

# 燒結理論與工藝

唐賢容 王篤陽 張清岑 編著

• 中南工業大學出版社 •



封面設計：郭 鳳

ISBN7-81020-496-3/TF.024

定價：4.40 圓



# 烧结理论与工艺

唐贤容 王笃阳 张清岑 编著

· 中南工业大学出版社 ·

湘新登字010号

烧结理论与工艺

唐贤容 张清岑 等编著

责任编辑：肖梓高

插图编辑：刘楷英

\*

中南工业大学出版社出版发行

中南工业大学印刷厂印装

湖南省新华书店经销

\*

开本：850×1168 1/32 印张：13.625 字数：341千字 插页：1

1992年10月第1版

1992年10月第1次印刷

印数：0001—1000

\*

ISBN 7-81020-496-3/TF·024

定价：4.40元

## 前 言

本书较系统地论述了烧结过程的燃料燃烧, 烧结过程的热交换, 水分在烧结混合料中的行为, 化学水和碳酸盐的分解, 氧化物的分解、还原和再氧化、烧结料层的气体力学、烧结过程的固相反应、液相形成及冷凝、烧结矿的矿物组成、结构及其性质等现代烧结理论, 并注意烧结理论与工艺的有机联系; 工艺部分除详细介绍烧结原料特性、烧结原料准备、混合料的烧结、烧结矿的处理外, 增加了烧结过程强化与节能、有色金属矿粉烧结、烧结过程控制和自动化等新内容。

本书在原有烧结学等教材的基础上, 经过多年教学和科研实践, 并引用了国内外有关文献资料编写而成, 全书分为两篇共计十八章, 由王笃阳(结论、第一~五章)、唐贤容(第六~十一章)、张清岑(第十二~十八章)编写, 最后由唐贤容、张清岑统理, 审查定稿。

本书可作为冶金资源工程、钢铁冶金、有色冶金等本科和专科学生的教材, 也可供有关工程技术人员和研究生参考。

本书在编写过程中得到本教研室, 不少工厂、设计和科研单位的大力帮助, 在此谨表衷心的感谢。

由于编者水平有限, 书中存在不妥之处, 恳请广大读者批评指正。

编 者

一九九二年四月

# 目 录

|               |        |
|---------------|--------|
| 绪 论           | ( 1 )  |
| 0.1 烧结的目的和意义  | ( 1 )  |
| 0.2 烧结精料的发展   | ( 2 )  |
| 0.3 烧结方法与工艺流程 | ( 10 ) |
| 0.4 选块方法的比较   | ( 12 ) |

## 第一篇 烧结过程的理论

|                      |        |
|----------------------|--------|
| 1. 抽风烧结过程            | ( 16 ) |
| 1.1 烧结过程概述           | ( 16 ) |
| 1.2 烧结过程中, 料层各带的温度变化 | ( 18 ) |
| 1.3 烧结料的结块           | ( 21 ) |
| 2. 烧结过程的燃料燃烧         | ( 23 ) |
| 2.1 气体燃料燃烧的热力学       | ( 23 ) |
| 2.2 固体燃料燃烧的热力学       | ( 28 ) |
| 2.3 固体燃料燃烧动力学分析      | ( 30 ) |
| 2.4 烧结料层中燃烧带的特性分析    | ( 33 ) |
| 2.5 燃料特性和用量对烧结过程的影响  | ( 44 ) |
| 3. 烧结过程的热交换          | ( 49 ) |
| 3.1 料层中的温度分布和蓄热      | ( 49 ) |

|     |                   |       |
|-----|-------------------|-------|
| 3.2 | 烧结料层中的传热          | (62)  |
| 3.3 | 燃烧带热交换特性对烧结机产量的影响 | (72)  |
| 3.4 | 烧结过程的热平衡          | (75)  |
| 4.  | 水分在烧结混合料中的行为      | (80)  |
| 4.1 | 水分对烧结过程的影响        | (80)  |
| 4.2 | 水分的蒸发过程           | (82)  |
| 4.3 | 水分的冷凝过程           | (88)  |
| 4.4 | 消除烧结料过湿带的主要措施     | (91)  |
| 5.  | 化学水和碳酸盐的分解        | (98)  |
| 5.1 | 化学水的分解            | (98)  |
| 5.2 | 混合料中碳酸盐的分解        | (102) |
| 6.  | 氧化物的分解、还原和再氧化     | (112) |
| 6.1 | 氧化物的分解            | (112) |
| 6.2 | 氧化物的还原            | (117) |
| 6.3 | 烧结过程中低价铁氧化物的再氧化   | (126) |
| 6.4 | 氧化-还原规律在烧结生产中的应用  | (134) |
| 7.  | 烧结料层的气体力学         | (141) |
| 7.1 | 烧结料层的透气性          | (141) |
| 7.2 | 烧结料层气体力学          | (143) |
| 7.3 | 烧结料层透气性的变化规律      | (149) |
| 7.4 | 改善烧结料层透气性的途径      | (153) |
| 8.  | 烧结过程的固相反应         | (174) |
| 8.1 | 固相反应理论            | (174) |

