

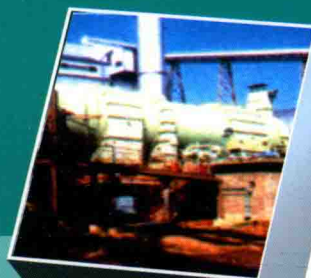


矿物加工工程卓越工程师培养·应用型本科规划教材

烧结球团理论与工艺

◎ 张汉泉 主编

SHAOJIEQIUTUAN
LILUN YU GONGYI



化学工业出版社

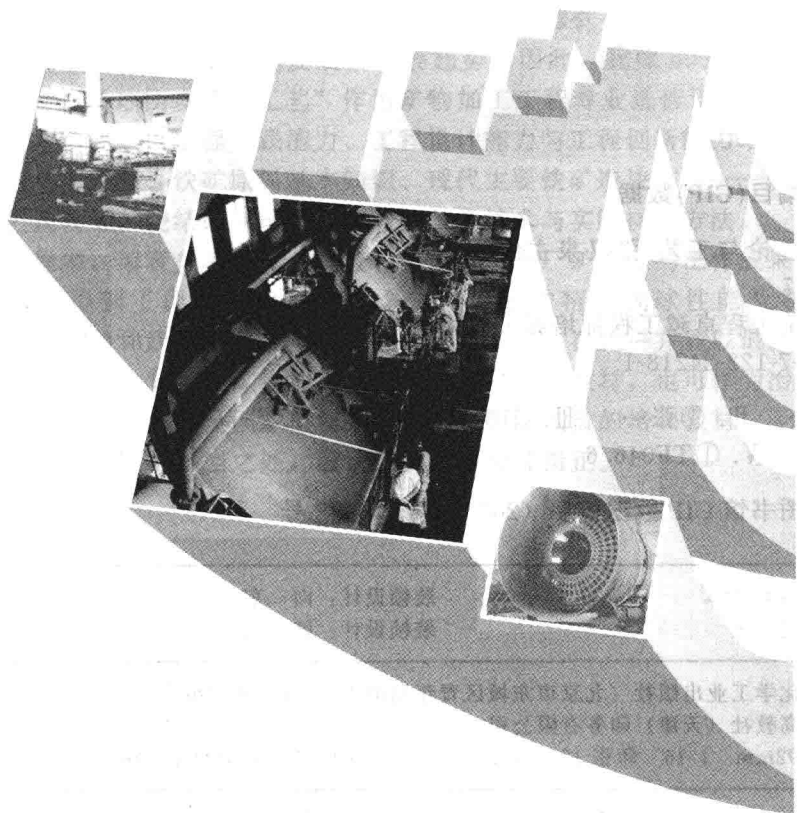


矿物加工工程卓越工程师培养·应用型本科规划教材

烧结球团理论与工艺

SHAOJIEQIUTUAN
LILUN YU GONGYI

张汉泉 主 编
罗立群 副主编
张泽强 主 审



化学工业出版社

· 北京 ·

《烧结球团理论与工艺》主要介绍了烧结球团的基本任务、铁矿原料基本知识、现代主要铁矿造块方法——烧结和球团基本理论、主要工艺及设备,具体包括烧结球团原料和燃料、铁矿烧结基本理论、烧结矿成矿机理及矿物组成、烧结工艺、铁矿球团生产现状、造球、球团焙烧固结、链算机-回转窑球团工艺、烧结矿和球团矿质量评价。

本书可作为普通大专院校矿物加工工程专业本科生的教材,也可作为冶金、化工和材料等专业本科生的参考书和冶金企业工程技术人员、管理人员的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

烧结球团理论与工艺/张汉泉主编. —北京:化学工业出版社, 2015. 7

(矿物加工工程卓越工程师培养·应用型本科规划教材)

ISBN 978-7-122-24218-1

I. ①烧… II. ①张… III. ①烧结-球团-生产工艺-高等学校-教材 IV. ①TF046.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 114822 号

责任编辑:袁海燕

装帧设计:向东

责任校对:边涛

装帧设计:韩飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:高教社(天津)印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张15 字数383千字 2015年9月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 48.00 元

版权所有 违者必究

“矿物加工工程卓越工程师培养·应用型本科规划教材” 编委会

主 任：张锦瑞

副主任：何东升 李富平 袁艳斌

编 委（按姓名笔画排列）：

李凤久 李冬莲 宋少先 张 翼

张汉泉 张泽强 张凌燕 陈铁军

赵礼兵 高惠民 韩秀丽

秘书长：赵礼兵

目 前 言

矿物加工工程专业是实践性非常强的工科专业，国家教育部大力提倡应用型人才培养，各高校积极开展卓越工程师培养计划、专业综合改革等本科教学工程建设，在此背景下，化学工业出版社会同武汉理工大学、华北理工大学、武汉科技大学、武汉工程大学的专家教授，规划出版一套“应用型本科规划教材”。

