

高等学校规划教材
GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

铁矿粉烧结原理与工艺

主编 龙红明

副主编 袁晓丽 刘自民



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

高等学校规划教材

铁矿粉烧结原理与工艺

主 编 龙红明
副主编 袁晓丽 刘自民

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2010

内 容 简 介

本书共分为8章, 主要包括铁矿粉烧结基本原理与生产工艺两部分。基本原理部分主要包括烧结的原燃料、烧结过程的物理化学原理、烧结过程的成矿机理、烧结自动控制原理等, 生产工艺部分按烧结工艺流程, 从原料配料、混合、布料、点火、烧结、冷却、整粒各环节介绍其工艺、设备以及工艺优化的途径与方法, 以及烧结矿质量评价指标及检测方法; 最后介绍烧结的新技术与新工艺、烧结工艺的节能与环保等内容。

本书可作为高等院校和职业技术学院冶金工程专业的教材, 也可作为冶金行业职工技术培训教材和技术资料。

图书在版编目(CIP)数据

铁矿粉烧结原理与工艺/龙红明主编. —北京: 冶金工业出版社, 2010. 8

高等学校规划教材

ISBN 978-7-5024-5332-9

I. ①铁… II. ①龙… III. ①铁粉—烧结—高等学校—教材
IV. ①TF124. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 130694 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcbbs@cnmip.com.cn

责任编辑 尚海霞 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5332-9

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2010 年 8 月第 1 版, 2010 年 8 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 11.5 印张; 304 千字; 172 页

28.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

铁矿粉烧结是钢铁冶金过程中一个重要的工艺环节，其原理复杂，涉及各种铁矿粉与燃料、熔剂的多种物理化学反应，是一个典型的非线性、大滞后的工艺过程。而且其工艺流程长，设备庞大，工艺技术参数多，一直是广大冶金工作者关注的对象。在高校教学过程中，编者认为缺乏一本能深入浅出、通俗易懂、紧跟行业最新动态的介绍包括烧结基本原理、工艺技术、节能环保、自动控制的教材。根据教学的需要，且随着近几年钢铁行业突飞猛进的发展，出版一本这样的教材非常必要。

为了适应冶金行业的快速发展和技术进步，培养高素质的冶金工程应用技术人员，编者结合多年的教学实践经验编写了这部教材。本教材具有如下特点：（1）侧重基本原理与工艺技术相结合，内容深度适宜，深入浅出，通俗易懂，深入细致地介绍“为什么”，而不是泛泛而谈“是什么”，可以满足以本科为主的不同层次人员的需求。（2）紧跟冶金行业的发展动态。近几年，我国烧结工艺技术取得重大进展，在基本原理的基础上介绍最新的铁矿粉烧结技术与工艺是本教材的重要特点。（3）增加了环境保护、节能方面的知识，如目前脱硫等环保问题已成为国内外研究的热点，而此前的教材均缺少这方面的内容。（4）增加了烧结自动控制原理内容，适合目前行业发展的需要，近年来自动检测技术与计算机控制技术的发展为烧结自动控制注入了新的活力，这方面的原理与应用知识也是本教材的重要特色。

本书由龙红明（安徽工业大学）、袁晓丽（重庆科技学院）和刘自民（马鞍山钢铁公司技术中心）合作编写。其中，龙红明负责第1章、第2章、第5章和第8章的编写，袁晓丽负责第3章和第4章的编写，刘自民负责第6章和第7章的编写。该教材在教学中已多次试用，产生良好的效果。并且三位编者都有为钢铁厂工程技术人员培训的宝贵经验，这能够使编者从学生的角度出发

