

文章编号:1673-9469(2008)02-0001-05

## 除尘器壳体纵梁承载性能的非线性分析

王元清<sup>\*1</sup>,李 轩<sup>1</sup>,白 音<sup>1</sup>,石永久<sup>1</sup>,戴海金<sup>2</sup>,陆道穗<sup>2</sup>

(1. 清华大学 结构工程与振动教育部重点实验室,北京 100084;2. 福建龙净除尘设备设计研究院,福建 龙岩 364000)

**摘要:**大型电除尘器钢结构为空间杆系与壳体混合结构体系,杆件种类多,受力状态复杂。传统的设计方法不能明确结构体系的承载性能,需进一步分析其非线性承载性能,并优化结构体系和构件截面。运用有限元软件 ANSYS,对某大型电厂 300MW 机组电除尘器壳体钢结构纵向大梁(仅有弯矩作用下及较大轴力、弯矩共同作用下)建立有限元模型,对整体结构进行静力分析、特征值屈曲分析及极限承载力分析。以分析结果为依据对仅有弯矩作用下的纵梁提出优化方案建议。计算结果表明,两类梁模型均满足设计荷载下的承载能力要求。

**关键词:**电除尘器;壳体;纵梁;ANSYS;极限承载力;优化

**中图分类号:** TU392

**文献标识码:** A

## Nonlinear finite element analysis on bearing capacity of the vertical beam of large - scale electrical dust precipitator

WANG Yuan-qing<sup>1</sup>, LI Xuan<sup>1</sup>, BAI Yin<sup>1</sup>, SHI Yong-jiu<sup>1</sup>, DAI Hai-jin<sup>2</sup>, LU Dao-hui<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of Education Ministry, Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084, China; 2. Fujian Longking Co., Ltd, Fujian, 364000, China)

**Abstract:** The steel structure of large - scale electric dust precipitator applies the combination structural system of spatial bars and shells, which has various bar and complex bearing states. It is not appropriate for the traditional calculation method to precisely evaluate the bearing capacity of the structural system, so a further nonlinear analysis is needed, and the structural system and member section need to be optimized. A finite element model of the vertical beam (only under moment, under both larger axial force and moment) of steel shell structure is established for a large - scale electric dust precipitator with finite element software ANSYS. The static analysis of the integral structure, eigen buckling analysis and ultimate strength analysis are proceeded. Based on the results of the analysis, this paper proposes an optimized program for the vertical beam only under moment. The calculation results show that the two types of beam model are designed to meet the loading capacity requirements.

**Key words:** electric dust precipitator, shell, vertical beam, ANSYS, ultimate strength, optimization

相比现今电除尘器的广泛应用,其结构设计方法已明显滞后。传统的经验设计方法具有较大的保守性和盲从性,既不能有效的提高结构安全度,又造成许多不必要的浪费<sup>[1]</sup>。近年来一些电除尘器结构破坏导致一些事故的发生,使电除尘器结构的合理化设计逐渐成为学者们研究的热点。目前,采用有限元软件对这类非标准结构进

行设计分析已经成为公认的有效方法<sup>[2-5]</sup>,既可以较为准确地模拟构件失稳破坏的情况,又可以通过参数的改变对设计进行优化。本文利用大型通用有限元软件 ANSYS 对某大型电厂电除尘器钢结构壳体部分的纵向梁进行了系统的结构分析,以验证结构满足设计条件下的可靠性要求,并提出了可行的优化方案。

收稿日期:2008-03-07

作者简介:王元清(1963-),男,安徽霍山人,教授,博士,从事钢结构、近海结构及玻璃幕墙的相关研究。

## 1 工程概况

本文模型所采用之数据来源于某大型电厂300MW 机组电除尘器钢结构工程。电除尘结构可分为上部壳体、下部灰斗及底部支架。其中上部壳体结构为空间梁柱体系,其结构平面图见图1。荷载通过顶板传至横梁,再经由纵梁传递至柱。

本文研究对象为电除尘器钢结构中壳体结构部分的纵梁。其中,图1示2、4轴纵梁只受到来自横梁的竖向外力作用,3轴纵梁在受到竖向外力的同时,还受到进出口喇叭传来的轴向压力。下面分别对两类梁的承载性能进行分析。

