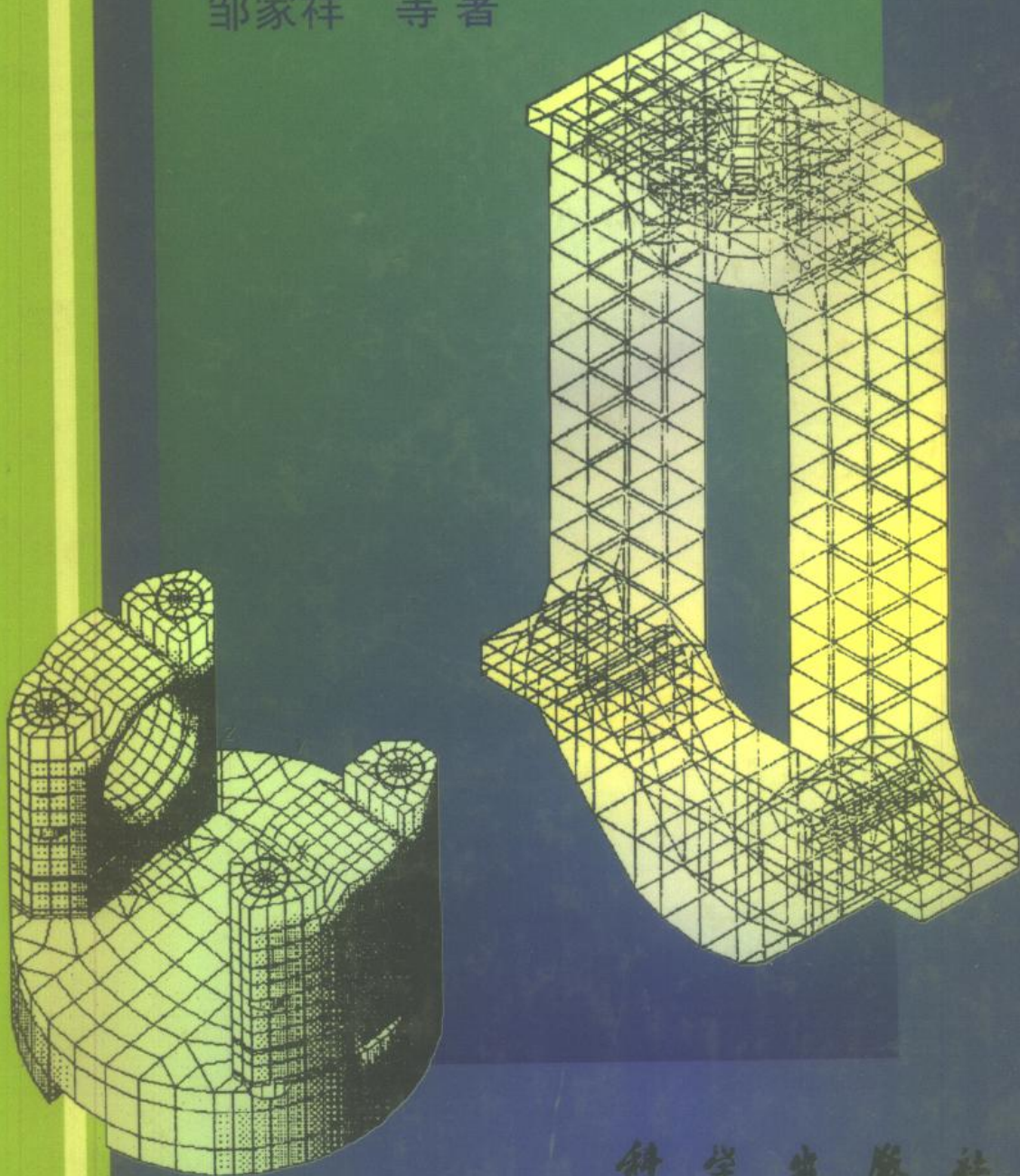


冶金机械的力学行为

邹家祥 等著



科学出版社

内 容 简 介

本书系统论述了冶金机械运行过程中的力学行为及冶金机械关键力学问题的研究进展.具体包括冶金机械的载荷行为,冶金机械的强度行为,冶金机械的变形行为,冶金机械的动态行为和冶金机械的热行为.

本书还介绍了相关的现代机械设计理论、方法以及现代实验方法.

本书可供机械、冶金、压力加工等专业的大学生和研究生参考,亦可供有关设计院、所及工厂技术人员使用.

图书在版编目(CIP)数据

冶金机械的力学行为/邹家祥等著.-北京:科学出版社,1999

ISBN 7-03-007022-4

I.冶… II.邹… III.冶金-机械-工程力学 IV.TF301

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 27551 号

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

科 地 亚 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1999年5月第 一 版 开本:787×1092 1/16

1999年5月第一次印刷 印张:14 1/2

印数:1—1 500 字数:328 000

定价: 35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

冶金工业的迅速发展,对大型机械设备的性能和使用条件提出了许多新的要求,在更高的层次上,要求设备能满足高速、重载、长寿命、自动化和精密控制的需要,由此涉及到许多结构问题和关键的力学问题.另一方面,计算机技术的发展和运用,促进了力学问题研究方法和研究体系变化,以现代设计计算理论代替过去的经典力学的计算方法,已显得十分重要.

冶金机械力学、强度研究是北京科技大学冶金机械博士点、重点学科的一个研究方向,经几代人努力工作而取得了很好的成绩,逐步形成了这个领域的系统规模.现在将其中的一些工作汇集出版,也是一个有意义的小结.

本书主要反映作者近 10 年来的一些研究成果,吸收了国内外的先进理论方法,又结合解决我国冶金工业等生产中的一系列问题,总结提高及创新.因此,此书将反映我国在这一领域某些方面新的水平.

