



經國濟世  
學成致用

2017年全国烧结球团技术交流年会

# 铁矿球团技术进展

朱德庆 教授、博导

*Telephone:* (+86) 88836041; *E-mail:* [dqzhu@csu.edu.cn](mailto:dqzhu@csu.edu.cn)

中南大学 资源加工与生物工程学院 钢铁冶金系

<http://mpb.csu.edu.cn/fm/>

# 目录

## 1. 球团矿产量、生产工艺和原料的发展

- 球团矿产量
- 球团矿生产工艺
- 球团原料变化

## 2. 什么是合格球团？（氧化球团的质量要求）

- 原料及生球性能
- 氧化球团质量要求

## 3. 强化氧化球团制备技术进展

- 原料的预处理工艺
- 新型球团粘结剂
- 优化配矿
- 熔剂型、镁质球团

## 4. 结论及展望

# 1.球团矿产量、生产工艺和原料的发展

## 球团矿产量

### □ 氧化球团矿的优点：

- 粒度均一、强度高，便于长途运输和贮存；
- 铁品位高、冶金性能优良，有利于提高冶炼效率和降低焦比；
- 与烧结矿、块矿构成现代高炉的优质炉料；
- 高炉入炉比例：欧洲80~90%，甚至达100%；我国在20%以下

- 世界球团矿产量：2006年 (3.5亿吨), 2012年 (4.4亿吨), 2015年 (4.47亿吨)；
- 中国球团矿产量：2011年 (2亿吨以上), 2011年逐渐减少, 2015年(1.2亿吨)；
- 中国是世界上最大的氧化球团生产国。

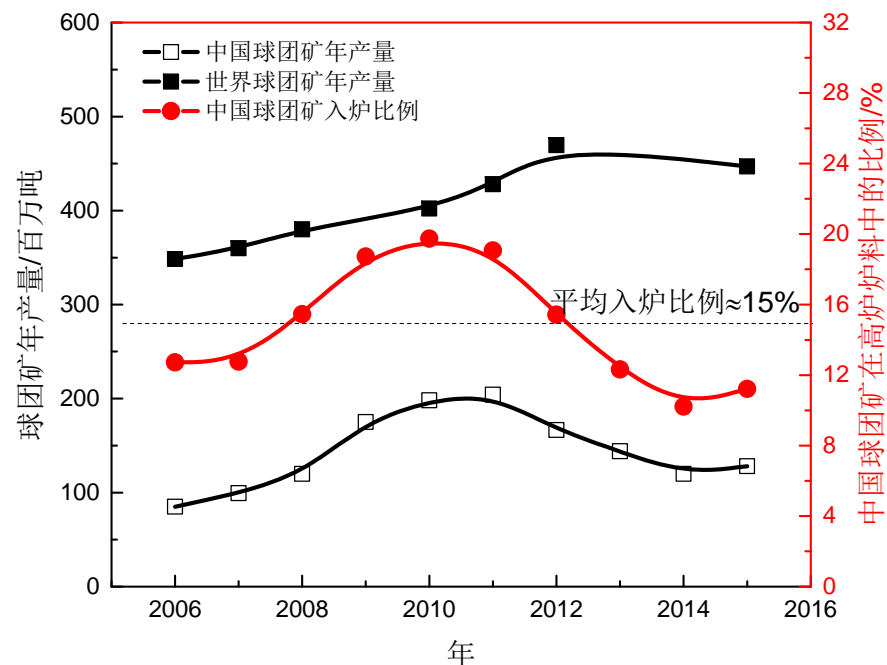


图1 历年来世界及中国球团矿产量及球团矿在中国高炉中的入炉比例



# 1.球团矿产量、生产工艺和原料的发展

## 球团生产工艺

- 带式焙烧机和链篦机-回转窑工艺是目前氧化球团生产中的主流工艺，分别占比58%和35%（2013年）；
- 我国主要为链篦机-回转窑和竖炉工艺，分别占比71.5%和24%（2012年）。
- 2000年来，逐渐由竖炉工艺向链-回工艺转变；特别是近年来，带式焙烧机工艺在国内开始得到快速发展。

