



中南大學  
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

# 铁矿球团技术进展

潘建 教授/博导

中南大学 资源加工与生物工程学院钢铁冶金系

中南大学低碳与氢冶金研究中心

电话/微信: 13873142654

Email: [pjcsu@csu.edu.cn](mailto:pjcsu@csu.edu.cn)

中国·迁安

二零二三年·三月

## 中巴合作共建低碳和氢冶金实验室

科技日报讯（记者俞慧友）2月25日，记者从中南大学获悉，该校教育基金会与巴西淡水河谷正式签约，获得来自淡水河谷捐赠的581万美元资金支持，新建“低碳和氢冶金实验室”。

淡水河谷为全球矿业巨头，拥有世界上储量最大的高品位铁矿石产品，在支持钢铁行业低碳发展方面具有得天独厚的优势。

中南大学是我国教育部直属全国重点大学，在矿业工程和冶金工程学科上，历史悠久，科技创新建树丰厚。

截至目前，淡水河谷与中南大学已建立了16年的产学研合作基础，为我国钢铁工业的可持续发展作出了重大贡献。双方的合作也得到了中国和巴西两国政府的高度关注。2021年11月9日，中巴两国科技部部长举行的会谈中，提出将淡水河谷与中南大学的科技合作纳入中巴标志性合作内容。此次，淡水河谷捐赠支持中南大学建设低碳和氢冶金实验室，则是该会谈的重大成果，也是两国科技国际合作的标志性事件。该实验室的建立，既可充分利用中南大学矿业与冶金学科的人才、技术、信息、成果优势，也可充分发挥淡水河谷的资源优势，构建互动融合、协同创新、资源共享、合作共赢的国际合作创新新模式，打造应对产业变化国际合作的样板。此外，通过产学研用协同以及多学科交叉融合，有望共建起国际一流的低碳与氢冶金协同创新成果转化基地，进一步促进我国钢铁产业的绿色高质量发展。





## ■ 拥有高水平的平台和完备的科研条件

- 低碳与氢冶金国际联合实验室
- 低碳有色冶金国家工程研究中心
- 国家环境保护有色金属工业污染控制工程技术中心
- 湖南省2011协同创新中心
- 湖南省钢铁烧结球团工程技术研究中心
- 湖南省矿产开发与高效利用国际合作基地

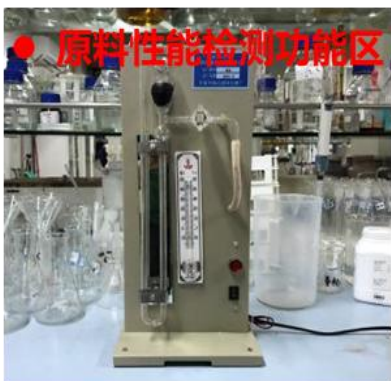
## ■ 国家“双一流”重点建设学科的支撑

- 冶金工程
- 矿业工程

## ■ 形成八大试验功能区

- 原料性能检测功能区
- 原料预处理功能区
- 矿物加工功能区
- 铁矿造块功能区
- 高温冶金性能功能
- 氢冶金与直接还原功能区
- 综合利用功能区
- 分析检测功能区

## 八大功能区



## 八大功能区



## 八大功能区

### ● 综合利用功能区(选冶联合+湿法冶金)



### ● 分析检测功能区





# 提纲

- 1** 球团矿产量、生产工艺和原料的发展
- 2** 氧化球团的质量要求
- 3** 强化氧化球团制备技术进展
- 4** 带式机焙烧球团技术
- 5** 结论及展望

# **1. 球团矿产量、生产工艺和原料的发展**

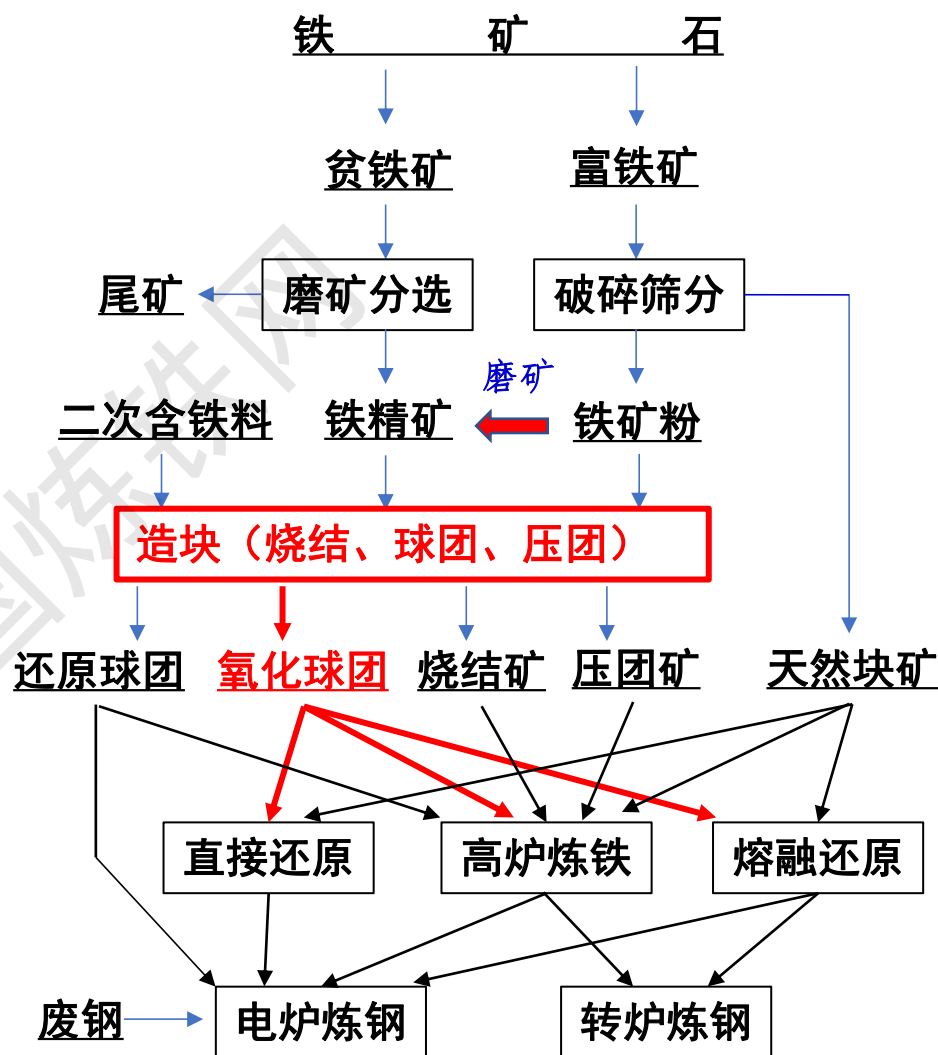
## 1.1 铁矿球团法简介：地位与作用



■ **铁矿造块**是处于矿石破碎、磨矿分选和冶炼之间的加工作业，担负着为钢铁冶炼提供优质炉料的作用。

■ **铁矿造块的作用**在于：

- ✓ 细粒物料制备成块状物料
- ✓ 调整化学成分、改善原料的冶金性能
- ✓ 改善料柱透气性，提高冶炼效率，降低能耗
- ✓ 去除原料中挥发成分和有害杂质
- ✓ 扩大可利用的冶金资源范围

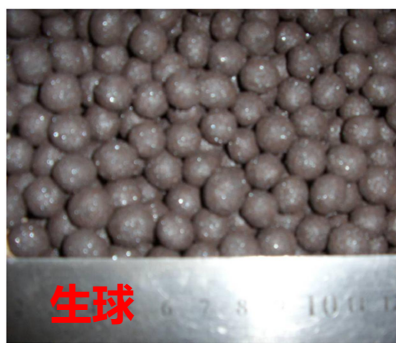


造块在钢铁冶金中的地位示意图

### 球团法 (pelletizing)

1) 定义：铁矿造块方法的一种，指**细磨物料**经加水润湿，在专门的造球设备上滚动而成球（生球），生球再经高温焙烧固结成成品球。产品称为球团矿（Pellets）。


2) 特点：① 球团焙烧所需热量主要由球团外部外部气体或固体燃料燃烧提供；② 球团法固结主要靠固相固结起作用，液相粘结相少；③ 球团矿粒度均匀（8-16mm），强度高、粉化低



### □ 根据球团矿固结温度和气氛的差异：

- (1) 氧化球团（1200-1300°C，氧化性气氛）
- (2) 还原球团（950-1100 °C，视还原气体定）
- (3) 冷固结球团（室温~250°C，借助于粘结剂的物理-化学变化对矿粉进行固结的球团工艺，有冷压球团块、碳酸化球团、蒸汽养生球团三种，在铁合金领域应用较广）

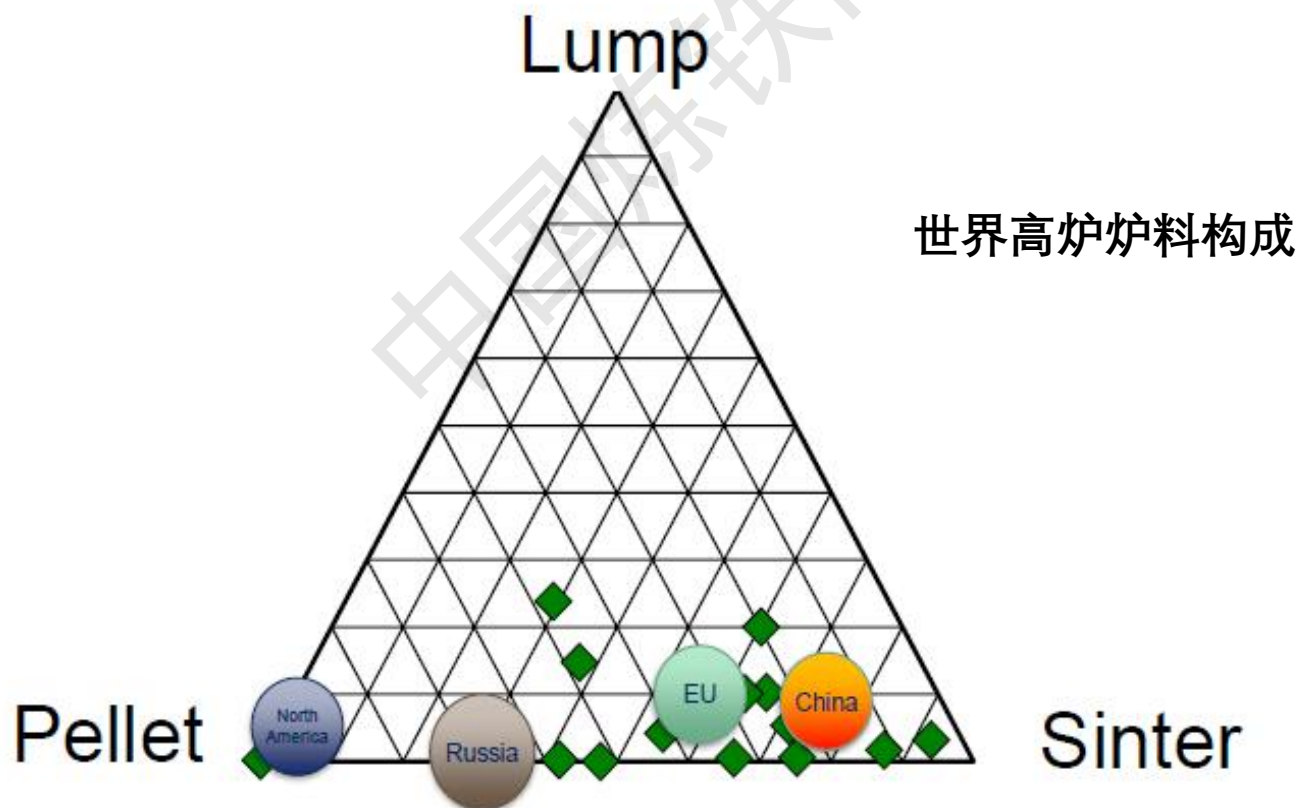
### □ 根据球团矿的碱度

- (1) 酸性球团（ $R < 0.3$ ）
  - (2) 熔剂性球团矿（添加熔剂， $R > 0.8$ ）
  - (3) 镁质球团矿（添加含镁熔剂）
- }  含镁熔剂性球团

## 1.2 发展球团矿生产的重要性：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，有利于提高铁水产量和降低焦比
- 高炉入炉比例：欧洲/北美 80~90%，甚至达100%；我国不足15%



