

# 高炉炉壳结构力学分析及应用软件

沈影 邵同平 马浏海 杨畏安

(中冶南方工程技术有限公司)

**摘要** 运用现代力学理论和计算机有限元技术,详细分析了高炉炉壳在各种工况下的应力情况,同时,开发了高炉炉壳结构力学分析软件包,应用该软件成功对高炉炉壳进行分析设计,取得良好效果。

**关键词** 高炉 炉壳结构 有限单元法 力学分析

高炉炉壳既是复杂的工程结构,又是炼铁的主要设备。高炉在完成规定工艺功能的同时,其炉壳应具有对各种因素的承受能力,以确保高炉在使用过程中的安全性和耐久性。炼铁的工艺过程相当复杂,高炉的使用环境恶劣,高炉炉壳的受力特征尚不完全清楚,传统的高炉炉壳设计手段存在不少局限性,迄今为止,我国尚未发布“高炉结构设计规范”,现在的高炉炉壳设计方法还停留在以经验公式为主的较低层次。

随着各种力学理论的进步和计算机技术的发展,重新进行高炉炉壳结构力学分析的研究不仅有了可能,而且有非常重要的现实意义。ANSYS是一种功能十分强大的有限元分析软件。若要利用ANSYS对实际工程问题进行分析计算,则必须要求操作人员对所用到的ANSYS模块比较熟悉,而且对力学和有限元的理论知识有较高的理解。因此,对于普通设计人员来讲,直接用ANSYS软件分析高炉炉壳结构具有相当的难度。

本文通过运用现代力学理论和计算机有限元技术,详细分析了高炉炉壳在各种工况下的应力情况,对高炉炉壳的受力状态有了更精准和更深入的认识,为各型高炉的设计提供了可靠的技术保障。同时,为方便设计人员对高炉炉壳进行力学分析,用VC++6.0开发了基于ANSYS平台的高炉炉壳结构力学分析软件,并成功用于实际工程的高炉炉壳设计。

## 1 高炉炉壳力学分析

高炉炉壳通常是根据KD公式和工程经验进行设计,常常有如下缺陷:计算部位太少,无法全面反映高炉炉壳应力分布特征;孔洞处的应力集中无法

计算,而理论和实践都说明孔洞周边是高炉炉壳最薄弱的环节之一;温度应力无法计算等。应用计算机有限元技术,可以克服以上不足,对炉壳进行更详细和深入的力学分析。

### 1.1 高炉炉壳力学分析的主要技术

(1)组合壳体的应力计算。组合壳体的传统计算方法是在组合壳体的各分段接头处,运用内力平衡和变形协调来求解内力和位移,进而根据物理方程来求得应力。在线弹性和均匀荷载下,对于长壳的组合壳可以列出线性方程组并由相关的数值计算软件来求解。但是对于短壳的组合壳,由于要考虑到壳体边缘效应的相互影响而使情况变得更加复杂而不易求解。因此,要对计算模型进行合理的简化和计算假设,用有限元技术对任意边界条件、任意荷载作用下、任意壳体组合进行求解,就能得到合理的结果。

(2)单工况及组合工况炉壳的应力分布。单工况的分析有助于发现每种荷载作用下炉壳的受力机理,评估各个单工况对炉壳的影响大小和影响方式,同时发现不利的影响因素;而组合工况的分析对于炉壳结构的整体应力分布有一个全面的认识,也是进行高炉结构板厚设计的前提。

(3)开大孔及加固后应力的分布情况。高炉炉壳上有铁口、风口、导出管、人孔、测温孔等大孔,由于孔边应力集中的影响因素很多(包括孔的多少、孔的位置、孔的大小几何尺寸、壳的厚度及曲率等),因而加固的方法不一,理论上进行求解计算的公式相当复杂。根据壳体开孔加固理论,对孔洞进行合理的假设,用有限元技术得到加固后的应力分布,进而确定加固的范围及板厚。

(4)计算模型简化。计算模型的简化包括边界条件和荷载条件简化。高炉炉壳由于要与热风围管、高炉炉身框架、炉顶设备等相连,使情况变得相当复杂。因此,有必要进行适当、合理的简化。

### 1.2 洞口加固理论

由于炉壳本身与设备件具有相关关系,使得炉壳上开有大小不一、数量巨大的孔洞,必须对这些洞口按实际情况进行合理的简化。应用洞口加固理论对炉壳上大洞口部位的应力集中进行详细分析。

