

结构优化及其在电除尘器壳体设计中的应用

方滨, 戚超龙

武汉理工大学土木工程与建筑学院, 武汉 (430070)

E-mail: fangbin@whut.edu.cn

摘要: 本文简要介绍了结构优化设计, 并利用有限元软件对某电除尘器壳体的壳体结构进行了结构分析, 并在此基础上对原有设计方案进行了优化分析, 并将两种方案作以对比, 同时指出, 优化分析是进行结构分析的一种重要方法。

关键词: 优化设计, 有限元, 结构分析

中图分类号: TU392.4

1. 引言

电除尘器是一种利用高压电吸附粉尘, 从而达到除尘目的的高效除尘设备。随着我国近年来电力、建材、冶金、化工等行业的发展, 以及人们环保意识的加强, 电除尘器的应用也越来越多。但是在目前, 我国的电除尘器设计基本上仍处于对国外的一些设计方案进行类比设计, 或者采用一些较简单的计算模型进行计算, 并不能真实反映电除尘器的受力状况, 用材也较为浪费^[1]。为了确保电除尘器的安全运行, 并节约材料, 降低生产成本, 本文采用有限元软件对某大型电除尘器壳体的板筋结构进行了结构分析, 并在此基础上进行了优化分析。

2. 结构优化设计

2.1 优化设计的数学模型

结构优化设计的目的在于以最少的材料, 最低的造价或最简单的工序来实现结构的最优性能^[2]。用数学语言来描述就是:

求设计变量:
$$X = [x_1 \quad x_2 \cdots x_n]^T, \quad x \in D \subset E^n$$

满足约束条件:
$$h_\nu(X) = 0, \nu = 1, 2, \cdots, p$$

$$g_\mu(X) \leq 0, \mu = 1, 2, \cdots, m$$

使得目标函数 $f(X)$ 最小。

2.2 优化设计三要素

从上述数学表达式中, 可以看出结构优化设计有三大要素: 设计变量、约束条件和目标函数。

(1) 设计变量: 一个结构设计的方案总是由若干个数量来描述的, 根据具体情况, 这些数量可以是各个构件的截面尺寸、面积、惯性矩等设计截面的几何参数, 也可以是柱高、梁的间距、拱的矢高等结构总体的几何参数, 或者是材料的弹性模量、强度等选用材料的参数。

(2) 目标函数: 目标函数是设计变量的函数, 是用来作为最佳设计的标准的, 可以是结构的刚度、体积、造价、变形、自振频率等。

(3) 约束条件: 在结构设计中应该遵守的条件称为约束条件^[2]。

3. 优化设计的工程应用

3.1 工程概况

电除尘器是一个主要由钢构件组成的结构系统, 钢耗量占其生产成本的大部分, 结构优化设计的主要目的就是在保证结构安全、可靠的前提下, 尽量降低其钢材耗量, 以降低生产成本。电除尘器壳体结构含有大量板筋结构, 现取其一侧板作为结构分析和优化的对象。电除尘器的壳体从整体上来看为大型框架结构, 具有结构庞大、工况复杂的特点^[3]。其壳板由壁板、型钢、以及角钢加强筋焊接而成, 壳板除受本身自重外, 还须考虑承受风压、工作负压以及内外的温度载荷等作用。

3.1 有限元模型的建立

结构模型的建立须根据“忠实于结构、忠实于工况”的原则^[3], 根据壳板结构特征, 可对模型进行适当简化。如壳体表面由于工艺或者结构特殊要求, 可能在壁板上有开孔, 此处均作简化处理而忽略。

电除尘器壳体壁板采用 4 节点 *Shell63* 单元模拟, 每个节点有 6 个自由度。角钢加强筋、立柱、以及圈梁均采用 3 节点二次线单元 *Beam188* 模拟。壁板厚度 6mm , 通过 *Shell63* 单元的实常数来定义, 角钢、立柱、圈梁的截面均采用梁截面工具定义。因角钢加强筋、立柱、圈梁与壁板均采用焊接连接, 建模时采用共用节点的形式将这些构件与壁板连为一体。壳体结构选用钢材为 Q235, 杨氏模量为 $2.1 \times 10^{11} \text{Pa}$, 密度为 7850kg/m^3 , 泊松比取 0.3, 热膨胀系数为 $1.22 \times 10^{-5} (\text{K}^{-1})$ 。

壳体内外均有一定压强, 但主要所受压强为外部气压, 内部压强较小, 建模时可取内外压强差。壳板壁上包有保温层, 建模时作为重力荷载施加于板壁上。电除尘壳体立柱与圈梁交接处架有钢管支撑, 因支撑系统具有较大刚度, 在此处可简化为水平约束考虑。电除尘器为减小因温度载荷的影响, 在其底部中心采用一点刚接, 柱脚各处采用滑动支座, 因此柱脚的约束条件为约束柱脚 Y 方向平动自由度和 XY、YZ 平面内的转动自由度, 释放余下三个自由度。载荷处理时, 结构自重通过设定材料密度, 对垂直方向施加一个重力加速度来设定; 结构大梁对柱顶的作用力以集中载荷 (315KN) 的形式施加, 壳体压力载荷以面载荷 (-8700Pa) 的形式施加于壳板表面。