本书主要结合冶金设备,着重介绍重型机械的典型力学行为和研究方法.全书共分六章:

第一章概述冶金机械的一些力学行为及其研究方法新的进展.

第二、三、四章分别阐述冶金机械的载荷行为、强度行为和变形行为.介绍了冶金机械工作中各类负荷的产生机理和求解方法;介绍了有限单元法、优化设计等现代设计方法在冶金设备强度设计上的应用;以及冶金机械在运行过程中的变形的确定、控制和利用.

第五章介绍冶金机械的动态行为,对冶金机械运行中的一些运动学和动力学问题进行了分析.

第六章介绍冶金机械的热行为.介绍了热场及热应力分析方法及其在冶金机械上应用的实例.

本书主编是邹家祥、副主编是臧勇、高永生.参与本书整理及编写的还有:苏兰海(第六章部分)、孙志辉(第五章部分)、秦勤、吴迪平、肖林、刘力等.

本书出版得到了中国科学院出版基金的资助,在此表示深切感谢.

本书可供高等院校机械、冶金、压力加工等专业的大学生和研究生使用,也适用于设计院所、工厂的工程技术人员阅读.

因著者水平有限,书中错误及不妥之处在所难免,恳请读者指正.

邹家祥

1996 年 12 月

于北京科技大学

目 录

前言

第一章 冶金机械力学行为研究..... (1)

1.1 冶金机械力学行为研究进展 (1)

1.1.1 冶金设备的特点和进展 (1)

1.1.2 冶金设备力学行为的研究目的和面向对象 (2)

1.1.3 冶金设备力学行为的研究方法及其进展 (2)

1.1.4 冶金设备的力学行为研究的具体内容 (3)

1.2 冶炼机械的力学行为 (4)

1.2.1 高炉炉体结构应力分析 (4)

1.2.2 大型转炉炉壳应力 (8)

1.2.3 连铸机结晶器振动机构动力学分析 (13)

1.2.4 薄板坯连铸技术中的力学问题 (17)

1.3 带钢轧机的力学行为..... (18)

1.3.1 轧制载荷 (18)

1.3.2 强度行为 (19)

1.3.3 变形行为 (20)

1.3.4 动态行为 (20)

1.3.5 热行为 (21)

1.3.6 随机行为 (23)

1.4 轧钢机动力学设计..... (25)

1.4.1 轧钢机动力学设计的要求 (25)

1.4.2 轧机结构动力学设计准则 (26)

1.4.3 轧钢机设计的动力学系统仿真 (28)

1.4.4 用有限单元法对轧机振动特性进行分析 (31)

1.5 板带轧机工程系统软件研究..... (32)

1.5.1 设计思想 (32)

1.5.2 环境与特点 (34)

1.5.3 应用范围 (34)

参考文献 (35)

第二章 冶金机械的载荷行为 (36)

2.1 轧制载荷的计算方法综述..... (36)

2.1.1 轧制载荷的工程解法基础 (36)

2.1.2 适用于冷轧的轧制压力公式 (38)

2.1.3 适用于热轧的轧制压力公式 (39)

2.1.4 考虑轧件的三维变形计算轧制力 (39)

2.1.5 滑移线法求解轧制压力 (40)

2.1.6	上界法求解轧制压力	(40)
2.1.7	轧制载荷的数值解法	(41)
2.2	工作辊附加力矩及辊系的稳定特性	(42)
2.2.1	工作辊的附加力矩	(42)
2.2.2	辊系受力分析	(44)
2.2.3	工作辊临界偏移距 e_0 的确定	(45)
2.3	板带轧机的轴向载荷特性	(46)
2.3.1	轧辊辊系的空间交叉及其运动形式	(47)
2.3.2	轧辊轴向力的理论模型	(48)
2.4	四辊可逆冷轧机轧制规程设定及数学模型	(50)
2.4.1	控制系统及其功能	(50)
2.4.2	轧制力数学模型	(50)
2.5	矫直机的载荷特点及其调整方案	(53)
2.5.1	弹塑性弯曲时材料的应力和应变	(53)
2.5.2	塑性弯曲方程式	(55)
2.6	剪切机的负荷计算	(58)
2.6.1	一般原理	(58)
2.6.2	剪切时的金属变形过程	(60)
2.6.3	低碳钢张力剪切时的变形过程	(61)
2.7	锯切过程的力能参数	(63)
2.7.1	单位锯切压力计算模型	(63)
2.7.2	宏观力能参数计算	(67)
	参考文献	(68)
第三章	冶金机械的强度行为	(70)
3.1	有限单元法及其在结构分析中的应用	(70)
3.1.1	有限单元法的基本概念和分析步骤	(70)
3.1.2	有限单元法的发展及其应用	(71)
3.2	轧钢机机架的强度设计	(74)
3.2.1	引言	(74)
3.2.2	闭式机架的强度计算	(74)
3.2.3	型钢轧机半闭口机架计算	(77)
3.2.4	轧机机架的三维计算	(79)
3.3	四辊轧机轧辊应力和辊间压力分析	(82)
3.3.1	引言	(82)
3.3.2	轧辊的三维有限单元法计算模型及机械应力分布	(82)
3.3.3	辊间压力分布	(84)
3.4	万向接轴的强度和结构分析	(87)
3.4.1	滑块式万向接轴变形和应力分析	(88)
3.4.2	十字轴式万向接轴强度分析及结构优化	(92)
3.5	大型转炉托圈的机械应力	(97)
3.5.1	十点支撑式 120t 转炉托圈的机械应力及变形	(97)

