



## 2 有限元模型的建立<sup>[5]</sup>

### 2.1 几何模型的建立

钢煤斗的设计主要包括两类构件：煤斗壁和加劲肋。有限元建模时采用混合维建模法建立其几何模型，即用曲面或平面表示煤斗壁，用线表示加劲肋。指定单元类型时，用板壳单元 shell63 模拟煤斗壁，用梁单元 beam189 模拟加劲肋，对有限元模型进行了高度抽象，大大降低了模型的复杂度，模型局部修改（如修改板厚）比较方便，对于反复试算的设计优化来说比较方便。

钢煤斗圆柱形仓筒壁板厚 10mm、支撑裙筒厚 30mm，均采用 Q235B 钢板；圆锥台漏斗壁板、斜圆锥漏斗曲面板、斜圆锥漏斗斜平板均采用 10mm 厚的 Q345B 钢板。加劲肋均采用 Q235B 热轧型钢；斜圆锥漏斗两斜平板相交处采用 Q345B 倒“T”形钢梁。

### 2.2 边界条件

裙筒底部等分点布置 16 个支座施加固定约束，考虑到煤斗支撑梁承受荷载会产生变形，有限元空间分析计算支座反力时考虑了 3 种不同情况：

(1) 煤斗 16 个支座之间没有相对沉降差，即煤斗支承梁没有挠度变形，16 个支座均在同一水平面上。

(2) 支承煤斗的楼板梁由于支座传来的集中荷载发生变形，造成煤斗支座发生相对沉降（不均匀沉降），16 个支座不在同一水平面上。

(3) 支承煤斗梁的框架梁因承受荷载产生变形，框架柱不发生竖向变形。

### 2.3 荷载计算

荷载计算及施加方法参照《钢筋混凝土筒仓设计规范》(GB50077-2003) 及《粮食钢板筒仓设计规范》(GB50322-2001) 的有关规定进行荷载计算。计算荷载中，恒载包括煤斗自重及顶盖自重，活荷载为考虑满煤的重量。

## 3 计算结果及分析

### 3.1 计算结果

通过对上述有限元模型的计算分析得到了煤斗壁板的应力分布及变形分布、煤斗壁板的最大应力及最大变形、煤斗各支座反力值。本文暂不讨论煤斗壁板应力和变形分布，仅讨论煤斗支座受力情况，图 2 为支座布置及编号，通过分析计算得到了 3 种工况下 16 个支座的反力值（见表 1）。

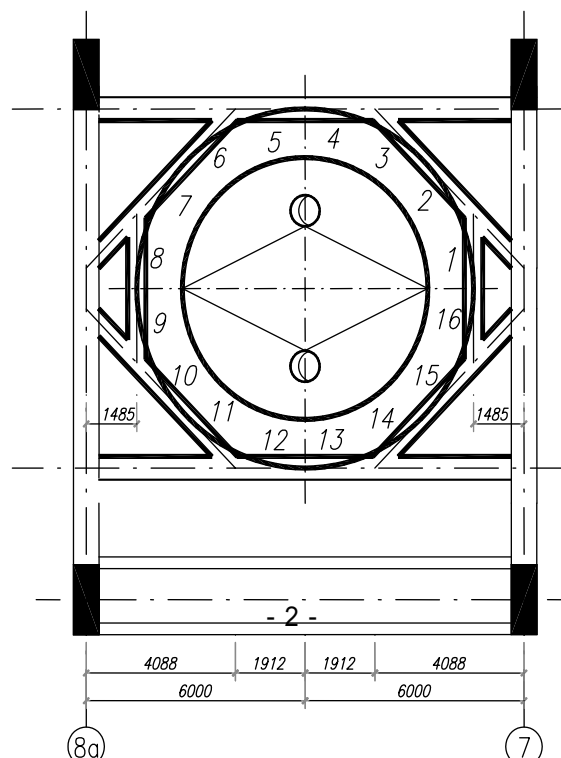


表 1 有限元分析得到的三种情况下支座反力统计表

支座 编号	单元节点 号	第一种情况下的 支座反力/kN	第二种情况下的 支座反力/kN	第三种情况下的 支座反力/kN
1	54518	665.96	634.31	646.78
2	54630	551.1	558.61	574.40
3	54658	425.78	503.11	441.29
4	54686	347.59	304.00	328.22
5	54490	348.17	304.48	328.62
6	54546	426.77	503.99	441.93
7	54574	550.71	558.59	574.29
8	54602	662.23	631.05	643.96
9	54950	669.30	624.68	649.18
10	55060	551.93	541.39	574.12
11	56678	422.98	487.92	438.30
12	54922	351.09	331.73	332.99
13	55005	348.26	326.61	329.33
14	54977	425.16	492.13	440.71
15	55142	552.02	539.31	575.57
16	55114	662.47	619.60	643.82
总 和		7961.5	7961.5	7961.5

