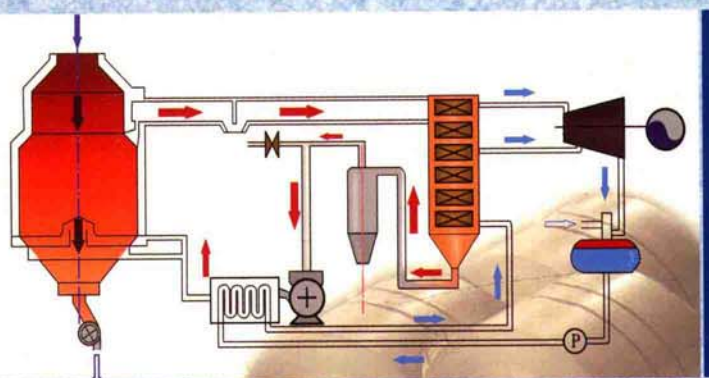


“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代冶金与材料过程工程丛书

烧结余热高效回收关键理论 及应用



董 辉 冯军胜 张 晟◎著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

现代冶金与材料过程工程丛书

烧结余热高效回收关键 理论及应用

董 辉 冯军胜 张 晟 著



科学出版社

北 京

前 言

烧结过程余热资源高效回收与利用是降低我国钢铁企业烧结工序能耗的重要方向与途径之一。本人及所在团队,在蔡九菊教授带领下,自2005年以来,一直致力于烧结合余热回收的研究。其中,2005年,提出了烧结合余热分级回收与梯级利用技术,开展了相关的理论和技术攻关,并借助企业技术改造之机将其逐步实施。2007年,提出了烧结合矿余热竖罐式回收技术,并于2010年获得国内首个相关专利;借助国家自然科学基金项目和辽宁省科学技术计划项目,提出了一整套确定余热回收竖罐以及余热锅炉的结构和操作参数基础理论,探索了强化竖罐内气固换热与锅炉内气汽、气水换热及降低竖罐内料层阻力的关键技术。

本人将10余年来的研究成果有机结合,以图书的形式呈现给大家,供学术界和工程界人士参考,真诚希望得到相关领域专家的共鸣和支持,因为一项技术从理论到形成技术再到工程化推广,必须依赖大批理论研究人员、技术研发人员几年、十几年的共同努力;也真诚希望本书起到抛砖引玉的作用,以促进我国烧结合余热回收与利用的大力发展。

本书中的绝大部分工作,历经整十届硕士或博士研究生共同努力,最后才形成了一套系统内容。本书主要由本人及研究团队成员共同撰写。其中,第1章由本人执笔,第2章由储满生和柳政根执笔,第3章由高建业和冯军胜执笔,第4章、第5章由冯军胜和高建业执笔,第6章由张晟和常弘执笔,第7章由贾冯睿和李含竹执笔,第8章由桂智勇和李慧梅执笔,第9章由高建业执笔。

在此真诚感谢我的导师蔡九菊教授,是恩师把我带上了这条丰富多彩而又充满挑战的探索之路。同时真诚感谢张琦、王爱华、韩宗伟、李国军等同事,是他们给予了我莫大支持。

十年磨一剑,本书得以出版,离不开研究团队内一届又一届学生孜孜不倦的付出与努力。非常感谢我的研究生们,科研道路上的每一步都是新的挑战与磨炼,是他们给了我莫大的支持,给予我充满活力的科研环境、真诚的帮助及富有创造力的启示,有他们的陪伴,我就有了无穷前行探索的动力。

由于本人水平有限,疏漏之处在所难免,望同行和读者批评、指正。

董 辉

2018年3月

目 录

《现代冶金与材料过程工程丛书》序

前言

第 1 章 概述	1
1.1 烧结矿余热资源的组成及特点	1
1.1.1 测试对象、体系内容与方法	1
1.1.2 热工测试结果与分析	3
1.2 烧结过程余热资源回收利用技术进步与展望	8
1.2.1 国外烧结余热回收利用技术发展状况	9
1.2.2 国内烧结余热回收利用技术发展状况	12
1.2.3 烧结余热回收与利用技术发展途径	17
1.3 烧结余热回收关键科学问题与技术问题的凝练	21
第 2 章 烧结基本原理	23
2.1 铁矿烧结发展状况	23
2.2 烧结过程	24
2.3 烧结过程主要反应及固结机理	28
2.3.1 燃烧反应	28
2.3.2 水分的蒸发和凝结	30
2.3.3 碳酸盐分解	30
2.3.4 铁氧化物的分解还原和氧化	31
2.3.5 有害杂质的去除	32
2.3.6 固相反应	33
2.3.7 液相黏结及基本液相体系	34
2.3.8 烧结矿冷凝固结	38
2.3.9 烧结矿的矿物组成及结构	39
2.4 烧结矿质量指标	40
2.4.1 烧结矿强度和粒度	40
2.4.2 烧结矿冶金性能	41
2.4.3 碱度	42
2.5 成熟应用的烧结工艺技术	43

