

分类号 TU3

学号 0501330172

# 西安建筑科技大学 学位论文

大型高炉炉壳结构

整体弹性有限元分析

作者 王兆村

指导教师姓名 徐善华 教授

陈大钧 教授

申请学位级别 工程硕士 专业名称 建筑与土木工程

论文提交日期 2012.02 论文答辩日期 2012.06

学位授予单位 西安建筑科技大学

答辩委员会主席 \_\_\_\_\_

评 阅 人 \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

# 声 明

本人郑重声明我所提交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中已经标明引用的内容外，本论文不包含其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果，也不包含本人或其他人在其它单位已申请学位或为其它用途使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所做的所有贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了致谢。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

论文作者签名：王心村

日期：2012/05/28

## 关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解西安建筑科技大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或者其它复制手段保存学位论文。

(保密的论文在论文解密后应遵守此规定)

论文作者签名：王心村

指导教师签名：徐善华

日期：2012/05/28

本人授权中国学术期刊(光盘版)杂志社、中国科学技术信息研究所等单位将本学位论文收录到有关“学位论文数据库”之中，并通过网络向社会公众提供信息服务。同意论文提交后滞后： 半年； 一年； 二年发布。

论文作者签名：王心村

指导教师签名：徐善华

日期：2012/05/28

# 大型高炉炉壳结构整体弹性有限元分析

专业名称：建筑与土木工程

硕士生：王兆村

指导教师：徐善华 教授

陈大钧 教授

## 摘 要

本文以首钢京唐钢铁联合有限责任公司钢铁厂炼铁工程 5500m<sup>3</sup> 高炉为背景，对高炉正常生产状态下作用于炉壳上的荷载类别、范围及方式进行了分析，建立了 5500m<sup>3</sup> 高炉炉壳整体三维壳体有限元分析模型，分析了正常生产状态下炉壳整体及局部的应力分布状态及变形特性，探讨了各类大孔对炉壳产生的影响，根据分析结果，对炉壳板厚、开孔形式及尺寸等方面提出合理建议。

本文研究内容及成果体现在以下几个方面：

### （1）荷载资料及分析

将高炉正常生产状态下作用于炉壳上的荷载进行分类，与已有荷载方面的成果及资料进行对比分析，通过与炼铁专业交流的方式确定各类荷载的作用方式及范围，同时确定风荷载及水平地震作用的相关计算参数。

### （2）炉壳整体三维有限元分析模型的建立

根据炼铁专业提供的炉壳外形及开孔资料，分别采用 MIDAS 及 ANSYS 两个大型通用有限元分析软件建立炉壳三维壳体整体模型，综合考虑各方面因素进行模型的单元划分，并将各类荷载按其作用方式及范围分别施加于单元划分完毕的结构整体几何模型上，形成最终分析用的整体有限元模型。

### （3）计算结果分析

基于相关资料及研讨结论确定荷载组合方式。通过两不同软件各工况组合后计算结果的对比，确定计算结果的准确性。并基于该计算结果对炉壳的应力状态和变形特性进行分析及评价。

### （4）结论及建议

在计算分析的基础上，对炉壳所用板厚的合理性及各类大孔对炉壳产生的影响程度进行评价，给出合理性建议。

关键词：高炉炉壳；有限元分析；应力分析；变形特性

## **Finite element analysis of large blast furnace shell structure**

**Speciality:** Architecture and Civil Engineering

**Name:** Wang Zhaocun

**Instructor:** Prof. Xu Shanhua

### **Abstract**

In the text, the classification, range and mode of load under the regular production condition was analyzed, the 5500 m<sup>3</sup> blast furnace finite element model was erected. Based on the finite element model analysis, the integral and local stress and deformation of the blast furnace shell, and the influence of the big holes to the blast furnace shell was discussed. And more, the appropriate advice of the thickness of shell , the form and dimension of the holes was making out.

The investigation takes the forms as the following parts:

(1) Analysis to the loads

Classify the loads on the shell of the blast furnace and contrast to the research production. Make certain the mode and range of load through the discussion to the iron-making major. Make sure the calculate parameter of the wind and the earthquake.

(2) Integral finite element model of the blast furnace shell

According to the shape and holes of the blast furnace provided by iron-making major, erect the integral finite element model of the blast furnace with the finite element programs MIDAS and ANSYS, and apply the loads to the finite element model,.

(3) Analysis to the result

The load combination was discussed in the text. Through the contrast to the results calculated by MIDAS and ANSYS, make sure the accuracy of the results. And more, analyze the stress and the deformation of the blast furnace shell.

(4) Conclusion and advisement

Through the previous analysis, the thickness of the blast furnace shell was appraised, and the influence of the big holes to the blast furnace shell was dicussed..

**Keywords:** blast furnace shell, finite element analysis, stress analysis, deformation characteristic



## 目录

<b>1 绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 高炉简介 <sup>[1~3]</sup> .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	2
1.2.1 国内研究概述 .....	2
1.2.2 高炉结构荷载认识的逐渐深入 <sup>[9~12]</sup> .....	3
1.2.3 高炉的有限元弹塑性分析 .....	4
1.2.4 高炉抗震方面的研究成果 .....	5
1.2.5 国外研究现状 <sup>[9]</sup> .....	5
1.3 炉壳设计方法发展历程及现状综述 .....	6
1.4 问题的提出 .....	7
1.5 研究目的及内容 .....	7
<b>2 工程概况及荷载分析</b> .....	<b>9</b>
2.1 工程概况 .....	9
2.2 工艺荷载 .....	10
2.3 荷载分析 .....	11
2.4 水平地震作用 .....	14
<b>3 基于有限元分析平台的炉壳整体几何模型的建立</b> .....	<b>15</b>
3.1 有限元分析软件的功能概述及适用性 .....	15
3.2 炉壳有限元结构建模中的几个问题 .....	15
3.2.1 炉壳外形特点及结构的对称性 .....	15
3.2.2 结构计算单元的选择 .....	16
3.2.3 结构单元网格的划分 .....	18
3.2.4 边界条件 .....	19
3.3 基于 MIDAS 平台的炉壳整体模型建立 .....	19
3.4 基于 ANSYS 平台的炉壳整体模型建立 .....	20
3.5 相关计算参数的确定 .....	23

3.6 小结.....	23
<b>4 计算结果及分析.....</b>	<b>24</b>
4.1 荷载效应组合及强度理论.....	24
4.1.1 荷载效应组合的原则.....	24
4.1.2 强度理论的采用.....	24
4.2 炉壳等效应力分布状态及分析.....	25
4.2.1 MIDAS 及 ANSYS 计算结果的对比及分析.....	25
4.2.2 炉头封板应力分布状态及分析.....	28
4.2.3 炉喉、炉身、炉腰、炉腹应力分布状态及分析.....	29
4.2.4 风口带应力分布状态及分析.....	30
4.2.5 铁口带应力分布状态及分析.....	31
4.2.6 炉壳底部应力分布状态及分析.....	31
4.3 炉壳各部位环向应力与竖向应力的分布状态及分析.....	32
4.3.1 炉壳各部位竖向应力与环向应力.....	32
4.3.2 炉壳各部位竖向应力与环向应力计算结果统计及分析.....	39
4.3.3 典型板带开孔方式合理性分析.....	42
4.4 炉壳变形特性及分析.....	45
4.4.1 炉壳的竖向变形及分析.....	45
4.4.2 炉壳的水平变形及分析.....	45
4.4.3 炉壳的环向和局部变形及分析.....	46
4.5 小结.....	48
<b>5 结论及建议.....</b>	<b>50</b>
5.1 本文结论.....	50
5.2 展望.....	50
<b>参考文献.....</b>	<b>52</b>
<b>致    谢.....</b>	<b>54</b>

# 1 绪论

## 1.1 高炉简介<sup>[1~3]</sup>

钢铁厂一般主要包括炼铁、炼钢、轧钢三个车间，加上烧结车间和焦化车间就被称作钢铁联合企业。生产钢铁产品的第一步就是把矿石里的氧化铁用还原剂还原成纯铁。在炼铁车间高炉是冶炼生铁的主要设备，它是由耐火材料砌筑的竖立式圆筒形炉体，最外层是由钢板制成的炉壳，在炉壳和耐火材料之间有冷却设备。高炉冶炼的实质是上升的煤气流和下降的炉料间进行传质传热的过程。

高炉的大小以高炉有效容积表示，高炉有效容积和高炉座数表明车间的规模，高炉炉型设计是高炉设计的基础。我国高炉炉型的发展主要受当时技术条件和原燃料条件的限制/随着原料燃料条件的改善以及鼓风能力的提高，高炉炉型演变过程大致分为三个阶段。1.无型阶段—又称生吹法。在土坡上挖洞四周砌石块，以木炭冶炼。2.大腰阶段—炉腰尺寸过大的阶段。由于当时工业不发达，高炉冶炼以人力、畜力、风力水力鼓风，鼓风能力弱，为保证整个炉缸截面获得较高的温度，炉缸直径较小；冶炼以木炭和无烟煤为燃料，机械强度很低；为了避免高炉下部燃料被压碎，从而影响料柱的透气性，故有效高度很低；为了人工装料方便并能够将炉料装到炉喉中心，炉喉直径也很小，而大的炉腰直径减小了烟气流的速度，延长了烟气在炉内停留的时间，起到焖住炉内热量的作用。因此，炉缸和炉喉直径小，有效高度低，而炉腰直径很大。这类

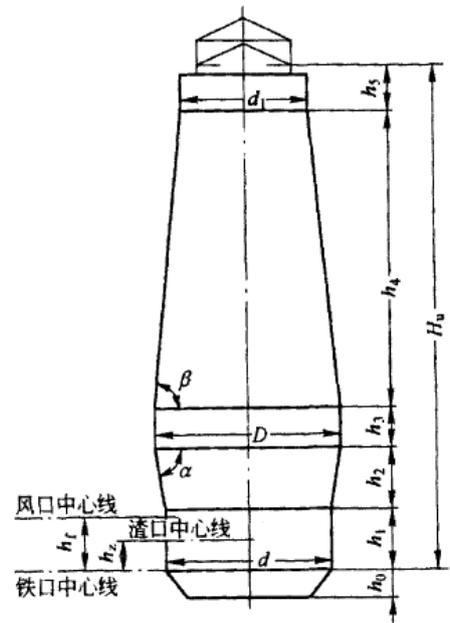


图 1.1 五段式高炉内型

高炉生产率很低，一座  $28\text{m}^3$  高炉日产量只有 1.5t 左右。19 世纪末，由于蒸汽鼓风机和焦炭的使用，炉顶装料设备逐步实现机械化，高炉内型趋向于扩大炉缸和炉喉直径，并向高度发展，逐渐形成了近代五段式高炉炉型。最初的五段式炉型，基本上是瘦长型，由于冶炼效果不明显，相对高度又逐渐降低。3.近代高炉，由于鼓风能力的进一步提高，原料处理更加精细，高炉炉型向着“大型横向”发展。五段式高炉炉型沿高度分为以下区段：炉

$H_u$ —有效高度； $h$ —死铁层厚度； $h_1$ —炉缸高度； $h_z$ —炉腹高度；  
 $h_3$ —炉腰高度； $h_4$ —炉身高度；  
 $h_s$ —炉喉高度； $h$ —风口高度；  
 $h_z$ —渣口高度； $d$ —炉缸直径；  
 $D$ —炉腰直径。

缸、炉腹、炉腰、炉身与炉顶。如图 1.1 所示：

在冶炼的高炉内有两种不断运动的物体。一种是炉料（包括焦炭、矿石、烧结矿和石灰石）缓慢下降，并逐渐被加热；另一种是焦炭燃烧产生的煤气。煤气以高速上升，温度也从 1600°C 降至 200°C，不均匀的分布在炉子的各截面内，沿炉壁流通，耐火砌体受煤气强烈的灼烧而侵蚀。

炉身下部的铁水与矿渣向下渗到块状炉料之间，部分沿炉壁流下。焦炭在炉缸风口区燃烧，一直深入炉内约 1.5-2.0 米处，这一区域是最高温度区达 1800-1900°C。

在机械、热工及化学作用下，炉身砌体遭到破坏。炉壳局部烧红，破坏高炉正常工作。崩料时，滑料动力冲击破坏炉腹与炉缸的砌体。特别是炉底和炉缸的砌体上作用着较大的荷载。炉底砌体受到铁水的冲刷，经常处于不断灼热及铁水压力作用下。铁水浸入砖缝，使其产生塑性变形，结果炉底砌体及炉缸壁很快破坏，炉底形成坑洞被铁水填满。当高炉工作制度改变时，这些铁水可能冷却，体积膨胀，炉壳受到附加的径向应力。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 国内研究概述

炉壳是高炉的外壳，主要作用是固定冷却设备、保证高炉砌砖的牢固性、承受炉内压力和起到炉体密封作用。它是高炉钢结构重要组成部分。

随着国民经济的发展和科技进步，国家对钢铁质量的要求也越来越高。从建国时大炼钢铁开始，炼铁行业大致经历了三次技术的革新<sup>[4]</sup>，从最初的 50 年代苏联专家指导下建成了鞍钢本钢等第一批高炉，到六七十年代我国科研人员靠经验自己独立摸索设计，再到八九十年代引进先进技术，我国已能设计出当时具有国际水平的高炉。进入 21 世纪以来，高炉建设正向大型化和现代化迈进。目前，世界上主要的炼铁工艺有三种，即高炉、直接还原和熔融还原。从生产规模和效率成以及同大型钢厂流程的匹配来看，迄今为止没有任何一种非高炉流程能达到或接近大型高炉目前已达到的生产水平。可以认为，在进入新世纪相当长的一段时间内，无论是我国还是工业发达国家，高炉流程都将占绝对优势<sup>[5]</sup>。以宝钢、武钢、鞍钢、首钢、邯钢、梅山、上钢一厂、莱钢、三明和新兴铸管等企业的高炉部分指标达到了国际先进水平，大大地缩短了我国高炉炼铁技术与工业发达国家之间的差距<sup>[6]</sup>。首钢院设计的全国最大炉容的高炉现在已经施工完毕<sup>[7]</sup>。随着技术的发展，高炉的结构也发生了很大的变化，炉缸支柱已不复存在，大小料钟已被无料钟所取代，吊装机具的发展也使高炉安装工艺发生了很大的变化<sup>[8]</sup>。但是国内的高炉设

计还基本停留在经验为主，计算为辅的阶段。由于高炉内部炉料运动的复杂性和现行设计方法先设后计的局限性,我国高炉系统特别是炉壳,主要是以经验为主并参考一部分计算数据来设计的。重庆钢铁设计研究院于 60 年代编制了我国高炉结构设计的基本依据—《高炉结构设计技术规定》。该规定引入原苏联  $\Delta=KD$  公式及边缘效应计算。 $\Delta$ —计算部位炉壳的厚度， $D$ —计算部位炉壳外弦带直径， $K$ —系数（单位 mm/m）。尽管实践和理论早已证明该式存在明显的局限性,但直到现在,我国大多数设计单位对炉壳的计算仍以此为依据。这种靠经验取值的方法和粗糙设计的理论已不能很好的模拟现在的炉况。所以利用更先进的计算方法和计算手段来对高炉进行更精确的分析是以后这种类型结构的趋势。虽然部分设计单位已进入应力分析阶段，但受条件限制计算精度并不高，主要有以下两方面因素，第一，炉内三相材料的运动规律难以确定，对作用于炉壳上的部分荷载缺少试验数据，难以做进一步的统计分析。第二，炉壳整体几何模型的过多简化，导致对炉壳整体及局部工作的性能、应力分布状态和变形特性难以确定。

### 1.2.2 高炉结构荷载认识的逐渐深入<sup>[9-12]</sup>

众所周知，高炉是炼铁工艺的关键设备，他是内部固态- 液态- 气态三相材料耦连运动并承受高温,高压等多种作用的复杂特殊结构<sup>[10]</sup>，其上的荷载种类繁多而且取值也不好确定。有炉料荷载及其作用，内部耐火砖膨胀压力，煤气压力，在风口处及导管等出口处还有盲板力，考虑温度作用时的内外温差应力以及整体升温带来的应力。随着大型高炉的增多，这些荷载的取值以及组合都是目前亟待解决的问题，国内对各种荷载的取值还没有统一的定论。

煤气压力、炉衬和冷却系统的热膨胀力、温度应力，炉料和铁水压力，决定了正常操作条件下炉壳的结构应力大小。炉内高温以及炉料的周期作用或突然作用，能使结构产生热疲劳或冲击应力，降低钢材塑性并导致炉体开裂。在出铁口及风口处因为应力集中和砖衬磨损较快使得局部应力过高，造成炉壳开裂。服役后期，由于内衬及冷却器的磨损，在局部可导致局部过热或大面积烧红，将产生很大热应力，加速炉壳开裂。1960 到 1972 年前苏联在研究高炉综合体结构问题的状态、调研与试验过程中对 60 个高炉和 200 个热风炉做了详细的研究，并对 7 个高炉综合体进行了现场试验。在试验过程中取得了 50, 000 个数据，收集了大量的统计资料。试验结果表明，在高炉和热风炉的炉皮上不论在环向和垂直方向都产生了大量的拉应力。而双轴的拉应力降低了炉壳的可变形程度，在炉缸炉底处，这些应力有时会超过屈服极限。炉身的应力有时也超过屈服强度。炉壳的破坏通常开

始于应力集中处(转折处、翘曲处、开洞处等)<sup>[12]</sup>。美国内陆公司证明,沿炉壳厚度的温度梯度是大应力的主要原因,当最大热应力超过屈服应力,炉壳就会开裂。许多高炉在开裂处采用水冷的方法控制炉壳应力,但是却加速了炉壳的腐蚀,使得截面削弱,最终导致停炉大修。低周疲劳也是影响高炉寿命的主要因素。据前苏联对高炉实际工作状态的研究,炉壳是在不同循环特征和不同变化幅度的周期荷载作用下工作的,炉壳10年中荷载变化的循环次数为 $2 \times 10^4$ ,荷载不对称系数 $\rho = 0.6 \sim 0.9$ 。在这种周期荷载作用下,炉壳应力集中部位可能产生局部塑性变形,从而导致低周疲劳破坏。日本在炉壳计算中计入炉壳整体温度 $t = 100 \sim 130^\circ\text{C}$ ,内外温差 $\Delta t = 10^\circ\text{C}$ 。

姜德进<sup>[8]</sup>在2003年对经常遇到的有关高炉土建设计中的一些有争议的荷载问题进行了探讨,并提出了相应的看法。他指出:由于炼铁工艺的改进,在计算炉腰以上应力强度时,由于炉内工作压力而产生的径向应力为拉力,如果取炉料荷载 $T=2V$ 参加组合,则该项荷载反而减小了径向应力,这样一来该项荷载就失去了实际意义。在计算高炉基础时不必考虑冲击系数,在计算炉壳时可以考虑0.25的附加系数,也即按 $1.25V$ 附加荷载考虑(注意仅在计算炉壳的最大压应力时才用到此附加荷载,此时应不考虑炉内工作压力参加组合)。还有所谓的爆炸压力在计算炉壳时也可以不予考虑。

### 1.2.3 高炉的有限元弹塑性分析

近年来,随着有限元技术的逐渐成熟和计算机分析水平的提高,我国已经在高炉整体弹塑性分析方面取得了很多有价值的研究成果。早在1992年韩二中等人利用SAP5程序计算了炉壳结构多种工况下的炉壳应力<sup>[13]</sup>。张荣刚等人利用SAP84把高炉系统包括高炉框架,上升管,下降管等构件简化为杆件计算他们的内力,提出了采用除尘器支座的弹性连接和下降管或塔前管设置温度补偿器的方案<sup>[14]</sup>。李富帅等人利用ALGOR96有限元计算程序中SSAP6S屈曲分析计算软件对宝钢3号高炉进行了稳定分析<sup>[15]</sup>。后来张开林等人借助大型通用有限元分析软件ANSYS,采用热结构耦合的方法计算了高温状态下直接还原炉炉壳的温度分布、热结构耦合应力场<sup>[16]</sup>。重庆大学的王志军等人,在包刚1号高炉大修时,通过对高炉炉壳的弹塑性有限元分析,得到了结构的塑性区域产生、发展以及最终应力—应变分布规律,为高炉的设计和建设提供了依据<sup>[17]</sup>。去年在制定《钢铁企业冶炼工艺炉技术规范》过程中,陶修等人基于有限元分析软件ADINA,对高炉炉壳整体进行弹性和弹塑性分受力变形分析,得出壳体的受力大小及其分布规律<sup>[18]</sup>。北

京首钢国际工程技术有限公司的张付可等人对  $1000\text{m}^3\sim 5000\text{m}^3$  综合考虑各方面因素的影响,采用有限元分析软件建立较完整的有限元整体分析模型的过程,并采用一次加载的模式对其进行弹性分析<sup>[19]</sup>。此外文献[20]~[24]对高炉开孔部位的应力集中问题和温度分不规律做了研究。