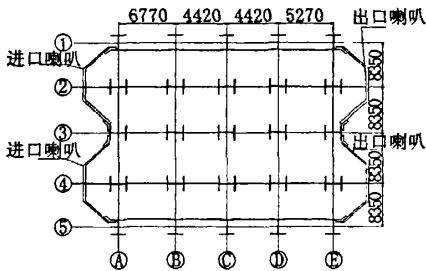


图1 壳体结构平面图(单位: mm)

Fig.1 The floor plan of shell structure

## 2 仅有弯矩作用下的纵梁承载性能分析

本部分所研究的对象位于2、4轴顶部的纵梁。由于工艺设置的需要,横梁悬挂于此纵梁的下侧,无法对受压的上翼缘侧向提供有效的约束,稳定性较差。而且此梁长度较长,且与简支梁不同,属于4跨连续梁,受力状况较为复杂,稳定计算无法直接根据规范公式得到。因此,以下将通

过有限元计算软件对其受力性能进行较为详细的分析。



图2 2、4轴纵梁有限元模型

Fig.2 Finite element model of 2,4 axis longitudinal beam

### 2.1 计算模型

纵梁截面尺寸为  $H900 \times 400 \times 18 \times 28\text{mm}$ , Q235 钢,由于结构长期在  $130^\circ\text{C}$  高温下工作,钢材的屈服强度按  $195\text{MPa}$  考虑,采用理想弹塑性模型。将横梁传来的荷载作为集中荷载施加在纵梁下翼缘,支座处附近的集中荷载标准值为  $279.0\text{kN}$ ,跨中的集中荷载标准值为  $423.6\text{kN}$ ,同时考虑纵梁自重。由于横梁截面较高,可视为纵梁下翼缘的有效支撑。

有限元模型见图2,取截面宽度方向为 X 轴,截面高度方向为 Y 轴,梁轴向为 Z 轴。纵梁的翼缘及腹板采用空间梁单元 SHELL181,梁端部铰接,梁中部横梁对应位置下翼缘处设置 X 向约束,立柱对应位置下翼缘处设置 Z 向约束。

### 2.2 静力承载性能分析

设计荷载作用下,计算模型的等效应力分布见图3(a)。结构的等效应力最大值为  $195\text{MPa}$ ,出现在施加了位移约束的节点附近的极小区域,而结构总体的应力水平较低,远低于屈服强度。



图3 2、4轴纵梁有限元静力分析结果

Fig.3 Finite element static analysis of 2,4 axis longitudinal beam

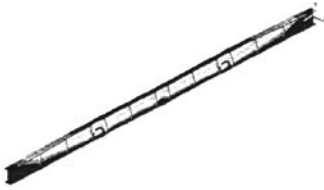


图4 2、4轴纵梁第一阶屈曲模态  
Fig.4 The first order buckling modal of 2,4-axis longitudinal beam

使用荷载作用下,计算模型的空间变形分布见图 4(b)。其中,结构 X 向及 Z 向的变形都不足 0.4mm, Y 向变形是结构的主要变形,其最大值为 3.25mm,出现在边跨跨中附近。空间最大变形为 3.25mm,约为单跨跨度的 1/1929,满足设计要求。

2.3 整体稳定承载力分析

根据规范中关于稳定计算的规定和建议,按照结构的最低阶屈曲模态施加初始几何缺陷(初弯曲),峰值为纵梁跨度的 1/1000。经特征值屈曲分析得到的纵梁第一阶屈曲模态如图 4 所示,其变形状态为上翼缘向平面外倾斜。

基于具有上述初始几何缺陷的模型,考虑几何非线性的影响,进行二阶弹塑性极限承载力分析。分析得到的荷载-位移曲线如图 5 所示,图中纵坐标为相对荷载水平(=实际荷载值/设计荷载值)。

2.4 纵梁的方案优化

基于前节对于 2、4 轴纵梁稳定性能的研究,其稳定承载力安全储备相对较低,侧向(X 向)位移过大。而如果依据现行《钢结构设计规范》对于受弯构件稳定性的验算,由于支撑均设置在下翼

缘,计算长度过长,稳定应力过大,无法满足规范的相关规定。

1)优化方案。最直接的改进方法即在受压侧的上翼缘设置侧向支撑,避免出现前述屈曲模态中柱顶处上翼缘的侧向变形。如此即可有效减小纵梁的计算长度,使其不易发生整体失稳。

2 计算模型。本计算模型与前节计算模型基本相同,只是在上翼缘设有支撑处增加了侧向的约束。由于对上翼缘施加侧向约束对应力和变形影响不大,以下仅计算稳定承载力相关的内容。