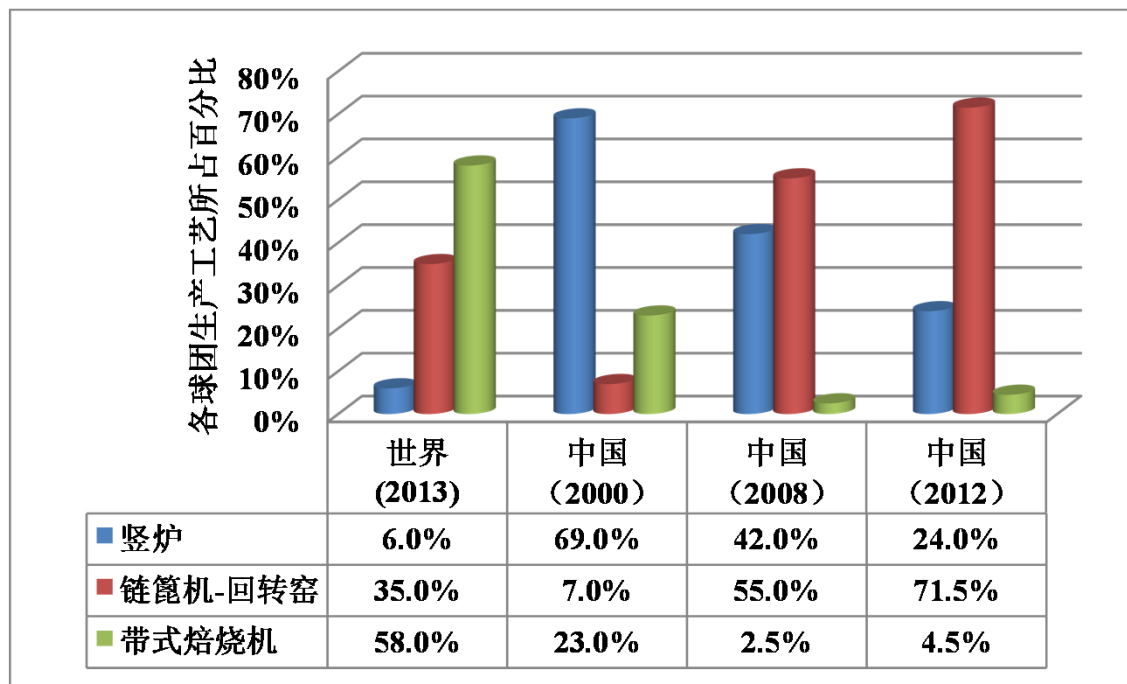


图2 世界及中国不同球团生产工艺在球团产量中所占的比例



# 1.球团矿产量、生产工艺和原料的发展

## 球团生产工艺

球团工艺	对球团原料的适应能力	生产能力	燃料类型	产品质量	基建投资	工序能耗	运行成本	国内应用实例
竖炉	差，主要为磁铁矿	小，单机最大产量约100万吨/年	气体燃料（如低热值高炉煤气）或油	较好，但因实现均匀加热较难，故球团矿质量不稳定	低	高于链篦机-回转窑和带式焙烧机	低	龙钢嘉惠19m <sup>2</sup> 竖炉、马钢3#竖炉（16.2m <sup>2</sup> ）
链篦机-回转窑	较好，对磁铁矿、磁铁矿和赤铁矿的混合精矿适应最佳，不太适用于100%赤铁矿球团焙烧。	大，单窑最大产能可达600万吨/年	对各燃料适应性好，可使用天然气、重油、煤粉等	好，但因球团转动易产生粉末，造成窑体结圈	高	与带式焙烧机工艺接近	较高（使用煤粉作为燃料）	宝钢湛江球团厂、武钢鄂州球团厂：500万吨球团生产线
带式焙烧机	对各球团原料的适应性好，能适应各种球团原料	大，单机最大产能可达825万吨/年	对各燃料适应性较好，可使用重油、天然气，但未见使用煤粉作为燃料的文献报道	较好，但因受热方式不同，球团质量不如链篦机-回转窑工艺均匀	稍高于链篦机-回转窑工艺	与链篦机-回转窑工艺接近	高，原因在于使用天然气，同时电耗较链篦机-回转窑工艺高	首都京唐钢铁（400万吨/年）、包钢（500万吨/年）

表1—三种球团工艺的对比，国内外不同球团生产工艺能耗水平的具体参数对比见下一张PPT的表2和表3



# 1.球团矿产量、生产工艺和原料的发展

## 球团生产工艺

表2—国外球团生产工艺的能耗对比

球团原料	磁铁矿(欧洲)		赤铁矿(南美)	
	带式焙烧机	链算机-回转窑	带式焙烧机	链算机-回转窑
电耗(kwh/t)	27.5	14.5	17.2	25.0
热耗(kg标煤/t)	6.79	9.94	31.46	40.05
合计	10.17	11.72	33.58	43.13

注：热耗按理论上1kwh/t=0.123 kg标煤/t折算

□ 赤铁矿球团能耗远高于磁铁矿球团。磁铁矿：两种工艺能耗接近；赤铁矿：链-回工艺能耗高。

表3—国内球团生产工艺的能耗对比

工艺		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	平均
链算机-回转窑	电耗(kwh/t)	30.40	29.80	31.50	29.75	29.43	31.03	29.77	30.24
	工序能耗(kgce/t)	31.50	24.92	27.42	24.45	24.45	25.91	29.03	26.81
带式焙烧机	电耗(kwh/t)	54.75	44.15	49.78	39.79	36.27	37.80	37.82	42.91
	工序能耗(kgce/t)	38.97	34.29	26.99	24.64	23.06	23.76	24.14	27.98
竖炉	电耗(kwh/t)	34.88	33.22	33.76	34.20	32.99	36.78	32.86	34.10
	工序能耗(kgce/t)	35.69	31.90	31.73	30.98	31.53	30.25	26.63	31.24

□ 我国球团矿生产能耗远高于国外。主要是我国原料条件差，整体上装备水平低，尤其是竖炉工艺还占相当的比例，主流工艺链算机-回转窑平均单窑生产能力仍然偏低。



# 1.球团矿产量、生产工艺和原料的发展

## 球团生产工艺

### 单机规模比较

工艺	国外(Mt/a)	国内(Mt/a)
链算机-回转窑	600	500
带式焙烧机	950(4×204m <sup>2</sup> )	500

### Sarmaco带式机球团厂

车间	Plant#1	Plant#2	Plan#3	Plant#4
球盘数	10	10	11	12
产能(DMT/a)	5.0	6.0	7.6	9.5
面积(m <sup>2</sup> )	704	714	768	816
利用系数(t/m <sup>2</sup> .h)	0.897	1.061	1.250	1.47
宽度(m)	4	4	4	4
长度(m)	176	186	192	204



### □ 当前球团原料的变化趋势：

- 1) **资源贫化**：铁品位下降， $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、P、S、碱金属、结晶水等含量增加；
- 2) **铁精矿供应比例逐步提高**：贫、细、杂铁矿的利用；
- 3) **粒度细粒化**：需要细磨深选，带来精矿细粒化的影响，如近些年文献报道的西澳超细粒铁精矿、太钢自产细粒铁精矿等；
- 4) **品种多、性质复杂化**：镜铁矿、硫酸渣、高硫铁精矿、针铁矿、含氟铁精矿、含硼铁精矿、钒钛磁铁矿、铬铁精矿、高镁磁铁矿等一系列成分和性质复杂、成球及预热焙烧性能差的原料被用于制备氧化球团。