随着现代高炉炼铁向着高产、低耗、长寿目标发展和钢铁冶炼新流程的迅速兴起，对入炉炉料的要求越来越高，高炉合理炉料结构的研究越来越受重视，人造熟料在钢铁工业中的使用和作用越来越显得迫切和重要，已成为一种不可或缺的高炉炉料。世界上最先进的高炉炼铁指标是由使用 100% 球团矿的瑞典 SSAB 创造的，目前先进的钢铁工厂设计也采用 50% 球团矿 + 50% 烧结矿的炉料结构。通过将酸性球团矿与高碱度烧结矿合理搭配的高炉用料，可以进一步优化高炉炉料结构，提高高炉利用系数，使炼铁生产达到增产节焦、降低成本、改善环境的目的，是我国冶金行业发展的主要趋势。因此，我国 60% 开设矿物加工工程专业的高校已把“烧结球团理论与工艺”作为矿物加工工程专业选修课。本书开拓专业视野，立足应用型人才培养，以工程实践能力、工程设计能力与工程创新能力培养为核心，主要介绍烧结球团的基本任务、铁矿原料基本知识、现代主要铁矿造块方法——烧结和球团基本理论、主要工艺及设备，烧结矿和球团矿生产的基本技术与实践操作方法。

在编写过程中，编者参考了兄弟院校、科研单位和厂矿企业的工作成果，已统一列在参考文献中；并且得到了国家自然科学基金 [人工磁铁精矿成球性能及氧化动力学研究 (51474161)] 的资助和武汉工程大学教务处的的大力支持，在此一并致以最诚挚的谢意。

本书可作为普通大专院校矿物加工工程专业本科生的教材，也可作为冶金、化工和材料等专业本科生的参考书和冶金企业工程技术人员、管理人员的培训教材。

由于编者水平所限，不当之处，敬请各位读者批评指正。

编者

2015 年 3 月于武汉

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 烧结、球团在钢铁工业中的地位	1
1.2 现代高炉精料方针	2
1.3 烧结球团发展趋势	5
1.3.1 不断提高含铁品位	5
1.3.2 设备大型化	6
1.3.3 大力发展球团矿	7
思考题	9
第 2 章 烧结球团原料和燃料	10
2.1 天然铁矿石	10
2.2 人工磁铁矿	14
2.3 铁矿石碱度	15
2.4 二次含铁原料	16
2.5 熔剂	16
2.5.1 烧结用熔剂	17
2.5.2 球团添加剂	17
2.6 球团黏结剂	18
2.6.1 无机黏结剂	18
2.6.2 有机黏结剂	23
2.7 燃料	23
2.7.1 煤	23
2.7.2 焦炭	26
2.7.3 气体燃料	26
2.7.4 液体燃料	27
思考题	27
第 3 章 铁矿烧结基本理论	28
3.1 铁矿烧结生产的发展	28
3.2 烧结过程燃料燃烧与传热规律	30
3.2.1 烧结料层燃料燃烧基本原理	30

3.2.2	固体燃料燃烧动力学	31
3.2.3	烧结料层中燃烧带	32
3.2.4	固体燃料特性及用量对烧结过程的影响	34
3.2.5	烧结料层中的温度分布	35
3.3	烧结过程物理化学原理	42
3.3.1	水分在烧结过程中的行为与作用	42
3.3.2	固体物料的分解	45
3.4	烧结料层的气体力学	56
3.4.1	烧结料层的透气性	56
3.4.2	烧结过程中料层结构的变化	59
3.4.3	气体通过散料层的阻力损失计算	60
3.4.4	烧结过程透气性变化规律	61
3.4.5	烧结料层各带阻力分析	61
3.4.6	改善烧结料层透气性的途径	62
	思考题	65

第4章 烧结矿成矿机理及矿物组成 66

4.1	烧结成矿机理	66
4.1.1	烧结过程固相反应	66
4.1.2	烧结过程液相的形成与结晶	71
4.1.3	烧结过程中的各类液相体系	73
4.2	烧结矿的矿物组成与结构	77
4.2.1	烧结矿的矿物组成与结构	78
4.2.2	烧结矿的矿物组成和结构对其性能的影响	83
4.2.3	影响烧结矿矿物组成与结构的因素	86
4.2.4	提高烧结矿质量的途径	90
	思考题	92

第5章 烧结工艺 93

5.1	原料准备	94
5.1.1	原料接收	94
5.1.2	原料储存、中和(混匀)	95
5.2	配料	96
5.3	混合制粒	97
5.4	混合料烧结	101
5.4.1	布料	101
5.4.2	烧节点火与保温	102
5.4.3	烧结	105
5.5	烧结矿处理	107
5.6	新型烧结技术	112

5.6.1 低温烧结法	112
5.6.2 小球烧结法	113
5.6.3 厚料层烧结	114
5.6.4 双层烧结	115
5.6.5 燃料分加技术	116
思考题	116

第6章 铁矿球团生产现状 117

6.1 国外球团生产状况	117
6.2 我国球团生产状况与资源需求	119
6.3 我国高炉对球团矿的要求	123
6.4 球团与烧结的比较	125

第7章 造球 127

7.1 球团原料特征	127
7.2 原料准备	129
7.2.1 配料	129
7.2.2 混匀	130
7.2.3 脱水	132
7.2.4 润磨与高压辊磨	133
7.3 成球理论基础	134
7.3.1 颗粒成球机理	134
7.3.2 水在成球过程中的作用	136
7.3.3 成球过程	140
7.3.4 成球动力学	144
7.4 影响成球的因素	146
7.4.1 原料水分	146
7.4.2 原料准备方式及添加量	149
7.4.3 原料的粒度、粒度组成和表面特性	150
7.4.4 添加剂的影响	151
7.4.5 工艺设备参数对造球的影响	154
7.4.6 操作工艺条件对造球的影响	156
7.5 造球设备	157
7.5.1 圆盘造球机	158
7.5.2 圆筒造球机	160
思考题	163

