

张一敏 编著

# 球团理论与工艺

冶金工业出版社

JF046.6  
2002323

# 球团理论与工艺

张一敏 编著

北 京  
冶 金 工 业 出 版 社  
2002

## 图书在版编目(CIP)数据

球团理论与工艺/张一敏编著. —北京:冶金工业出版社,1997.10(2002.1重印)

ISBN 7-5024-2087-8

I. 球… II. 张… III. 球团矿-工艺 IV. TF046.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 10431 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 谭学余 美术编辑 李心 责任印制 牛晓波

北京源海印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1997 年 10 月第 1 版,2002 年 1 月第 2 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 10.875 印张; 292 千字; 336 页; 1401~3000 册

24.80 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

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

# 前 言

钢铁工业的不断发展,使得对入炉原料的粒度、强度、化学成分及冶炼特性的要求日趋严格。钢铁工业发达国家把提供粒度均匀、成分稳定、物理与化学特性尤其是冶炼特性良好的人造富矿视为强化高炉冶炼过程的必要前提。球团矿作为人造富矿之一,由于其特有的冶金性能而成为当今冶炼炉料中不可缺少的重要组成部分。因此,重视球团理论与工艺的研究,努力提高球团工业科技水平,无疑对下世纪将要面临的新技术挑战,具有十分重要的意义。

本书主要内容由球团理论和球团工艺两部分组成。球团理论部分包括造球、干燥、球团焙烧以及球团矿的还原性状等基本理论;球团工艺部分包括隶属高温固结范畴的三大方法与实例。考虑到特殊球团法在钢铁工业中的应用,书中对金属化球团等几种特殊球团法的工艺及原理作了相应描述。以计算机进行过程控制和生产管理已成为现代化球团厂的重要标志,而数学模型的不断建立和应用,则是造块过程最优控制的先决条件。基于此,在本书中以相当篇幅论述与介绍了这方面的内容。此外,为使该书尽可能地具备完整性,还将球团质量要求与检测内容独立成章,试图向读者呈献一部较为系统的、可资借鉴的球团科技书,此亦为成书的初衷之一。

本书是作者在为武汉冶金科技大学团矿专门化 89、90、91、92、93 年级本科生讲授专业课讲义基础之上,参阅近年来国内外造块新著、新教材以及作者的有关研究结果写成的。由于水平所限,加之时间仓促,谬误与不足在所难免,敬请读者赐教斧正。

本书可作为高等院校团矿专门化本科高年级学生和硕士研究生的专业课教材,亦可作为从事造块、资源综合利用以及环境保护等方面工作的工程技术人员的参考书。

最后,谨向在成书过程中的张德焜教授给予本人大力支持与帮助的有关单位以及所有关心此书的同事们致以真诚谢意。

作者

1996年12月于武汉

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	(1)
1.1 球团的概念 .....	(1)
1.2 球团方法分类 .....	(1)
1.3 球团矿在钢铁工业中的地位及作用 .....	(2)
1.4 球团矿与烧结矿比较 .....	(3)
1.4.1 原料条件比较 .....	(3)
1.4.2 冶金性能比较 .....	(4)
1.4.3 冶炼效果比较 .....	(8)
1.4.4 经济效果比较 .....	(9)
1.4.5 环境状况比较 .....	(10)
<b>2 造球理论</b> .....	(12)
2.1 物料的表面性质 .....	(12)
2.1.1 液体的表面性质 .....	(12)
2.1.2 液体和固体的作用 .....	(15)
2.1.3 细磨物料的表面特性 .....	(18)
2.2 水分在细磨物料中的形态及作用 .....	(19)
2.2.1 水分子的构造与性质 .....	(19)
2.2.2 吸附水的特性及作用 .....	(20)
2.2.3 薄膜水的特性及作用 .....	(23)
2.2.4 毛细水的特性及作用 .....	(24)
2.3 细磨物料的成球过程 .....	(26)
2.3.1 成球机理 .....	(26)
2.3.2 成球阶段 .....	(30)
2.3.3 成球动力学 .....	(36)
2.4 造球机工作原理分析 .....	(48)

