

# 干煤棚网壳结构使用现状与缺陷分析\*

罗尧治 吴玄成 沈雁彬 胡 宁  
(浙江大学 空间结构研究中心 杭州 310027)

**摘 要:** 电厂干煤棚大都采用了大跨度柱面网壳结构,但由于煤场的腐蚀环境影响和堆煤过高,许多已建煤棚不同程度地出现网壳结构杆件的锈蚀和弯曲现象。如果结构中存在大量杆件的锈蚀和弯曲,显然会导致结构安全度降低,甚至破坏。以实际工程为例,研究缺陷对结构强度、稳定性的影响。建立杆件锈蚀和弯曲的计算模型,提出并采用随机缺陷模态法研究具有缺陷的结构承载能力。

**关键词:** 网壳结构 缺陷分析 锈蚀 初弯曲 等效刚度

## CURRENT STATUS AND IMPERFECTION ANALYSIS OF LATTICED SHELL STRUCTURES OF INDOOR COAL STORAGE YARD

Luo Yaozhi Wu Xuancheng Shen Yanbin Hu Ning  
(Research Center of Space Structure of Zhejiang University Hangzhou 310027)

**Abstract :** Cylindrical latticed shell structures are widely used in indoor coal storage yard of the power plant. However, due to the rusty atmosphere and the gravity of the coal, the rusty and bending bars appeared in the use of the structures. If there are too many members have seriously rusted and bent, the safety of the structures will be greatly decreased and even be collapsed. Taking the example of a practical engineering, this paper studied the influence of imperfection to the strength and stability of structures and established a model for calculating the corrosion and bending of members. In the final, the paper introduced the method of calculating the bearing capacity of this kind of structures with a random imperfection model.

**Keywords :** latticed shell structure imperfection analysis rust initial bending equivalent stiffness

### 0 前 言

随着我国火电厂的发展,一种用来满足储存和运输等工艺要求的干煤棚得到了兴建。干煤棚的建筑功能主要是大型的存储库房,必须有一定的储存和作业空间,即结构必须满足一定的净空要求,所以这种结构的跨度和净高都较大,通常跨度都在 70m 以上。随着空间网格结构的广泛应用,大跨度干煤棚基本上采用空间网壳结构的形式<sup>[1,2]</sup>。20 世纪 90 年代以来,我国相继建成了南京金陵石化电厂干煤棚、湖南石门电厂干煤棚、台州电厂干煤棚、嘉兴电厂干煤棚、湘潭电厂干煤棚、河南鸭河口电厂干煤棚等几十座大跨度柱面网壳结构的干煤棚。

干煤棚结构由于工艺的要求一般采用两对边落地的柱面体形,如图 1 所示。但由于堆煤过高,在使用中因挤压产生大量杆件弯曲,如图 2。同时,在煤的腐蚀环境下,钢管和球节点易发生锈蚀,如图 3。杆件的锈蚀和弯曲现象比较严重,导致结构的局部破坏,严重的还会引起整个结构的倒塌,如 2000 年 4 月 14 日耒阳电厂干煤棚的倒塌(图 4),造成重大的财产损失<sup>[3]</sup>。