3.5.2	三点铰接式 300t 转炉机械应力及变形分析	(99)
3.5.3	三点铰接式 50t 顶底复合吹转炉托圈机械应力及变形分析	(101)
3.6	冶金机械链条的研究	(104)
3.6.1	冶金机械链条的力学强度分析	(104)
3.6.2	链条主要零件选材及热处理工艺合理化	(106)
3.6.3	冶金机械链条计算机设计系统软件	(106)
3.7	金属热切圆锯片应力分析及齿形优化	(108)
3.7.1	计算方案和计算模型	(108)
3.7.2	典型尖齿的应力分析	(109)
3.7.3	主要齿形参数对应力的影响	(109)
3.7.4	光测弹性力学实验结果	(113)
3.7.5	结果分析	(113)
3.8	轧辊磨损预报	(114)
3.8.1	轧辊磨损预测方法的研究	(114)
3.8.2	影响轧辊磨损预报的主要参数	(115)
3.8.3	轧辊磨损预报模型设计	(116)
	参考文献	(119)
第四章	冶金机械的变形行为	(120)
4.1	带钢板形及轧辊有载辊缝的调整技术	(120)
4.1.1	板带翘曲及其影响因素	(120)
4.1.2	板形及板凸度控制技术的分类	(122)
4.1.3	传统的板形控制方式	(122)
4.1.4	液压弯辊方式	(122)
4.1.5	阶梯支承辊形式	(124)
4.1.6	可变凸度轧辊	(125)
4.1.7	轧辊横移轧机	(125)
4.1.8	轧辊交叉轧机	(127)
4.1.9	在线磨辊(ORG)技术	(128)
4.2	辊系变刚度弹基梁——有限单元模型的研究	(128)
4.2.1	辊间刚度系数 K_G	(128)
4.2.2	轧件与工作辊之间的刚度系数 K_s	(130)
4.2.3	辊系机械应力场	(131)
4.3	辊系变形时轧辊的凸度特性	(131)
4.3.1	弹性基础梁理论及本城恒的工作	(131)
4.3.2	对辊间刚度系数 K 的研究	(133)
4.3.3	轧辊凸度对辊系变形的影响	(134)
4.3.4	轧辊凸度对轧制压力分布的影响	(135)
4.4	HCW 轧机辊系变形计算机模拟及辊缝控制机理	(136)
4.4.1	HCW 轧机辊系变形计算机模拟	(136)
4.4.2	HCW 轧机辊缝控制机理	(138)
4.5	交变弯曲矫直理论	(141)
4.5.1	小变形调整方案	(142)

4.5.2	轧件平直部分不产生塑性变形的调整方案(最小能量调整方案)	(143)
4.5.3	综合调整方案	(144)
4.5.4	大变形调整方案	(145)
4.5.5	均衡负荷调整方案	(146)
4.5.6	整体倾斜调整方案	(146)
4.6	弹塑性线性强化带钢的拉弯矫直过程分析	(147)
4.6.1	拉弯过程应力-应变状态的分析	(147)
4.6.2	弹复曲率 $\bar{\kappa}_f$	(150)
4.6.3	几何中间层应变的计算	(151)
	参考文献	(152)
第五章	冶金机械的动态行为	(153)
5.1	对机械振动系统六种动态响应的分析方法	(153)
5.1.1	振型叠加法	(153)
5.1.2	状态空间法	(154)
5.1.3	复模态法	(154)
5.1.4	直接积分法	(154)
5.1.5	一阶常微分方程组初值问题的数值解法	(155)
5.1.6	时域有限元法	(156)
5.2	MWR 仿真程序及其在轧钢机主传动系统扭振分析中的应用	(157)
5.2.1	MWR 仿真程序介绍	(157)
5.2.2	MWR 仿真程序在轧钢机主传动系统扭振分析中的应用	(158)
5.3	随机变量优化设计方法在轧钢机主传动系统扭振中的应用	(160)
5.3.1	工程随机变量机会约束问题的求解方法和技术	(160)
5.3.2	轧钢机主传动系统结构参数优化设计	(161)
5.4	国内带钢热轧机主传动系统的扭振计算分析	(163)
5.4.1	频率和主振型的分析	(164)
5.4.2	扭矩放大系数 TAF 的分析	(165)
5.4.3	降低扭矩放大系数 TAF 的措施	(166)
5.5	2030 带钢冷连轧机自激振动问题的研究	(166)
5.5.1	轧机振动的综合诊断测试	(166)
5.5.2	轧机自激振动形成的机理及影响因素	(168)
5.5.3	2030 带钢冷连轧机振动诊断评判	(170)
5.6	带钢冷连轧机振动的系统仿真	(171)
5.6.1	仿真模型及振动方程	(171)
5.6.2	仿真方法及程序结构	(173)
5.6.3	仿真结果举例	(173)
5.7	圆锯片的振动及噪声特性研究	(174)
5.7.1	圆锯片的振动模态分析	(174)
5.7.2	圆锯片振动模态的准确解	(177)
5.7.3	圆锯片的动态特性	(180)
5.7.4	圆锯片的振动噪声及其抑制	(184)
5.8	连铸机结晶器振动机构的运动学及动力学分析	(187)

5.8.1 运动构件惯性力、惯性力矩的计算	(187)
5.8.2 铰链点支反力的计算	(190)
5.8.3 运动学和动力学结果分析	(192)
5.8.4 高频振动对机构过载保护装置的影响	(195)
参考文献	(196)
第六章 冶金机械的热行为	(198)
6.1 机械热应力分析方法及应用	(198)
6.1.1 解析法	(198)
6.1.2 数值模拟方法	(198)
6.1.3 物理模拟方法	(199)
6.2 连铸机拉矫辊的温度场和应力场	(201)
6.2.1 温度场数学模型的建立	(202)
6.2.2 温度场的数值求解	(203)
6.2.3 温度场计算结果及分析	(206)
6.2.4 热应力场数学模型的建立	(207)
6.2.5 热应力场的数值计算及结果	(209)
6.3 转炉托圈温度应力分析	(210)
6.3.1 托圈的温度场	(210)
6.3.2 托圈温度应力	(211)
6.4 转炉炉壳蠕变研究	(214)
6.4.1 转炉炉壳蠕变	(214)
6.4.2 炉壳材料蠕变试验方法和结果分析	(215)
6.4.3 炉壳寿命预测	(218)
参考文献	(220)

