

无粘结预应力筋在混凝土圆形煤仓中的应用

陶学康 蔡鲁生 王国栋 金宏

摘要 天津大港电厂的两个 5000m^3 的贮煤筒仓,采用了部分预应力的设计概念和多根无粘结预应力筋并束排列及单根张拉的设计方案。本文介绍设计原理和配筋准则,无粘结预应力筋的应用和构造,以及技术经济意义。

关键词 无粘结 预应力筋 圆形煤仓 应用

一、前言

预应力混凝土是建造水池、各类储仓、压力容器等圆形结构的理想材料。它能减小甚至消除装料或内压在筒壁中引起的拉应力,使混凝土免于开裂,克服普通钢筋混凝土结构在使用阶段出现裂缝,以至引起钢筋锈蚀的缺点,从而使整个结构的安全度和可靠性得到保证。以前我国所建造的预应力油罐、水池和贮仓,大多采用缠丝或电热法张拉的方法来建立预应力。采用缠丝的方法施加预应力有如下的缺点:(1)对容量大,内压高或直径大的结构,要求的预应力吨位大,钢丝间距过密;(2)由于钢丝紧贴筒壁,其外侧虽有喷射高标号水泥砂浆作保护层,但钢丝内侧仍有喷不到砂浆的死角。水或潮气的渗入,造成钢丝锈蚀,影响结构的安全使用;(3)由于筒壁的收缩、徐变及喷射砂浆层本身的收缩、温度变化等因素的影响,砂浆层易起鼓开裂、剥落,造成钢丝的锈蚀;(4)喷射砂浆的操作技术要求较高,施工难度大,材料浪费较多。而电热法用的钢材强度低,工艺复杂较少采用。

近些年来,预应力混凝土的设计方法,预应力高强钢材、预应力工艺、设备和机具的研究和生产都有了很大的发展。高强钢丝和钢绞线的大量生产、后张工艺的改进与提高,无粘结预应力筋束的研制、生产和大量应用,锚、夹具及张拉设备的系列化配套生产,为大容量圆形容器采用预应力技

术提供了极大的选择余地。因此有必要在圆形容器的设计中,采用国内外先进的设计思想和预应力工艺,设计出使用性能好、施工方便、安全可靠和综合经济效益高的贮仓结构。

在大港电厂两座 5000m^3 贮煤筒仓的设计中,我们采用了部分预应力的设计概念和多根无粘结预应力钢丝束并束排列和单根张拉的新方案。现将对该煤仓的设计作一介绍,以推动预应力大型容器的建造和使用。

二、预应力圆形煤仓的设计

贮煤仓的设计容量为 5000m^3 ,是电厂的备用煤仓,经常处于满载状态。煤仓内径 18m ,总高 32.30m ,壁厚 30cm ,仓底离地面 8.14m ,底部中央有四个卸料口,呈方形排列,故须在仓内下部用加气混凝土块砌成四个扇面,形成方锥形煤斗。斜面上现浇 20cm 厚混凝土,上铺铸石板。简图见图1。

预应力煤仓在荷载作用下的内力分析,与一般煤仓相同,此处不再赘述。筒壁环向拉应力沿高度的分布见表1。应该指出的是,由于仓底四块扇形现浇板的上端,沿着一条矢高为 5.7m 的曲线斜倚在筒壁上,在曲线矢高范围内筒壁的内力会由于板的侧压力而增大,其增值取决于板的刚度等因素。在这次设计中,参照以往的使用经验,这段高度内的筒壁环拉力取为表1中数值的1.5

陶学康 中国建筑科学研究院结构研究所总工程师 研究员

蔡鲁生 中国建筑科学研究院

王国栋 金宏 华北电力设计院

倍。

部分预应力混凝土的设计概念是近年来发展起来的。与全预应力的概念不同,部分预应力混凝土按照结构或构件的使用条件和环境、重要程度等因素,允许在混凝土中出现一定的拉应力,甚至微小的裂缝。这样,可以节约钢材,降低造价,还可以避免由于预应力值过大带来的张拉变形过大等缺点。与全预应力相比,具有明显的优点。这次设计的煤仓,地处海边,且经常处于满载,但考虑到一般的煤仓对抗裂的要求不高,在环向施加一定的预应力,按照部分预应力混凝土的概念设计,已能满足使用上的要求。因此,设计采用下列准则:

(1)在最不利荷载组合作用下,筒壁混凝土中的环向拉应力应低于 $0.5f_{ptk}$ (f_{ptk} 为混凝土的抗拉标准强度值)。

(2)在准永久荷载作用下,筒壁混凝土中不出现环向拉应力。(本煤仓设计中,煤炭装载 85% 时,混凝土中不出现拉应力)。

(3)当采用无粘结预应力筋束时,在可能出现拉应力的部位,混凝土中按构造要求或强度要求设置的有粘结普通钢筋的配筋率,不宜小于 0.4%,以减小在偶然荷载下裂缝的宽度。

(4)煤仓筒壁的纵向配筋,仍按普通钢筋混凝土计算确定,不配置预应力筋束,以节省钢材和减少施工的复杂程度。

(5)强度安全系数 $K=1.65$,预应力混凝土抗裂安全系数 $K_{cr}=1.265$ 。

(6)混凝土采用 C30 级,普通钢筋采用 II 级钢筋,预应力筋用无粘结钢丝束,摩擦系数为 $\mu=0.10$ 。

按上述准则设计和计算的配筋量沿高度从下到上划分为四个区段:第一段高 4m(标高 8.14~12.14m),第二段高 7m(标高 12.14~19.14m),第三段高 5m(标高 19.14~24.14m),24.14m 以上为第四段。每段的预应力筋配筋率依次为 0.32%、0.46%、0.18% 及 0.18%;非预应力筋配筋率均为 0.51%。其他计算结果列于表 2。

三、无粘结预应力筋在圆形煤仓的应用

在我国现有的预应力钢材及锚固系统中,粗钢筋由于成型困难、强度低、施工复杂,技术经济指标不好,不宜选用。在 高强钢丝和钢绞线系列

中,若采用有粘结的后张法系统,对配筋率较小、而要求较均匀配筋的煤仓筒壁,必须因预留管道过多而大量增加留管、定位、穿束、张拉和灌浆等工序的工作量。为简化施工,我们选用了单根无粘结筋并束排列和单根张拉的配筋方案。

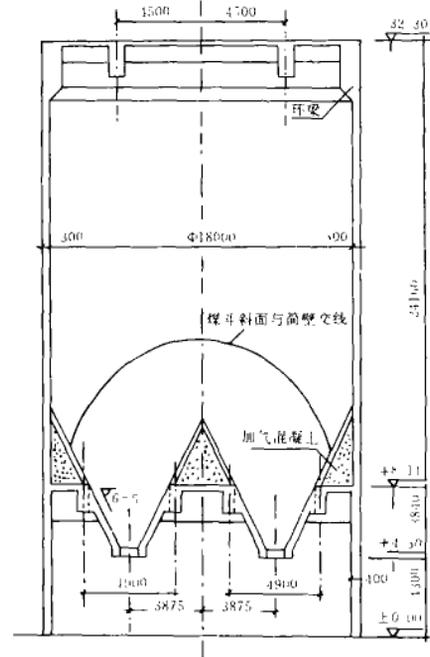


图 1 煤仓纵剖面图

仓壁环向拉力分布 表 1

标高	每米高环向拉力 kN/m
32.30	401.4
24.14	401.4
23.14	446.4
22.14	489.6
21.14	534.6
20.14	565.2
19.14	608.4
18.14	639.0
17.14	667.8
16.14	698.4
15.14	727.2
14.14	757.8
13.14	786.6
12.14	817.2
11.14	846.0
10.14	876.6
9.14	891.0
8.14	921.6