### 1 杆件锈蚀对结构受力影响

#### 1.1 钢材锈蚀损伤机理及其力学性能

##### 1) 钢材锈蚀损伤和破坏机理<sup>[4]</sup>

钢材和煤堆里的腐蚀性物质发生电化学反应,造成钢材

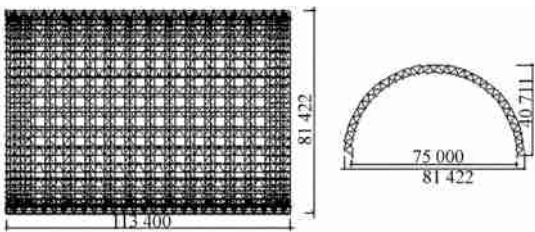


图 1 某电厂干煤棚网壳结构平剖面



图 2 某电厂干煤棚煤堆挤压和杆件弯曲现象

的锈蚀,当钢材处于负载之下,必然增加作用在金属上的应力;另外,杆件还会发生局部腐蚀,应力腐蚀及氢脆等。

局部腐蚀是由于金属内部存在缝隙,并夹杂着介质时而

\*国家自然科学基金项目(编号:50378083)资助。

第一作者:罗尧治 男 1966 年 8 月出生 教授 博导

收稿日期:2005 - 01 - 04

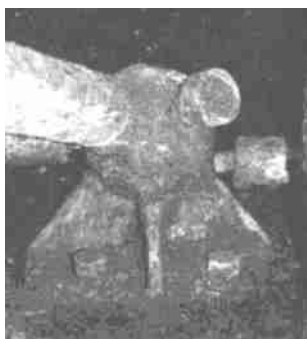


图3 堆煤环境下钢材的锈蚀现象



图4 湖南耒阳电厂干煤棚倒塌

发生的腐蚀形态。在腐蚀环境里金属一部分表面比其余表面以较高的速度发生腐蚀。这类腐蚀有明显的破坏性,它能引起其他类型的腐蚀:局部腐蚀产生的斑点常被腐蚀产物形成的膜所覆盖,这层膜疏松的附着在表面时,有助于形成充气条件,引起进一步的腐蚀。

产生应力腐蚀的有效应力是拉伸应力,它是工程应力、残余应力和装配应力的叠加。当钢材受到拉伸应力的作用并与某些腐蚀介质接触时,产生裂纹,这种现象叫做应力腐蚀开裂。与下述两步骤过程有关:首先,电化学反应产生一个能使应力提高的斑点;第二,应力提高使裂纹移动了一个短距离,接着再次发生电化学反应。

在腐蚀环境中,应力作用破坏了一些金属,氢原子进入晶格,这种现象叫做氢脆或氢脆裂。氢脆一般发生在硫化物介质中,硫离子妨碍了以原子形式进入金属的氢的析出反应,氢对材料的弹性模量不发生影响,脆裂主要发生在晶界,而且从受到最大拉伸应力的地方开始,实际氢脆是直线前进的,与外加应力的方向相垂直,这样的脆裂发展非常迅速,结构可能会因为氢脆裂引起迅速破坏,造成严重事故。

## 2) 锈蚀钢材的力学性能变化

### a. 应力 - 应变关系与钢材锈蚀程度的关系

未锈蚀钢材有明显的屈服点和一定长度的屈服台阶,抗拉强度与屈服强度之比一般在 1.5 倍以上。然而当钢材严重锈蚀后,应力 - 应变关系发生很大变化,没有明显的屈服点,屈服强度与抗拉强度非常接近,容易引起结构的突然破坏。试验表明,当截面损失在 10 % 以上时,钢材不再具有明显的屈服点。

### b. 伸长率与钢材锈蚀程度的关系

钢材的伸长率尽管在设计计算中没有直接反应,但它是干煤棚网壳结构使用现状与缺陷分析——罗尧治,等

表征钢材内在质量的一个重要指标。钢材锈蚀后,伸长率均有明显下降,当截面损失小于 5 % 时,钢材的伸长率基本上大于规范最小允许值;当截面损失大于 10 % 时,钢材的伸长率则小于规范最小允许值。钢材锈蚀后,其伸长率降低程度远远大于截面面积的损失率。具有局部锈蚀的钢材,蚀后伸长率与原始伸长率的关系可由下述统计公式表示<sup>[5]</sup>:

$$s_s = (0.874 - 0.012 s_s) s_{原始} \quad (1)$$

式中  $s_s$  ——钢材锈蚀的伸长率;

$s_{原始}$  ——正常钢材的伸长率;

$s_s$  ——截面损失率。

可以看出,伸长率的降低使锈蚀钢筋的塑性变差,其原因是塑性变形主要集中在截面锈损最大,发生断裂的部位。这对于结构的影响非常不利,往往是发生脆性破坏的原因。

### c. 屈服强度和抗拉强度与钢材锈蚀程度的关系

屈服强度和抗拉强度随着钢材锈蚀量的增加而降低,其原因有二:其一是钢材锈损以后有效截面面积变小;其二是锈蚀钢材的表面凹凸不平,受力以后严重的应力集中使其所抗拉力进一步减小。一般认为截面损失在 5 % ~ 10 % 之间时,屈服强度和抗拉强度可以按与母材相同来考虑,承受荷载的计算则需考虑截面的折减。

## 1.2 杆件锈蚀对干煤棚结构受力影响

锈蚀导致钢材物理性能的改变,更主要的引起杆件有效截面的削弱。本节引用文献[6,7]的资料采用折减杆件壁厚方法来计算锈蚀的作用。在钢管内径不变的情况下,取壁厚折减 0.5、1.0、1.5、2.0mm 四种情况进行结构计算。