## 1.2 发展球团矿生产的重要性：氧化球团矿的优点

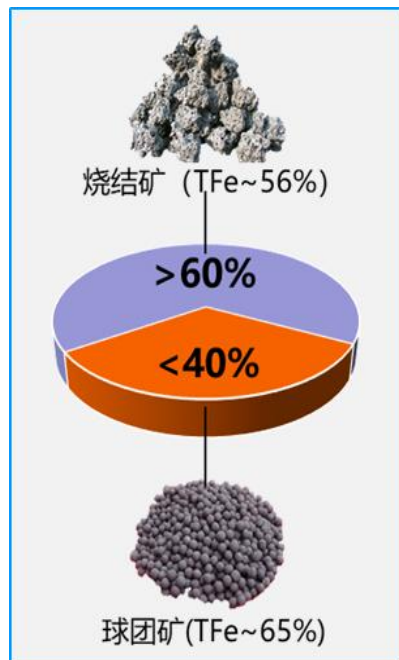


欧洲、北美与国内部分高炉炉料结构与冶炼指标对比

企业	炉料结构 (%)			利用系数	入炉品位	高炉技术经济指标 (kg/t)			
	球团矿	烧结矿	块矿	t/m <sup>3</sup> d	/%	渣铁比	焦比	煤比	燃料比
瑞典瑞钢	97.2	0.5	2.3	3	66	164	/	/	457
瑞典SSAB3#高炉	92.05	0.95	7	2.6	65.69	166	300	150	450
瑞典SSAB4#高炉	88.56	1.27	10.17	2.91	65.26	153	352	90	442
加拿大多法斯科	100	/	/	3.2	65.1	194	/	/	480
美国米塔尔7#高炉	80	20	/	2.366	63.33	275	335	120	455
美钢联14#高炉	80	20	/	2.377	61.89	250	300	160	460
宝钢2#高炉	13.1	69	17.9	2.169	60	268	/	/	486
首钢京唐钢铁	29.6	65.5	4.9	2.210	59.6	289	/	/	505
	55.0	40	5.0	2.50	61.5	215	/	/	480
包钢	27.5	72.0	0.5	2.140	58.6	319	/	/	550

球团入炉比例↑，入炉品位↑，渣铁比↓，燃料比↓，炼铁效益↑ 减排明显

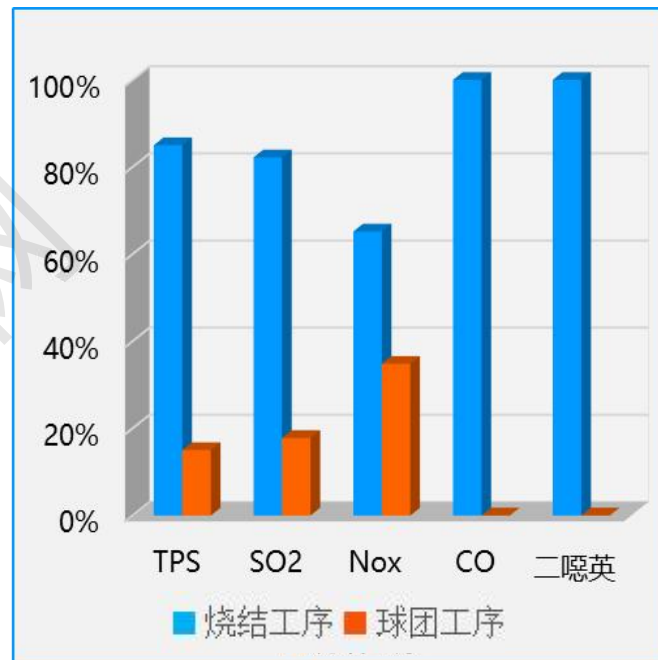
## 1.2 发展球团矿生产的重要性：球团法与烧结法的对比



我国高炉炉料结构



烧结及球团工序能耗



烧结及球团等标污染负荷比

- 球团法能耗和碳排放量减少50%以上
- 烟气污染物排放负荷仅为烧结的20%左右。

### □ 低碳

- 2015年，习近平主席在巴黎气候大会向世界承诺：中国CO<sub>2</sub>排放在2030年达峰并争取早日实现，同时使2030年单位GDP的CO<sub>2</sub>排放量较2005年下降60-65%。2020年习主席提出30、60“双碳目标”
- 2016年9月，全国人大常委会批准中国加入《巴黎气候变化协定》。
- 2016年，发改委发布《关于切实做好全国碳排放权交易市场启动重点工作的通知》(发改办气候[2016]57号)，将钢铁等8个行业的重点排放企业（控排企业）纳入交易。
- 2020年两会，全国人大代表、阳光电源董事长曹仁贤提议：“尽快启动征收碳税相关工作，参考国际碳市场价格，考虑国情和企业承受能力，可对每吨二氧化碳征收50-150元的碳税。”

### □ 绿色

- 2017年6月，环保部发布《钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准》：此次提标主要针对烧结、球团的生产工序，颗粒物、二氧化硫、氮氧化物的排放浓度分别从50、200、300 mg/m<sup>3</sup>进一步减少到20、50、100 mg/m<sup>3</sup>。
- 2018年7月，国务院发布《打赢蓝天保卫战三年行动计划》，目标是“到2020年，二氧化硫、氮氧化物排放总量分别比2015年下降15%以上”。
- 2019年4月，生态环境部等五部委联合发布《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》，要求“烧结机机头、球团焙烧烟气颗粒物、二氧化硫、氮氧化物排放浓度小时均值分别不高于10、35、50 mg/m<sup>3</sup>，其他主要污染源原则上分别不高于10、50、200 mg/m<sup>3</sup>”；“到2020年底前，力争60%左右产能完成改造；到2025年底前，改造基本完成，全国力争80%以上产能完成改造”。

### □ 高质量

- 2019年4月8日，国家发改委发布的《产业结构调整指导目录(2019本)》，设置行业准入标准：

**淘汰类：** 8m<sup>2</sup>以下球团竖炉；8-10平方米竖炉淘汰截止时间截止2020年

**限制类：** 120万吨/年以下的球团设备(铁合金球团除外、铸造用生铁球团除外)，球团竖炉(铸造用生铁球团除外)

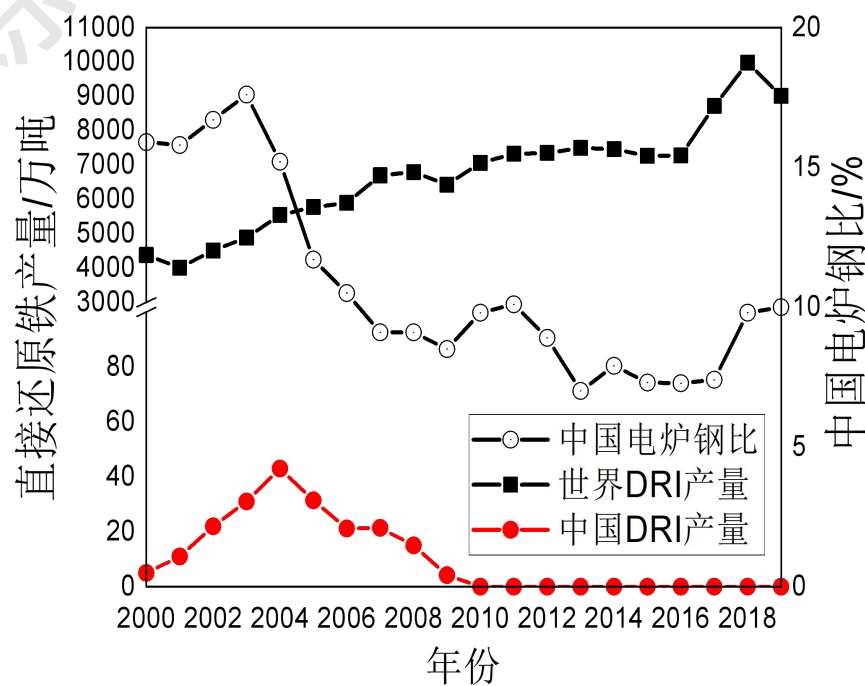
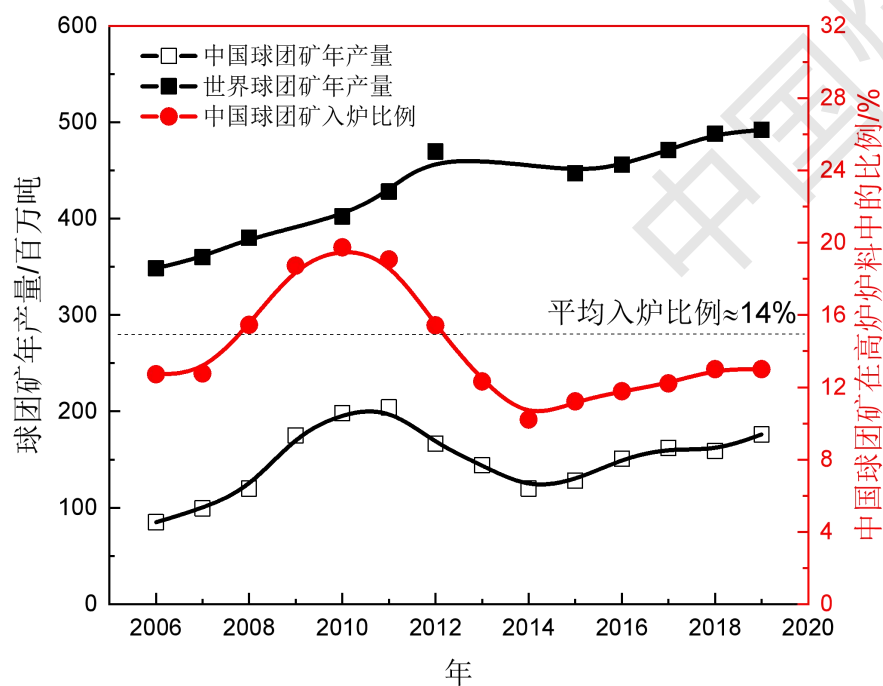
**鼓励类：** 带式焙烧等高效球团矿生产工艺技术，高炉高比例球团冶炼工艺技术

日益严格的环保要求为球团行业提供了广阔的发展空间

### 1.3 球团矿的产量及球团发展前景



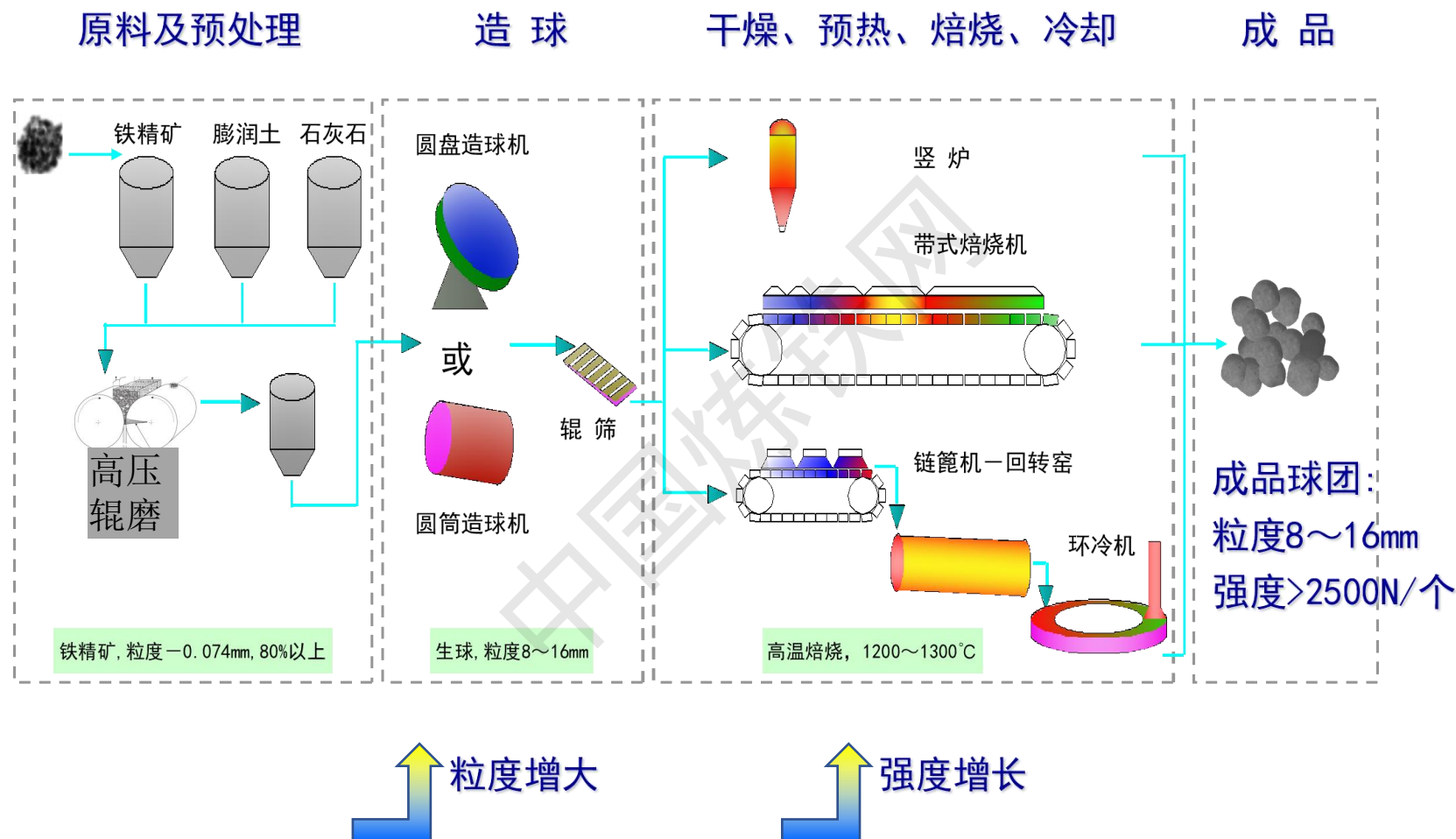
- 目前，世界球团矿总产量约**4.92亿吨**，其中**70%**用于高炉炼铁，**30%**用于直接还原；
- 2019年我国球团矿产量**1.76亿吨**，进口**3000多万吨**；2022年产量**2.3亿吨**。
- 短流程炼铁，尤其是国内电炉钢的发展（**2000年650万吨**，**2017年7749万吨**，**2022年约1.04亿吨**），将推动直接还原工艺发展（**目前国内DRI产量空白**），增大对高品质球团矿的需求，为球团矿的进一步发展提供广阔空间。



