

钢铁烧结烟气 全流程减排技术

Flue Gas Full-process Emission Reduction Technology
for Sintering of Iron and Steel

叶恒棣 编著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

钢铁烧结烟气 全流程减排技术

Flue Gas Full-process Emission Reduction Technology
for Sintering of Iron and Steel

叶恒棣 编著

魏进超 王兆才 参编



微信“扫一扫”
读取本书数字资源

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2019

内 容 提 要

全书共分6章,第1章简要介绍了钢铁烧结及烧结烟气净化技术的发展历程;第2章阐述了钢铁烧结烟气及污染物产生的机理、影响因素及排放规律;第3章系统阐述了钢铁烧结烟气及污染物减量化主要技术原理、工艺及设备;第4章介绍了烧结烟气末端治理的主要技术路线,重点阐述活性炭法烟气净化技术和装备及其组合应用技术;第5章提出了在钢铁全流程应用活性炭法烟气净化技术的整体解决方案;第6章介绍了钢铁烧结烟气全流程减排技术在钢铁行业工业应用实际案例。

本书可供钢铁行业从事钢铁冶金环境治理的工程技术人员、教学人员、管理人员阅读,也可供有色、化工等行业有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢铁烧结烟气全流程减排技术/叶恒棣编著. —北京:
冶金工业出版社, 2019.5

ISBN 978-7-5024-8123-0

I. ①钢… II. ①叶… III. ①工业废气—废气治理—
研究 IV. ①X701

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 092893 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjchs@cnmp.com.cn

策划编辑 张 卫 责任编辑 赵亚敏 美术编辑 彭子赫

版式设计 孙跃红 责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-8123-0

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2019年5月第1版,2019年5月第1次印刷

169mm×239mm; 20.5印张; 56彩页; 531千字; 421页

168.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

序

钢铁工业是国民经济中重要的基础性和支柱性产业。对于高炉-转炉型钢铁联合企业而言,烧结是铁素原料加工的重要工序之一。相当长一段时间内人们对烧结过程的研究重视不够。新世纪以来,烧结工序技术取得了若干进步,主要体现在厚料层烧结工艺的研发和大型烧结机的自主设计并投产等,但烧结仍存在一些值得改进的问题,诸如:漏风率高、废气排放污染严重、返矿率高、台车寿命短等问题。特别是烧结工序的废气排放问题,引起了各方面焦虑和关注。

我国目前每年生产烧结矿逾十多亿吨,对生态环境造成了巨大压力,尤其是环渤海、长三角、汾渭地区,大气环保负荷的压力尤甚。

烧结工序的废气排放量占钢铁行业废气排放总量的 50% 左右, SO_x 、 NO_x 和二噁英则分别占行业排放总量的 70% 左右、48% 左右和 90% 左右,成为钢铁行业实现超低排放的难点和重点。

本书研究讨论的内容突出了钢铁企业绿色化发展,突出了环保、生态意识,特别是突出了烧结过程中的“风”“漏风”和“烟气治理”的理念。在烧结生产过程中,“风”意味着能量消耗,漏风和废气排放体现着污染物的扩散和传播;烧结烟气的组分、构成复杂,既包括了 CO_x 、 H_2O 汽、 SO_x 、 NO_x ,也包括二噁英、VOCs,还有粉尘以及 As、F、Pb、Zn、K、Na、Cu 等有害元素排放物,这些问题长期以来没有得到人们的充分重视,有的甚至被熟视无睹。在中国特色社会主义五大发展理念中,绿色发展具有重大战略意义,因此必须高度重视、认真对待、贯彻执行。从这一视角看,本书出版具有积极的引导作用,是适时的,也应该说是有新意的。从学术讨论的角度上看,过去对“风”——空气的认识有限,特别是把“风”——空气当作资源甚至污