组织、编写本书，本教材的出版可望为读者提供烧结方面有价值的参考资料。

在编写过程中，编者参考了诸多同行的研究工作和成果，得到冶金工业出版社的支持、课题组老师与研究生的帮助、家人的理解与鼓励，在此一并表示诚挚的谢意！

由于作者的学识及水平所限，书中难免有不妥之处，恳请同行与读者不吝赐教，并提出宝贵的建议或意见。

编 者
2010 年 6 月

目 录

1 概述	1
1.1 烧结的目的与意义	1
1.2 烧结生产的发展、现状与趋势	1
1.2.1 烧结生产的发展历史	1
1.2.2 烧结生产的现状及发展趋势	2
1.3 烧结生产工艺流程	4
2 烧结原燃料及配料计算	8
2.1 含铁原料	8
2.1.1 铁矿石	8
2.1.2 其他含铁原料	15
2.2 熔剂	16
2.3 燃料	16
2.3.1 固体燃料	16
2.3.2 气体燃料	17
2.4 配料计算	17
2.4.1 配料的目的与意义	17
2.4.2 配料计算方法	18
3 烧结过程物理化学原理	23
3.1 烧结过程概述	23
3.1.1 烧结矿层	24
3.1.2 燃烧层	24
3.1.3 预热层	24
3.1.4 干燥层	24
3.1.5 过湿层	25
3.2 烧结过程燃料燃烧与传热规律	25
3.2.1 烧结料层燃料燃烧基本原理	25
3.2.2 烧结料层中温度分布和热交换	26
3.3 水分在烧结过程中的作用与行为	29
3.3.1 水分的蒸发	29
3.3.2 水汽的冷凝	30
3.3.3 水分在烧结过程中的作用	30

3.3.4 防止烧结料层过湿的主要措施	31
3.4 烧结过程固体物料的分解	32
3.4.1 结晶水的分解	32
3.4.2 碳酸盐的分解	32
3.4.3 氧化物的分解	34
3.5 氧化物的还原及氧化	36
3.5.1 铁氧化物的还原	36
3.5.2 低价铁氧化物的氧化	37
3.6 烧结过程中有害元素的脱除	41
3.6.1 硫的去除	41
3.6.2 氟的去除	45
3.6.3 砷的去除	46
3.6.4 铅、锌、钾、钠的去除	46
3.7 烧结料层的透气性	47
3.7.1 透气性概述	47
3.7.2 烧结料层透气性变化规律	48
3.7.3 改善烧结料层透气性的途径	49
4 烧结过程成矿原理	56
4.1 烧结过程固相反应	56
4.1.1 固相反应的一般类型及特点	56
4.1.2 固相反应在烧结过程中的作用	60
4.2 烧结过程中的液相形成与冷凝	61
4.2.1 液相的生成	61
4.2.2 液相的冷凝	63
4.2.3 烧结过程中的主要液相	64
4.3 烧结矿的矿物组成、结构及其对烧结矿质量的影响	71
4.3.1 烧结矿的矿物组成、结构及其性质	71
4.3.2 影响烧结矿矿物组成和结构的因素	73
4.3.3 烧结矿的矿物组成和结构对其质量的影响	75
5 烧结自动控制原理	79
5.1 烧结过程自动化体系结构	79
5.2 烧结过程参数的自动检测	80
5.2.1 烧结自动检测概述	80
5.2.2 电子皮带秤与定量給料装置	80
5.2.3 烧结混合料水分检测	81
5.2.4 料位和料层厚度检测	82
5.2.5 烧结矿中 FeO 的质量分数的检测	82

5.3 烧结基础自动化	83
5.3.1 烧结基础自动化的发展	83
5.3.2 典型烧结基础自动化系统	83
5.4 烧结过程控制	88
5.4.1 烧结过程特点及控制方法	88
5.4.2 烧结数学模型	89
5.4.3 综合人工智能系统	93
6 烧结生产工艺流程	96
6.1 烧结原料准备与配料	96
6.1.1 原料接受、储存及中和混匀	96
6.1.2 熔剂和燃料的破碎、筛分	98
6.1.3 配料方法	100
6.1.4 理论配料计算	101
6.2 烧结料混合与制粒	101
6.2.1 混合的目的与要求	101
6.2.2 混匀效率与制粒效果的评价	101
6.2.3 影响混合与制粒的因素	102
6.3 混合料烧结	104
6.3.1 混合料布料	104
6.3.2 点火与保温	106
6.3.3 混合料烧结过程	108
6.3.4 强化烧结过程的途径	108
6.4 烧结矿处理	113
6.4.1 烧结矿的破碎和筛分	114
6.4.2 烧结矿的冷却	114
6.4.3 烧结矿的整粒	116
6.5 烧结矿质量评价	116
6.5.1 化学成分及其稳定性	117
6.5.2 粒度组成	117
6.5.3 转鼓强度与筛分指数	118
6.5.4 低温还原粉化性	119
6.5.5 还原性	121
6.5.6 还原软化熔融特性	122
6.6 烧结生产经济指标评价	122
6.6.1 烧结生产利用系数	122
6.6.2 返矿率	123
6.6.3 工序能耗	125
6.7 我国重点钢铁企业烧结主要技术经济指标	128

