

# 有限元法分析计算在首钢京唐钢铁联合有限责任公司钢铁厂 5500m<sup>3</sup> 高炉设计中的应用

蒋治浩 苏 维 张 建

(北京首钢设计院炼铁室)

**摘 要** 用有限元法分析计算首钢京唐钢铁联合有限责任公司钢铁厂 5500m<sup>3</sup> 高炉无料钟炉顶设备阀箱的应力和变形, 对其结构进行优化

**关键词** 有限元法 阀箱 应变 应力 变形

## Application of Finite Element Method Analysis and Calculation in Shougang Jingtang United Iron and Steel Co., Ltd. BF Designing

Jiang Zhihao Su Wei Zhang Jian

(Beijing Shougang Design Institute)

**Abstract** Analysis and calculating the strain, stress and displacement of valve casing using finite element method for Shougang Jingtang United Iron and Steel Co., Ltd. 5500 m<sup>3</sup> blast furnace 2-hopper bell-less top charging system. According to the analysis and calculation, optimizations were made for the valve casing's structure.

**Key words** finite element method, valve casing, strain, stress, displacement

### 1 引言

高炉炉顶装料设备是用来装料入炉并使炉料在炉内合理分布,同时要起炉顶密封作用的设备。曹妃甸工程5500m<sup>3</sup>高炉采用无料钟炉顶设备,它主要由换向溜槽、受料漏斗、上密封阀、料罐、阀箱、料流调节阀、下密封阀、中间漏斗、波纹伸缩器及内部耐磨环、短节、布料装置(含水冷气密箱、行星差动减速机、布料溜槽倾动减速机、中心喉管、布料溜槽转角、摆角指示器等)、布料溜槽、布料溜槽更换装置等组成。无料钟炉顶设备优点突出但系统结构复杂,它的工作环境及其恶劣,其布料器转速、料仓容积、料流调节阀内径和中心喉管内径等基本参数可通过传统的计算方法进行确定。为了保证无料钟炉顶设备工作安全、可靠,其各个部件的工程结构设计相当重要,必须要计算分析它们的变形、应力以及动力学特性。在有限元法出现之前,把这些部件结构简化为梁、桁架、刚架或板,采用材料力学、结构力学或弹性力学的方法来进行计算。虽然这些力学方法是建立在严密理论基础之上的,是科学的,但是为了便于计算作了很多简化,由于这种简化与实际结构之间有很大的差异,因而计算结果与实际情况不可避免地会有很大的差异。这样,设计时为了“保险”,不得不采用很大的安全系数,致使结构笨重。

有限元法是一种采用电子计算机求解结构静、动态力学特性等问题的数值解法。有限元法具有精度高、适应性强以及计算格式规范统一等优点,已成为现代机械产品设计中的一种重要工具。本文对5500m<sup>3</sup>高炉无料钟炉顶设备阀箱采用有限元法作静力学分析。

### 2 有限单元法分析过程概述

#### 2.1 结构的离散化

把实际结构划分(或离散)为一个个的“单元”,而单元与单元之间仅在“节点”处相连,这样就把由无

限个相互连接的质点所组成的真实结构,用有限个节点相连的离散单元组合体的有限元网络计算模型所近似代替。这样的计算模型比较接近于真实结构。有限单元法离不开计算机,随着计算机技术的不断发展,计算机容量的不断扩大,计算速度不断加快,单元可以划分得越来越小。网格可以划分得越来越密,节点越来越多。使有限元计算模型及其计算结果与真实结构越趋于接近,使工程结构设计得既安全又轻巧、合理。

## 2.2 选择位移模式

为了能用节点位移表示单元体的位移,应变和应力,假设单元体位移分布是坐标的某种简单的函数,普遍用多项式作位移模式。

$$\{f\} = [N]\{\delta\}^e$$

$\{f\}$ 单元内任一点位移列阵, $[N]$ 形函数阵, $\{\delta\}^e$ 单元节点位移列阵

## 2.3 形成单元刚度矩阵

利用几何方程(用节点位移表示单元应变关系),物理方程(节点位移表示单元应力关系)和虚功原理(建立单元应力与应变关系)可以对单元力学特性进行分析,形成单元刚度矩阵。

$$[k] = \iiint [B]^T [D] [B] dx dy dz$$

$[B]$ ,单元应变矩阵, $[D]$ 单元材料有关的弹性矩阵

## 2.4 计算等效节点力

单元离散后,是假定力通过节点之间相互传递的。而实际的连续体,力是从单元的公共边界相互传递的,故作用在单元边界上的表面力与体力必须等效移置到节点上,也就是用等效节点力替代所有作用在单元上的力。具体过程略(原理是单元力与等效节点力虚功等效原则)。