带来

- 球团矿生产工艺的转变：传统竖炉→链篦机-回转窑、带式焙烧机
- 强化球团制备技术的开发及应用





## 2.氧化球团质量要求

## 原料及生球性能要求

实验室对氧化球团原料性能及生球质量的推荐要求

### □ 原料性能要求

#### ➤ 成分

**TFe不低于64%**，CaO，MgO，酸性氧化物适量；P、S、碱金属等有害元素含量尽可能低

#### ➤ 粒度及比表面积

**-0.044mm含量在60%~80%**（对球磨产品而言）

精矿比表面积：**1500~1900cm<sup>2</sup>/g**（往往对HPGR产品而言）

### □ 生球质量要求

#### ➤ 粒度大小

**9~16mm含量在85%以上；**

#### ➤ 落下强度和抗压强度

从0.5m高生球到钢板的摔落次数在**5~6次，不低于4次**；抗压强度不低于**10N/个**。

#### ➤ 爆裂温度

一般要求在**350℃以上**。

化学成分	高炉用氧化球团				直接还原用氧化球团
	酸性球团		熔剂性球团		
Fe	65.10	65.60	63.30	65.10	67.80
SiO <sub>2</sub>	5.20	4.50	3.75	2.50	1.65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.50	0.50	0.50	0.45	0.35
CaO	0.60	0.60	3.68	2.25	0.50
MgO	0.25	0.25	1.30	1.50	0.30
二元碱度CaO/SiO <sub>2</sub>	0.12	0.13	0.98	0.90	0.30

表4—典型高炉和直接还原用氧化球团的化学成分



## 2.氧化球团质量要求

## 氧化球团质量要求

指标		高炉（消耗70%氧化球团）	直接还原（消耗30%氧化球团）
化学成分	Fe	≥64.00%	≥67.00%
	CaO、MgO、 酸性氧化物	适量	(CaO+MgO) : <3%; 酸性氧化物: <3%
	P、S、碱金属等 有害元素	尽可能低 P<0.045%; S<0.25%	尽可能低 P<0.03%; S<0.008%
粒度组成		9~16mm: >85%	9~16mm: >95%; +12.5mm: >50%
抗压强度, N/个		>2500N/个 (大型高炉)	>2500N/个
转鼓强度, %(+6.3mm)		>95%	>95%
耐磨强度, %(-0.5mm)		<5%	<5%
高温冶金性能	还原性	RI≥65%; RI <sub>40</sub> =0.6~1.4%/min	金属化率≥92%; RI <sub>40</sub> =0.9~1.4%/min
	还原粉化性能 RDI	RDI <sub>-6.3mm</sub> <10%; RDI <sub>-3.15mm</sub> <7% RDI <sub>-0.5mm</sub> <5%	RDI <sub>-3.15mm</sub> <5%
	还原膨胀指数 RSI	酸性球团: ≤20%; 熔剂性球团: ≤15%	---
	还原强度	还原后球团抗压强度>450N/个	(MIDREX热荷重还原试验): 转鼓强度≥90% (+6.73mm); 抗压强度≥1000N/个

表5—高炉和直接还原用氧化球团推荐的质量要求。（熔融还原工艺对氧化球团的要求与高炉用球团类似）。



当前广泛用于球团原料的预处理工艺有润磨、球磨、高压辊磨或这些方法的联合工艺。

#### 1) 润磨预处理

- 润磨预处理工艺主要应用于中国的竖炉球团厂，其目的就是改善磁铁精矿的成球性和减少膨润土用量；
- 以大冶精矿为例，2.5%膨润土的混合精矿不经润磨处理其最佳生球落下强度仅4.2次/0.5m，而1.0%膨润土的混合精矿经过润磨处理后制备的生球落下强度便可达4.9次/0.5m，膨润土用量可减少0.5%~1.0%；
- 大量研究表明润磨预处理工艺还能明显改善以赤铁矿粉为主要原料、高MgO球团原料和一些特殊球团物料（如100%硫酸渣或其与铁精矿组成的混合精矿）的成球性和球团预热焙烧性能。

#### 缺点

- 1) 处理能力小，30-80万吨/年；
- 2) 生产上常用于处理磁铁矿，不适用于镜铁矿等坚硬矿石

### 3.强化氧化球团制备技术

#### 原料的预处理工艺

#### 2) 球磨预处理

- 当球团原料较粗时，如以烧结粉料为原料，通常需要通过球磨得到细粒粉料后才能造球。
- 在生产中，预处理磁铁精矿和镜铁矿通常采用湿式球磨工艺，而预处理赤铁矿粉时采用干式球磨工艺，主要原因是细粒赤铁矿的沉降性能较差，难以过滤。

#### ● 干式球磨预处理赤铁矿粉工艺-应用实例：

- ✓ 澳大利亚一钢（One Steel）公司
- ✓ 日本神户钢铁（Kobe Steel）球团厂
- ✓ 印度塔塔钢铁（Tata Steel）600万吨/年带式焙烧机球团厂
- ✓ 印度京德勒西南钢铁（JSW Steel）420万吨/年带式焙烧机球团厂