### 3.2 结果分析

### 3.2.1 支座总反力误差分析：

实际总反力：煤的重量+钢煤斗重量+悬挂吊重=8076.0kN。

有限元分析计算的总反力为 7961.5kN；

$$\text{误差率} = \frac{|8076.0 - 7961.5|}{8076.0} \times 100\% = 1.42\%$$

误差产生的原因主要是由于有限元分析建模时，实际的曲面结构用有限元模型中的平面片单元的集合来近似代替。也就是说，有限单元的表面积之和略小于实际曲面的表面积，所以，作用在有限元模型上的面荷载略小于实际荷载，因而产生了上述误差。有限元分析本身是对实际结构的近似计算，产生误差是必然的，只要误差很小，还是可以接受的。可以看出，本工程煤斗的支座反力分析误差很小，计算结果是合理可靠的。

### 3.2.2 支座反力分析

一般常规计算只是简单粗略地将煤斗总荷重平均分配到各支座点来计算支承梁的强度及变形。通过有限元空间分析结果可以看出，由于煤斗结构并非各向对称，决定了支座承受的荷载并不是均匀分布；同时由于支承煤斗的煤斗梁承受支座传来的集中荷载时将发生变形，而支承煤斗梁的框架梁也会因承受荷载产生变形，煤斗支座之间将会产生不均匀沉降，因此支承梁的变形会进一步引起支座反力的重分配。

为了便于比较支座反力的情况，支座的反力按  $7961.5\text{kN}/16=497.59\text{kN}$  考虑。通过有限元分析计算的煤斗支座反力与粗略平均分配的支座反力误差值以及考虑支座沉陷对支座反力的影响，见表 2，其中：

有限元计算的支座反力与平均分配的支座反力差值比=（有限元计算结果-平均分配结果）/平均分配结果。

考虑支座相对沉陷与不考虑支座相对沉陷的支座反力差值比=（考虑支座沉陷结果-不考虑支座沉陷结果）/不考虑支座沉陷结果。

表 2 有限元分析计算结果差值比

项 目	有限元计算的支座反力与平均分配的 支座反力差值比/%			考虑支座相对沉陷与不考虑支座相对 沉陷的支座反力差值比/%	
	情况 1	情况 2	情况 3	情况 2	情况 3
1	33.84	27.47	29.98	-4.75	-2.88
2	10.75	12.26	15.44	1.36	4.23
3	-14.43	1.11	-11.31	18.16	3.64
5	-30.03	-38.81	-33.96	-12.55	-5.61
6	-14.23	1.29	-11.19	18.09	3.55
7	10.67	12.26	15.41	1.43	4.28
8	33.09	26.82	29.41	-4.71	-2.76
9	34.51	25.54	30.46	-6.67	-3.00
10	10.92	8.80	15.38	-1.91	4.02
11	-14.99	-1.94	-11.91	15.35	3.62
12	-29.44	-33.33	-33.08	-5.51	-5.15

13	-30.01	-34.36	-33.81	-6.22	-5.44
14	-14.56	-1.10	-11.43	15.75	3.66
15	10.94	8.38	15.67	-2.30	4.27
16	33.14	24.52	29.39	4	-30.15
最大差值比	34.51	-38.90	-34.04	18.16	-5.57
最小差值比	10.67	-1.10	-11.19	1.36	-2.81

#### 4 结语

通过对该钢煤斗的有限元空间分析计算支座反力,可以看出,对于各向非对称煤斗的支座反力采用传统的平均分配方法将产生较大的误差,不能准确反映支座的受力情况。下部两个斜椭圆锥台漏斗相交处的倒 T 形梁两端附近 4 个支座即 1、8、9、16 号支座(见图 2)反力差值比最大,比平均分配的支座反力增大约 30%;而与之相对的 4、5、12、13 号支座的反力差值比也较大,比平均分配的支座反力减小大约 30%左右。

通过表 2 的数据比较可以看出,简单地将煤斗总荷载平均分配到支座上并不能真实地反映实际受力情况,与利用有限元计算的煤斗支座反力误差较大,对其煤斗支承梁内力计算影响较大。有限元计算是否考虑支座沉陷,对支座反力也会产生一定影响,较前者相比影响相对较小;框架梁的变形对支座反力重分配影响更小,可以忽略不计。因此,对于非各向对称煤斗支座反力,将煤斗总荷载平均分配到支座上计算煤斗支承梁是不合适的,建议采用有限元分析或其他合适的方法进行分析计算,以保证煤斗梁的安全性、经济性。

---

注:本文发表在《武汉大学学报》2006 年