

国家出版基金资助项目

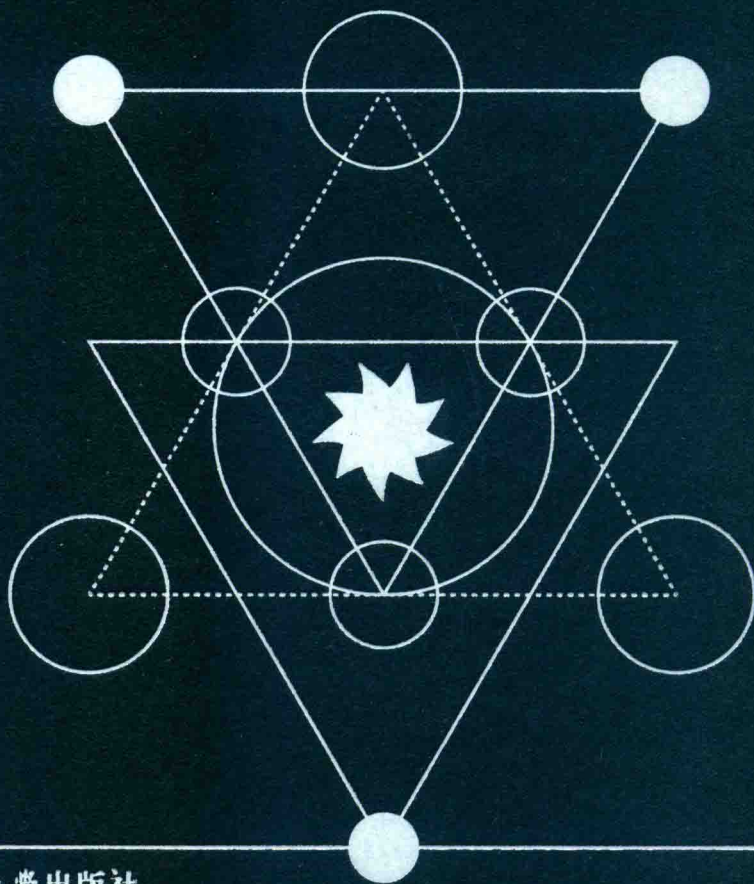
Metal

有色金属技术手册系列

有色金属炉窑设计手册

梅焯 周萍 主编

Handbook for Nonferrous Metal
Furnace and Kiln Design



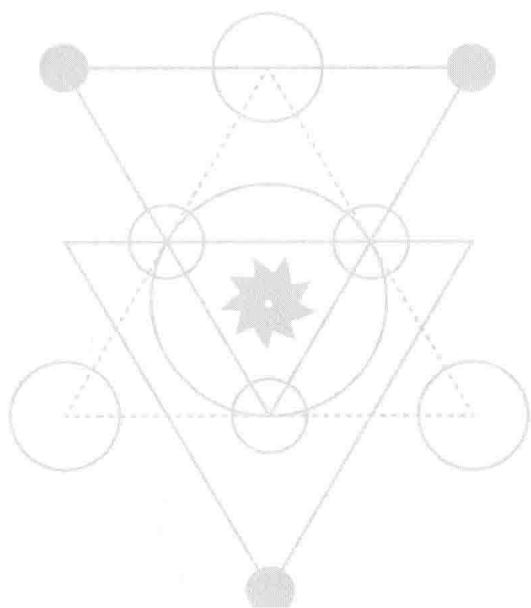
中南大学出版社

国家出版基金资助项目

有色金属炉窑设计手册

梅焱 周萍 主编

Handbook for Nonferrous Metal
Furnace and Kiln Design



中南大学出版社·长沙·

图书在版编目 (C I P) 数据

有色金属炉窑设计手册 / 梅焯, 周萍主编. --长沙:
中南大学出版社, 2018. 10
ISBN 978 - 7 - 5487 - 3434 - 5

I. ①有… II. ①梅… ②周… III. ①有色金属—工
业炉窑—设计—手册 IV. ①TK175 - 62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 220045 号

有色金属炉窑设计手册

梅焯 周萍 主编

-
- 责任编辑 史海燕
责任印制 易红卫
出版发行 中南大学出版社
社址: 长沙市麓山南路 邮编: 410083
发行科电话: 0731 - 88876770 传真: 0731 - 88710482
印 装 长沙超峰印刷有限公司
-

- 开 本 787 × 1092 1/16 印张 75 字数 2480 千字
版 次 2018 年 10 月第 1 版 2018 年 10 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 3434 - 5
定 价 386.00 元
-