6.8 我国对烧结清洁生产的指标要求	129
6.8.1 清洁生产的定义	129
6.8.2 指标分级	129
6.8.3 指标要求	129
6.8.4 我国烧结行业与清洁生产标准的差距	130
7 烧结新技术和新工艺	132
7.1 高铁低硅烧结新技术	132
7.1.1 高铁低硅烧结固结机理	133
7.1.2 强化高铁低硅烧结的技术措施	133
7.1.3 高铁低硅烧结矿高炉冶炼效果	136
7.2 球团烧结新工艺	136
7.2.1 HPS 小球烧结工艺	136
7.2.2 复合造块烧结新工艺	140
7.3 低温烧结法	142
7.3.1 低温烧结法实质	142
7.3.2 低温烧结工艺的基本要求	143
7.3.3 实现低温烧结生产的工艺措施	144
7.3.4 低温烧结技术的应用	145
7.4 厚料层烧结技术	145
7.5 热风烧结工艺	147
7.5.1 热风烧结原理	147
7.5.2 热风烧结工艺因素分析	148
7.5.3 热风烧结技术的应用	150
7.6 高配比褐铁矿烧结技术	152
7.6.1 褐铁矿的主要特性及对烧结生产的影响	152
7.6.2 提高褐铁矿烧结比例的技术措施	153
7.7 基于铁矿石自身烧结基础特性的烧结配矿技术	155
7.7.1 理论基础	155
7.7.2 企业应用优化配矿实践	157
7.8 强化烧结添加剂(助燃剂)技术应用	157
8 烧结节能环保	158
8.1 烧结节能的方向与途径	158
8.1.1 降低固体燃料消耗	158
8.1.2 降低点火燃料消耗	159
8.1.3 降低电能消耗	159
8.1.4 热废气的回收利用	161
8.2 烧结污染物排放及其治理	161

8.2.1 烧结污染物的排放	161
8.2.2 烧结污染物的治理	163
8.3 烧结的“三废”循环利用	168
8.3.1 固废的利用	168
8.3.2 液废的利用	169
8.3.3 气废的利用	169
参考文献	170

1 概 述

1.1 烧结的目的与意义

随着钢铁工业的快速发展,天然富矿在产量和质量上都远远不能满足高炉冶炼的要求,而大量贫矿经选矿后得到的精矿粉却不能直接入炉冶炼,只能通过人工方法将这些粉矿制成块状的人造富矿供高炉使用。目前生产人造富矿的方法主要有烧结法和球团法。烧结法生产的人造富矿称为烧结矿,球团法生产的人造富矿称为球团矿,烧结矿和球团矿统称为熟料。

铁矿粉在一定的高温作用下,部分颗粒表面发生软化和熔化,产生一定量的液相,并与其他未熔矿石颗粒作用,冷却后,液相将矿粉颗粒黏结成块,这个过程称为烧结。显然,烧结过程是一个高温物理化学反应的造块过程。

铁矿粉烧结是目前最重要的造块技术。由于开采时产生大量铁矿粉,特别是贫铁矿富选促进了铁精矿粉的生产发展,使铁矿粉烧结成为规模较大的造块作业。其物料的处理量约占钢铁联合企业的第二位(仅次于炼铁生产),能耗仅次于炼铁及轧钢而居第三位,成为现代钢铁工业中重要的生产工序。铁矿粉烧结要求烧结矿有很好的物理、冶金性能。由于现代炼铁设备的大型化,炉料倒运次数多、落差大,要求烧结矿有较高的冷强度,如抗压强度等。烧结矿经历冶炼中的高温过程,要求具备一定的热强度,即在高温还原气氛下抗压、耐磨及耐急热爆裂性能;烧结矿在高炉内经历物理化学反应,要求它具有良好的冶金性能,如还原性、软化性、熔滴性等。铁矿粉烧结技术的困难还在于追求合理的经济效果,因此,铁矿粉烧结是一门技术复杂的专门学科。

随着炼铁“精料”的研究工作越来越深入,烧结矿朝着品位高、成分稳定、粒度均匀、强度高、冶金性能好的方向发展。在烧结料中加入一定数量的石灰石或生石灰、消石灰,可生产出具有一定碱度的自熔性烧结矿、高碱度烧结矿。高炉冶炼这种原料时可不加或少加熔剂,从而进一步降低焦比,提高生产率。综上所述,烧结具有如下重要意义:

(1) 通过烧结可为高炉提供化学成分稳定、粒度均匀、还原性好、冶金性能高的优质烧结矿,为高炉优质、高产、低耗、长寿创造了良好的条件;