染物传播、扩散的载体的意识还不够，本书专注于“气质流”的研究，并首次提出“风”是烧结生产过程中的“血液”的比喻，以引起有关人士的重视，这是一种有益的探索和尝试。

中冶长天国际工程有限责任公司、国家烧结球团装备系统工程技术研究中心的叶恒棣及其团队近年来开展了烧结漏风及烟气产生过程的机理研究，并从源头减量、过程控制入手，开发了降低烧结机漏风率技术、烟气循环烧结技术、基于氢系介质喷吹的清洁烧结技术、活性炭烟气净化技术及其组合应用技术，为铁矿烧结资源节约、环境友好的清洁生产做出了巨大的贡献。本书将这些新技术的原理、工艺及装备、工程应用系统总结出来，可供相关单位参考、推广应用，进而对中国钢铁工业的绿色发展做出贡献。

殷瑞钰

2018年12月

前 言

钢铁工业是国民经济的支柱产业，2018 年我国生产粗钢 9.28 亿吨，支撑着我国工业化和城镇化的稳步推进。在钢铁生产的诸多工艺流程中，烧结工艺流程是钢铁原料制备的关键工序之一，也是目前钢铁生产整个过程中烟气污染最严重的工序。目前我国每年生产烧结矿十亿余吨，铁矿烧结烟气治理是钢铁领域减排的重点和难点，治理的好坏已经关系到钢铁企业的生死存亡。

党的十八大提出了“美丽中国”的概念，强调把生态文明建设放在突出地位。生态环境部近年开始重点抓钢铁企业烟气排放问题。如何适应生态环境要求，使钢铁企业绿色环保并与城市友好地持续发展，是当前摆在钢铁行业面前的重大课题。

钢铁的烧结生产工艺已有 100 余年的历史。100 年来，钢铁烧结技术虽然取得了巨大的进步，但影响烧结生产的基础物质依然主要是原料（含铁原料与辅料）、燃料与空气（流动的空气俗称风）。

从工艺看，合理配比的原料在高温条件下，经物理化学反应转变为适合高炉冶炼、具有良好冶金性能和物理尺寸的烧结矿；燃料则为上述物理化学反应提供热量；而风除为燃料燃烧提供助燃氧气外，还承担传热载体的功能。对原料的研究关注的是物质流（铁素流），对燃料的研究关注的是能量流（碳素流），风（气质流）是能量流促使物质流发生变化的重要媒介。

钢铁烧结生产过程中，原料与燃料中的杂质如硫、重/碱金属等会在高温条件下析出和部分析出而成为污染物，这些杂质析出后的烧结

矿,有利于高炉的稳定运行和高质量钢铁产品的生产;同时我们必须承认钢铁烧结生产过程中也会产生氮氧化物和二噁英等污染物。在整个钢铁生产流程中,烧结生产工艺流程产生的 SO_x 占 70%, NO_x 占 48%, 二噁英占 90%, 是钢铁生产流程中多污染物排放大户。这时,风承担了多污染物析出的载体功能,从而形成污染物成分复杂、烟气量大、难以治理的工业废气——烧结烟气。

如果把烧结生产工艺看作一个有机体,则原料是其“肌体”,燃料是“食物”,而风则是“血液”。把对空气的污染看作是对资源的消耗,在保证烧结矿产量和质量的前提下,减少污染物总量和减少被污染空气的总量,并在末端治理,高效协同脱除污染物并使其部分高度资源化是生态文明建设的要求。

近年来,中冶长天国际工程有限责任公司(中冶长天)、国家烧结球团装备系统工程技术研究中心等非常重视钢铁生产的烧结工艺基础理论研究,并从源头——过程控制入手,结合末端治理,开发了降低烧结机漏风率技术、烟气循环烧结技术、基于氢系介质喷吹的清洁烧结技术、活性炭烟气净化技术及其组合应用技术,并得到了广泛应用,为钢铁行业超低排放奠定了技术基础。

在钢铁冶金领域,对原料和燃料的研究已非常充分,著述颇丰。而本书将尝试专注于对“风”的研究,把近年来研究的新技术原理、工艺、装备及应用情况进行了系统整理,进而提出钢铁全流程烟气活性炭法净化整体解决方案,期望对行业污染物超低排放技术进步有所贡献。