第8章 球团焙烧固结 164

8.1 生球干燥	164
----------------	-----

8.1.1	生球干燥机理	164
8.1.2	干燥过程生球强度的变化	166
8.1.3	影响生球干燥的因素	166
8.1.4	生球爆裂温度的影响因素	168
8.1.5	提高生球破裂温度的途径	170
8.2	球团焙烧固结机理	172
8.2.1	球团焙烧过程	173
8.2.2	球团预热	173
8.2.3	球团焙烧的固结机理	176
8.2.4	铁矿球团固结的形式	178
8.2.5	球团矿矿物组成和显微结构	181
8.3	影响球团焙烧过程的因素	182
8.3.1	焙烧温度	182
8.3.2	加热速度	183
8.3.3	焙烧时间	183
8.3.4	焙烧气氛	184
8.3.5	燃料性质	184
8.3.6	球团冷却方式和冷却速度	184
8.3.7	生球尺寸	185
8.3.8	硫含量	185
8.4	球团焙烧过程中有害杂质的去除	186
8.5	球团矿质量进步	186
	思考题	186

第9章 链算机-回转窑球团工艺 **188**

9.1	链算机-回转窑球团工艺与装备	189
9.1.1	回转窑	189
9.1.2	链算机	192
9.1.3	环式冷却机	195
9.2	链算机-回转窑球团工艺控制	197
9.2.1	烘炉和试车	197
9.2.2	工艺过程	199
9.2.3	链算机-回转窑工艺形式	200
9.2.4	回转窑开炉	201
9.2.5	常见工艺事故分析及预防	202
9.3	链算机-回转窑球团质量控制	205
9.4	链算机-回转窑球团新技术	206
9.4.1	实现链算机均匀布料的新途径	206
9.4.2	回转窑前部网孔通入二次风技术	207
9.4.3	回转窑液压驱动系统	207
9.5	典型实例	208

9.5.1 鞍钢球团厂	208
9.5.2 武钢矿业公司鄂州球团厂	209
思考题	212

第 10 章 烧结矿和球团矿质量评价 **213**

10.1 烧结矿理化性能	213
10.1.1 化学成分及其稳定性	213
10.1.2 粒度组成与筛分指数	213
10.1.3 烧结矿强度	213
10.2 球团矿理化性能	215
10.2.1 生球质量标准及检验方法	215
10.2.2 成品球团质量要求及标准	217
10.3 烧结矿和球团矿冶金性能	219
10.3.1 还原性	219
10.3.2 低温还原粉化性	222
10.3.3 还原膨胀性	222
10.3.4 高温软熔特性	223

参考文献 **227**

第1章 绪论

1.1 烧结、球团在钢铁工业中的地位

铁矿石经过采矿、选矿之后呈块状和粉末状态存在，尚不能完全满足高炉炼铁精料方针的需求。精料是高炉炼铁的基础。国内外炼铁生产实践表明，高炉炼铁技术水平如何，精料技术的影响率占70%，其他因素占30%，包括高炉操作、装备水平和现代化管理技术等。

高炉炼铁的炉料包括：铁矿石、烧结矿、球团矿、焦炭、石灰石、萤石、锰矿、碎铁等。随着炼铁科技的发展，现在高炉炼铁已基本不使用萤石和锰矿；石灰石和白云石原则上也不直接加入高炉，而是在烧结配料中使用；铁矿石一般也不直接加入高炉，而是加工成烧结矿或球团矿。在采用科学的生产工艺技术和装备之后，高炉炼铁就能够实现优质、高产、低耗、长寿、高效益，进而提高钢铁产品的市场竞争力。

现代高炉炼铁生产流程框图见图1-1。炼铁系统工序能耗占钢铁工业总能耗的70%，所以说高炉炼铁承担着钢铁工业的节能降耗、降低成本和环境友好的重任。完成上述重任，高炉炼铁的原料质量起着决定性的因素。铁矿石是生产烧结矿和球团矿的主要原料。2004年全国重点大中型炼铁企业所用烧结矿和球团矿的比例达93.02%。所以说，评价烧结矿和球团矿的质量标准，大部分是对铁矿石质量的评价。