2.4.1	圆盘造球机	(48)
2.4.2	圆筒造球机	(53)
2.5	影响造球的因素	(55)
2.5.1	原料对造球过程的影响	(55)
2.5.2	工艺条件对造球过程的影响	(69)
<b>3</b>	<b>生球干燥</b>	<b>(76)</b>
3.1	生球干燥机理	(76)
3.1.1	表面气化控制	(77)
3.1.2	内部扩散控制	(77)
3.1.3	干燥速度	(78)
3.2	干燥过程生球强度的变化	(84)
3.3	影响生球干燥的因素	(86)
3.3.1	干燥介质的温度	(86)
3.3.2	干燥介质的流速	(87)
3.3.3	生球的初始湿度与物质组成	(88)
3.3.4	球层高度	(91)
3.3.5	生球尺寸	(91)
3.4	提高生球破裂温度的途径	(92)
<b>4</b>	<b>球团焙烧的理论基础</b>	<b>(95)</b>
4.1	球团焙烧过程概述	(95)
4.2	球团预热	(96)
4.2.1	磁铁矿球团的氧化机理	(96)
4.2.2	磁铁矿氧化对球团强度的影响	(100)
4.3	球团焙烧的固结机理	(102)
4.3.1	固相固结	(102)
4.3.2	球团固结时的物理化学变化	(105)
4.3.3	液相对固结的作用	(108)
4.4	铁矿球团固结的形式	(109)
4.4.1	磁铁矿球团固结形式	(109)
4.4.2	赤铁矿球团固结形式	(111)

4.4.3	熔剂性球团固结形式 .....	(113)
4.5	影响球团焙烧过程的因素 .....	(116)
4.5.1	温度 .....	(116)
4.5.2	加热速度 .....	(120)
4.5.3	焙烧时间 .....	(121)
4.5.4	焙烧气氛 .....	(123)
4.5.5	燃料性质 .....	(124)
4.5.6	冷却 .....	(125)
4.5.7	生球尺寸 .....	(126)
4.5.8	硫含量 .....	(127)
4.5.9	孔隙率 .....	(129)
<b>5</b>	<b>球团矿的还原性状 .....</b>	<b>(131)</b>
5.1	球团矿还原机理 .....	(131)
5.1.1	球团矿还原过程中各参与项变化的基本 表达式 .....	(132)
5.1.2	还原过程中各反应阶段的物质平衡方程式及 初始边界条件的计算 .....	(134)
5.1.3	球团断面的还原行为 .....	(137)
5.1.4	球团还原反应机理 .....	(138)
5.2	还原过程中球团矿结构的变化 .....	(139)
5.2.1	晶格变化引起的球团矿体积变化 .....	(142)
5.2.2	脉石成分对结构变化的影响 .....	(144)
5.2.3	碱度变化引起球团矿结构变化 .....	(145)
5.3	含铁矿和浮士体的焙烧球团矿的还原性状 .....	(151)
<b>6</b>	<b>球团工艺过程 .....</b>	<b>(153)</b>
6.1	原料准备 .....	(153)
6.2	配料、混合和造球 .....	(156)
6.3	竖炉法焙烧球团矿 .....	(158)
6.3.1	概述 .....	(158)
6.3.2	竖炉类型 .....	(161)