第一章 冶金机械力学行为研究

1.1 冶金机械力学行为研究进展

冶金工业的发展对机械设备的性能和使用条件提出了许多新的要求,一项新技术的产生都要求有新的设备做为载体来实现.如近年出现的短流程非高炉炼铁技术及连铸连轧技术,就带动了一系列新设备的出现,其中又提出了如大型窑体设计、液芯轧制的软压下机理及设备、漏斗型及平板型结晶器的设计、非正弦结晶器振动机构设计等上百个技术难点问题,而这些关键技术又集中表现为要解决的关键力学问题.包括金属塑性流变问题、弹塑性问题、弹性变形及强度问题、运动学及动力学问题和传热及热应力问题.由于新型冶金机械出现的周期由过去的 15~20 年缩短到目前的 5~10 年,这也对机械力学行为的研究和开发提出了更高的要求.

近年来,国内外冶金生产中,不断出现重大设备事故,也都涉及到设备的力学行为,有许多是由于设计时力学模型不合理,力学分析不完备造成的.

冶金机械设备的设计及力学分析,经过了 20 世纪 30 年代后的经验设计,50 年代后的应用经典力学计算及设计阶段,到 80 年代后进入了现代设计及计算机辅助设计的阶段.计算机技术和测试技术的发展,推动了机械设计及设备力学行为的研究,大量多维问题及非线性问题得以解决.

1.1.1 冶金设备的特点和进展

冶金设备和普通大型机械相比,既有共性,也有因工作条件和使用性能不同而形成的自身特点.冶金设备的主要特点和发展趋势可归纳为:大型、重载、高速、连续自动化、精密化、恶劣工作条件的改善等.

(1) 大型化.一个热连轧机生产厂的设备在 50000t 以上.一个机架零件的重量可达 200t.

(2) 重载.2800 四辊中板轧机的最大设计轧制力为 30000kN、最大设计轧制力矩达 2000kN·m.而一座 300t 转炉,炉壳自重 386t、炉衬重约 732t,钢液重约 370t,总重量约 1500t 左右,这些重量悬挂在托圈上,工作时要频繁转动,同时炉内还存在承受横向旋转的激振力.

(3) 高速.带钢热轧连轧机的最大轧制速度为 25m/s;带钢冷连轧机的轧件出口速度可达 35m/s,高速线材轧机的最大轧制速度则已达 120m/s.

(4) 连续化及自动化.不论是带钢全连轧生产,还是连铸连轧的短流程工艺,均已实现了在本质内涵上的过程连续化.由钢水到板卷整个生产过程都是由计算机自动控制的.

(5) 精密化.现在冷轧带钢厚差要求已达微米级,如纵向厚差可控制在 3~5 μ m 以下,横向厚差也可控制在 10 μ m 以下.

(6) 冶金设备一般都是在高温、高粉尘、大冲击等恶劣条件下工作.如热轧开轧温度

约 1200℃;转炉炉壳温度也多在 300℃以上,有的高达 470℃.冷轧机的轧辊辊身温度也在 120℃以上.

以上这些特点就决定了现代冶金工业设备是高投入、高产出、高经济价值的行业.相应的,要求现代的冶金设备具备很高的自动化程度和可靠性.对大多数设备,特别是其大型、主要的部件要求永不损坏,即设备寿命永久化.为满足所有这些要求,必须对设备的生产运行的行为有全面了解和掌握运用.而这又大多归结为对设备的力学行为的研究.

1.1.2 冶金设备力学行为的研究目的和面向对象

冶金设备作为一类实用工业设备,其力学行为研究的目的就是要为生产服务,面向的对象也就是生产运行中提出的各种问题.

1. 关于产品、工艺及设备创新设计中重点成套技术的理论研究

由冶金产品改进、工艺革新和设备的换代要求提出,包括一个方面的技术群.这方面的研究往往带来本领域的技术革命.也会形成各经济实体的独有技术,创造巨大的经济效益.

如带钢的板形质量的提高问题,推动了轧机变形行为、板带轧机板形控制理论、新型轧机的研究.形成了液压弯辊、阶梯支承辊、可变凸度轧辊、轧辊横移技术、轧辊交叉轧机、多辊轧机、在线磨辊等成套技术和 60 多种新型轧机和轧辊的出现^[1].

再如,连铸连轧工艺要求连铸能高生产率地生产出无缺陷连铸坯、实现热态的直接轧制,这带动了连铸机结构、铸坯凝固过程的热力学行为、结晶器的振动特性等成套技术群的研究.

这一类的研究对工业过程的革命和国家及经济实体的市场竞争力提高,有重要意义.

2. 设备事故状态分析和预报

这类研究主要是面向原有生产工艺设备的生产过程.工作技术路线一般是利用现有技术,确定特定设备事故的原因,根据客观条件提出预防预报措施.

如国内外大型轧机传动系统发生断轴事故屡见不鲜.但造成事故原因是多种多样的.我国近年来轧机接轴事故有的是因为轧制时轧辊与轧件之间打滑造成传动系统自激振动引起的;有的是因为接轴设计不合理造成的,这一类事故不仅会使工厂停产,还会造成数百万元的经济损失.

