu$  — 考虑孔道每米长度局部偏差的摩擦系数

$k$  — 考虑预应力钢束与孔道壁之间的摩擦系数

本文采用CPR1000堆型的摩擦系数, 水平向预应力钢束  $\mu$  取0.18,  $k$  取0.0016; 竖向预应力钢束  $\mu$  取0.16,  $k$  取0.0008; 穹顶预应力钢束  $\mu$  取0.16,  $k$  取0.0015;

对不同线形 (圆弧、直线等) 连接成的力筋上任意一点处  $\sigma_{l1}(x)$ , 通常方法是逐段计算。

可以证明<sup>[4]</sup>空间曲线预应力钢束的孔道摩擦

损失公式和平面相同, 仅需将空间虚线转角  $\theta$  改用空间包角  $\theta_{包}$ , 长度改用空间曲线的长度。空间包角的计算公式:

$$\theta_{包} = \sqrt{\theta^2 + \varphi^2} \quad (2)$$

式中,  $\theta$  为预应力钢束在竖向平面内的弯起角;  $\varphi$  为预应力钢束在水平面内的弯起角。

## 3 锚固损失的计算

我国混凝土结构设计规范 (GB500100-2002) 规定: 后张法构件预应力曲线钢筋或折线钢筋由于锚具变形和预应力钢筋内缩引起的预应力损失  $\sigma_{l2}$ , 应根据预应力曲线钢筋或折线钢筋与孔道壁之间反向摩擦影响长度  $l_f$  范围内的预应力钢筋变形值等于锚具变形和钢筋内缩值的条件确定。规范建议采用的反向摩擦系数与正向相同。

预应力钢筋锚固前的力筋中应力分布如图1中曲线AGB所示。锚固时, 张拉端力筋发生  $\Delta l$  的回缩值, 当力筋与管道间的摩擦力较大时, 此回缩引起的力筋应力损失将被反向摩擦阻力在回缩影响长度  $l_f$  内完全平衡,  $l_f$  以外的力筋仍如锚固前分布。假设回缩时发生的反向摩擦与正向摩擦的摩擦系数相等, 则锚固后瞬间钢束中应力分布如图中曲线A'GB所示, 其中AG=A'G。因此,  $\Delta l$  可以由以下积分式得到:

$$\Delta l = \int_0^{l_f} \frac{\sigma_{l2}(x)}{E} dx \quad (3)$$

其几何意义就是图中AGA'所构成的封闭面积除以弹性模量  $E$ 。  $S_{AGA'} = S_{AC'G}$ ,

$$\begin{aligned} \therefore \Delta l \cdot E &= 2S_{AC'G} = 2(S_{AGC''O} - S_{G'GC''O}) \\ &= 2 \left[ \int_0^{l_f} e^{-(\mu\theta + kx)} dx - l_f e^{-(\mu\theta + kl_f)} \right] \quad (4) \end{aligned}$$

利用(3)式编程计算,可以得到 $l_f$ 的精确值。对于不同线形组成的曲线,可用逐段积分的方法试算得到反向摩擦影响长度的值。如果手算,也可简化处理。在预应力筋线形变化处取控制点,计算结果表明,控制点之间是 $e^x$ 的曲线,但是与直线相差很小。在控制点间线性插值,通过直线段组成的面域求 $l_f$ 只需要解一个二次方程。