## 2.5 形成总刚度矩阵,即建立整体平衡方程

$$[K]\{\delta\} = \{R\}$$

## 2.6 求解未知节点位移和计算单元力

# 3 有限元软件概述

有限元分析计算从最初的人工编制程序,到SAP系列,经过几十年的发展,现在有很多的成熟商业软件,比较通用的有以下几种:ANSYS, IDEAS, MSC\NASTRAN, MSC\MARC, ABAQUS, ALGOR。

ANSYS是最为通用和有效的商用有限元软件之一。ANSYS拥有丰富和完善的单元库,材料模型库和求解器,能分析各类静力,动力,振动,线性和非线性问题,稳态和瞬态热分析及热-结构耦合问题,静态和时变电磁场问题,压缩和不可压缩流体力学问题,以及多场耦合问题,声场分析,压电分析等等。还可以进行概率设计,优化设计等等。并为用户提供了良好的二次开发平台及各种类型的数据转换接口。

# 4 阀箱静力学初步分析

## 4.1 问题描述

阀箱是无料钟炉顶设备的重要部件之一,是一个由不同厚度的钢板焊接成的对称箱形结构。它由四根立柱支撑在高炉炉体上。阀箱的上平台和两个料罐相连接,下板与下部波纹管连接。阀箱内部安装有节流阀和料罐的下密封阀,节流阀控制高炉炉料的流量,下密封阀起密封作用。

此外,箱体上还有用于支撑、增加箱体刚度及吊装的部分,如上、下侧立柱,筋板,加强筋,上、下吊

耳等。

在阀箱的上平台和每个料罐的接口法兰之间装有三个用于称量的传感器，传感器的触点互成120°平均分布；上平台与料罐接口法兰由12个平均布置的螺栓和弹簧连接，安装时对弹簧施加预紧力，使料罐由于均压产生浮力时，仍有足够的力使其紧固在阀箱上。

#### 4.2 计算力（受力情况简化）

当一个料罐内装有最大批矿，另一个料罐内没有批料时，阀箱受力情况最不利，变形也应该最大。空料罐内部的压力按放散前0.3MPa计算，满料罐侧的三个压头的压力各为125t空料罐侧的三个压头的压力各为30t，弹簧预紧压力各为7.35t，中间漏斗重量按13t考虑，阀箱内部压力按0.3MPa考虑，阀箱内部温度按150℃考虑。

计算中所取的材料机械性能参数为：

钢的密度=7.85E-6kg/mm<sup>3</sup>；

弹性模量（杨氏模量Young's）=2.068E5MPa；

泊松比=0.3；

重力加速度（Gravity）=9.81m/s<sup>2</sup>。

#### 4.3 GUI 方式分析过程

第一步：指定分析标题并设置分析范畴

第二步：定义单元类型

第三步：定义材料性能

第四步：输入阀箱的实体模型

第五步：指定网格划分密度并网格划分

第六步：对模型施加约束

第七步：加载

第八步：求解

第九步：后处理

#### 4.4 初步分析和局部改进

根据阀箱最坏的载荷工况对模型进行了以上有限元分析，计算结果应力偏大。应力偏大位置为：底板上（下密封阀座附近）圆弧为R=100mm处、底板与三角筋的连接处、上盖板（调节阀吊架）拐角处。

由于应力偏大对模型局部结构进行了修改，根据实际应用情况和受力状况，在考虑整体结构装配关系的情况下，把底板上（下密封阀座附近）应力集中处附近的模型边界外移，使其截面积增大6000mm<sup>2</sup>。对修改过后的结构进行有限元分析，计算结果显示此处应力有明显降低。