2.5.1 低硅高还原性烧结矿技术	43
2.5.2 低碳厚料层烧结技术	45
2.5.3 小球团烧结法	46
2.5.4 烧结机偏析布料技术	48
2.6 烧结新技术进展及应用	49
2.6.1 镶嵌式烧结法	49
2.6.2 复合造块法	50
2.6.3 涂层制粒技术	52
2.6.4 烧结喷吹氢系气体燃料技术	53
2.7 铁矿烧结的发展趋势	56
第3章 烧结矿床层内填充特性及气体流动的实验研究	58
3.1 烧结矿层填充特性的研究	58
3.1.1 烧结矿形状因子的研究	58
3.1.2 烧结矿床层内空隙率分布的研究	61
3.2 烧结矿床层内流动过程分析	66
3.3 烧结矿床层内气体流动状态的判定	67
3.3.1 颗粒床层内的雷诺数	67
3.3.2 实验原理	68
3.3.3 实验装置	69
3.3.4 实验过程	70
3.3.5 实验结果与讨论	71
3.4 烧结矿床层内气流压降实验关联式的确定	76
3.4.1 修正 Ergun 方程	76
3.4.2 颗粒摩擦因子	79
3.4.3 无量纲化床层阻力关联式的建立	82
第4章 烧结矿床层内气固传热实验研究	91
4.1 烧结矿床层内气固传热过程分析	91
4.1.1 烧结矿床层内的导热过程	91
4.1.2 烧结矿床层内的对流传热过程	92
4.1.3 烧结矿床层内的辐射传热过程	92
4.2 烧结矿床层内气固传热过程实验研究	92
4.2.1 床层内气固传热系数公式推导	93
4.2.2 床层内气固焓传递系数公式推导	95
4.2.3 实验装置与过程	101

4.2.4 实验结果与分析	104
4.3 烧结矿床层内气固传热过程试验研究	112
4.3.1 实验内容与目的	112
4.3.2 实验装置与过程	113
4.3.3 实验结果与分析	117
第5章 烧结余热回收竖罐内流动与传热数值计算及应用	120
5.1 物理模型及其基本假设	120
5.2 竖罐内气固传热数学模型	122
5.2.1 多孔介质模型	122
5.2.2 竖罐内流动与传热基本方程	124
5.2.3 竖罐内气体流动模型	130
5.3 网格划分及边界条件	131
5.3.1 网格划分	131
5.3.2 边界条件的设置	132
5.4 模型计算方法	133
5.4.1 模型计算软件的选择	133
5.4.2 数值离散方法的选择	134
5.4.3 SIMPLE 算法	136
5.5 模型参数 UDF	137
5.5.1 UDF 的编写基础	137
5.5.2 UDF 宏的选取与定义	138
5.6 模型可靠性验证及分析	139
5.6.1 模型网格的无关性验证	139
5.6.2 模型的可靠性验证	140
5.7 烧结矿竖罐内气固传热过程数值计算	142
5.7.1 某一工况下模拟计算结果分析	142
5.7.2 主要影响因素及其影响规律	148
5.8 竖罐适宜热工参数的确定	157
5.8.1 竖罐适宜热工参数的判据	157
5.8.2 试验设计方法的确定	160
5.8.3 试验方案的确定	162
5.8.4 单罐条件下竖罐适宜结构参数和操作参数的确定	168
5.8.5 双罐条件下竖罐适宜结构参数和操作参数的确定	170

第 6 章 环冷模式下烧结矿床层内流动和传热数值计算及其应用	174
6.1 环冷机内气固传热过程数值计算模型的建立	174
6.1.1 模型建立基本流程	174
6.1.2 环冷机内传热过程研究方法的确定	174
6.1.3 物理模型的建立	175
6.1.4 数学模型的建立	177
6.1.5 数值计算区域与条件的设定	181
6.2 环冷机内气固传热基本规律与影响因素分析	185
6.2.1 环冷机内气体流动基本规律分析	186
6.2.2 环冷机内温度分布基本规律分析	187
6.3 余热发电模式下环冷机热工参数的确定	190
6.3.1 环冷机出口热载体可用性判断依据及计算	190
6.3.2 环冷机气固传热过程影响规律分析	192
6.3.3 适宜操作参数的确定	198
6.4 环冷机余热分级回收梯级利用工艺	201
6.4.1 工艺流程与参数确定的原则与方法	201
6.4.2 较为完善的可行性实施方案	202
6.4.3 较为实际的可行性实施方案	206
第 7 章 烧结合热直接热回收系统研究	209
7.1 烧结混合料干燥规律的实验研究	209
7.1.1 实验原理	209
7.1.2 实验内容	211
7.1.3 实验结果分析	212
7.2 烧结合热用于烧结混合料干燥	214
7.2.1 基本假设	214
7.2.2 解析模型建立	215
7.2.3 解析模型验证	218
7.2.4 烧结混合料干燥工艺参数的确定	221
7.3 烧结合热用于烧结合点	228
7.3.1 烧结合点的作用与意义	228
7.3.2 烧结合点工艺及特点分析	229
7.3.3 影响点火的因素分析	233
7.3.4 点火助燃工艺参数的确定	235
7.4 烧结合热用于热风烧结	240