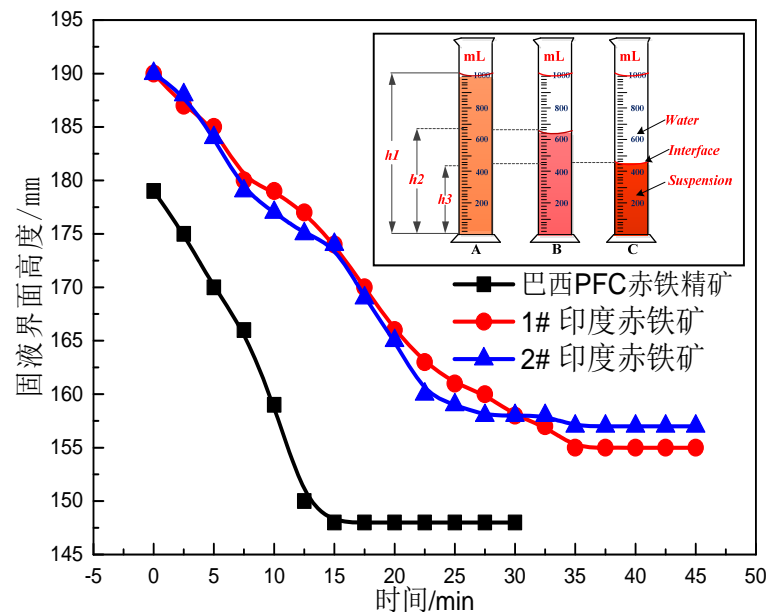


图3—印度赤铁矿和巴西PFC镜铁矿沉降曲线（样品粒度： $-0.074\text{mm}$  90%；矿浆浓度：80%）

### 3. 强化氧化球团制备技术

### 原料的预处理工艺

↓ 以印度赤铁矿粉为原料干式球磨至0.074mm以下的颗粒含量达到80-81%，膨润土用量仅为0.5%时便能够制备质量良好的生球，落下强度达14次/0.5m以上。

⇒ 相比而言，镜铁矿则要求有更细的粒度和更高的比表面积来降低膨润土用量和提高生球质量，从而导致球磨能耗高。

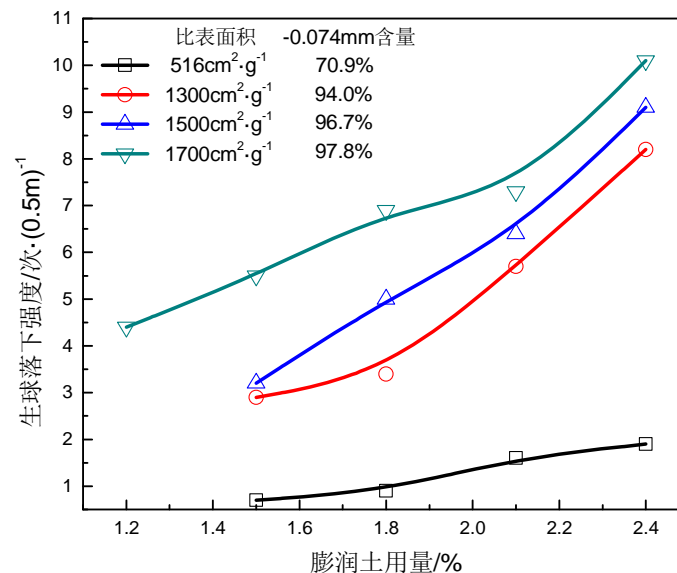


图4—以巴西镜铁矿为原料干磨至不同粒度对生球落下强度的影响

矿种	粒度组成 / (-0.074mm) wt%	生球质量		
		落下强度 / 次·(0.5m) <sup>-1</sup>	抗压强度 / $\text{N} \cdot \text{个}^{-1}$	爆裂温度 / $^{\circ}\text{C}$
1#	81.6	14.6	18.3	326
	85.3	17.0	19.8	315
	90.8	23.7	22.3	306
2#	80.1	22.9	25.7	329
	85.1	35.3	26.7	307
	90.5	68.0	28.4	295

表6—以印度赤铁矿粉为原料干磨至不同粒度对生球质量的影响（原料初始粒度：0~8mm；膨润土用量0.5%，造球时间15min）



## 3. 强化氧化球团制备技术

### 原料的预处理工艺

#### 3) 高压辊磨预处理

- 上世纪90年代初后，高压辊磨机开始应用于钢铁行业的球团原料处理。
- 优点：1) 节能，较传统润磨和球磨预处理工艺节省20%~50%能耗，特别是处理镜铁矿等坚硬矿石；2) 处理能力大，可达到700t/h以上；3) 明显改善球团原料的成球和预热焙烧性能。