图书出现印装问题, 请与经销商调换

编委会

主 编：梅 炽 周 萍

副主编：黄文华 曹珂菲 刘燕庭

编 委(按姓氏笔画排序)：

王 华	方建中	邓胜祥	艾元方	白 桦
刘雅锋	刘燕庭	闫红杰	闫 辉	杨晓东
李世轩	李 栋	李贺松	李 勇	余广松
汪大明	张乐如	张 岭	张振民	陈 卓
陈 萃	罗晓斌	金 培	周子民	周 俊
周 萍	郝小红	胡东华	胡忠东	黄文华
梅 炽	曹珂菲	崔大桦	傅志华	鲁志昂
简正柱	蔡 晖	熊家政	黎伟文	颜非亚
薄 钧				

参编单位



中南大学

长沙有色冶金设计研究院有限公司

中国瑞林工程技术有限公司

中国恩菲工程技术有限公司

苏州新光热能科技有限公司

株洲火炬工业炉有限责任公司

深圳市中金岭南有色金属股份有限公司

昆明理工大学

北京科技大学

贵阳铝镁设计研究院有限公司

沈阳铝镁设计研究院有限公司

铜陵有色金属集团控股有限公司

白银有色集团股份有限公司

中钢集团耐火材料有限公司

东北大学

编写审稿人员

章节	作者单位	作者	审稿
第1章	中南大学	梅炽、周萍	
第2章	昆明理工大学	胡建杭	王华
第3章	东北大学、中南大学	郭茂先、周萍	杨莺
第4章	中南大学	傅志华、周萍	马爱纯
第5章	北京科技大学、 中钢集团耐火材料有限公司	李勇、王继宝	程本军、薄钧
第6章	中国瑞林工程技术有限公司	罗晓斌、吕辉勇、刘涛	李大浪、王临江、 袁精华
第7章	中南大学	艾元方、傅志华	梅炽
第8章	中国瑞林工程技术有限公司 中南大学	袁精华、简正柱、 艾元方(8.9节)、 涂福炳(8.8节)	李茂、王临江、 黄文华
第9章	中国恩菲工程技术有限公司、 长沙有色冶金设计研究院有限公司	李栋、蔡晖	张振民、刘燕庭
第10章	长沙有色冶金设计研究院有限公司	胡东华	蔡晖
第11章	中国瑞林工程技术有限公司	刘八生、彭天照	袁精华、黄文华
第12章	中国瑞林工程技术有限公司	黄文华、彭天照	王临江、袁精华
第13章	长沙有色冶金设计研究院有限公司	陈艳梅	张晓惠
第14章	沈阳铝镁设计研究院有限公司 中南大学	吕博、白瑞升、周萍	杨光华
第15章	中南大学 中国瑞林工程技术有限公司 铜陵有色金属集团控股有限公司	陈卓、黄文华、周俊、袁精华	唐尊球、王临江
第16章	长沙有色冶金设计研究院有限公司	张岭	蔡晖

章节	作者单位	作者	审稿
第 17 章	苏州新长光热能科技有限公司、 长沙有色冶金设计研究院有限公司	余光松、齐翼龙	梅炽、白桦
第 18 章	中国恩菲工程技术有限公司	张振民、刘朝辉	高桂兰
第 19 章	中国瑞林工程技术有限公司	方建中、普宗祥、简正柱	程海帆、金培、 袁精华
第 20 章	中国恩菲工程技术有限公司、 长沙有色冶金设计研究院有限公司	崔大桦、何玉林、 刘燕庭、罗蜀乾	徐惠华、张振民、 蔡晖
第 21 章	中国瑞林工程技术有限公司	魏振、张妍、彭天照	金培、黄文华
第 22 章	长沙有色冶金设计研究院有限公司	陈萃	汪大明
第 23 章	深圳市中金岭南有色金属 股份有限公司 中南大学	蔡军林、谢锴	周萍、梅炽、 吴斌秀
第 24 章	中南大学	邓胜祥、周子民	梅炽
第 25 章	株洲火炬工业炉有限责任公司	李勇	孙阳春、鲁志昂
第 26 章	株洲火炬工业炉有限责任公司	李勇	孙阳春、熊家政
第 27 章	中南大学	闫红杰、周子民	周萍
第 28 章	中国恩菲工程技术有限公司	曹珂菲、朱让贤	张振民
第 29 章	贵阳铝镁设计研究院有限公司、 中南大学、沈阳铝镁设计研究院有限公司	李贺松(执笔)、阮绍勇、 刘伟、王富强	杨涛、周东方
第 30 章	苏州新长光热能科技有限公司	闫辉、李浩、罗文祥	梅炽
第 31 章	苏州新长光热能科技有限公司	陈景阁、李世轩、谢晓燕	梅炽
第 32 章			
32.1	中国恩菲工程技术有限公司、中南大学	冯双杰、胡立琼、闫红杰	张振民
32.2	长沙有色冶金设计研究院有限公司	刘燕庭	孙月强
32.3	中国恩菲工程技术有限公司	曹珂菲、许欣	张振民
32.4	白银有色集团股份有限公司	李康建	胡忠东
32.5	中国瑞林工程技术有限公司	胡俊、简正柱、刘八生	陆军、金培、 黄文华
32.6	中国恩菲工程技术有限公司	冯晓梅、邹传谷、许欣	张振民
32.7	中国恩菲工程技术有限公司	郝小红	张振民
附录	中南大学	蒋绍坚、周萍、李茂、马骥	梅炽