#### 1.2.4 高炉抗震方面的研究成果

我国是个地震多发国家,汶川地震后,引起人们对建筑物和各种构筑物的抗震能力的普遍关注,高炉结构也不例外。但是,由于高炉工况的复杂,国内外经历地震的高炉很少,这方面的经验十分缺乏。1960年智利大地震,位于震中西边公里的。钢厂日产1200吨、全高184英尺典型的智利型高炉,仅按0.17g地震系数抗震设计,成功地抗御了地面加速度达0.3g(g为重力加速度)的地震考验<sup>[25, 26]</sup>。1968年十胜冲地震室兰炼铁厂典型的日本型高炉经受了当地测得的最大加速度为0.21g的地震考验<sup>[27]</sup>。1976年唐山地震中投产十八年严重侵蚀的唐山钢铁厂小高炉,主体结构经受了十度地震考验<sup>[28]</sup>。高炉震害主要由于地震停电、停水造成铁水凝固,炉皮过热导致炉腹外壳凹凸变形,以及附属管道如上升管的根部翘曲失稳或焊缝开裂,地脚螺栓拉开等。

由于国家现行有关设计规范及鉴定标准和规程中也只是概括性地给出了一些计算原则和经验构造方法,故在高炉设计中一般不进行抗震能力分析,大多数是基于已有的经验进行一些抗震构造设计。这与高炉重要性是不相称的。高炉抗震能力是由地震作用和正常生产状态时作用荷载的应力组合所决定的。目前国内对这方面的研究还很少,俞祖范等人在1984年把炉壳简化为悬臂杆用空间体系计算简图运用有限元分析方法通过计算各阶振型和振型叠加法对炉壳结构进行了地震反应分析,能够反映地震时上升管根部弯曲失稳震害现象,并且反映出平时振动中经常呈现的两个主要频率<sup>[29]</sup>。徐祥文等人通过实测高炉的自振特性和模型试验,提供了估算高炉自振特性以及它对于地震反应的方法<sup>[30]</sup>。在李青芳翻译的《日本高炉结构抗震设计的研究中》也是把炉壳考虑成悬臂杆通过对整体系统结构包括炉体,框架,下降管,除尘器的平面模型和空间模型抗震分析的对比,确定了空间模型考虑扭转的必要性<sup>[31]</sup>。郑山锁等人通过对太钢4号高炉的加固研究分析将高炉炉体简化为一个多质点的悬臂杆利用水平剪力法对地震反应进行了模拟<sup>[32]</sup>。这些都为高炉的抗震设计提供了宝贵的经验。

#### 1.2.5 国外研究现状<sup>[9]</sup>

断裂力学的发展,阐明了疲劳裂纹的扩展规律,为确定材料的断裂韧性提供

了理论支持，对估计结构的使用寿命起到了很大作用。有限元技术的发展为整体宏观和局部微观的应力分析提供了便利。美国内陆钢公司运用计算机和有限元法，建立了宏观整体和微观模型，对炉壳进行了分析，计算了一般薄膜应力和孔口峰值应力，由此确定疲劳应力，从而决定炉壳疲劳应力的容许循环次数。通过局部热点分析，证实沿板厚的温度梯度是应力大的主要原因，最大应力和偏移在热点中心图，最大热应力超过炉壳的屈服应力。局部热点分析揭示热点中心炉壳厚度及过热反复次数和开裂的关系。小仓制铁所对炉壳局部过热区进行了热弹性有限元分析，获得内表面温度达到最大值 $T_{\max}$ 时，局部过热区附近的应力应变规律：局部过热温度越高，炉壳厚度越大；局部范围越大，允许过热次数越少。

### 1.3 炉壳设计方法发展历程及现状综述

国内外炉壳设计方法的发展经历了三个阶段<sup>[33]</sup>：第一阶段为经验设计法，即前苏联的 $\delta = KD$ 公式辅以边缘效应的方法；第二阶段为常规计算方法，即按照压力容器规范进行设计；第三阶段为应力分析法，即利用有限元分析方法在计算机中建立数学模型，基于该模型输入荷载数据及边界条件，通过大规模的矩阵运算求解方程组得出结构的应力状态和变形特性。应力分析方法是目前高炉炉壳设计中较为先进的一种方法。

目前我国炉壳设计技术的水平很不平衡，大致分为三个层次<sup>[34]</sup>：中冶京诚和中冶赛迪是我国高炉结构设计较早进入电算阶段的大型设计院，代表我国相关技术的先进水准。它们分别引进了美国和日本的相关软件用于工程设计，凭借大量工程实践及相对先进的计算设备，对炉壳整体和局部进行有限元分析。其它一些专业性大院主要采用经验设计法并辅以相关技术规定对大中型高炉进行设计。中小冶金设计单位基本属于第三层次，主要停留在小型高炉的设计上，参考以往的经验 and 图纸，较少考虑设计的技术性和经济性。

综上所述，目前我国炉壳设计大多还处于以经验为主、计算为辅的阶段。虽然部分设计单位已进入应力分析阶段，但受条件限制计算精度并不高，主要有以下两方面因素，第一，炉内三相材料的运动规律难以确定，对作用于炉壳上的部分荷载缺少试验数据，难以做进一步的统计分析。第二，炉壳整体几何模型的过多简化，导致对炉壳整体及局部工作的性能、应力分布状态和变形特性难以确定。

## 1.4 问题的提出

大型化是高炉今后的发展方向。宝钢及其它后续建成的四千立级大型高炉与原日本设计的宝钢高炉基本处于同一水平。我国对于超越四千立级的 5500m<sup>3</sup> 大型高炉的炉壳设计经验较少。对其在正常生产状态下，炉壳不同部位的应力分布状态及变形特性的认识基本空白。为了最大限度地提高设计精度，掌握正常生产状态下高炉炉壳工作特性，必须对正常生产状态下 5500m<sup>3</sup> 大型高炉炉壳整体及各部位的应力分布状态和变形进行分析。

炉壳总体可视为轴对称壳体结构，炉壳表面不同部位分布有形状各异、大小不一且数目繁多的设备孔，各类孔对炉壳受力性能将产生不同程度的影响。另外，正常生产时作用于炉壳上的荷载种类繁多，且不同荷载的作用范围及方式有所差异。综合以上两方面因素，以往的经验设计法和杆系整体分析加局部实体分析的有限元分析方法均难以满足 5500m<sup>3</sup> 大型高炉炉壳设计精度要求。

## 1.5 研究目的及内容

本文旨在通过分析高炉正常生产状态下作用于炉壳上的荷载类别、范围及方式，建立 5500m<sup>3</sup> 高炉炉壳的整体三维壳体有限元分析模型，并基于整体有限元模型的分析确定在正常生产状态下炉壳整体及局部的应力分布状态及变形特性，对各类大孔对炉壳产生的影响进行评价，据此对炉壳不同部位的板厚确定、开孔形式及尺寸等方面提出合理建议。

结合工程的具体特点、相关研究成果和工程实践情况，本文研究内容如下：

### (1) 荷载资料及分析

将高炉正常生产状态下作用于炉壳上的荷载进行分类，与已有荷载方面的成果及资料进行对比分析，通过与炼铁专业交流的方式确定各类荷载的作用方式及范围，同时确定风荷载及水平地震作用的相关计算参数。

### (2) 基于有限元分析软件的炉壳整体三维模型的建立

根据炼铁专业提供的炉壳外形及开孔资料，分别采用 MIDAS 及 ANSYS 两个大型通用有限元分析软件建立炉壳三维壳体整体模型，综合考虑各方面因素进行模型的单元划分，并将各类荷载按其作用方式及范围分别施加于单元划分完毕的结构整体几何模型上，形成最终分析用整体有限元模型。

### (3) 计算结果分析

基于相关资料及研讨结论确定荷载组合方式。通过两不同软件各工况组合后

计算结果的对比，确定计算结果的准确性。并基于该计算结果对炉壳的应力状态和变形特性进行分析及评价。

#### (4) 结论及建议

综合上述各方面工作，通过计算结果的对比及分析，对炉壳所用板厚的合理性及各类大孔对炉壳产生的影响程度进行评价，给出合理性建议。

## 2 工程概况及荷载分析

作用于高炉炉壳上的荷载包括工艺荷载和结构荷载两大类。工艺荷载可大致分为竖向荷载和水平荷载两类，结构荷载指除炼铁专业资料外的风荷载及水平地震作用。各类荷载的作用范围及方式有所差异，结合目前已有的高炉荷载相关方面的成果资料，对各类荷载进行分析，并最终确定各类荷载的施加方式及范围。

### 2.1 工程概况

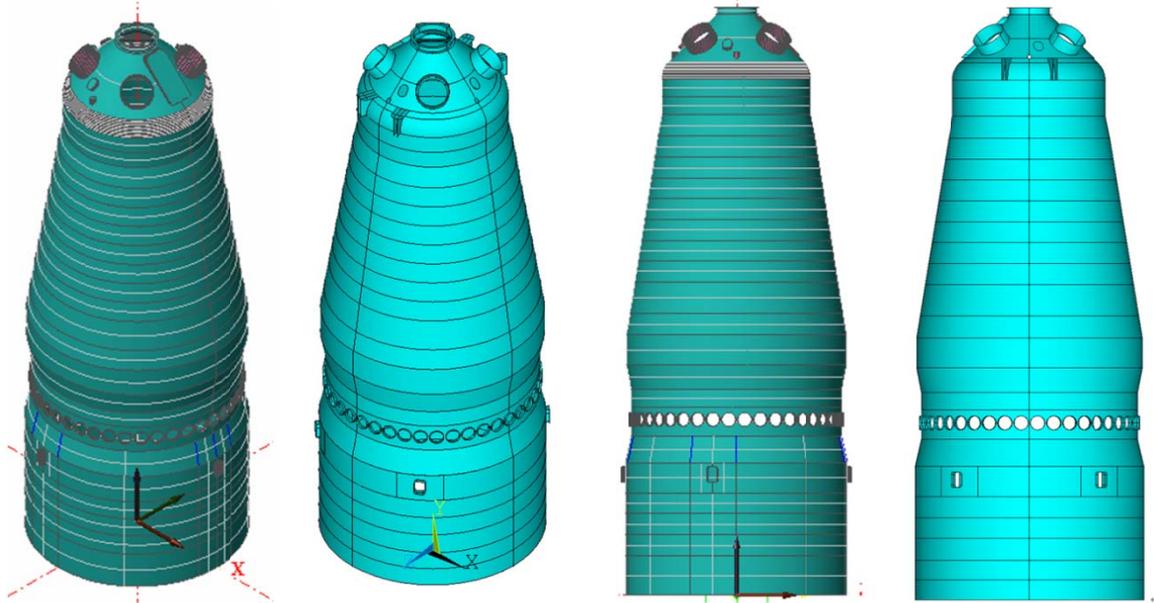
首钢京唐钢铁联合有限责任公司钢铁厂炼铁工程 5500m<sup>3</sup> 高炉积极贯彻全面、协调、可持续发展的科学发展观，按照循环经济的理念，遵循“先进成熟、实用可靠、长远发展”的原则，充分发挥综合资源优势，坚持工艺现代化、装备大型化、生产集约化、资源和能源循环化、经济效益最佳化的高起点发展目标，积极采用当今国际一流的先进工艺装备，把 5500m<sup>3</sup>高炉建设成为 21 世纪国际先进、竞争力强的特大型高炉。坚持“高效、低耗、优质、长寿、清洁”的设计理念，采用先进实用、成熟可靠、节能环保、优质长寿的工艺技术和设备材料，实现高炉的大型化、高效化、现代化、长寿化、清洁化。

该工程一期共建设两座 5500m<sup>3</sup>高炉，分两步实施，生产规模为年产 898.15 万 t/a 炼钢生铁，全部热送炼钢厂。炼铁工艺设计参数及技术指标如下：

表 2.1 炼铁工艺设计参数及技术指标

项 目	单 位	指 标	备 注
高炉有效容积	m <sup>3</sup>	2×5500	
年工作日	d	355	
利用系数	t/(m <sup>3</sup> ·d)	2.3	最大 2.4
日产铁量	t/d	2×12650	
焦比	kg/t	290	
煤比	kg/t	200	最大 250
综合焦比	kg/t	450	
综合冶炼强度	t/(m <sup>3</sup> ·d)	1.035	
入炉风量（不富氧）	Nm <sup>3</sup> /t	1170	
富氧率	%	3.5	设备能力 5.5
入炉风量（富氧 3.5%）	Nm <sup>3</sup> /t	1003	
送风温度	℃	1300	
炉顶压力	N/mm <sup>2</sup>	0.28	设备能力 0.3
炉顶温度	℃	150~200	
入炉风压：	N/mm <sup>2</sup>	0.50~0.52	

该高炉是目前国内有效容积最大的高炉。高炉炉壳高度为 49.06m，有效内径 17m，高径比 1.94，共划分 26 个板带（如图 2.1 所示）。炉壳表面上分布众多设备孔，除开有 4 个铁口（矩形孔）、42 个风口（圆形孔）、1 个换溜槽孔（矩形孔）及 4 个导出管孔（圆形孔）等大孔外，还有固定测温孔、探尺孔、人孔、冷却壁水冷管孔及螺栓孔等万余个小孔。



a) MIDAS 模型轴侧图 b) ANSYS 模型轴侧图 c) MIDAS 模型立面图 d) ANSYS 模型立面图

图 2.1 基于两种大型有限元平台建立的高炉炉壳三维几何模型

## 2.2 工艺荷载

工艺荷载包括作用于炉壳上的附属物自重（炉头保护衬自重、炉喉钢砖自重、冷却壁自重、内衬自重、风口及铁口的配合自重、炉顶阀箱荷载、）炉料侧压力及摩擦力、渣铁压力、煤气导出管反力、换溜槽孔、人孔等处的盲板力、煤气压力及内衬膨胀压力。各类荷载数值详见表 2.2。

表 2.2 高炉炉壳工艺荷载

序号	名称	单位	荷载
一	纵向荷载		
1	由炉腹、炉腰、炉身产生的荷载	kN	
(1)	炉头保护衬总重	kN	520
(2)	炉喉钢砖及固定测温总重	kN	3980
(3)	炉腹、炉腰、炉身冷却壁总重	kN	19500
(4)	炉腹、炉腰、炉身内衬总重	kN	19800
(5)	正常生产时炉料产生的荷载	kN	28000

(6)	其它载荷	kN	1500
2	由炉腹以下产生的载荷		
(1)	炉缸、炉底冷却壁总重	kN	10500
(2)	风口、铁口及其它配合重量	kN	4550
3	由炉料产生的载荷		
a	正常时	kN	28000
4	炉顶设备产生的载荷	kN	
5	由粗煤气系统产生的载荷	kN	
二	横向载荷		
1	正常时炉内气体产生的载荷	N/mm <sup>2</sup>	0.52
2	作用在炉体壁上的炉料压力	N/mm <sup>2</sup>	0.145
3	炉缸部位液体渣铁横向压力	N/mm <sup>2</sup>	0.75

### 2.3 荷载分析

国内有关炉壳计算方面的资料中，对作用于炉壳上的荷载情况介绍大多停留在将工艺荷载简化为节点荷载<sup>[35]~[38]</sup>的阶段，主要是因为计算时均不同程度的将炉壳简化为杆系结构，其计算结果的实际指导意义不强。文献[39]、[40]中对各类荷载的作用方式的介绍与实际情况相对较接近。以下结合相关资料成果，对表 2.2 所列各项荷载的作用范围及方式逐项进行对比分析，同时介绍在所建立的整体模型上各类荷载的施加方式。

对于竖向荷载，除炉壳自重外，作用于炉壳上的竖向荷载包括冷却壁及内衬等自重。在 MIDAS 中设定自重系数为-1，由程序自动考虑炉壳自重，在 ANSYS 中采用施加反向惯性加速度的方式以考虑其自重的影响。冷却壁的自重根据工艺给出的各板带上的重量确定，按均布的面荷载施加于炉壳上，方向竖直向下。内衬自重根据炼铁专业给出的总重及炉壳有效面积确定，施加方式同冷却壁自重的施加方式。炉头保护衬的重量根据工艺专业给出的总重及炉头有效面积确定，按均布面荷载施加于炉头封板，方向竖直向下。

作用于炉壳上的设备荷载主要有阀箱荷载、固定测温装置荷载及风口和铁口的配合重量等。对于炉壳上部的阀箱荷载的确定，首先进行阀箱支腿的三维放样，据此确定阀箱的四个支座位置及支座的有效承载面积。在 MIDAS 模型中，根据三维放样结果将每个支座处的空间集中力分别转化为在 X、Y、Z 三个方向上的均布面荷载施加于支座的有效面积上。在 ANSYS 模型中，根据三维放样结果将每个支座处的空间集中力分别转化为在三个方向上的均布面荷载施加于阀箱支座上。炉喉处的固定测温装置对炉壳除产生竖向荷载外，还产生炉壳平面外的附加弯矩，

计算时在相应位置处施加竖直向下的集中荷载和平面外的节点弯矩。风口及铁口等处的连接设备对炉壳的影响，主要是通过连接的法兰将荷载传递至炉壳，计算时将该类荷载施加在法兰位于炉壳外的悬臂端上。

炉料压力及摩擦力同时作用于炉身、炉腰及炉腹区域，计算时按均布荷载施加于该区域的炉壳上。炉料侧压力作用方向垂直于炉壳，炉料摩擦力按沿炉壳向下的切向施加。

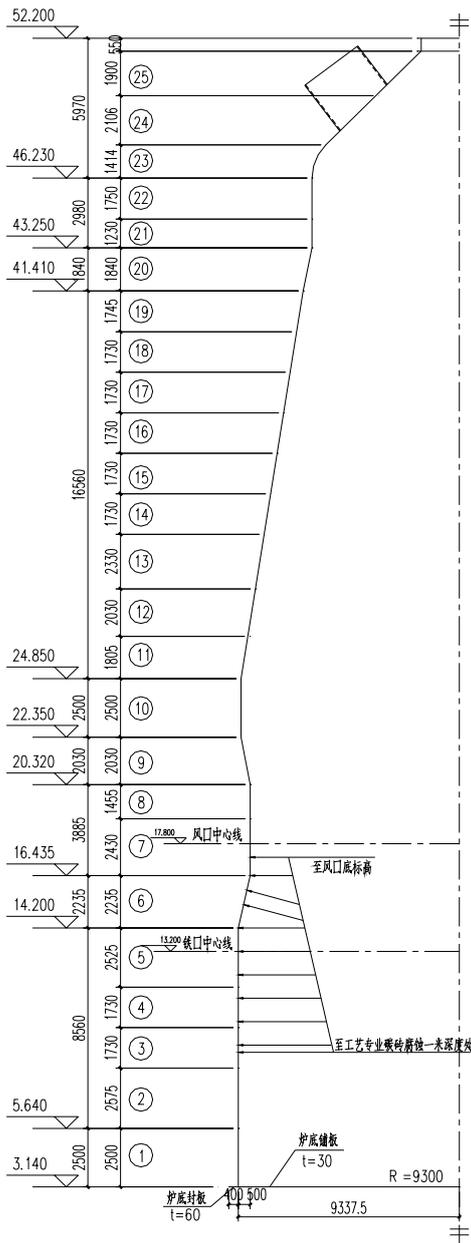


图 2.2 内部渣铁压力

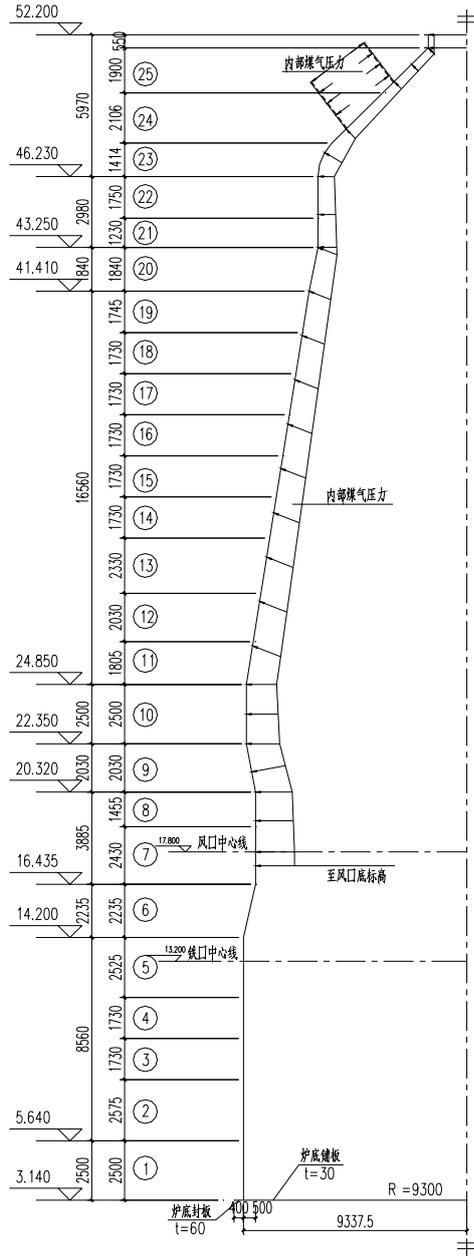


图 2.3 内部煤气压力

正常生产时，渣铁对炉缸及炉底区域产生较大的侧向压力。计算时考虑其最不利作用范围为上至风口底标高，下至炉缸底部碳砖受侵蚀后的厚度减小 1m 处。顶面压力值按等同于该处的煤气压力确定，渣铁底部压力值按考虑煤气压力影响