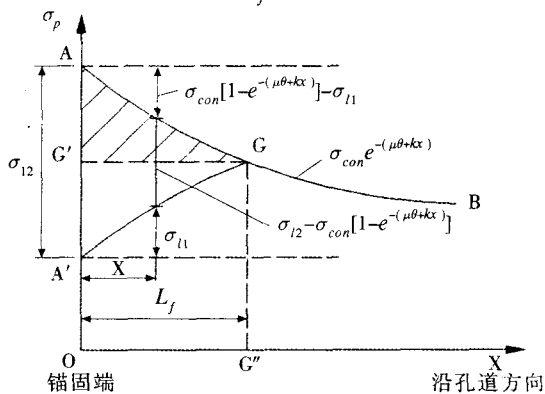


图1 反向摩擦影响长度计算示意图

#### 4 安全壳柱体部分钢束预应力摩擦及锚固损失的计算

##### 4.1 标准段水平预应力钢束摩擦及锚固损失计算

水平向预应力钢束布置于安全壳柱体部分环向360°范围,且分别锚固在4个扶壁柱上。水平预应力钢束标准段有2种形式,如图3和图4,半径分别为19.03m和19.23m,称为内层钢束和外层钢束。内层钢束和外层钢束相对布置,按照扶壁柱1、2、3、4分别对应着外、内、内、外层钢束,如图2所示。安全壳柱体部分水平向预应力钢束均采用两端张拉的方法进行张拉。

水平向预应力钢束的尺寸:

内层钢束:如图3所示,分为2段: $L_{12} = 4.9m, R = \infty; L_{23} = 56.81m, R = 19.03m$ 。

总长:  $(56.81 + 4.9) \times 2 = 123.42m$ 。采用夹片式锚具:  $\Delta l = 8mm$ 。

外层钢束:如图4所示,分为3段

$L_{12} = 1.42m, R = \infty; L_{23} = 1.19m, R = 10m; L_{34} = 59.68m; R = 19.23m$

总长:  $(59.68 + 1.19 + 1.42) \times 2 = 124.58m$ ,采用夹片式锚具:  $\Delta l = 8mm$ 。

张拉控制应力均为:  $\sigma_{con} = 1413MPa$ 。

内层钢束的反向摩擦影响长度 $l_f$ 为10.00m,

外层钢束为10.27m,钢束中的应力沿长度变化分别如图5和图6所示:

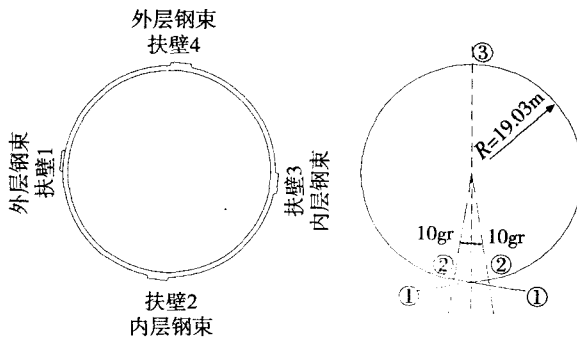


图2 安全壳柱体部分平面图

图3 内层钢束

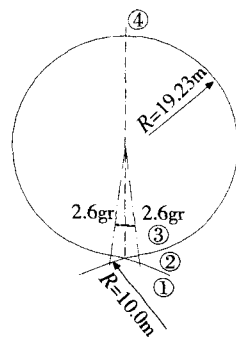


图4 外层钢束

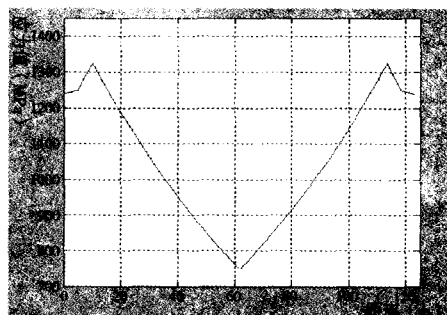


图5 内层钢束应力沿长度变化图

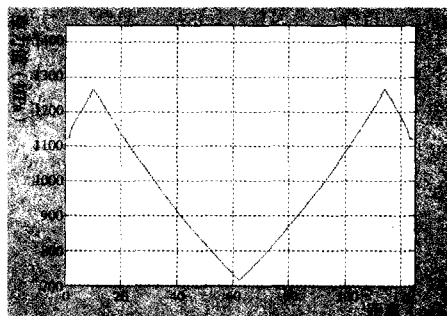


图6 外层钢束应力沿长度变化图

##### 4.2 闸门洞口附近预应力钢束摩擦及锚固损失的计算

闸门洞口处的预应力钢束分布比较复杂,距离闸门洞口最近的预应力钢束,平面展开图如图7。(第一段和第三段的曲率半径为8m,第二段

展开图上为直线。)