## 1.4 球团生产工艺的发展



中南大学  
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

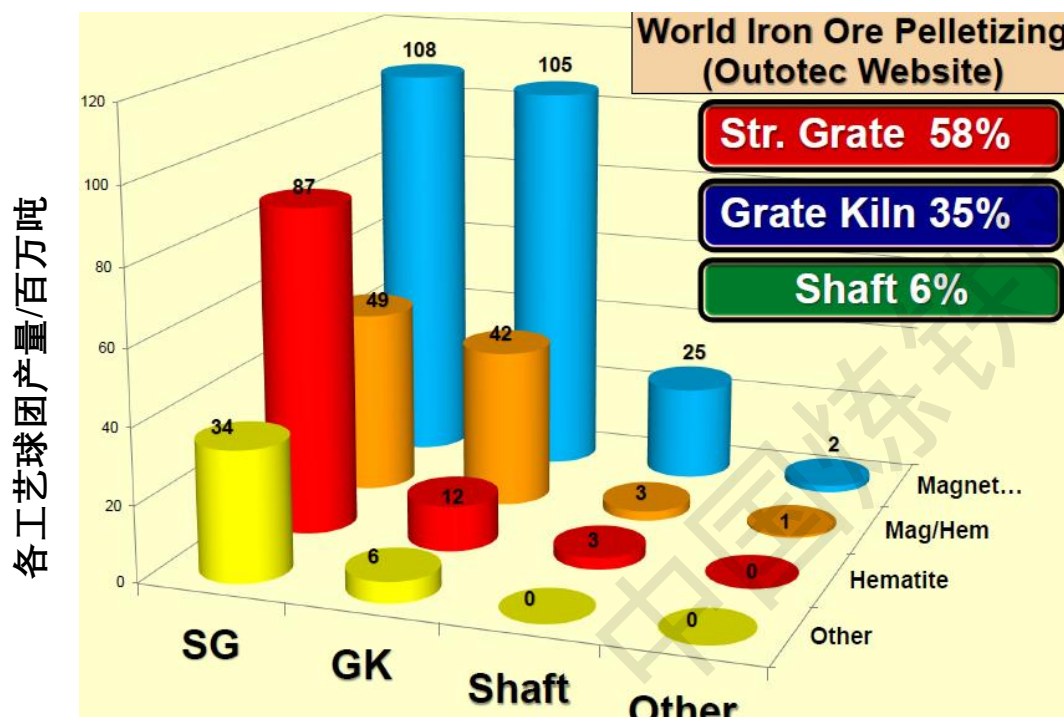


球团工艺流程示意图

## 1.4 球团矿生产工艺的发展



中南大學  
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY



世界球团矿生产工艺及所用原料构成

**铁矿：**磁铁矿、赤铁矿、风化矿及其混合矿。

**燃料：**天然气、煤气、煤、焦油

**粘结剂：**膨润土、有机粘结剂、复合膨润土等

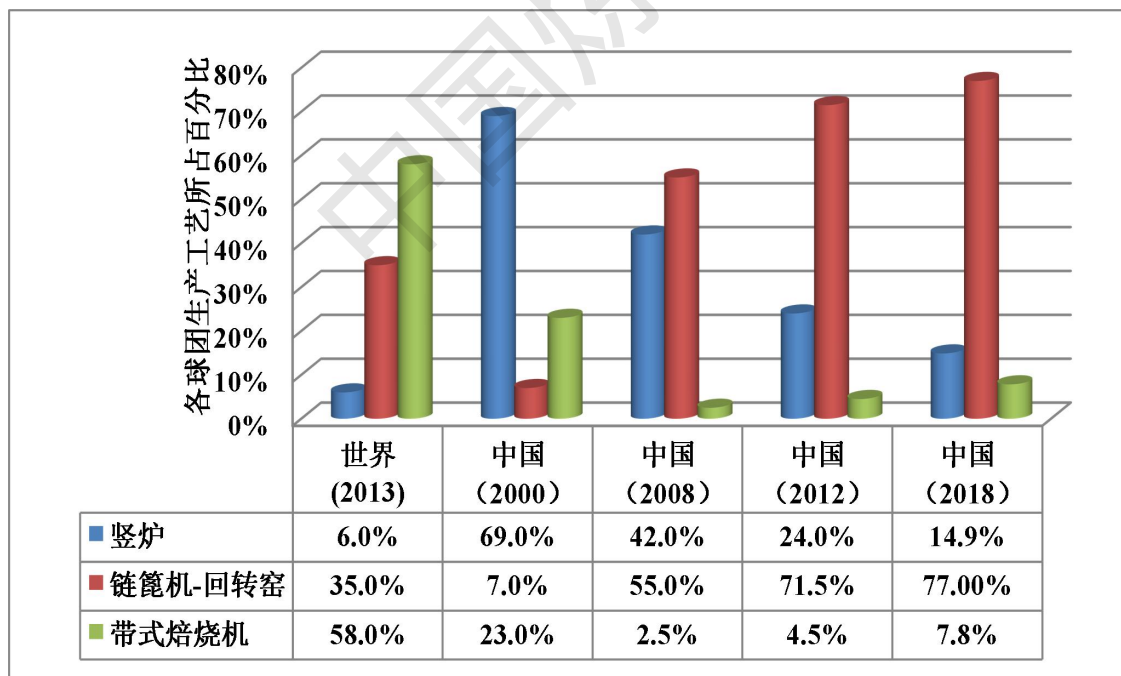
以全赤铁矿为原料  
带式机工艺 占比：**85.3%**  
链-回工艺 **11.8%**  
竖炉工艺 **2.9%**

- 带式焙烧机工艺的原料适应性较好，竖炉球团工艺的原料适应性较差。

## 1.4 球团矿生产工艺的发展



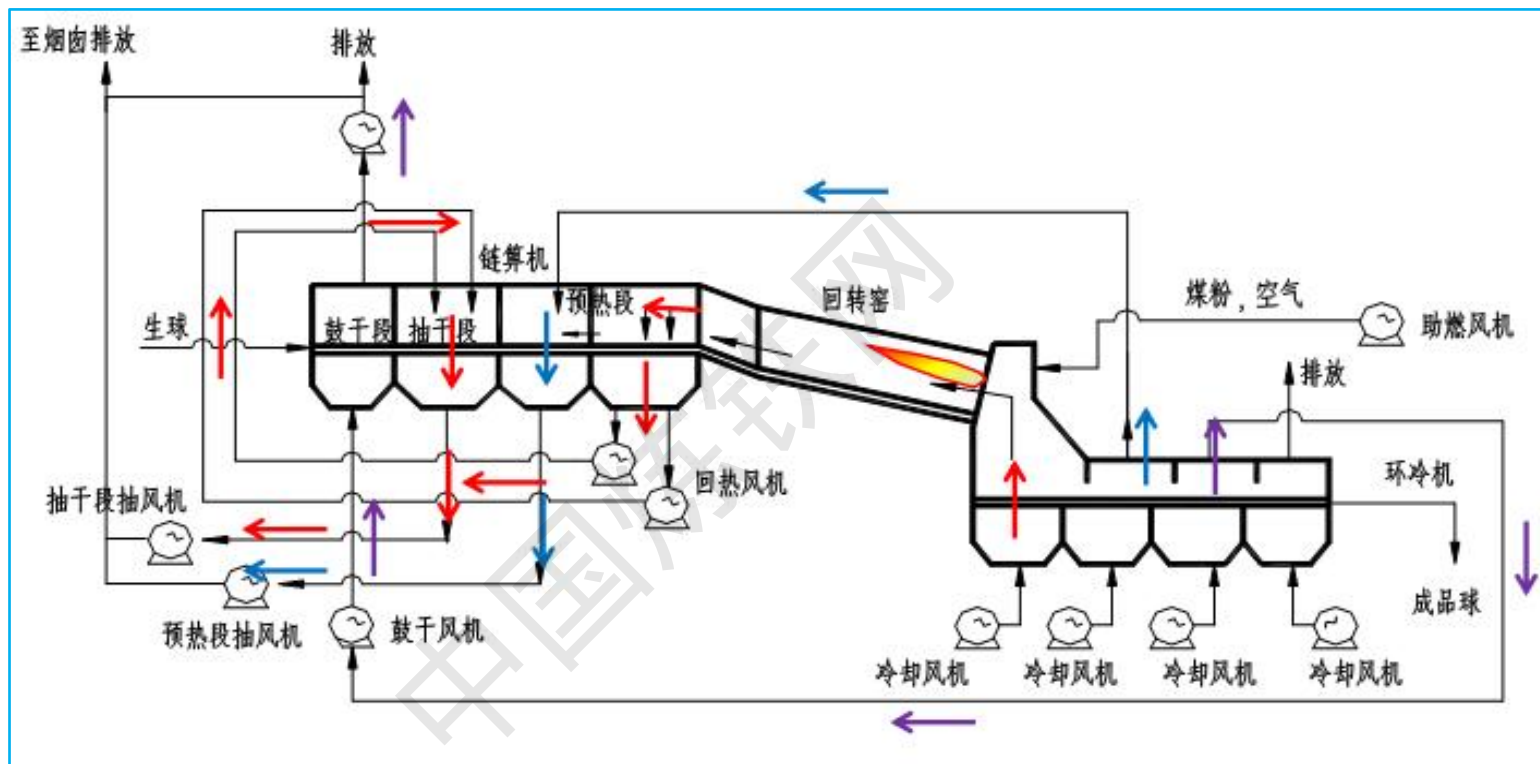
- **链-回工艺**是目前国内主导球团生产工艺。近年来，带式焙烧机工艺在国内开始得到快速发展，如首钢(400\*3万吨)、包钢500万吨等，2018年带式焙烧机工艺占比攀升到**7.8%左右**。
- 福建三钢国产首条200万吨/年带式机生产线(中钢设备建造，2019年12月投产)
- 预计今后带式机球团比例将**进一步提高到30%以上**(河钢乐亭2×480万吨/年、柳钢防城港1×400万吨/年、六安钢铁1×400万吨/年、山西建邦钢铁青岛邦拓1×300万吨/年等10余条建成或在建)，而竖炉工艺面临淘汰。