同时,考虑到堆煤造成的锈蚀主要在支座向上一个网格内比较严重,所以计算分析的对象选取支座处向上一个网格内的杆件。

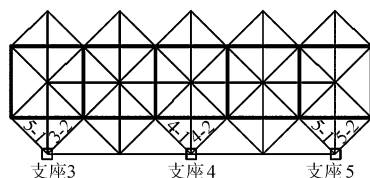


图5 杆件编号

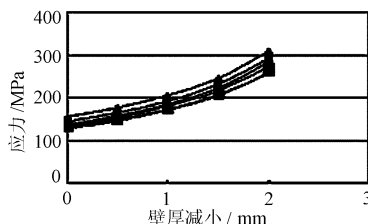


图6 锈蚀应力

图5 给出被考察的干煤棚网壳局部杆件编号,图6 为杆件在锈蚀引起壁厚削弱情况下的应力变化。计算结果表明:

1) 随着锈蚀程度的增加,壁厚折减量的增大,杆件应力增大的趋势加快;

2) 一根杆件锈蚀,对周围的杆件应力的影响较小,只是该杆件本身的应力变化比较明显;

3) 当靠近支座附近的所有杆件全部发生锈蚀, 计算发现也不会对周围杆件产生重大的影响。但是与支座相连的腹杆的应力变化比较大, 当壁厚减小达到一定值时, 这些腹杆将出现大量的超应力。

## 2 杆件弯曲的计算模型及其对结构受力影响

### 2.1 计算模型

如前所述, 煤的堆压使杆件产生弯曲, 即使清理掉煤堆, 杆件弯曲还是存在的。杆件一旦发生了弯曲, 对压杆是极其不利的, 它本身的刚度会随着挠度的增加而降低, 如果产生的挠度比较大, 刚度将会急剧下降。不同压杆的刚度降低程度与截面属性有关, 截面积越小的杆件刚度降低得越快。图 7 曲线反映了弯杆的刚度(截面)随挠度折减的规律。局部杆件刚度的变化, 会带来整体刚度的改变, 进而使整个网壳结构内力重分布, 周围受其影响大的那些杆件应力会产生很大的变化。

考虑到杆件的弯曲主要是因为施工工艺或者煤的堆压

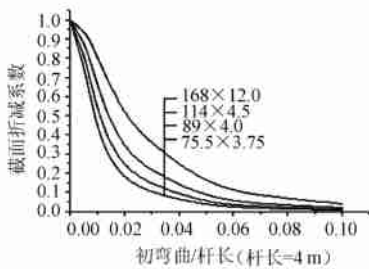


图 7 杆件弯曲截面(刚度)折减系数变化规律

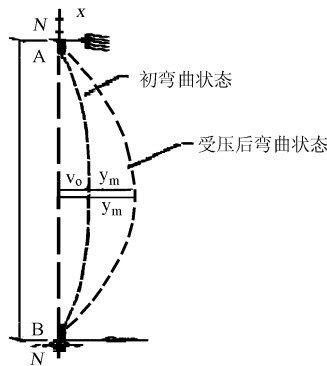


图 8 弯曲杆件计算简图

引起, 不是设计承载力不足而导致压弯, 因此, 将此弯曲作为杆件的初始弯曲考虑(图 8)。把刚度降低的弯杆用等刚度的直杆替换, 不同的初挠度使弯杆产生了不同的刚度, 在不考虑杆件自身长度变化的前提下, 刚度直接与截面积成正比。通过直接改变杆件截面积的方法来反映这个等代过程, 作为计算其他杆件内力变化的依据。

假定发生弯曲后的杆件挠度曲线用最接近实际状况的正弦曲线来近似, 即

$$y_0 = v_0 \sin \frac{\pi x}{l} \quad (2)$$

弯杆的等代刚度<sup>[8]</sup>:

$$k = \frac{1}{\frac{8v_0^2}{D^2(1+\eta^2)} + 1} \frac{EA}{l} = \frac{EA}{l} \quad (3)$$

其中,  $\eta$  为刚度折减系数, 即

$$\eta = \frac{1}{\frac{8v_0^2}{D^2(1+\eta^2)} + 1} \quad (4)$$

式中  $d$ ——钢管内径;

$D$ ——钢管外径;