序一

Preface

有色金属是国民经济重要的基础材料，也是高新技术和国家安全不可或缺的支撑材料。新世纪以来，我国有色金属工业持续快速发展，已成为世界有色金属生产大国、消费大国和进出口贸易大国，为世界有色金属工业技术进步和推动全球有色金属工业持续发展做出了积极贡献。

有色金属炉窑是有色金属生产的关键设备，是推动有色金属行业节能减排的重要环节。新世纪以来，随着有色行业的产业升级，有色炉窑的技术进步取得了显著成效，特别是炉窑的大型化、机械化、自动化、高效化等居世界先进水平，有的技术、设备和标准已走向世界。

随着有色金属炉窑技术的发展，有色行业迫切需要一部新型实用设计手册，全面提升设计、科研、生产管理人员的技术水平。《有色金属炉窑设计手册》的适时出版，对有色金属工业的技术进步和高质量发展必将起到指导和引领作用。该手册由行业内设计、科研、生产、制造和高校等 15 家单位的经验丰富的专家集体编写，充分体现了全行业关于炉窑方面的集体智慧和辛勤努力。该手册全面系统总结了有关技术数据，充分反映了有色行业技术进步的最新成果，引领有色冶金炉窑设计方法朝着大数据、云计算和智能化为特征的多目标、整体优化方向发展。该手册既是有色金属行业技术文库中的一部巨著，也是一部深受广大技术人员和高校师生欢迎的实用方便的工具书。

衷心感谢全体编写和出版人员为此付出的辛勤劳动。

康戎

2018年8月

序二

Preface

面对资源紧缺、能源危机、环境污染的严峻挑战，能耗高、环境污染严重的有色金属炉窑引起了有色金属行业的高度关注。不断提高有色金属炉窑的设计水平、推进设计创新是我国有色金属行业科技工作者的光荣使命。

有色金属炉窑品种繁多，用户分散，国内外对其设计方法的研究与设计资料的积累不够系统与完善。中南大学组织了有色金属行业八十余名专家、学者，在1999年出版的《有色冶金炉设计手册》的基础上，引入了新的设计方法、增加了新的炉型、补充与更新了大量生产实践数据，历时6年，完成了《有色金属炉窑设计手册》的编写工作。该书的出版确是我国有色金属领域的一件喜事，值得祝贺！

值得特别指出的是，《有色金属炉窑设计手册》在设计内容、设计目标以及设计方法上体现了以下重要特点：

1) 该手册由基础篇、技术应用篇及设计篇三个部分组成，从炉窑热工、材料及结构等学科基础入手，结合最新标准和技术创新，介绍了30种有色金属炉窑的结构、设计计算方法与技术经济指标。

2) 推动有色金属炉窑的设计方法由经验法、综合热工分析法，朝着多相多场耦合仿真—优化设计方法的方向发展。

3) 倡导有色金属行业的绿色发展，增加了有色金属生产污染物排放标准的相关内容，明确提出要以高产率、高质量、高寿命、低污染、低能耗（“三高两低”）整体优化为设计目标。

4) 该手册体现了集成性、综合性、严谨性和创新性，突出了新技术、新设备、新材料、新指标、新标准，是对当代有色金属炉窑设计理念和前沿技术的诠释。

我相信，《有色金属炉窑设计手册》的面世必将加速我国有色金属炉窑技术的创新与发展，在促进我国有色金属工业的绿色发展与信息化进程中发挥重要的推动作用。再次祝贺《有色金属炉窑设计手册》的出版。

黄伯云

2018年8月

前言

Foreword

有色金属炉窑是有色金属工业生产的主要设备，也是能耗大户和环境污染的主要来源之一。炉窑的科学设计与操作是实现有色冶金与加工过程“三高两低”（高产率、高质量、高寿命、低能耗、低污染）多目标整体优化的重要保障，也是实现有色金属行业绿色发展的有效途径。

本手册由国内有色金属行业的设计、研究、生产制造部门及有关高等院校具有丰富经验的炉窑设计专家集体编写，试图以“三高两低”整体优化为目标，引入多物理场耦合仿真优化设计手段，总结国内外特别是国内有色金属炉窑的设计与操作经验，提出一套比较合理而系统的设计计算方法，收集整理出一些与之配套的、经过生产实践检验的经验数据和技术参数，以供设计、研究及教学人员参考。