大型设备的运行监测及事故预报诊断技术,近年来已有很大的进步,并成为设备力学分析不可缺少的内容.例如,一个带钢热轧车间在主轧线及其辅助设备上需要装 160~300 个振动监测传感器,通过计算机网络进行在线监测,可利用系统分析软件对设备异常的原因进行判断和报警.

3. 关于设备基础件的研究开发的相关力学问题研究

主要是指冶金设备专用基础件的研究开发,如对于轧辊、新型金属热切圆锯片和冶金高强度链条的开发中的负荷问题、结构优化问题、选材问题^[2,3],生产工艺过程合理设计等.因基础件的消耗量大,这方面的研究具有较大的实用价值.

1.1.3 冶金设备力学行为的研究方法及其进展

冶金设备力学行为的研究方法近年来发生了很大的变化,主要表现在现代力学方法

和测试技术手段的应用。

1. 采用现代力学方法和现代分析手段研究经典力学问题

如在冶金设备的载荷研究上应用现代方法和手段体现在两个方面：

一是利用解析的数学力学方法(变分法、上限解等)和计算机的数值分析技术(有限元、边界元、差分法等)结合,对经典问题深入研究.这方面的工作主要用于理论研究,为解释载荷行为机理提供依据。

二是将特定问题的各种主要影响因素形成较为简单的模型,利用在线计算机控制系统根据实测数据进行实时控制,其追求的是在线反应速度。

2. 充分利用国内外的大型系统软件并开发自身的软件

这方面表现最为突出的是各种有限元程序的应用,如 SAP, ANSYS, MARC, NASTRAN等国际著名通用软件和行业专用软件,已成为当前冶金设备力学行为研究广泛应用和不可缺少的工具.同时,我国也从局部对象开始,逐渐形成一些自己的、具有行业特色的专用软件,如武汉钢铁公司和北京科技大学合作完成的大型热连轧机生产过程控制软件、宝钢高炉炉壳应力计算程序 PSAFS^[4]、北京科技大学的板带轧机工程系统软件等。

3. 系统仿真技术的发展和應用

由于冶金设备的大型笨重,许多力学行为无法采用实物试验的方法预先获得,所以系统仿真技术在冶金设备的力学行为研究上得到了广泛的应用.仿真技术以计算机为基础,根据系统实验的目的,建立系统模型,并在不同条件下对模型进行动态运行的一门综合性技术.如对五机架冷连轧机振动系统仿真,吸收了过程控制的数学模型和大量实测参数,根据轧制理论及振动理论建立综合模型,并在多功能系统仿真软件环境下运行求解,取得了明显的效果^[5]。

4. 先进测试技术的发展和实际使用

先进测试技术是冶金设备自动控制和实物行为参数测试基础,受到各方面的重视.国内在引进一些国外设备和软件的同时,也开发出较高水平的传感器和测试分析软件.我国设备诊断工程,正在吸收高新技术成果,向综合化、智能化、网络化发展.单体设备运行性能及力能参数测试也得到了普遍应用,这对掌握和分析设备的力学行为提供了方便的条件。

1.1.4 冶金设备的力学行为研究的具体内容

为便于研究,可将冶金设备的力学行为大致划分为六种:载荷行为、强度行为、变形行为、动态行为、热行为和随机行为。

1. 载荷行为

设备载荷行为主要包括载荷的水平和性态,其精确掌握是整个力学行为研究的基础.如轧钢机轧制负荷的设计计算,转炉炉体的倾翻力矩,连铸机的拉坯阻力,结晶器的振动载荷等,都要求提出正确的数学模型和计算方法。

2. 强度行为

是机械设备经典设计的主要内容.冶金设备强度问题,更多的表现为各种机械载荷、温度应力、振动及各种随机因素造成冲击和疲劳破坏。

3. 变形行为

冶金设备的变形直接影响设备的安全运行和产品的精度,如在板带轧制中,机座系统的弹性变形是影响和控制板带厚度及板形的重要因素。

4. 动态行为

随着生产速度的提高,冶金设备的振动问题愈来愈引起人们的重视。一类工作是利用设备的振动特性的振动机械,如大量使用的振动筛,振动应力时效装置;另一类是防止和避免机械设备发生振动。这两方面的研究都获得了发展。动态行为研究已成为现代设计中的重要内容。例如,对轧钢机进行动力学设计,主要包括设备的结构参数的动态优化设计,设备的动力学系统仿真,结构的有限元动力学设计等内容。

5. 热行为

在冶金设备中,热行为占有重要地位。如铸坯的凝固过程、轧辊的热凸度、某炼铁厂高炉煤气下降管断裂、某炼钢厂的托圈裂纹产生等均与之有关。

6. 随机行为

许多机械设备的载荷是随机的,在工作历程中载荷随工况和时间历程变化,而无一定的规律。有时设备的零部件的应力状态是随机变化的,这都可以归纳为随机行为,需要用专门的方法来进行研究。

冶金设备力学行为的上述分类是人为的。实际上在各种设备的工作过程中它们都是同时发生,又是相互影响的,研究时不可割裂。如某 300t 转炉炉壳由于长期受到高温、机械负荷和炉衬膨胀力的作用,发生了严重变形,炉壳和托圈间的间隙迅速减小,有顶死发生事故的危險。要确定变形原因、残余寿命、整治措施,必须对其载荷(自重和搅动力)、应力(机械应力和温度应力)、变形(材料的蠕变、钢壳和炉衬间的间隙造成的变形协调问题)、热传导等问题进行全面的分析。

1.2 冶炼机械的力学行为

冶炼机械种类繁多,主要包括炼铁机械如高炉及其辅助设备,炼钢机械如转炉、连续铸锭机等。这些机械设备多为大型壳体结构或组合,并在高温条件下工作。这些设备不但要完成冶炼工艺,还要完成金属由液态凝固成型的工艺,所以在设计和运行中表现出来的力学行为具有特色。这里简要介绍在大型高炉、转炉及连铸机的一些力学分析举例。