(2) 可去除有害杂质,如硫、锌等;

(3) 可扩大炼铁原料来源,利用工业生产的废弃物,如高炉炉尘、轧钢皮、硫酸渣、钢渣等,对钢铁冶金过程减少排放、发展循环经济发挥着重要作用。

在长期的生产实践中,人们发现经过选矿、烧结处理后的人造富矿能进一步地使矿物富集和去除有害杂质,使高炉生产率提高,焦比下降。对高炉炼铁来说,烧结矿比天然矿石有许多优点,如铁含量高、气孔率大、易还原、有害杂质少、含碱性熔剂等,且对原料要求不像球团矿那么严格,所以烧结生产发展得十分迅速,在世界上得到了广泛应用。

1.2 烧结生产的发展、现状与趋势

1.2.1 烧结生产的发展历史

烧结生产的历史已有一个多世纪。它起源于资本主义发展较早的英国、瑞典和德国。大约在1870年前后,这些国家就开始使用烧结锅。美国在1892年也出现烧结锅,1905年美国曾用

大型烧结锅处理高炉炉尘。世界钢铁工业上第一台带式烧结机于1910年在美国投入生产。烧结机的面积为 8.325m^2 ($1.07\text{m} \times 7.78\text{m}$)，当时是用来处理高炉炉尘的，每天生产烧结矿140t。它的出现，引起烧结生产的重大革新，从此带式烧结机得到了广泛的应用。但在1952年以前，由于钢铁工业发展缓慢，天然富矿入炉率还占很大比例，所以烧结生产的发展也不快。烧结工业的迅速发展是近几十年的事。

日本烧结工艺完善，设备先进，技术可靠，自动化水平高，是世界上烧结技术发展最快的国家，单机平均烧结面积达 218m^2 ， 400m^2 以上的烧结机11台。世界上最大的烧结机为 648m^2 （前苏联），包括机上冷却面积的带式烧结机最大则为 700m^2 （巴西）。

在1949年以前，我国钢铁工业十分落后，烧结生产更为落后，1926年3月在鞍山建成4台 21.63m^2 带式烧结机，日产最高1200t；1930年又扩建2台；1935年和1937年又相继建成4台 59m^2 的烧结机。至此共建有10台烧结机，总面积为 330m^2 ，但工艺设备落后，生产能力很低，最高年产量仅十几万吨。

1949年以后，我国烧结工业有了很大发展，改建和扩建了鞍钢烧结厂，同时本钢、马钢、首钢、武钢、包钢、太钢、重钢、湘钢、攀钢、酒钢、水钢、邯钢、舞钢、宝钢等烧结厂相继建成投产。主要的带式烧结机规格有： 24m^2 、 36m^2 、 50m^2 、 75m^2 、 90m^2 、 130m^2 、 182m^2 、 265m^2 、 400m^2 、 450m^2 等。建国60年来，我国铁矿石烧结工业取得了很大成就。到2007年，全世界烧结机年生产能力已超过 $10 \times 10^8\text{t}$ ，其中我国的烧结矿产量占全世界产量的一半左右，相当于排名第2~第7名的6个国家产量之和。我国钢铁工业中人造富矿主要靠烧结法生产，占高炉用含铁炉料的80%以上。

1.2.2 烧结生产的现状及发展趋势

铁矿石烧结造块技术的进步为钢铁工业的快速发展已经并将继续提供强有力的支撑。目前，在信息技术和控制技术的迅猛发展和广泛应用的推动下，钢铁工业向高精度、连续化、自动化、高效化快速发展。其中，烧结生产的现状主要体现在以下几个方面。

1.2.2.1 设备大型化

据统计，我国现有烧结机近500台，其中在建和投产的 $180 \sim 660\text{m}^2$ 烧结机125台，其烧结面积达 38590m^2 。已投产的大于 360m^2 的烧结机27台，其中京唐公司曹妃甸 550m^2 烧结机是最大的。太钢正在筹建 660m^2 烧结机，该烧结机在国际上可称为巨型烧结机。它采用了一系列先进的工艺技术，达到国际一流装备水平。至此，我国大中型烧结机面积在全国烧结机总面积之中已占明显优势，烧结矿的质量也得到明显提高。