本书由叶恒棣主持编著并统稿,王兆才和魏进超分别参与了本书上半部分(第2章、第3章)和下半部分(第4章、第5章)的策划及撰写工作,参加撰写工作的人员还有李俊杰、卢兴福、杨本涛、周

浩宇、廖继勇、唐艳云、刘克俭、胡兵、张震、李小龙、康建刚、徐忠、李勇、占敏剑、沈维民、刘再新等。中南大学范晓慧，宝山钢铁股份有限公司王跃飞，中冶长天戴传德、张俊涛、孙英、贺新华、周志安、刘昌齐、彭杰等行业专家对全书进行了审核和校对。中冶长天王菊香、周乾刚自始至终参与了本书的筹备与策划，提供帮助的还有东北大学蔡九菊教授。书中参考和引用了中南大学姜涛教授和范晓慧教授研究团队及其他专家学者的有关文献资料，在此一并表示衷心感谢。

作者特别感谢中冶长天董事长易曙光和总经理何国强对本书撰写和出版的大力支持和指导，也特别感谢中国工程院院士殷瑞钰在百忙之中审阅书稿并撰写序。感谢宝武集团宝钢本部，湛钢和韶钢等企业领导和专家的支持和指导。

由于作者水平有限，书中不足和疏漏之处，恳请同行与读者批评指正。

作 者

2018年12月于长沙

目 录

1 钢铁烧结及烧结烟气净化技术发展历程	1
1.1 钢铁烧结工艺的地位和作用	1
1.2 钢铁烧结技术总体发展历程	3
1.3 钢铁烧结烟气净化技术发展历程	7
1.3.1 烧结烟气粉尘治理技术发展	7
1.3.2 烧结烟气脱硫技术发展	9
1.3.3 烧结烟气脱硫脱硝多污染物协同治理技术发展	11
1.4 钢铁烧结工艺及烧结烟气净化技术发展展望	14
1.4.1 烧结工艺及装备技术发展	15
1.4.2 烧结烟气净化技术发展	15
参考文献	16
2 钢铁烧结烟气及污染物的产生	18
2.1 钢铁烧结基础物质三要素	18
2.1.1 原料	18
2.1.2 燃料	20
2.1.3 空气	21
2.2 风对钢铁烧结的影响及风的合理匹配	22
2.2.1 烧结过程概述及风的作用	22
2.2.2 烧结有效风量的确定	26
2.2.3 风对烧结生产的影响	30
2.2.4 烧结料层阻力变化规律及风的合理匹配	35
2.3 钢铁烧结过程中污染物的产生	38
2.3.1 烧结过程 CO_x 的形成	38
2.3.2 烧结过程水蒸气的形成	42
2.3.3 烧结过程 SO_x 的形成	43
2.3.4 烧结过程 NO_x 的形成	48
2.3.5 烧结过程二噁英的形成	52

2.3.6 烧结过程 VOCs 的形成	56
2.3.7 烧结过程其他有害元素	57
2.3.8 烧结过程粉尘的形成	59
2.4 钢铁烧结烟气的形成及烟气量的确定	63
2.5 钢铁烧结烟气及其污染物排放规律	64
2.5.1 烟气温度规律	64
2.5.2 烟气压力规律	65
2.5.3 O_2 及 CO_x 排放规律	66
2.5.4 SO_x 排放规律	66
2.5.5 NO_x 排放规律	66
2.5.6 烟气量排放规律	67
2.5.7 二噁英排放规律	67
2.5.8 超细粉尘排放规律	68
2.6 钢铁烧结烟气污染物对环境的影响及排放标准	68
2.6.1 烟气污染物对环境的影响	68
2.6.2 烧结烟气污染物排放标准	70
2.7 小结	74
参考文献	75
3 钢铁烧结烟气及污染物减量技术	77
3.1 降低烧结系统漏风技术	77
3.1.1 烧结机漏风原因及危害性分析	77
3.1.2 降低烧结料层阻力技术	81
3.1.3 烧结机漏风治理技术	104
3.1.4 烧结机漏风率测试方法	118
3.2 烟气循环烧结技术	125
3.2.1 烟气循环烧结基础研究	125
3.2.2 烟气循环烧结工艺流程研究	137
3.2.3 烟气循环系统关键装置仿真模拟及结构设计	142
3.3 基于氢系介质喷吹的清洁烧结技术	147
3.3.1 燃气喷吹烧结技术	147
3.3.2 蒸汽喷吹烧结技术	158
3.4 基于燃料预处理的低 NO_x 烧结技术	164
3.4.1 燃料预处理对单一焦粉燃烧过程 NO_x 生成的影响	164
3.4.2 燃料预处理对烧结过程和 NO_x 排放的影响	169