|      |                                |       |
|------|--------------------------------|-------|
| 8.2  | 烧结过程的固相反应·····                 | (177) |
| 8.3  | 烧结过程主要固相反应类型·····              | (184) |
| 9.   | 烧结过程的液相形成与冷凝·····              | (188) |
| 9.1  | 液相的形成·····                     | (188) |
| 9.2  | 液相的冷凝·····                     | (195) |
| 9.3  | 铁矿粉烧结主要液相形成与冷凝过程的相图<br>分析····· | (199) |
| 10.  | 烧结矿的矿物组成、结构及其性质·····           | (217) |
| 10.1 | 烧结矿中的矿物组成和结构及其性质·····          | (217) |
| 10.2 | 影响烧结矿矿物组成和结构的因素·····           | (222) |
| 10.3 | 烧结矿矿物组成和结构对烧结矿质量的影响            | (230) |
| 11.  | 烧结过程中某些元素的脱除·····              | (240) |
| 11.1 | 硫·····                         | (240) |
| 11.2 | 砷·····                         | (251) |
| 11.3 | 氟·····                         | (253) |
| 11.4 | 铅、铋、铜、钾和钠·····                 | (254) |

## 第二篇 烧结生产工艺

|      |                |       |
|------|----------------|-------|
| 12.  | 烧结原料及其特性·····  | (255) |
| 12.1 | 铁矿石·····       | (255) |
| 12.2 | 锰矿石·····       | (262) |
| 12.3 | 烧结燃料·····      | (268) |
| 12.4 | 熔剂·····        | (273) |
| 12.5 | 其他含铁物料の利用····· | (280) |

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| <b>13. 烧结原料的准备</b> .....    | (285) |
| 13.1 烧结原料的接受、贮存、中和与粒度的准备    | (285) |
| 13.2 烧结原料的配制.....           | (296) |
| 13.3 烧结料的混合与制粒.....         | (313) |
| <b>14. 混合料的烧结</b> .....     | (321) |
| 14.1 布料.....                | (321) |
| 14.2 烧结料的点火与保温.....         | (323) |
| 14.3 烧结过程的影响因素.....         | (327) |
| <b>15. 烧结矿的处理</b> .....     | (337) |
| 15.1 烧结矿的破碎筛分.....          | (338) |
| 15.2 烧结矿的冷却.....            | (339) |
| 15.3 烧结矿的整粒.....            | (351) |
| 15.4 烧结矿的质量评价.....          | (356) |
| <b>16. 烧结过程的强化与节能</b> ..... | (366) |
| 16.1 高碱度烧结.....             | (366) |
| 16.2 小球烧结.....              | (369) |
| 16.3 烧结矿的热处理.....           | (373) |
| 16.4 厚料层烧结.....             | (375) |
| 16.5 双层布料与燃烧分加.....         | (380) |
| 16.6 低温烧结.....              | (382) |
| <b>17. 其他有用矿物的烧结</b> .....  | (385) |
| 17.1 锰矿粉的烧结.....            | (385) |
| 17.2 铅、锌矿石的烧结.....          | (389) |

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| 17.3 铜精矿的烧结.....           | (399) |
| 18. 烧结过程的控制和自动化.....       | (402) |
| 18.1 概述.....               | (402) |
| 18.2 料场自动控制.....           | (403) |
| 18.3 烧结过程自动控制.....         | (405) |
| 18.4 我国烧结厂的自动控制及计算机应用情况... | (419) |
| 主要参考文献.....                | (424) |

# 绪 论

## 0.1 烧结的目的和意义

烧结是将粉状料（如粉矿）或细粒料（如精矿）进行高温加热，在不完全熔化的条件下烧结成块（烧结矿）的过程。物料的固结主要靠固相反应，以及颗粒表面软化、局部熔化和渣相生成。

在粉末冶金中，粉料粘结成型是靠固相反应，这一过程也称为烧结（Sintering），本课程是针对冶金工业中粉矿和精矿的烧结，扩散粘结仅起次要作用，而主要是靠液相粘结，也称为熔化烧结。烧结所需的热能，由混合料中添加的炭（或其中所含的硫），与通入过剩的空气燃烧而发生的，故又称为氧化烧结。