建立其有限元计算模型如下图 1 所示。

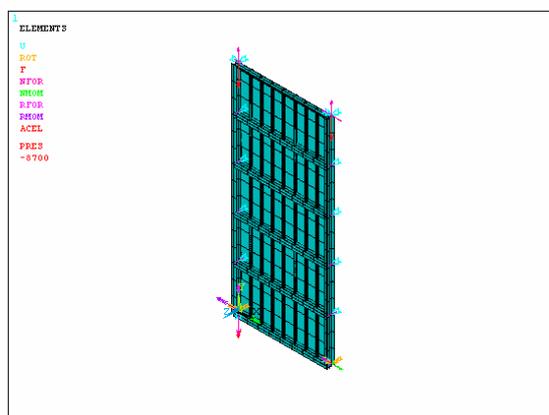


图 1 计算模型

3.3 计算结果分析

根据上述建立的有限元模型，并对模型施加约束载荷，采用静态线性分析，可得出壳板各节点的位移组合（图2），以及壳板的 Von Mises 等效应力（图3）。

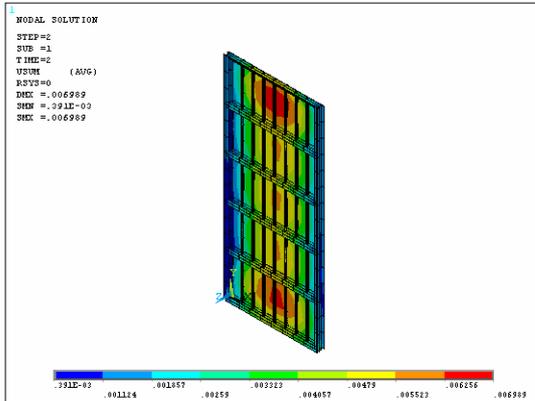


图2 壳板组合位移图

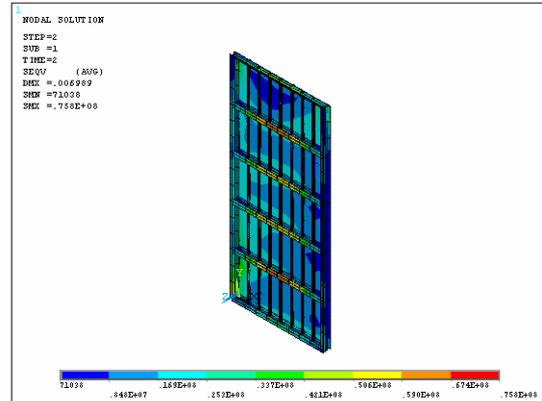


图3 壳板 Von Mises 等效应力图

从上述分析结果可以看出：壳板的最大位移组合出现在顶梁与底梁中部附近，最大值为 6.99mm (<1/1000)；壳板的最大应力为 164Mpa(<215Mpa)，出现在圈梁中部及立柱底部，均满足结构规范对于构件的应力应变要求。且可以看出应力分布在梁中向立柱两侧减小得十分迅速，应力在壳板与加强筋上的分布不均匀，结构有一定的优化空间。

3.4 壳板优化分析

现以上述分析结果作为优化分析的初始方案。为电除尘器的生产安装方便，本文不以原结构型钢构件尺寸作为优化变量，取加强筋根数(N_jiajing)及壁板厚度(TK)作为优化的设计变量，以壳板总耗钢量(V)最小作为优化的目标函数，以结构的规范要求作为优化设计的约束条件，在上述结构分析的基础上，对壳板结构进行优化。

即有，已知设计变量：
$$X = \left[N_Jiajing, TK \right]^T ;$$

满足约束条件：
$$\begin{cases} s_{max} < 215Mpa \\ u_{max} < 13.1mm \end{cases} \quad (\text{强度、刚度要求});$$

求耗钢量：
$$V_{min}$$

使用有限元软件进行优化，经过 15 次优化迭代，目标函数迭代结果如下：

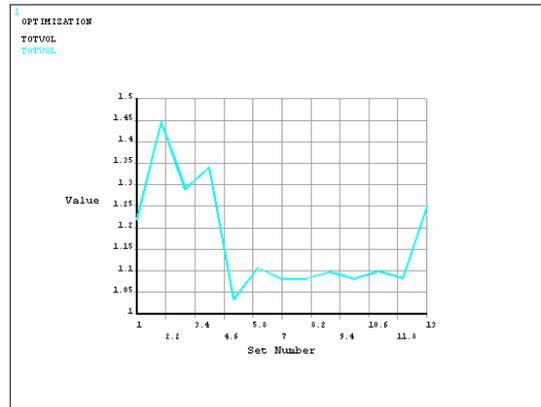


图4 目标函数优化结果

去除不可行结果，对比各个优化方案，即可得出最优化方案 $V_{\min} = 1.12\text{m}^3$ 。比原方案 $V_0 = 1.22\text{m}^3$ 节省钢材 8.2%。取其圆整值，可知壳体壁板厚度可由原 6mm 变为 5mm，且平均每一墙板加强筋角钢可减少 5 根，达到了优化设计的目的。

4. 结论

采用有限元软件对结构进行优化分析，颠覆了过去单纯依靠经验对结构进行少数几次的校核的结构分析方式。与传统设计相比，使用优化设计可以使结构造价降低 5%~30%^[2]。随着计算机技术的发展，结构优化也必将得到更大的应用空间。

参考文献

- [1] 任惠巧,杨兆建等. 大型电除尘钢结构立柱部件有限元分析 [J]. 太原理工大学学报,2005,36 卷,第 3 期;
- [2] 张炳华,侯昶. 《土建结构优化设计》[M], 上海: 同济大学出版社, 1998.3;
- [3] 黄丽霞. 《296m²电除尘器的结构分析及优化改进》[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.6.

Structure Optimization and It's Application in the Design of Electrostatic Precipitator's Shell

Fang Bin, Qi Chaolong

Wuhan University of Technology, Civil engineering and building academy, Wuhan (430070)

Abstract

In this paper introduced the method of structure optimization. And analyzed the Electrostatic Precipitator's shell structure by the finite element method. On the base of the structure analyze, get the shell structure optimized, and pointed out structure optimization is an important method in structure analyze.

Keywords: structure optimization, finite element method, structure analyze