本手册在《有色冶金炉设计手册》（冶金工业出版社 1999 年版）的基础上做了比较多的增订和修改。编入本手册的冶金炉窑种类增加了有色金属材料加工的炉窑，故对书名进行了相应更改。在某些章节中尽可能多地展示了多物理场耦合仿真方法，这将引领有色金属炉窑设计方法朝着集成大数据和云计算的多目标整体优化的方向发展。对于当前很少使用的炉型，此次编写中已将相关内容删除。对于能反映有色金属炉窑某些发展趋势的新型炉窑的相关内容进行了整理与调整。由于多方面的原因，目前收集现场生产数据比较困难，对于一些可能变化较快的现场数据，本手册只能提供大致范围的参考。

本手册编委会对《有色冶金炉设计手册》全体作者先期奠基性的工作和贡献，表示衷心的感谢和怀念。编委会真诚地感谢各编委所在单位对本手册的编写工作给予的多方面的支持。衷心感谢众多企业热心为本手册提供技术资料与工作成果，感谢国家高技术研究发展计划项目的支持。特别需要指出的是，本手册的最终出版，应该感谢中南大学出版社及中南大学能源科学与工程学院热工设备全息仿真与可视化研究所伍东玲、朱蓉甲、李家栋、付佩等研究生们的共同努力。

由于时间和水平的原由，书中肯定还有不少问题和不足之处，敬希读者批评指正。

本书中未标注的气体状态均为标态。

《有色金属炉窑设计手册》编委会

目录

Contents

- 第1章 绪论 / 1
 - 1.1 有色金属炉窑分类 / 3
 - 1.2 炉窑热工过程与炉窑热工系统 / 3
 - 1.3 炉窑设计研究方法——从经验分析到全息仿真试验 / 4
 - 1.4 有色金属炉窑数学模型及一般建模步骤 / 5
 - 1.5 炉窑设计多目标整体优化 / 6
- 第2章 流体流动及其阻力计算 / 9
 - 2.1 流体流动基本方程 / 11
 - 2.1.1 流体流动类型 / 11
 - 2.1.2 流体连续性方程 / 12
 - 2.1.3 流体能量方程 / 12
 - 2.2 流体流动阻力计算 / 13
 - 2.2.1 沿程阻力 / 13
 - 2.2.2 局部阻力 / 16
 - 2.3 流体输送和排烟管道系统设计计算 / 16
 - 2.3.1 管道系统布置 / 16
 - 2.3.2 管路系统阻力计算 / 19
 - 2.3.3 管道及烟道截面尺寸确定 / 23
 - 2.4 炉子供气及排烟装置 / 29
 - 2.4.1 风机的选择及计算 / 29
 - 2.4.2 烟囱计算 / 32
- 第3章 传热与热平衡计算 / 37
 - 3.1 概述 / 39
 - 3.2 稳态热传导 / 39
 - 3.2.1 平壁导热 / 39
 - 3.2.2 圆筒壁导热 / 39
 - 3.2.3 球壁导热 / 40
 - 3.3 对流传热 / 40
 - 3.3.1 对流传热量的一般计算式 / 40
 - 3.3.2 在无限空间中的自然对流传热 / 40
 - 3.3.3 在有限空间中的自然对流传热 / 41
 - 3.3.4 在管道中强制紊流时的换热 / 41
 - 3.3.5 流体在管道中层流流动及过渡状态时的换热 / 45
 - 3.3.6 金属熔体的换热 / 46
 - 3.3.7 流体横向流过单管及管群时的换热 / 47
 - 3.3.8 流体沿平板流动时的对流传热 / 49
 - 3.3.9 散料层内的对流传热 / 49
 - 3.3.10 流态化层的对流传热 / 50
 - 3.3.11 水蒸气冷凝及水沸腾时的换热 / 51
 - 3.4 辐射传热 / 51