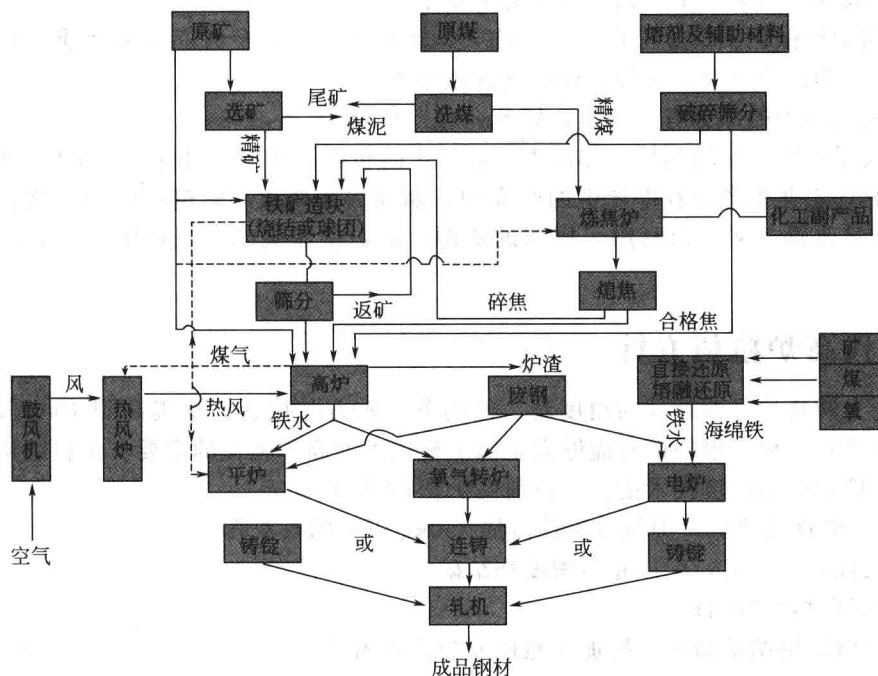


图 1-1 现代高炉炼铁生产流程框图（未包括蒸汽、水、电等）

铁矿石（iron ore）主要成分：铁（Fe），磷（P），硫（S），二氧化硅（ SiO_2 ），锰（Mn），氧化铝（ Al_2O_3 ），水分（moisture）。按粒度分类：

- 铁矿粉 (iron ore fines), 粒度: 0~1mm;
- 块铁矿 (iron ore lumps), 粒度: 6.3~50mm;
- 烧结粉矿 (sinter feed), 粒度: 0~6.3mm;
- 球团矿 (iron ore pellets), 粒度: 6~16mm;
- 球团粉矿 (pellets feed), 粒度: 0~1mm。

由于天然富矿资源有限, 而其冶金性能又不如人造富矿优越, 所以绝大多数现代高炉都用人造富矿, 或大部分用人造富矿、兑加少数天然富矿冶炼。在这种情况下, 钢铁厂便兼有人造富矿和天然富矿两种处理流程。在 1937 年以前, 高炉原料主要是天然矿, 烧结矿只占 1%; 到了 1957 年天然矿占 69%, 人造富矿占 31%; 20 世纪 70 年代, 天然矿占 33%, 人造富矿占 67%; 20 世纪 80 年代, 天然矿占 27%, 人造富矿占 73%; 到 2000 年, 高炉炉料中天然矿占 2% 左右, 人造富矿占 98% 左右, 甚至 100%。

以原矿直接供应高炉冶炼用的炉料叫生料 (raw material)。将各种原料配合后经高温处理的人造块矿 (烧结矿和球团矿) 叫熟料 (agglomerated material)。熟料的优点: 由于熟料的造渣过程已经完成, 在冶炼过程中只进行金属氧化物还原和分离, 燃料消耗、电耗大大降低, 成本下降, 设备生产率大大提高。因此, 将粉状物料根据不同需要加工成块状产品的工艺, 已经在工业生产中得到广泛的应用。

造块: 富选得到的精矿粉, 天然富矿破碎筛分后的粉矿, 以及一切含铁粉尘物料 (如高炉、转炉炉尘, 轧钢皮, 铁屑, 硫酸渣等) 不能直接加入高炉, 必须用烧结或制团的方法将它们重新造块, 制成烧结矿、球团矿, 或预还原炉料。当今世界上, 人造块矿原料方法有烧结法、球团法。

造块不仅解决了入炉原料的粒度问题, 扩大了原料来源, 同时, 还大大改善了矿石的冶金性能, 提高高炉冶炼效果, 铁矿造块的主要作用:

- ① 为高炉提供化学成分稳定、粒度均匀、还原性好、冶金性能高的优质炉料, 从而强化冶炼过程, 为高炉高产、优质、低耗创造良好条件。
- ② 除去原料中的部分有害杂质, 如 S、As、Zn 等。
- ③ 扩大了有效资源的利用, 如矿山开采产生的粉矿和贫矿经过深加工所得的精矿粉。
- ④ 可利用工业生产过程中的废弃物, 如高炉瓦斯灰、轧钢产生的氧化铁皮等, 使工厂环境质量改善, 又综合利用了国家的资源。高炉使用烧结矿、球团矿之后, 生产率提高、焦比下降。

1.2 现代高炉精料方针

从理论上和高炉经营管理的角度看, 使用单一矿石并把熟料率提高到 100% 是合理的。然而目前还没有一种理想的矿石能够完全满足现代大型高炉强化的需要。炉料结构合理与否直接影响高炉冶炼的经济技术指标。目前高炉炉料结构:

- ① 100% 酸性球团矿, 但每吨生铁需加 250kg 以上的石灰石。
- ② 以酸性球团为主, 配加超高碱度烧结矿。
- ③ 100% 自熔性烧结矿。
- ④ 以高碱度烧结矿为主, 配加天然矿或酸性球团矿。

采用什么样的炉料, 应依据国家的具体条件, 即合理利用国家资源而定。合理炉料结构应从国家和本企业实际情况出发, 充分满足高炉强化冶炼的要求, 能获得较高的生产率, 比较低的燃料消耗和好的经济效益。符合这些条件的炉料组成就是合理的炉料结构。