(1)围壁加固理论。①承受沿径向均匀分布线荷载的圆柱壳的有效长度。假想有一长度为 $l'$ ,半径为 $a$ ,厚度为 $\delta$ 的圆柱壳,如图1所示。此假想的圆柱壳承受均布压力 $H/l'$ 。当假想的圆柱壳产生的法向位移正好等于图2所示在 $x=0$ 处的法向位移时,此时的假想圆柱壳的长度称为有效长度 $l'$ 。作此假设,主要是为了把三维问题简化为二维问题(假想圆柱壳的变形在长度方向上是相同的)。有效长度为: $l' = \zeta \sqrt{a\delta}$ 。式中: $a$ 为半径, $\delta$ 为板厚, $\zeta$ 有效长度系数。②围壁的近似处理。开口降低了空口区的强度。围壁的设置(见图3)乃是为了补偿结构因开孔而引起的强度损失,作为这种补强效果的一种度量,引入围壁有效面积或者称之为相当面积。围壁的有效面积为: $F = l'\delta$ ,即 $F = \zeta \sqrt{a\delta}\delta$ 。利用虚位移原理及围壁与壳体孔边位移协调,可求得孔边挠度值,及孔边诸内力值,进而可由应力系数 $(K_\theta)_{\max}$ 来方便的表示应力值。分析最大应力集中系数 $(K_\theta)_{\max}$ 的计算公式,可以发现,最大应力集中系数 $(K_\theta)_{\max}$ 只与四个参数: $\frac{R}{h}$ 、 $\frac{a}{R}$ 、 $\frac{F}{ah}$ 、 $\zeta$ 直接相关。 $R/h$ 为表征壳体厚度的几何参数; $a/R$ 为表征开孔大小的几何参数; $F/(ah)$ 为表征围壁加强程度的参数; $\zeta$ 为围壁的有效长度参数;在围壁的几何尺寸即半径 $a$ 、厚度 $h$ 、长度 $l$ 给定的情况下, $\zeta$ 的大小取决于围壁的安装位置。当围壁与壳体对称安装时(铁口部位), $\zeta$ 最大,亦即围壁最能发挥最大效应;当围壁与壳体单面连接时(导出管部位), $\zeta$ 最小,这时围壁加强效果最差。③围壁加厚板加固。如图4所示的围壁加厚板组合加强的结构形式,是在围壁加强的基础上,为进一步降低切口区的应力值,或将切口区域壳板局部加厚、或嵌入厚板,这样便构成围壁加厚板组合这种结构形式。因此,人们自然会想到,以开有围壁加强的圆形切口的应力系数的计

算为基础,再计入加厚板的加强效应,便可导出有围壁加厚板组合加强的圆形切口的应力系数的简化计算方法。

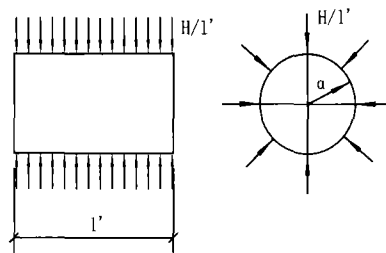


图1 假想圆柱壳

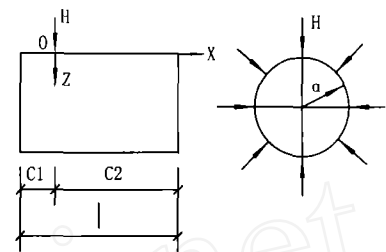


图2 圆柱壳

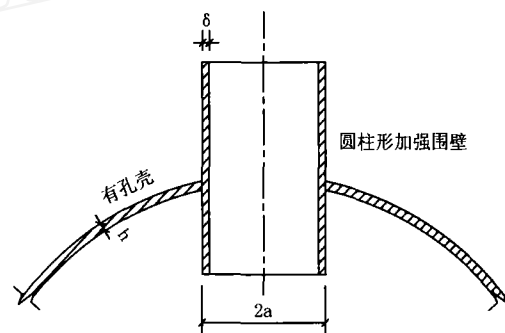


图3 开有围壁加强的圆形切口圆柱壳

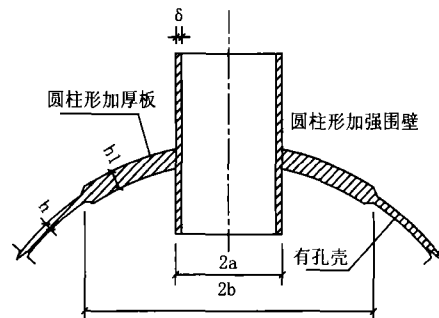


图4 开有围壁加厚板组合加强的圆形切口的圆柱壳

算为基础,再计入加厚板的加强效应,便可导出有围壁加厚板组合加强的圆形切口的应力系数的简化计算方法。

(2)刚性环加固。作为对自由开孔的一种孔边加固,刚性环加固边系指孔边用刚性环加固的边界。

由于孔边作了一个刚性位移,因此,刚性环加固边的边界条件并不意味着零边界条件,还有刚性位移。分析表明,无论对于那种荷载工况,其孔边的应力系数均小于相应的平板开孔的应力系数。因此,理论计算时,可以采用板中刚性圆环加强的圆孔附近的应力系数公式,来估算壳体开有刚性环加固孔边的圆孔时的应力系数,这种处理方式是偏于安全的。