6.3.3	竖炉工艺 .....	(164)
6.3.4	生产实例 .....	(171)
6.4	带式焙烧机法焙烧球团矿 .....	(178)
6.4.1	概述 .....	(178)
6.4.2	带式焙烧机工艺 .....	(179)
6.4.3	生产实例 .....	(186)
6.5	链篦机-回转窑法焙烧球团矿 .....	(192)
6.5.1	概述 .....	(192)
6.5.2	链篦机-回转窑工艺 .....	(192)
6.5.3	生产实例 .....	(202)
6.6	主要球团焙烧法比较 .....	(205)
<b>7</b>	<b>特殊球团法 .....</b>	<b>(207)</b>
7.1	金属化球团矿 .....	(207)
7.1.1	概述 .....	(207)
7.1.2	金属化球团矿还原机理 .....	(208)
7.1.3	金属化球团矿生产工艺 .....	(210)
7.2	水硬性球团矿 .....	(219)
7.2.1	概述 .....	(219)
7.2.2	水硬性球团固结机理 .....	(219)
7.2.3	生产工艺 .....	(221)
7.3	碳酸化固结球团矿 .....	(223)
7.3.1	基本原理 .....	(223)
7.3.2	影响碳酸化固结过程的因素 .....	(224)
7.3.3	生产工艺 .....	(226)
7.4	球团过程中综合回收铁矿原料中的有用金属 .....	(228)
7.4.1	概述 .....	(228)
7.4.2	球团氯化焙烧生产工艺 .....	(228)
7.4.3	氯化焙烧的基本原理 .....	(230)
7.4.4	氯化挥发焙烧竖炉 .....	(231)
7.4.5	金属氯化物烟尘的捕集和分离提取 .....	(233)

<b>8 工艺过程自动化及模型</b> .....	(235)
8.1 主要工艺参数的测量方法及装置 .....	(235)
8.1.1 电子秤 .....	(235)
8.1.2 温度测量装置 .....	(239)
8.1.3 球团厂原料粒度的检测 .....	(240)
8.1.4 生球和成品球团粒度自动检测装置 .....	(241)
8.1.5 自动取样、制样和 X-射线荧光分析装置 ...	(243)
8.2 料场自动控制 .....	(245)
8.2.1 概述 .....	(245)
8.2.2 料场计算机控制系统 .....	(245)
8.3 球团生产过程自动控制 .....	(247)
8.3.1 配料自动控制 .....	(247)
8.3.2 磨矿粒度自动控制 .....	(248)
8.3.3 造球原料水分和造球机自动控制 .....	(249)
8.3.4 竖炉自动控制 .....	(250)
8.3.5 带式焙烧机自动控制 .....	(251)
8.3.6 链篦机-回转窑的自动控制 .....	(257)
8.3.7 冷却机自动控制 .....	(258)
8.4 数学模型 .....	(261)
8.4.1 概述 .....	(261)
8.4.2 造球数学模型 .....	(262)
8.4.3 竖炉球团数学模型 .....	(273)
8.4.4 带式球团焙烧过程数学模型 .....	(285)
8.4.5 链-回-冷球团固结数学模型 .....	(289)
<b>9 球团质量要求及检验方法</b> .....	(314)
9.1 生球质量标准及检验方法 .....	(314)
9.1.1 生球粒度 .....	(314)
9.1.2 生球抗压强度 .....	(314)
9.1.3 生球落下强度 .....	(315)
9.1.4 生球破裂温度 .....	(315)

9.2	成品质量要求及标准 .....	(316)
9.3	成品质量检验方法 .....	(317)
9.3.1	冷强度 .....	(318)
9.3.2	还原性 .....	(321)
9.3.3	孔隙率 .....	(326)
9.3.4	高温软化及熔融特性 .....	(328)
9.3.5	还原状态下物理特性测定 .....	(331)
<b>主要参考文献</b> .....		<b>(335)</b>

# 1 绪 论

## 1.1 球团的概念

球团是人造块状原料的一种方法，是一个将粉状物料变成物理性能和化学组成能够满足下一步加工要求的过程。球团过程中，物料不仅由于滚动成球和粒子密集而发生物理性质，如密度、孔隙率、形状、大小和机械强度等变化，更重要的是发生了化学和物理化学性质，如化学组成、还原性、膨胀性、高温还原软化性、低温还原软化性、熔融性等变化，使物料的冶金性能得到改善。