国内外高炉炼铁的实践表明, 精料 (high-grade burden) 对高炉炼铁科技进步的影响率

在70%左右。精料工作是高炉的基础，精料技术是钢铁企业的核心技术，是降低成本的关键。

炼铁高炉的精料技术要重点突出高品位、高强度、高碱度、高熟料率、净炉料、粒度均匀、稳定性好、有害杂质少、冶金性能好等技术特点。精料的基本因素包含入炉矿品位高、矿石的冶金价值高、烧结矿和球团矿的强度高、烧结矿碱度高等内容。

精料技术的内容：精料技术对高炉炼铁技经指标的影响率在70%，其中焦炭质量的影响占30%左右，高炉操作占10%。精料技术的内涵有：高、熟、稳、均、小、净、少、好八个方面。

(1) 高 入炉矿含铁品位高，原燃料转鼓指数（强度）高。品位高是精料的核心，经验数据表明，高炉入炉矿石品位提高1%，焦比下降2.5%，产量提高3%，吨铁渣量减少30kg，允许多喷煤粉15kg。2013年我国高炉入炉矿品位较高的企业是：宝钢和太钢均为59.61%、包钢59.42%、兴澄59.21%、沙钢58.77%、鞍钢58.70%等。国际上最先进水平高炉入炉矿品位为64%，其相应渣量在150kg/t铁左右。

提高入炉矿品位的方法如下：

① 配用高品位的矿石。进口矿的品位高，能有效地提高入炉矿品位。

② 烧结采取高铁低硅新技术。“吃百家矿”的企业，尽可能选购高铁低硅的矿粉，提高烧结原料的品位，同时采取高铁低硅新技术生产高品位烧结矿。低 SiO_2 烧结矿不仅具有良好的还原性能，还有较好的高温冶金性能。

③ 球团矿提高品位的方法是：将矿粉磨细，提高精矿细度， -0.074mm 含量 $\geq 70\%$ ， $\text{TFe} \geq 68\%$ ；减少皂土用量，提高球团矿的品位；降低球团矿 SiO_2 含量，对于提高品位、改善球团矿性能也有良好的作用。

高炉入炉料的强度是用转鼓指数来表示的，我国大部分企业采用YB/T 5166—93标准，高强度烧结矿的一级品 $\geq 66.0\%$ ，优质烧结矿 $\geq 70\%$ 。我国要求球团矿转鼓指数 $> 78\%$ ，抗磨强度 $A < 5\%$ ，压缩强度 $> 2000\text{MPa}$ 。生产实践表明：在其他条件比较理想的情况下，入炉烧结矿和球团矿的转鼓指数稳定升高1%，高炉产量将提高1.9%左右。

提高烧结矿强度的办法：

① 控制原料粒度：矿粉的粒度要控制在8mm以下，中间粒级0.125~1mm的部分要控制在一个合适的范围；焦炭粉和熔剂的粒度要 $< 3\text{mm}$ ，同时焦粉 $< 0.25\text{mm}$ 的细粒越少越好。

② 严格控制混合料水分：混合料对磁铁矿和赤铁矿适宜的水分要求在7%~9%，而波动的范围一般 $< 0.5\%$ 。混合料最佳水分一般为混合料最大透气性时水分量的90%，一次混合时水量要加总量的99%，以保障物料的潮湿和制粒，在二次混合中只添加1%的水分作调整。

③ 加强混合料的制粒：二次混合的主要任务是强化粒度。一次混合与二次混合的时间比约为2:1，总的混合时间在9min左右为佳。混合时间长造球性能好，进而改善烧结机的透气性，但会增加设备投资。均匀混合的制粒是提高烧结矿强度的关键，一些单位甚至加长了圆筒混合机的长度。

④ 以细精矿为主的烧结厂，可适当添加石灰。预热混合料到烧结废气的露点以上；石灰作为黏结剂，强化混合料的制粒。

⑤ 加强对烧结机的点火温度、料层厚度、机速、抽风等工艺参数的控制。

提高球团矿强度的办法：

① 要细精矿粉的 -0.074mm 粒级含量 $> 85\%$ ； -0.044mm 粒级含量 $> 60\%$ 。

② 高球团矿质量的关键是精矿粉造球的质量，对添加水分和皂土量要根据不同矿物性能选择最佳值。

③ 生产实践表明，采用大型链算机-回转窑生产的球团矿质量要比竖炉工艺好。

高碱度烧结矿与熔剂性烧结矿相比，具有强度高、含 FeO 低、还原性好、软化温度高等优点。目前，国内外炼铁企业大多数采用 70% 左右的高碱度烧结矿的炉料结构。

(2) 熟 指烧结矿加球团矿占入炉料比例。熟料比下降 1%，焦比会升高 2~3kg/t。国内外高炉炼铁生产实践表明，使用熟料炼铁可大幅度提高高炉各项技术经济指标。因为熟料可提高铁矿在高炉内的间接还原比例，提高炉料透气性，降低燃料消耗，提高产量。2007 年上半年全国重点企业熟料比为 92.48%，宝钢为 81.42%，海鑫为 76.32%，鞍钢为 97.21%，首钢为 83.05%，莱钢为 91.55%，三明为 96.88%，邯钢为 87.96%。2013 年我国重点企业熟料比为 91.73%。每提高 1% 的熟料率可降低焦比 1.2kg/t，增产 0.3% 左右。近些年我国高炉的熟料率已从小于 50% 提高到 80%~90%。首钢、鞍钢、本钢一般在 95% 以上，接近 100%。