1.2.1 高炉炉体结构应力分析^[4]

1. 高炉炉体结构应力测定

高炉是一个长期在恶劣环境下承受各种工艺载荷的压力容器构筑物。大型高炉炉壳表面积达几千平方米,炉内铁水、炉渣温度高达 1400℃以上。炉壳表面事故温度高达 200℃。为保证正常安全生产及合理设计,高炉结构的温度与力学参数测量受到关注。如原苏联克里沃罗斯克钢厂 5000m³ 高炉上安装了 135 个热电偶、139 个电阻应变计和测量、记录、切换、定值报警监测装置。

高炉炉壳在役期间承受各种工作载荷,包括炉体自重和安装载荷、料体和铁水的压力、煤气及热风的压力、内衬和冷却系统的热胀压力、悬料后发生崩料引起的动载荷等。与

之相对应,需要长期测量监控的项目有:炉壳的应力、应变,开孔区与孔边应力集中的应力、应变,炉壳转折区的应力、应变,炉壳表面温度场及内衬温度梯度,烘炉及开炉初期炉体上涨和径向膨胀量,炉壳内压力等.这些参数都是由专用的传感器及仪表测量,并具有数据采集系统.

我国某大型高炉上测点布置为,沿炉身纵向七个环带,布置了纵向、横向应力测量传感器 66 台,以测定高炉结构整体应力.在每个应力测点处都设置了一个温度测点用以测温.在开口密集处布置了 36 个应力测点监测孔边集中应力.在炉腹和炉腰的转折处设 20 个应力测点,监测转折处集中应力.在炉顶部布置了 6 台位移测量传感器,监测炉顶位移变化.在炉缸、炉腹、炉腰及炉身下部等处还专门布置了内衬温度梯度测点和炉内压力测点.图 1-1 为点火一年内应力变化规律.由图可见,炉壳应力沿身高度方向是变化的,最大值出现在炉身五段(炉身上中部),平应力值为 112MPa.

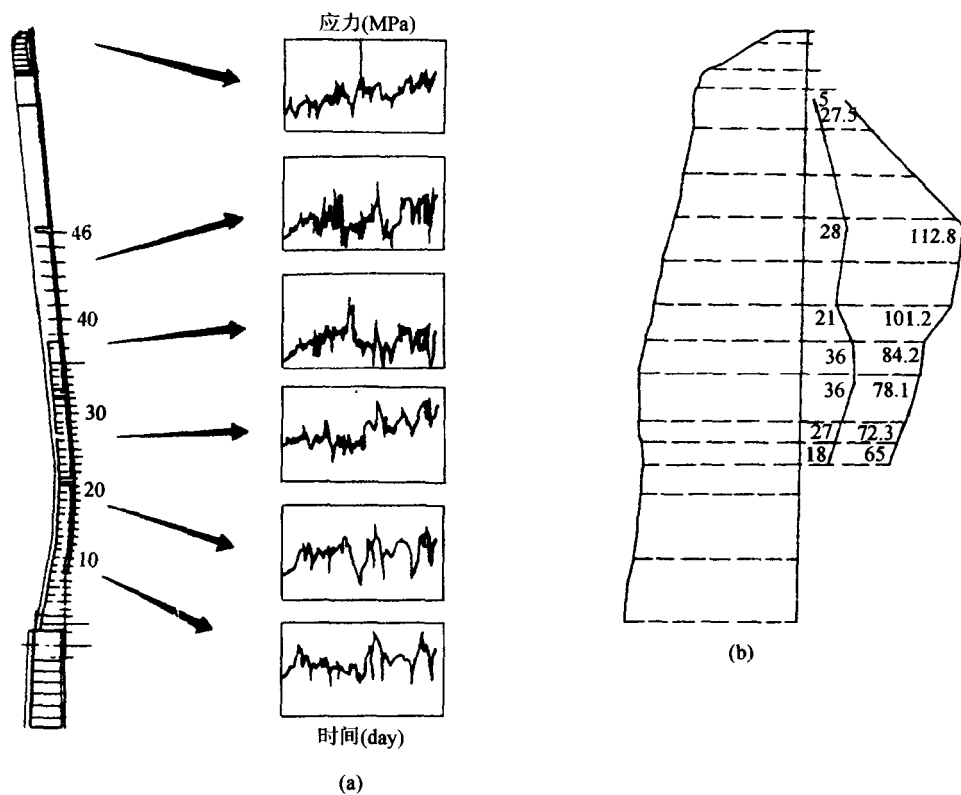


图 1-1 高炉炉壳整体应力(a)及应力沿炉身分布图(b)

2. 大型高炉炉壳应力计算

炉壳应力计算要正确确定负荷情况和计算模型.在分析炉壳整体应力时,忽略壳面孔洞和壳体连接部位局部影响,先按薄壳无矩理论设计计算出炉壳各区段的环向应力和竖向应力,然后按有矩理论分析壳段转折处的边缘应力.同时,在各区段壳面上取出孔洞分离体,周界上作用由整体分析得出的应力为边界条件,计算孔洞应力集中和局部强度.在计算这两种局部应力时,还需考虑局部塑性开展的影响.具体说,炉壳应力计算的主要内