的液态渣铁容重换算确定。故渣铁压力按梯形荷载施加，作用方向垂直于炉壳。

高炉正常生产时内部煤气对炉壳产生侧向及竖向压力，相关资料中均认为该项荷载是影响炉壳强度的重要因素，压力值自风口至炉顶部位逐渐减小。计算时考虑煤气压力的最不利作用范围，下端取至风口底标高处，上端至炉顶钢圈处。按沿炉壳高度方向线性变化施加该压力<sup>[39]</sup>，作用方向垂直于炉壳表面。

高炉正常生产时内部温度升高，因内衬与炉壳材质差异，导致内衬的受热膨胀量大于炉壳的膨胀量，对炉壳产生侧向压力。该压力的取值目前尚未形成统一的认识。

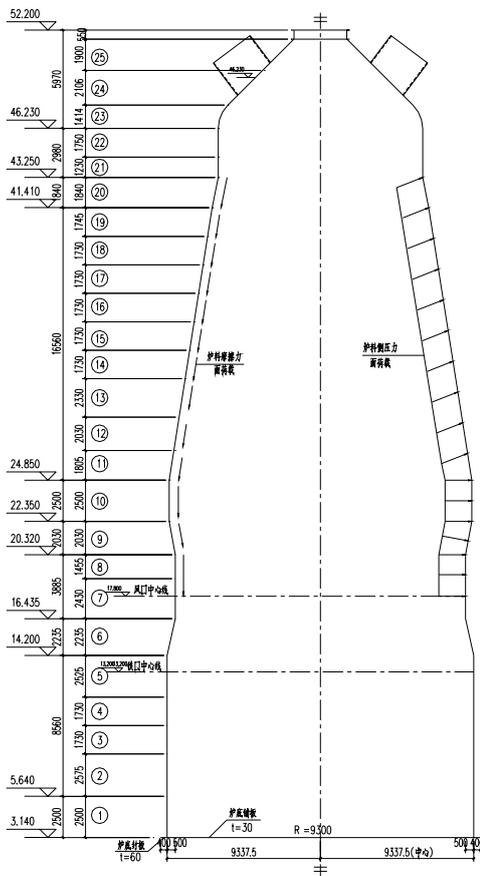


图 2.4 内部炉料侧压力及摩擦

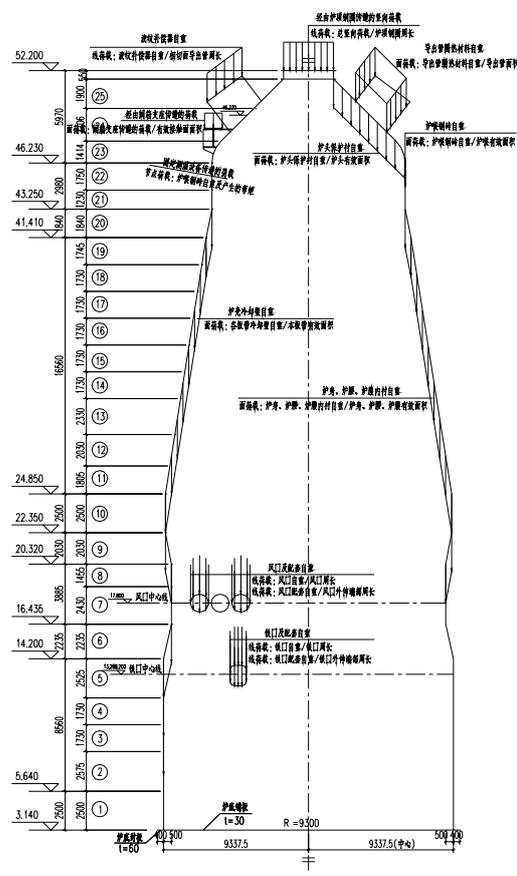


图 2.5 设备荷载及附属设备自重

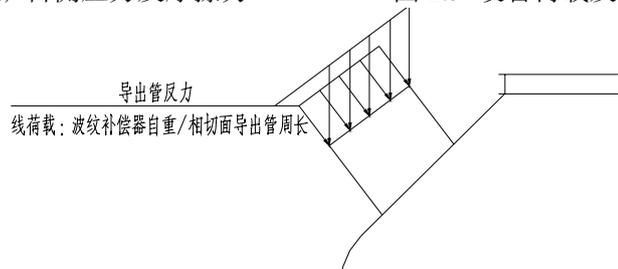


图 2.6 导出管反力

不同资料中给出的建议值甚至相差悬殊<sup>[39]</sup>，难以精确计算。根据日本和我国大型高炉的经验及实测数据，结合本高炉实际特点，最终确定高炉内衬膨胀侧压

力为  $0.2\text{N/mm}^2$ ，按均布荷载的形式施加于炉壳上，方向垂直于炉壳表面。

高炉正常生产时炉壳温度同烘炉前相比有较大的提高。计算时须同时考虑炉壳整体温度升高和沿炉壳厚度方向的温度梯度。炉壳温度与生产操作及高炉砌筑结构有较大的关系，其温度分布的计算有较大的不确定性，根据首钢生产实际情况及我国大型高炉的实测数据，考虑高炉正常生产时周围温度由  $20^\circ\text{C}$  升至  $40\sim 75^\circ\text{C}$ 。沿炉壳厚度方向的温差取  $10^\circ\text{C}$ <sup>[33]</sup>。计算用荷载简图如图 2.2~图 2.6 所示。

## 2.4 水平地震作用

除以上所述工艺资料中所含荷载外，高炉炉壳的整体计算尚须考虑风荷载及水平地震作用对炉壳产生的影响。

因高炉炉壳大部分位于出铁场主厂房内部，仅炉顶封板小部分露出厂房，故计算时不考虑风荷载对炉壳的影响。

根据文献[41]的规定，高炉正常生产时可仅考虑其水平地震作用效应，因炉顶煤气管道系统支撑于炉顶主平台上，且导出管与上升管之间采用膨胀节连接，计算时不考虑煤气管道系统对炉壳的影响，故计算时可仅考虑其在两个正交方向上的水平地震作用。地震作用计算采用振型分解反应谱法，计算输入的反应谱根据文献[41]高炉系统的相关规定确定，并考虑阻尼比的修正，振型个数一般可以取振型参与质量达到总质量 90% 所需的振型数，本工程所取振型数目为 16 个。

### 3 基于有限元分析平台的炉壳整体几何模型的建立

#### 3.1 有限元分析软件的功能概述及适用性

有限元分析方法是 20 世纪 50 年代随着电脑技术发展起来的一种求解偏微分方程的数值计算方法。普遍适用于进行科学的数值分析、产品的优化设计和生产过程的数值模拟。该方法以其适用性强而被广泛运用，成为目前科学研究和工程计算的一种最重要的方法。

本文分析采用的两个大型通用有限元分析软件 MIDAS 及 ANSYS 在功能性及适用性方面均具有强大优势。MIDAS 由世界最强以及最有信誉保证的韩国浦项集团成立的 CAD/CAE 研发机构开发，适用于机械、航空、造船、汽车、电力、水利、土木建筑等几乎所有工程领域，除常规分析功能外，具备移动荷载、水化热、热传导、恒态、瞬态、热应力、老化、徐变、干缩、管冷等方面的分析功能。在高炉分析方面，成功完成光阳一号、五号高炉、浦项二高炉、K1R1 高炉等项目的分析工作。ANSYS 由美国匹兹堡大学创建发展，是世界 CAE 行业最大的公司。融结构、流体、电磁学、声场和耦合场分析于一体的大型通用有限元分析软件，涵盖了机械、航空航天、能源、交通运输、土木建筑、水利、电子、地矿、生物医学等众多领域，是这些领域进行国内外分析设计技术交流的主要分析平台，拥有全球最大的用户群，领导着有限元界的发展趋势，成功完成转炉、冷却壁传热量分析及包钢新一号高炉等分析工作。

#### 3.2 炉壳有限元结构建模中的几个问题

##### 3.2.1 炉壳外形特点及结构的对称性

###### (1) 炉壳外形特点

高炉炉壳为轴对称的空间薄壁壳体结构，其炉壳上除开有 1 个炉顶钢圈孔、1 个换溜槽孔及 4 个导出管孔、42 个风口、4 个铁口等大孔外，还开有观测孔、人孔、探尺孔、冷却壁孔等万余个小孔。

各大孔的存在对炉壳的工作性能将产生较大的影响，故建模时根据工艺资料确定的各大孔位置及形状在炉壳对应位置开孔。

在整体几何模型中严格按照炉壳的所有开孔形状及位置逐个开孔是难以实现的，且各小孔的存在为精确建立高炉炉壳的几何模型及单元划分带来极大难度。文献[42]~[44]基于炉壳局部建模分析及测试结果，对不同压力状态下各

类小孔对炉壳应力的影响程度进行了详实的分析与评价。由此，可先确定不考虑小孔影响的炉壳整体应力分析状态，并基于此计算结果的应力状态对众多冷却壁小孔对炉壳应力状态的影响进行评价。

### (2) 结构的对称性<sup>[45]</sup>

工程实际中，很多结构具有对称性，如能恰当地加以利用，可以使结构的有限元计算模型以及相应的计算规模得到缩减，从而使数据准备工作和计算工作量大幅度地降低。对于一般结构和荷载的情况，对称性的利用原则是：如果结构对于某 1 个坐标面是对称的，同时荷载对该对称面是对称或反对称的，则可取结构的 1/2 建立计算模型；如果结构有 2 个或 3 个对称面，同时荷载对它们是对称或反对称的，则可分别取结构的 1/4 或 1/8 建立计算模型。对称面上的边界条件按照相应的规则确定。

### (3) 本工程中对称性的考虑

本工程中，在炉顶封板以下的高炉炉壳中，结构在平面上对于 2 个坐标面是对称的，但是炉顶封板不具有对称性。为了得到炉顶封板处实际的应力状态，本工程中按照结构的实际模型建模。本文建议在研究炉体水冷管开孔对结构的影响时，可以考虑结构的对称性，取结构的 1/4 建立计算模型，使计算量得到缩减，提高计算效率。

## 3.2.2 结构计算单元的选择

### (1) MIDAS 板单元<sup>[46]</sup>

MIDAS 软件中板单元可以适用于面内受拉压及面外受弯的压力容器、护壁、桥梁板等模型中。板单元的形状有三角形和四边形两种。

MIDAS 软件所采用的板单元，根据平面外刚度不同可把单元划分为薄板单元和厚板单元两种，既 DKT、DKQ (Discrete Kirchhoff Element) 和 DKMT、DKMQ (Discrete Kirchhoff-Midlin Element)。DKT (三角形单元) 和 DKQ (四边形单元) 是以薄板理论 (Kirchhoff Plate Theory) 为基础开发的；DKMT (三角形单元) 和 DKMQ (四边形单元) 是以厚板理论 (Mindlin-Reissner Plate Theory) 为基础开发的。三角形板单元的面内刚度使用了线性应变三角形 LST (Linear Strain Triangle) 理论，四边形板单元使用了等参数单元 (Isoparametric Plane Stress Formulation with IncoN/mm<sup>2</sup> tible Modes) 理论。厚板单元与薄板单元的差别为厚板单元考虑剪切变形。本文采用厚板单元。

板单元应尽量使用四边形单元。在建立曲面时，相邻板单元的夹角尽量不要超过 10 度。当需要输出比较精确的结果时，夹角尽量不要超过 2~3 度。在应力变化较大的位置，应尽量使用四边形单元细分。

输入板单元的厚度时，可以分别输入计算面内刚度(Inplane stiffness)和计算面外刚度(Out of Plane stiffness)所需的厚度。一般在计算自重和质量时，使用面内刚度厚度，但如果只输入了面外刚度厚度，则在计算自重和质量时使用面外刚度厚度。

板单元的自由度是以单元坐标系为基准，每个节点具有 x、y、z 轴方向的移动的线性位移自由度和绕 x、y 轴旋转的旋转位移自由度。

单元坐标系是由 x、y、z 三轴构成的，满足右手螺旋法则的空间直角坐标系。如图 3.1、图 3.2 所示。

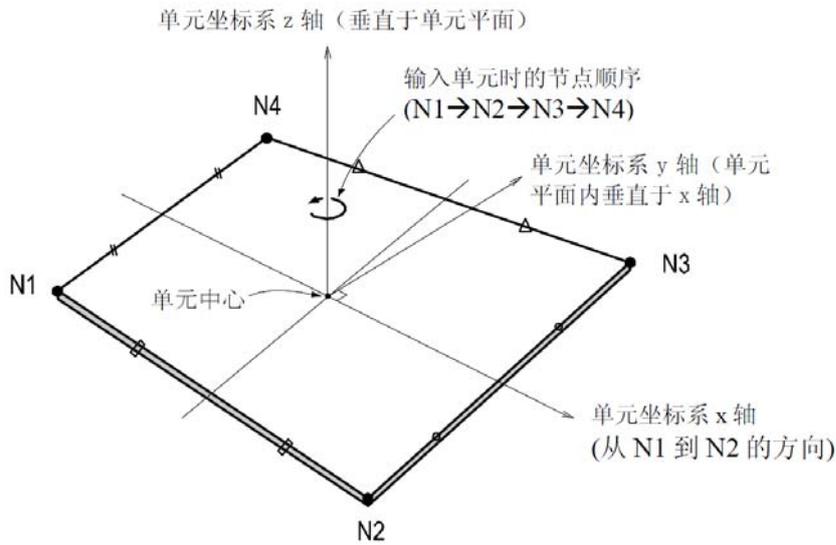


图 3.1 四边形单元的单元坐标系

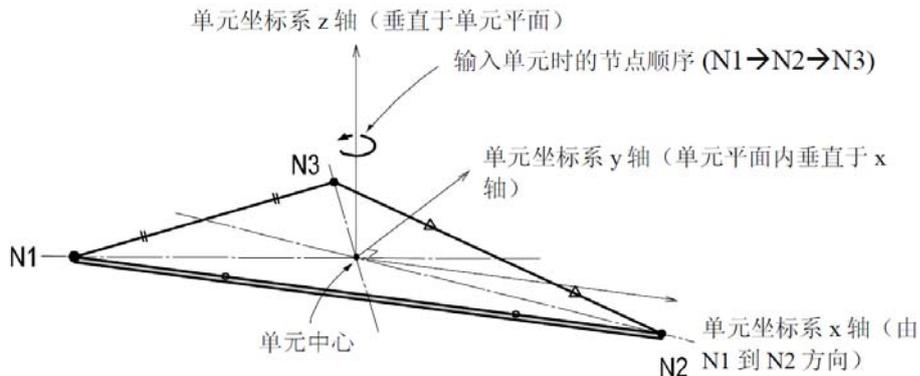


图 3.2 三角形单元的单元坐标系

(2) ANSYS 壳单元<sup>[47]</sup>

ANSYS 软件中 SHELL93 单元特别适合于曲壳模型。单元的每个节点都具有 6 个自由度：沿节点坐标系 x、y、z 方向的平动和沿节点坐标系 x、y、z 轴的转动。



### 3.2.4 边界条件

高炉炉壳底部与炉底封板焊接并坐于耐热混凝土基墩上，综合考虑其底部的实际约束情况及计算的可行性，计算时释放底部板带支座处的平面外转动自由度并固结其余自由度。将高炉炉底边沿 3 个自由度方向，即 X、Y、Z 轴的平动自由度进行约束。

### 3.3 基于 MIDAS 平台的炉壳整体模型建立

基于炉壳为轴对称壳体结构的形状特点，首先在 Auto CAD 中建立炉壳外形的基准线，该基准线建立时设置多道几何边界，以考虑后期各类荷载的施加便利及不同板带特性赋值的差异。基准线确定完成后导入 MIDAS 平台的 FX+ 模块中，通过旋转建立炉壳整体几何外形。

建模时首先建立该对称壳体结构，其次在 FX+ 模块中采用曲面相贯的方法建立各大孔。因在这些大孔处炉壳均通过法兰与设备相连，法兰采用剖口焊的形式与炉壳形成整体，且风口大套法兰、铁口框及换溜槽孔法兰的材质与炉壳材质不同，为考虑其在温度作用对炉壳产生的影响，在相应的风口、铁口、溜槽孔及炉顶钢圈等处建立相连接的法兰，在导出管处建立一段导出管（如图 2.1 所示），以考虑不同材质及多边界约束的影响，并避免后期分析可能出现的洞口局部计算结果失真的问题。炉顶封板的换溜槽孔、观测孔及探尺孔等在高炉正常生产时均为封闭状态，建模时建立盲板以考虑其所受煤气压力对炉壳产生的影响（如图 3.5 所示）。

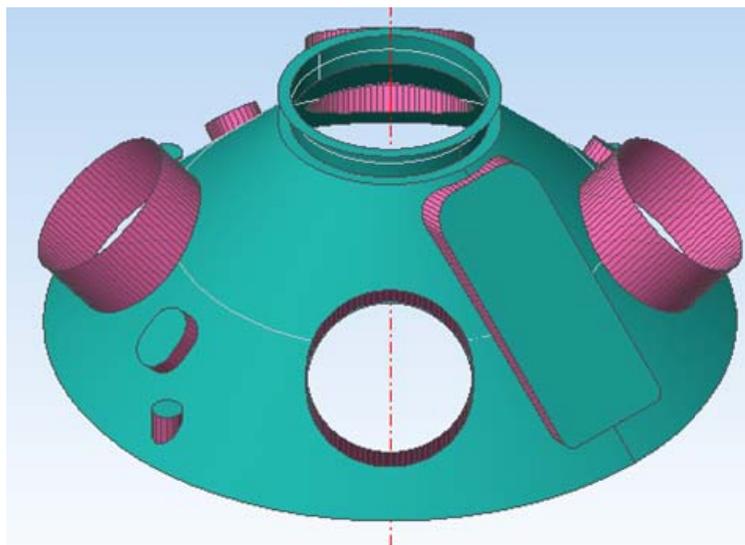


图 3.5 MIDAS 炉顶封板局部示

单元形状的好坏是影响计算结果精度的重要因素之一。基于以上建立的炉壳

整体模型经单元试划分及试算，发现铁口处应力过大且存在因单元形状不好导致局部计算结果失真较严重的问题。为解决这一问题，在风口带以下各板带建立前，首先建立铁口板带的加强区及非加强区，为避免角部单元形状不好的问题，以铁口带加强区与非加强区的分界线作为基准线，上至风口带下至炉底封板，将各板带均沿竖向分割。对于炉顶封板 25 及 26 板带边界处单元形状不好的问题，因设计初期拟定该两板带的板厚相同，故取消该几何边界（如图 1.1 中 a、c 所示）。通过控制单元划分的尺寸并设置或取消多道几何边界，炉壳整体单元划分可达到良好效果，单元形状良好。

综合以上几个方面，为使所建立的几何模型最终能还原炉壳真实的受力性能并反映各部位的应力状态及规律，前期炉壳整体几何模型的建立及单元的划分须综合考虑荷载作用范围、材质、炉壳板材特性等差异及多边界约束等各方面因素影响，因炉顶封板及风口段、铁口段开有众多大孔，划分时控制这三个区域单元尺寸较小，考虑到整体计算的耗时性，须将不开大孔的部分单元尺寸适当调大。经多次试划分确定了炉顶封板、炉身、炉腰、炉腹及炉底等不同部位的单元控制尺寸和划分顺序，炉顶封板 100mm、炉身区域由上而下逐渐过渡至 300mm、铁口及风口区域为 100mm、炉缸及炉底区域逐渐过渡至 500mm，划分完毕单元总数为 139749 个。单元划分完毕的炉壳整体模型如图 3.6 所示。

### 3.4 基于 ANSYS 平台的炉壳整体模型建立

基于炉壳的轴对称旋转壳体的几何外形特点，利用 ANSYS 内置的 APDL 处理器算法语言快速完成炉壳结构的整体建模。炉壳结构共分为 26 个板带，板带的划分综合考虑了炉壳各板带的初步拟定厚度、不同荷载的作用范围及特点、炉壳表面孔洞的分布位置以及有限元网格划分便利等因素。

建模过程中，首先确定高炉炉壳母线的控制点及拐点形成关键点和曲线，然后定义旋转轴，再将母线旋转成壳体。炉壳采用 shell93 单元，此类单元是 8 节点等参单元，适于模拟曲面壳体。完成后的炉壳几何模型如图 1.1 中 b、d 所示，炉顶封板局部示意图见图 3.7。