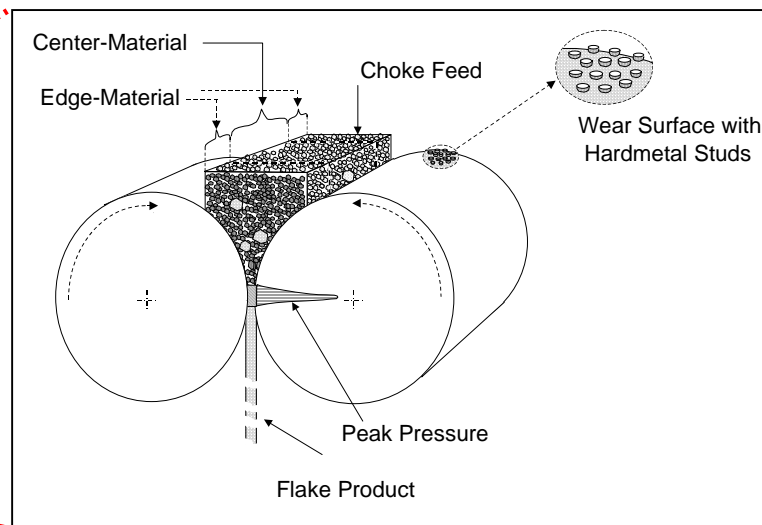


图5—高压辊磨机



### 3. 强化氧化球团制备技术

### 原料的预处理工艺

表7—高压辊磨预处理工艺在国内外部分球团厂的应用情况

公司	巴西 CVRD (1)	巴西 CVRD (2)	美国IDI公 司	印度 Kudremukh 铁矿公司	中国武钢 集团程潮 铁矿	中国武钢 集团鄂州 球团厂	中国珠海 粤裕丰球 团厂	首都京唐 带式焙烧 机球团厂
压辊尺寸 (mm)	Φ1400×14 00	Φ1400×14 00	Φ1400×80 0	Φ1400×1100	Φ1200×5 00	Φ1400×1 400	Φ1400×8 00	Φ1700×1 200
处理能力 (t/h)	600	715	400	530	210	760	450	700
预处理工 艺	球磨-高压 辊磨	高压辊磨- 球磨	单一高压 辊磨	球磨-高压 辊磨	球磨-高 压辊磨	球磨-高 压辊磨	单一高压 辊磨	单一高压 辊磨
给料水分 (%)	8.6	8.5	1	9~11	3~8	8~10	3~8.5	3~8
给料粒度	1mm	500cm <sup>2</sup> /g	2mm	<0.5mm	900~1100 cm <sup>2</sup> /g	900~1100 cm <sup>2</sup> /g	500~700c m <sup>2</sup> /g	<0.2mm
比表面积 增加值 (cm <sup>2</sup> /g)	>300	900	50%< 0.075mm	1600~2150	300~400	平均900	300~500	300~500
单位电耗 (kWh/t)	~2.8	~2.4	~1.75	~2.2	~2.6	~2.2	~2.0	~2.2
辊面寿命 (h)	14000	10800	8500	20000	---	12000	---	---



### 3.强化氧化球团制备技术

### 原料的预处理工艺

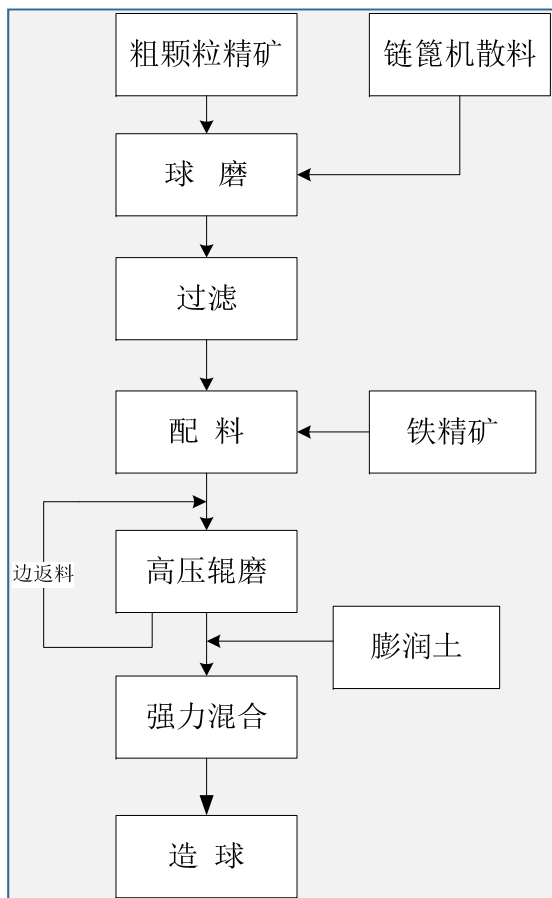


图6—武钢鄂州球团厂球磨-高压辊磨联合预处理工艺流程图

← 武钢球磨-高压辊磨联合预处理工艺：**原料适应性强**，用来预处理巴西和加拿大镜铁矿粉、巴西粗粉和毛粉等原料。

↓ **球磨的重要性**：球磨预处理后物料的0.074mm以下宜在60%以上，同时比表面积在900cm<sup>2</sup>/g以上。

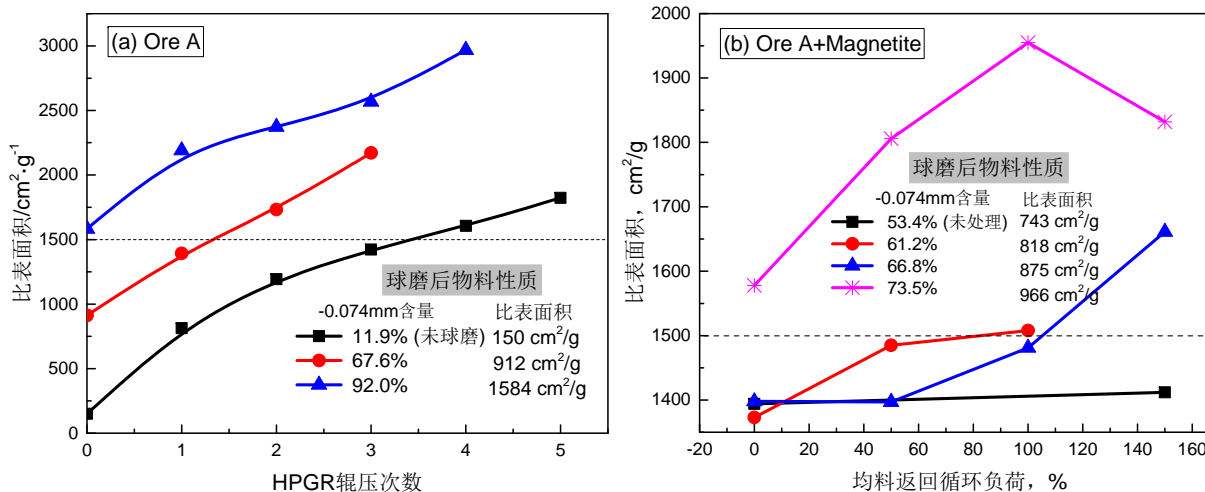


图7—采用球磨-高压辊磨联合工艺时，湿式球磨预处理单一矿(a)和混合矿(b)的性质对高压辊磨效果的影响





### 3.强化氧化球团制备技术

#### 原料的预处理工艺

高压辊磨预处理能显著提高生球强度，降低膨润土用量同时改善球团的预热焙烧性能，是强化镜铁矿、硫酸渣、高结晶水锰矿粉、铬铁矿等一系列特殊球团原料球团制备的关键技术，其作用机理主要在于：