在高炉炼铁时，为了保证料粒透气性良好，要求炉料粒度均匀，粉末少、机械强度高（冷强度和热强度）。为了降低高炉焦化，要求炉料含铁品位高、有害杂质少，且具有自熔性和良好的还原性能。而采用烧结方法后上述要求几乎能全部达到。

贫矿经过选矿后所得到的细粒精矿，天然富矿在开采过程中和破碎分级过程中所产生的粉矿，都必需经过烧结成块才能进入高炉。含碳酸盐和结晶水较多的矿石，经过破碎进行烧结，可以除去挥发分而使铁富集。某些难还原的矿石，或还原期间容易碎裂，或体积膨胀的矿石，经过烧结变成还原性良好和热稳定性高的炉料。铁矿石中的某些有害元素，特别是硫，

可以在烧结过程中大部分脱除。

钢铁厂的含铁废料，各种含铁尘、泥、渣的综合利用，是国内外钢铁厂一个急待解决的问题，不妥善处理不仅造成有用金属浪费，而更严重的是造成环境污染。用烧结法可以处理大部分这种废料作为高炉炉料。

高炉使用天然矿和烧结矿时，是否需要添加石灰，石灰石和白云石作为熔剂，可能有下列三种情况：

(1) 生产酸性（含硅的）烧结矿，造渣所需的熔剂加到高炉中；

(2) 生产熔剂性烧结矿，达到高炉渣同样的碱度，高炉中只加入为满足块矿，球团矿和焦炭灰分等所需的熔剂。

(3) 生产高碱度烧结矿，在高炉中再加入部分块矿或酸性球团矿，调整到高炉炉渣碱度。

通常在高炉炉料结构中包含一定比例的非熔剂性的球团矿和自熔性烧结矿，对这种炉料结构（即块矿和酸性球团矿加熔剂性烧结矿）必需使用高碱度烧结矿。这里用  $(\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$  的重量比表示碱度。如果成品烧结矿中的熔剂量，使烧结矿冶炼成铁足以产生适当的炉渣，则叫自熔性烧结矿，即所有加入的含铁原料是自熔性烧结矿，那么其他所需原料仅仅是焦炭。如果烧结矿中所含的熔剂超过炉渣所需熔剂量同时加入部分块矿或酸性球团矿，这种烧结矿叫高碱度烧结矿。

因此，烧结法不仅能使粉矿成块，还对高炉炉料起着火法预处理的作用，使高炉冶炼达到高产，优质，低耗、长寿的目的。

## 0.2 烧结精料的发展

1. 烧结工艺的发展 这里只就烧结设备而言，从最初间

断生产的烧结锅发展到今天普遍使用的连续生产的带式烧结机,已经历了近百年,最初使用烧结法的是铜、铅、锌矿石,而用于铁矿石则是后来的事,实际上在19世纪中叶,在英国的铜矿山和德国的铅冶炼公司就建设了烧结锅。

1897年, T·Huntington 和 F·Heberlein 申请了含硫化铅矿焙烧的专利,这是烧结最早的专利(德国专利95601),为间歇式鼓风烧结法,设备为底部装炉篦的烧结锅。

1902年, W·Job提出将硫酸渣,铁矿粉与煤混合,在侧倾式炉上鼓风烧结,并申请了专利(德国 137438),后来又用作高炉灰的烧结。

1905年, E·J·Savelsberg首次将Huntington-Heberlein 烧结锅用于烧结铁矿石,并申请了专利(德国专利 210742)。

1909年, Schl; Penbach 申请了连续环式烧结机专利,烧结铅矿石。

A·S·Dwight 和 R·L·Lloyd 首先建议采用抽风烧结,并发明了连续作业的带式烧结机,一般简称为 D-L 式烧结机,1911年这种设备获得专利,并在美国钢铁生产中投产了第一台D-L烧结机。1914年德国也投产了这种烧结机。

1914年, J·E·Greenawalt 建议使用抽风操作的烧结盘烧结(美国专利1103196),从此周期作业的烧结盘也在钢铁生产中得到推广。

1904, 年就开始了回转窑烧结法。

20年代所建的烧结设备,主要是带式烧结机,烧结盘和回转窑。但随着钢铁工业的发展需要进行烧结入炉的粉矿、精矿和其他含铁粉料增加,以及劳动保护和自动化程度的提高,带式烧结机逐渐变为主要烧结设备,在大钢铁企业中几乎是唯一的烧结设备。