## 1.4 球团矿生产工艺的发展



### 链篦机- 回转窑- 环冷机 主要结构

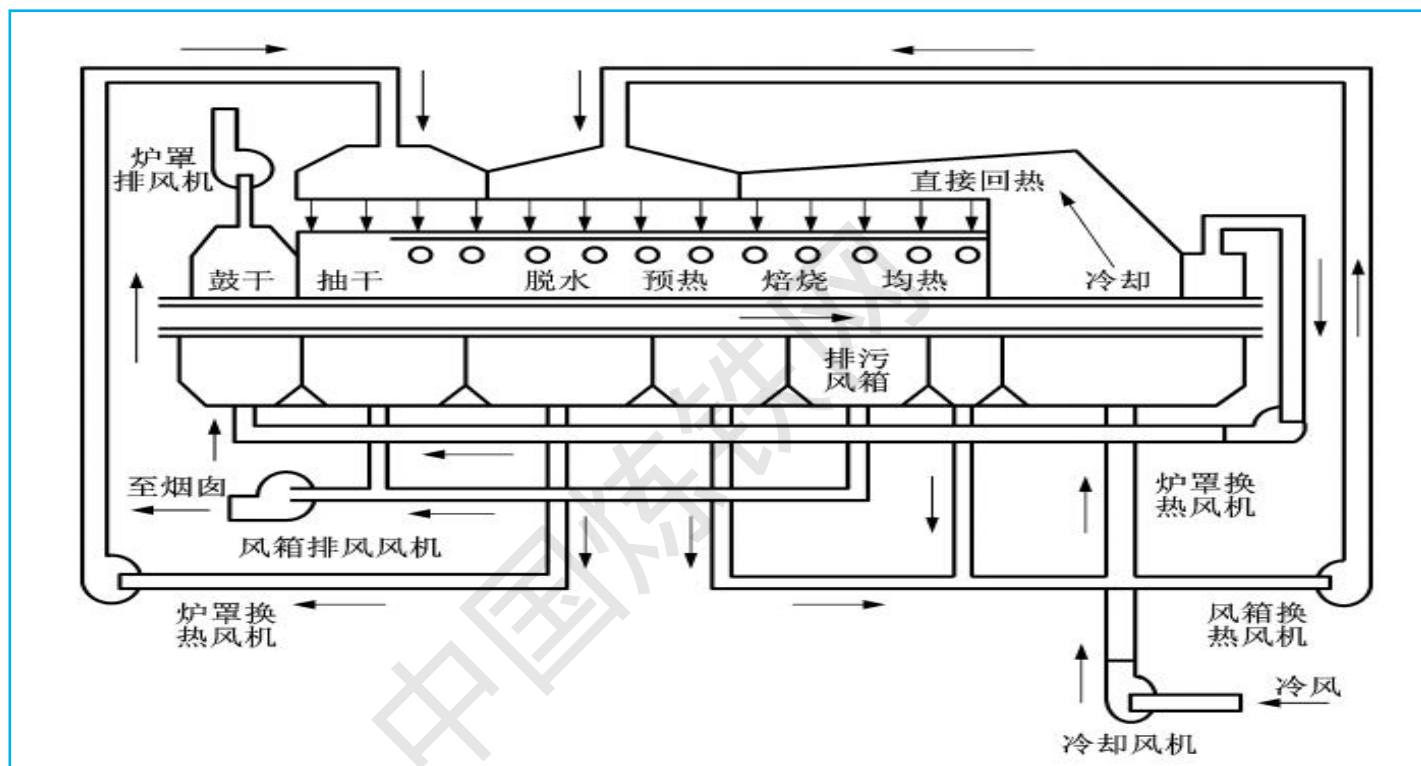


- 设备总体材质耐高温要求低
- 可用煤气、重油和煤粉作为燃料
- 球团质量均匀
- 开停慢，热工控制复杂、难度大，要求高
- 回转窑易结圈，作业率略低

## 1.4 球团矿生产工艺的发展



### 带式焙烧机主要结构



- 开停方便，工艺操作可控性强，作业率高
- 烟气逐级循环利用，能耗低，排放少
- 球团相对静止(对预热球强度无要求，降低粘结剂用量)，粉末产生少，无结圈
- 设备大型化、自动化程度高、作业率高
- 边缘效应明显，球团质量不均匀

## 1.4 球团矿生产工艺的发展

不同球团生产工艺的综合对比

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矿适应最佳，不太适全100%赤铁矿	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	稍高于带式焙烧机工艺	较高（可使用煤粉作为燃料）	宝钢湛江球团厂：500万t/a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925万吨/年	对原料适应性较好，但未见使用煤粉作为燃料的文献报道	较好，球团质量不如链篦机-回转窑工艺均匀	稍高于链-回工艺	低于链篦机-回转窑工艺	较高，使用天然气、燃油或焦炉煤气，电耗较链-回工艺高	首钢京唐（3*400万t/a）；包钢（500万t/a）；河钢乐亭（2*480万t/a）

## 1.4 球团矿生产工艺的发展



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)	
工艺	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	35.20

注：热耗按理论上1 kwh/t=0.123 kg标煤/t折算

- 赤铁矿球团能耗远高于磁铁矿球团。相同原料而言，链-回工艺能耗稍高。带式机工艺电耗更高。

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，主要原因是由于我国原料条件差，整体装备水平低，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。
- 2018年，国内包钢和首钢京唐带式机球团生产线的工序能耗约19 kgce/t左右，但仍高于国外。

### 球团生产工艺装备大型化

#### 链算机-回转窑工艺：

- ✓ 宝武集团鄂州球团厂、湛江钢铁球团厂（单机产量500万t/a，混合矿）
- ✓ 国外单机产量可达600-700万t/a（全磁铁矿）

#### 带式机焙烧球团工艺，奥图泰

- ✓ 包钢500万t/a（624m<sup>2</sup>，混合矿）、首钢3×400万t/a(504m<sup>2</sup>，混合矿)；
- ✓ 巴西Samarco 球团厂年产925万t带式机（单机产能最大，816m<sup>2</sup>，赤铁矿）
- ✓ 印度Tata Steel年产600万吨带式机（768m<sup>2</sup>，赤铁矿）；印度JSW年产700万吨带式机（816m<sup>2</sup>，赤铁矿），目前在建
- ✓ 俄罗斯Stoilensky GOK年产600万吨带式机（768m<sup>2</sup>，磁铁矿）
- ✓ 伊朗BIMISCO年产500万吨带式机（720m<sup>2</sup>，磁铁矿）

#### 带式焙烧机设备国产化，中钢设备公司

- ✓ 伊朗SISCO公司250万t/a(高MgO型磁铁矿)
- ✓ 阿尔及利亚TOSYALI公司400万t/a
- ✓ 中国福建三明钢铁200万t/a（国产首条），2019年12月26日投产
- ✓ 柳钢防城港钢铁基地400万吨t/a
- ✓ 河钢乐亭钢铁2×480万t/a，
- ✓ 德国CPG 400万t/a，在建

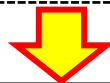
## 1.4 球团矿生产工艺的发展

### 近5年新建带式焙烧机项目列表

项目名称	年份	规格/（万吨/年）	类型	技术和设计单位
首钢京唐钢铁二期400万吨带式焙烧机项目	2019	2*400	带式焙烧机	奥图泰
河钢乐亭1#线工程	2020	480	带式焙烧机	中钢设备
河钢乐亭2#线工程	2020	480	带式焙烧机	中钢设备
福建三明钢铁200万吨/年带式焙烧机项目	2019	200	带式焙烧机	中钢设备
柳钢防城港钢铁基地400万吨/年带式焙烧机球团项目	2020	400	带式焙烧机	中钢设备
防城港钢铁基地400万吨带式焙烧机绿色低碳球团项目	2022	400	带式焙烧机	中钢设备
福建龙钢新型材料有限公司200万吨/年带式焙烧机球团项目	2022	200	带式焙烧机	中钢设备
安徽首矿大昌金属材料有限公司200万t/a带式焙烧机球团烟气脱硫脱硝项目	2022	200	带式焙烧机	中钢设备
南京金江冶金炉料有限公司带式焙烧球团生产线技术改造项目	2023	400	带式焙烧机	中钢设备
建龙西林钢铁“基于绿色低碳的400万吨/年数字化带式焙烧技术研究与应用”	2023	400	带式焙烧机	中钢设备
中天钢铁集团绿色精品钢带式焙烧机项目	2022	300	带式焙烧机	首钢-奥图泰
鞍山钢铁公司400万吨/年球团工程	2021	400	带式焙烧机	中钢设备
南钢带式焙烧机球团项目	2022	300	带式焙烧机	中钢设备
唐山市瑞丰钢铁170万吨焙烧机工程项目	2023	170	带式焙烧机	/
中钢集团滨海实业有限公司480万吨/年带式焙烧机球团项目	2022	480	带式焙烧机	中钢设备
昆明钢铁260万吨/年带式焙烧机球团项目	2022	260	带式焙烧机	中钢设备
广西盛隆产业升级技术改造工程	/	300	带式焙烧机	中钢设备

近年来，国内外球团原料的变化趋势：

- **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
- **铁精矿供应比例逐步提高**：贫、细、杂铁矿的利用；进口赤铁精粉比例增加；到2025年，世界上每年有5亿吨新的铁精矿投放市场；
- **粒度细粒化**：贫矿细磨深选，带来精矿细粒化的影响，如西澳超细粒铁精矿、太钢自产细粒铁精矿等；
- **品种多、性质复杂化**：镜铁矿、硫酸渣、红土镍矿、高S铁精矿、针铁矿、含氟铁精矿、含硼铁精矿、钒钛磁铁矿、铬铁矿、高MgO磁铁精矿、钢厂固废料等一系列成分和性质复杂的原料被用于制备氧化球团。另外，**烧结用粗粒赤铁矿粉用于制备氧化球团，如宝钢湛江、武钢、柳钢；淡水河谷开发了新的铁精矿品种（GF88）。**



- ✓ **强化球团制备技术的开发及应用**：原料预处理、优化配矿、新型球团粘结剂、熔剂性球团和镁质球团
- ✓ **球团矿生产工艺的转变**：传统竖炉→带式焙烧机、链篦机-回转窑

## **2. 氧化球团的质量要求**

## 2.1 原料及生球性能要求



### 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

0.5m高生球摔落次数在**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

##### ➤ 干球抗压强度大于22N /个

### 典型高炉和直接还原用氧化球团的化学成分

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

## 2.2 氧化球团矿质量要求



**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)

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

### **3. 强化氧化球团制备技术 进展**

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；也可用于少数钢厂循环料的预处理。
- 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个百分点；
- 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%硫酸渣或与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

## 3.1 原料预处理工艺

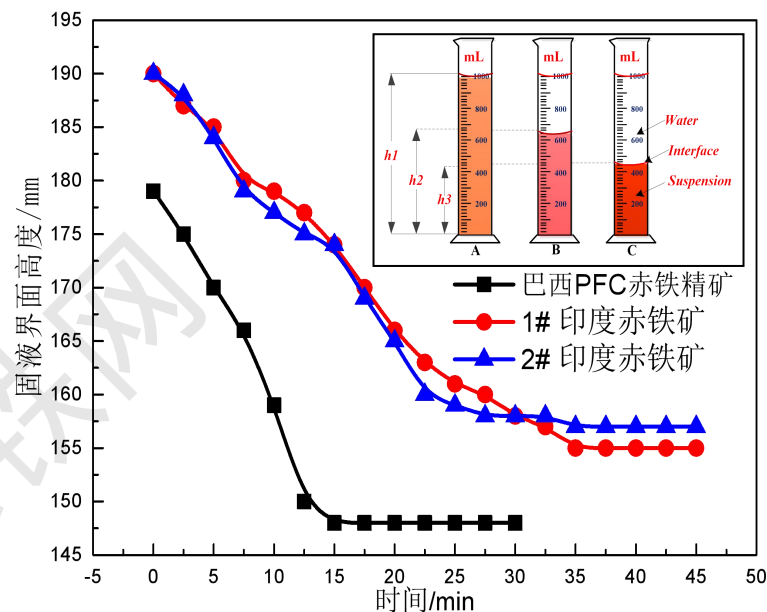


### (2) 单一球磨预处理

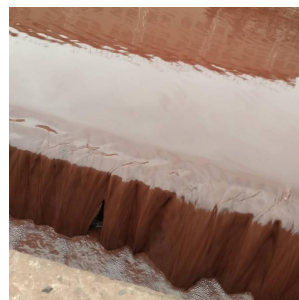
- 当球团原料较粗时，如以**烧结粉料**为原料，通常需要通过球磨得到细粒物料后才能造球。
- 在生产中，预处理磁铁精矿和镜铁矿通常采用湿式球磨工艺；而预处理赤铁矿粉时采用干式球磨工艺，主要原因是细粒赤铁矿的沉降性能较差，难以过滤。
- 宝武、中南大学等联合开发了**基于矿石特性配合的载体强化磨矿、沉降、过滤技术**。