7.4.1 热风烧结的作用与意义	240
7.4.2 热风烧结工艺及特点	242
7.4.3 热风烧结工艺参数的确定	242
第8章 烧结余热锅炉热工参数优化及应用	251
8.1 余热锅炉结构设计	251
8.1.1 余热锅炉整体结构	251
8.1.2 余热锅炉结构确定	254
8.1.3 余热锅炉通风阻力的确定	261
8.1.4 余热锅炉水循环检验	267
8.2 余热锅炉计算机辅助计算软件	273
8.2.1 计算机辅助计算概念	273
8.2.2 计算机辅助热力计算	274
8.2.3 计算机辅助阻力计算	275
8.2.4 计算机辅助水循环计算	276
8.2.5 程序编制原则	276
8.2.6 程序设计基本流程	277
8.3 余热锅炉的热经济学分析与优化	278
8.3.1 余热锅炉热经济学基础概念	278
8.3.2 受热面几何参数优化模型的建立	282
8.3.3 蒸汽参数优化模型的建立	287
8.3.4 优化模型的求解方法	292
8.4 基于某竖罐余热锅炉的案例分析	294
8.4.1 计算程序的编制	294
8.4.2 热工参数优化	303
第9章 烧结余热回收系统热力学分析	305
9.1 余热回收的热力学分析方法	305
9.1.1 能量分析理论	305
9.1.2 焓分析	305
9.1.3 熵分析	306
9.1.4 能级分析	310
9.2 热力学分析模型和余热回收利用原则的建立	313
9.2.1 热力学分析模型建立的方法与步骤	313
9.2.2 余热回收与利用原则的确定	321
9.3 烧结余热回收系统热力学分析与评价	322

9.3.1 烧结生产条件	323
9.3.2 烧结环冷余热回收系统热力学分析与评价	324
9.3.3 现有余热利用不足及技术的改进方案及分析	331
9.3.4 烧结矿余热竖罐式回收系统热力学分析	334
参考文献	339

第1章 概述

现代钢铁联合企业的烧结工序能耗仅次于炼铁而居第二位。2015 年中国钢铁工业协会会员企业烧结工序能耗为 48.66kgce/t 左右, 与国际先进水平的 47kgce/t 有一定差距。烧结过程余热资源包括烧结矿显热和烧结烟气显热, 它们分别为从烧结矿环冷机上部排出的冷却废气和烧结机下部抽出的烧结烟气所携带, 分别占烧结工序热量收入的 40%~45%和 15%~20%。据统计, 我国大中型钢铁企业每生产 1t 烧结矿产生的余热资源量约为 1.44GJ; 这一余热资源回收率(即回收的余热占余热总量的百分比)为 35%~45%。以 2015 年计(烧结矿产量为 8.874 亿 t), 我国尚有约 7.03 亿~8.31 亿 GJ 的烧结合余热资源没有得到回收利用。因此, 烧结过程余热资源的高效回收与利用是目前我国降低钢铁企业烧结工序能耗乃至炼铁工序能耗的重要方向与途径之一。

1.1 烧结矿余热资源的组成及特点

热工测试是弄清烧结矿余热资源组成与特点的主要手段。基于此, 本研究团队借助国家高技术研究发展计划(863 计划)项目, 以国内某 360m² 烧结机为对象, 采用在线测试仪器, 对余热产生、转换、回收与利用等环节进行了摸底性热工测试, 借此确定烧结合余热资源的组成及特点。该测试是进入 21 世纪烧结机实施大型化以后的首次全方位测试。同以往的测试相比, 本测试具有以下特点: 基于余热资源产生、转换、回收与利用各环节, 涵盖烧结系统、冷却系统和余热利用系统; 首次对烧结机运行方向上烧结台车内的气氛以及抽风箱内烧结烟气的气氛、温度进行了在线测试; 综合了不同的气候工况。

1.1.1 测试对象、体系内容与方法

1. 测试对象

该烧结机由烧结、冷却和余热回收利用系统组成, 利用系数为 1.0~1.2t/(m²·h)。其中, 烧结采用抽风烧结, 烧结有效面积为 360m², 料层厚度为 700mm, 24 对抽风箱, 引风风量为 150 万~180 万 m³/h; 冷却采用环形 5 段鼓风冷却, 自