2007~2008年我国重点钢铁企业烧结机装备情况见表1-1。

表 1-1 2007~2008 年我国重点钢铁企业烧结机装备情况

设备规格	2008 年		2007 年	
	台 数	年生产能力/t	台 数	年生产能力/t
130m^2 及以上	149	37.651×10^7	125	30.396×10^7
$90 \sim 129\text{m}^2$	88	9.876×10^7	81	9.179×10^7
$36 \sim 89\text{m}^2$	154	10.923×10^7	154	10.923×10^7
$19 \sim 35\text{m}^2$	53	2.071×10^7	62	2.186×10^7
合 计	444	60.521×10^7	422	52.684×10^7

2009 年,我国新投产 21 台烧结面积大于 150m^2 的烧结机,其中大于 180m^2 的有 20 台,大于 360m^2 的有 11 台。目前正在建设的烧结机有 14 台,其中 11 台大于 360m^2 ,沙钢和宣钢在建烧结机为 550m^2 。这些说明我国加快了烧结机大型化的步伐。烧结机大型化会促进烧结质量的提高,降低工序能耗,减少污染物排放,降低单位面积投资和运行成本。

1.2.2.2 生产技术不断进步

我国烧结生产技术进步体现在如下几个方面:

(1) 一批先进成熟的烧结生产技术得到全面推广。1) 建立综合原料混均料场;2) 自动称重配料;3) 添加生石灰;4) 采用小球烧结;5) 烧结机科学布料;6) 广泛采用铺底料;7) 燃料分加;8) 超厚料层烧结;9) 低温烧结;10) 高铁低硅烧结;11) 热风烧结;12) 取消热矿筛;13) 烧结矿整粒。

(2) 烧结机漏风率降低。20 世纪 70 年代,我国烧结机漏风率在 60% 以上。目前新建的烧结机漏风率为 30% 左右,如宝钢 2 号烧结机系统漏风率在 30% ~ 48%。

采用一种液密封鼓风环式冷却机,其漏风率可降低到 5% 以下,可节能 20%,还可取消原环冷机配套的一些辅助设备,节省投资。涟钢 360m^2 烧结机和济钢 460m^2 烧结机的环冷机漏风率仅为 4.7%。

(3) 烧结烟气脱硫。现在我国有 35 台烧结机安装了烟气脱硫设施,年脱硫量为 $8 \times 10^4\text{t}$ 。2008 年 7 月工信部提出 3 年内要增加脱硫量 $20 \times 10^4\text{t}$,提高环保水平。

目前,烧结烟气脱硫成熟的工艺技术有 20 多种,但尚未有一个标准的、适合于每个企业的技术装备,均要根据每个企业的具体情况进行选择。评价烧结烟气脱硫工艺技术设备好坏的标准是:脱硫效率、设备的寿命和作业率、投资、运行费、副产品的价值和综合利用、占地、维护和操作等因素。

烧结机点火器之后的约 $1/3$ 风箱烟气含 SO_2 较低,温度高,可以不进行烟气脱硫,将这部分烟气回用于烧结,实现热风烧结,可提高烧结矿质量,降低固体燃料消耗。所以,烧结烟气脱硫不必是全量烟气脱硫,这样可以降低投资和运行费约 $1/3$,提高经济效益。

1.2.2.3 自动化水平不断提高

烧结生产过程的自动化水平与烧结矿产量、质量的稳定息息相关。随着工业自动化技术、信息技术和控制技术的快速发展,在硬件方面,大量的数字、智能仪表提高了信息检测的精度,先进的自动执行设备逐渐取代传统的人工操作。随着计算机软件技术和人工智能技术的应用逐渐深入,模糊控制、专家系统和神经网络在一些厂家的应用取得初步成效,由现场总线到车间网、工厂网、企业综合网络系统构成的企业信息高速公路在少数大型钢铁公司开始实施。

同时,随着建设资源节约型、环境友好型社会的要求越来越高,烧结生产在资源、环保方面面临着新的巨大挑战,今后的烧结技术发展必须要解决好如下问题:

(1) 铁矿石资源问题。近年来,随着中国成为世界上最大的钢铁生产国,国内铁矿石供应缺口越来越大,铁矿石的进口规模也相应扩大,而进口价格也水涨船高。根据中国钢铁联合网的数据,2000 年以来我国进口铁矿石量及到岸价格见表 1-2。

从表 1-2 中可以看出,进口铁矿石量及价格增长很快,特别是 2003 ~ 2008 年,铁矿石进口数量增加 3 倍,而进口额则增加近 15 倍,进口额的增长远远超过了数量的增长。2006 年进口量首次超过了 $3 \times 10^8\text{t}$,而 2008 年则达到超过 $4.4 \times 10^8\text{t}$,价格则飙升到 136.5 美元/t。从总体上看,如此大的增幅不仅给钢铁企业带来巨大的经济压力,而且给烧结生产带来了很大影响,