计算结果综合一览表

表 2

项 目	区段号			
	第一段 ▽8.4~▽12.14	第二段 ▽12.14~▽19.14	第三段 ▽19.14~▽24.14	第四段 ▽24.14~▽32.30
筒壁拉力 T(kN/M)	930	930	670	410
标 号	c30	c30	c30	c30
预应力筋种类	Φ5	Φ5	Φ5	Φ5
预应力筋种类	每 7 根为一类	每 7 根为一束	每 7 根为一束	每 7 根为一束
预应力筋极限强度(MPa)	1600	1600	1600	1600
预应力筋设计强度(MPa)	1280	1280	1280	1280
预应力张拉应力	1120	1120	1120	1120
$\sigma_{con} \parallel 0.7 \times f_{puk}$				
筒壁厚度 t(cm)	30	30	30	30
锚具损失 σ_{s1} * (MPa)	209.8	209.8	209.8	209.8
摩擦损失 σ_{s2} (MPa)	237.2	237.2	237.2	237.2
第一批损失 $\sigma_{s1} + \sigma_{s2}$ (MPa)	223.5	223.5	223.5	223.5
钢筋松弛损失 σ_{s3} (MPa)	50.4	50.4	50.4	50.4
砼收缩,徐变损失	40	60	40	40
σ_{s5} MPa				
第二批损失 σ_{s4} (MPa)	90.4	110.4	90.4	90.4
总损失 $\sigma_s = \sigma_{s1} + \sigma_{s4}$ (MPa)	313.9	333.9	313.9	313.9
有效预压应力(MPa)	2.47	2.44	1.41	1.41
每米高非预应力筋	Φ14@200	Φ14@200	Φ14@200	Φ14@200
面积 cm ² /m	15.4	15.4	15.4	15.4
非预应力筋配筋率 μ%	0.51	0.51	0.51	0.51
每米高预应力筋面积 cm ² /m	9.6	13.72	5.49	5.49
预应力筋配筋率				
μ 预%	0.32	0.46	0.18	0.18
总配筋率	0.83	0.97	0.69	0.69
μ 总%				
锚具形式	XM15-4	XM15-4	XM15-4	XM15-4
锚具间距(mm)	570	400	1000	1000
荷载引起的筒壁拉应力 σ(MPa)	3.1	3.1	2.2	1.37
设计抗裂安全系数	1.265	1.265	1.265	1.265
实际抗裂安全系数	>1.30	>1.6	>1.44	>2.34
设计强度安全系数	1.65	1.65	1.65	1.65
实际强度安全系数	1.88	2.45	1.83	2.99

* 由于束长较大,计算锚具变形损失时考虑了反向摩擦的影响,此值是张拉端的损失值。在中间截面无此项损失,故中间截面只取较大的摩擦损失。

** 由于每环的张拉端即为相邻环的中间截面,故损失值取两者的平均值。

单根无粘结预应力筋由 7 根 Φ5 钢丝或单根钢绞线组成,钢绞线直径为 12~15.7mm,在工厂涂油脂后通过注塑机用挤出法生产包套上密封的聚乙烯套管,即制成了无粘结预应力筋。其截面见图 2。这种钢丝束或钢绞线表面覆裹了一层特制的防锈油脂隔离材料,使得预应力筋与混凝土不粘结,张拉时的摩擦损失很小,适用于包角较大的预应力束,以减少壁柱数量和张拉次数,并保护钢束在运输、堆放和铺设时免遭锈蚀;与普通后张法相比,它无需预留孔道,不必灌浆,工序少,操作简便。无粘结预应力筋可以直条定长或盘圆供货、运

输和堆放。

本煤仓设计中,采用 7 根 Φ5 高强钢丝组成一根无粘结筋,用 4 根无粘结筋组成一束。锚具选用国内已推广的 XM15-4 群锚体系,每两束组成一环,锚于沿筒壁等距离分布的四根凸出壁柱中相对的两根壁柱上,预应力钢束的包角为 180 度,见图 3。相邻的一环则锚于另外两根柱上,使环向预应力更为均匀。壁柱的构造设计是非常重要的,应考虑到预应力钢束在这里要交叉通过,纵向非预应力普通钢筋及内外拉结箍筋的合理配置,预应力张拉端的局部承压抗裂和强度要求,以