- 3.4.1 物体的热辐射 / 51
 - 3.4.2 封闭体系内固体表面间的辐射热交换 / 59
 - 3.4.3 气体或火焰与固体表面的辐射热交换 / 60
 - 3.4.4 平均温度和平均辐射温差 / 61
 - 3.4.5 辐射传热系数 / 61
 - 3.5 稳态综合传热 / 63
 - 3.5.1 气体通过器壁向另一气体的传热 / 63
 - 3.5.2 火焰炉炉内综合传热 / 64
 - 3.5.3 竖炉热交换 / 65
 - 3.6 炉子热平衡计算 / 66
 - 3.6.1 热平衡方程 / 66
 - 3.6.2 热收入计算 / 66
 - 3.6.3 热支出计算 / 67
- 第4章 燃料及燃烧计算 / 75**
- 4.1 常用燃料的特性 / 77
 - 4.1.1 固体燃料 / 77
 - 4.1.2 液体燃料 / 80
 - 4.1.3 气体燃料 / 85
 - 4.2 燃烧计算 / 89
 - 4.2.1 燃料组成的表示方法 / 89
 - 4.2.2 燃料发热量计算 / 91
 - 4.2.3 燃料完全燃烧时所需空气量及燃烧产物体积、成分和密度的计算 / 91
 - 4.2.4 燃烧温度计算 / 93
 - 4.2.5 空气系数 α 的计算 / 95
 - 4.2.6 计算实例 / 95
- 第5章 筑炉材料及砌筑基本要求 / 97**
- 5.1 耐火材料的分类、组成及性质 / 99
 - 5.1.1 耐火材料分类 / 99
 - 5.1.2 耐火材料的宏观组织结构 / 101
 - 5.1.3 耐火材料的主要性质 / 101
 - 5.1.4 有色冶金炉常用耐火砖主要性能指标 / 107
 - 5.2 有色冶金炉用高级耐火材料简介 / 112
 - 5.2.1 碳化硅质耐火砖 / 112
 - 5.2.2 电熔镁砖 / 114
 - 5.2.3 氧化镁-氧化铬系耐火砖 / 114
 - 5.2.4 氧化镁-尖晶石系耐火砖 / 117
 - 5.2.5 铬刚玉复合尖晶石耐火砖 / 118
 - 5.3 有色冶金炉常用隔热砖及隔热材料 / 118
 - 5.3.1 各种隔热耐火制品的分类与使用 / 118
 - 5.3.2 各种隔热耐火制品的使用温度范围 / 119
 - 5.3.3 常用隔热耐火砖性能指标 / 120
 - 5.3.4 耐火纤维制品 / 120
 - 5.3.5 岩棉和矿渣棉 / 122
 - 5.3.6 膨胀珍珠岩 / 122
 - 5.4 通用耐火砖形状与尺寸 / 123
 - 5.5 不定型耐火材料 / 125
 - 5.5.1 耐火浇注料 / 125
 - 5.5.2 耐火可塑料 / 125
 - 5.5.3 耐火捣打料 / 125
 - 5.6 砌体设计的基本规定 / 125
 - 5.7 不定型耐火材料结构设计 / 137
 - 5.7.1 耐火材料衬体设计 / 137
 - 5.7.2 耐火浇注料衬体设计 / 138
 - 5.7.3 耐火喷涂料衬体设计 / 140
 - 5.7.4 烘炉及其要求 / 140

- 5.8 炉窑设计与耐火材料衬里的关系 / 142
- 5.8.1 影响炉衬使用寿命的常见因素 / 142
- 5.8.2 炉窑的设计条件与耐火材料特性关系 / 142
- 5.8.3 炉体砌筑与选择耐火材料使用性能的关系 / 143
- 第6章 金属材料与钢结构设计 / 145**
- 6.1 材料及其特性 / 147
- 6.1.1 材料的选用 / 147
- 6.1.2 钢材的许用应力 $[\sigma]$ / 147
- 6.1.3 常用型钢组合截面特性表及拱脚梁截面系数 / 154
- 6.1.4 型钢弯曲半径及钻孔尺寸 / 167
- 6.2 荷载及其分析 / 171
- 6.2.1 荷载分类 / 171
- 6.2.2 球形拱顶水平推力 / 171
- 6.2.3 锥形拱顶水平推力 / 171
- 6.2.4 圆柱形拱顶水平推力 / 172
- 6.2.5 炉料侧压力 / 172
- 6.2.6 圆柱形拱顶炉子立柱受力分析 / 172
- 6.3 板 / 174
- 6.3.1 截面验算 / 174
- 6.3.2 平板弯矩及挠度计算 / 174
- 6.3.3 查表确定平板厚度 / 179
- 6.4 梁 / 181
- 6.4.1 梁的截面计算 / 181
- 6.4.2 简支梁截面的选用 / 182
- 6.4.3 结构静力及单跨刚架弯矩计算 / 185
- 6.5 柱 / 191
- 6.5.1 柱的分类和长细比 / 191
- 6.5.2 中心受压柱计算 / 191
- 6.5.3 查表选用柱的截面 / 196
- 6.6 柱脚 / 197
- 6.6.1 底板平面尺寸 / 197
- 6.6.2 底板厚度 / 198
- 6.6.3 靴梁的构造尺寸 / 200
- 6.6.4 基础螺栓 / 200
- 6.7 几种常用构件的计算 / 200
- 6.7.1 拉杆计算 / 200
- 6.7.2 圆环计算(环形箍) / 201
- 6.7.3 连续水平圆弧梁计算 / 202
- 6.7.4 支承托圈计算 / 202
- 6.7.5 支架计算 / 204
- 6.8 连接计算 / 207
- 6.8.1 焊接计算 / 207
- 6.8.2 螺栓连接 / 208
- 6.9 钢结构应力的数值模拟分析 / 210
- 6.9.1 闪速熔炼炉炉体框架分析 / 210
- 6.9.2 结果分析 / 211
- 第7章 燃烧技术与装置 / 213**
- 7.1 原煤层燃装置 / 215
- 7.1.1 手工加煤层燃室 / 215
- 7.1.2 机械加煤层燃室 / 219
- 7.2 煤粉燃烧器 / 220
- 7.2.1 煤粉燃烧器计算 / 220
- 7.2.2 常用煤粉燃烧器 / 221
- 7.3 燃油烧嘴 / 224
- 7.3.1 燃油烧嘴的类型及其技术特性 / 224
- 7.3.2 燃油烧嘴设计计算 / 226
- 7.3.3 常用低压油烧嘴 / 228
- 7.3.4 常用高压油烧嘴 / 234
- 7.3.5 常用离心式机械油雾化烧嘴 / 241