由于矿源紧张,许多钢铁厂有时处在“等米下锅”的状态,而且“吃的”矿很杂。因此,必须对各种铁矿石进行合理的配矿研究和烧结性能研究,同时对价格相对低廉的难烧结矿石(如褐铁矿等)进行研究,从而保证烧结矿的优质、高产。

表 1-2 我国进口铁矿石量及到岸价格

年 份	进口量/t	进口额 /千美元	进口均价 /美元·t ⁻¹	年 份	进口量/t	进口额 /千美元	进口均价 /美元·t ⁻¹
2000 年	6.997×10^7	1857699	26.55	2005 年	27.526×10^7	18372783	66.75
2001 年	9.231×10^7	2502751	27.11	2006 年	32.600×10^7	20782500	63.75
2002 年	11.149×10^7	2769066	24.84	2007 年	38.309×10^7	33796199	88.22
2003 年	14.813×10^7	4056502	27.38	2008 年	44.356×10^7	60545940	136.5
2004 年	20.808×10^7	12699132	61.03				

(2) 能源消耗问题。我国钢铁企业的能量消耗约占全国能量消耗总量的 10%,作为钢铁生产重要组成部分的烧结生产,其能耗约占钢铁生产总能耗的 10%~15%。烧结能耗主要包括固体燃料消耗、电力消耗、点火煤气消耗等。其中固体燃料消耗占烧结总能耗的 75%~80%,电力消耗占 13%~20%,点火热耗占 5%~10%。当前,能源供不应求,制约了钢铁企业的可持续发展,降低了其经济效益,因此,余热回收利用、节能新设备的开发与应用等成为节能降耗的有效手段。

(3) 环境保护问题。钢铁生产工序多、工艺流程长,是环境污染的“大户”,其中每吨钢耗水 100~300t,产生废气 10000m³、粉尘 100kg、废渣 0.5t。对烧结而言,主要的污染物是烧结废气中的 SO₂、NO_x、CO₂ 和具有生物毒性、免疫毒性和内分泌毒性的致癌物质二噁英。其中 SO₂ 排放量占整个钢铁工业的 33.26%,CO₂ 排放量占整个钢铁工业的 10%。由于烧结废气量大,烟气含尘高,SO₂、NO_x、CO₂ 浓度低,后续处理成本高,给治理带来很大困难。

(4) 烧结过程控制问题。从控制的角度来看,烧结过程是具有多变量、非线性、强耦合特征的工艺流程。传统的依靠人工“眼观—手动”的调节方法已经无法满足大型烧结设备的控制要求,需要更加精确和稳定的自动控制。目前新建和改建的烧结机都配备了集散控制系统,具备了基本检测和基础控制功能,进一步开发适应烧结过程特点的智能控制系统是目前需要解决的问题。

针对这些问题,必须加强对烧结过程机理的深入研究,才能从根本上提高烧结技术水平,减轻能源、环境等问题的压力,实现烧结工艺的可持续发展。

1.3 烧结生产工艺流程

按照烧结设备和供风方式的不同,烧结方法可分为鼓风烧结、抽风烧结和在烟气中烧结。

鼓风烧结是烧结锅,平地吹。这是小型厂的土法烧结,逐渐被淘汰。

抽风烧结分连续式和间歇式。连续式烧结设备有带式烧结机和环式烧结机等;间歇式烧结设备有固定式烧结机和移动式烧结机,固定式烧结机如盘式烧结机和箱式烧结机,移动式烧结机如步进式烧结机。

在烟气中烧结包括回转窑烧结和悬浮烧结。

目前，广泛采用带式抽风烧结机，因为它具有生产率高，原料适应性强，机械化程度高，劳动条件好和便于大型化、自动化等优点，所以世界上有 90% 以上的烧结矿是这种方法生产的。

带式抽风烧结过程是将混合料（铁矿粉、燃料、熔剂及返矿）配以适量的水分，混合、制粒后，铺在带式烧结机的炉算上，点火后用一定负压抽风，使烧结过程自上而下地进行。烧结矿从烧结台车上卸下，经破碎、冷却、制粒、筛分，分出成品烧结矿、返矿和铺底料。图 1-1 所示为现行常用的烧结生产工艺流程。