- ✓ 高压辊磨工艺使物料的微细颗粒含量明显增多，比表面积变大，改善了原料的颗粒形貌和粒度组成，使得颗粒在成球过程中堆积更加紧密，同时扩大了其在高温固结时颗粒间的（反应）接触面积，使得球团固结更加紧密；
- ✓ 高压辊磨作为一种机械活化作用能够将一部分机械能转化为自由能，通过结构的破坏如物料的非晶化，表面积、晶粒大小和强度的改变以及相位转变，内部破裂形成了大量的晶格缺陷使物料的表面活性增强，从而降低了反应所需的活化能，促进了焙烧过程中的质点迁移和连接颈的形成。



如前所述，当前球团厂面临着原料品种繁多、物化性质、成球性和预热焙烧性能存在差异的问题，给现场生产组织和操作及球团矿产品质量的稳定性带来了严峻的考验。对球团原料进行优化配矿有以下几个优势：

- ✓ **节省原料成本，合理使用经济矿。**如武钢鄂州球团厂对包含毛粉、巴粗粉、邦矿和铁红等一系列非主流经济矿种在内共多达7种铁精矿进行优化配矿来稳定球团质量同时降低球团生产成本；
- ✓ **改善难冶球团原料的成球性和焙烧性能，**如赤铁矿（镜铁矿）、硫酸渣配加磁铁矿，混合精矿可能仍需润磨或球团-高压辊磨工艺进行预处理。
- ✓ **基于原料自身性质进行优劣互补，实现对原料进行不磨或少磨，降低磨矿能耗和生产成本。**

### 3.强化氧化球团制备技术

### 优化配矿

使用西澳超细粒磁铁精矿（比表面积达 $2100\text{cm}^2/\text{g}$ 以上， $0.028\text{mm}$ 以下含量达90%以上）搭配粒度较粗的国产磁铁精矿或20%~40%比表面积较低的巴西镜铁矿时可制备性能合格的生球和焙烧球。减少了原料磨矿预处理流程，从而节省了能耗和成本。

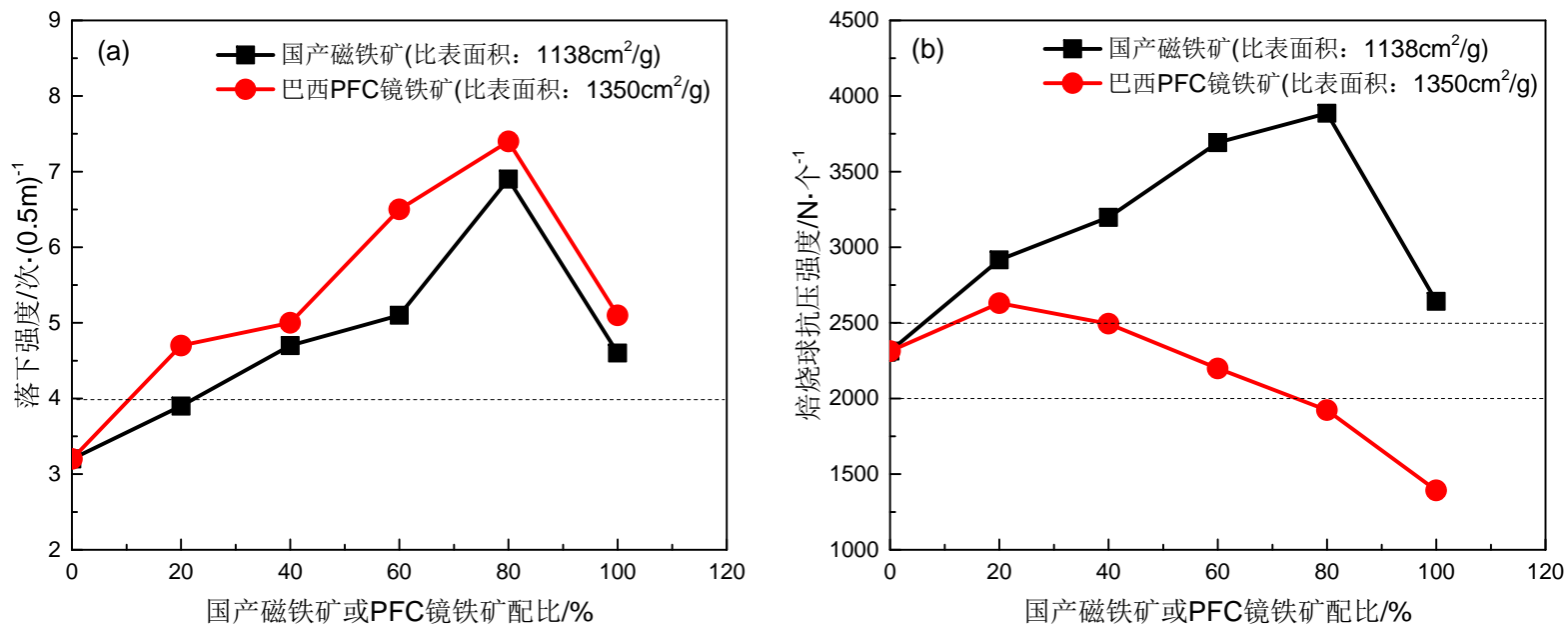


图8—西澳超细粒磁铁精矿与粒度较粗的国产磁铁精矿、焙烧性能差的巴西PFC镜铁矿搭配使用时对生球、焙烧球性能的影响（1.5%膨润土用量，造球时间16min；焙烧温度 $1280^\circ\text{C}$ ，焙烧时间15min）



表8—几类最常见粘结剂的对比

类别	粘结剂名称	一般使用量/%	优点	缺点
无机 粘结剂	膨润土	0.5%~3.0%	传统粘结剂，热稳定性高，来源广泛	用量高；降低铁品位；恶化球团的冶金性能尤其是还原性
有机 粘结剂	纤维素类(如CMC、佩利多、阿可泰)	0.025%~0.1%	用量少；高温易分解，避免铁品位的下降	合成成本高；热稳定性差，不太适用于链篦机-回转窑工艺
复合 添加剂	腐殖酸型复合粘结剂(F粘结剂、MHA)	0.25%~1%	兼有无机和有机添加剂的优势，具有粘结性强、催化的特性	对某些球团原料的适应性差；制备成本偏高
	膨润土基复合粘结剂	1.0%~1.5%	粘结剂的原料易得，制备简单、成本低	粘结剂（其中膨润土）的用量依然较高