- 7.3.6 转杯式油烧嘴 / 243
- 7.3.7 燃烧机 / 245
- 7.4 有焰煤气烧嘴 / 245
 - 7.4.1 有焰煤气烧嘴计算 / 246
 - 7.4.2 常用有焰煤气烧嘴 / 247
 - 7.4.3 常用有焰天然气烧嘴 / 257
 - 7.4.4 液化石油气烧嘴 / 262
- 7.5 无焰燃气烧嘴 / 263
 - 7.5.1 煤气喷射式烧嘴 / 264
 - 7.5.2 天然气喷射式烧嘴 / 265
- 7.6 其他常用燃烧器 / 266
 - 7.6.1 自身预热式燃烧器 / 266
 - 7.6.2 高效蓄热式燃烧器 / 268
 - 7.6.3 低氧弥散燃烧器 / 276
 - 7.6.4 GRYQ 型高温燃烧器 / 277
 - 7.6.5 稀氧燃烧器 / 280
 - 7.6.6 水煤浆燃烧器 / 280
- 第 8 章 换热器 / 283**
 - 8.1 换热器分类及选型 / 285
 - 8.1.1 换热器分类 / 285
 - 8.1.2 换热器选型 / 286
 - 8.2 换热器的结构设计 / 286
 - 8.2.1 流道安排及流动方式 / 286
 - 8.2.2 换热器材质选择 / 287
 - 8.2.3 热膨胀设计 / 289
 - 8.3 表面式换热器的热计算 / 293
 - 8.3.1 基本计算公式 / 293
 - 8.3.2 总传热系数 K / 294
 - 8.3.3 对数平均温差 Δt_{LM} / 296
 - 8.3.4 计算方法和步骤 / 297
 - 8.3.5 壁温计算 / 300
 - 8.3.6 流体出口温度验算 / 301
 - 8.4 列管式换热器 / 301
 - 8.4.1 构造 / 301
 - 8.4.2 计算特点 / 305
 - 8.4.3 计算实例 / 305
 - 8.5 辐射换热器 / 310
 - 8.5.1 构造 / 310
 - 8.5.2 计算特点 / 312
 - 8.5.3 环缝式辐射换热器计算实例 / 315
 - 8.5.4 管组式辐射换热器计算实例 / 320
 - 8.6 辐射-对流换热器 / 323
 - 8.6.1 构造简述 / 323
 - 8.6.2 计算特点 / 325
 - 8.7 喷流换热器 / 325
 - 8.8 热管换热器 / 328
 - 8.8.1 热管换热器类型 / 328
 - 8.8.2 几何参数 / 328
 - 8.8.3 热计算 / 331
 - 8.8.4 计算实例 / 334
 - 8.8.5 典型热管换热器技术参数 / 338
 - 8.9 蓄热式陶瓷换热器 / 339
 - 8.9.1 陶瓷蓄热体规格与技术性能指标 / 339
 - 8.9.2 蓄热式陶瓷换热器综合传热系数 / 342
- 第 9 章 水冷装置 / 343**
 - 9.1 水套冷却装置 / 345
 - 9.1.1 常用冷却水套类型 / 345
 - 9.1.2 铜水套 / 345
 - 9.1.3 其他类型的水套 / 350
 - 9.1.4 水套的安全使用 / 350
 - 9.1.5 水套的其他优点 / 351
 - 9.2 汽化冷却 / 351
 - 9.2.1 汽化冷却的热力计算 / 351
 - 9.2.2 汽化冷却循环方式与循环系统的确定 / 352