炉壳为曲面壳体，因此其表面开孔的边界均由相贯线组成。在 ANSYS 中运用布尔操作进行曲面相贯，形成孔洞的相贯边界。铁口、风口、换溜槽孔及炉顶钢圈等处均通过法兰与工艺设备相连，法兰采用剖口焊形式与炉壳连接，且风口大套法兰、铁口框及换溜槽孔法兰的材质与炉壳材质不同，为考虑法兰在温度作用

下对炉壳产生的影响，在几何模型中的相应部位建立了材质不同的法兰。炉头区域换溜槽孔、人孔及探尺孔等在高炉正常生产状态下均为封闭状态，故建立盲板以考虑其盲板力对炉壳的影响。

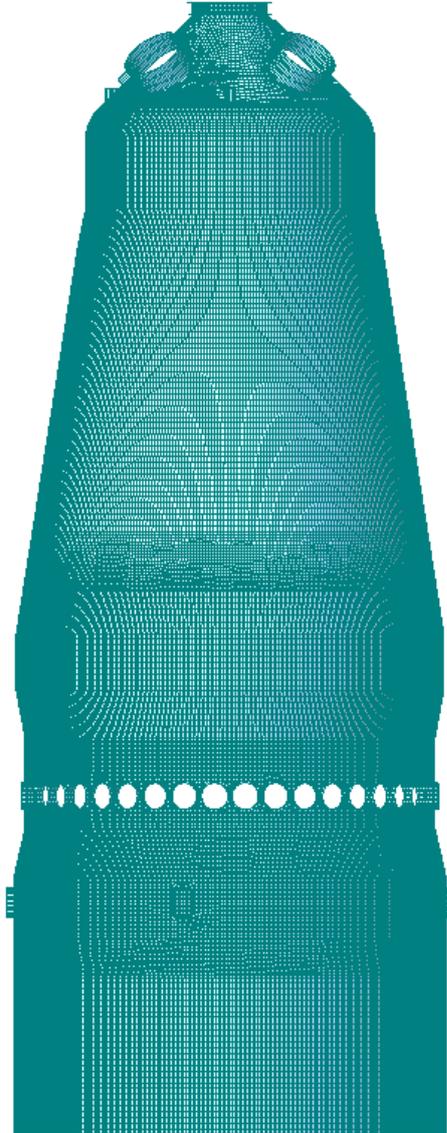


图 3.6 MIDAS 整体模型

为真实模拟高炉炉壳的受力状态，在模型所有大孔周围均施加孔边约束以避免虚假的应力集中现象。采用 shell93 单元模拟了一段导出管，并将承受较大设备荷载的阀箱支座与炉壳一同建模。

单元形状的好坏直接影响计算结果精度。shell93 单元的高厚比不能过小，否则即成为实体单元从而导致计算结果失真。炉壳表面开有众多设备孔，尤其是风口带及炉顶封板板带的洞口相对集中，过多的洞口限制单元平面尺寸不能太大，否则不能很好的模拟孔洞形状，导致洞口处计算结果失真。综合以上两方面因素，进行了单元试划分和试算后，对各板带的单元尺寸进行了多次调整，采用不同的

单元尺寸，使各区域尽可能的使用四边形单元，而非退化的三角形单元，经过多次单元试划分，单元形状全部合格，完全通过 ANSYS 严格的单元形状检查。炉头及炉喉板带，单元基本尺寸为 250~600mm，炉身段因大孔较少单元尺寸逐渐放大，至炉身底部单元尺寸为 1200mm，炉腰板带单元尺寸为 1000mm，炉腹向下炉壳半径变小且大孔相对集中，故单元尺寸变小，至风口带单元尺寸为 150mm，铁口板带单元尺寸为 200mm，铁口以下单元尺寸逐渐变大，至炉底板带单元尺寸为 700mm。单元基于 ANSYS 的智能划分，在洞口边缘等应力分布复杂部位进行加密划分，在其它部位尽可能使用较大的单元尺寸，可同时满足计算精度及耗时的要求。经过多次划分，最终的模型共有 58538 个节点和 19056 个单元。模型单元划分完毕的炉壳整体模型如图 3.8 所示。

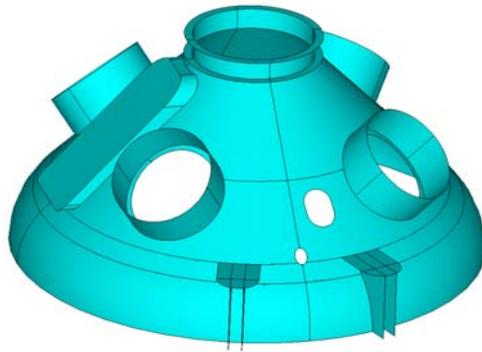


图 3.7 ANSYS 炉顶封板局部示意图

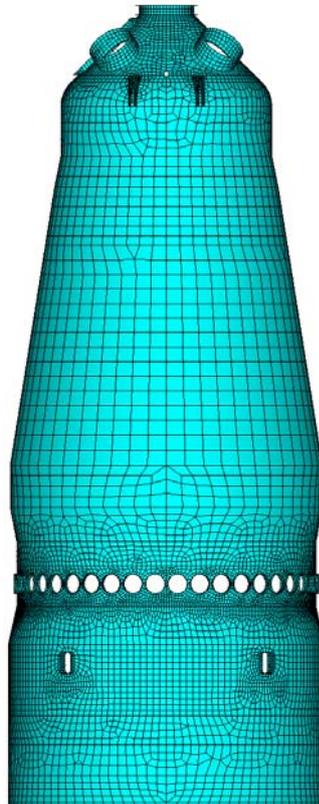


图 3.8 ANSYS 整体模型图

### 3.5 相关计算参数的确定

因各大孔的法兰及炉壳材质不同（BB503 及 ZG230-450），为考虑两者连接时因温度变化引起的约束应力，建模时分别建立两种材料，两种材料的计算参数取值如表 3.1 所示。

表 3.1 材料参数表

材 质	弹性模量 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	泊松比	线膨胀系数 ( $1/[\text{T}]$ )	比 热 $\text{J}\cdot\text{g}/\text{N}\cdot[\text{T}]$	热传导率 $\text{J}/\text{mm}\cdot\text{hr}\cdot[\text{T}]$
BB503	$2.06 \times 10^5$	0.309	$1.34 \times 10^{-5}$	507	209.34
ZG230-450	$2.06 \times 10^5$	0.309	$9.6 \times 10^{-6}$	494	162

### 3.6 小结

本章分别采用 MIDAS 及 ANSYS 建立了  $5500\text{m}^3$  高炉炉壳的整体三维壳体模型。两模型中均考虑了材质差异、边缘及约束效应、荷载作用范围及方式、盲板力等对计算结果可能产生影响的因素。基于多次试划分工作，确定了两个不同模型最终的单元划分尺寸及形状。在允许的条件下，建立了使计算精度达到尽可能高的模型。

## 4 计算结果及分析

基于前两部分的工作，在建立完成的炉壳整体几何模型上，按照第二章分析确定的不同荷载的施加方式及其范围，施加各类荷载，荷载施加完毕后分工况计算，根据各工况计算结果可确定对应工况下炉壳的应力分布状态及变形特性。

因高炉正常生产时，各类荷载同时作用于炉壳上，故须考虑除各工况下的炉壳效应外，针对整体受力及变形情况，尚须通过荷载效应组合确定。基于组合后的效应可确定高炉正常生产时不同部位的应力分布状态及变形特性。

### 4.1 荷载效应组合及强度理论

#### 4.1.1 荷载效应组合的原则

文献[48]中针对不同的荷载，考虑其超越的可能性提出不同的荷载系数，这与当时的允许应力设计方法是相对应的。而该安全系数的确定方法与目前的结构设计方法存在本质区别，目前的结构设计方法中，综合考虑了荷载分项系数及材料抗力超越概率的分项系数两项，已进入基于概率统计的结构设计阶段。进入基于概率统计的结构设计阶段后，炉壳设计一直未形成对应的荷载组合方法。

鉴于高炉炉壳的重要性，我院组织召开炉壳分析专家研讨会，就其正常生产状态下计算结果的组合原则进行讨论。对高炉不同部位起控制作用的活荷载（如煤气压力、渣铁压力及内衬膨胀压力、整体升温效应）的系数均为 1.0，对于其它活荷载，考虑到炉内各种荷载同时作用于炉壳，难以明确区分，且目前国内尚无完整的测试资料，其它各活荷载工况的荷载组合系数也均取为 1.0。

本文所采用的荷载组合取值与文献[49]是一致的。

#### 4.1.2 强度理论的采用

##### (1) 最大切应力理论（第三强度理论）

该理论认为，处于复杂应力状态下的材料，只要其最大切应力  $\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$  达到该材料在简单拉伸下出现屈服时的最大切应力值  $\sigma_s/2$ ，材料就发生屈服而进入塑性状态。因此材料在复杂应力状态下的屈服条件为：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s。$$

引入安全系数  $n$ ，取许用应力为  $[\sigma] = \sigma_s/n$ ，第三强度理论的强度条件为：

$$\sigma_1 - \sigma_3 \leq [\sigma]。$$

塑性金属试验证实了当材料出现塑性变形时最大切应力基本上保持为常值。所以这一理论可用来建立塑性材料的强度条件。这一理论引起的误差是由于不考虑中间主应力  $\sigma_2$  对材料屈服的影响。

### (2) 形状改变比能理论 (第四强度理论)

该理论认为, 当单元体储存的形状改变比能达到单向拉伸屈服时的畸变能密度, 材料就进入塑性屈服。

形状改变比能的屈服准则为:

$$\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} / 2 = \sigma_2$$

引入安全系数  $n$ , 第四强度理论的强度条件为:

$$\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} / 2 \leq [\sigma]$$

### (3) 第三强度理论和第四强度理论的比较<sup>[18]</sup>

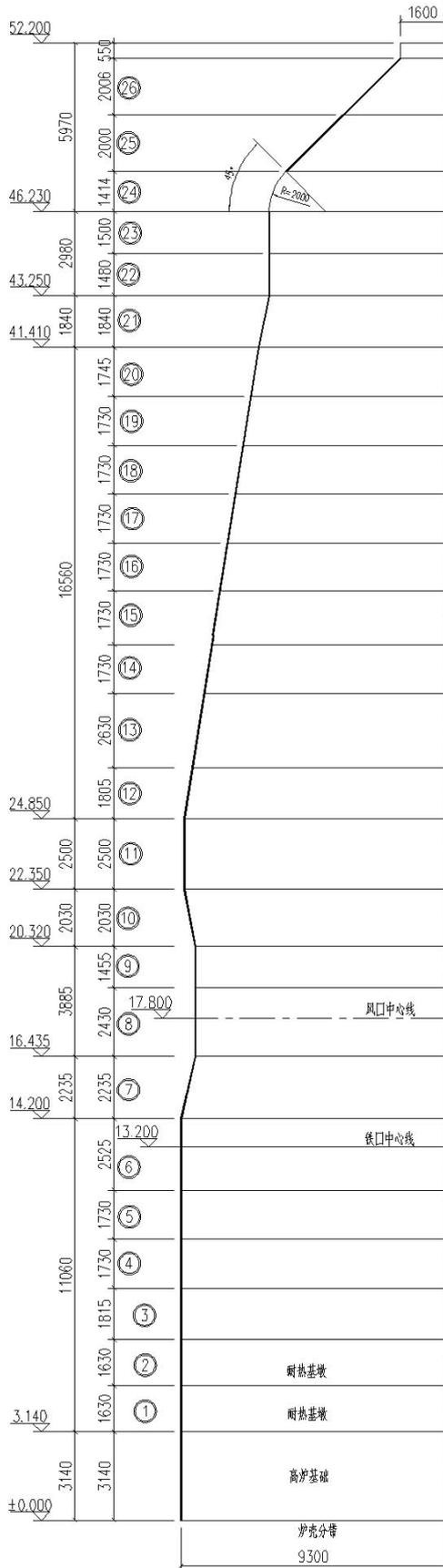
材料处于三向等值压缩时, 既没有切应力, 也没有形状改变比能, 所以无论按第三或第四强度理论判断, 材料都不会发生屈服。薄壁圆筒的试验表明, 第三强度理论的屈服条件与试验结果基本符合, 而形状改变比能的屈服条件与试验结果符合的更好些。本文采用第四强度理论。

## 4.2 炉壳等效应力分布状态及分析

以下为两个不同软件基于相同的荷载施加情况及荷载组合的前提下确定的炉壳不同部位的应力分布状态及分析。表 4.1 为不同部位两不同软件的应力计算结果, 表中所示最大应力及平均应力均为已考虑沿厚度方向应力的等效应力值, 且均为组合后的最不利状态。

### 4.2.1 MIDAS 及 ANSYS 计算结果的对比及分析

图 4.1 所示为基于相同计算条件的前提下两不同计算软件的结算结果, 图中给出的最大值为对应各板带计算结果的最大值。对于采用平面单元模拟的各板带应力计算结果均为一个范围, 要准确统计出等效应力的平均值是有难度的。因两个软件的计算结果表明各板带的应力分布规律是一致的, 故表中平均值按对应板带应力水平较高且影响区域较大的同一区域的应力值确定。



高炉炉壳板带划分

部位	编号	板厚	Midas应力	Ansys应力
炉头	上部	⑳	d=110 整体应力: 124 N/mm <sup>2</sup> 导出管根部: 210 N/mm <sup>2</sup> 溜槽口上部: 210 N/mm <sup>2</sup>	整体应力: 130 N/mm <sup>2</sup> 导出管根部: 210 N/mm <sup>2</sup> 溜槽口上部: 237 N/mm <sup>2</sup>
		㉕	d=110 溜槽口下部: 152 N/mm <sup>2</sup>	溜槽口下部: 158 N/mm <sup>2</sup>
	弧形段	㉔	d=80 最大值: 77 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 48 N/mm <sup>2</sup>	最大值: 82 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 45 N/mm <sup>2</sup>
炉喉	㉓	d=60 最大值: 110 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 72 N/mm <sup>2</sup>	最大值: 94 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 60 N/mm <sup>2</sup>	
	㉒	d=60		
炉身上部	㉑	d=60		
	㉐	d=60 最大值: 119 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 111 N/mm <sup>2</sup>	最大值: 106 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 103 N/mm <sup>2</sup>	
	㉏	d=60		
炉身中部	㉍	d=70		
	㉌	d=70 最大值: 122 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 113 N/mm <sup>2</sup>	最大值: 101 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 96 N/mm <sup>2</sup>	
	㉋	d=80		
	㉊	d=80		
炉身下部	㉉	d=80 最大值: 125 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 122 N/mm <sup>2</sup>	最大值: 112 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 110 N/mm <sup>2</sup>	
	㉈	d=80		
	㉇	d=80		
炉腰	㉆	d=75 最大值: 142 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 135 N/mm <sup>2</sup>	最大值: 126 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 122 N/mm <sup>2</sup>	
炉腹	㉅	d=75 最大值: 165 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 141 N/mm <sup>2</sup>	最大值: 162 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 146 N/mm <sup>2</sup>	
风口上板带	㉄	d=90 最大值: 163 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 119 N/mm <sup>2</sup>	最大值: 160 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 120 N/mm <sup>2</sup>	
风口带	㉃	d=110 最大值: 171 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 118 N/mm <sup>2</sup>	最大值: 150 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 119 N/mm <sup>2</sup>	
炉缸二带	㉁	d=80 最大值: 187 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 133 N/mm <sup>2</sup>	最大值: 168 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 133 N/mm <sup>2</sup>	
铁口带	非加强区	d=90 最大值: 179 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 156 N/mm <sup>2</sup>	最大值: 186 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 160 N/mm <sup>2</sup>	
	加强区	d=110 最大值: 392 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 257 N/mm <sup>2</sup>	最大值: 410 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 260 N/mm <sup>2</sup>	
炉缸一带	㉂	d=90 最大值: 221 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 208 N/mm <sup>2</sup>	最大值: 211 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 202 N/mm <sup>2</sup>	
炉底二带	㉁	d=90 最大值: 226 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 198 N/mm <sup>2</sup>	最大值: 217 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 193 N/mm <sup>2</sup>	
炉底一带	㉀	d=75 最大值: 137 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 112 N/mm <sup>2</sup>	最大值: 125 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 112 N/mm <sup>2</sup>	
耐热基墩带	㉀	d=75 最大值: 258 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 102 N/mm <sup>2</sup>	最大值: 215 N/mm <sup>2</sup> 平均值: 97 N/mm <sup>2</sup>	
	㉀	d=75		

高炉炉壳应力结果表

图 4.1 高炉炉壳两不同软件计算结果汇总

表 4.1 两软件计算结果差异统计

部 位		应力类型	MIDAS (N/mm <sup>2</sup> )	ANSYS (N/mm <sup>2</sup> )	绝对 差值	差值百 分 比
炉 头	上部	整体应力	124	130	6	4.6%
		导出管根部	210	210	0	0.0%
		溜槽口上角部	210	237	27	11.4%
		溜槽口下角部	152	158	6	3.8%
	弧形 段	最大值	77	82	5	6.1%
		平均值	48	45	3	6.3%
炉喉		最大值	110	94	16	14.5%
		平均值	72	60	12	16.7%
炉身 上部		最大值	119	106	13	10.9%
		平均值	111	103	8	7.2%
炉身 中部		最大值	122	101	21	17.2%
		平均值	113	96	17	15.0%
炉身 下部		最大值	125	112	13	10.4%
		平均值	122	110	12	9.8%
炉腰		最大值	142	126	16	11.3%
		平均值	135	122	13	9.6%
炉腹		最大值	165	162	3	1.8%
		平均值	141	146	5	3.4%
风口上 板 带		最大值	163	160	3	1.8%
		平均值	119	120	1	0.8%
风口带		最大值	171	150	21	12.3%
		平均值	118	119	1	0.8%
炉缸 二段		最大值	187	168	19	10.2%
		平均值	133	133	0	0.0%
铁 口 段	非加 强区	最大值	179	186	7	3.8%
		平均值	156	160	4	2.5%
	加强 区	最大值	392	410	18	4.4%
		平均值	257	260	3	1.2%
炉缸 一段		最大值	221	211	10	4.5%
		平均值	208	202	6	2.9%
炉底 二段		最大值	226	217	9	4.0%
		平均值	198	193	5	2.5%
炉底 一段		最大值	137	125	12	8.8%
		平均值	112	112	0	0.0%
耐热基 墩 段		最大值	258	215	43	16.7%
		平均值	102	97	5	4.9%

表 4.1 所示为两软件计算结果的对比分析,可见两软件计算结果存在数值上的差异,最大值的差异较平均值大,这与两不同软件单元划分的尺寸控制有直接关系。两不同软件对单元尺寸要求的控制方法不同,单元划分的尺寸及形状难免产生差异。

划分单元时尽可能避免出现形状不好的单元,为最大限度的提高开孔附近区

域的计算精度，需将开孔附近的单元尺寸尽可能减小，考虑到计算的耗时性，在开孔较少板带须将单元尺寸调大，由此导致中间存在过渡单元的区域，这些区域及开孔附近的单元难免出现少量形状不规则的问题，导致计算结果存在一定的差异。

经统计，两个不同软件各板带计算结果的差异值均值为 6.7%，表明拟合结果的精度较高。可据此对炉壳各板带的应力水平及分布状态进行分析，同时可基于该结果对炉壳在各工况及效应组合后的变形特性进行定量分析。

#### 4.2.2 炉头封板应力分布状态及分析

炉头部位所受荷载较小，以煤气压力为主、同时承受炉头保护衬自重、导出管反力及阀箱荷载。因开孔较大且较多，炉顶封板的有效面积较小，且孔洞之间间距较小，导致局部应力水平较高。

根据工艺专业资料，换溜槽孔尺寸为  $3355\text{mm} \times 2205\text{mm}$ ，上边缘与炉顶钢圈相连处倒角尺寸为半径  $300\text{mm}$ ，具此计算得出炉顶封板的最大等效应力为  $375\text{N/mm}^2$ ，位于换溜槽孔上边缘两个角部，分析认为是由该处倒角过小所致。经与炼铁专业协商确定在满足工艺要求的前提下将换溜槽孔的倒角半径加大至  $600\text{mm}$ ，后经校核该处等效应力最大值降低至  $210\text{N/mm}^2$ 。炉顶封板与导出管根部相接处等效应力最大值为  $210\text{N/mm}^2$ ，导出管与换溜槽孔之间连接区域的应力水平也较高，如图 4.2 所示。