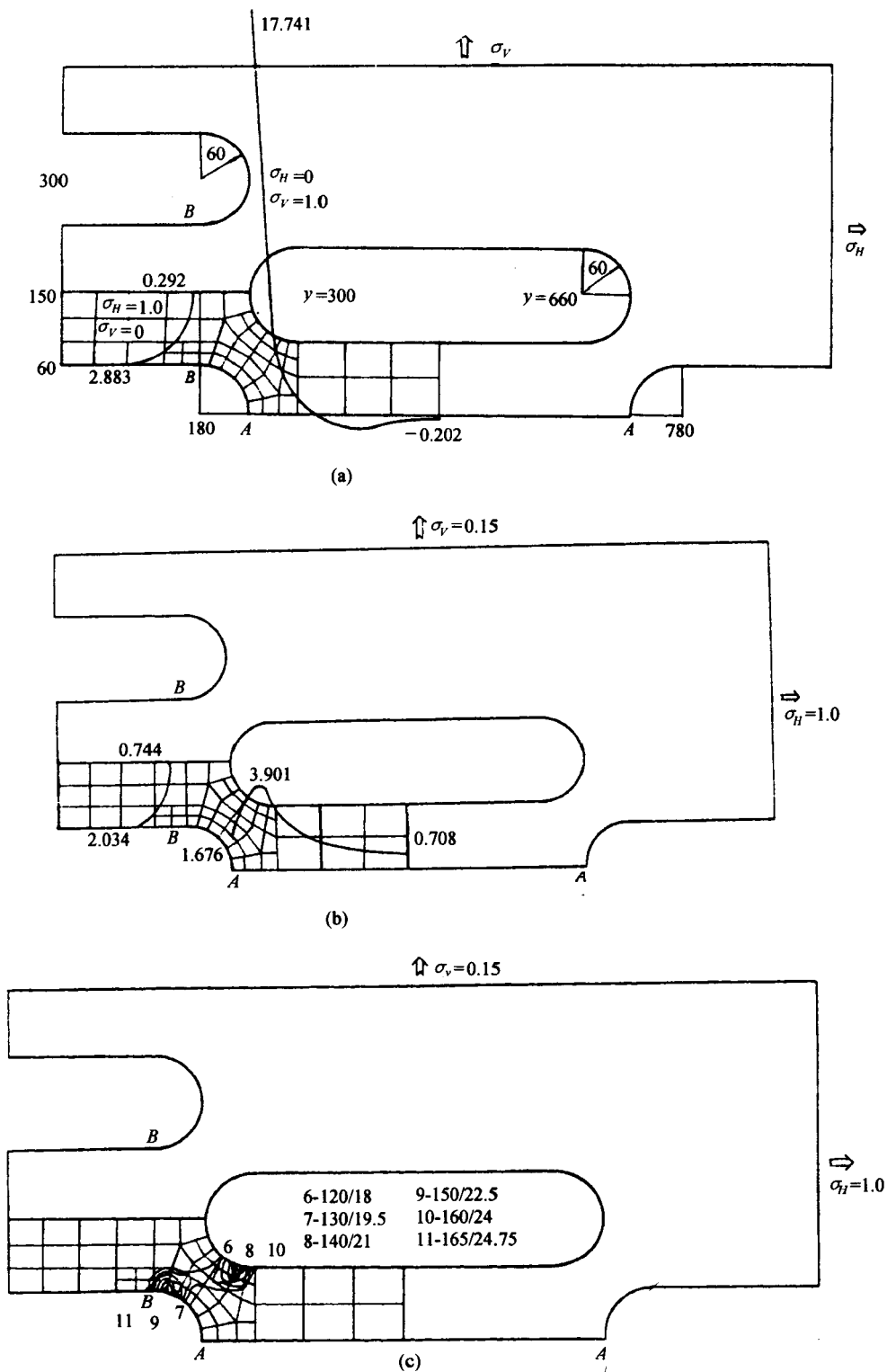


图 1-3 冷却孔处应力计算结果
(a)单向受力时应力集中曲线;(b)双向受力时应力集中曲线;(c)塑性区扩展图形

容有：(1)炉壳整体应力计算.输入参数包括确定炉料对炉壳的作用力、炉内煤气压力对炉壳的作用力,内衬膨胀对炉壳的作用力、炉壳温度差应力、上升管膨胀反力,炉壳自重及附属物的荷重、内衬材料荷重等.冶金部建筑研究院的炉壳整体应力计算程序 PSAFS 程序框图如图 1-2 所示。(2)高炉炉壳局部应力计算.包括高炉组合炉壳边缘应力的弹塑性分析、凸型及凹型相交锥壳的极限内压和炉壳孔洞应力的弹塑性分析.这些计算可用 ADINA 等大型程序完成。

图 1-3 为孔洞应力有限元计算结果举例.由图 1-3(a)可以看出环向应力在单独作用时($\sigma_H=1.0, \sigma_V=0$),B 点的环向应力集中系数为 2.883,B-B 截面上的应力分布很不均匀,中间仅剩 0.292.在竖向应力单独作用时($\sigma_H=0, \sigma_V=1.0$),A 点的竖向应力集中系数高达 17.741.运算时通过逐级加载考核塑性区的产生及发展趋势,由图 1-3(c)可见,载荷为 $\sigma_H=165\text{MPa}$, $\sigma_V=24.75\text{MPa}$ 时,上、下二层孔的塑性区扩展连通,孔间净截面全部达到屈服,呈塑性破坏状态。

1.2.2 大型转炉炉壳应力

1. 转炉炉壳承受的负荷

氧气顶吹转炉是当今炼钢的主要设备(图 1-4),炉壳承受很大的负荷.如一台 50t 转炉炉壳自重 94t,炉衬重 194t,炉液重 72t,总重在 360t 左右.而一台 300t 转炉炉壳自重 386t,炉衬重 732t,炉液重 370t,总重在 1500t 左右.炉壳是一个可倾动的容器,属于薄壳结构,并在高温条件下工作,其基本负荷有：