球团的基本任务除利用精矿和粉矿制成球状冶炼原料外，还可生产用于直接还原的金属化球团矿以及将其应用于综合利用回收有用金属。

## 1.2 球团方法分类

造块方法可分为三类：烧结、球团和压团。

压团是发展最早的一种造块方法，且过程简单，其产品团块可直接使用或者经过热处理后再使用。团块的冶金性能良好，但加工成本较高。同时与需要造块的铁精矿或粉矿的巨大数量相比，压团设备的生产能力有限。所以，铁矿石压团法并未能在钢铁工业中得到发展。

球团法是一种新型造块方法，自投入使用以来发展迅速。其产品不仅用于高炉，而且用于转炉，平炉或电炉。球团矿与压团团块相比，具有以下几点优越性：

- (1) 适于大规模生产；
- (2) 粒度均匀，能保证高炉炉料的良好透气性；
- (3) 孔隙率高，还原性好；

(4) 冷态强度高，便于运输和贮存，不易破碎等。

因此，目前球团法以其巨大的优越性与造块的另一种方法烧结法并列成为人造块状原料的两大方法。

球团法按固结方法分可分为高温固结和低温固结两种类型，见图 1-1。

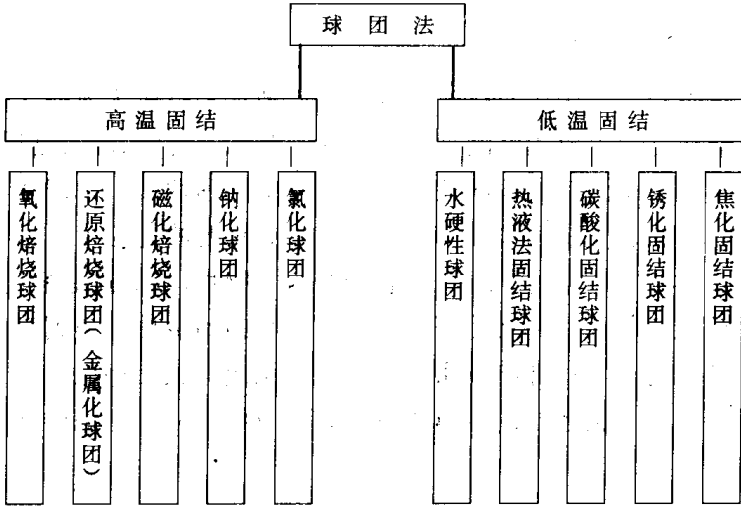


图 1-1 球团固结方法分类

### 1.3 球团矿在钢铁工业中的地位及作用

到目前为止，全球铁矿资源中，已探明的品位大于 40% 的铁矿石约为 8500 亿 t。随着钢铁工业的发展，炼铁所需原料将愈来愈大，而可供直接入炉的富块矿却愈来愈少。我国铁矿储量居世界第 5 位，其中含铁 50% 以上的富矿却仅占已探明储量的 4% 左右，绝大部分为含有害杂质 (P、S、Pb、Zn、As) 的贫矿。这类矿石须细磨精选后造块才能入炉冶炼。

目前，全世界范围内，欧美等国铁矿石的入选比为 83%~93%，而我国高达 95% 以上的铁矿石须进行预先选矿。因此，人造块矿产量及高炉熟料率呈逐年上升趋势。本世纪 70 年代以来，我国重点钢铁企业的熟料入炉率已达 89%，与一些发达国家相

当。而直接入炉的天然块矿则逐年减少，目前不足 300 万 t，仅占入炉含铁原料的 7%。总之，铁矿资源的变化，人造块矿的优越性，极大地促使了球团、烧结技术的不断发展。

球团矿因其良好的冶金性能，使得它自本世纪 60 年代以来得到很大发展。据统计，世界范围内一些大型钢铁企业球团矿年生产能力超过 28500 万 t。

球团矿的高炉冶炼效果明显优于其他原料（表 1-1）。要说明的是，球团法和烧结法有其各自的适用范围，它们之间并不存在竞争，而是一种相辅相成的互补关系。其共同目的都是使粉料块矿化。此外，对高炉冶炼而言，球团矿和烧结矿的混用往往是不可避免的。