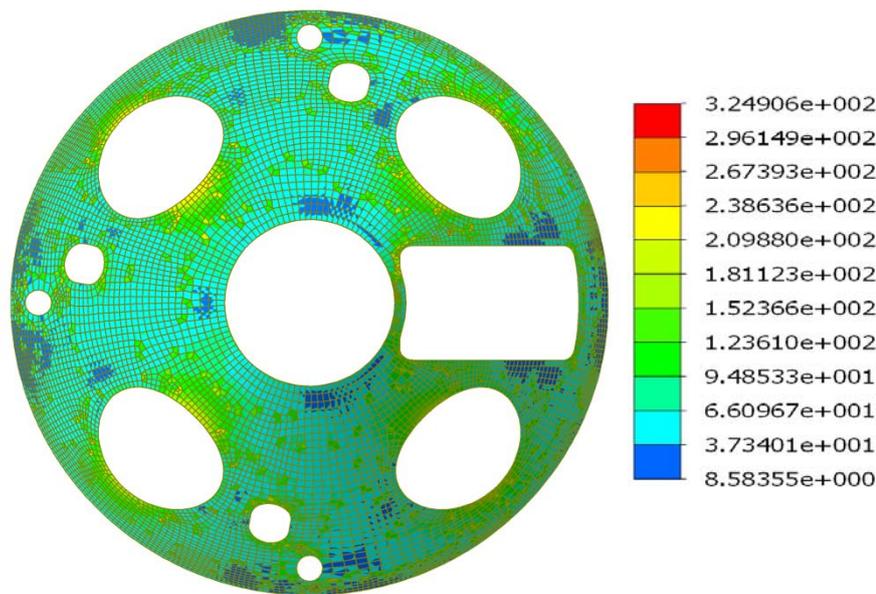
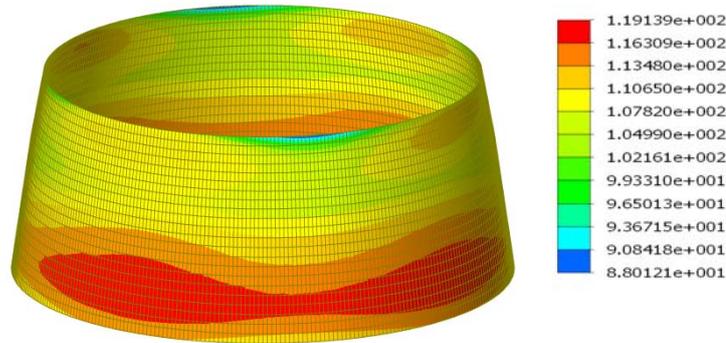


图 4.2 炉头封板应力云图 ( $\text{N/mm}^2$ )

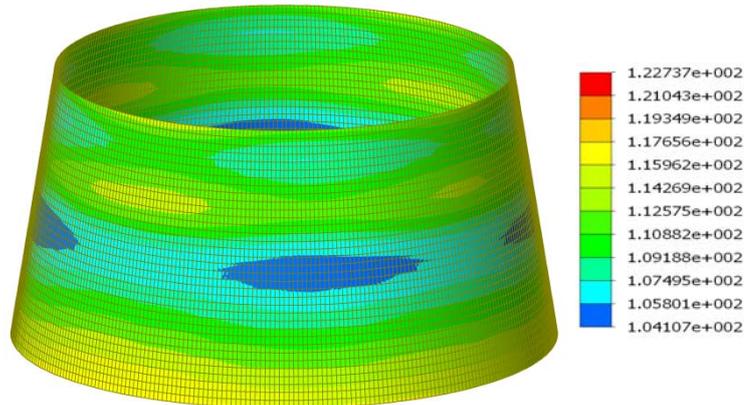
### 4.2.3 炉喉、炉身、炉腰、炉腹应力分布状态及分析

炉喉、炉身、炉腰及炉腹等部位炉壳没有设备大孔，故这些部位的应力分布状态比较均匀，如图 4.3 所示。炉身应力水平较低（约  $100\text{N/mm}^2$ ），图示红色为该部分的应力较大的区域，炉身应力最大值位于炉身下部与炉腰相连处（最大为  $125\text{N/mm}^2$ ）。炉身部位所受荷载以煤气压力为主，由上而下煤气压力逐渐增大，且与炉腰相接处炉壳截面存在拐点，导致该处存在因边缘效应引起的相对较大的弯曲应力，该弯曲应力主要存在于拐点边缘附近。

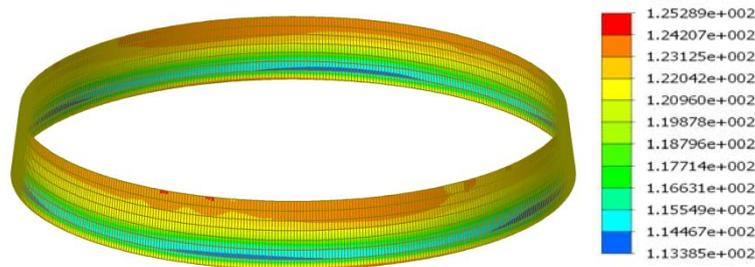
炉腰及炉腹区域，同样存在边缘效应引起的应力，以煤气压力最大的炉腹底部边缘最大。由图 4.3 可见，在炉腹下部存在的四片红色（应力较大）区域呈轴对称分布，分析认为是水平地震作用所致。沿两个正交方向，水平地震作用对该四处区域本来较大的弯曲应力又有增大作用。



a) 炉身上部应力云图



b) 炉身中部应力云图



c) 炉身下部应力云图

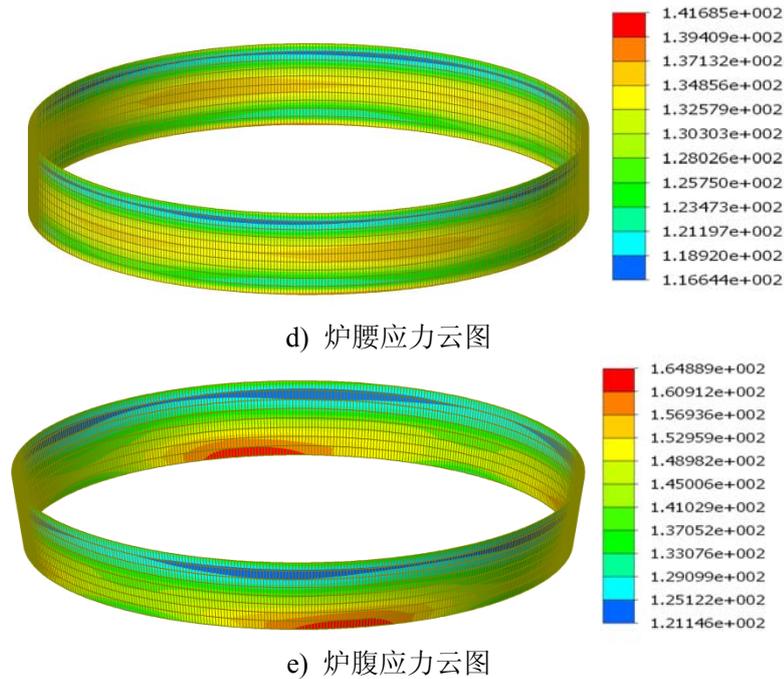


图 4.3 炉身、炉腰、炉腹应力云图 (N/mm<sup>2</sup>)

#### 4.2.4 风口带应力分布状态及分析

风口区域炉径为 8800mm，开有 42 个孔径为 1160mm 的风口孔，导致两风口之间最小有效截面宽度仅为 155mm。风口带应力较大区域位于风口之间的上下区域。最大等效应力为 171N/mm<sup>2</sup>，均位于两风口之间的下部区域（如图 4.4 所示）。分析认为原因如下，因炉壳整体沿环向及高度方向均呈现受拉状态，其中以环向拉应力为主，仅在环向拉力作用下，其应力集中区域应出现在洞口上下边缘，在竖向拉力作用下，应力较大部位出现在风口之间的区域。对于风口带，在竖向拉应力及较大的环向拉应力作用下，应力集中区域由风口上下向风口之间的上下部位转移。因风口底边缘以上均为煤气压力作用区域，底边缘以下为渣铁压力作用区域，渣铁压力值较煤气压力值大，故最大区域出现在洞口之间的下部区域。

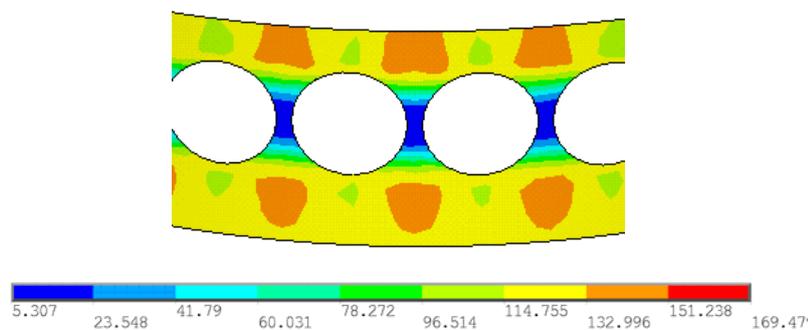


图 4.4 风口带局部应力集中云图 (N/mm<sup>2</sup>)

#### 4.2.5 铁口带应力分布状态及分析

铁口带开有四个扁高型铁口孔，对以环向拉应力为主的铁口带而言，这种开孔形式是不利的，易引起较大的应力集中，国内外较多扁高型高炉的铁口角部破损均为实例。

经炉壳整体有限元分析后，在铁口横断面上下较大区域内应力均过大（已超过炉壳板材的屈服强度），分析认为，由于铁口高度较大，导致有效纵断面削弱过大，在较大的环向拉应力作用下，导致铁口开孔上下出现相互连通的屈服区域，这种状态对炉壳将产生破坏性影响。另外，铁口四个角部因倒角过小导致应力集中问题尤其严重（如图 4.5 所示）。除此之外，在该板带远离铁口的其它区域应力水平相对较低，分布状态如图 4.6 所示。故采取在铁口开孔区域一定宽度范围内将炉壳厚度加大的措施，为满足工艺开孔要求，铁口倒角无法加大。经计算，将 4 个铁口处局部加强后可将屈服区域限于铁口的四个角部，未出现屈服区域相互连通的问题。铁口开孔的角部应力最大值有所降低，最大应力为  $392\text{N/mm}^2$ ，小于炉壳板材屈服承载力的两倍。根据研讨会专家意见，该局部应力集中程度不会对炉壳工作产生破坏影响。

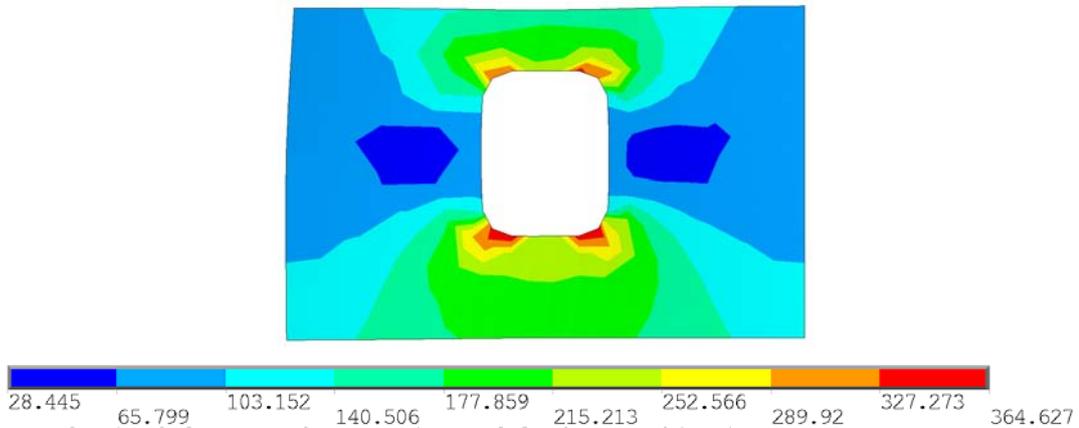


图 4.5 铁口加强区应力集中云图 ( $\text{N/mm}^2$ )

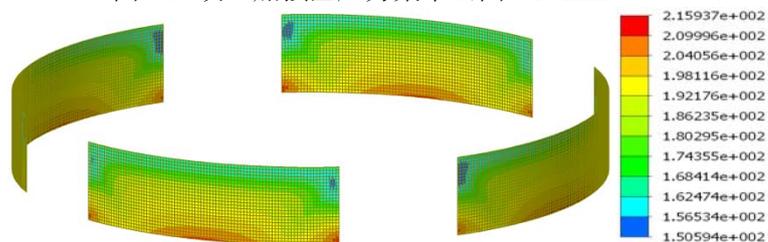


图 4.6 铁口带非加强区应力云图 ( $\text{N/mm}^2$ )

#### 4.2.6 炉壳底部应力分布状态及分析

高炉正常生产时，环境温度升高，计算时考虑其不利影响。分析认为高炉正

常生产时竖向负荷较大，炉底封板与耐热基墩之间难以产生相对滑动的位移，炉壳底部与炉底封板相连，因约束的存在导致其底部不能自由膨胀，炉壳整体温度升高后在炉壳底部连接部位产生相对较大的约束弯曲应力（如图 4.7 所示）。该工况对炉壳底部的受力是及其不利的。我国以往曾出现高炉烘炉时炉底封板处胀裂的现象，但有关资料中并未提及该荷载对炉壳的不利影响，宜引起足够重视。

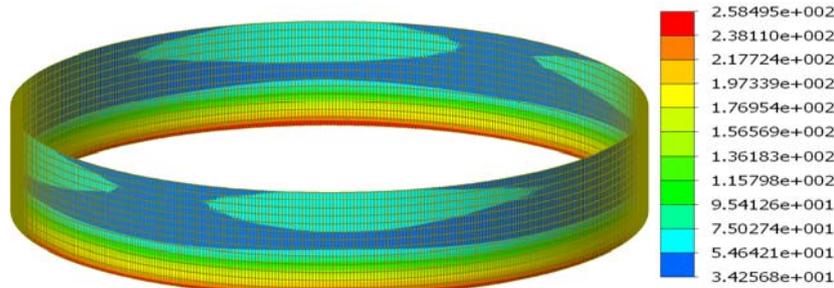


图 4.7 炉壳底部应力云图 (N/mm<sup>2</sup>)

### 4.3 炉壳各部位环向应力与竖向应力的分布状态及分析

针对高炉炉壳的结构设计，除了应满足其承载力的强度要求外，另一个侧重点是对不同部位高炉炉壳上的开孔形式的合理性进行评价。

高炉炉壳除开有导出管孔、风口孔、铁口孔、换溜槽孔等大孔外，还开有万余个小孔，以冷却壁固定用螺栓孔和冷却水管孔为主。这些小孔对炉壳受力性能的影响主要体现在两个方面，一方面是众多小孔将削弱炉壳有效受力面的大小，另一方面是开孔形式对炉壳局部应力集中的程度会产生影响。就开孔对炉壳应力集中所产生的影响须综合考虑以下两个方面的因素：一方面是须综合考虑开孔的大小及间距，因为开孔的大小及间距决定该区域炉壳截面有效受力面的面积，而间距是否满足要求，尚须结合分析结果看开孔周围的塑性区域是否连通。另外一个方面是沿着炉壳竖向及环向的应力大小及比值，两个方向的应力大小及应力比值对应力集中数值的大小及进入屈服区域的炉壳面积具有决定作用。

为此，须分别确定以上两方面因素以对开孔形式的合理性进行评价。

#### 4.3.1 炉壳各部位竖向应力与环向应力

以下结合计算结果分别介绍高炉炉壳各个区域的竖向及环向应力的大小及分布。

炉顶弧形段的环向应力最大值为 50.5N/mm<sup>2</sup>，位于炉顶阀箱支座处，除此之外环向应力较均匀，均值约为 24N/mm<sup>2</sup>，如图 4.8 所示。竖向应力差别较小 31~7N/mm<sup>2</sup>，最大值位于四个阀箱支座之间的上侧，如图 4.9 所示。因为该区域的

荷载分布相对均匀，对于局部出现的相对的应力集中分析认为主要是阀箱支座产生的集中荷载所致。

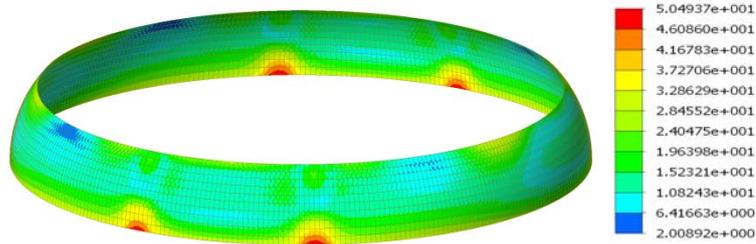


图 4.8 炉顶弧形段环向应力云图 (N/mm<sup>2</sup>)

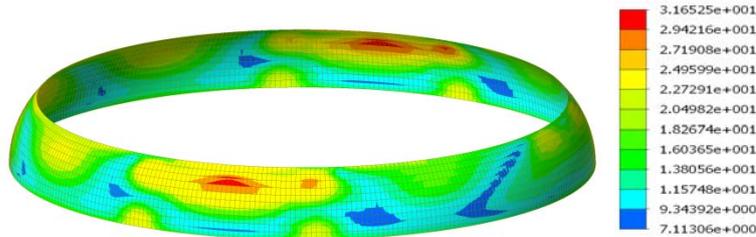


图 4.9 炉顶弧形段竖向应力云图 (N/mm<sup>2</sup>)

炉顶封板环向应力在椭圆人孔的上下边缘处较大，约 153N/mm<sup>2</sup>。导出管之间环向应力约 77N/mm<sup>2</sup>，导出管与换溜槽孔之间环向应力较小约 30N/mm<sup>2</sup>，与炉顶钢圈连接处环向应力约 19N/mm<sup>2</sup>，溜槽孔上角部环向应力约 134N/mm<sup>2</sup>，溜槽孔下角部环向应力约 153N/mm<sup>2</sup>。炉顶封板竖向应力在椭圆人孔的左右两侧边缘处略大，约 77N/mm<sup>2</sup>，导出管之间竖向应力约 50N/mm<sup>2</sup>，导出管与换溜槽孔之间竖向应力较小约 57N/mm<sup>2</sup>，与炉顶钢圈连接处竖向应力约 15N/mm<sup>2</sup>。溜槽孔上角部竖向应力约 77N/mm<sup>2</sup>，溜槽孔下角部环向应力约 75N/mm<sup>2</sup>。

炉喉环向应力约 52N/mm<sup>2</sup>，上端与炉顶弧形段连接处环向应力最小，约为 30N/mm<sup>2</sup>，下端与炉身连接处的环向应力最大约为 84N/mm<sup>2</sup>，在炉顶阀箱支座处环向应力局部出现集中大小约 68N/mm<sup>2</sup>。竖向应力在靠近弧形段处约为 38N/mm<sup>2</sup>，中部应力较小约 20N/mm<sup>2</sup>，下部与炉身连接处较大约为 50N/mm<sup>2</sup>。

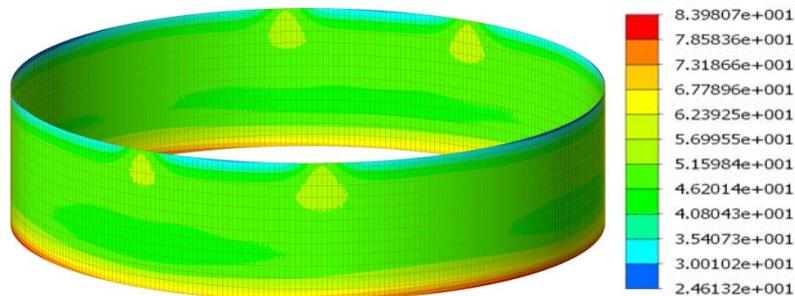


图 4.10 炉喉环向应力云图 (N/mm<sup>2</sup>)

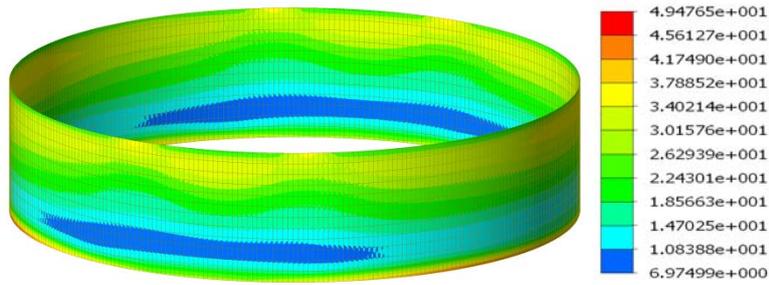


图 4.11 炉喉竖向应力云图 (N/mm<sup>2</sup>)

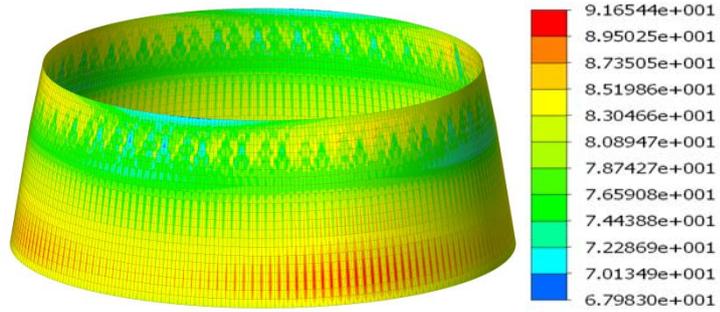


图 4.12 炉身上部环向应力云图 (N/mm<sup>2</sup>)