由于安全壳的水平向预应力筋是在4个扶壁柱上轮流锚固,在标准段,同一个高度上只有一条预应力筋。而闸门洞口位于扶壁柱1处,因此,锚固点位于扶壁柱1,3和2(或4)时,情况均有所不同。本文将如图7中水平向预应力钢束为例,给出3个锚固点时的应力沿长度变化曲线。

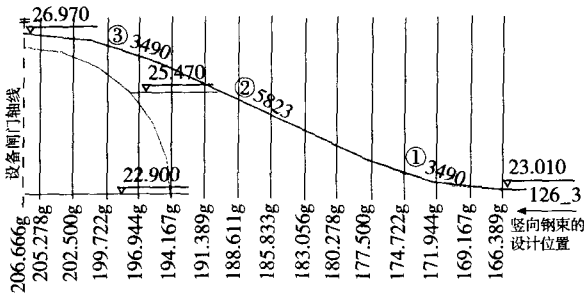


图7 闸门洞口附近水平向预应力钢束平面展开图

a. 锚固点位于扶壁柱1处时

水平向预应力钢束是对称的,其锚固方式与标准段有所不同,钢束伸出扶壁柱中心有一段2.1m的直线和一段长2.2m,半径6m的弧线。而曲线均平滑连接,逐段计算可以得到几个控制点的应力值和摩擦损失,见表1:

表1 控制点应力值和摩擦损失

长度 (m)	钢束应力值 (MPa)	摩擦损失(MPa)
0	1413	0
2.1	1408.3	4.7
4.3	1313.8	94.4
7.8	1200.2	113.6
13.613	1130.8	69.4
17.103	1033.0	97.8
65.265	609.3	423.7

$$\Delta l \cdot E/2 = 8 \times 1.95 \times 105/2 = 780 \text{MPa} \cdot \text{m}$$

$$\text{当 } l_f \text{ 取 } 4.299 \text{ 时, } S = 4.7 \times 2.1/2 + 94.4 \times (2.1 + 4.3)/2 = 307.0 \text{MPa} \cdot \text{m}$$

$$\text{当 } l_f \text{ 取 } 7.789 \text{ 时, } S = 307.0 + (4.3 + 7.8) \times 113.6/2 = 994.3 > 780 \text{MPa} \cdot \text{m}$$

因此,  $l_f$  位于 4.3 ~ 7.8m 之间,计算简图如图8所示,即求  $\Delta S = 780 - 307.0 = 473 \text{MPa} \cdot \text{m}$  时  $t$  的值

$$\begin{cases} \frac{f}{f+113.6} = \frac{4.3}{7.8} \\ \Delta S = 473 = (4.3+t) \times (\frac{f}{4.3}t - f) \end{cases}$$

解得:  $t = 6.90 \text{m}$

计算机程序解为:  $7.014 \text{m}$ , 误差仅为 1.6%。

最终可得钢束中应力沿长度变化如图9示。

b. 锚固点位于扶壁柱2或4时(非对称)

由计算得到反向摩擦长度  $l_f$  为 10.27m, 因为闸门洞口位于锚固点的一侧,使预应力钢束分布不对称,所以分别从两个张拉方向摩擦损失,当两边长度相加等于实际预应力钢束的长度,且摩擦损失相等时,即摩擦损失最大的拐点处,计算结果如图10所示。