表 1-1 球团矿与其他炼铁原料指标比较

原料种类		球团矿			烧结矿		天然块矿	
		普通	自熔性	金属化	普通	自熔性	天然矿	整粒矿
主要指标	Fe/%	61.9	57.2	81.8	61.8	54.8	50.9	55.4
	<20mm 颗粒所占比例/%	1.0	1.0	1.0	1.0		18.0	2.0
冶炼指标	石灰石/kg·t <sup>-1</sup> (铁)	200	0	186	249		258	233
	焦比/kg·t <sup>-1</sup>	495	450	270	554	576	765	593
	生铁生产指数 <sup>①</sup>	155	170	256	139	140	100	127

①生铁生产指数以天然矿为 100 计算得出。

我国铁精矿球团研究工作，早在本世纪 50 年代初即已开始。50 年代末采用隧道窑生产球团矿成功，至 60 年代末在济南钢厂等八厂相继建立球团竖炉十几座，70 年代以后又建立了三座带式机球团车间和三套链篦机-回转窑球团车间，从而使我国球团工业进入稳定发展时期。实践证明，为了适应和满足我国钢铁工业的发展需求，按比例有计划发展球团生产是十分必要的。

## 1.4 球团矿与烧结矿比较

### 1.4.1 原料条件比较

就使用的原料粒度而言，球团要求原料粒度细，而烧结要求原料粒度相对较粗。一般认为：前者要求-325目粒级必须大于70%，比表面积 $1500\sim 2000\text{cm}^2/\text{g}$ ，甚至更高；而后者希望原料中-150目粒级在20%以下。近来出现的小球烧结法，可使烧结原料中-150目粒级提高到40%~50%。

由于世界上富矿资源有限，贫矿开采量越来越多，使得细磨精矿的数量大大增加，球团生产不断发展，工艺不断完善。过去那种认为球团法只能处理磁铁矿的观点已不存在。球团原料范围现已扩大到赤铁矿、赤-磁铁矿混合矿、土质赤铁矿以及各种矿石的混合料。日本等国的一些球团厂还利用钢铁厂粉尘造球，生产预还原球团和氧化球团。

烧结法在处理原料上也有其突出优点，它对于粗粒原料的适应性强，可以处理各种富矿粉、焦粉、钢铁厂粉尘和粉粒状含铁废料。因此，烧结法仍然不失为一种重要的造块方法。

#### 1.4.2 冶金性能比较

目前国内外普遍认为球团矿比烧结矿在冶金性能上有以下优点：

(1) 粒度小而均匀，有利于高炉料柱透气性的改善和气流的均匀分布。通常球团粒度在8~16（或20）mm的占90%~95%以上。这一点即使整粒最好的烧结矿也难以相比。

(2) 冷态强度（抗压和抗磨）高。在运输、装卸和贮存时产生粉末少。

(3) 铁份高和堆密度大，有利于增加高炉料柱的有效重量，提高产量和降低焦比。

(4) 还原性好，有利于改善煤气化学能的利用。测定表明，在用低 $\text{SiO}_2$ 的优质原料时，球团矿与烧结矿的还原性相差不大，而在使用 $\text{SiO}_2$ 较高的原料时，球团的还原性优于烧结矿。

从日本加古川厂自熔性球团矿与自熔性烧结矿的质量对比（表1-2）和森永孝三等用相同原料制备球团和烧结矿的质量对比（表1-3）中，可以看出两种造块方法的差异。

表 1-2 加古川厂烧结矿和球团矿的质量指标

项 目	球 团 矿	烧 结 矿
单球抗压强度/N	2726~3180	
转鼓指数 (小于 1mm) /%	1~3	3~8
气孔率/%	24~28	
-5mm 颗粒所占比例/%	<1	3~8
还原率 (JIS) /%	85~90	65~70
收缩率/%	30~35	
膨胀率/%	8~12	
TFe/%	61.0	55~57
SiO <sub>2</sub> /%	4.1	5.4~6.0
CaO/%	5.3	
CaO·SiO <sub>2</sub>	1.3	1.5~2.0
低温粉化率/%	8~12	30~40