$\eta$ ——内外径之比, 即  $\eta = d/D$ 。

### 2.2 杆件弯曲对干煤棚网壳结构受力影响

根据网壳结构的实际情况, 杆件弯曲主要集中在支座附近区域。因此, 选择支座附近有代表性的杆件来进行具体考察。

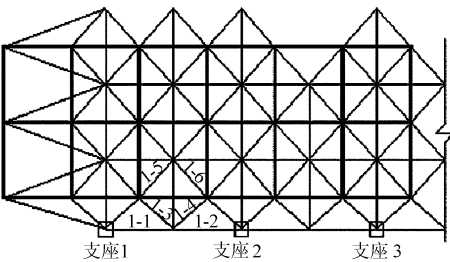


图 9 杆件编号

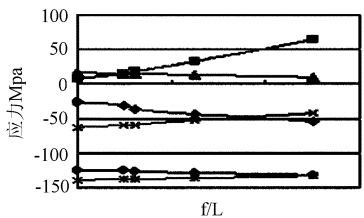


图 10 弯曲应力变化

图 9 为被考察的干煤棚网壳局部杆件编号, 图 10 为杆件由于弯曲引起壁厚削弱情况下的应力变化。由于篇幅关系, 其他各种弯曲杆件分布情况不再一一列出。计算结果表明:

- 1) 杆件弯曲对其他杆件的影响一般在两个网格之内, 第 3 个网格之外影响迅速减小;
- 2) 弯曲杆件本身的应力增加较大;
- 3) 支座处的腹杆弯曲对周围的腹杆影响比较大, 但对上、下弦杆的影响较小。

## 3 网壳结构随机缺陷模态分析

### 3.1 随机缺陷模态分析法

网壳结构的缺陷涉及多个因素, 要全面分析各种缺陷是非常复杂的。干煤棚在使用中最主要的、比较普遍的缺陷是杆件的锈蚀和弯曲, 因此, 本文仅研究此类缺陷对结构整体承载力的影响。

随机论认为, 缺陷随机地分布于结构当中, 且其大小近似的呈正态分布, 缺陷的大小由程序产生的随机数来控制。正态分布的随机数可以通过函数变换关系由均匀随机数产生, 设  $r_1, r_2$  是两个相互独立的  $(0, 1)$  区间均匀分布的随机变量, 将它们作如下变换<sup>[9]</sup>:

$$\begin{cases} y_1 = (-2\ln r_1)^{-\frac{1}{2}} \cos 2r_2 \\ y_2 = (-2\ln r_1)^{-\frac{1}{2}} \sin 2r_2 \end{cases} \quad (5)$$

其逆变换为：

$$\begin{cases} r_1 = e^{-\frac{1}{2}(y_1^2 + y_2^2)} \\ r_2 = \frac{1}{2} \left[ \arctg \left( \frac{y_2}{y_1} \right) + C \right] \end{cases} \quad (6)$$

其中  $C$  为常数。由于  $r_1$  及  $r_2$  相互独立, 且在  $(0, 1)$  区间均匀分布的随机变量, 所以在  $0 < r_1 < 1, 0 < r_2 < 1$ 。

$$f(r_1, r_2) = f(r_1)f(r_2) = 1 \quad (7)$$

利用函数变换的雅可比 (Jacobi) 行列式：

$$J = \begin{vmatrix} \frac{\partial}{\partial r_1} & \frac{\partial}{\partial r_2} \\ \frac{\partial}{\partial y_1} & \frac{\partial}{\partial y_2} \end{vmatrix} \quad (8)$$

当  $J$  的值不为 0 时, 可得随机向量  $(y_1, y_2)$  的二维联合密度函数为：

$$f^*(y_1, y_2) = f(r_1, r_2) |J| = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-\frac{y_1^2}{2}} \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-\frac{y_2^2}{2}} \quad (9)$$

又由于  $y_1$  和  $y_2$  相互独立, 所以  $y_1$  和  $y_2$  的概率密度函数为：

$$f_1(y_1) = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-\frac{y_1^2}{2}} \quad (10)$$

$$f_2(y_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-\frac{y_2^2}{2}} \quad (11)$$

可见  $y_1$  和  $y_2$  分别是两个互相独立的标准正态分布随机数。将随机数的值作为缺陷的大小赋给理想结构, 就得到近似的实际结构。此种方法的优点是能较真实的反映实际结构中的缺陷分布规律。