### ● 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）、加古川球团厂
- ✓ 印度Tata Steel 600万吨/年带式焙烧机球团厂
- ✓ 印度JSW Steel 420万吨/年带式焙烧机球团厂
- ✓ 国内宝钢湛江、柳钢、安阳钢铁等



印度赤铁矿和巴西PFC镜铁矿沉降性能对比  
(粒度：-0.074mm 90%；矿浆浓度：80%)



“跑红”现象

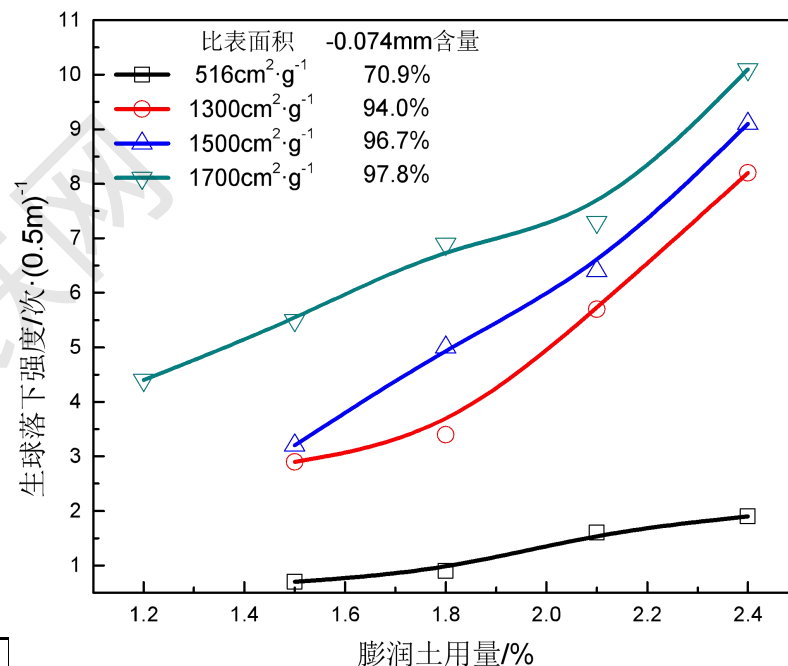


沉降正常

### 3.1 原料预处理工艺



- 以印度KSP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。



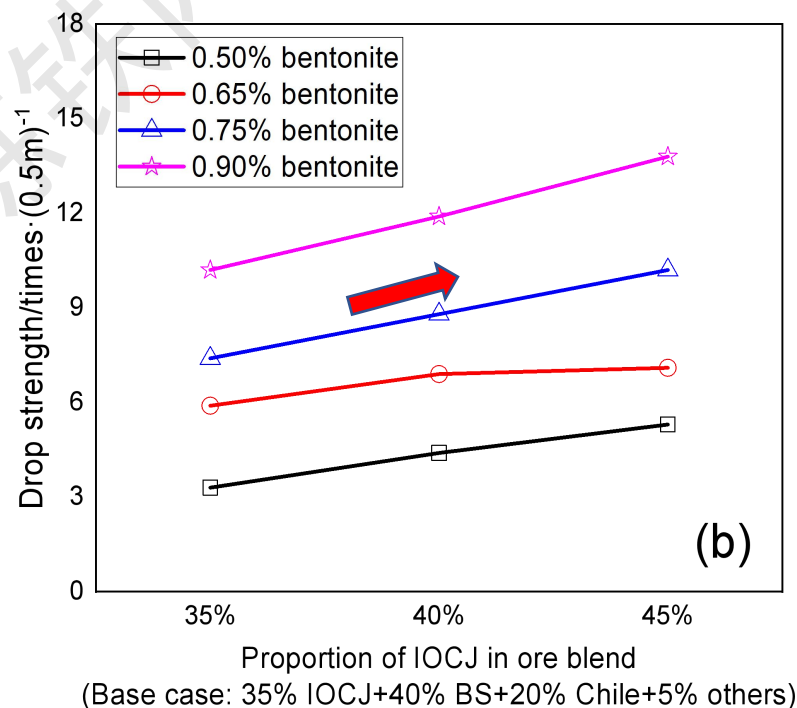
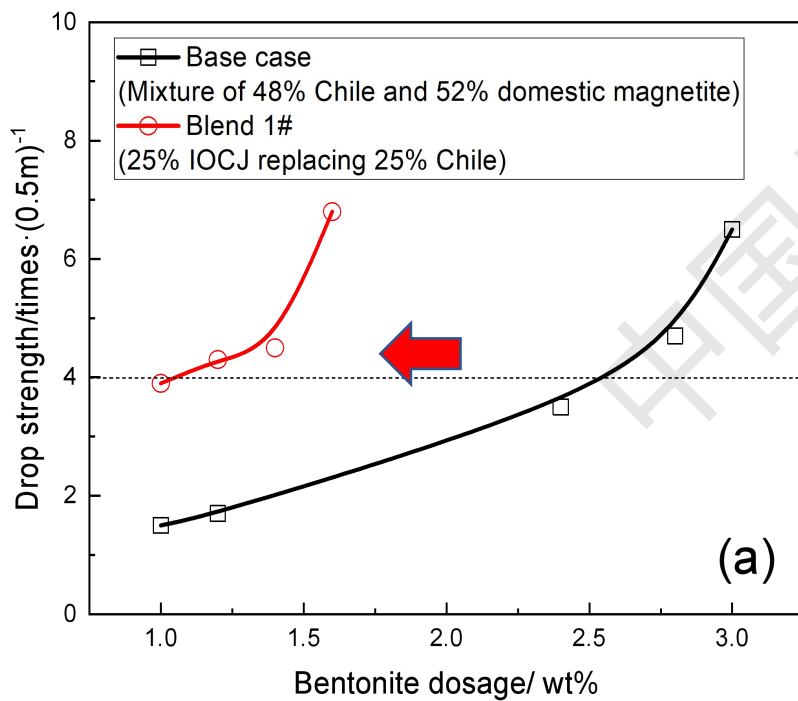
以印度粗赤铁矿粉为原料，干磨至不同粒度对生球质量的影响  
(初始粒度：0~8mm；膨润土用量0.5%，造球时间15min)

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 /N·个 <sup>-1</sup>	爆裂温度 /°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

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

### 3.1 原料预处理工艺

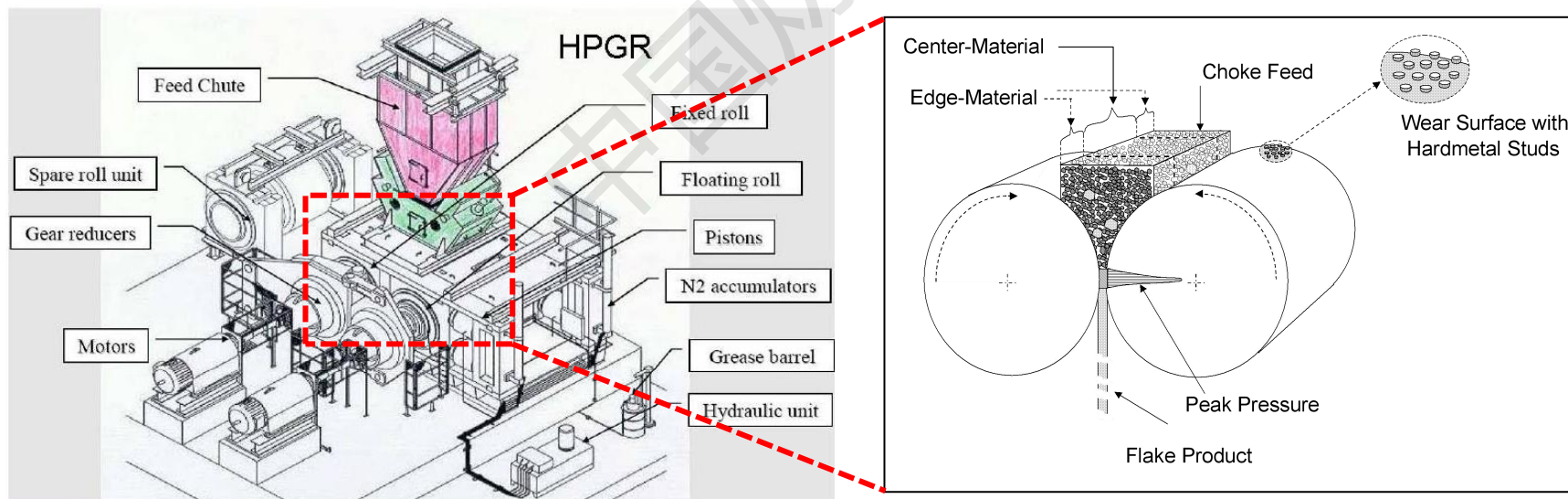
- 配加细磨卡粉能明显改善物料的成球性，显著降低膨润土用量；且在此条件下，球团矿焙烧性能和产品冶金性能良好。
- 粗粒赤铁矿粉磨矿预处理技术为**拓宽球团原料来源，降低球团矿生产成本**奠定了坚实的基础。



细磨卡粉替代智利磁铁精矿(a)和巴西镜铁精矿(b)对生球落下强度的影响

### (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；目前已广泛应用于国内球团厂。
- 优点：1) **节能**，较传统润磨和球磨预处理工艺能耗节省20%~50%，特别是处理镜铁矿等坚硬矿石；2) **单台处理能力大**，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，甚至冶金性能。



高压辊磨机结构及工作原理

## 3.1 原料预处理工艺



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	中国武钢集团鄂州球团厂	中国珠海粤裕丰球团厂	包钢带式焙烧机线	首都京唐带式焙烧机球团厂
压辊尺寸 (mm)	Φ1400×1400	Φ1400×1400	Φ1400×800	Φ1400×1100	Φ1400×1400	Φ1400×800	Φ1400×1400	Φ1700×1200
处理能力 (t/h)	600	715	400	530	760	450	800	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	单一高压辊磨	单一高压辊磨	单一高压辊磨
给料水分 (%)	8.6	8.5	10	9~11	8~10	3~8.5	3~8	3~8
给料粒度	1mm	500cm <sup>2</sup> /g	2mm	<0.5mm	900~1100 cm <sup>2</sup> /g	500~700 cm <sup>2</sup> /g	<0.2mm	<0.2mm
比表面积增加值 (cm <sup>2</sup> /g)	>300	900	50%<0.075mm	1600~2150	平均900	300~500	300~500	300~500
单位电耗 (kWh/t)	~2.8	~2.4	~1.75	~2.2	~2.2	~2.0	~2.2	~2.2
辊面寿命 (h)	14000	10800	8500	20000	12000	---	---	---

- 单一高压辊磨，开路和闭路；球磨-高压辊磨，对原料适应性更强。
- 比表面积的增幅与原料性质有密切关系；球团原料推荐的比表面积为1500-1900 cm<sup>2</sup>/g