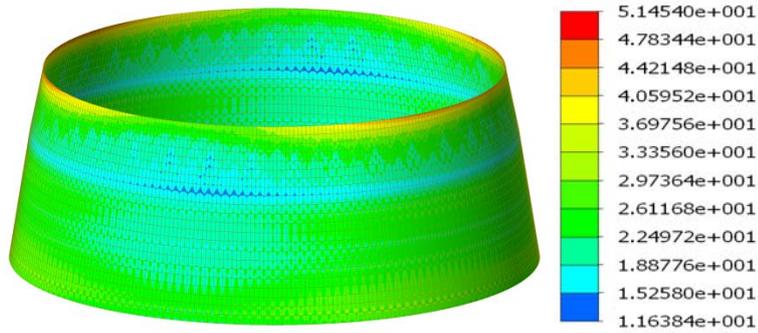


图 4.13 炉身上部竖向应力云图 (N/mm<sup>2</sup>)

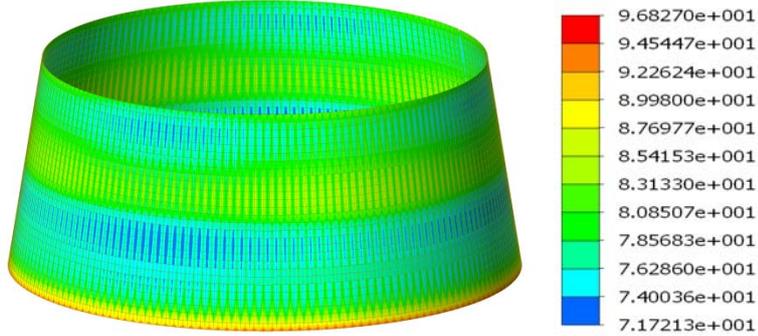


图 4.14 炉身中部环向应力云图 (N/mm<sup>2</sup>)

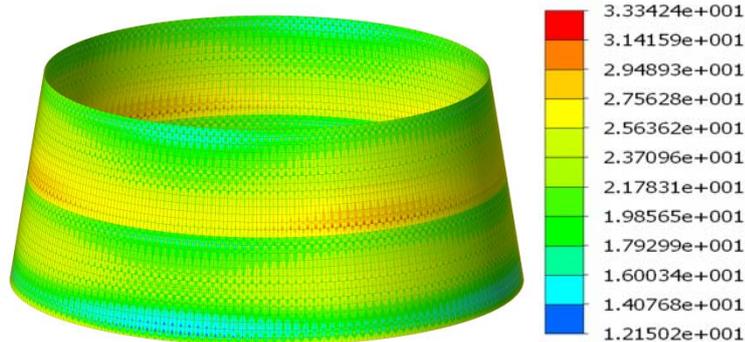


图 4.15 炉身中部竖向应力云图 (N/mm<sup>2</sup>)

炉身上部自上而下环向应力之间变大由  $68\text{N/mm}^2$  逐渐过渡至  $92\text{N/mm}^2$ 。竖向应力在与炉喉连接处较大约为  $52\text{N/mm}^2$ ，其余部位的环向应力较均匀，约为  $30\text{N/mm}^2$ 。

炉身中上部（厚度为  $70\text{mm}$ ）的部分，环向应力自上而下逐渐变大由  $78\text{N/mm}^2$  逐渐过渡至  $90\text{N/mm}^2$ 。竖向应力自上而下逐渐变大，由  $18\text{N/mm}^2$  逐渐过渡至  $28\text{N/mm}^2$ 。炉身中下部（厚度为  $80\text{mm}$ ）的部分，环向应力自上而下逐渐变大由  $76\text{N/mm}^2$  逐渐过渡至  $97\text{N/mm}^2$ ，竖向应力较均匀，约为  $16\text{N/mm}^2 \sim 25\text{N/mm}^2$ 。

炉身下部环向应力自上而下逐渐变大由  $92\text{N/mm}^2$  逐渐过渡至  $124\text{N/mm}^2$ 。竖向应力较均匀，约为  $30\text{N/mm}^2 \sim 40\text{N/mm}^2$ ，炉身下部与炉腰连接处为  $51\text{N/mm}^2$ 。

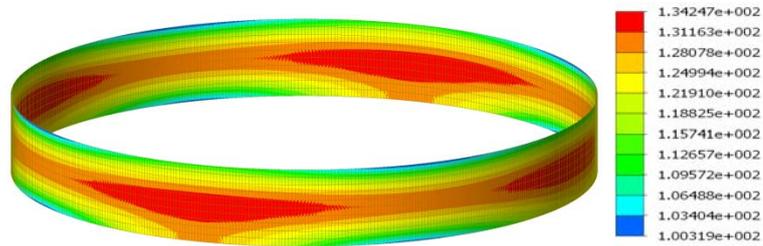


图 4.16 炉腰环向应力云图 ( $\text{N/mm}^2$ )

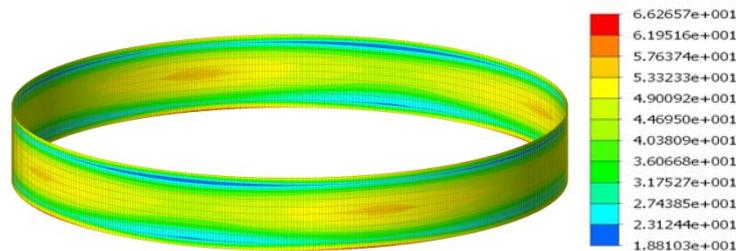


图 4.17 炉腰竖向应力云图 ( $\text{N/mm}^2$ )

炉腰部位的环向应力上下两端分别与炉身及炉腹连接处的应力相对较小约为  $100\text{N/mm}^2 \sim 116\text{N/mm}^2$ ，中部的环向应力较大约为  $131\text{N/mm}^2 \sim 134\text{N/mm}^2$ 。竖向应力在上下两端分别与炉身及炉腹连接处的应力相对较大，约为  $62\text{N/mm}^2 \sim 66\text{N/mm}^2$ ，中部的竖向应力较均匀约为  $53\text{N/mm}^2$ 。

炉腹部位的环向应力自上而下逐渐增大，由  $106\text{N/mm}^2$  逐渐过渡至  $154\text{N/mm}^2$ 。竖向应力在上下两端分别与炉腰及炉缸连接处的应力相对较大，分别为  $66\text{N/mm}^2$  和  $82\text{N/mm}^2$ ，中部的竖向应力较均匀约为  $50\text{N/mm}^2$ 。

风口上板带环向应力与炉腹连接部位最大，约为  $145\text{N/mm}^2$ 。自上而下逐渐变小，底端的环向应力约为  $81\text{N/mm}^2$ 。竖向应力在上端与炉腹连接处的应力最大，最大值为  $59\text{N/mm}^2$ 。除此之外，在对应风口开孔的以上部位的竖向应力相对较小约为  $21\text{N/mm}^2$ ，风口之间的部分对应的上部的竖向应力相对较大约为  $34\text{N/mm}^2$ ，这两部分的差别在距该板带底部约  $250\text{mm}$  处基本区域均匀，约为  $34\text{N/mm}^2$ 。

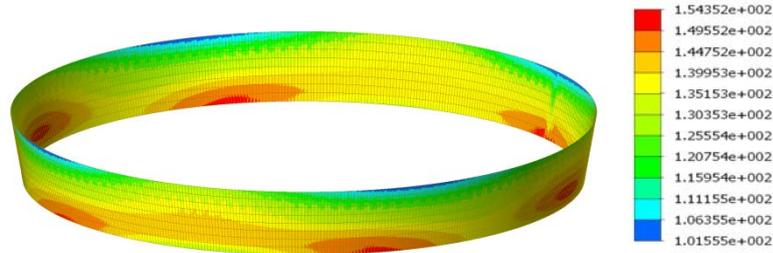


图 4.18 炉腹环向应力云图 (N/mm<sup>2</sup>)

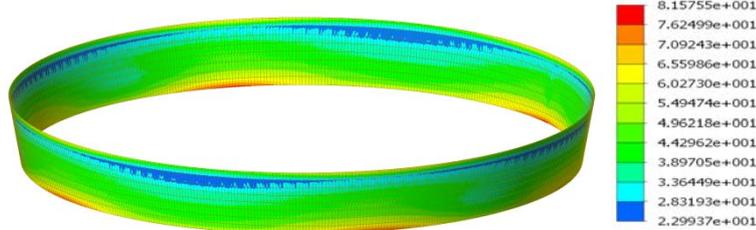


图 4.19 炉腹竖向应力云图 (N/mm<sup>2</sup>)

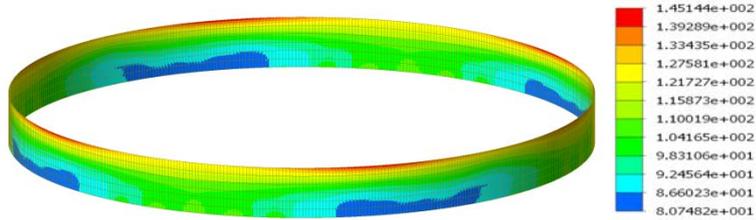


图 4.20 风口上板带环向应力云图 (N/mm<sup>2</sup>)

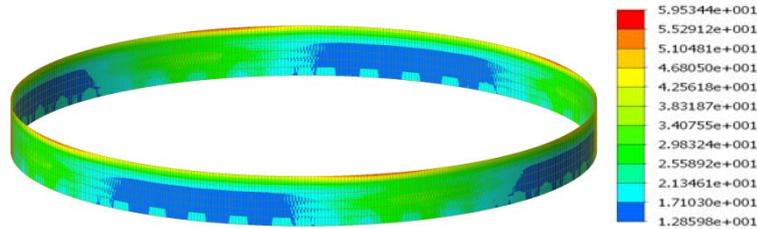


图 4.21 风口上板带竖向应力云图 (N/mm<sup>2</sup>)

风口带对应开孔上部及风口之间上部的环向应力约为 106N/mm<sup>2</sup>，风口之间的环向应力大小约为 40~60N/mm<sup>2</sup>，风口以下环向应力约为 131N/mm<sup>2</sup>。风口带对应开孔上部的竖向应力约为 68N/mm<sup>2</sup>，风口之间的上部竖向应力大小约为 20 N/mm<sup>2</sup>。风口上部的竖向应力约为 117N/mm<sup>2</sup>，风口以下竖向应力约为 32N/mm<sup>2</sup>。

炉缸二段下部对应铁口上部的位置环向应力最大达到 215N/mm<sup>2</sup>~195N/mm<sup>2</sup>，影响区域宽度约为 1000mm，影响高度约为 300mm。其余部位的环向应力约为 155N/mm<sup>2</sup>，竖向应力约为 14~32N/mm<sup>2</sup>，在上部与风口段连接处竖向应力大小约为 68N/mm<sup>2</sup>，下部与铁口带连接处的竖向应力约为 50N/mm<sup>2</sup>。

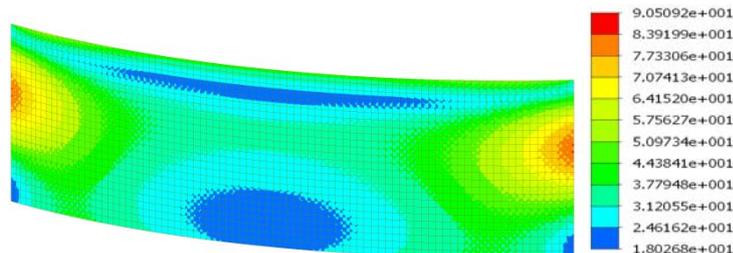
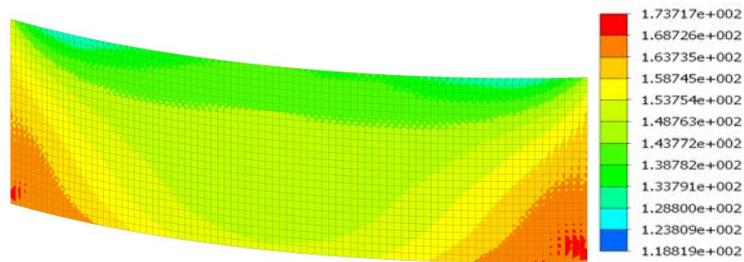


图 4.22 铁口带非加强区竖向应力云图 ( $\text{N/mm}^2$ )图 4.23 铁口带非加强区环向应力云图 ( $\text{N/mm}^2$ )

铁口带在铁口加强区区域，在铁口上下边缘的环向应力约为  $236\sim 312\text{N/mm}^2$ ，在铁口的四个倒角部位的环向应力最大可达到  $312\text{N/mm}^2$ 。在铁口开孔两侧的上下环向应力约为  $162\sim 199\text{N/mm}^2$ ，由铁口两侧边缘的  $51\text{N/mm}^2$  往外逐渐增大，在铁口开孔两侧的中部的环向应力约为  $114\sim 141\text{N/mm}^2$ 。在铁口上下边缘的竖向应力约为  $59\text{N/mm}^2$ ，在铁口的四个倒角部位的竖向应力最大可达到  $142\text{N/mm}^2$ 。在铁口开孔两侧的上下竖向应力约为  $32\sim 60\text{N/mm}^2$ ，由铁口两侧竖向应力较均匀，约为  $88\text{N/mm}^2$ 。铁口加强区域的四个角部的竖向应力较小约为  $30\text{N/mm}^2$ 。

在铁口带的非铁口加强区区域，环向应力以靠近铁口加强区区域的下角部区域的环向应力最大，最大可达到  $173\text{N/mm}^2$ ，且均以两个角部为中心向外逐渐过渡变小，至非加强区中部的环向应力约为  $150\text{N/mm}^2$ ，非加强区上段与炉缸二段连接处的竖向应力约为  $140\text{N/mm}^2$ 。铁口非加强区的竖向应力以靠近加强区且标高与铁口开孔一致区域的竖向应力最大，最大可达到  $90\text{N/mm}^2$ ，且非加强区域两侧均以该两个区域为中心向外逐渐变小，影响区域可达到非加强区边缘约  $2300\text{mm}$  左右，环向应力在  $2300$  区域以外较小，在  $2300$  区域以外的上下两侧竖向应力约为  $25\sim 31\text{N/mm}^2$ ，中部的竖向应力为  $38\text{N/mm}^2$ 。

炉缸一段上端的环向应力在对应上带四个铁口开孔的位置最大，最大值为  $184\text{N/mm}^2$ ，该区域对应本板带的其它区域环向应力较均匀约为  $168\text{N/mm}^2$ 。竖向应力在对应上带四个铁口开孔的位置较大，约  $76\text{N/mm}^2$ 。在距离该区域约  $3350\text{mm}$  左右两侧各有宽度约  $2400\text{mm}$  区域竖向应力约  $45\text{N/mm}^2$ ，除此之外，该板带的竖向应力均小于  $30\text{N/mm}^2$ 。

炉底二段上端在对应铁口开孔处的环向应力约为  $160\text{N/mm}^2$ ，下端的环向应力较大，约为  $182\text{N/mm}^2$ 。竖向应力相对较均匀，约为  $20\sim 70\text{N/mm}^2$ ，均值约  $55\text{N/mm}^2$ 。

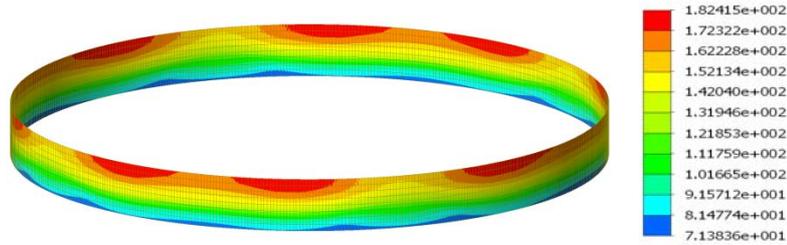


图 4.24 炉底二段环向应力云图 (N/mm<sup>2</sup>)

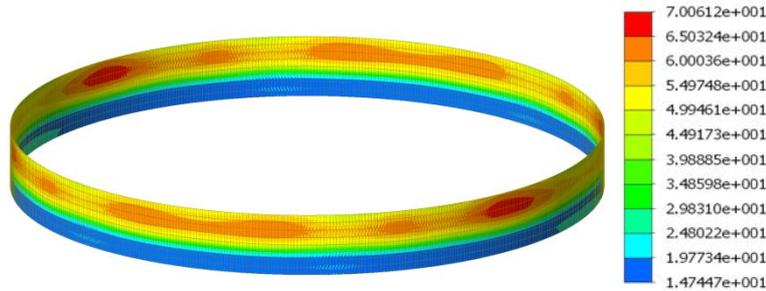


图 4.25 炉底二段竖向应力云图 (N/mm<sup>2</sup>)

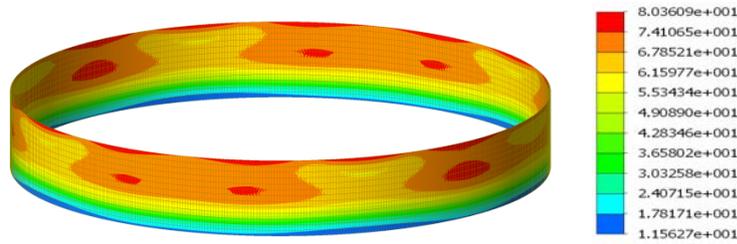


图 4.26 炉底一段环向应力云图 (N/mm<sup>2</sup>)

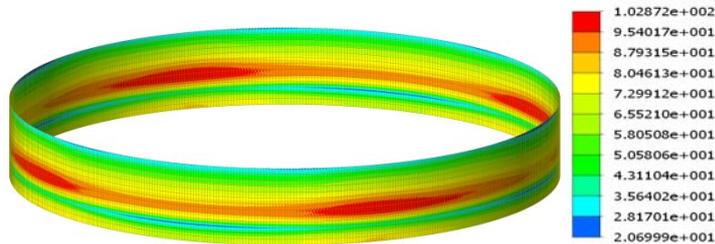


图 4.27 炉底一段竖向应力云图 (N/mm<sup>2</sup>)

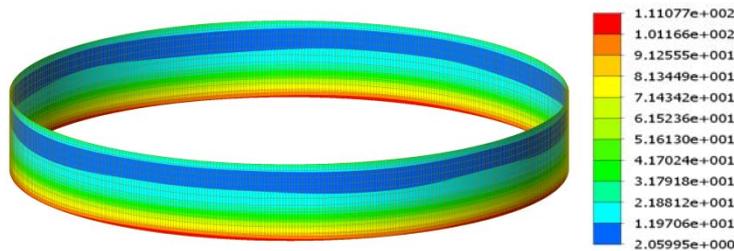


图 4.28 耐热基墩段环向应力云图 (N/mm<sup>2</sup>)

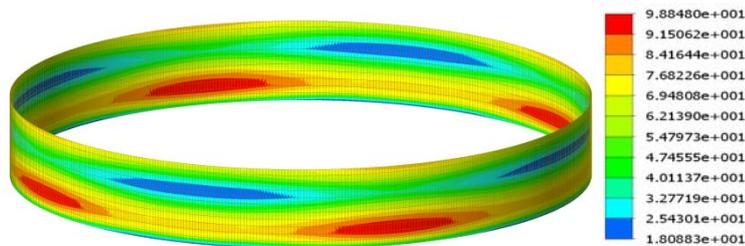


图 4.29 耐热基墩段竖向应力云图 (N/mm<sup>2</sup>)

炉底一段沿高度方向由上而下的环向应力逐渐减小, 应力 80~12N/mm<sup>2</sup>。竖向

应力中部较大，由中部向两端逐渐减小，应力 52~18N/mm<sup>2</sup>。

耐热基墩上段环向应力中部较小，约 28N/mm<sup>2</sup>，由中部向上下两端逐渐变大，至底端的环向应力约 111N/mm<sup>2</sup>。竖向应力中下部较大约 76N/mm<sup>2</sup>，中上部相对较小 13N/mm<sup>2</sup>。

#### 4.3.2 炉壳各部位竖向应力与环向应力计算结果统计及分析

以下结合炉壳各部位计算结果，将炉壳各板带分为板带上端、板带中部、板带下端三个不同部位，给出三个不同部位的竖向应力及环向应力的统计表格，同时给出各个区域竖向应力与环向应力的比值，如下表 4.2 所示。