### 3.2 随机缺陷对干煤棚网壳结构的影响

本文结合文献[6]中电厂的双层柱面网壳干煤棚出现的锈蚀和弯曲问题, 采用随机缺陷模态法。计算时根据实际结构的锈蚀情况控制随机数的产生系数, 锈蚀量最大的杆件的壁厚削弱控制在 1.5mm 以内, 对结构做  $N = 50$  次的荷载 - 位移全过程计算, 得到相应的极限荷载与锈蚀率的关系, 如图 11 所示。其中横坐标为壁厚削弱量为 1.5mm 的杆件所占总杆件的百分率, 纵坐标为结构的极限荷载的统计平均值, 锈蚀前的极限荷载值为 29.653kN。从图 11 可以看出, 随着锈蚀杆件的增多, 结构的承载力与锈蚀率的增加近似的保持线性关系。

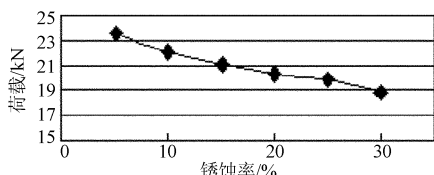


图 11 锈蚀率与极限荷载关系

图 12 是根据随机缺陷模态法计算得到的杆件弯曲率与结构极限承载力的统计平均值的关系, 杆件弯曲率指弯曲杆件占总杆件的百分比。计算中考虑了 50 种缺陷模态分布, 干煤棚网壳结构使用现状与缺陷分析——罗尧治, 等

杆件的最大弯曲量取杆长的 1/40。计算表明, 弯曲杆件率增大, 结构的承载力显著下降, 当弯曲杆件率占 10 % 时极限承载力仅为理想结构的 50.67 %。

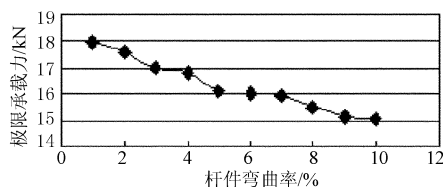


图 12 杆件弯曲率与极限承载力关系

## 4 结 语

因干煤棚网壳结构呈现单向受力状态, 内力分布很不均匀, 跨度方向的弦杆和支座附近的腹杆是主要受力杆件, 而纵向的弦杆受力较小, 实际上仅起到构造作用, 相对来说是次要杆件。根据实际情况, 支座附近的杆件容易在煤的堆压下产生锈蚀、弯曲等损伤, 这对结构的安全是不利的。因此, 可以认为, 支座附近的杆件是影响结构安全性的敏感区域。

本文研究了这些敏感区域杆件锈蚀和弯曲后对结构的受力影响, 结果表明, 不同部位的杆件锈蚀和弯曲对结构的受力影响是不同的, 影响最大的是支座附近的腹杆。同时, 由于锈蚀和弯曲的原因, 杆件自身的应力变化最大, 对周围杆件有一定影响。

随机缺陷模态法是实际工程结构中缺陷模拟分析的有效方法, 其特点是利用多次计算的结果取平均值求得结构的承载力, 当样本数  $N$  的取值越大, 求出的极限荷载越接近真实值。

本文受湖南省电力工业公司的委托, 是在对湖南石门电厂干煤棚和湘潭电厂干煤棚网壳结构进行安全性评估基础上完成的。

## 参考文献

- 1 罗尧治, 葛 玮. 大型三心圆柱面网壳结构体型优化. 第一届结构与地基国际学术研讨会论文集, 杭州: 1994. 320 ~ 325
- 2 罗尧治, 胡 宁, 沈雁彬. 108m 跨度网壳结构的设计. 第二届现代结构工程学术研讨会, 2002. 171 ~ 177
- 3 尹德钰, 刘善维, 严 慧, 罗尧治. 耒阳电厂干煤棚倒塌事故意见. 2000
- 4 李金桂, 赵闰彦. 腐蚀和腐蚀控制手册. 北京: 国防工业出版社, 1988
- 5 惠云玲, 林志伸. 锈蚀钢筋性能试验研究分析. 工业建筑, 1997, 27 (6): 10 ~ 13
- 6 浙江大学空间结构研究中心. 湖南石门电厂干煤棚结构安全性评估报告. 2001
- 7 浙江大学空间结构研究中心. 湖南湘潭电厂干煤棚结构安全性评估报告. 2001
- 8 罗尧治, 符 刚, 等. 两端简支弯曲杆件的等效刚度、稳定性计算公式. 钢结构, 2003 (2): 53 ~ 55
- 9 王惠刚. 计算机仿真原理及应用. 北京: 国防科技大学出版社, 1994