3)整体稳定承载力分析。计算方法如前节,仍然按照结构的最低阶屈曲模态施加初始几何缺陷(初弯曲),峰值为纵梁跨度的 1/1000。考虑几何非线性的影响,二阶弹塑性极限承载力分析得到的荷载-位移曲线如图 6 所示,图中纵坐标为相对荷载水平(=实际荷载值/设计荷载值)。

可见,设置了上翼缘侧向支撑后,该纵梁的稳定承载力有所提高,平面外的位移得到了很好的控制,并且也能够很好的满足现行《钢结构设计规范》对于梁计算长度的要求。但稳定承载力的提高并不显著,其原因主要是计算中柱顶约束处对应的梁腹板过早进入屈服,这与模型位移约束的施加过于理想化有很大关系,实际结构可以很好缓冲这一现象。

3 较大轴力作用下的纵梁承载能力分析

本部分研究的对象是位于 3 轴顶部的纵梁,其除受弯外还受到进出口喇叭传来的轴向压力的作用,其下端的柱对其横向的约束作用也需通过模拟计算获得,以下将通过有限元计算软件对其受力性能进行较为详细的模拟。

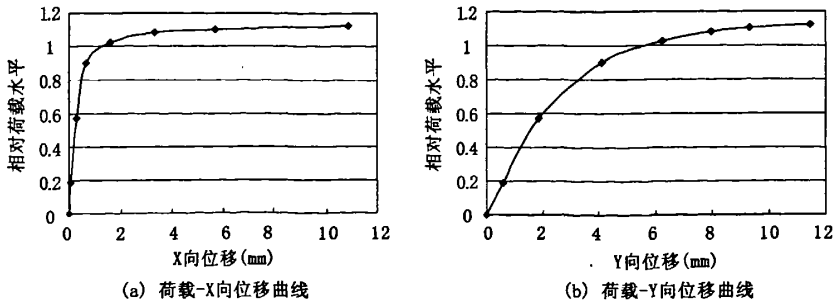


图5 二阶弹塑性荷载-位移曲线  
Fig.5 Second elastoplastic load - displacement curve

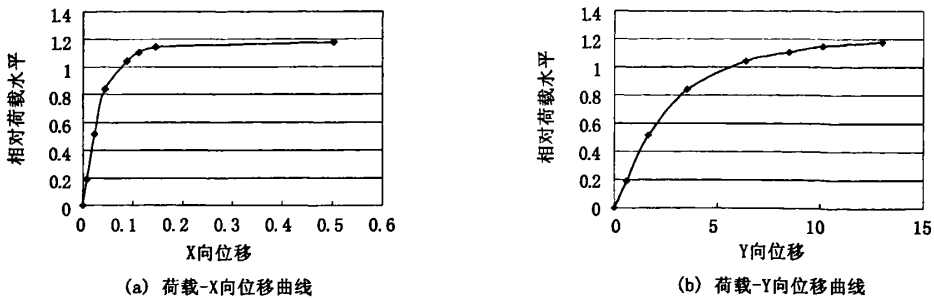


图6 二阶弹塑性荷载-位移曲线

Fig.6 Second elastoplastic load - displacement curve

### 3.1 计算模型

纵梁截面尺寸为  $H900 \times 250 \times 14 \times 18\text{mm}$ , 材料及本构关系同 2.1 节。将横梁传来的荷载作为集中荷载施加在纵梁上翼缘, 荷载值同 2.1 节, 同时在梁两侧施加  $750\text{kN}$  的轴向压力, 并考虑纵梁自重。由于横梁截面较高, 可视为纵梁上翼缘的有效支撑。同时, 在考虑轴力下梁的侧向变形时, 不可忽略下方柱子对梁的侧向约束作用。



图7 3轴纵梁有限元模型

Fig.7 Finite element model f 3 axis longitudinal beam

有限元模型见图 7, 取截面宽度方向为 X 轴, 截面高度方向为 Y 轴, 梁轴向为 Z 轴。纵梁的翼缘及腹板采用空间梁单元 SHELL181, 梁端部铰接, 梁中部横梁对应位置上翼缘处设置 X 向约束。由于所研究的梁下端柱在距离梁下翼缘底面  $2\ 164\text{mm}$  处设置了两个方向的管支撑, 为了能够准

确模拟实际荷载作用下梁的变形特性, 又能够对计算模型进行合理简化, 故在所研究梁模型下利用 BEAM188 单元建立  $2\ 164\text{mm}$  的钢柱, 柱底采用刚接形式。

