

某干煤棚三心圆柱面网壳结构设计与分析

张 晋

上海博尚建设有限公司 上海 200000

摘 要：随着科学技术和经济的发展，大跨度空间结构应用备受关注。大跨度空间结构由于自重轻，空间刚度好，中间无支撑能很好地满足建筑使用功能，故受到结构工程界的青睐。而火电厂的干煤棚结构形式多采用三心圆柱面网壳结构。三心圆柱面比标准圆柱面更具优势。这种结构形式不仅结构外形与煤堆外形相匹配，既能满足输煤设备斗轮机回转半径和起吊高度等运转要求，又能合理利用煤棚结构空间，因此三心圆柱面网壳就成了干煤棚这类建筑的首选结构形式。由于是大跨度空间钢结构，风荷载的作用和整体稳定性分析对于结构设计来说至关重要。

关键词：三心圆柱面网壳结构；初始几何缺陷；非线性整体稳定性分析

引言：三心圆柱面网壳结构属于大跨度空间结构，属于风荷载敏感型建筑，因此风荷载的作用和分析对于结构设计来说非常重要。另外大跨度空间结构一旦失稳，后果不堪设想故整体稳定性分析也至关重要。

1 项目概况

本项目厂址位于湖北省应城市中心城区郎君镇西北约1.4km处，西北距应城市中心城区约8km，东南距长江埠约7.2km的付家湾。电厂内设有1座条形斗轮机煤场，煤场场地总长度 376m，宽 100m，在煤场中部位置设置了1座干煤棚，跨度 92m，长度 112m，煤场内布置有1台悬臂式斗轮堆取料机，悬臂长度为35m，折返式布置；同时在煤场设有2个地下煤斗作为斗轮堆取料机的备用取料手段。

2 结构体系及受力特点

本项目干煤棚上部钢结构采用带直段的三心圆柱面双层正放四角锥网壳结构。节点形式为螺栓球节点。高强螺栓采用10.9级。钢球：45号钢；锥头和封板：Q345B；套筒：Q345B；销子：高强度钢丝；弦杆、腹杆为 Q345B。干煤棚网壳结构采用上弦支撑，直接支撑于混凝土基础上。支座为低位布置，支座面标为3.0m，干煤棚外表面采用压型钢板围护结构。

三心圆柱面网壳结构受力类似于拱结构，因此会对支座产生较大的水平力。使用后大量堆煤荷载和斗轮机的运行荷载会对网壳基础产生水平附加推力，有时会出现不均匀沉降。所以干煤棚的网壳支座受力复杂，支座设计是至关重要的。支座一般采用刚性铰支座或者橡胶支座，本项目基础外侧增加抵抗水平力的支撑体系，混凝土挡煤墙增加侧墙。如果水平力很大，地基处理也可采用斜桩方案。网壳结构设计主要从结构刚度，强度，稳定性三个方面来考虑。网壳结构受力分析采用的是杆

单元模型，采用3D3S软件对结构进行了数字模拟，通过静力学的方法验算构件的刚度，强度，稳定性。在通过非线性有限元方法分析结构整体稳定性^[3]，验算整体稳定性K值是否满足要求。

3 荷载及边界条件

荷载取值：1) 屋面非人行范围的活荷载标准值取值 0.30kN/m^2 。2) 风荷载应根据荷载规范考虑风荷载负压对整个屋盖的影响，檩条、压型钢板及连接应考虑正负压时的疲劳强度。3) 地震荷载：6度，反应谱特征周期值为0.35s，建筑场地类别为II类本地地拟建建筑物抗震设防类别为丙类。4) 温度荷载：环境温度最低温度 3°C ，最高温度按 38.7°C 考虑5) 基础沉降差，相邻支座 $2/1000$ 。6) 应考虑施工误差引起的附加应力。

干煤棚主要承受静荷载，活荷载，风荷载，温度荷载，地震荷载还有考虑支座不均匀沉降。

干煤棚结构体型巨大，风荷载对三圆心柱网壳结构的受力影响很大，在不同的风向角作用下，结构受力情况有较大差异。结构反弯点的位置有较大不同，故风荷载是三心圆柱面网壳结构的重要荷载。本项目方案阶段的风荷载验算，体型系数^[1]按《屋盖结构风荷载标准》JGJ/T481-2019的规定采用，附录A。B = 189m L = 92m, f = 28.7m, B/f = 2.15 > 2 体型系数区域划分

风荷载工况按 0° 风向角， 45° 风向角， 90° 风向角，分别按表A.0.2-1, A.0.2-2, A.0.2-3

4 结构计算及分析

采用3D3S软件进行建模，杆件数量16352个，节点数4195个，边界条件两侧刚性铰支座。

4.1 基于3D3S的静力分析结果

1) 承载能力极限状态验算：

通过有限元静力计算，结果表明：在荷载组合工况

下,强度应力比最大0.7,验算满足,平面内及平面外稳定验算结果最大应力比0.9,满足要求。

2) 正常使用极限状态验算:

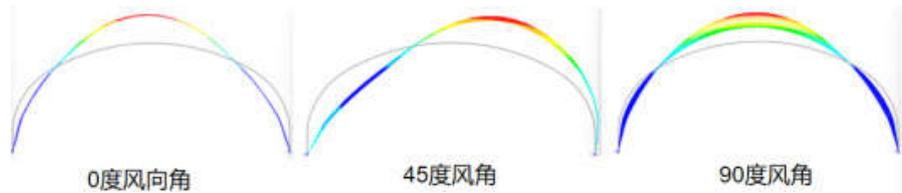
网壳最大位移出现跨中, $U_z = 205\text{mm}$, 满足规范要求: 跨中允许挠度要求 $\leq L/300$ 。

3) 杆件稳定性验算:

根据规范, 受压杆: $[\lambda] \leq 180$, 受拉杆: $[\lambda] \leq 250$ 。通过计算, 所有杆件最大长细比为144, 均满足长细比要求。

4.2 基于3D3S的风荷载的分析

结构在不同风向角^[1]的风荷载作用下, 上弦杆位移状态:



通过以上分析可以看出: 不同风向角风荷载作用下, 位移分布图有很大差异, 故只考虑一种风向角的风荷载作用是不全面的。

4.3 基于3D3S的整体稳定性分析

网壳的失稳即整体失稳和局部失稳。整体失稳是结构出现偏离平衡位置而发生的几何变位的一种失稳。局部失稳是单根杆件的失稳, 点失稳是整体失稳的开始。网壳结构常用分析方法有两种, 拟壳法和有限元分析方法, 拟壳法^[4]有很大局限性, 有限元分析方法不受结构形状, 边界条件, 荷载状况的限制, 但需要借助计算机才能完成。结构的荷载-位移全过程曲线可以准确地把结构的强度、稳定性以至于刚度的整个变化历程表示得清清楚楚。当考察初始缺陷和荷载分布方式等因素对实际网

壳结构稳定性能的影响时, 也均可从全过程曲线的规律性变化中进行研究。网壳的整体稳定性分析通常采用特征值屈曲^[3]分析方法来确定结构的临界荷载, 同时进行二阶非线性分析。特征屈曲和弧长法^[3]相结合, 可以更方便的得到结构整体失稳的全过程, 得到安全系数K值。

结构整体稳定性分析有两种组合工况:

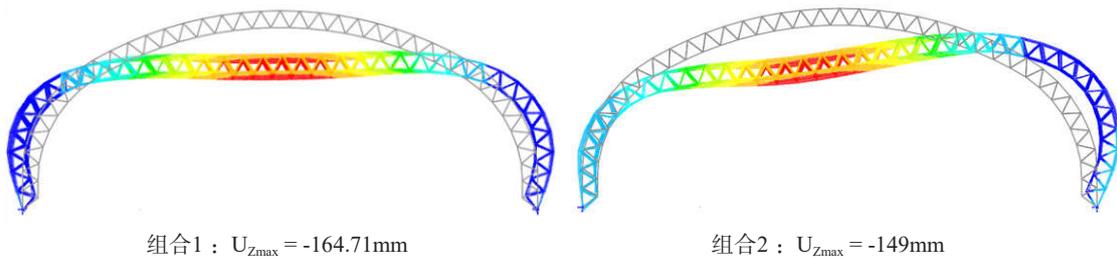
组合1: 1.0恒荷载+全跨活荷载

组合2: 1.0恒荷载+半跨活荷载

4.3.1 线性稳定分析:

经过分析, 第一阶屈曲模态如下图: 得出出现临界荷载的模态为模态1, 系数 $K = 17.716$

两种组合下的位移如下图:



通过计算结果显示: 线性整体稳定性分析的最不利荷载组合为: 1.0恒荷载+全跨活荷载

4.3.2 非线性稳定分析:

网壳的非线性稳定性分析方法按照《空间网格结构技术规程4.3.2条也就是荷载-位移全过程分析方法, 假定材料保持为线弹性, 也考虑材料的弹塑性。

$$K_t \Delta U^{(i)} = F_t + \Delta t - N_{t+\Delta t}^{(i-1)}$$

《空间网格结构技术规程4.3.3条 圆柱面网壳应考虑满跨均布荷载, 半跨均布荷载分布情况。

《空间网格结构技术规程》4.3.4条容许承载力为极

限承载力/K.弹性全过程分析: $K = 2$.弹性全过程分析 $K = 4.2$

①不考虑缺陷的非线性稳定分析

通过计算结果显示:

组合1得到K值14.5, 组合2得到K值为16.3

非线性整体稳定性分析(不考虑初始缺陷)的最不利荷载组合为: 1.0恒荷载+全跨活荷载

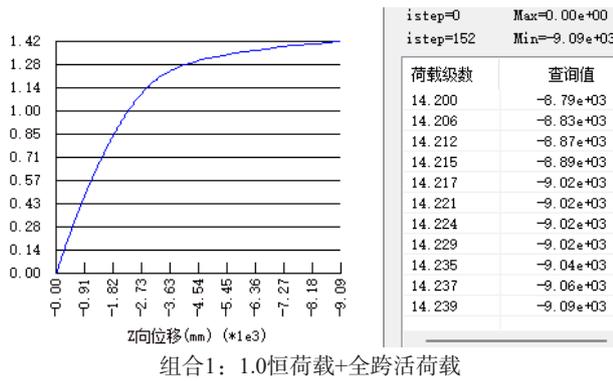
②考虑初始缺陷非线性稳定分析:

网壳结构不可避免地具有各种缺陷^[2]: 如杆件的初始弯曲, 初始应力, 初始偏心距等等, 而对于网壳结构

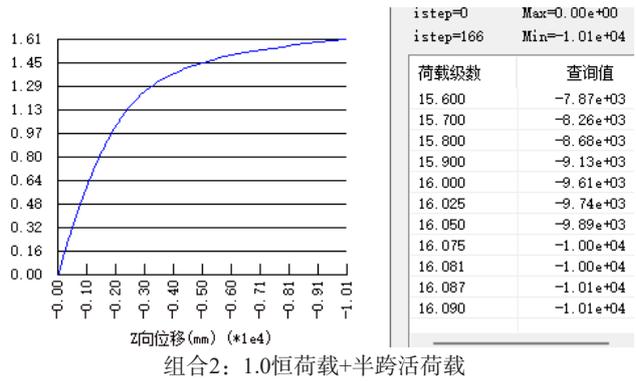
来说, 曲面形状的安装偏差即各节点的位置偏差是影响稳定性的主要初始缺陷因素。受网壳跨度大, 受荷不对称, 安装偏差等原因的影响, 该方法不能准确地反应结构稳定性。随着有限元程序的发展, 可以对有初始缺陷的网壳进行非线性整体稳定性分析。进行网壳全过程分析^[3], 初始几何缺陷的分布可采用结构的最低阶屈曲模态^[2], 缺陷最大计算值按网壳跨度1/300取值。这种方法可以用一种逐渐增加荷载的非线性方法分析得出结构开

始出现失稳的临界荷载, 跟踪结构的后屈曲行为, 能更好切合实际进行结构设计。考虑初始缺陷后进行非线性分析, 当计算结果出现发散, 不收敛的情况时可认定为临界失稳状态, 此时得到荷载倍数-位移曲线。按此分析方法求得的第一个临界点处的荷载取值即为网壳的稳定极限承载力。

结构计算得到两种组合工况下的第一阶屈曲模态的荷载倍数-位移曲线



组合1: 1.0恒荷载+全跨活荷载



组合2: 1.0恒荷载+半跨活荷载

组合1: 位移值为9090mm时, 出现明显波动, 发散, 可以认定满跨活荷载作用下此时为稳定极限承载力, 得到K值14.2。

组合2: 位移值为10100mm时, 出现明显波动, 发散, 可以认定半跨活荷载作用下此时为稳定极限承载力, 得到K值为16.1。

计算结果显示: 考虑初始缺陷非线性整体稳定性分析的最不利荷载组合为: 1.0恒荷载+全跨活荷载

以上两种组合工况下荷载级系数 $K > 4.2$, 均满足规范要求。考虑缺陷和不考虑缺陷, K值下降幅度并不大, 所以对于三心圆柱面双层网壳结构, 不像单层球面网壳结构对初始缺陷^[2]那么明显, 但是K值也是在降低的, 故缺陷还是不可忽视的。

结论

三心圆柱面网壳结构: 1) 活荷载的不对称分布对结

构受力不太敏感, 恒荷载+全跨活荷载, 和恒荷载+半跨活荷载两种组合受力分析显示, 不利荷载组合均为全跨活荷载。2) 风荷载的作用至关重要, 不同风向角作用下的风荷载对结构的受力状态明显不同, 均需考虑。3) 结构的非线性整体稳定性分析需考虑几何初始缺陷, 属于初始几何缺陷不敏感的结构体系。

参考文献

[1]杜文风.网架、网壳结构设计实例与解析[M]. 中国电力出版社. 2012;
 [2]杜新喜.大跨度空间结构设计与分析[M]. 中国建筑工业出版社]. 2014;
 [3]沈世钊, 陈昕.网壳结构稳定性[M]. 北京: 科学出版社. 1999;
 [4]华泽起.网壳结构的整体稳定性分析方法[J]. 山西建筑, 2010, 36(9) 64-65