3.4.3 燃料预处理工艺流程	176
3.5 生物质类燃料及尿素类添加剂技术	177
3.5.1 生物质类燃料技术	177
3.5.2 尿素类添加剂技术	181
3.6 小结	185
参考文献	186
4 钢铁烧结烟气净化技术	189
4.1 典型的脱硫技术	190
4.1.1 湿法脱硫及烟羽治理	190
4.1.2 半干法脱硫技术	199
4.2 SCR 烟气脱硝技术	203
4.2.1 催化脱硝基础理论	203
4.2.2 催化剂制备及性能评价	206
4.2.3 SCR 脱硝技术工艺流程	212
4.2.4 低温 SCR 脱硝技术	214
4.2.5 SCR 脱硝主体装备	217
4.3 活性炭法烟气脱硫脱硝技术	221
4.3.1 活性炭法烟气净化基础理论	221
4.3.2 活性炭法烟气净化典型工艺及参数	240
4.3.3 活性炭法烟气净化关键技术及装备	251
4.3.4 副产物资源化技术	296
4.3.5 工程安装、调试及运行注意事项	323
4.4 组合脱硫脱硝技术	333
4.4.1 单级活性炭法+SCR 技术	333
4.4.2 (半) 干法脱硫+单级活性炭法技术	334
4.4.3 (半) 干法脱硫+SCR 技术	336
4.4.4 湿法脱硫+SCR 技术	337
4.4.5 臭氧氧化法脱硝+半干法脱硫组合技术	339
4.5 小结	341
参考文献	341
5 钢铁全流程活性炭法烟气净化整体解决方案	345
5.1 概述	345
5.2 钢铁全流程各工序废气排放特征	346

5.2.1 焦化生产工艺及废气排放特征	346
5.2.2 球团生产工艺及废气排放特征	348
5.2.3 炼铁生产工艺及废气排放特征	350
5.2.4 炼钢生产工艺及废气排放特征	352
5.2.5 轧钢生产工艺及废气排放特征	354
5.3 钢铁行业全流程废气共性特征及净化方法分析	359
5.3.1 钢铁全流程废气共性特征分析	359
5.3.2 钢铁全流程排放标准体系的演变	361
5.3.3 钢铁全流程净化方法适用性分析	363
5.4 钢铁全流程烟气活性炭法整体解决方案	364
5.4.1 分散吸附—集中解吸活性炭法 (DC-AC) 整体解决方案	364
5.4.2 烟气集中—分别吸附—集中解吸活性炭法 (FRC-AC) 整体 解决方案	373
5.5 小结	376
参考文献	377
6 工程应用	378
6.1 降低烧结系统漏风技术工程应用	378
6.1.1 日本住友金属和歌山烧结机工程应用	378
6.1.2 宝钢湛江烧结机工程应用	381
6.2 燃气喷吹清洁烧结技术工程应用	389
6.2.1 工程概况	389
6.2.2 技术方案	389
6.2.3 技术效果	390
6.3 活性炭法 (单级) 烟气净化技术工业应用	391
6.3.1 工程概况	391
6.3.2 技术方案	391
6.3.3 技术效果	396
6.4 活性炭法 (双级) 烟气净化技术工业应用	399
6.4.1 工程概况	399
6.4.2 技术方案	399
6.4.3 技术效果	401
6.5 半干法+SCR 法烟气净化技术工业应用	404
6.5.1 工程概况	404
6.5.2 技术方案	404