带式烧结机的面积不断增大,台车宽度也不断增大,日本

最大带式烧结机面积从70年开始，从400、500、550到600m<sup>2</sup>，台车宽从4m增加到5m。

我国建国初期，只有首钢的烧结锅，本钢的烧结盘，以及鞍钢的50m<sup>2</sup>带式烧结机；到1952年鞍钢从苏联引进75m<sup>2</sup>烧结设备和技术，在当时它是具有世界水平，对新中国的烧结工业起了示范作用。在50年代我国的烧结设备和方法有了较大发展，从平地吹，烧结盘，到自己制造13.50m<sup>2</sup>的烧结机；70年代开始发展到90m<sup>2</sup>和130m<sup>2</sup>；并设计和改造各种50m<sup>2</sup>以下的烧结机。到80年代初我国宝钢自日本引进450m<sup>2</sup>带式烧结机和配套设备具有世界先进水平，经过消化移植无疑将会促使我国烧结工艺走入世界先进行列。

2. 烧结矿生产的发展 目前全世界烧结机的年生产能力达到或超过10亿吨。据70年代统计，全世界高炉炉料中，烧结矿平均占50%，球团矿占35%，块矿仅占15%，日本、前苏联和西德等，烧结矿入炉比达到80%以上，美国的球团矿入炉比达50%以上，总的趋势是高炉炉料中熟料比不断增加，表0-1列为世界上几个主要产钢国高炉炉料中熟料及烧结矿和球团矿入炉比，表中的数字说明在70年代，这几个国家高炉熟料比达到80~90%以上。

图0-1列出了日本高炉生铁产量与其熟料比、烧结矿比、高炉燃料比、焦比以及高炉利用系数的关系。从图中可以看出随着高炉熟料比和烧结矿比的不断提高，高炉利用系数也逐步提高，而燃料比和焦比不断下降。1979年后，焦比又有回升是由于减少了油燃料的原因。

根据冶金工业部烧结球团情报网的统计资料。我国重点钢铁企业中的20个烧结厂，到1985年底为止共建设了带式烧结机78台，总的有效面积为5913m<sup>2</sup>，年产烧结矿5155万吨。

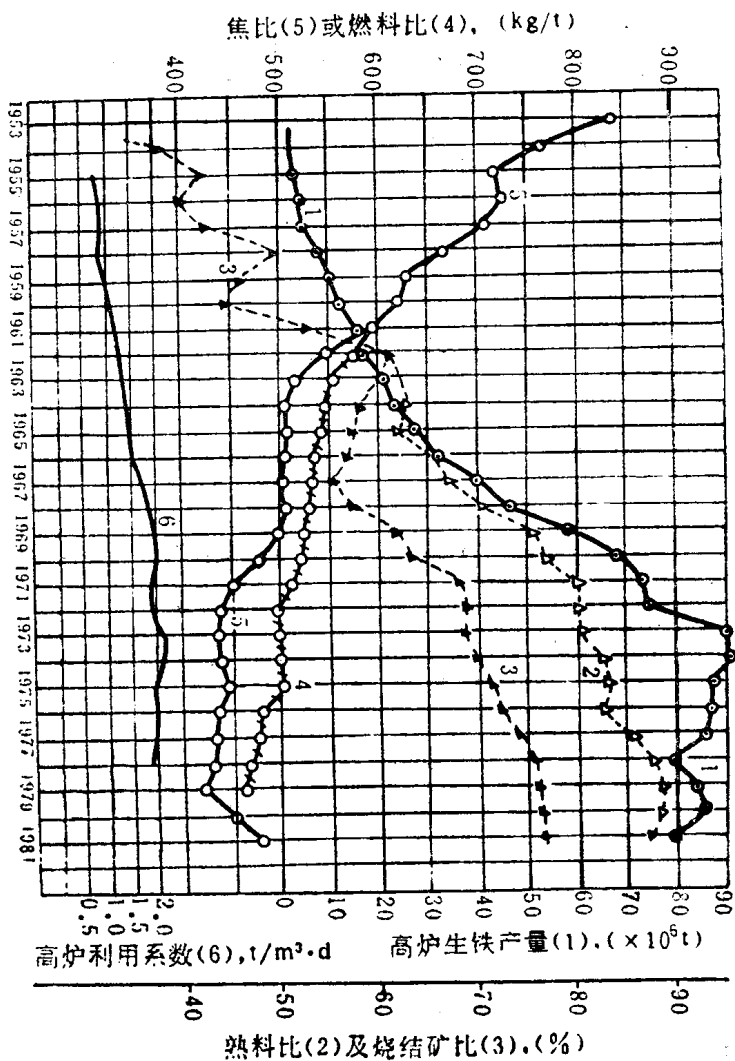
“七五”计划期间，我国的大中型钢铁企业将新建烧结球团设

表0-1 主要产钢国高炉炉料中熟料及烧结矿和球团矿入炉比 (%)