(3) 稳 原燃料化学成分和物理性能要稳，波动范围要小。要求：品位波动 $< 0.5\%$ ，碱度波动 < 0.05 ；影响：品位波动 1%，产量影响 3.9%~9.7%，焦比 2.5%~4.6%；碱度波动 0.1，产量影响 2%~4%，焦比 1.2%~2.0%。目前，我国高炉生产中存在的最大问题是原燃料成分波动大。

(4) 均 入炉原燃料粒度要均匀。粒度均匀会提高炉料透气性，提高矿石间接还原度，炉料的填充作用，使孔隙度减少。粒度均匀会降焦增产。烧结和焦炭均要进行整粒，就是要实现粒度均匀，例如焦炭要保证 60mm 左右粒度占 80% 以上， $> 80\text{mm}$ 的要小于 10%，物料中 -5mm 含量的比例要小于 5%，5~10mm 比例要小于 30%。

炉料中粒度尺寸大小的比例与大小粒度所占的百分数，对炉料在炉内的透气性起着决定性作用。实验表明，混合料中大粒度级和小粒度级的增加，都会使混合料的空隙度变小，使煤气通过料层的阻力增加而影响高炉的顺行。优化的粒度组成是粗细粒度级的粒度差越小越好。

(5) 小 是指原燃料粒度要小。烧结 25~40mm，焦炭 25~45mm，球团 8~15mm，块矿 8~30mm。炉料粒度偏小，比表面积大，与还原剂接触面大，可提高矿石还原度，促进提高间接还原比例。个别企业加入的白云石粒度偏大，造成焦比升高。没完全熔化的白云石进入炉缸，消耗炉缸的热量。块矿、球团、白云石均有穿透现象，会比炉料提前进入炉缸。高炉炼铁实践表明，最佳强度的粒度是：烧结矿为 25~40mm，对容易还原的赤铁矿和褐铁矿为 8~20mm；入炉粒度由 10~40mm 降为 8~30mm 时，高炉产量可增加 9.6%，焦比下降 3.1%。

(6) 净 要筛除小于 5mm 的粉末。净炉料能提高高炉炉料的透气性，为提高高炉冶炼强度、高炉顺行高产和增加喷煤比创造出有利条件，为减少炉料之间的填充作用，要求 5~10mm 粒度的炉料所占比例要 $< 30\%$ ；要求 5mm 以下的炉料占全部炉料的比例不超过 3%~5%，5~15mm 的比例要小于 30%，实现上述要求焦比下降 0.5%，产量增加 0.4%~1.0%。物料中 -5mm 含量从 4% 升到 11%，煤气阻力由 1.6 升到 2.9，焦比升高 1.6kg/t。

(7) 少 含有害杂质少。 $S \leq 0.3\%$ 、 $P \leq 0.2\%$ 、 $\text{Cu} \leq 0.2\%$ 、 $\text{Pb} \leq 0.1\%$ 、 $\text{Zn} \leq 0.08\%$ 、 $\text{As} \leq 0.07\%$ 、 $\text{K}_2\text{O} + \text{N}_2\text{O} \leq 0.25\%$ ；焦炭灰分中含有 $\text{K}_2\text{O} + \text{N}_2\text{O}$ 要少，煤中硫含量要小于 2.0%。

(8) 好 铁矿石冶金性能好。铁矿石还原性好：还原度大于 60%；低温还原粉化率低，每升高 5%，产量下降 1.5%；要求荷重软化温度高，铁矿石滴熔温度高，铁矿熔化区间窄。

铁矿石的冶金性能 (metallurgical properties) 包括还原性、低温还原粉化性、荷重还原软化性和熔滴性等, 是指矿石在冶炼状态下 (高温、还原性气氛) 表现出的一些性能。

① 矿石的还原性——还原指数 (reduction index) 铁矿石的还原性取决于矿物性质、矿石种类、矿石所具有的气孔度及气孔特性等。矿物特性是 Fe_2O_3 易还原, Fe_3O_4 难还原, $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ 更难还原, 所以说褐铁矿还原性最好, 其次是赤铁矿, 而磁铁矿难还原。

还原指数 $\text{RI} > 60\%$ 的矿石为还原性好的铁矿石, 大高炉要求矿石还原性要改善 10% , 其波动范围在 $\pm 1\%$ 。矿石的还原性与 FeO 含量相关性强, 一般 FeO 含量高还原性能差。

目前在部分企业对烧结矿还原性好的认识还很一般, 缺乏深入的研究, 没有有效的技术措施控制烧结矿还原性。

② 低温还原粉化性 (reduction degradation index) 高炉原料 (特别是烧结矿) 在高炉上部的低温区还原时会严重破裂、粉化, 使料柱的空隙度降低, 煤气透气性恶化。

低温还原粉化性 RDI 每升高 5% , 高炉产量下降 1.5% , CO 利用率也会下降。RDI 的高低与烧结生产使用的矿粉种类有关。富矿粉生产出来的烧结矿 RDI 偏高, 含 TiO_2 高的精矿粉生产的烧结矿 RDI 也高, 而采用磁精矿粉就低。降低 RDI 的办法是设法降低造成烧结矿 RDI 升高的菱形赤铁矿的数量, 可适当增加 FeO 含量和添加卤化物等。许多企业在烧结矿成品表面喷洒 3% 的卤化物溶液, 使 RDI 降低了 $10.8\% \sim 15\%$, 高炉产量提高约 5% 。