6.5.3 技术效果	410
6.6 烧结烟气减排技术在宝钢本部3号烧结机的应用	412
6.6.1 工程概况	412
6.6.2 技术方案	413
6.6.3 技术效果	414
6.7 烧结烟气减排技术在宝钢本部2号烧结机的应用	416
6.7.1 工程概况	416
6.7.2 技术方案	416
6.7.3 技术效果	420
6.8 小结	420
参考文献	421

1 钢铁烧结及烧结烟气净化 技术发展历程



数字资源 1

1.1 钢铁烧结工艺的地位和作用

钢铁是人类社会使用的最主要的结构材料和产量最大的功能材料，是现代工业社会最重要的原材料之一。目前，世界钢铁工业所需的生铁主要由高炉生产，而含铁炉料的质量是影响高炉炼铁生产指标的主要因素之一。

高炉炼铁时，为了保证炉内料柱透气性良好，要求炉料粒度均匀、粉末少、机械强度高。为了提高生产效率，要求炉料含铁品位高，脉石成分和有害杂质少。为了降低炼铁焦比，还要求炉料具有优良的冶金性能。因此，炉料制备应满足高炉冶炼精料方针及高炉炉料结构合理化的需要。烧结工艺具有生产规模大、资源适应能力强的特点，在我国钢铁炉料制备生产中发挥着重大作用^[1,2]。

烧结工艺在钢铁生产中有如下作用：

(1) 将细粒铁矿粉或精矿制备成具有一定强度和适宜粒度的高炉炉料。烧结的初衷和最主要的目的是造块。烧结工艺是一种将粉状含铁物料进行高温加热，在不完全熔化的条件下烧结成块并形成合理强度和粒度分布的方法，所得产品称为烧结矿。由于全球范围内高品位块矿的稀缺，绝大部分的铁矿石自矿山开采出以后必须经过深磨细选，得到的高品位精矿粉需造块后才可入炉。此外，少量铁品位达到入炉要求的富矿，也要经过破碎和筛分，使粒度均匀，破碎筛分过程中所产生的粉矿也必须经过造块加工后才能供高炉使用。

(2) 调整化学成分、改善含铁原料的冶金性能。块矿未经人工处理，高炉冶炼时易于粉化、还原性和熔滴性差，会阻碍高炉的顺行，恶化冶炼指标。目前国内高炉块矿质量分数一般仅 10%~15%，宝钢、首钢等钢铁企业的高炉含铁炉料中，天然块矿的质量分数曾高达 20% 以上，但无法长期维持较好的冶炼指标^[3,4]。而烧结工艺可将铁矿石生料变熟料，烧结后产品具有成分稳定、粒度合适、还原和熔滴性能好、造渣性能良好等优势，使用后可保证高炉的稳定顺行。尤其是在烧结料中配入一定量熔剂后所产生的熔剂性烧结矿，可使高炉冶炼少加或不加石灰石，降低炉内热消耗，从而改善高炉的生产指标。高碱度烧结矿搭配酸性球团矿已成为我国大型钢铁企业高炉的主要炉料结构，表 1-1 为我国部分大型钢铁企业的高炉炉料结构^[5]。

表 1-1 我国部分大型钢铁企业的高炉炉料结构

企业名称	高炉炉料结构
宝钢	高碱度烧结矿 74.5%+酸性球团矿 8.5%+天然块矿 17%
安钢	高碱度烧结矿 70%+酸性球团矿 25%+天然块矿 5%
鞍钢	高碱度烧结矿 70%+酸性球团矿 30%
邯钢	高碱度烧结矿 73%+酸性球团矿 19%+天然块矿 8%
酒钢	高碱度烧结矿 63%+酸性小球烧结矿 21%+天然块矿 16%
包钢	高碱度烧结矿 75%+酸性球团矿 20%+天然块矿 5%
石钢	高碱度烧结矿 85%+酸性烧结矿 15%