及设置某些构造钢筋避免出现张拉裂缝等,详见图4。

后张无粘结预应力混凝土工艺,即在筒仓浇灌混凝土之前,把无粘结预应力筋束送到规定的位置,用人工沿筒壁铺成环形并加以固定,然后浇灌混凝土。当混凝土达到设计规定的强度时,即可开始施加预应力。工程单根张拉吨位为160kN,张拉伸长量约16cm。采用一端张拉,另一端补张拉的方法建立预应力,无粘结预应力筋张拉以应力控制为主,张拉伸长值为校验项目,实测无粘结预应力筋的摩擦系数小于设计值。两座煤仓共168束合计672根无粘结预应力筋,每根预应力筋均能顺利张拉,正常情况每台班可张拉无粘结预应力筋40根。为减小混凝土弹性压缩引起的预应力损失,图5表示环向预应力筋的张拉顺序。

锚具垫板下喇叭管中的空间用纯水泥浆灌实,以保护预应力筋。灌浆用525号水泥,水灰比为0.4~0.45,水泥浆标号不低于C30级。施加预应力工艺完成后,应将外露的预应力钢丝或钢绞线除油后在离夹片10cm以外散开弯折,和锚具一道用C40级混凝土浇筑保护。

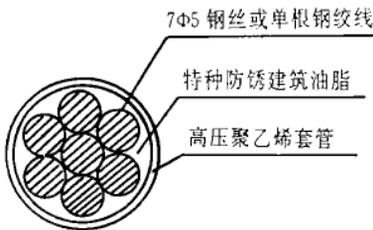


图2 无粘结筋横截面示意图

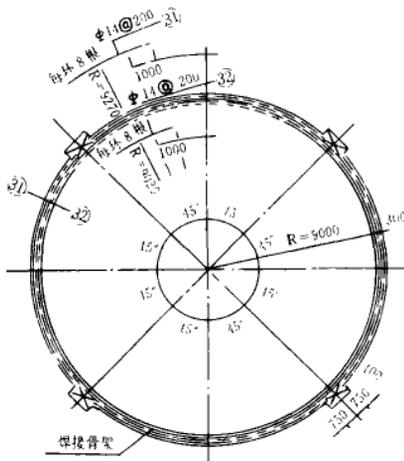


图3 $\nabla 8.14 \sim \nabla 32.30\text{m}$ 筒壁配筋
(图中双点划筋表示预应力钢丝束)

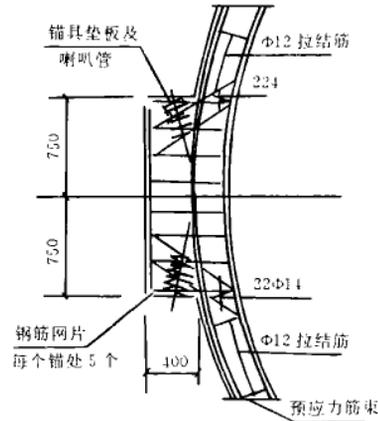


图4 扶壁柱的配筋

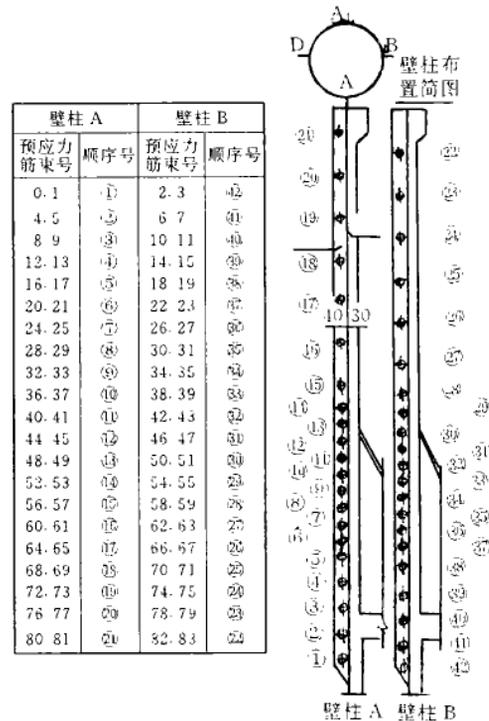


图5 预应力筋束张拉顺序图

四、技术经济意义

煤仓在贮料侧压力的作用下,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少的状态,不会引起仓壁混凝土开裂。这对处于沿海环境中的工程,确保结构的长期安全可靠使用,具有更加重要的意义。