③ 荷重还原软化性 (softening point under load) 是指矿石在荷重还原条件下, 收缩率在到达 $3\% \sim 4\%$ 时的温度。为有利于高炉煤气顺利通过软熔带, 要求铁矿石软化温度要高一些, 软熔温度区间要窄。

影响矿石软熔性的主要因素是渣相的数量和熔点, 矿石中 FeO 含量和其生成矿物的熔点, 还原过程中产生的含铁矿物及金属铁熔点也对矿石的熔化和滴落产生重大影响。 $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ 的熔化温度低 (1205°C), 而 $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ 共熔混合物熔点仅 1178°C , $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{FeO}$ 熔点为 1177°C 。所以, 要减少烧结矿中的 FeO 含量。将炉渣中 MgO 含量控制在 $4\% \sim 10\%$, 提高碱度有利于提高脉石熔点, 这也就提高了矿石的软熔性。

④ 熔滴性 (melting-down properties) 是指铁矿石在高炉开始还原熔化的温度。为使高炉生产顺行, 要求铁矿石熔滴温度高, 区间窄, 这可使高炉内煤气压差低一些。

1.3 烧结球团发展趋势

21 世纪之前, 我国各个钢铁集团大都还没有形成节能减排的意识, 烧结球团技术发展主要用在提高企业的生产总量上, 对于能源消耗基本没有过高的重视。进入 21 世纪以来, 我国钢铁企业迎来了百年难得的发展机遇, 在这种大环境下几乎所有的企业都开足马力加大钢铁的生产量, 这种情况一直持续到 2008 年才暂告一段落。由于我国现已探明的大部分铁矿石储量已被开发利用, 而且我国的铁矿石 97.5% 为贫杂矿 (平均含铁量仅为 32.7%)。同时, 我国长期计划经济所造成的炼铁原料准备结构错位, 使球团及细粉精矿生产技术落后于世界先进水平。因此, 随着“精料方针”的贯彻, 高炉配料需要各钢厂不同程度地进口球团矿, 而国内新型烧结矿开发及球团矿生产又需要大量地进口高品位粉精矿。2010 年全球球团矿产量 3.881 亿吨, 创历史新高。

2012 年, 中国成为全球最大的球团矿生产国, 产量增至 1.103 亿吨。目前超过 500 万吨的新增球团矿年产能正在建设中。球团矿与烧结矿比例达到 $1:3$ 。

1.3.1 不断提高含铁品位

2010 年我国烧结工序能耗为 52.65kg 标煤/t, 达到钢铁行业 (烧结) 清洁生产标准 3

级要求,较2009年下降了2.3kg标煤/t,取得较大进步。烧结矿转鼓指数达到78.77%,符合钢铁行业(烧结)清洁生产标准3级要求,为高炉生产顺行提供了有力支持。烧结工序固体耗较2009年仅下降1kg/t。含铁品位与2009年相比稍有降低,这与2010年铁矿石价格和供应关系较大。未来烧结工序仍需提高含铁品位上下工夫,力争全面达到清洁生产三级标准要求。与2009年相比,烧结工序日历作业率下降3.21%,在烧结操作工艺方面仍须进一步改进提升。全面达到清洁生产要求。

1.3.2 设备大型化

“十一五”期间,我国钢铁工业适应了国民经济的快速发展,满足了工业化、城镇化等对钢材的旺盛需求,在装备大型化、节能减排、技术创新、综合竞争力增强等方面均有较大进展。“十二五”是我国钢铁工业实现科学发展、加快转变发展方式的攻坚阶段,调整钢铁工业结构,是加快新型工业化进程的重要任务。其中,装备大型化仍将是国家政策要求的方向。

部分企业依据自身生产实际,已实施或拟建的烧结总面积达到4242m²，“十二五”期间将新形成产能约4325万吨;链算机-回转窑、竖炉10余条(座),产能约1730万吨。对于新建和拟建的烧结球团装备,大型化仍将是主要趋势。另外,在“十二五”期间,为贯彻落实国家相关政策要求,钢铁工业在总量控制的基础上,淘汰落后装备仍将是工作重点,一大批落后的烧结机、竖炉将被逐渐淘汰,我国烧结、球团装备水平将得到进一步提升。

2009年我国重点大中型钢铁企业烧结机总量为491台,烧结机总面积为67731m²,平均单机面积138m²,总生产能力72669万吨,平均单机生产能力148万吨。

2009年我国烧结生产具有以下几个比较突出的特点:一是烧结机装备技术水平取得长足进步,130m²及以上烧结机占烧结机总量的38%,产能上则占到68%。大型烧结机无论是数量还是生产能力上都已逐渐占据主导地位。二是淘汰落后烧结装备工作取得一定成效;由于对节能环保工作的日益重视,钢铁企业小型烧结机各方面的劣势日益突出;在整个钢铁行业淘汰落后装备的大背景下,烧结落后装备淘汰工作取得了一定进展。三是烧结装备在生产、运行、维护等方面均取得显著成效。钢铁企业的烧结生产日历作业率、台时产量、从业人员实物劳产率等基本指标都维持在较高水平。

