

# 余热锅炉构架护板结构的有限元分析

夏拥军<sup>1</sup>, 赵昕哲<sup>2</sup>, 陆念力<sup>1</sup>, 聃顺<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨·第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036)

**摘 要:** 余热锅炉的构架护板结构是一个典型的复杂壳梁组合结构, 在工程实际中对其进行力学分析主要使用有限元方法。讨论了其有限元建模过程中应注意的问题和处理方法, 给出了一些很有实用价值的建模技巧, 并对 PG9171E 型燃气轮机所配的余热锅炉的构架护板结构在设计阶段进行了有限元分析, 根据其位移和应力分布状况对初始设计进行逐步调整, 使该结构最终设计定型。文中方法对同类结构的有限元建模及力学分析有很好的参考价值。

**关 键 词:** 余热锅炉; 构架护板结构; 壳梁组合结构; 有限元法

中图分类号: TK229.92; TU398

文献标识码: A

## 1 引 言

余热锅炉是燃—蒸联合循环发电中的重要组成部分, 它被用于从燃气轮机排气中回收热量, 产生高压蒸汽并输送给蒸汽轮机做功, 带动发电机发电。余热锅炉构架护板结构(以下简称构架护板结构)是余热锅炉的承载结构, 它对维持锅炉本体各部件的相对位置、保证锅炉的安全、稳定运行发挥着重要作用。此外, 构架护板结构占整台锅炉金属耗量的 1/3 以上, 在设计阶段即对其进行必要的力学性能分析, 以便在保证可靠使用的前提下合理地确定结构各板材厚度, 这对缩短设计周期、降低材料消耗、方便安装运输和提高经济效益都有非常重要的意义。

构架护板结构是一个典型的复杂壳梁组合结构。壳梁组合结构以板壳为基体, 用梁加强。此类结构因强度大、质量轻而被广泛应用于船舶、潜艇、飞机、工程结构等众多领域。目前此类结构基础理论的研究对象为结构形式和支承条件非常简单, 仅有为数不多且布置规则的加强梁的单一平面壳和圆柱壳, 使用梁、壳理论可获得其解析表达<sup>[1~4]</sup>, 但对如构架护板结构复杂的壳梁组合结构而言要获得解析解是非常困难的, 在工程实际中需采用有限元方

法<sup>[3]</sup>。有许多文章探讨了壳梁组合结构的有限元建模和工程应用, 但其模型较为简单<sup>[4]</sup>, 有些是壳、梁连接仅为单点连接的情况<sup>[5]</sup>, 有些则全部使用壳单元建模<sup>[6]</sup>, 此外对混合使用壳、梁单元的探讨也不够。针对以上不足, 本文以 PG9171E 型燃气轮机所配的余热锅炉的构架护板结构为例, 以通用有限元分析软件 ANSYS 为平台, 探讨此类结构的有限元合理建模及分析问题, 并给出了一些很有实用价值的建模技巧。

## 2 典型结构描述

构架护板结构通常采用一体化钢架结构方式, 主要由构架和护板两部分组成。构架由钢板焊接而成, 是余热锅炉的主要受力构件; 护板采用轻型片式结构, 由内外护板、保温材料、加强筋组装而成, 并与构架焊接在一起。

图 1 所示为 PG9171E 型燃气轮机余热锅炉的几何模型(图中作了适当简化)。构架护板结构包括: 护板、竖梁、纵梁、吊梁、横梁, 外轮廓尺寸为 9.7 m × 11.8 m × 20.8 m。组成构架的 12 道竖梁、上下两层共 4 道横梁和 12 道纵梁均为由钢板焊接而成的 H 型构件, 吊梁是由钢板焊接而成的双方管结构, 其间用钢板联接; 在构架的前后(沿 X 轴方向)和上下面的各道梁之间铺设了护板。此外在进气侧(Y 轴反方向)由高 1.7 m 的上下两块护板和两侧护板组成了进气通道。由于整体结构的外轮廓尺寸较大, 为保证安全, 在前后面护板上各用工字钢焊接了 12 道加强梁(图中前后面上的 12 道白线处), 它们同时与竖梁也焊接在一起。由于工字钢尺寸相对于结构中其它部件的尺寸而言较小, 如果全部使用板壳建模, 为了保证分析精度, 工字钢的腹板和翼缘需要一定数量的单元, 这将导致此处单元尺寸较小, 即使使