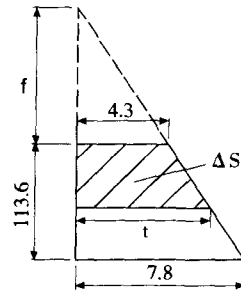


图8 计算示意图

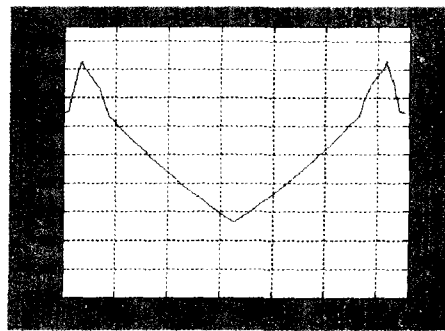


图9 锚固于扶壁柱1

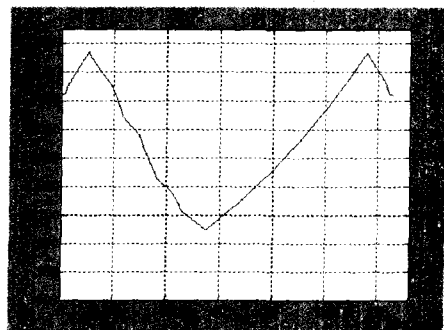


图10 锚固于扶壁柱2或4

c. 锚固点位于扶壁柱3时

由计算得到反向摩擦长度  $l_f$  为 10.27m, 应力分布是对称的,如图11所示。

4.3 竖向预应力筋的计算

如图12所示,分为2段:  $L_{12} = 54.8 \text{m}$ ;  $R = \infty$ ;  $L_{23} = 5.66 \text{m}$ ;  $R = 26.12 \text{m}$ ; 总长:  $54.8 + 5.66 = 60.46 \text{m}$ ;  $\Delta l = 8 \text{mm}$ ;  $\sigma_{\text{con}} = 1413 \text{MPa}$