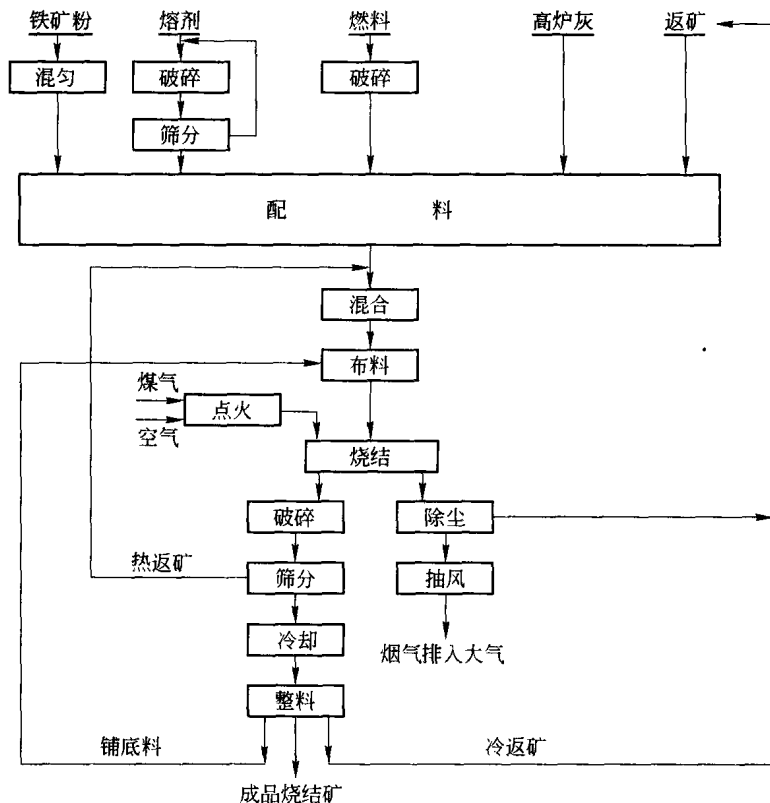


图 1-1 现行常用的烧结生产工艺流程

较典型的烧结生产工艺流程可分为 8 个工序系统：

(1) 受料工序系统，主要包括翻车机系统、受料槽、精矿仓库、熔剂仓库、燃料仓库等，其任务是担负进厂原料的接受、运输和储存。

(2) 原料准备工序系统，包括含铁原料的中和、燃料的破碎、熔剂的破碎和筛分，其任务是为配料工序准备好符合生产要求的原料、熔剂和燃料。

(3) 配料工序系统，包括配料间的矿槽、圆盘给料机、称量设施等；根据规定的烧结矿化学成分和使用的原料种类，通过计算，各原料按计算的重量进行给料，以保证混合料和烧结矿化学成分稳定及燃料量的调整。

(4) 混合、制粒工序系统，主要包括冷热返矿圆盘、一次混合，混合料矿槽、二次混合等工序。其任务是加水、润湿混合料，再用一次混合机将混合料混匀，二次混合机造成小球后

预热。

(5) 烧结工序系统，包括铺底料、布料、点火、烧结等。主要任务是将混合料烧结成合格的烧结矿。其示意图如图 1-2 所示，此部分是烧结工艺的核心，前面的工序都是准备烧结的原料，而后面的工序都是对烧结矿产品进行处理及相关的辅助工序。