- ✓ 迄今为止，**膨润土**仍是球团生产中最常用的粘结剂；
- ✓ 但近年来，新型球团粘结剂在球团工业生产中不断得到成功应用。**美国Cliffs公司**的一条链篦机-回转窑球团生产线已成功应用**100%的有机粘结剂**取代膨润土。而带式焙烧机球团工艺的发展有望进一步推广有机粘结剂的应用。
- ✓ 在国内，中南大学研制了一种基于常规膨润土进行有机小分子插层复合的复合粘结剂并成功应用于武钢、涟钢等球团厂，粘结剂用量由原先的3.0%降低到1.4%，同时爆裂温度提高了150℃，焙烧球强度可增加1000N/个。而国内其他复合粘结剂在球团厂现场应用的实践并不多。
- ✓ 因此，**开发对球团原料适应性好、能够满足球团工艺生产要求及高效低成本的新型复合球团粘结剂**始终是今后研究的一个重要方向。



### 3.强化氧化球团制备技术

### 新型球团粘结剂

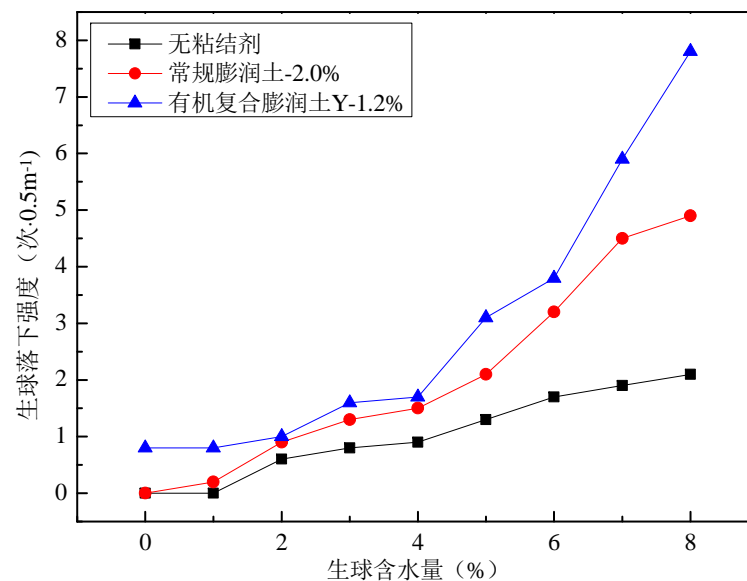
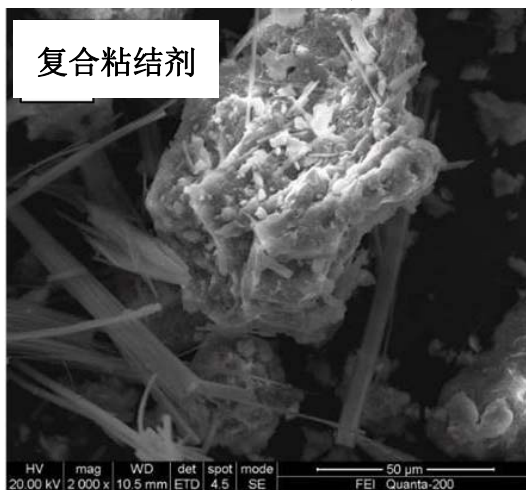
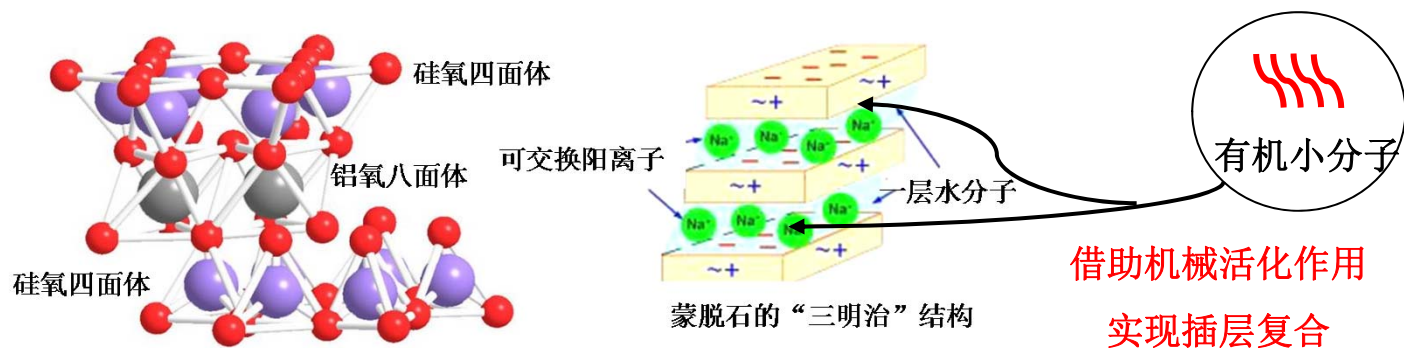


图9—复合球团粘结剂（中南大学）的制备原理及其与常规膨润土的对比





### 3.强化氧化球团制备技术

### 熔剂型、镁质球团

- 现代高炉操作要求高炉炉渣中有一定量的MgO以改善其流动性和提高炉渣脱硫能力；另一方面，当某些球团原料（如镜铁矿）的焙烧性能和冶金性能（如还原膨胀性能）均比较差时，调节球团碱度和MgO含量将是改善球团焙烧性能和冶金性能的有效技术手段（如图10所示）。