在壳体理论和开孔加固理论的指导下,就可以建立炉壳有限元分析计算的正确模型并进行分析。

首先对单工况按荷载作用的部位及方向进行加载,求解各相应单工况的结果;然后对各个单工况进行荷载组合得到组合结果,输出炉壳相应板带上下边缘的应力强度结果值和炉壳各板带的应力强度云图(见图5 a、b、c)以便观察炉壳整体应力分布规律,同时从中可以得到孔洞处板带的应力影响范围和沿哪个方向影响,为孔洞处设计加厚板的方向及范围提供依据。

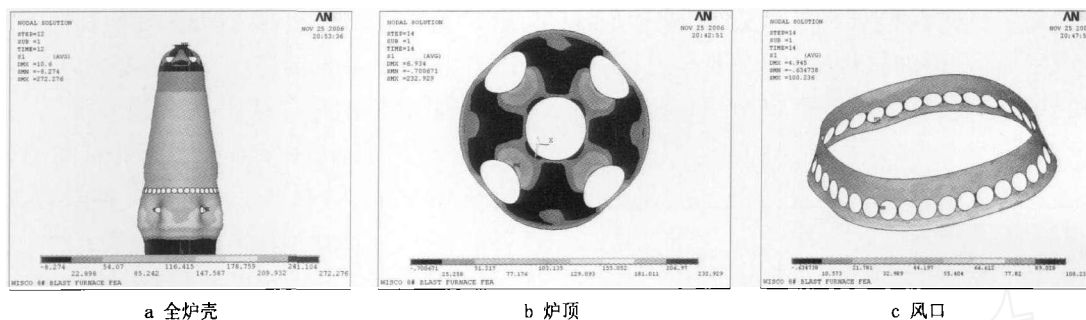


图5 某工程3200m<sup>3</sup>高炉炉壳应力

## 2 应用软件

### 2.1 实现方法

根据 ANSYS 软件的特点,首先利用 ANSYS 建立一个通用的有限元模型,并进行计算求解。在建立有限元模型时,先根据模型中所有可变数据定义相应的参数名,在模型中使用参数名来表示相应的数据值,然后用 APDL 语言将其生成程序模块。

编写的程序必须要具备 4 个功能:①前处理参数输入功能;②根据用户输入的参数修改 APDL 程序模块参数表中对应的参数值;③将完成的 APDL 程序块提交给 ANSYS 程序进行批处理操作;④程序必须能够判断 ANSYS 的批处理操作何时结束。

### 2.2 关键技术

作者研制的软件包是基于先进的 ANSYS 的 APDL 的参数化模型开发技术上的,在 ANSYS 平台上进行的二次开发而形成高炉炉壳结构力学分析软件。ANSYS 系统为用户提供了一种建立参数化模型的基本工具—APDL 语言。APDL 语言是一种面向工程的、结构化的解释性语言,它具有高级算法语言的基本特征与功能,但是它的逻辑运算和条件处理等功能较弱。

(1)模型参数库的调用。ANSYS 的 APDL 提供了打开库文件的命令: \* ULIB, <库名>, <扩展名>。利用该命令先打开上述模型参数库文件,再利

用宏调用命令: \* USE, <参数模块名>。这样可将结构的参数模块嵌入到其模型产生程序,并可在其后的程序段中引用这些变量名或数组名。因此,结构参数模块的独立定义与有限元模型的产生程序可以分开。这对于熟悉工程设计而不懂 APDL 编程的工程设计人员,可以方便地定义结构的参数模块。

(2)参数化模型程序的开发技术。利用 ANSYS - APDL 开发具体的结构有限元参数模型程序,是与具体的工程对象相结合的二次开发工作。图 6 给出了利用 ANSYS 的 APDL 进行二次开发的高炉炉壳处理流程图。