### 3.2 静力承载性能分析

设计荷载作用下, 计算模型的等效应力分布见图 8(a)。结构的等效应力最大值为  $195\text{MPa}$ , 出现在施加了集中荷载的节点附近的极小区域, 而结构总体的应力水平明显低于屈服强度。

使用荷载作用下, 计算模型的空间变形分布见图 8(b)。其中, 结构 X 向的变形不足  $0.06\text{mm}$ ; Y 向变形最大值出现在边跨跨中附近, 为  $5.90\text{mm}$ ; Z 向变形最大值出现在梁的边支座处, 为  $3.0\text{mm}$ 。空间最大变形为  $6.05\text{mm}$ , 约为单跨跨度的  $1/1\ 038$ , 满足设计要求。

### 3.3 整体稳定承载力分析

按照结构的最低阶屈曲模态施加初始几何缺陷(初弯曲), 峰值为纵梁跨度的  $1/1\ 000$ 。经特征值屈曲分析得到的纵梁第一阶屈曲模态如图 9 所示, 由于上翼缘受到横梁的侧向约束, 受压后的侧向变形主要发生在下翼缘。



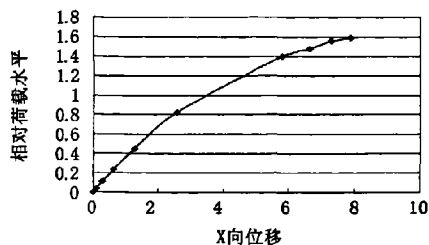
图8 3轴纵梁有限元静力分析结果

Fig.8 Finite element static analysis of 3 axis longitudinal beam

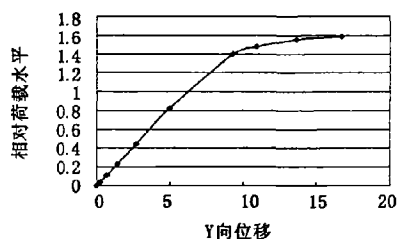


图9 3轴纵梁第一阶屈曲模态

Fig.9 The first order buckling modal of 3-axis longitudinal beam



(a) 荷载-X向位移曲线



(b) 荷载-Y向位移曲线

图10 二阶弹塑性荷载-位移曲线

Fig.10 Second elastoplastic load - displacement curve

基于具有上述初始几何缺陷的模型,考虑几何非线性的影响,进行二阶弹塑性极限承载力分析。分析得到的荷载-位移曲线如图10所示,图中纵坐标为相对荷载水平(=实际荷载值/设计荷载值)。

## 4 结论

1) 电除尘器纵梁长度过长、荷载值较大,其跨中梁柱节点处的受力情况较为复杂,易先于其它部位屈服,设计时应考虑对节点部位进行加强。

2) 采用有限元方法可以较为准确的得到各构件不同部位的应力分布与变形情况。2、4轴纵梁计算长度过大,超出规范公式适用范围,宜优先采用有限元方法进行分析。

3) 改进后的2、4轴纵梁方案可以很好的限制梁上翼缘的侧向变形。

4) 由于横梁起到了侧向支撑的作用,因而承受较大轴力的3轴纵梁承载性能较好。

5) 纵梁方案可以较好的满足设计荷载下对内力及变形的要求,但极限相对荷载水平较低,安全储备不足。应考虑适当降低设计承载力或进一步提高结构承载能力。

同时,对纵梁的分析也为结构其他部件的结构分析及优化提供了较好的理论依据。

## 参考文献:

- [1] 吴凤林,任黎明. 电除尘器本体结构的优化设计[J]. 太原理工大学学报, 2000, 31(3): 263-266.
- [2] 张一舟,王元清,高轩能,等. 大型电除尘器钢结构支架承载性能的非线性有限元分析[J]. 煤矿机械, 2006, 27(12): 58-60.
- [3] 王学文,杨兆建. ANSYS参数化设计语言及其在电除尘器荷载梁优化设计中的应用[J]. 煤矿机械, 2005(11): 18-20.
- [4] 任惠巧,杨兆建,王义亮. 大型电除尘器钢结构立柱部件有限元分析[J]. 太原理工大学学报, 2005, 36(3): 290-292.
- [5] 王学文,杨兆建. 基于ANSYS的电除尘器箱形钢结构承载梁结构分析及试验研究[J]. 机械制造, 2005, 43(488): 33-36.