- 9.2.3 汽化冷却装置的选择
和布置 / 353
- 9.2.4 供水和炉水的水质
要求 / 358
- 9.2.5 自然水循环计算 / 358
- 9.2.6 强度计算 / 366
- 9.2.7 水压试验 / 370
- 第 10 章 余热锅炉 / 371**
- 10.1 特点 / 373
- 10.1.1 积灰及防止 / 373
- 10.1.2 腐蚀及防止 / 375
- 10.1.3 磨损及减少磨损的
措施 / 376
- 10.1.4 负荷的不稳定问题及其
对策 / 376
- 10.2 设计方案的确定 / 377
- 10.3 结构设计 / 377
- 10.3.1 结构类型 / 377
- 10.3.2 结构设计原则 / 378
- 10.3.3 构件 / 378
- 10.4 热力计算 / 379
- 10.4.1 烟气的热力计算 / 380
- 10.4.2 热平衡计算 / 380
- 10.4.3 辐射受热面的设计与
计算 / 381
- 10.4.4 对流受热面的设计与
计算 / 385
- 10.4.5 余热锅炉热力设计
实例 / 388
- 10.5 多场耦合仿真与结构优化 / 396
- 10.5.1 物理模型 / 396
- 10.5.2 多场耦合数学模型 / 396
- 10.5.3 结果分析与讨论 / 397
- 10.5.4 结构参数优化设计 / 397
- 10.6 受压元件的强度计算 / 398
- 10.6.1 许用应力 / 398
- 10.6.2 锅筒、集箱筒体的强度
计算 / 399
- 10.6.3 凸形封头的强度计算 / 402
- 10.6.4 平端盖及盖板的强度
计算 / 403
- 10.7 水循环 / 404
- 10.7.1 水循环的选择 / 404
- 10.7.2 对水质的要求 / 404
- 10.7.3 用水量 / 404
- 10.7.4 水动力计算 / 404
- 10.8 主要附件及仪表 / 405
- 10.9 辅助设备与配置 / 406
- 10.10 国内部分有色冶金炉余热锅炉
实例 / 407
- 第 11 章 回转干燥筒 / 411**
- 11.1 分类及结构特征 / 413
- 11.1.1 分类 / 413
- 11.1.2 结构特征 / 413
- 11.2 干燥过程基本计算 / 414
- 11.2.1 干燥过程中被脱除的
水量 / 414
- 11.2.2 干燥过程中气体(干燥介质)
的消耗量 / 414
- 11.2.3 干燥过程的附加热消耗
/ 414
- 11.2.4 在 $I-d$ 图上确定理论干燥
过程各参数 / 415
- 11.2.5 在 $I-d$ 图上求解实际干燥
过程 / 416
- 11.2.6 工程计算用 $I-d$ 图 / 416
- 11.3 主要尺寸的确定 / 420
- 11.3.1 工作容积 / 420
- 11.3.2 直径 / 420
- 11.3.3 长度 / 421

- 11.3.4 长径比 / 421
- 11.4 运转参数 / 421
 - 11.4.1 转速和倾斜度的确定 / 421
 - 11.4.2 物料平均停留时间 / 422
 - 11.4.3 转动功率 / 422
- 11.5 燃烧室的计算 / 422
 - 11.5.1 燃烧室的容积 / 422
 - 11.5.2 燃烧室主要尺寸的确定 / 423
- 11.6 蒸汽干燥机 / 423
- 11.7 计算实例 / 424
- 11.8 主要结构参数及技术性能 / 429
 - 11.8.1 主要结构参数及技术性能 / 429
 - 11.8.2 部分标准产品结构参数及性能 / 431
 - 11.8.3 部分标准产品外形尺寸 / 432
- 第12章 回转窑 / 433**
 - 12.1 生产能力的计算 / 436
 - 12.1.1 按窑内炉料流通能力计算 / 436
 - 12.1.2 按正常排烟能力计算 / 437
 - 12.1.3 按传热能力计算 / 437
 - 12.2 运转参数的确定 / 438
 - 12.2.1 斜度(或倾斜角) / 438
 - 12.2.2 转速 / 438
 - 12.2.3 炉料在窑内的停留时间 / 439
 - 12.3 筒体主要尺寸的计算 / 439
 - 12.3.1 窑有效容积($V_{\text{窑}}$)或工作表面积($F_{\text{窑}}$) / 439
 - 12.3.2 筒体直径的计算 / 440
 - 12.3.3 筒体长度的计算 / 440
 - 12.3.4 有效长径比 / 440
 - 12.4 支承装置及回转体的设计与计算 / 441
 - 12.4.1 支座数的确定 / 441
 - 12.4.2 筒体 / 442
 - 12.4.3 窑内热交换器 / 444
 - 12.4.4 滚圈 / 446
 - 12.4.5 托轮 / 449
 - 12.4.6 挡轮 / 451
 - 12.5 窑头、窑尾及密封装置的选择 / 452
 - 12.5.1 窑头及燃烧装置 / 452
 - 12.5.2 窑尾沉降室 / 453
 - 12.5.3 密封装置 / 453
 - 12.6 传动装置及功率计算 / 454
 - 12.6.1 传动装置选择 / 454
 - 12.6.2 主传动功率 / 455
 - 12.6.3 辅助传动功率 / 455
 - 12.7 窑衬 / 455
 - 12.7.1 窑衬的砌筑 / 455
 - 12.7.2 耐火材料的选择 / 456
 - 12.7.3 砖型选择 / 457
 - 12.7.4 烘窑升温注意事项 / 457
 - 12.8 计算实例 / 457
 - 12.8.1 已知条件 / 457
 - 12.8.2 冶金计算结果 / 458
 - 12.8.3 回转窑直径和长度的确定 / 462
 - 12.8.4 筒体主要零部件的计算 / 463
 - 12.8.5 窑头、窑尾及其密封 / 464
 - 12.8.6 窑衬耐火材料的选择及计算 / 465
 - 12.8.7 热平衡 / 465
 - 12.8.8 回转窑电动机功率计算及选择 / 466
 - 12.8.9 $\phi 2.4 \text{ m} \times 45 \text{ m}$ 锌浸出渣挥发回转窑主要结构参数与技术性能 / 466