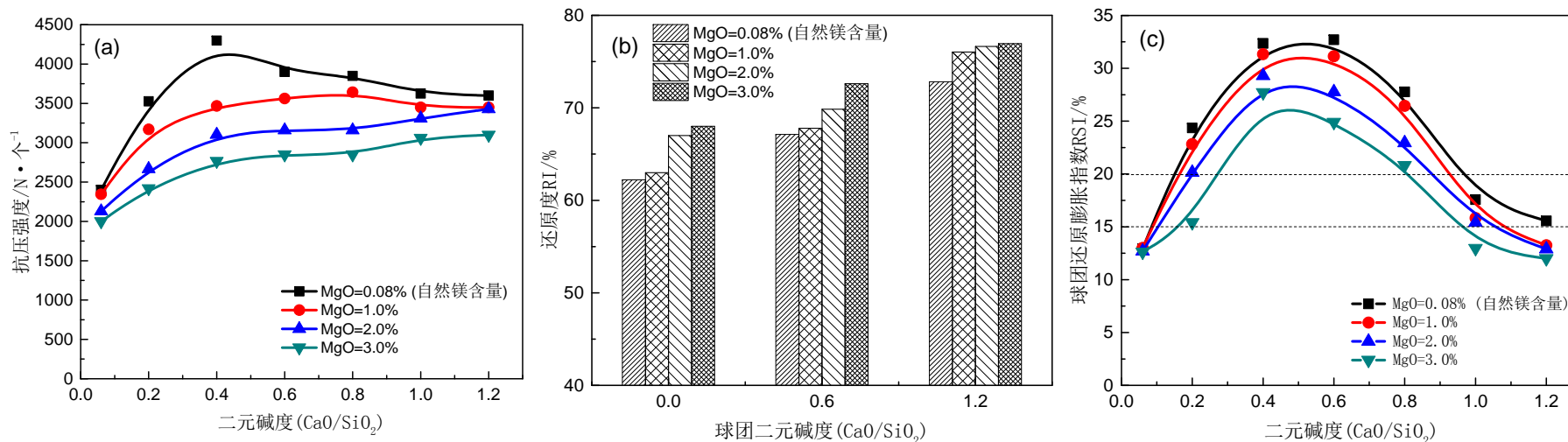


图10—球团二元碱度和MgO含量对100%巴西镜铁矿球团抗压强度(a)、还原性(b)和还原膨胀性能(c)的影响 (SiO<sub>2</sub>含量: 3.0%~3.1%)

### 3.强化氧化球团制备技术

### 熔剂型、镁质球团

- 自上世纪70年代以来，欧洲、北美和日本等国就开始生产和在高炉应用熔剂性及含镁球团，而我国高炉主要采用高碱度烧结矿配加酸性球团矿的炉料结构，导致球团矿的碱度提升空间有限，熔剂性球团发展受限。
- 受我国高炉炉料结构影响，冶炼所需的MgO主要来自高碱度烧结矿。但随着烧结矿中MgO含量的增加，烧结矿转鼓强度明显下降（如图11所示）。

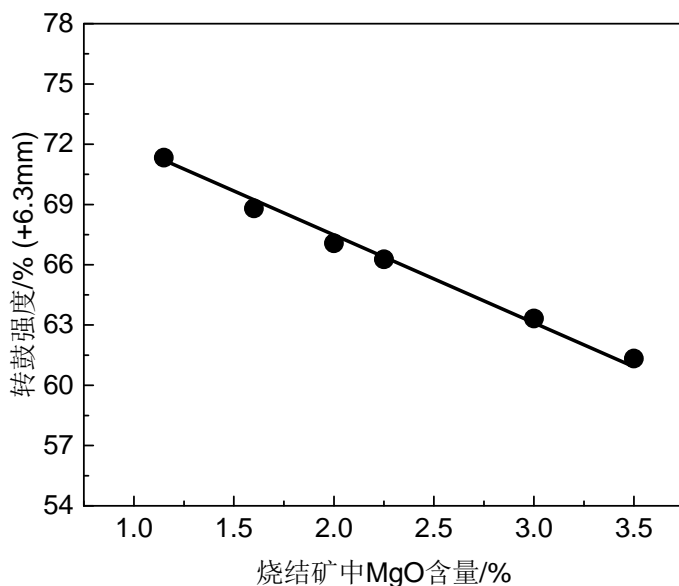


图11—提高MgO含量对烧结矿转鼓强度的影响

- 因此，2000年以来国内在生产熔剂性和镁质球团方面有许多有意义的尝试和实践：
  - 首钢矿业公司在200万吨球团生产线生产碱度为1.0的自熔性球团；
  - 河北宣化正朴铁业采用了100%自熔性球团入炉；
  - 武钢、首钢、包钢等钢铁厂对镁质球团进行了工业试验和应用。





## 4.结论

- ✓ 氧化球团产量将持续增加并在未来有很大的提升空间，这是由于有更多细磨精矿投入生产，提高焙烧球团入炉比例能够改善高炉炉况，也符合炼铁业环保的要求；
- ✓ 回转窑和带式焙烧机在我国球团生产工艺中将占据主导地位，特别是带式焙烧机工艺在我国将有进一步发展，这是由于为了能够更加节约能源和降低生产成本，同时也是为了满足产量不断扩大的需要。
- ✓ 球团原料将会变得越来越复杂，为改善其成球性和降低膨润土用量，高压辊磨预处理工艺将进一步发展，同时优化配矿技术，新型球团粘结剂的使用等是强化复杂球团原料球团制备的有效技术手段。开发对球团原料适应性好、能够满足相应球团工艺生产要求及高效低成本的新型复合球团粘结剂始终是今后研究的一个重要方向。
- ✓ 提高球团碱度和MgO含量是改善球团焙烧性能和冶金性能的有效技术手段，自熔性球团及镁质球团在国内将进一步快速发展。





經國濟世  
學成致用

**Thanks for your attention!**

请各位专家和领导批评指正!

[www.csu.edu.cn](http://www.csu.edu.cn)