接下来处理底板与三角筋的连接处应力较大的问题。在上步修改过后模型的基础上再进行修改：在下立柱和底板之间添加一块筋板，考虑到焊接过程中的可操作性，此块筋板和其他两块筋板的尺寸不同；并在三块筋板的端面添加了一块堵板。通过有限元计算后可知，通过此措施使此处的应力大为降低。附加的对两种堵板的形状和焊接形式进行了对比，表明堵板的形状和焊接形式对实际结构应力影响很小。

接下来对上盖板（调节阀吊架）拐角处应力较大的问题进行分析。由于在最坏载荷工况下，载荷给予阀箱的是一种弯曲作用，且在此处上盖板截面积变小，所以造成此处应力较大，但此处零部件装配关系复杂，在可能的情况下，此处添加了100mm的45°倒角，且在上盖板的下底面添加了一块补板对此处进行加厚处理。经过这样处理后，用有限元进行计算、验证，此处应力有明显降低。附加的对补板的另一种添加形式进行了分析，即在侧板上添加补板，补板的上表面和上盖板的底面相连，经有限元计算，此种情况下，拐角处应力降低不明显。

由于只是对模型局部结构进行的修改，对于阀箱的整体刚度影响不大，致使每次对模型局部结构进行修

改过后的有限元计算结果中，左右三个压头的垂向位移为：空罐三个压头的相对位移为0.9mm，满料料罐三个压头的相对位移为4.2mm。由于应力和变形不理想，需要对四根立柱的尺寸规格和阀箱的整体刚度进行较大的改进才能满足工程设计需要。

#### 4.5 阀箱尺寸变更情况

阀箱二维平面图参看我院资料图：称量支架图（T302B5-85）。

(1) 件号 22 底板由 60mm 厚改为 75mm，R450mm 改为 R475mm，加厚方向为下表面；

(2) 件号 2、21、36 立柱壁厚由 20mm 改为 25mm，即尺寸改为  $\phi 700\text{mm} \times 25\text{mm}$ ；

(3) 件号 16、17、35 上、下侧板板厚由 40mm 改为 50mm，在外侧面增厚；

(4) 中间压头下面的钢板变化：件号 29 由 40mm 增厚为 50mm，在两个压头下面各增加一块小筋板（同件号 28）；

(5) 件号 5 上盖板三个孔上面加材料的形式作成一样，都加一圈钢板，再加齿边板，中间孔长度方向的尺寸由 1400mm 改为 1200mm；

(6) 四根大立柱钢管由  $\phi 700\text{mm} \times 60\text{mm}$  改为  $\phi 700\text{mm} \times 50\text{mm}$ 。