- 12.9 有色冶金用回转窑主要结构参数
及技术性能 / 468
- 第 13 章 流态化焙烧炉 / 471**
- 13.1 流态化床的操作气流速度与单位
生产率 / 473
- 13.1.1 操作气流速度($\omega_{\text{操作}}$) / 473
- 13.1.2 床能率 / 475
- 13.2 炉子主要尺寸的确定 / 476
- 13.2.1 床面积($F_{\text{床}}$) / 476
- 13.2.2 流化层高度($H_{\text{层}}$) / 476
- 13.2.3 炉膛面积($F_{\text{膛}}$) / 478
- 13.2.4 炉膛有效高度($H_{\text{膛}}$) / 478
- 13.2.5 炉腹角(θ) / 479
- 13.3 气体分布板 / 479
- 13.3.1 气体分布板孔眼率($b_{\text{孔}}$)
/ 479
- 13.3.2 床层阻力 / 479
- 13.3.3 风帽 / 480
- 13.3.4 花板及耐火衬垫 / 482
- 13.4 其他部件 / 483
- 13.4.1 风箱及预分布器 / 483
- 13.4.2 排热装置 / 483
- 13.4.3 加料方式及装置 / 485
- 13.4.4 排料口 / 488
- 13.4.5 排烟口 / 488
- 13.4.6 开炉烧嘴 / 490
- 13.5 砖体 / 490
- 13.5.1 球形拱顶的计算 / 491
- 13.5.2 球形拱顶的捣制 / 491
- 13.6 流态化焙烧炉外保温 / 491
- 13.6.1 保温材料的条件 / 491
- 13.6.2 保温层厚度计算 / 492
- 13.7 计算实例 / 492
- 13.7.1 已知条件 / 492
- 13.7.2 冶金计算结果 / 493
- 13.7.3 操作气流速度与床能率
/ 495
- 13.7.4 炉子主要尺寸的确定 / 496
- 13.7.5 气体分布板 / 497
- 13.7.6 其他部件 / 497
- 13.7.7 砖体 / 498
- 13.7.8 炉子热平衡 / 499
- 13.7.9 炉子主要结构参数及技术
性能与炉体总图 / 500
- 13.8 国内外流态化焙烧炉主要结构参数
及技术经济指标 / 502
- 13.8.1 国内流态化焙烧炉主要结构
参数及技术经济指标 / 502
- 13.8.2 国外流态化焙烧炉主要结构
参数及技术经济指标 / 504
- 第 14 章 稀相流态化焙烧炉 / 507**
- 14.1 氢氧化铝流态化焙烧的工艺与
炉型 / 509
- 14.1.1 焙烧工艺 / 509
- 14.1.2 焙烧炉型 / 510
- 14.2 主要设备尺寸确定 / 513
- 14.2.1 主反应炉 / 513
- 14.2.2 文丘里干燥器 / 516
- 14.2.3 旋风分离器 / 516
- 14.3 主要部件 / 517
- 14.3.1 螺旋给料机 / 517
- 14.3.2 鲁奇型两段流态化
冷却器 / 518
- 14.3.3 旋风筒的排料阀 / 518
- 14.4 耐火内衬材料 / 520
- 14.4.1 概况 / 520
- 14.4.2 炉衬用耐火材料和锚固件
/ 520
- 14.4.3 内衬 / 524
- 14.4.4 烘炉曲线 / 526