据统计,2010年新投产烧结总面积约为3575m²,总产能约为3555万吨。2010年我国新投产的烧结机从数量上与2009年相比呈下降趋势。究其原因,主要是受国际金融危机和整个钢铁行业宏观形势的影响。但是从装备水平上来看,2010年新投产的烧结机全部符合《钢铁产业发展政策》的相关要求:烧结机使用面积均大于180m²,平均烧结面积275m²,平均单机生产能力273万吨,其中360m²及以上大型烧结机4台,最大烧结机为450m²。这说明我国烧结机大型化工作正在持续、整体推进。

2009年我国球团装备中,竖炉生产能力为8700万吨,带式焙烧机生产能力为740万吨,链算机-回转窑生产能力为10200万吨,球团矿总生产能力为19640万吨。无论是从数量还是产能上,竖炉、链算机-回转窑都是我国球团工业的主力生产装备。在装备数量上,竖炉约占全国球团装备的一半以上;在装备产能上,链算机-回转窑工艺所占比重最高,达到了51.9%,明显超过竖炉产能,新建项目大多采用链算机-回转窑球团生产工艺。单机能力在240万吨及以上的链算机-回转窑生产线发展迅速,逐步成为球团矿的主力。除此之外,2009年带式焙烧机生产球团矿工艺在我国也取得了较大发展。首钢曹妃甸带式焙烧机的投产,为我国球团工业的多元化发展奠定了基础。

1.3.3 大力发展球团矿

据统计,2010年我国新投产的球团装备能力约为570万吨。与2009年相比,新投产的球团装备数量下降较为明显,这与整个钢铁行业的宏观形势密不可分。许多钢铁企业使用的球团矿来自于独立的球团生产企业,并未包括到此次统计之列,而这部分产能所占比重较大。2010年工信部发布《部分工业行业淘汰落后生产工艺装备和产品指导目录》,将 8m^2 以下球团竖炉纳入淘汰范畴,对实现球团工业的健康、快速发展起到积极的促进作用。

跨入21世纪以来,我国钢铁工业进入快速发展的轨道,作为高炉炼铁的一种主要含铁炉料,球团矿生产的发展速度超过了高炉炼铁年生长的速度。据统计,从2001年到2011年,我国生铁年产量由1.5554亿吨增长到6.29695亿吨,11年间年均增长27.71%;而球团矿年产量由1784万吨增长到2.041亿吨,年平均增长速度达到103.28%,球团矿占炉料结构的比例已接近20%。

球团质量、原料消耗、能耗水平取得进步。我国链算机-回转窑球团矿的含铁品位2005~2006年曾上升到高于64.5%的水平,但随着矿价的急剧上涨,2011年又下降到低于63.5%;竖炉球团一直处在62%~63%的水平。近几年,链算机-回转窑球团矿 SiO_2 含量接近6%,竖炉球团 SiO_2 含量高于6.2%。链算机-回转窑球团矿的转鼓指数达到95%,竖炉球团矿为91%~92%。近几年,首钢和鞍钢链算机-回转窑球团矿的含铁品位保持在65.5%以上,接近巴西进口球团矿的水平;武钢程潮链算机-回转窑球团矿成品球的 SiO_2 含量达到3.75%的优良水平。邯钢球团厂成品球的转鼓指数已达到97%的水平。

钢铁生产节省原材料,是资源循环与实现可持续发展的一项重要举措。吨球精矿粉消耗回转窑球团已基本稳定在1000kg以内,竖炉球团也下降到接近1000kg的水平。回转窑球团的吨球膨润土用量已下降到2011年的19.53kg,竖炉球团也下降到2011年的21.04kg。国外球团生产膨润土的用量可达到4~8kg/t球,因此我国球团生产膨润土用量还有一个较大的改善空间。首钢和鞍钢球团生产的膨润土用量近几年下降到了10~11kg/t球,已接近国外的先进水平。

我国回转窑球团工序能耗已下降到2011年的27.42kg标煤/t球,竖炉球团的工序能耗也下降到2011年的31.76kg标煤/t球。

球团对优化炉料结构意义重大。《2006年~2020年中国钢铁工业科学与技术发展指南》提出:“中国高炉炉料中球团比约12%,从当前优化炉料结构发展趋势看,中国应大力发展球团生产,并全面提高球团生产水平。”而球团技术的发展目标是“实现装备大型化,形成以不小于200万吨年产量的链算机-回转窑为主体的球团生产工艺与装备,加快淘汰小竖炉球团工艺装备”。

2001~2013年重点钢铁企业高炉原料质量指标见表1-1。

表 1-1 2001~2013 年重点钢铁企业高炉原料质量指标

年份		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
烧 结 矿	$w(\text{Fe})/\%$	55.73	56.54	56.74	56.90	56.00	56.80	55.65	55.97	55.39	55.53	55.20	54.78	54.38
	$w(\text{CaO})/$ $w(\text{SiO}_2)$	1.76	1.83	1.94	1.93	1.94	1.94	1.884	1.834	1.858	1.91	1.87	1.89	1.89
	转鼓指数 /%	66.42	83.72	71.83	73.24	83.77	75.75	76.02	77.44	76.59	78.77	78.71	78.98	79.69
球 团	$w(\text{Fe})/\%$				63.06	62.85		62.89		62.95	62.65			
	强度/N				2458	1389		2372		2449.9	2726.1			