表 1-3 球团矿和烧结矿的质量指标比较

项 目		气孔率 /%	体积 密度/ g·cm <sup>-3</sup>	落下强度 (>10mm) /%	抗磨性 (<6目) /%	单球抗 压强度 /N	备 注
赤铁矿	普通球团矿	22.0	2.11	98.7	2.2	3873.6	1200 C 焙烧
	普通烧结矿	42.7	1.49	84.1	1.9		6% 焦粉
磁铁矿	普通球团矿	25.0	2.27	98.9	3.8	3344.1	1200 C 焙烧
	普通烧结矿	41.0	1.52	87.6	4.8		4% 焦粉
褐铁矿	普通球团矿	25.3	1.94	98.2	2.7	1304.3	1200 C 焙烧
	普通烧结矿	26.7	1.60	84.2	2.1		9% 焦粉

近十几年来,国内外十分重视球团矿与烧结矿的高温还原强度。已有的资料表明,两者在加热还原时都因体积膨胀而强度降低,产生破碎和粉化。除少数情况外,许多试验证实球团矿比烧结矿碎裂严重。用 Linder 法测定高温还原强度,按小于 1mm 和小于 3mm 粉末计,球团矿分别高达 44%~65%和 38%~62%,而烧结矿则为 20%~28%。从各国制定的球团矿与烧结矿质量标准



中，也可明显看出球团矿的热膨胀率普遍高于烧结矿。

理论研究指出，球团矿所以产生热膨胀与球团含有  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  有关。球团矿膨胀通常分为两步。第一步发生在赤铁矿还原为磁铁矿阶段，膨胀率在 20% 以下。一般解释为赤铁矿的六面体结构转变为磁铁矿的立方体结构，氧化铁晶体结构破裂，造成体积膨胀。对于焙烧球团，最大膨胀率出现在还原度为 30%~40% 之间。此种膨胀对于高炉操作影响并不很大。对于磁铁矿制成的冷粘结球团，则没有这一步膨胀。第二步发生在浮士体转变为铁时，膨胀十分显著，称之为异常膨胀，体积可增加 100%，甚至更多，严重时达 300%~400%。异常膨胀时铁晶粒自浮士体表面直接向外长出似瘤状物称为晶须（或称“铁须”）。此晶须的生长造成很大拉力，使铁的结构疏松从而产生膨胀，造成球团的高温还原粉化。

当高炉确定使用球团矿时，必须进行高温还原强度和热膨胀试验。如果试验证实确有异常膨胀产生时，必须采取有效措施，使之控制在规定的标准之内。否则这种异常膨胀会给高炉带来透气性恶化、悬料等灾难性影响。

尽管球团矿的许多指标优于烧结矿，但其热膨胀问题在相当程度上影响了它的冶金性能因而往往不得不限定其使用条件，比如，高炉球团矿入炉比问题。经高炉试验得出以下结论：

(1) 球团膨胀率小于 20% 时，高炉操作无困难；

(2) 球团膨胀率为 20%~40% 时，球团入炉比不得超过 65%；

(3) 球团膨胀率大于 40% 时，高炉操作失常。此时，即使球团矿入炉比小于 65%，风量亦须减少。

对此，不少国家的质量标准都将球团矿的膨胀率规定在 20% 以内，甚至更低，以确保高炉顺行。

为了改善球团矿的高温冶金性能，国内外不少学者致力于研究解决球团热膨胀问题，主要有以下几个方面的措施：

(1) 适当提高球团的  $\text{SiO}_2$  含量。 $\text{SiO}_2$  含量较高的球团有利于形成较多的渣键，可以适当抑制球团膨胀和抵制晶须的成长。前苏