(责任编辑 刘存英)

# 除尘器壳体纵梁承载性能的非线性分析

作者: [王元清](#), [李轩](#), [白音](#), [石永久](#), [戴海金](#), [陆道穗](#), [WANG Yuan-qing](#), [LI Xuan](#),  
[BAI Yin](#), [SHI Yong-jiu](#), [DAI Hai-jin](#), [LU Dao-hui](#)

作者单位: [王元清, 李轩, 白音, 石永久, WANG Yuan-qing, LI Xuan, BAI Yin, SHI Yong-jiu\(清华大学, 结构工程与振动教育部重点实验室, 北京, 100084\)](#), [戴海金, 陆道穗, DAI Hai-jin, LU Dao-hui\(福建龙净除尘设备设计研究院, 福建, 龙岩, 364000\)](#)

刊名: [河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 

英文刊名: [JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)

年, 卷(期): 2008, 25 (2)

被引用次数: 3次

## 参考文献(5条)

1. 吴凤林;任黎明 [电除尘器本体结构的优化设计](#)[期刊论文]-[太原理工大学学报](#) 2000(03)
2. 张一舟;王元清;高轩能 [大型电除尘器钢结构支架承载性能的非线性有限元分析](#)[期刊论文]-[煤矿机械](#) 2006(12)
3. 王学文;杨兆建 [ANSYS参数化设计语言及其在电除尘器荷载梁优化设计中的应用](#)[期刊论文]-[煤矿机械](#) 2005(11)
4. 任惠巧;杨兆建;王义亮 [大型电除尘器钢结构立柱部件有限元分析](#)[期刊论文]-[太原理工大学学报](#) 2005(03)
5. 王学文;杨兆建 [基于ANSYS的电除尘器箱形钢结构承载梁结构分析及试验研究](#)[期刊论文]-[机械制造](#) 2005(488)

## 本文读者也读过(10条)

1. [童根树](#). [饶芝英](#). [TONG Gen-shu](#). [RAO Zhi-ying](#) [一个奇特的除尘器钢支架的屈曲问题](#)[期刊论文]-[建筑钢结构进展](#) 2007, 9(5)
2. [章华熔](#) [电除尘器新技术在125MW机组电除尘器改造中的应用](#)[会议论文]-2007
3. [王元清](#). [李轩](#). [白音](#). [石永久](#). [戴海金](#). [陆道穗](#). [WANG Yuan-qing](#). [LI Xuan](#). [BAI Yin](#). [SHI Yong-jiu](#). [DAI Hai-jin](#). [LU Dao-sui](#) [大型电除尘器壳体钢结构立柱承载性能的非线性分析](#)[期刊论文]-[煤矿机械](#)2008, 29(9)
4. [王登峰](#). [方滨](#). [任刚](#). [戴海金](#). [王元清](#). [石永久](#) [电除尘器钢结构的承载性能分析及优化设计研究进展](#)[会议论文]-2010
5. [毛程奇](#). [白希尧](#). [白敏药](#) [烟尘电晕荷电物理过程及电除尘的研究方向](#)[会议论文]-2006
6. [王爱华](#). [冯国生](#) [触摸屏在电除尘高压控制器中的应用](#)[会议论文]-2007
7. [朱国庆](#) [双熔敷极焊条电弧焊除尘净化设备设计](#)[学位论文]2007
8. [李刚](#). [王强](#). [叶亮](#) [新型电除尘器下部钢支架与灰斗协同作用分析](#)[期刊论文]-[四川建筑](#)2009, 29(1)
9. [陈骥](#) [梭形轻钢屋架失稳事故分析](#)[期刊论文]-[钢结构](#)2000, 15(4)
10. [王林](#). [沈晓兰](#). [周廷军](#) [论大连金州热电有限公司五台电除尘除灰系统改造](#)[会议论文]-

## 引证文献(3条)

1. [刘勇](#) [重载桥式运输框架计算及应用](#)[期刊论文]-[中国机械](#) 2013(7)
2. [刘菲](#). [潘伶](#) [基于ANSYS的布袋除尘器花板优化软件的开发](#)[期刊论文]-[机械](#) 2011(11)
3. [潘伶](#). [陈金兴](#) [布袋除尘器壳体有限元优化设计](#)[期刊论文]-[机械设计与研究](#) 2011(1)

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_hbjzkjxyxb200802001.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hbjzkjxyxb200802001.aspx)