(下转第6页)

制创造了良好的条件。这样作为核安全最后一道屏障的安全壳结构外表也会给人们留下一个良好的形象,因此通个二个工程的设计实践,安全壳选用预应力混凝土结构实在是非常理想的。

具体在预应力混凝土结构的设计中,由于设计公式非常繁复,各环节的控制比较严密,例如安全壳结构的预应力度也不能选得太大。太大既不经济又会在结构的某些部位造成过大的约束弯矩而导致开裂。因此在设计预应力混凝土结构时,某些工况下可看成是全预应力结构,而在另一些工况下,结构又可看成是部分预应力结构,而有关设计规范中对部分预应力结构的设计都比较含糊。因此通常结构设计工程师往往对预应力混凝土结构尤其是所谓部分预应力结构的设计带有某种恐惧的心理而尽量回避采用。

但作为预应力混凝土的结构设计,如果一开始就明白把预加力所造成的作用作为整个结构的荷载,那末所设计的整体结构事实上可以退化近

似看作为普通的钢筋混凝土结构一样来对待,这样原先很多的顾虑就可打消了。我们在二十年前设计秦山核电厂的预应力混凝土安全壳时就是按这样简单直观的思路闯过来的。通过我们对秦山核电厂预应力混凝土安全壳的1:15及1:10的两个模型作极限承载力试验及相应的非线性分析证明,所谓预应力混凝土结构在受力性能本质上与普通的钢筋混凝土结构是完全相似的。

只要我们能很好地留意手头的工程,很多结构尤其是某些特种结构都可以用预应力混凝土特别是部分预应力概念来作经济合理的设计。预应力结构尤其是后张法预应力结构不要怕存在某些裂缝。事实上后张预应力钢束就裂缝的保护条件来说,包括它所在的位置较深,有孔道套管以及有高碱性的砂浆包裹等,都比普通筋的条件优越,因此预应力混凝土特点是部分预应力概念的应用一定会有良好的发展前景。

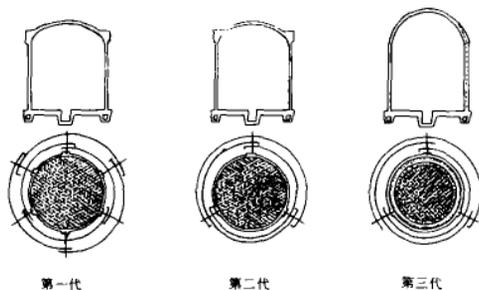


图1 预应力混凝土安全壳的演变

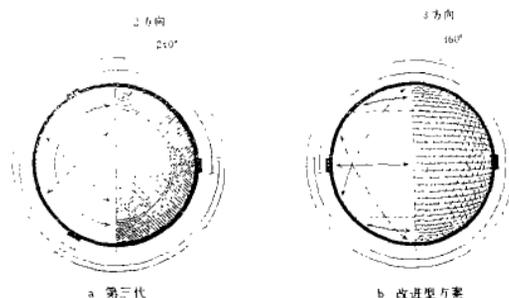


图2 安全壳的预应力钢束布置

(上接第18页)

本设计采用后张无粘结预应力筋并束排列和单根张拉新技术,与大形圆形筒仓结构其它方案相比,具有明显的优点:

- (1)可节约钢材约20%;
- (2)可显著提高环向预应力的吨位,从而满足建造大型煤仓等容器结构对环向预应力的要求;
- (3)钢丝束或钢绞线经涂裹建筑油脂和外包裹聚乙烯套管后,具有很好的防锈性能,又设置在筒壁截面内,外有混凝土保护层,更有利于提高高强

钢材的耐久性;

(4)比通常的后张法施工明显地简化施工,所需设备也远比缠丝简单;

(5)无粘结预应力束摩擦损失小,环向钢束的包角可以进一步扩大,从而节约锚具、夹具和垫板等钢材。

*该煤仓由铁道部第十六工程局二处负责施工,中国建筑科学研究院结构所承担无粘结预应力筋的张拉工作。