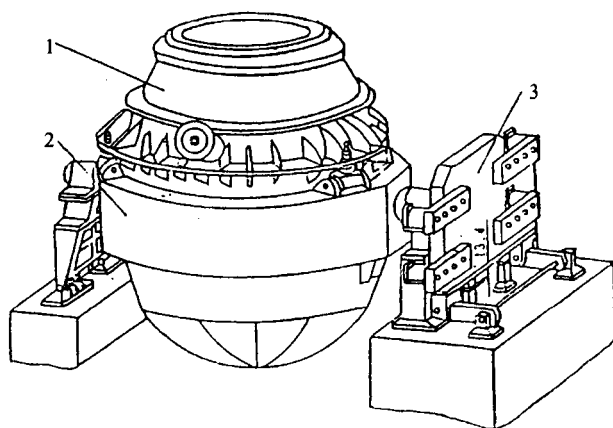


图 1-4 300t 转炉炉体结构图

1. 炉体; 2. 支承装置; 3. 倾动机械

(1)静负荷 包括炉壳、炉衬、炉料重量等引起的负荷.在静负荷作用下,在炉壳的相应部位上产生薄壁应力.而在炉壳与其支承装置相联结的部位——所谓力传导区域则在转炉倾动时,外力对炉壳的作用使炉壳产生的局部应力出现复杂的情况。

(2)动负荷 包括装入废钢和刮渣时引起的冲击,及炉壳在旋转时由于加速和减速所产生的动力,它会在炉壳相应部位产生机械应力。

(3)炉壳受炉衬热膨胀影响产生的负荷 转炉炉衬材料的

热膨胀系数与炉壳钢板的热膨胀系数不同,炉衬的温度远比炉壳的温度高,所以炉衬的径向热膨胀也远比炉壳的径向热膨胀大.这样,在炉衬与炉壳间产生内压力,炉壳在这个内压力作用下产生热膨胀应力。

(4)炉壳温度分布不均匀引起的负荷 在转炉工作过程中,炉壳各部分工作状态不同,炉壳的温度也不同.炉帽上部接近高温炉气,受喷溅物和烟罩反射回来的辐射作用,故

此处温度最高. 炉身部分由于托圈的屏蔽作用, 使热不能直接散发到大气中, 加之这部分炉衬的严重蚀损, 故其温度也比较高. 上述情况说明, 炉壳是在较高的温度条件下工作, 则不仅在其高度方向, 而且在其圆周方向及半径方向都会存在温度梯度, 使炉壳各部分产生不同程度的热膨胀, 进而使炉壳产生热应力.

2. 炉壳应力分析

(1) 炉壳机械应力

转炉炉壳厚度远小于它的高度和直径, 属于薄壳结构. 从目前的情况来看, 炉壳应力的分析方法有理论分析计算方法和数值计算方法.

由于转炉炉壳是一薄壳容器, 用弹性力学的壳理论可以对炉壳的应力进行计算, 即先用无矩理论计算整个炉壳的薄膜应力(即一次应力), 然后用有矩理论对其几何边界处进行效应计算, 最后将薄膜应力和边界效应应力叠加, 即为整个炉壳的应力状态. 弹性力学计算应力的缺点是在几何连接处的应力误差较大, 计算极其繁琐, 如炉体上局部位置开孔(如有复吹孔存在), 弹性力学很难求解.

目前数值计算方法发展非常迅速, 用有限单元计算方法对转炉壳的机械应力进行分析计算, 可以得到较为理想的结果.

下面以某厂 300t 转炉为例分析炉壳的应力状况.

炉壳采用整体建模方案, 有限元网格分别采用板单元和实体单元, 炉壳上构造了托架及悬挂支撑的加强筋结构, 支撑约束采用边界元模拟炉壳与托圈的连接, 通过坐标变换可实现炉体 360°方位旋转. 模型确定炉口方向为 y 轴, 耳轴传动侧为 X 轴, 出钢口方向为 Z 轴. 图 1-5 为炉壳处于铅垂(吹炼)位置时炉壳机械应力的计算模型. 图 1-6 表明由于三点支撑造成应力沿炉体圆周分布不均, 在支点附近为三个高应力区、悬垂边为三个低应力区, 其间为六个中间过渡带. 以重力为主要负荷产生的应力一般都低于 20MPa.

(2) 炉壳温度应力

炉壳表面温度分布不均匀, 可通过实测数据建立温度场, 然后再用有限元法计算温度应力. 计算表明(图 1-7)在温度梯度大, 结构又不规则的区域都有较高的温度应力. 最大温度应力分布在炉底处, 在 200MPa 左右, 炉身直线段温度应力水平较低, 圆周应力和等效应力一般在 30~40MPa.

(3) 炉壳膨胀应力

炉衬在热态对炉壳产生膨胀压力, 在炉壳膨胀应力计算时要考虑耐火材料的物理特性及中间间隙(膨胀吸收系数)、炉壳与炉衬之间的不协调变形及不同刚度, 这就使计算变得复杂(图 1-8). 图 1-9 为炉壳第 19 层面(炉前支点处)膨胀应力沿炉高分布状态.

(4) 炉壳合成应力计算

将炉壳的机械应力、热应力及膨胀应力诸因素合成建立模型, 可求出诸因素作用的综合效果.

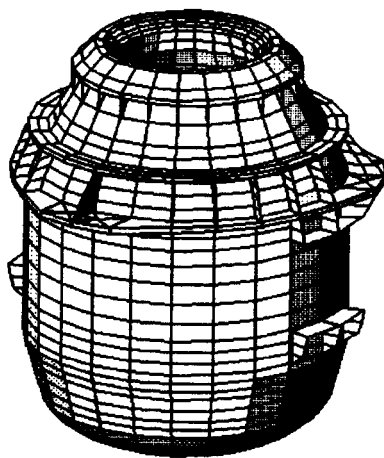


图 1-5 炉壳有限元计算基本网格图