收稿日期: 2005-05-08; 修订日期: 2005-11-22

作者简介: 夏拥军(1977—)男, 安徽濉溪人, 哈尔滨工业大学博士研究生。

用疏密网格进行过渡, 从而在其它位置增大单元尺寸, 也将导致整个结构的有限元模型十分庞大, 这不仅大大增加了计算时间、降低了计算精度, 对后处理的图形显示也十分不利。因此对工字钢使用梁单元建模, 其它构件使用壳单元建模较为恰当。所以从实际结构和有限元建模角度考虑, 构架护板结构都是一个典型的复杂壳梁组合结构。除构架护板外, 余热锅炉的主要附属部件还包括: 管屏(共 21 屏, 沿 Y 轴方向不均匀悬挂于吊梁上)、除氧器、低压锅筒和中压锅筒等。

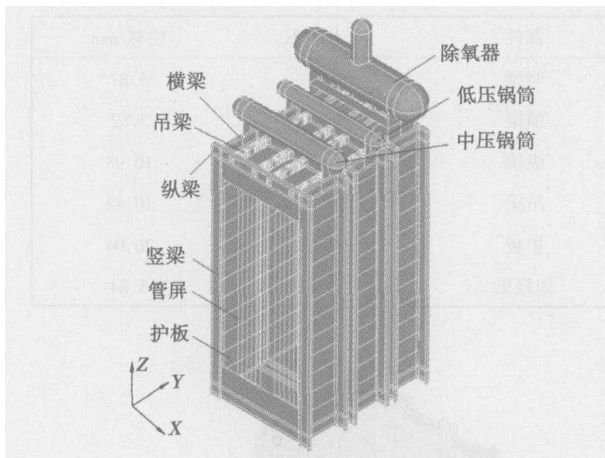


图 1 构架护板结构的几何模型

### 3 有限元模型的建立

#### 3.1 单元类型的选择

对于需要混合使用多种类型单元的壳梁组合结构而言, 为了在不同类型的单元间实现无缝连接, 保证相互间载荷传递的正确性, 根据所分析问题的要求选择合适的单元类型是非常重要的。要实现这一点, 最基本的就是要保证所选壳单元和梁单元具有相同的结点自由度类型及数量; 对于一些特殊类型的结构保证单元具有相同的阶次或相近的形函数形式也是非常重要的。此外, 由于一根加强梁往往要用多个单元离散, 可能导致生成的梁单元为深梁, 此时就应考虑选用计入剪切变形影响的梁单元。

ANSYS 提供了多种用于梁、壳建模的单元类型, 以满足不同分析场合的要求。由于构架护板结构的重要性, 在设计时不需要考虑其塑性的扩展和利用, 其始终处于弹性阶段, 因此对壳体构件可选用 SHELL43 单元类型、梁构件可选用 BEAM188 单元类型。SHELL43 单元与 BEAM188 单元均为一次单元,

每个单元结点均有 6 个自由度: 3 个平动自由度 ( $u_x, u_y, u_z$ ) 和 3 个转动自由度 ( $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ ), 可以保证受力的正确传递。SHELL43 单元考虑了剪切变形的影响, 适合于中等厚度的壳体建模。BEAM188 单元是 Timoshenko 梁单元, 其形函数为:

$$u_i = \frac{1}{2}(u_{iL}(1-s) + u_{iR}(1+s)) \quad (1)$$

式中:  $u_i$ —某方向位移场;

$s$ — $u_i$  方向的自然坐标;

$u_{iL}, u_{iR}$ — $u_i$  方向的单元始、终结点位移。

与 Euler—Bernoulli 梁相比, 其计入了剪切变形对梁弯曲的影响, 适合于短粗梁的有限元建模。

#### 3.2 有限元模型的建立

ANSYS 提供了两种建模方式: 一是首先建立结构的几何模型, 通过对几何模型进行有限元网格离散而获得有限元模型; 二是首先生成结点, 随后由结点直接生成单元而获得有限元模型。至于具体使用何种建模方式或综合使用此两种建模方式应依据结构的实际情况而定。

对本结构, 加强梁需要与壳体相连接, 如果使用第一种建模方式, 不易实现加强梁与壳体的正确连接, 因此我们对壳体采用第一种建模方式, 加强梁采用第二种建模方式。本结构的最佳建模步骤为:

(1) 建立壳体结构的几何模型;

(2) 对几何模型进行有限元离散, 得到壳体结构的有限元模型;

(3) 利用在壳体结构有限元模型正确位置上的结点生成加强梁的有限元模型。

在此过程中应注意以下问题:

(1) 为了在正确的位置上生成加强梁单元, 在建立壳体结构的几何模型时就应考虑在有加强梁的位置处分割壳体, 使分割后的壳体在加强梁位置处拥有公共边线, 以便在其有限元网格离散时能在此处生成创建加强梁所需要的结点。

(2) 为了方便生成加强梁的有限元模型, 在对壳体进行有限元离散前应指定上述公共边线的有限元网格的大小或分段数, 使该公共边线上的结点具有明确的坐标, 以便使用 ANSYS 的内嵌函数 NODE ( $x_m, y_m, z_m$ ) 来正确捕捉到该公共边线上的结点。

图 2 中左图所示为一壳梁组合结构。为了提高钢板绕 Z 轴的抗弯刚度, 在其外侧沿 Y 轴方向焊接了一根工字钢, 该工字钢还可同时提高钢板绕 X 轴的抗弯刚度, 而其对钢板绕 Y 轴的抗弯刚度贡献较小, 可以忽略。此外, 在分析中认为焊接质量可靠, 钢板与加强梁作为一组合整体共同承载。建模

过程为: 首先建立钢板的几何模型——一个平面; 沿工字钢的腹板中平面将该平面分割为两个平面(此两平面有一条公共边线); 为该公共边线指定单元大小或网格分段数, 使用壳体单元为平面划分网格; 使用公共边线上的结点结合 ANSYS 循环功能和内嵌函数  $NODE(x_m, y_m, z_m)$  生成加强梁单元。最终的有限元模型如图 2 中右图所示(图中使用了单元实体绘制)。应当注意, 由于钢板与加强梁之间往往沿加强梁轴线方向使用贴角焊缝完全焊接在一起, 因此在建模时壳体与加强梁在沿加强梁轴线方向上应保证一定的单元个数。对于曲面的壳梁组合结构也同样可用上述方法很方便地完成有限元模型的建立。

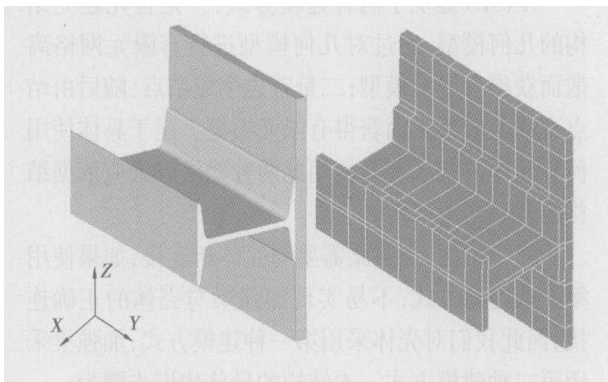


图 2 梁板组合结构及其有限元模型

参照上述讨论编写了构架护板结构建模的命令流文件, 结构主要尺寸均实现了参数化, 最终的有限元模型如图 3 所示。模型共有结点 32 170 个、壳单元 33 123 个、梁单元 2 064 个。

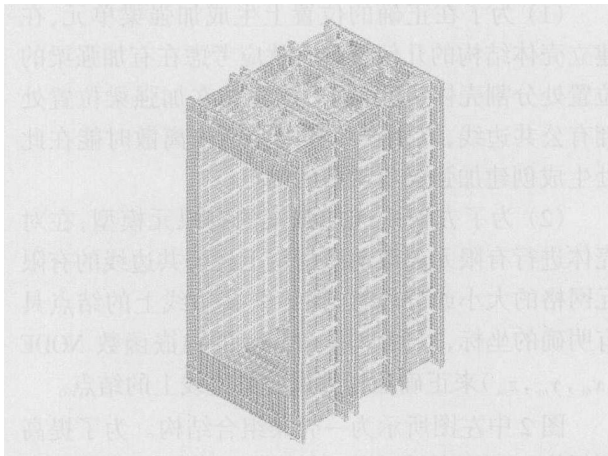


图 3 构架护板结构的有限元模型

### 3.3 载荷确定与结果分析

将安装、悬挂在构架护板结构顶面横梁和吊梁

上的各种部件, 如中压锅筒、低压锅筒、除氧器、管屏等作为静压力载荷施加到有限元模型的相应位置上, 忽略其它次要载荷。构架护板结构的竖梁使用螺栓与底座紧固, 可限制竖梁底部的平动自由度。

经过多次计算, 对初步设计中不合理的板材厚度进行调整, 最终定型后的结构的 MISES 应力云图如图 4 所示, 各构件的最大 MISES 应力和最大位移列于表 1。