表 4.2 环向应力与竖向应力

部 位		应力类型	环向应力 (N/mm <sup>2</sup> )	竖向应力 (N/mm <sup>2</sup> )	竖向应力与环向 应力比值
炉头	上部	整体应力	124	130	1.048
		导出管根部	210	210	1.000
		溜槽口上角部	210	237	1.129
		溜槽口下角部	152	158	1.039
炉头 弧形段	上端	最大值及最小值	33~2	31~18	—
		平均值	24	25	1.042
	中部	最大值及最小值	24~11	24~7	—
		平均值	15	12	0.800
	下端	最大值及最小值	51~19	25~7	—
		平均值	28	18	0.643
炉喉	上端	最大值及最小值	62~24	38~18	—
		平均值	52	34	0.654
	中部	最大值及最小值	52~41	26~15	—
		平均值	46	22	0.478
	下端	最大值及最小值	84~46	49~7	—
		平均值	57	15	0.263
炉身 上部	上端	最大值及最小值	85~68	52~19	—
		平均值	79	30	0.380
	中部	最大值及最小值	85~74	30~19	—
		平均值	79	26	0.329
	下端	最大值及最小值	92~83	30~19	—
		平均值	85	26	0.306
炉身 中上部	上端	最大值及最小值	83~71	26~12	—
		平均值	76	22	0.289
	中部	最大值及最小值	83~76	24~18	—
		平均值	81	22	0.272
	下端	最大值及最小值	90~78	33~22	—
		平均值	83	26	0.313
炉身 中下部	上端	最大值及最小值	76~72	24~18	—
		平均值	74	20	0.270
	中部	最大值及最小值	79~72	28~18	—
		平均值	76	24	0.316
	下端	最大值及最小值	97~76	26~12	—
		平均值	85	26	0.306

		平均值	83	20	0.241
炉身下部	上端	最大值及最小值	115~89	40~19	—
		平均值	115	34	0.296
	中部	最大值及最小值	121~114	25~34	—
		平均值	118	30	0.254
	下端	最大值及最小值	124~105	51~19	—
		平均值	118	40	0.339
炉腰	上端	最大值及最小值	125~100	45~19	-
		平均值	120	40	0.333
	中部	最大值及最小值	134~122	58~41	-
		平均值	132	49	0.371
	下端	最大值及最小值	134~100	66~19	-
		平均值	128	40	0.313
炉腹	上端	最大值及最小值	140~102	50~34	—
		平均值	126	34	0.270
	中部	最大值及最小值	145~126	50~29	—
		平均值	135	44	0.326
	下端	最大值及最小值	154~135	82~44	—
		平均值	142	52	0.366
风口上板带	上端	最大值及最小值	145~105	60~26	—
		平均值	128	38	0.297
	中部	最大值及最小值	110~92	34~13	—
		平均值	105	21	0.200
	下端	最大值及最小值	105~81	30~13	—
		平均值	93	21	0.226
风口带		风口之间	60	20	0.333
		风口以上	106	33	0.311
		风口以下	131	32	0.244
炉缸二段	上端	最大值及最小值	134~114	68~14	—
		平均值	124	50	0.403
	中部	最大值及最小值	154~114	50~32	—
		平均值	134	41	0.306
	下端	最大值及最小值	215~134	14~50	—
		平均值	154	50	0.325
铁口段非加强区	上端	最大值及最小值	144~128	44~18	—
		平均值	139	31	0.223
	中部	最大值及最小值	164~144	91~31	—
		平均值	154	51	0.331
	下端	最大值及最小值	174~154	51~18	—
		平均值	163	38	0.233
铁口段加强区	上端	最大值及最小值	200~51	59~5	—
		平均值	162	59	0.364
	中部	最大值及最小值	142~44	88~51	—
		平均值	114	70	0.614
	下端	最大值及最小值	312~125	142~44	—
		平均值	237	87	0.367
炉缸一段	上端	最大值及最小值	184~168	76~30	—
		平均值	168	45	0.281
	中部	最大值及最小值	184~168	76~30	—

	下端	平均值	168	45	0.281
		最大值及最小值	184~168	76~30	—
炉底二段	上端	平均值	168	45	0.281
		最大值及最小值	182~162	70~55	—
	中部	平均值	172	65	0.378
		最大值及最小值	152~121	65~50	—
	下端	平均值	142	55	0.387
		最大值及最小值	127~71	42~20	—
炉底一段	上端	平均值	97	36	0.371
		最大值及最小值	80~62	52~29	—
	中部	平均值	74	33	0.446
		最大值及最小值	80~55	55~18	—
	下端	平均值	74	37	0.500
		最大值及最小值	62~12	37~18	—
耐热基墩段	上端	平均值	43	33	0.767
		最大值及最小值	47~18	9~18	—
	中部	平均值	37	13	0.351
		最大值及最小值	43~15	94~26	—
	下端	平均值	28	76	2.714
		最大值及最小值	111~41	97~18	—
		平均值	92	76	0.826

由以上表格给出各段竖向应力与环向应力的比值可见，从炉喉底端至炉顶封板的弧形段的顶端，由下而上该比值由 0.3 逐渐增大至 1.0 左右，炉顶封板竖向应力与环向应力的比值基本为 1.0 左右。

高炉炉壳在炉身、炉腰、炉腹、炉缸及炉底的上端等没有开设大孔的区域竖向应力与环向应力的比值大致为 0.3 左右，高炉炉壳以环向受拉为主，竖向为拉应力，但拉应力相对较小。

炉底二段的竖向应力与环向应力的比值相对较大，均约为 0.38，主要是因为该区域的炉壳承受的向外的均布压力荷载达到最大（渣铁压力荷载的最大处），而竖向拉力在该区域并没有产生明显变化所致。

炉底一段的竖向应力与环向应力的比值相对较大，约为 0.45~0.77，主要是因为该区域无内侧的渣铁压力，仅存在内衬膨胀产生的压力荷载，而竖向拉力在该区域并没有产生明显变化。

至耐热基墩段，因无内侧的压力荷载，故该区域上端的环向应力较小，下端相对较大的环向应力主要是在温度升高过程中炉壳底端约束所致。

除此在外，通过计算结果的对比可见，高炉炉壳沿高度方向在截面产生拐点等处，如炉喉下端、炉身的上下端、炉腰，炉腹及风口上部区域等处存在竖向应力相对较大的问题，这些拐点处的竖向应力基本较临近的区域竖向应力大约

20~25N/mm<sup>2</sup>，分析认为主要是在竖向拉力作用下，拐点的存在使得这些区域产生弯曲应力所致。

### 4.3.3 典型板带开孔方式合理性分析

在炉壳各板带开设的冷却壁水冷管孔及固定用螺栓孔等万余个小孔，如图 4.30~图 4.35 所示。根据炼铁工艺专业所提资料，高炉炉壳各段的冷却壁水冷管孔及螺栓孔大小及间距相差较小，水冷管开孔约为  $\Phi 115@200\text{mm}$ ，固定螺栓开孔约为  $\Phi 50@400\text{mm}$ 。

在高炉炉壳结构分析时，完全按照高炉炉壳开孔的形式建立有限元模型是难以实现的。为此，根据以上各板带竖向应力与环向应力分布的情况，建立典型板带开孔的有限元分析模型是有必要的。

为此建立开孔的局部有限元分析模型，如图 4.36~4.37 所示。因建立的是局部有限元分析模型，考虑到边界约束及荷载施加和传递的过程对局部模型分析结果可能产生的影响，建立了高度及宽度均为 3000mm 的平板单元分析模型，将所开的冷却壁水冷管开孔开设在模型的中部，以减小底端约束对模型的影响。

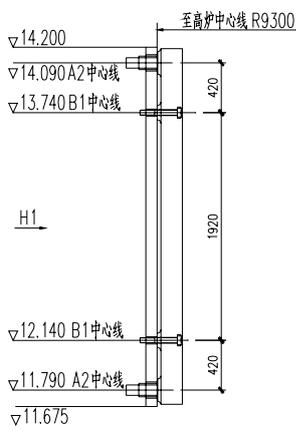


图 4.30 炉壳开孔立面

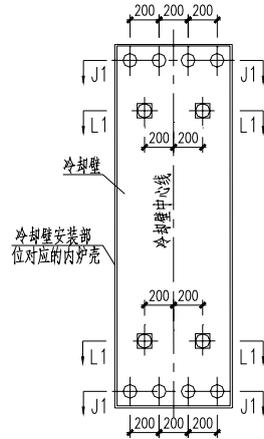


图 4.31 H1 向

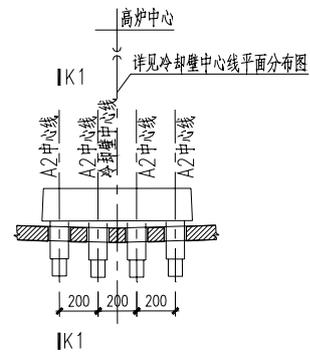


图 4.32 H1 向 J1-J1

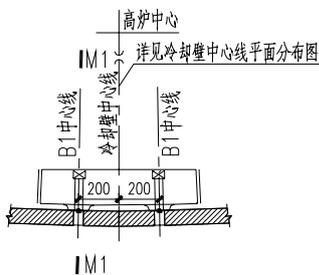


图 4.33 L1-L1

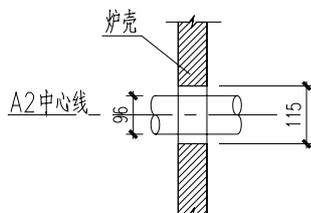


图 4.34 K1-K1

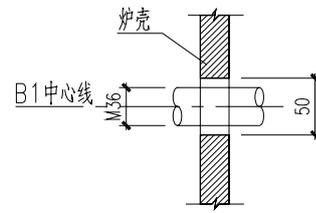


图 4.35 M1-M1

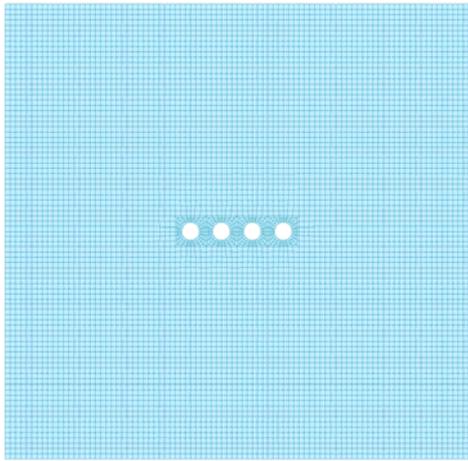


图 4.36 开孔局部分析模型

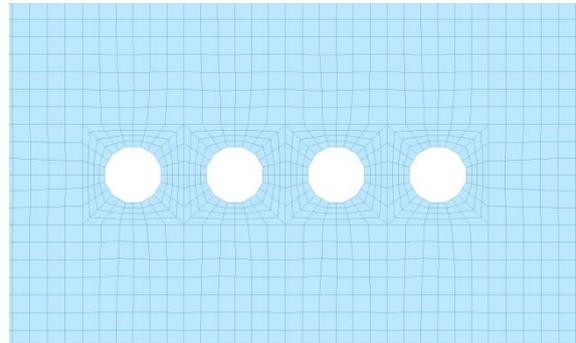


图 4.37 开孔局部分析模型单元划分示意图

在模型上端节点及左右两侧节点施加节点荷载，使得开孔区应力集中影响区以外的较大区域的竖向应力与环向应力比值为 0.3，以此模拟大多数炉壳板带的应力状态。为确保炉壳的安全性，应使局部分析的炉壳应力数值不小于多数板带的应力数值。随着荷载逐渐加大，至开孔影响以外区域的等效应力达到  $163\text{N/mm}^2$  时，其环向应力为  $164\text{N/mm}^2$ ，竖向应力为  $50\text{N/mm}^2$ ，该应力的数值及比值与炉壳大多板带接近，其应力云图如图 4.38~图 4.43 所示。

加载完毕时，孔上下边缘进入屈服，开孔局部分析应力云图如图 4.38~图 4.43 所示。与此对应的开孔区域的等效应力最大值约  $300\text{N/mm}^2$ ，即刚进入弹塑性状态，应力最大区域位于开孔的上下边缘，其应力云图如图 4.43 所示。

屈服区域在所开设的孔上下约  $33\text{mm}$  以内，而高炉炉壳上下两端冷却壁的螺栓孔最小间距约  $250\text{mm}$ ，故上下两段冷却壁开孔的塑性区域之间尚且存在不小于  $184\text{mm}$  的弹性区域。

根据典型板带的分析结果，认为该开孔方式不会对炉壳产生破坏作用，满足结构设计的要求。

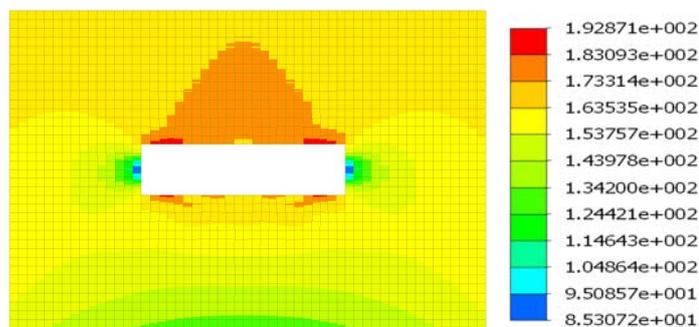


图 4.38 开孔以外区域环向应力云图 ( $\text{N/mm}^2$ )

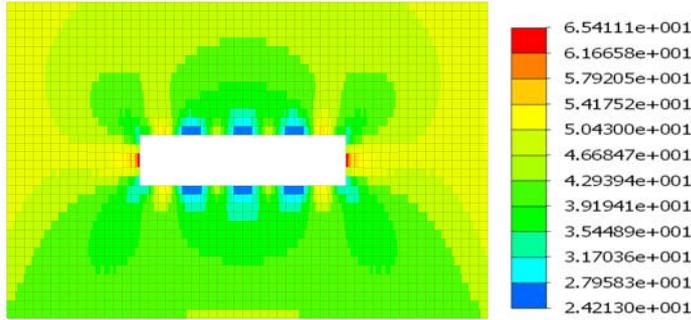


图 4.39 开孔以外区域竖向应力云图 (N/mm<sup>2</sup>)

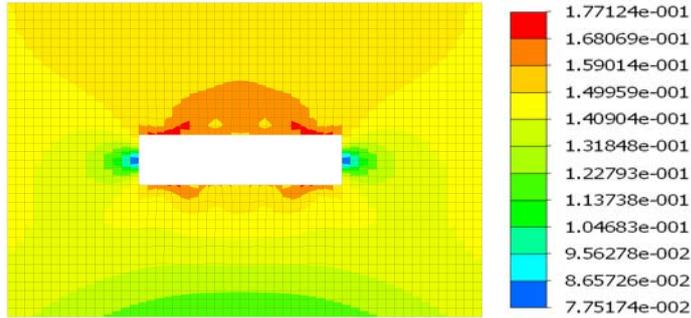


图 4.40 开孔以外区域等效应力云图 (N/mm<sup>2</sup>)

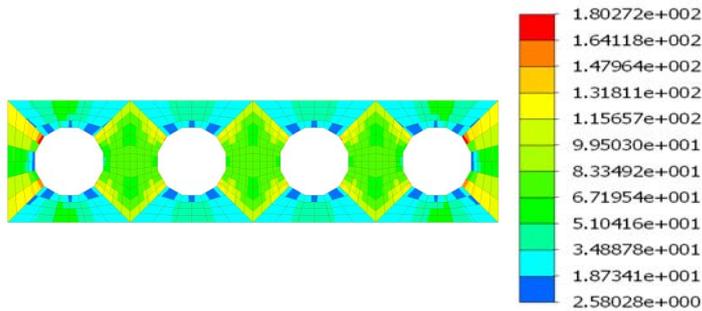


图 4.41 开孔区域竖向应力云图 (N/mm<sup>2</sup>)

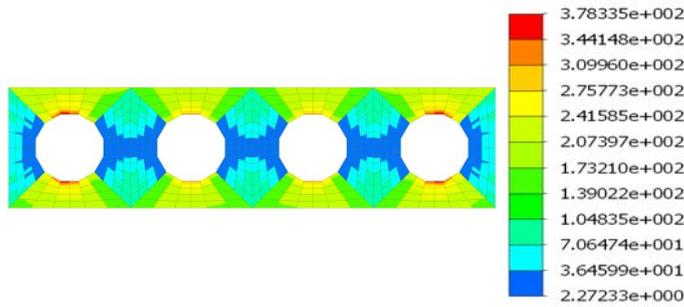


图 4.42 开孔区域环向应力云图 (N/mm<sup>2</sup>)

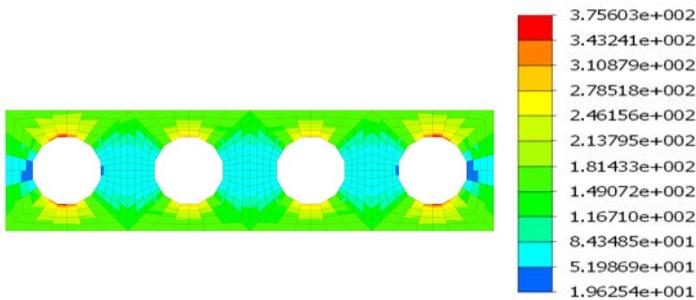


图 4.43 开孔区域等效应力云图 (N/mm<sup>2</sup>)

## 4.4 炉壳变形特性及分析

### 4.4.1 炉壳的竖向变形及分析

根据计算结果，炉壳产生的变形以竖向变形为主。分析认为主要是因炉壳整体温度升高及内部的煤气压力共同作用所致。计算时，考虑炉壳上部为自由端，故整体温度升高时，沿高度方向会产生向上的温度膨胀变形。内部煤气压力作用下，除产生环向拉应力，沿高度方向因炉顶封板的存在，导致其在煤气向上的压力作用下，产生相对较大的竖向推力，使得炉壳各段产生竖向向上的变形。两个不同软件计算结果分别为 38.9mm (MIDAS) 和 35.4mm (ANSYS)。

因设计采用自立式炉壳，故应释放该竖向变形，以避免其与炉体框架之间产生不利的相互影响。在炉顶主平台与炉头锥形段之间应留有足够的空隙，以释放炉壳的该竖向膨胀变形。

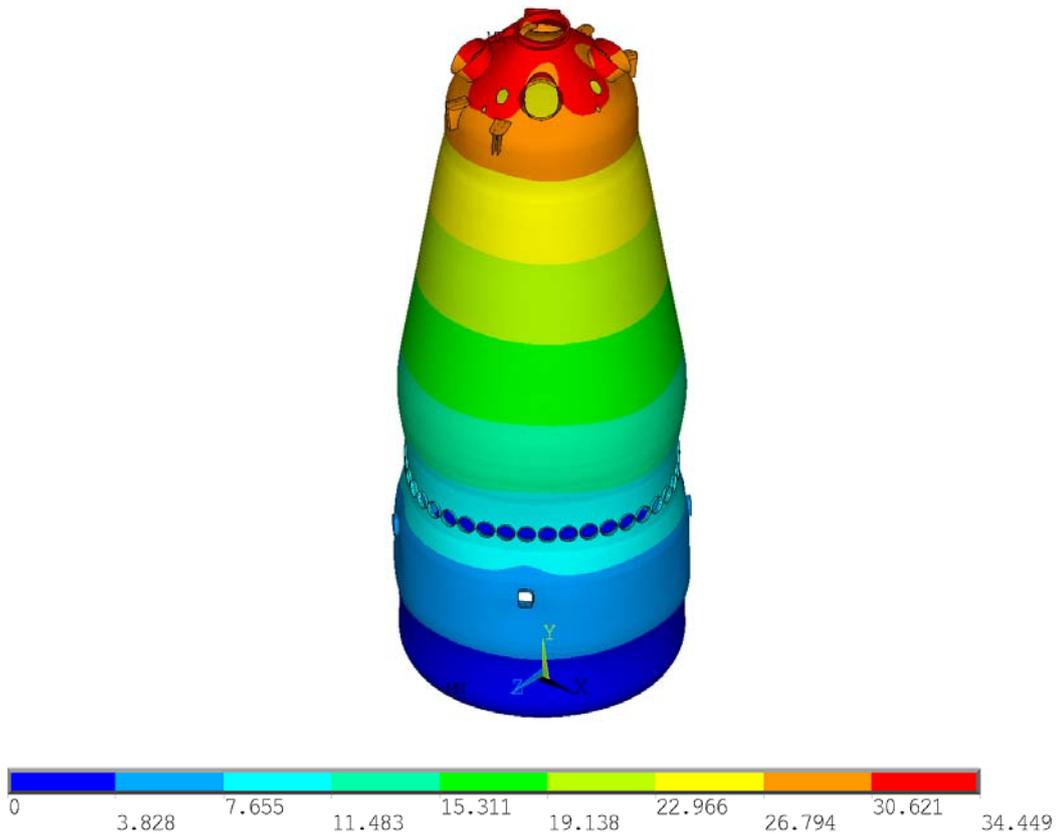


图 4.44 炉壳整体竖向变形图 (mm)

### 4.4.2 炉壳的水平变形及分析

炉壳水平方向的变形除了包括因内部压力作用下产生的环向膨胀变形外，还有因水平地震作用引起的水平变位。

高炉炉壳抗侧刚度大，计算自振周期较小。水平地震作用下，其在两个正交

方向上的整体弯曲变形分别对应于结构的第五及第六振型，周期分别为 0.3986S 和 0.3980S。高炉本体系统的抗侧刚度与炉壳相比较小，根据高炉本体系统整体计算结果，炉体及炉顶整体框架结构的整体变形分别对应于第三及第五振型，其自振周期分别为 1.742S 和 1.360S。故炉壳与高炉本体系统的周期差异相对较大，在水平地震作用下两结构产生相向或相背变形的可能性较大。为避免炉壳与炉体框架之间产生碰撞引起的不利影响，设计时除须考虑炉壳竖向的自由膨胀外，炉壳与炉体框架之间尚须留有足够的水平间隙。