竖向预应力钢束标准段锚固于顶部环梁处,由底部张拉,算得反向摩擦长度为 37.04m, 沿长

度预应力筋中的应力变化如图14。

闸门洞口附近(标高12m~35.14m)的竖向筋分为了7段,如图13所示。计算得到反向摩擦长度为16.55m,钢束中的应力分布见图15。

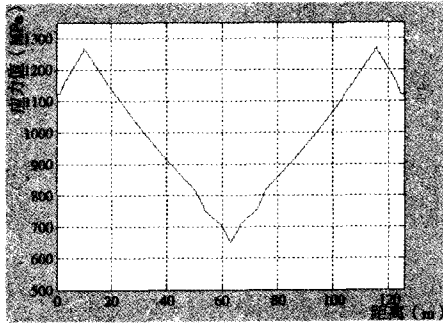


图11 锚固于扶壁柱3

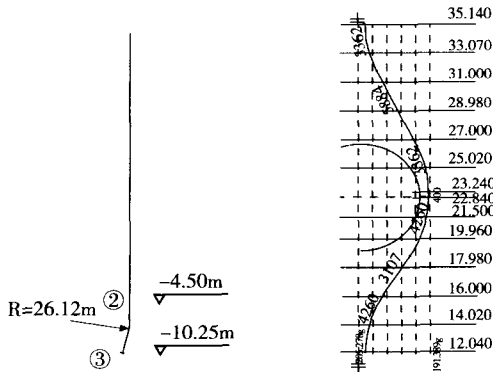


图12 竖向钢束

图13 闸门洞口处竖向钢束展开图

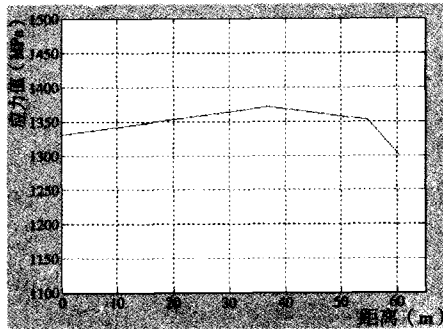


图14 标准段竖向钢束应力变化图

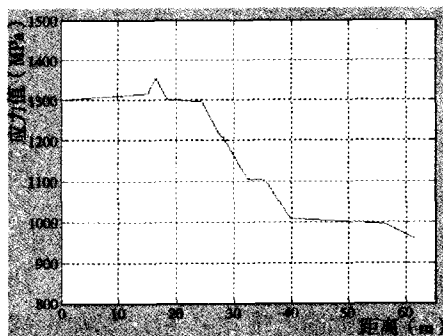


图15 闸门洞口附近竖向钢束应力变化图

#### 4.4 安全壳穹顶钢束预应力损失计算

穹顶预应力钢束三向布置,各向钢束与不同方向的钢束均成60°角(见图16)。索有以下两种形式:

形式1(图17):  $L_{12} = 3.408m$ ;  $R = 10.0m$ ;  
 $L_{23} = 18.715m$ ;  $R = 24.62m$ ;

总长:  $18.715 + 3.408 = 22.123m$ ;  $\Delta l = 8mm$ ; 张拉控制应力:  $\sigma_{con} = 1413MPa$ 。

形式2(图18):  $L_{12} = 22.916m$ ;  $R = 24.40m$ ;  
总长:  $22.916m$ ;

$\Delta l = 8mm$ ; 张拉控制应力:  $\sigma_{con} = 1413MPa$ 。

计算可得形式1和形式2的反向摩擦长度分别为12.17m和11.90m,钢束中的应力沿长度变化分别如图19和20所示:

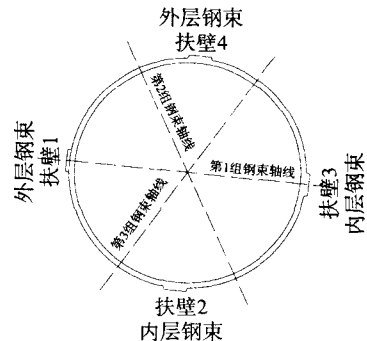


图16 穹顶预应力布置图

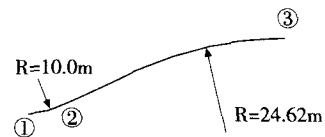


图17 形式1



图18 形式2

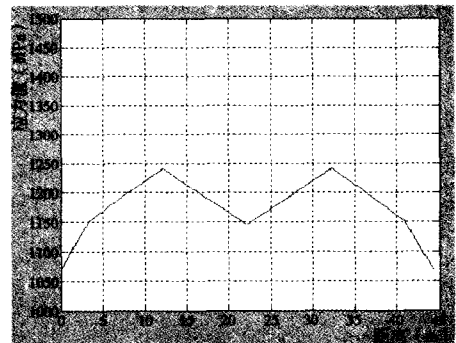


图19 形式1钢束应力变化曲线

(下转第29页)

人工配合机械穿束(将钢绞线束固定在一个锥形的牵引装置上,用卷扬机牵引锥形牵引装置),可以很好的避免钢绞线间的互相缠绞;否则采用人工穿丝,多根钢绞线缠绞在一起,张拉时各根钢绞线受力不均匀,增大了钢绞线之间的摩擦,造成预应力损失加大,易出现滑丝断丝情况,影响锚固效果。

应引起重视的是实际施工中很多施工单位没有做好这些细部工作,固定橡胶管道的定位井字架筋不按照规范和设计规定的间距布置或位置不准确,必然造成钢束位置与设计不符、有的还会在曲线变化段产生急弯或孔道局部偏差过大。