| 国   | 家     | 年 份  |      |      |      |      |      |      |      |       |
|-----|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
|     |       | 1971 | 1973 | 1975 | 1976 | 1977 | 1978 | 1979 | 1980 | 1981  |
| 苏联  | 熟料 比  | 93.5 | 94.4 | 93.1 |      |      |      |      |      |       |
| 日 本 | 熟料 比  | 79.2 | 79.6 | 82.7 | 83.3 | 85.6 | 87.6 | 89.8 | 88.5 | 87.1  |
|     | 烧结矿 比 | 67.0 | 67.5 | 71.3 | 72.1 | 75.0 | 76.0 | 75.8 | 76.5 | 76.5  |
|     | 球团矿 比 | 12.2 | 12.1 | 11.4 | 11.2 | 10.6 | 11.6 | 14.0 | 12.0 | 10.6  |
| 美 国 | 熟料 比  | 72.3 | 72.8 | 79.4 | 34.5 | 83.3 | 86.6 | 89.9 | 90.8 | 92.0  |
|     | 烧结矿 比 | 30.1 | 27.4 | 26.7 | 25.8 | 26.2 | 25.2 | 25.5 | 25.3 | 23.3  |
|     | 球团矿 比 | 42.2 | 45.4 | 52.7 | 58.7 | 57.1 | 61.4 | 64.4 | 65.5 | 68.7  |
| 西 德 | 熟料 比  | 68.3 | 70.0 | 82.6 | 80.7 | 83.8 | 81.5 | 78.8 | 82.8 | ~84.3 |
|     | 烧结矿 比 | 63.6 | 62.8 | 76.1 | 72.5 | 74.9 | 68.2 | 60.8 | 65.7 | 67.3  |
|     | 球团矿 比 | 4.7  | 7.2  | 6.5  | 8.2  | 8.9  | 13.3 | 18.0 | 17.1 | ~17.0 |
| 英国  | 烧结矿 比 | 70.9 | 63.1 | 68.0 | 65.9 | 65.3 | 75.4 | 77.9 | 69.2 | 62.4  |
| 法 国 | 熟料 比  | 79.2 | 85.0 | 88.2 | 89.1 | 89.9 | 89.0 | 89.4 | 90.4 | ~91.5 |
|     | 烧结矿 比 | 77.3 | 83.3 | 86.6 | 87.6 | 89.1 | 88.0 | 86.9 | 87.3 | 87.5  |
|     | 球团矿 比 | 1.9  | 1.7  | 1.6  | 1.5  | 0.8  | 1.0  | 2.5  | 3.2  | ~4.0  |

图0-1 日本高炉生铁产量与熟料比、烧结矿比、燃料比、焦比及高炉利用系数

1——高炉生铁产量； 2——熟料比； 3——烧结矿比； 4——燃料比； 5——焦比； 6——高炉利用系数



备约3000m<sup>2</sup>。其中2000m<sup>2</sup>，可望在1988~1990年间建成。相当于现有能力的三分之一。新建烧结机中大于100m<sup>2</sup>的约有13台，预计“七五”末期烧结球团总能力将接近一亿吨。

到1981年我国高炉炉料中熟料率平均达到90.02%，一些大型企业含铁原料主要是精矿，其熟料率还要高，可以这样说，在钢铁联合企业中几乎都建有烧结厂。

### 3. 烧结科学的发展

(1) 烧结设备大型化。烧结机大型化的目的是因为烧结厂的投资随着烧结有效面积的增大而降低的。烧结机大型化的经济效益见表0-2。

与烧结机大型化的同时，有关的配套设备也向大型化发展。由于设备的大型化，必须对所需要的设备的适宜材质和合理结构进行研究，不断改进现有设备，延长易磨损部件和结构的寿命，提高作业率。

表0-2 烧结机面积与经济效益

| 烧结机面积(m <sup>2</sup> ) | 建 设 费 | 经 营 费 |
|------------------------|-------|-------|
| 700                    | 100   | 100   |
| 600                    | 104   | 102   |
| 500                    | 108   | 104   |
| 400                    | 120   | 105   |
| 300                    | 131   | 107   |
| 200                    | 151   | 112   |
| 100                    | 193   | 124   |

(2) 加强烧结理论的研究。目前的烧结理论研究还不是很透彻的，烧结矿的性能往往满足不了冶炼要求，所以全世界都