在 X、Y 两个正交方向上，与炉顶主平台同一标高处的炉头封板水平变形计算结果均约为 15mm，炉体框架的炉顶主平台水平位移最大值为 32mm，故水平间隙应不小于两者之和，即不应小于 47mm。

综合考虑炉壳的竖向及水平方向的变形和炉体框架水平方向的变形，炉壳与炉体框架在炉顶主平台之间的间隙不应小于 47mm。

#### 4.4.3 炉壳的环向和局部变形及分析

除竖向变形及水平方向的变形外，炉壳在内部各类压力作用下产生向外的膨胀变形。其中以铁口板带以下至渣铁压力作用底端部位最为严重，主要是因该区域所承受的内部压力较大所致，风口底边缘以下渣铁压力尚须考虑上部煤气压力的影响，故该区域的内侧压力值最大。

铁口带最大环向变形值约为 13.2mm，位于铁口板带的非加强区，加强区因四个铁口开孔周围的炉壳厚度加大且有铁口法兰的约束作用，故该处的向外的膨胀变形量小于非加强区的变形量，约为 7.6mm，如图 4.45 所示。风口带最大环向变形约为 13.4mm。

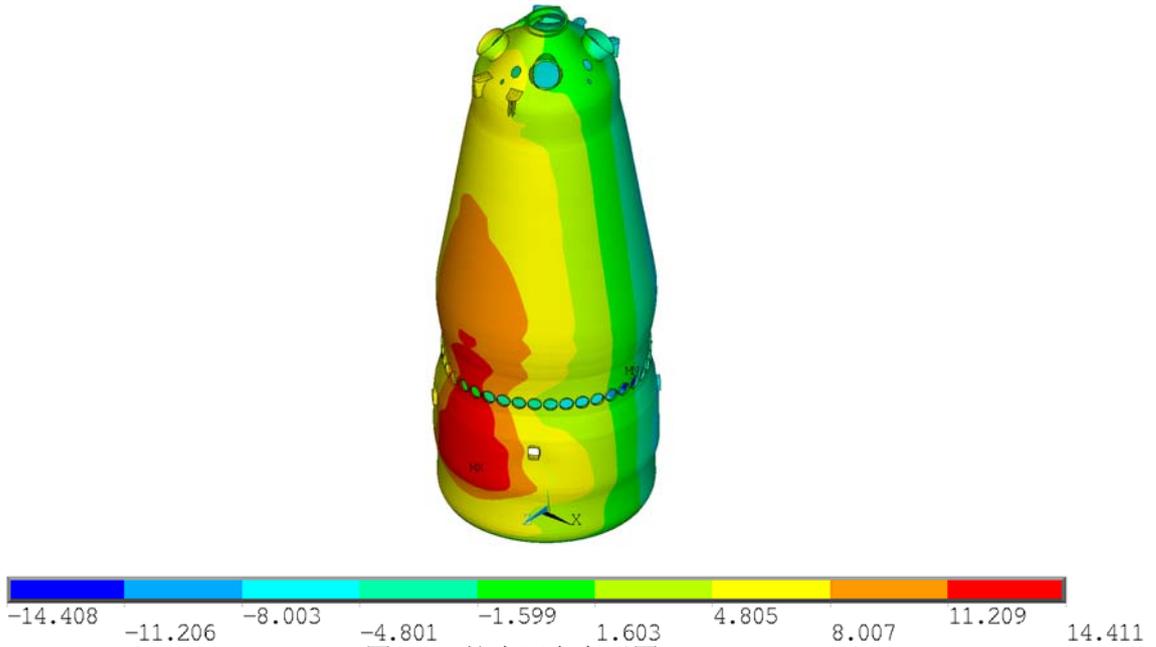


图 4.45 炉壳环向变形图 (mm)

炉头部所受荷载以内部煤气压力为主，在导出管上作用有经膨胀节传递至炉壳的反力。经计算，炉头封板变形如图 4.49 所示，在内部的煤气压力作用下，炉头封板以竖向的向上变形为主。因炉头封板开孔较大且较多，在换溜槽孔与导出管之间及四根导出管之间区域出现较大的竖向变形，约为 33.2mm。

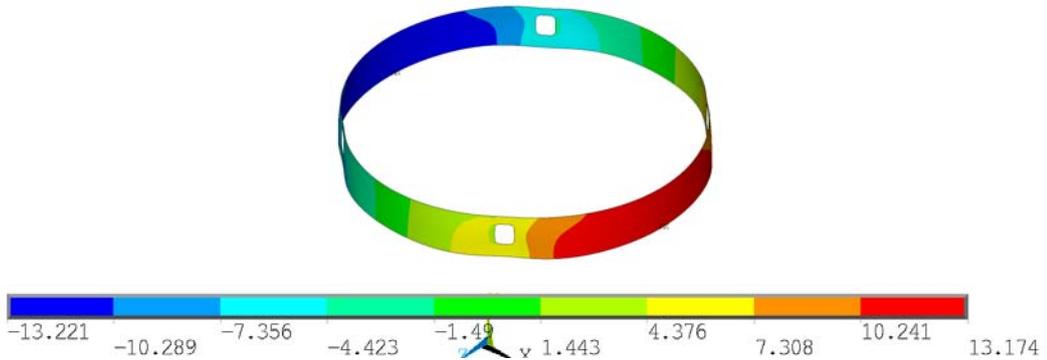


图 4.46 铁口带变形图 (mm)

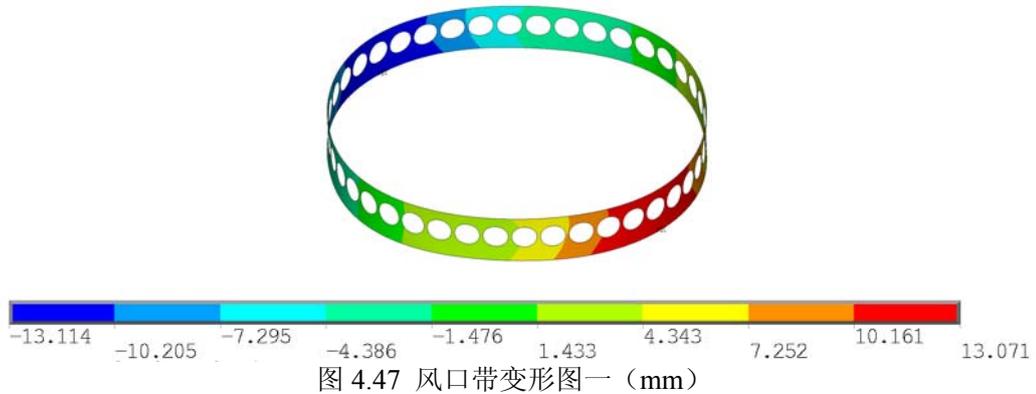


图 4.47 风口带变形图一 (mm)

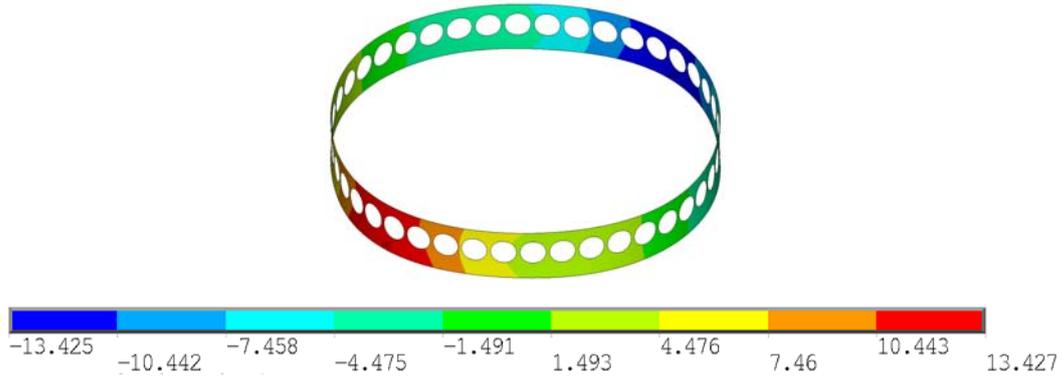


图 4.48 风口带变形图二 (mm)

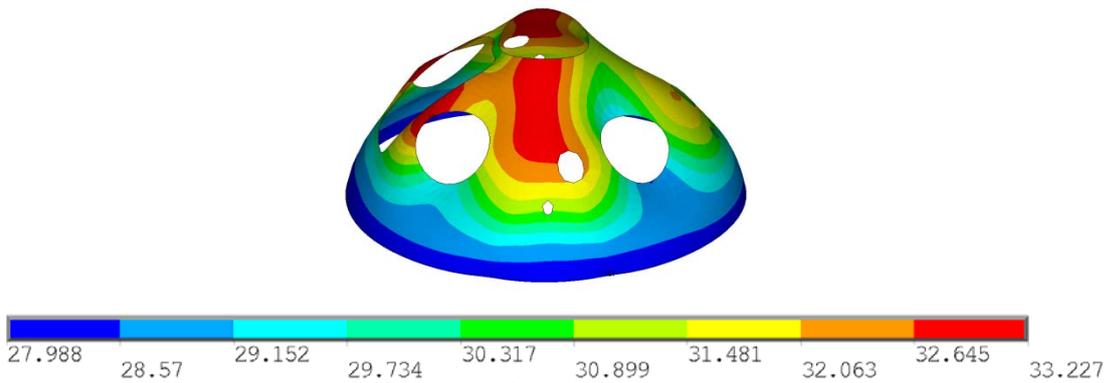


图 4.49 炉头变形图 (mm)

#### 4.5 小结

基于 MIDAS 及 ANSYS 两不同软件计算结果的对比分析, 可得出如下结论:

- (1) 两软件整体计算结果的拟合精度较高。
- (2) 计算结果表明炉壳整体处于弹性状态, 所取炉壳厚度可满足设计要求。
- (3) 对于环境温度升高考虑底端约束导致的炉壳底端与炉底封板连接部位的弯曲应力相对较大的问题宜引起重视。

(4) 炉头部位, 虽所受荷载相对较小, 但因有效受荷面积小, 导致开孔边缘及换溜槽孔的上角部应力水平较高。将换溜槽孔角部的倒角尺寸加大可有效减小其应力集中程度。

(5) 应将炉壳的厚度在铁口开孔附近加大以降低该区域过高的应力水平。在炼铁专业允许的条件下宜减小铁口高度同时加大铁口四个角部的倒角尺寸, 以降低该区域的应力水平。

(6) 炉壳的竖向应力与环向应力比在炉身、炉腰、炉腹及炉缸上部基本为 0.3, 炉底区域至渣铁压力最大处约为 0.77, 由炉喉下端至炉顶封板弧形段逐渐由 0.3 过渡至 1.0, 炉顶封板的竖向应力与环向应力比约为 1.0。

(7) 根据典型板带的分析结果, 炼铁工艺专业所开冷却壁开孔方式满足设

计要求。

(8) 炉壳在正常生产状态下产生相对较大的竖向及水平变形, 为避免与炉本体系统之间产生不利的相互影响, 宜释放该变形。

(9) 采用振型分解反应谱法考虑高炉炉壳的水平地震效应, 振型个数一般可以取振型参与质量达到总质量90%所需的振型数, 本工程所取振型数目为16个。

## 5 结论及建议

### 5.1 本文结论

本文以首钢京唐钢铁联合有限责任公司钢铁厂炼铁工程 1 号高炉为背景, 针对高炉炉壳的荷载作用方式及范围、正常生产状态下炉壳的应力分布状态和变形特性等方面分别进行了分析, 结论如下:

1. 计算结果表明炉壳整体处于弹性状态, 所取炉壳厚度可满足设计要求。炉壳的竖向应力与环向应力比在炉身、炉腰、炉腹及炉缸上部基本为 0.3, 炉底区域至渣铁压力最大处约为 0.77, 由炉喉下端至炉顶封板弧形段逐渐由 0.3 过渡至 1.0, 炉顶封板的竖向应力与环向应力比约为 1.0。

2. 考虑周围温度升高及底端约束, 炉壳底端与炉底封板连接部位的弯曲应力相对较大的问题宜引起重视。

3. 炉头部位因开孔较大且较多, 导致在外荷载作用下开孔边缘及换溜槽孔的上角部的应力水平均较高, 将换溜槽孔角部的倒角尺寸加大可有效减小该部位的应力集中程度。

4. 铁口带的窄高型铁口开孔对炉壳受力是不利的。采用铁口区局部炉壳厚度加大的方法是相对有效的处理方法, 可降低该区域的应力水平并避免塑性区域相互连通的问题。在允许的条件下宜采用宽矮型铁口以降低开孔高度, 同时加大铁口四个角部的倒角尺寸, 以降低该区域的应力水平。根据典型板带的分析结果, 炼铁工艺专业所开冷却壁开孔方式满足设计要求。

5. 在各种荷载的同时作用下, 炉壳产生相对较大的水平变形及沿高度方向的竖向变形, 宜释放该变形。

6. 采用振型分解反应谱法考虑高炉炉壳的水平地震效应, 振型个数一般可以取振型参与质量达到总质量 90% 所需的振型数, 本工程所取振型数目为 16 个。

### 5.2 展望

1. 在研究高炉炉壳受力性能时, 虽然较全面考虑到内外温差和整体升温产生的影响, 但有研究表明, 随着炉料的循环加载和温度的变化, 温度疲劳是影响高炉寿命一个因素, 在高炉炉壳设计中该如何考虑温度疲劳的影响也是以后研究工作需要解决的问题。

2. 由于高炉内部是固-液-气三相运动, 高温高压环境下难于观测, 目前对高炉

内部其运动规律研究还有待进一步深入，进一步明确高炉内部实际荷载，建立符合实际情况炉壳计算模型和分析理论，会对高炉结构设计起到重要促进作用。

3.现有炉壳厚度的确定都是建立在工程设计经验的基础上，根据本文研究结果，炉壳应力沿高度方向存在明显的差异，如何对炉壳厚度进行合理的优化是今后进一步研究的问题。

## 参考文献

- [1]王平, 炼铁设备 北京: 冶金工业出版社, 2006
- [2]郝素菊.高炉炼铁设计原理[M].北京: 冶金工业出版社, 2003, 30-40
- [3]中国冶金设备总公司, 现代大型高炉设备及制造技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996
- [4]郑执信, 炼铁 40 年 炼铁,1989 (5)
- [5]于仲洁, 高炉炼铁技术未来的发展, 钢铁研究, 2001(1)
- [6]王维兴, 中国高炉炼铁技术进展 钢铁, 2005.10
- [7]大型高炉炉壳整体弹性有限元分析
- [8]姜德进, 关于高炉结构设计的若干问题探讨, 工业建筑, 2003.6
- [9]李连祥,买香玲,国内外高炉钢结构设计技术的比较分析, 特种结构, 1998.1
- [10]李连祥, 我国高炉结构设计的基本现状及前瞻, 工业建筑, 1997.12
- [11]李马可.日本高炉冶炼技术的发展[C].炼铁文集, 1984 年 23 期
- [12]Jl.A.索罗金.高炉结构[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1983: 8-37
- [13]韩二中等, 鞍钢 11 号高炉炉壳的有限元强度分析, 钢铁, 1992.05
- [14]张荣钢, 冶金高炉结构体系受力分析, 沈阳建筑工程学院学报, 1993.1
- [15]李富帅, 刘兆宏, 宝钢 3 号高炉炉壳结构稳定性分析及临界载荷, 上海金属, 2001.03
- [16]张开林等, 热一结构耦合的高炉炉壳静强度及疲劳强度分析, 重庆大学学报, 2008.6
- [17]王志军,陈曦.包钢 1 号高炉炉壳整体弹塑性有限元分析[J].工业建筑,2003 年第 33 卷第 10 期
- [18]陶修, 大型高炉炉壳整体弹塑性分析, 重庆大学硕士论文, 2008
- [19]张付可等, 大型高炉炉壳钢结构整体弹性有限元设计分析, 工业建筑, 2009 增刊
- [20]李富帅, 方如华等.高炉炉壳开孔位置对应力集中的影响[J].力学季刊, 2003, 24(4): 585-589
- [21]郭志强, 转炉炉壳热膨胀应力和温度差应力的分析, 钢铁研究学报, 2003.8
- [22]H.Takahashi,H.Kawai, Y. Suzuki,Analysis of stress and buoyancy for solids flow in the lower part of a blast furnace[J],Japan,30 September,2001
- [23]国外大型高炉炉体结构应力测定与设计[M].冶金部建筑研究总院,1993 年 9 月
- [24]黄纲华.1 号高炉炉壳开孔后的有限元静力和屈曲分析[J].宝钢技术, 1997 年 05 期.
- [25]R.Flores:Design Principles of Earthquak Resistant Blasst Furnaces, Proc.3.W.C.E.E.Vol.3, New Zealand ,1965.
- [26]R.Vignola,e.Arze:Behavior of a Steel Plantunder major earthquakes ,proc. 2.W.C.E.E.Vol.1, Japan, 1960.
- [27]宫岛信雄: 高炉的耐震设计, 1976.1
- [28]中国科学院工程力学研究所、河北省地震局抗震组编, 唐山地震震害调查初步总结, 地震出版社, 1978 年
- [29]俞祖范,杜井林,序舜德,高炉抗震分析,浙江工学院学报, 1984.2
- [30]徐祥文, 卢书辉, 陆干文, 高炉结构的动力特性
- [31]李青芳译,日本高炉结构抗震设计的研究. 1992.2

- [32]郑山锁等, 高炉炉壳抗震承载力的一种实用计算方法, 工业建筑, 2007.3
- [33] 虞孝儒. 高炉炉壳设计方法的探讨. 重型机械,1990 年,3 卷: 45~50
- [34] 李连祥等 国内外高炉钢结构设计技术的比较分析. 特种结构,1998 年,15 卷: 22~26
- [35] 炼铁高炉结构体系受力分析. 蔡红 1996 年.
- [36] 冶金高炉结构体系受力分析. 张荣钢等 1993 年 沈阳建筑工程学院学报.
- [37] 鞍钢 11 号高炉炉壳的有限元强度分析. 张德臣 1992 年 钢铁.
- [38] 1 号高炉炉壳的有限元应力分析. 黄纲华 1994 年 宝钢技术.
- [39] 《现代大型高炉设备及制造技术》. 1996 年.
- [40]包钢新 1 号高炉炉壳整体弹塑性有限元分析. 王志军 2003 年 现代钢结构.
- [41] 《构筑物抗震设计规范》. 1993 年.
- [42]轴对称组合壳的弹性和塑性分析. 科学技术成果报告 85-311-02-05, 宝钢 4063m<sup>3</sup> 高炉炉体结构应力测试与分析课题组, 1992.8
- [43]高炉炉壳孔洞应力的弹性和塑性分析. 科学技术成果报告 85-311-02-05, 宝钢 4063m<sup>3</sup> 高炉炉体结构应力测试与分析课题组, 1993.8
- [44]宝钢二号高炉(4063m<sup>3</sup>)高炉炉体结构应力测定与分析. 科学技术成果报告 85-311-02-05, 宝钢 4063m<sup>3</sup> 高炉炉体结构应力测试与分析课题组, 1994.9
- [45] 王勖成. 有限单元法. 清华大学出版社, 2003 年.
- [46] MIDAS 结构分析与设计. 北京迈达斯技术有限公司.
- [47] ANSYS 理论参考.
- [48]重庆钢铁设计院. 高炉结构设计技术规定. 1964 年.
- [49] GB50567-2010,炼铁工艺炉壳体结构技术规范[S].
- [50]苏翼林等. 材料力学. 天津大学出版社, 2001 年.

## 致 谢

本论文是在导师徐善华教授的悉心指导下完成的，从论文选题、研究方案、理论分析到最终定稿，无不凝聚着导师的心血和汗水。几年来导师一直以渊博的学识、严谨的治学态度、踏实的工作作风、敏锐的科学洞察力激励我、启发我和鞭策我。导师富于建设性、启发性的指导使我步入了科学研究的殿堂，导师的言传身教，使我受益匪浅。值此论文完成之际，谨向在学习和工作上给予我关心、教诲和帮助的徐老师致以崇高的敬意和由衷的感谢！

在论文研究过程中得到了同门师生的指导和建议，谨向他们表示我深深的谢意！

衷心感谢首钢国际工程技术有限公司提供了很多便利条件，感谢相关工作人员在论文期间给予的莫大支持和指导！

感谢西安建筑科技大学对我的培养。

感谢支持我完成学业的父母和家人，感谢我所在工作单位首钢国际工程技术有限公司的领导和同事在我攻读硕士学位期间的支持和关怀！

感恩知福，饮水思源。最后再次衷心感谢所有关心帮助过我的人，请让我把最真挚、最诚恳的祝福送给你们！

王兆村  
2012年2月于北京