表 1 各部件最大 MISES 应力和最大位移

部件	应力/MPa	位移/mm
竖梁	76.1	5.87
横梁	56.0	3.82
纵梁	144.7	10.98
吊梁	79.7	10.84
护板	169.0	26.04
加强梁	23.8	5.84

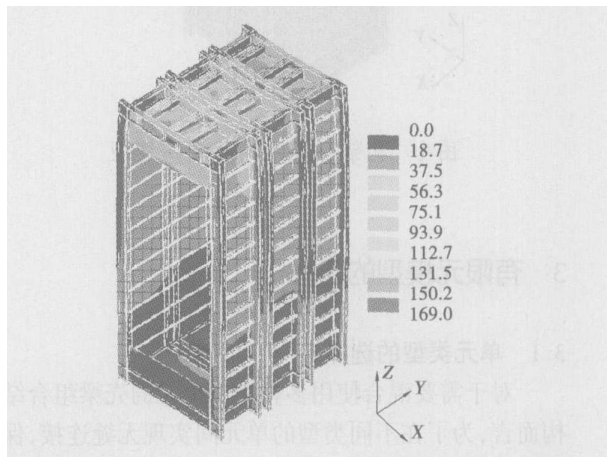


图 4 构架护板结构的 MISES 应力云图

对计算结果进行分析可得如下结论:

(1) 结构的主要变形形式为前后面的顶部向内外下方凹陷、中部向外侧凸起, 顶面在随后面产生向下位移的同时其中部向下凹陷, 这与结构的受力形式相符, 因为管屏是结构的最主要载荷, 作用在顶面吊梁上。

(2) 最大应力出现在进气口侧的外护板上, 这是由于结构后面中部向外凸起, 使外护板受到很大的拉力, 而出于使用要求的考虑, 该侧板的厚度不大, 所以出现了很大的应力。

(3) 加强梁的应力不大, 这是因为结构前后面的变形主要为绕 Y 轴的弯曲变形, 对加强梁的影响很小, 其应力的产生主要是由于结构沿 Y 方向的载

荷分布不均使前后面各自产生一定的绕  $Z$  轴的扭转而造成的。但由于前后面护板的高度很大, 为了提高其稳定性, 减轻护板与竖梁间焊缝的受力, 保证结构的密封性能, 加强梁不仅是不可缺少的, 而且起到了很大的作用, 其安全系数取值偏大是合理的。

(4) 各部件的应力均小于许用应力, 位移也在容许范围之内, 同时结构具有一定的安全系数, 整体结构满足设计使用要求。

## 4 结束语

(1) 余热锅炉的构架护板结构是一个典型的复杂壳梁组合结构, 在对其进行有限元分析时应根据结构特点选择合适的壳、梁单元类型, 保证单元位移模式的协调一致。在建模过程中应充分使用有限元软件所提供的建模手段, 减轻建模工作量。此外还应尽量实现建模的自动化、模型主要尺寸的参数化和易修改性, 以满足设计过程中对模型可能的多次调整、修改要求。

(2) 构架护板结构是余热锅炉的重要组成部分, 对余热锅炉的稳定、安全运行起到了重要作用, 在设计阶段即对其进行力学分析是十分必要的。本文对 PG9171E 型燃气轮机余热锅炉的构架护板结

构进行了有限元静力分析, 使该结构最终得以定型, 并为以后的动力特性和抗震性能分析奠定了基础。

(3) 文中对复杂壳梁组合结构有限元模型的建模方法和建模过程中应注意问题的探讨以及给出的建模技巧, 对同类结构的有限元建模及力学分析有很好的参考价值。

## 参考文献:

- [1] SHEIKH I A, ELWI A E, GRONDIN G Y. Stiffened steel plates under combined compression and bending[J]. *J Construct Steel Res*, 2003, 59: 911—930.
- [2] 胡刚义. 周向变刚度环肋圆柱壳应力分析研究[J]. *海洋工程*, 2004(3): 75—85.
- [3] PRUSTY B G, SATSANGIS K. Analysis of stiffened shell for ships and ocean structures by finite element method[J]. *Ocean Engineering*, 2001, 28: 621—638.
- [4] JIA JUNBO, ULFVARSON ANDERS. A systematic approach towards the structural behaviour of a lightweight deck-side shell system[J]. *Thin-Walled Structures*, 2005, 43: 83—105.
- [5] 吴嘉蒙, 刘见华, 金咸定. 非标准交接板梁组合结构的有限元建模新方法[J]. *上海交通大学学报*, 2002(11): 1621—1624.
- [6] 刘绍峰, 姚文娟, 叶志明. 大型汽轮发电机若干部件有限元分析模型探研[J]. *上海大学学报*, 2002(6): 515—517.
- [7] 王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.