### 5 阀箱静力学详细分析

#### 5.1 模型的建立

阀箱的有限单元模型见图 1 和图 2。

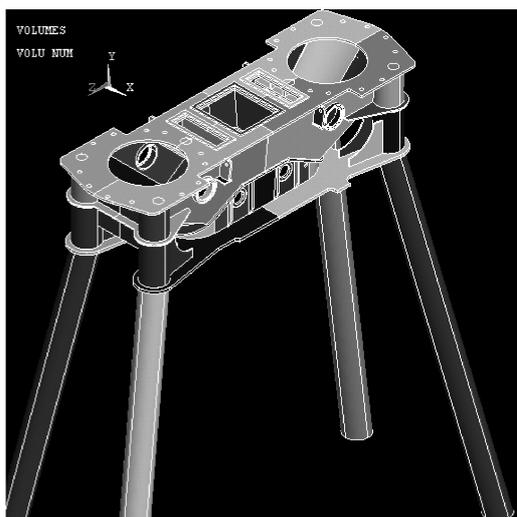


图 1 阀箱有限元计算模型

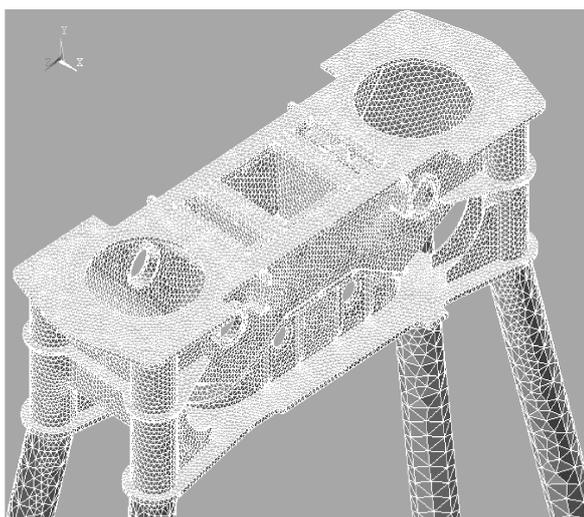


图 2 阀箱模型网格划分图

#### 5.2 阀箱的载荷

以阀箱最危险工况做有限元分析，即：单边承受最大载荷，另一边承受最小载荷，且承受最小载荷的一边内部有最大煤气压力 0.3MPa。载荷情况见图 3。

#### 5.3 阀箱的变形分析

阀箱的位移见图 4~图 6。

六个压头位置的位移见表 1。这六个节点的位置分别与 6 个压力传感器的位置相对应，其中节点 1、2、3 位于重料罐下，节点 4、5、6 位于空料罐下，节点 3、4 靠近阀箱的中心线。

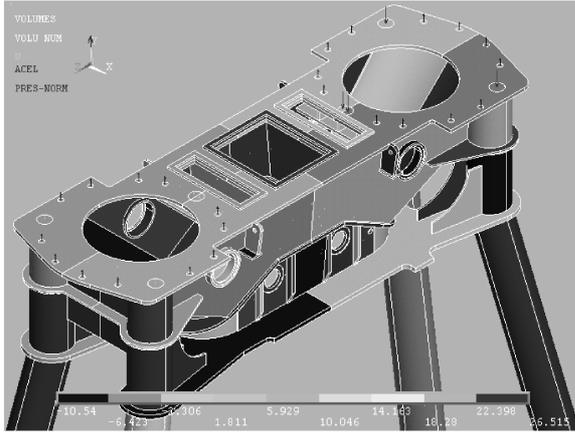


图3 阀箱模型载荷图

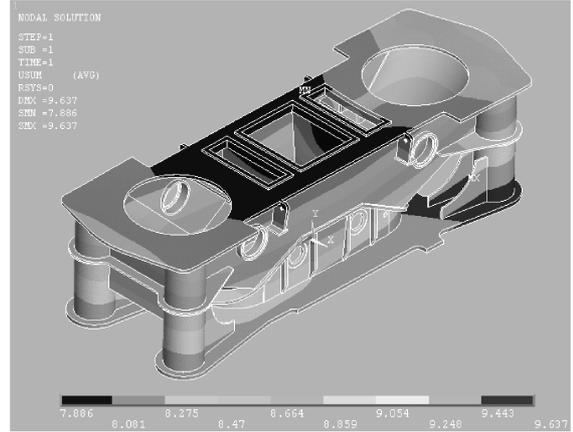


图4 阀箱变形向量云图

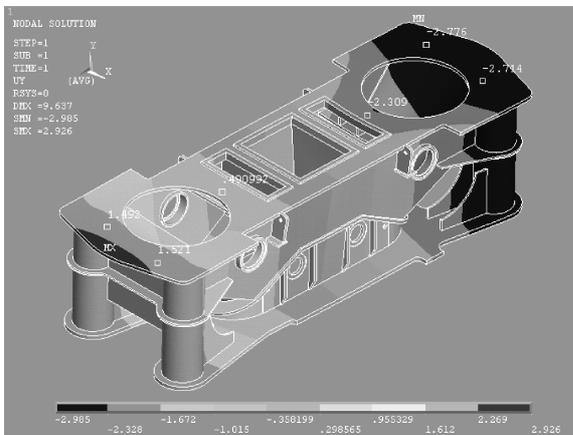


图5 结构应力造成的压头垂向位移值 (UY)



图6 阀箱变形位移

表1 电子称传感器各触点位移

节点	位移	触点各方向位移		
	总体	UX	UY	UZ
1号 (81300)	8.4677	-0.37371E-01	-2.8331	7.9797
2号 (78223)	8.4724	0.47400E-01	-2.8406	7.9818
3号 (78233)	8.3159	-0.10285E-01	-2.3014	7.9911
4号 (67207)	8.0249	-0.74705E-02	0.46347	8.0116
5号 (67195)	8.1943	-0.97543E-02	1.6369	8.0291
6号 (75367)	8.1941	-0.26923E-02	1.6373	8.0288