#### 4 锚具质量精度

夹片的齿高和锥形角对锚具组合性能有一定的影响。齿高加大可以提高摩阻力,更好的咬紧钢绞线,但很容易在夹片和钢绞线的咬合段形成很大的剪应力,从而导致断丝。夹片的锥形角大,可以降低夹片和锚板承受的正压力,降低钢绞线的横向挤压力,但锥形角过大又会对夹片的自锁产生负面影响。目前不同生产厂家、部分厂家的不同批次夹片齿高、锥形角往往都不一样,因此必须对夹片齿高和锥形角进行质量控制。试验表明<sup>[5]</sup>,夹片的设计齿高以0.4mm~0.45mm为宜;锥形角以16.34°作为临界角度时,夹片的锚固和自锁性能最好。

#### 5 张拉控制程序

预应力施加过程中,以下工序对锚具的有效锚固也有着重要的影响。

① 由于操作失误或千斤顶压力不准确以及安

装夹片顶面不齐等原因,有时会发生断丝和滑丝的情况;

② 锚板喇叭筒、锚板、锚环及千斤顶不同心,造成偏拉,受力不均;

③ 钢束、夹片清理不彻底或受养护用水影响,有油、锈或杂物张拉时存在于夹片与钢绞线之间或夹片与锚环之间。

④ 千斤顶张拉时回油过快也可能发生滑丝现象;拆卸工具锚时剧烈震动也可能造成滑丝。

基于以上情况,安装锚具及千斤顶时必须保证锚板、锚环、千斤顶均在一条直线上;在安装夹片时必须先检查钢绞线锚固部位及夹片是否清洁,合格后方可安装,安装时必须使夹片外露部分平齐,开缝均匀;同时在切割多余钢绞线时,一般应使用砂轮切割机,避免使夹片受热失锚;张拉锚固后应及时压浆(一般应在48h内完成),水泥浆配制及压浆工艺按设计要求或现行规范执行。

#### 6 结语

可以认为:钢绞线的力学性能、孔道位置线型、锚具质量精度、张拉控制程序是锚固失效的主要因素。通过采取相应的预防措施,为优质高效的完成京石、石武客运专线预制箱梁工程提供了保证。

#### 参考文献

- [1] GB/T14370—2000 预应力筋锚具、夹具和连接器
- [2] GB/T5224—1995 预应力混凝土钢绞线
- [3] 高友长. 浅析钢绞线张拉常见故障及处理措施[J]. 西部探矿工程. 2007, 7: 164-165.
- [4] 姜招喜. 钢绞线对夹片式锚具静载锚固试验影响的研究[J]. 桥梁建设. 2006, 6: 76-78.
- [5] 肖常青. 影响夹片式扁锚静载锚固组合性能的因素探讨[J]. 中外建筑. 2005, 3: 107-108.

(上接第27页)

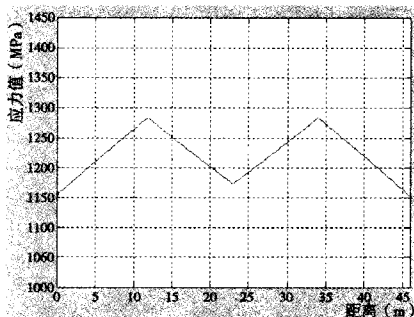


图20 形式2钢束应力变化曲线

#### 4 结论

(1) 根据规范,假设回缩时发生的反向摩擦与正向摩擦的摩擦系数相等,给出了反向摩擦

影响长度的简单计算方法。

(2) 安全壳预应力筋分布密集、复杂,特别是在闸门洞口这个敏感部位更是出现了三维空间曲线形状,加大了摩擦损失,计算结果表明,水平向预应力钢束在闸门洞口附近摩擦损失较标准段多达100MPa,竖向钢束较标准段则多达300MPa。

#### 参考文献

- [1] GB 50010—2002, 混凝土结构设计规范
- [2] JTC 023—2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
- [3] 欧洲规范EN 1992-1-1:2004
- [4] 刘永顺. 空间曲线预应力束摩擦应力损失计算方法的探讨[J]. 土木工程学报, 1981, 114(3): 69-74