## 3.1 原料预处理工艺

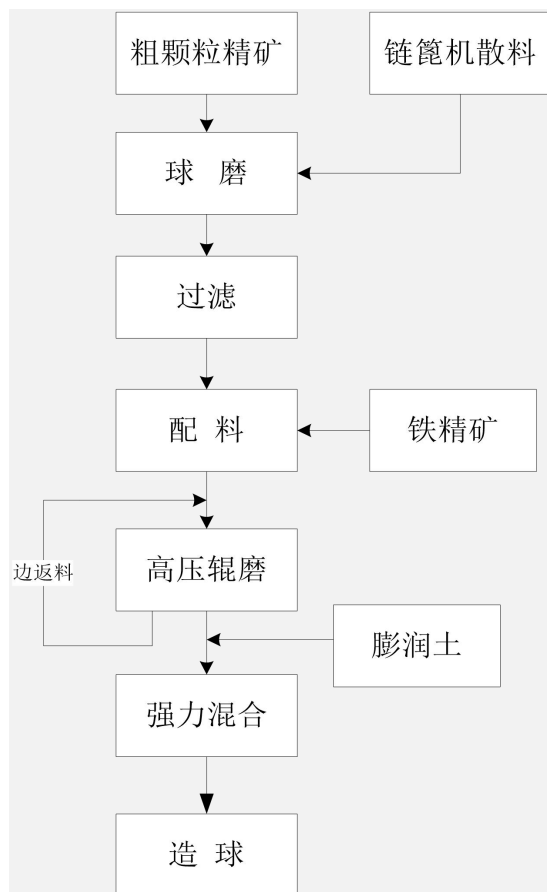


**高压辊磨作用：**能显著提高生球强度，降低膨润土用量同时改善球团的预热焙烧性能，是强化镜铁矿、硫酸渣、高结晶水锰矿粉、铬铁矿等一系列特殊球团原料球团制备的关键技术，其作用机理主要在于：

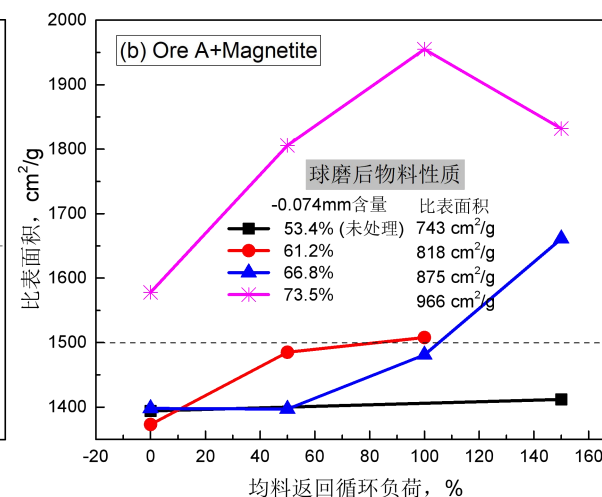
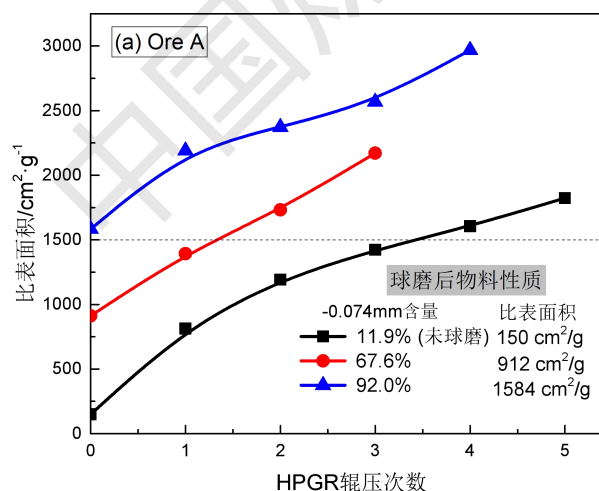
- ✓ 高压辊磨工艺使物料的微细颗粒含量明显增多，比表面积变大，改善了原料的颗粒形貌和粒度组成，使得颗粒在成球过程中堆积更加紧密，同时扩大了其在高温固结时颗粒间的（反应）接触面积，使得球团固结更加紧密；
- ✓ 高压辊磨作为一种机械活化作用能够将一部分机械能转化为自由能，通过结构的破坏如物料的非晶化，表面积、晶粒大小和强度的改变以及相位转变，内部破裂形成了大量的晶格缺陷使物料的表面活性增强，从而降低了反应所需的活化能，促进了焙烧过程中的质点迁移和连接颈的形成。

高压辊磨流程选择：开路和闭路

### 3.1 原料预处理工艺



- 武钢鄂州球团厂500万t/a 链-回生产线采用**球磨-高压辊磨联合预处理工艺**：原料适应性强，可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。
- **增设球磨段的重要性**：球磨预处理后物料的0.074mm以下宜在60%以上，比表面积在900cm<sup>2</sup>/g以上。



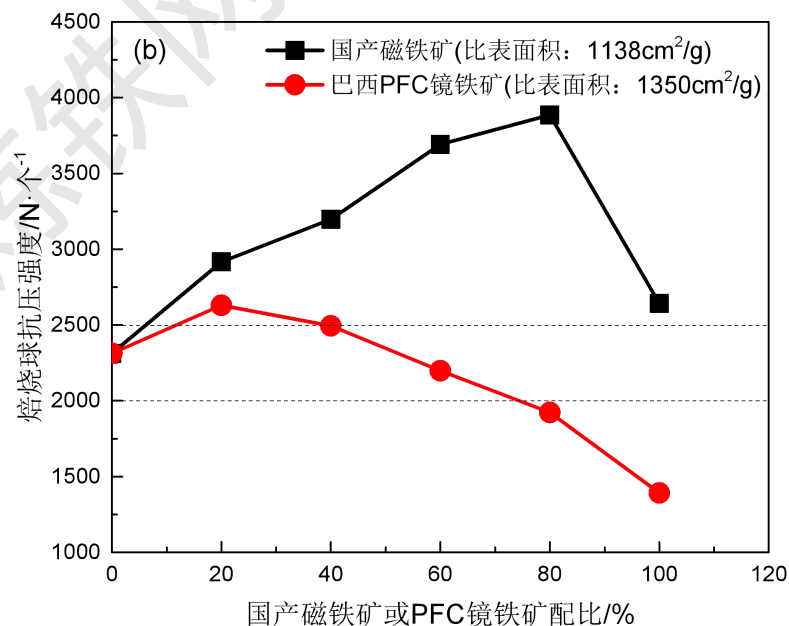
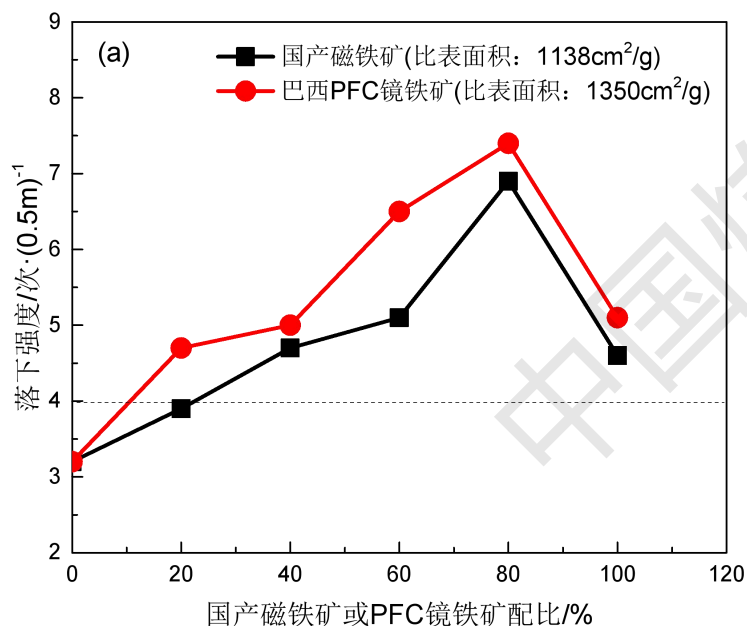
采用球磨-高压辊磨联合工艺时，湿式球磨预处理单一矿(a)和混合矿(b)的性质对高压辊磨效果的影响

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；印度Tata Steel IJmuiden 球团厂（430平米带式机，500万t/a）使用7种矿配矿；日本加古川厂（链-回工艺）使用10种矿配矿。
- **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。

## 3.2 多元优化配矿

- 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。



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)

### 3.3 新型球团粘结剂的开发与应用

几类最常见粘结剂的对比

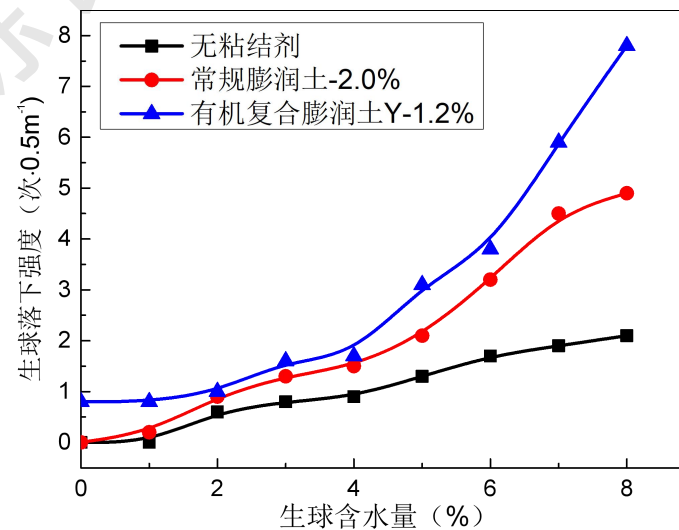
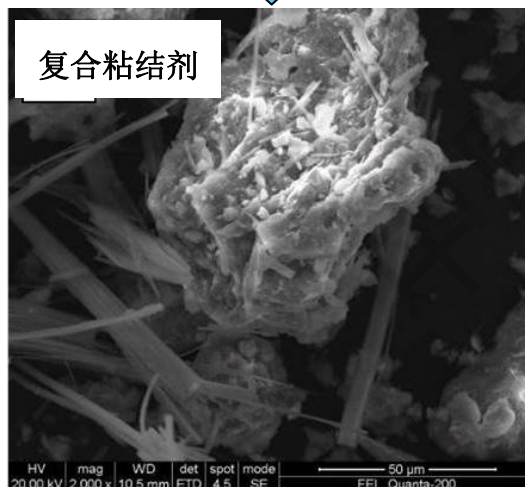
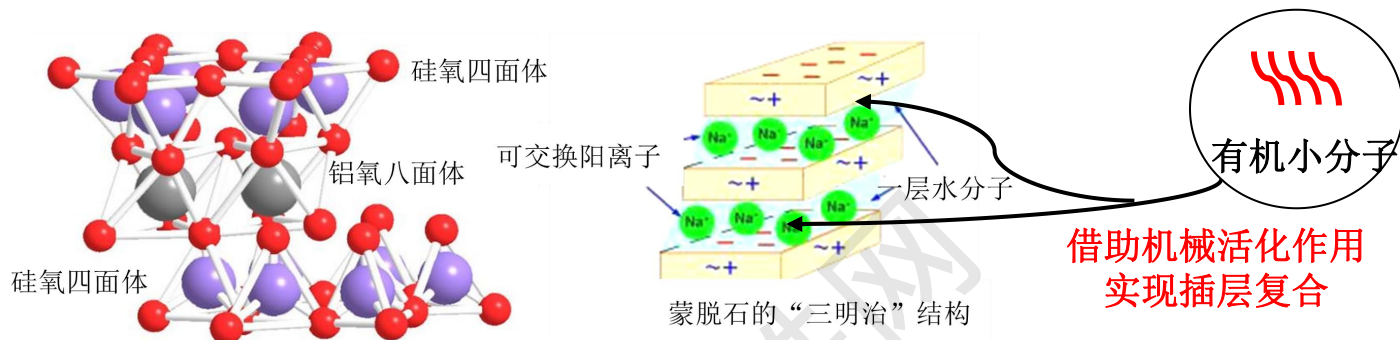
类别	粘结剂名称	一般使用量/%	优点	缺点
无机 粘结剂	膨润土	0.5%~3.0%	传统粘结剂，热稳定性高，来源广泛	用量高；降低铁品位；恶化球团的冶金性能尤其是还原性
有机 粘结剂	纤维素类(如CMC、佩利多、阿可泰)、聚丙烯酰胺等	0.025%~0.1%	用量少；高温易分解，避免铁品位的下降	合成成本高；热稳定性差，不太适用于链篦机-回转窑工艺
复合 添加剂	腐殖酸型复合粘结剂(F粘结剂、MHA)	0.25%~1%	兼有无机和有机添加剂的优势，具有粘结性强、催化的特性	对某些球团原料的适应性差；制备成本偏高
	膨润土基复合粘结剂	1.0%~1.5%	粘结剂的原料易得，制备简单、成本低	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

### 3.3 新型球团粘结剂的开发与应用



- 迄今为止，膨润土仍是球团生产中最常用的粘结剂；
- 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。美国近10%的球团厂使用了聚丙烯酰胺(PAM)等有机粘结剂。美国Cliffs公司的一条链篦机-回转窑球团生产线及Arcelor Mittal在AMEM的带式焙烧机上已成功应用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。河钢集团宣钢2016年在其100万t/a链-回生产线上进行了配加有机粘结剂的工业试验，确定最佳的粘结剂组合为：0.6%有机粘结剂+0.8%膨润土。
- 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。