(3) 去除含铁原料中挥发成分和有害杂质。对于含碳酸盐（如菱铁矿）、结晶水（如褐铁矿）较多的矿石，需要通过预处理脱除挥发后才能供高炉使用。此外，天然铁矿中还含有硫、砷、氟、钾、钠、铅、锌等有害元素。其中硫是影响钢质量极为有害的元素，可大大降低钢的塑性，出现金属热脆现象，中国国家标准规定生铁中允许含硫量最高不得超过 0.07%，企业则常以 0.03% 作为质量考核指标。高炉冶炼过程中虽能脱硫，但脱除 1kg 硫需消耗 26.5kg 焦炭；炼钢过程脱硫比高炉还要难得多。砷作为一种有害元素，可使钢铁产品产生冷脆并影响钢材的力学性能，砷在钢中偏析严重，降低钢的冲击韧性，易使钢在加热过程中开裂。高炉脱砷量极其有限，常在铁水预处理及精炼中加入 Ca-Fe 合金来脱除。氟对高炉炉渣冶金性能有不利影响，而且在高温下气化后将腐蚀金属。钾、钠、锌在高炉内会循环富集，促使炉瘤形成，从而损坏炉衬；铅由于比重大，熔点低，破坏高炉炉底。烧结过程是在高温和氧化性气氛下完成的，可在不额外消耗燃料的前提下为硫的氧化提供条件，实现硫的脱除，明显减轻炼铁和炼钢过程的脱硫任务，非常经济合理。除了脱硫以外，烧结过程还能部分去除铁原料中的砷、氟、钾、钠、铅、锌等有害元素，为后续流程的清洁生产和优质钢的生产创造条件^[1,6]。

(4) 扩大可利用的冶金资源范围，变废为宝。随着优质铁矿资源的不断减少和人类对环境的日益关切，各种复杂共生铁矿和含铁二次资源的处理和利用的要求日益迫切。在目前尚无其他成熟可靠的处理技术前提下，烧结可将这类物料作铁矿石替代品加以回收利用，不仅有利于扩大铁矿炼铁资源，而且还可减少公害和降低炼铁成本。

(5) 降低钢铁生产过程中燃料的消耗。尽管烧结过程需要一定的能耗，但由于烧结矿的物理性能和冶金性能均远优于天然矿，高炉冶炼使用烧结矿可使综合能耗、电耗、成本均显著降低，设备生产能力大幅提高，在大型高炉冶炼

中效益尤为显著。表 1-2 所示为国外对天然矿和烧结矿的高炉冶炼效果的对比^[1]。此外，烧结过程中可以采用焦化和炼铁过程产生的碎焦粉、煤气和煤粉等做燃料。

表 1-2 各种炉料对高炉冶炼的影响

炉料指标	天然块矿	天然富矿	普通烧结矿
焦比/kg·t ⁻¹	850	670	615
相对生产率/%	100	127	139

(6) 消纳城市市政固废。随着我国经济的快速发展和城市化进程的不断加快，我国城市垃圾的产生量不断增加。据统计，目前我国年排放城市垃圾接近 2 亿吨以上，当前我国城市生活垃圾无害化处理主要以填埋为主，焚烧和堆肥为辅。焚烧处理技术因具有明显的减容化、减量化和资源化等优点，近年来得到了广泛的应用。然而生活垃圾焚烧烟气净化系统捕集的细颗粒物——垃圾焚烧飞灰（以下简称飞灰）富集了毒性较强的重/碱金属和二噁英类污染物，属危险废物需重点控制，其处理也是国内外垃圾焚烧企业面临的主要问题^[7-9]。高温处理技术是处理飞灰的有效方法之一，若能利用钢铁厂的高温冶金技术和设备对飞灰进行协同处理，不仅可以发挥钢铁企业的城市协调和友好功能，还可以减少固体废弃物处理的投资和运行成本^[9]。鉴于烧结过程具有相似的高温熔融环境，反应温度可高达 1250℃，部分二噁英在此温度条件下可无害化分解，重/碱金属可被固定在熔渣中，人们提出了采用烧结法处理飞灰方法。初步实验室研究表明：在烧结原料中配加 1% 的飞灰对烧结产质量指标影响不大，由飞灰带入的二噁英 90% 以上被降解，但烧结烟气中二噁英浓度相比常规烧结增加约 30%，飞灰带入的 Cl 元素对烧结原料中 K、Na、Pb、Zn 等重/碱金属元素的脱除有明显促进作用。当然，这方面的技术还处于研发阶段，对经济指标和末端治理的影响仍需进一步探索。