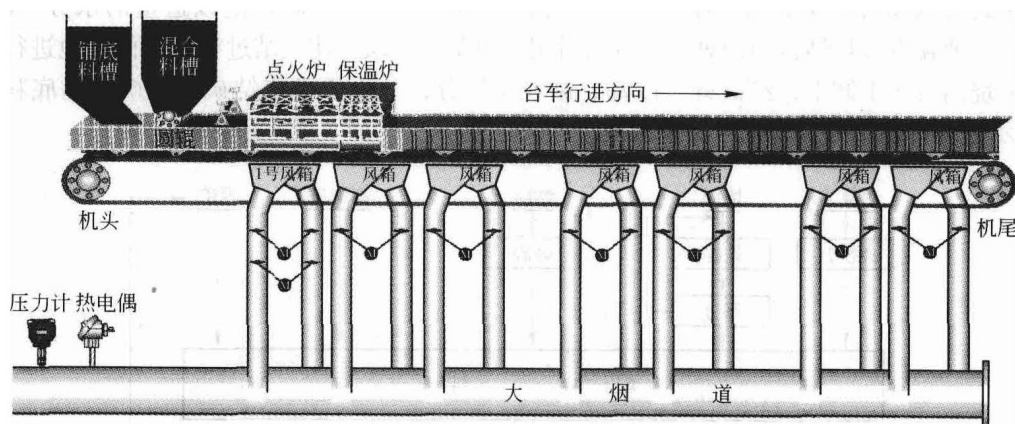


图 1-2 烧结机示意图

烧结过程是许多物理化学变化的综合过程。这个过程不仅错综复杂，而且瞬息万变，在几分钟甚至几秒钟内，烧结料就因强烈的热交换而从 70°C 以下被加热到 $1200 \sim 1400^{\circ}\text{C}$ ，与此同时，它还要从固相中产生液相，然后液相又被迅速冷却而凝固。这些物理化学变化包括：

- 1) 燃料的燃烧和热交换；
- 2) 水分的蒸发及冷凝；
- 3) 碳酸盐的分解，燃料中挥发分的挥发；
- 4) 铁矿物的氧化、还原与分解；
- 5) 硫化物的氧化和去除；
- 6) 固相间的反应与液相生成；
- 7) 液相的冷却凝结和烧结矿的再氧化等。

(6) 抽风工序系统，包括风箱、集尘管、除尘器、抽风机、烟囱等。

(7) 成品处理工序系统，包括热破碎、热筛分、冷却、冷破碎、冷筛分及成品运输系统。该工序的任务在于分出 $5 \sim 50\text{mm}$ 的成品烧结矿、 $10 \sim 20\text{mm}$ 的铺底料、小于 5mm 的冷返矿（部分厂为小于 $3 \sim 6\text{mm}$ ）。

(8) 环保除尘工序系统，主要是用电除尘器系统将烧结机尾部卸矿处、热筛、冷却、返矿及整粒系统各处扬尘点的废气经过除尘器净化后排入大气，粉尘经过润湿后加入烧结混合料中再烧结。其任务是担负烧结生产的环境保护。

以宝钢 2 号烧结机 (495m^2) 为例，其工艺流程如图 1-3 所示。共有 17 个原料矿槽，混合料经过一混、二混后由皮带输送至混合料槽，混合料和来自成品皮带的铺底料通过布料器均匀地布在烧结台车上，在点火、保温、抽风等作用下完成烧结，在机尾卸料，由单辊破碎机破碎后进入环形鼓风冷却机，后经双系列的成品筛分、整粒系统分出成品烧结矿送往高炉，而返矿则进入配料矿槽重新配料烧结。

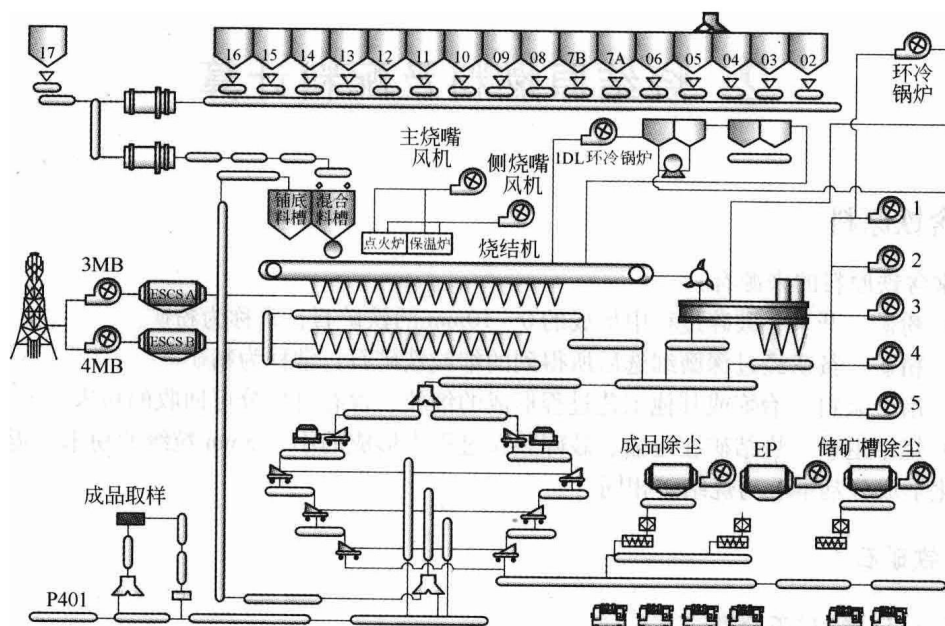


图 1-3 宝钢 2 号烧结机工艺流程