### 3.3 新型球团粘结剂的开发与应用

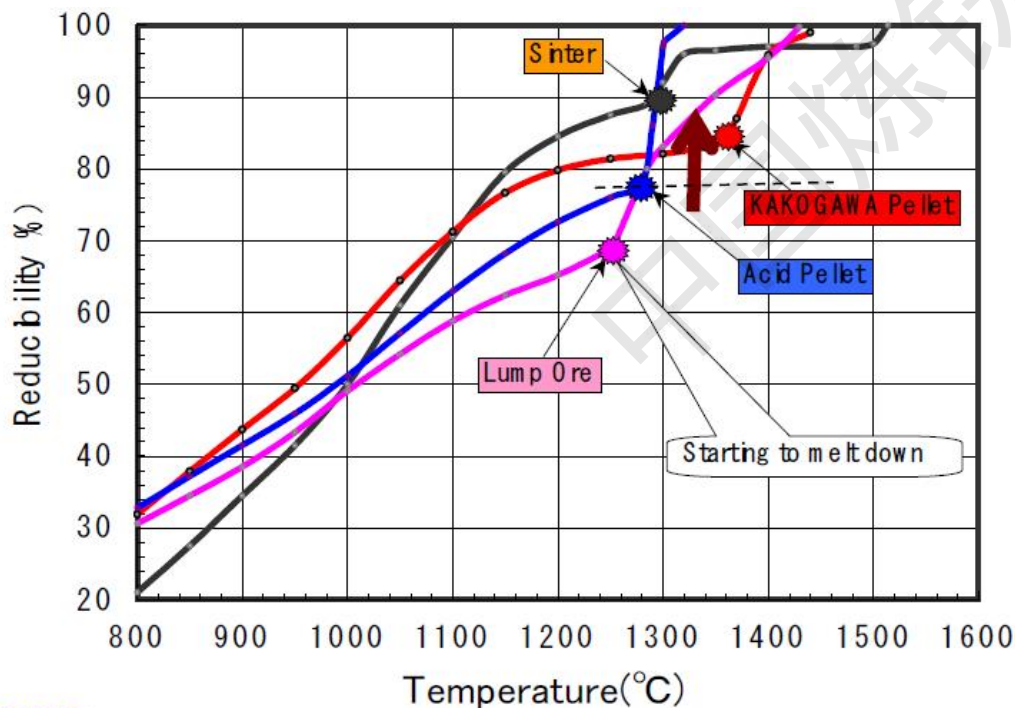


复合球团粘结剂（中南大学）的制备原理及其与常规膨润土的对比

### 3.4 生产熔剂性球团和镁质球团



□ 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。



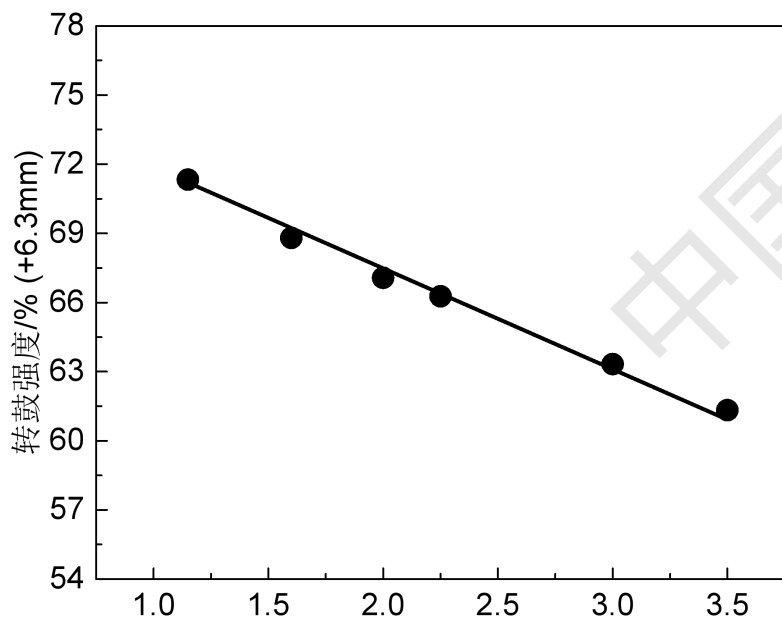
日本加古川(Kakogawa)钢厂比较了块矿、酸性球团矿、熔剂性球团及烧结矿的性能

- 熔滴之前，还原性能：烧结矿 > 熔剂性球团 > 酸性球团 > 块矿
- 滴落温度：熔剂性球团 > 烧结矿 > 酸性球团 > 块矿

### 3.4 生产熔剂性球团和镁质球团



- 上世纪70年代，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，同时能耗升高。



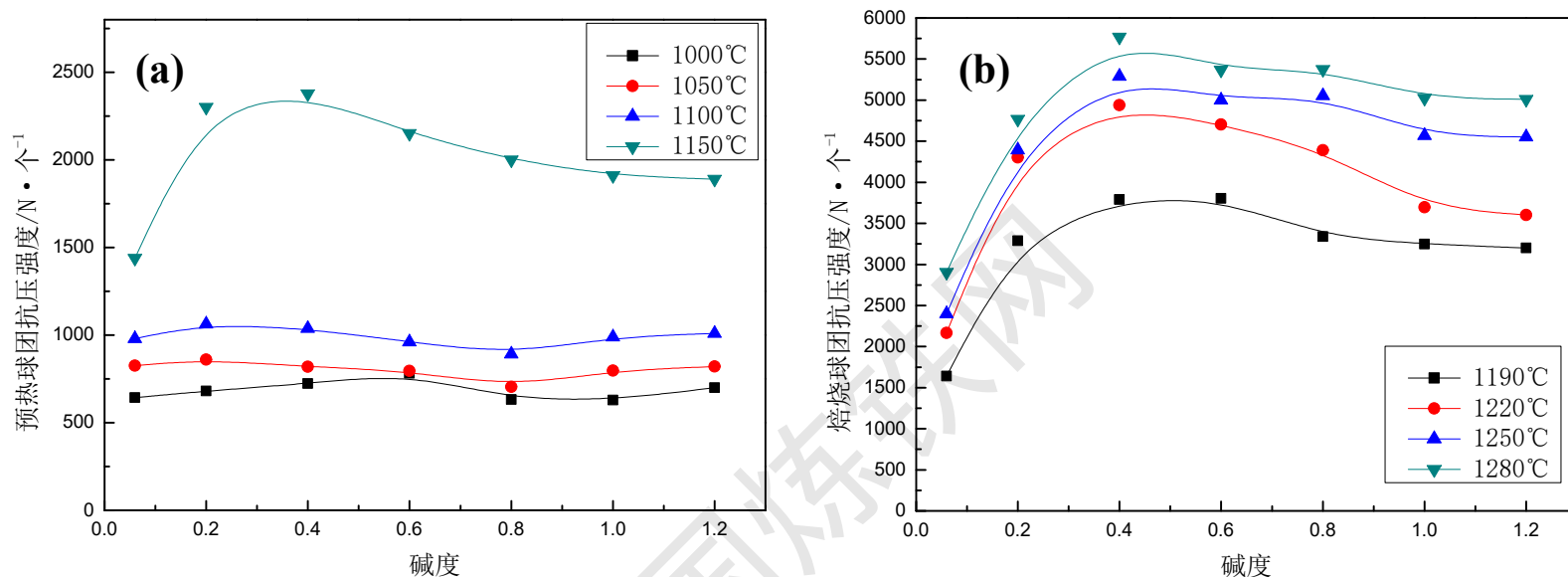
烧结矿中MgO含量/%

提高MgO含量对烧结矿转鼓强度的影响

2000年以来，国内的相关实践：

- 首钢京唐400万t/a带式机和首钢矿业200万t/a链-回工艺、宝钢湛江500万t/a链-回工艺，以及武钢、包钢等对熔剂性球团及镁质球团进行了工业试验和应用
- 首钢牵头国家科技部“十三五”重点研发专项“钢铁流程绿色化关键技术” (2017-2021)对自熔性球团制备和应用进行攻关
- 2016年12月，河钢集团组织推进“高炉全球团冶炼技术研究”重点项目

### 3.4 生产熔剂性球团和镁质球团



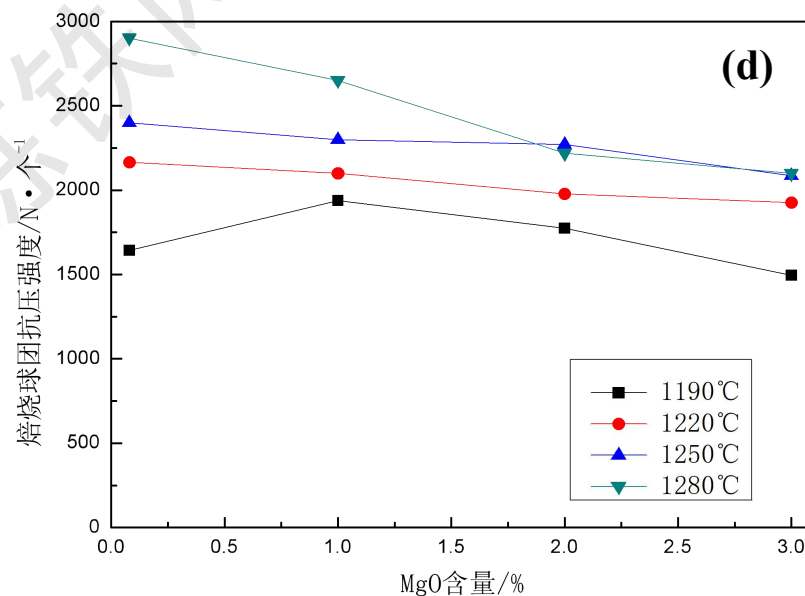
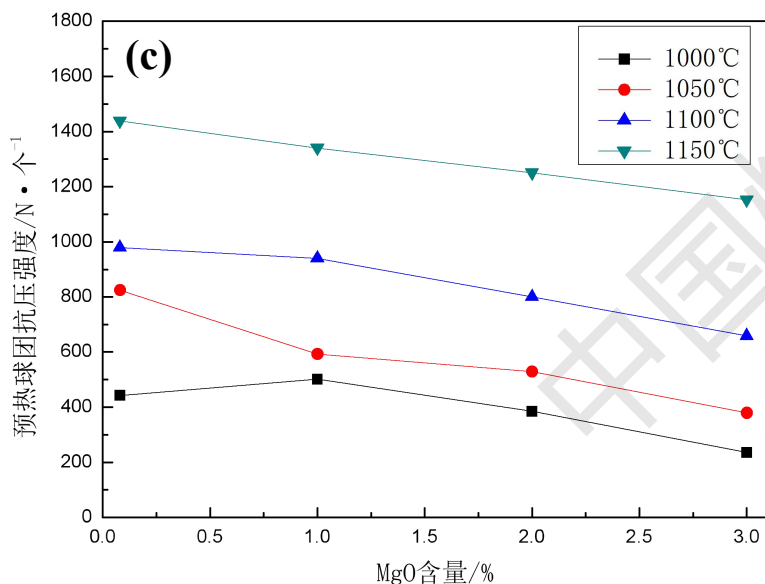
自然MgO含量条件下，球团二元碱度对100%巴西镜铁矿预热球团(a)、成品球团抗压强度(b)的影响  
( $\text{SiO}_2$ 含量: 3.0%~3.1%, 预热时间10min, 焙烧时间15min)

- 碱度对预热球团抗压强度影响不明显，但对焙烧球团抗压强度的影响较大。自然碱度0.06时，焙烧温度1280°C，焙烧球团强度才达到2900  $\text{N} \cdot \text{个}^{-1}$ 。随着碱度提高，焙烧球团抗压强度在碱度0.4时达到峰值。
- 提高碱度可降低焙烧温度。在碱度0.2，球团焙烧温度只需1190°C，赤铁矿球团抗压强度就可以达到3000  $\text{N} \cdot \text{个}^{-1}$ 以上。

### 3.4 生产熔剂性球团和镁质球团



- 预热球团和焙烧球团抗压强度均随着MgO含量的增加而降低；
- 尤其是预热球团强度下降将对链算机-回转窑工艺产生不利影响，增加结圈风险，由此带式焙烧机工艺的优势得以凸显。