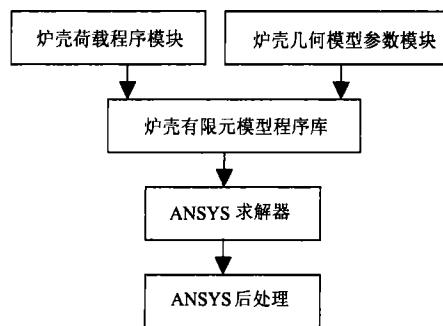


图6 二次开发高炉炉壳结构力学分析软件流程

炉壳有限元模型程序库包括方案设计模型及详细设计模型的产生程序,主要输入参数是相应模型结构几何参数模块、荷载参数模块等。这些程序的

主要输出结果是 ANSYS 求解器能够执行的有限元模型及运行流程命令行。这些参数化程序的集合,也就构成了高炉炉壳的 FEM 模型程序库。图 7 给出模型程序库中高炉炉壳参数化模型程序的结构框图。它们调用相应的结构参数模块及有关荷载参数模块,各种炉型及炉容应具有自己的参数模块形式,因此,与其相应的 FEM 模型产生程序也不相同,彼此是独立的。具体的 FEM 模型产生程序是 ANSYS 的 APDL 语句流。它可分为:①ANSYS 分析控制与分析类型定义;②打开参数库参数块的调用;③参数变量及数组定义;④关键点(KP)定义;⑤线的几何与分网定义;⑥面和面的材料与物理特性定义;⑦荷载定义;⑧约束定义;⑨分析流程定义;⑩后置处理定义。

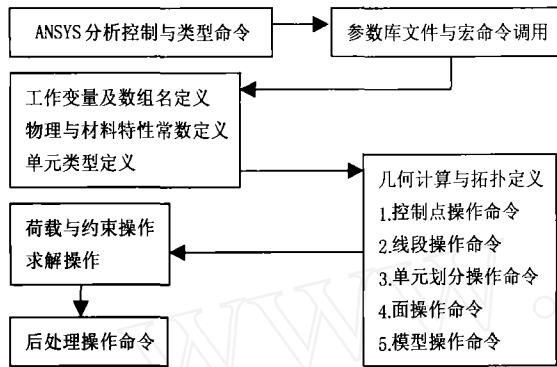


图 7 高炉炉壳参数化模型程序的结构

(3)用户界面接口技术。用 VC++6.0 编制菜单调用 ANSYS 软件。前处理模块主要包括输入参数、自动生成有限元计算模型等。高炉炉壳结构计算模型主要包括 ANSYS 的结构力学(包括弹性及塑性)分析计算。后处理模块主要包括生成应力沿母线及环向分布曲线图、薄膜力及边缘效应、洞口应力峰值等。图 8 为程序的数据转换流程图。

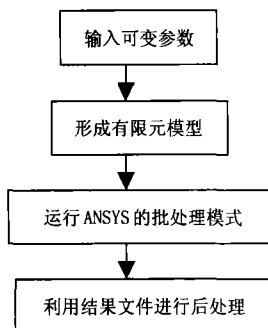


图 8 数据转换流程

## 2.3 高炉炉壳结构力学分析应用软件

用上述编程思想和技术,编制了界面的软件包,它包含了工程设计人员必须涉及到的设计输入输出信息。运行该软件后,可以很方便的得到供计算使用的有限元模型、后处理结果,大大提高了设计的可靠性和效率。

## 3 结论

(1)用最新的计算机有限元技术和力学理论来研究高炉炉壳,比以往的 KD 公式设计方法上了一大步台阶,使我们对高炉炉壳的作用机理和应力分布有了更全面的、更深入的理解,使我们对高炉设计更有把握,让我们能进一步优化高炉炉壳的设计,真正做到“该厚的地方厚、该薄的地方薄”。

(2)用 Visual C++ 编写了针对高炉炉壳结构力学分析的封装程序。摸索了一种封装 ANSYS 软件的方法,从而达到让不熟悉 ANSYS 的人也能够运用 ANSYS 的强大功能分析计算工程实际问题的目的。操作用户只需输入工程中的可变参数,然后即可运行 ANSYS 的批处理进行分析计算。后处理部分可以借用 ANSYS 的后处理功能,也可以借助其他商业软件进行后处理操作。

(3)通常,工业建筑结构中,具有相同功能的构筑物,其有限元模型的参数通常可以归纳为一类,可以用上述思路来进行各种类构筑物的力学分析及开发其通用有限元分析软件。从这个意义上说,本文探索出了一条对于各类复杂工程结构进行详尽力学分析的思路,并能大大提高工程设计的质量与速度。

## 4 参考文献

- [1] 高炉结构设计技术规定(第三次讨论稿). 1964.
- [2] 苏联容积 3200m<sup>3</sup>大型高炉钢结构计算规程:苏联部长会议国家建设事业委员会出版. 1987.
- [3] 吴连元编著. 板壳理论[D]. 上海:上海交通大学出版社,1989.
- [4] 徐秉汉等著. 壳体开孔的理论及试验[D]. 北京:国防工业出版社出版,1987.
- [5] ANSYS 中国公司. ANSYS 基本分析过程指南,2000.
- [6] ANSYS 中国公司. ANSYS APDL 使用指南,2000.
- [7] 刘正林. 面向对象程序设计[D]. 武汉:华中科技大学出版社,2001.

联系人:沈影

(430223)湖北省武汉市中冶南方工程技术有限公司结构一室

收稿日期:2008-12-12