从以上结果可以看出，阀箱在载荷作用下，产生的位移有如下现象：

(1) 阀箱整体向空料罐方向位移，位移量从重料罐一边到空料罐一边逐渐减小。

(2) 阀箱重料罐一边被压，空料罐一边向上翘起，绝对位移量相当。

阀箱上板的空罐三个压头的相对位移为 1.17mm，满料料罐三个压头的相对位移为 0.54mm。

#### 5.4 阀箱的应力分析

阀箱的应力见图 7 和图 8。

由图 7 和图 8 可见阀箱的整体应力水平不大，仅在与重料罐靠近阀箱中心线的传感器相接触的部位有局

部应力集中, 应力值为 108.9MPa, 如果选取 Q345 为主要材料, 安全系数=275/108.9=2.5。

## 6 结论

通过以上有限单元法分析计算, 可以看出:

(1) 由于四根立柱较长(每根 10.8m 左右), 阀箱整体位移较大(位移向量值 9.63mm)。钢管尺寸为  $\phi 700\text{mm} \times 50\text{mm}$ , 通过有限元再分析和结构优化, 钢管的尺寸可以向小的方向变化。

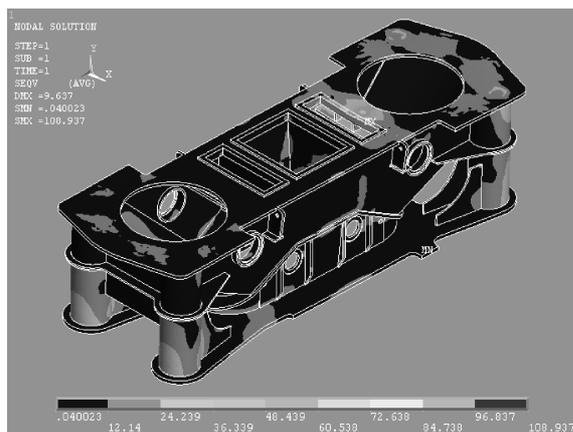


图 7 阀箱应力云图

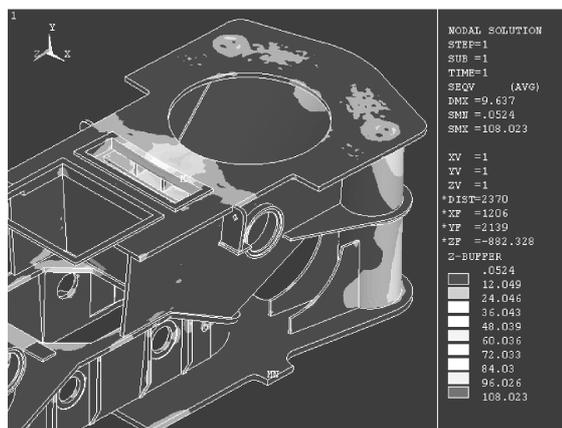


图 8 阀箱应力云图局部放大图

(2) 阀箱各单元节点的应力水平与材料的机械性能相比可以满足要求, 安全系数为 2.5。如果调整安全系数, 阀箱的主要钢板可以适当调整厚度或降低次要材料的机械性能, 使阀箱的结构更加合理。

(3) 阀箱上板与压力传感器相接触的局部面域, 满料罐一侧三个压头的相对位移为 0.54mm, 空料罐一侧三个压头的相对位移为 1.17mm, 对满料罐的称量可满足要求。

要使称量尽量准确, 阀箱整体及阀箱上板的位移要尽量减小以外, 电子秤的精度要适应较大的位移变化(比如在 1.5mm 内), 电子秤的安装等问题也要引起足够的重视, 以及电子秤底座要有足够的刚度等。使用过程中, 建议对传感器的安装环境做进一步的检查: 传感器的横向力过滤装置及垂直自位装置; 料罐下部 12 个弹簧预紧力的均匀和准确, 工作中是否松动。

## 参考文献

- 1 严允进. 炼铁机械. 北京: 冶金工业出版社, 1980
- 2 徐士良. C 常用算法程序集. 北京: 清华大学出版社, 1993
- 3 机械设计手册联合编写组. 机械设计手册. 北京: 机械工业出版社, 1984
- 4 小飒工作室. 最新经典 ANSYS 及 Workbench 教程. 北京: 电子工业出版社, 2004