(丹 编辑)

新技术  
新工艺

## 利用尼龙磨光的齿轮精磨技术

据《Gear Technology》2005 年 9—10 月号报道, 日本佐世保国立技术大学的 Nakae M 教授等专家近期开发出一种新颖的齿轮研磨技术, 它能有效地使淬硬钢齿轮的齿面如同镜面那样光滑。使用作为磨具的尼龙斜齿轮(实际上它的工作如同一个砂轮), 并使用一个简单的机械装置完成磨光。

文章介绍由作者设计并制造的磨光机(附有照片)、磨光的程序和基本原理。显然, 这个过程能在很短的时间使淬硬钢齿轮的齿面光滑如镜(使齿面的粗糙度  $R_y$  小于  $0.5 \mu\text{m}$ ), 并且为了防止齿型误差增大, 在高速和轻载下使用具有大螺旋角和高齿(具有齿高大于它们的模数的齿)的尼龙齿轮进行研磨。

此外, 也使磨光过程多样化, 以便包括尼龙齿轮的微振动。根据这个结果已经发现, 加上微振动使研磨过程也能减少被加工齿轮的齿型误差。通过研磨过程减少了被加工齿轮的运转噪声和点蚀率。

(吉桂明 供稿)

**words:** combustion optimization, positive equilibrium, self-optimization, optimal air/coal ratio

锅炉沸腾液体膨胀蒸汽爆炸 (BLEVE) 的小尺寸模拟试验 = **The Small-scale Simulation Test of the Boiling Liquid Expanding-vapor Explosion (BLEVE) of a Boiler** [刊, 汉] / CHEN Si-ning, SUN Jin-hua, CHU Guan-quan, et al (State Key Laboratory of Fire Science under the China National University of Science & Technology, Hefei, China, Post Code: 230026) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 132 ~ 135

During the operation of a boiler there may emerge due to various causes fine and small cracks on the main body of the boiler. With the progress of equipment material aging and in case of abnormal operation the cracks will rapidly expand, leading in extreme circumstances to boiling liquid expanding-vapor explosion (BLEVE). The latter is a kind of physical explosion with a serious destructive force. To study the generation mechanism of BLEVE a small-scale experimental device has been set up to conduct simulation tests. Through the measurement of the changes in temperature and pressure in a vessel at the very moment of explosion the movement of gas-liquid two-phase medium in the vessel can be analyzed for a further study of the cause of the integral rupture of the vessel. It has been found through tests that in the BLEVE process there exist two pressure peaks due to different causes. In this connection, the intense boiling of a superheated liquid can lead to the formation on the liquid surface of a rapidly expanding two-phase flow layer. In the vessel the gas and liquid phase being squeezed there may emerge the first pressure peak. The second pressure peak is mainly sparked by a phenomenon of "liquid hammer", which impacts violently on the vessel. The open hole located at the vessel wall surface may be subjected to a most intense shock force. **Key words:** boiler, boiling liquid expanding-vapor explosion, explosion pressure, two-phase flow

余热锅炉构架护板结构的有限元分析 = **Finite Element Analysis of the Frame-casing Structure of a Waste Heat Recovery Boiler** [刊, 汉] / XIA Yong-jun, LU Nian-li, (College of Mechanical & Electrical Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), ZHAO Xin-zhe, DING Zhao-shun (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 136 ~ 139

The frame-casing structure of a waste heat recovery boiler represents a typical and complicated shell-beam composite structure. In engineering practice a finite element method is mainly used to perform the mechanics analysis of the above-mentioned structure. The problems to be addressed and methods used to deal with them during finite element model-building are discussed, and some modeling techniques of highly practical value presented. The authors have performed a finite element analysis for the frame-casing structure of the waste heat recovery boiler (installed in tandem with model PG917E gas turbine) during its design stage. On the basis of displacement and stress distribution conditions the initial design has been progressively modified and then finalized. The methods employed by the authors may serve as a valuable reference for finite element modeling and mechanics analysis of analogous structures. **Key words:** waste heat recovery boiler, frame-casing structure, shell-beam composite structure finite element method

轴流压气机叶片优化设计 = **Optimized Design of Axial Compressor Blades** [刊, 汉] / YI Wei-lin, HUANG Hong-yan, HAN Wan-jin (College of Energy Science & Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China,