1.2 钢铁烧结技术总体发展历程

烧结生产工艺起源于英国、瑞典和德国，已有 100 余年的历史。大约在 1870 年前后，这些国家开始使用烧结锅。1887 年英国人 Heberlein F 和 Huntington T 在伦敦获得了世界上第一项关于硫化矿烧结焙烧法和用于这种方法的烧结盘设备的专利，此法以烧结锅为主体设备，采用鼓风方法进行间断烧结作业，这是冶金界公认的烧结法最早的专利。美国于 1892 年出现烧结锅，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 ($1.07\text{m}\times 7.78\text{m}$)，当时用来处理高炉炉尘，每天生产烧结矿 140t 。它的出现，引起了烧结生产的重大变革，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，天然富矿入炉率占比很大，导致烧结生产发展缓慢。随着高炉炉料结构的发展，熟料占比越来越高，烧结工艺才得到了迅速的发展^[1,6]。

日本是世界上烧结技术发展较早和较快的国家。日本于 1971 年率先建成投产台车宽 5m 、面积 500m^2 烧结机，1973 年扩大到 550m^2 ，1975 又扩大到 600m^2 ，1976 年、1977 年又连续投产 2 台 600m^2 烧结机。到 20 世纪 80 年代，日本单机平均烧结面积达 218m^2 ， 400m^2 以上的烧结机 11 台^[1,6]。

据资料记载，我国第一台烧结机于 1926 年在鞍钢建成投产，烧结面积为 21.8m^2 。此后又在 20 世纪三四十年代建成 2 台 50m^2 烧结机和若干台小型烧结机。1949 年以前全国共有烧结机 10 台，总面积 330m^2 ，烧结矿最高年产量达到 24.7 万吨（1943 年），主要生产酸性热烧结矿^[6]。

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、太钢等烧结厂相继建成投产。主要的带式烧结机规格也由起初的 $21.8\sim 90\text{m}^2$ 逐步扩建到 $90\sim 180\text{m}^2$ 。1985 年，宝钢从日本引进的 450m^2 大型烧结机投产，带动了我国烧结整体技术的快速提升，在消化吸收宝钢和国外烧结新技术的基础上，逐步积累了自主建设现代化大型烧结机的丰富经验^[6]。2010 年在太钢建成投产的 660m^2 烧结机是目前世界上单台面积最大的烧结机，2016 年投产的宝钢湛江 $2\times 550\text{m}^2$ 烧结机、2016 年投产的宝钢本部 3 号 600m^2 烧结机、2018 年投产的宝钢本部 2 号 600m^2 烧结机等工程项目，从工艺技术、装备技术、控制技术、环保技术等方面都达到了世界先进水平。

无论国内外，烧结技术都经历了工艺从简单到完善，规模从小到大，设备从落后到先进，控制从手动到自动，能耗从高到低，环保从无到有且标准不断升高的过程。

从我国烧结工艺流程的完善程度来看，可大致分为以下几个阶段^[10]：

(1) 烧结技术起步期（1949~1970 年）。这个时期，我国主要是学习苏联烧结技术。在苏联帮助下，先后在鞍钢、武钢、包钢、马钢、湘钢、太钢等建成 20 余台 65m^2 以下的烧结机，22 台 75m^2 烧结机，2 台 90m^2 烧结机，全部生产碱度 $1.0\sim 1.3$ 之间的自熔性烧结矿。这一时期，烧结工艺很不完善，料层厚度低于 200mm ，无自动配料，无烧结矿整粒，大部分无烧结矿冷却设施，且几乎没有环保设施，烧结技术经济指标非常落后。其工艺流程大致见图 1-1。