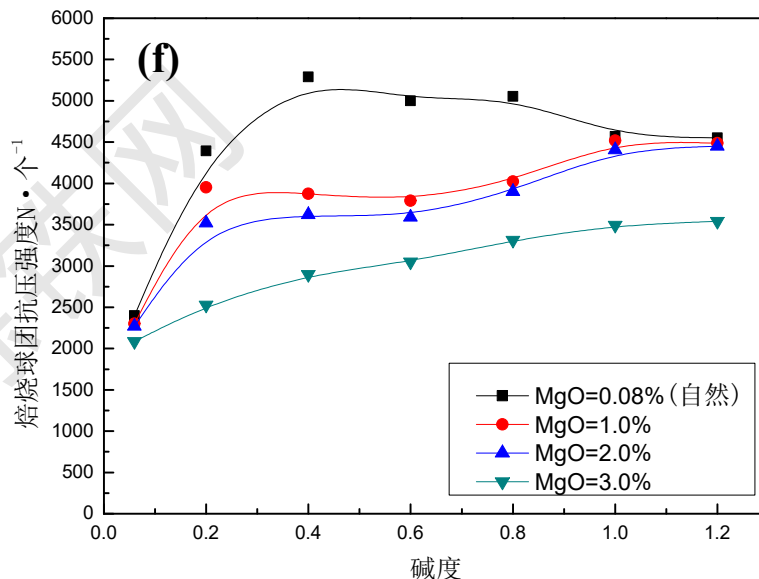
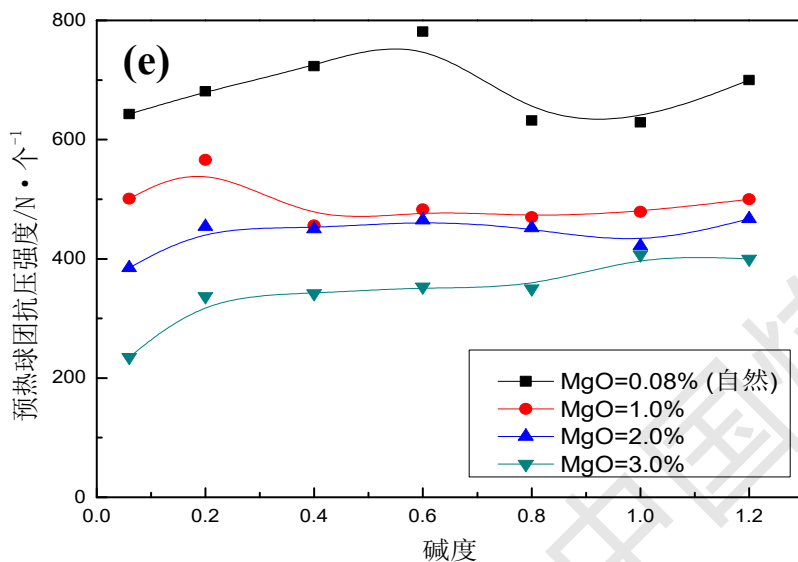


自然碱度条件下，球团MgO含量对100%巴西镜铁矿预热球团(c)、成品球团抗压强度(d)的影响  
(SiO<sub>2</sub>含量：3.0%~3.1%，预热时间10min，焙烧时间15min)

### 3.4 生产熔剂性球团和镁质球团



■ 同时提高碱度和氧化镁含量，预热球团和焙烧球团抗压强度均下降

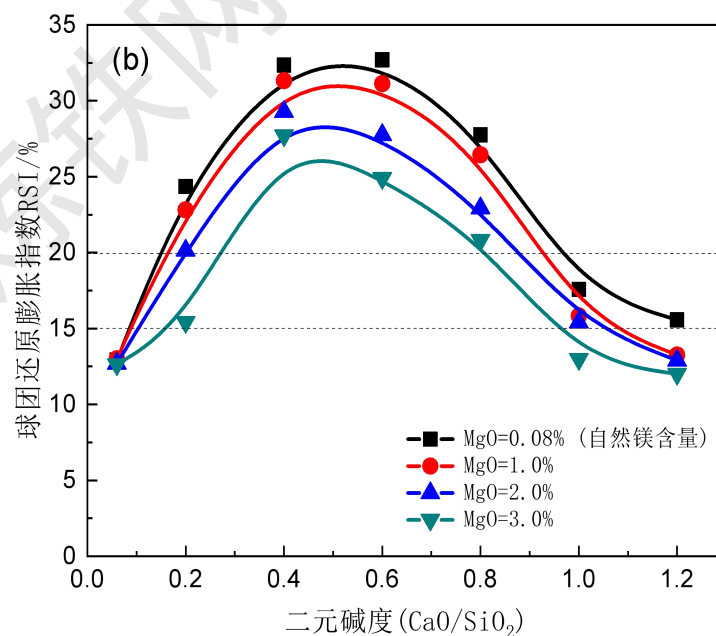
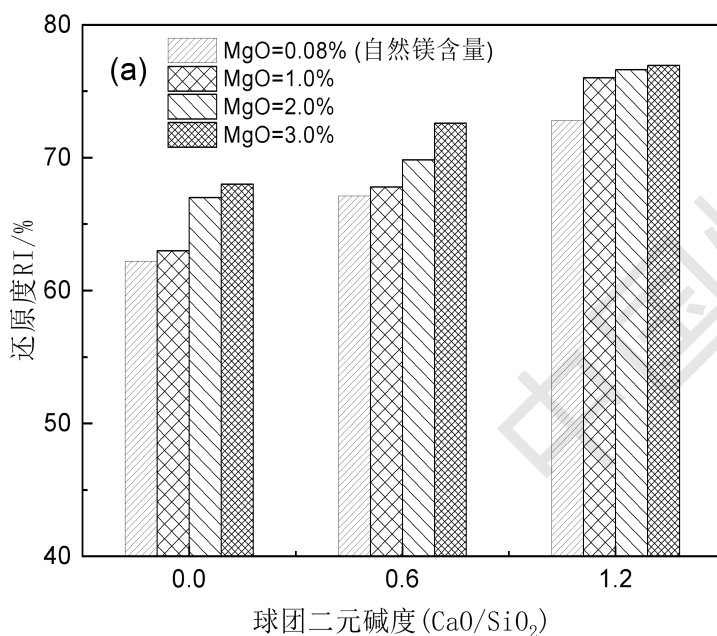


球团MgO含量对100%巴西镜铁矿预热球团(e)、成品球团抗压强度(f)的影响  
(SiO<sub>2</sub>含量: 3.0%~3.1%, 预热时间10min, 焙烧时间15min)

- 固定MgO含量时，碱度对预热球团抗压强度影响不大，但显著提高焙烧球团强度。
- 固定碱度下，MgO含量增加，预热球团抗压强度降低。与自然碱度时的规律相一致。

### 3.4 生产熔剂性球团和镁质球团

- 提高球团碱度和MgO含量，成品球团还原性升高；提高碱度，成品球团矿还原膨胀呈现极值变化规律，存在适宜的碱度范围 $R_2 < 0.3$ 或 $R_2 > 0.8$ 。
- 提高MgO含量，有利于抑制球团矿还原膨胀。



球团二元碱度和MgO含量对100%巴西镜铁矿球团还原性(a)和还原膨胀性能(b)的影响 (SiO<sub>2</sub>含量: 3.0%~3.1%)

### 3.4 生产熔剂性球团和镁质球团



- 提高碱度和MgO含量，成品球团还原后强度升高，熔滴性能改善。
- 综合来看，球团MgO含量宜  $\leq 2.0\%$

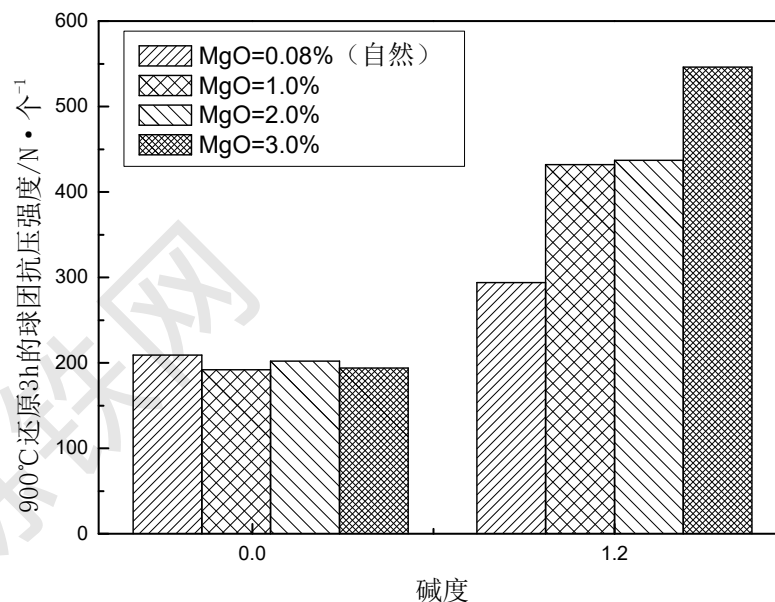


图 900°C等温还原3h后的球团抗压强度

碱度及MgO含量对赤铁矿球团高温软熔性能的影响/°C

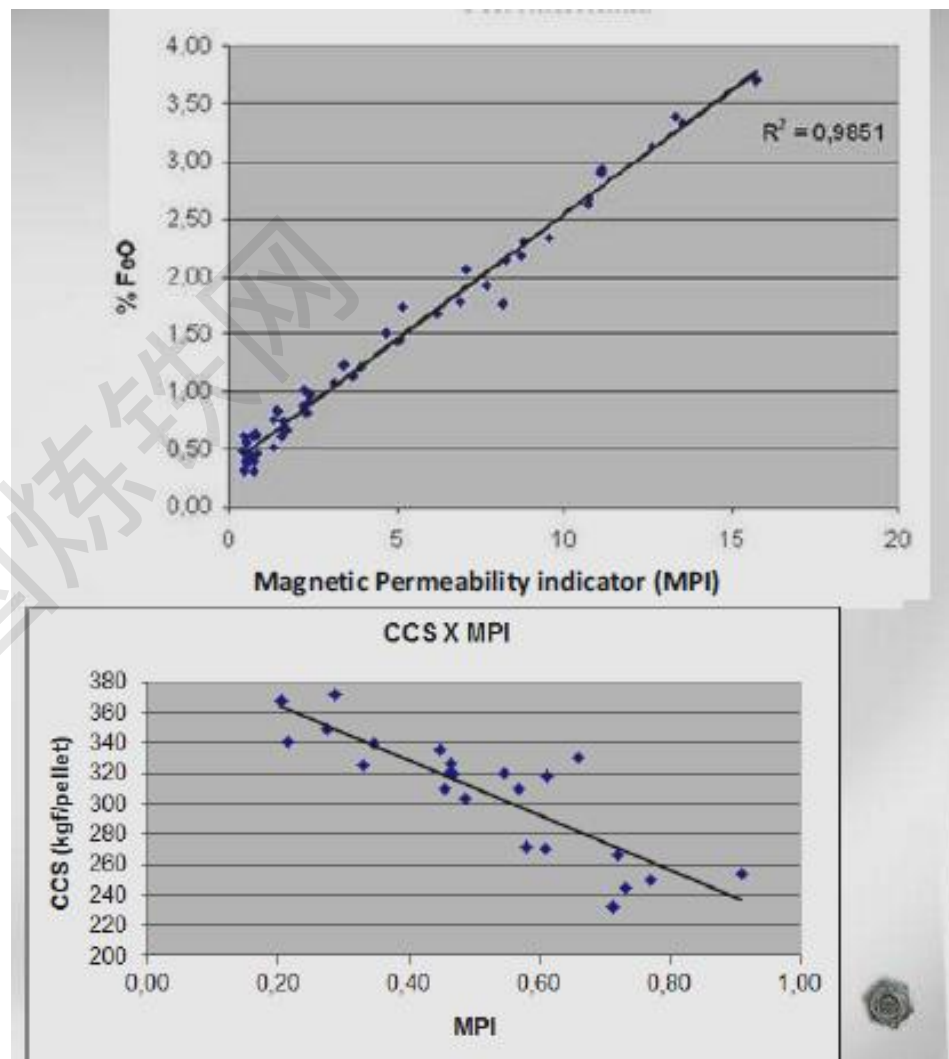
碱度	MgO /%	软化开始 $T_{a-10\%}$	软化终了 $T_{s-40\%}$	熔融开始 $T_m$	开始滴落 $T_d$	软化区间 $\Delta t_{sa}$	熔融区间 $\Delta T_{dm}$	软熔区间 $\Delta T_{ds}$
0.08	0.08	1009	1099	1230	1272	90	42	263
1.2	0.08	1034	1106	1262	1299	72	37	265
1.2	1.0	1072	1170	1297	1319	98	22	247
1.2	2.0	1079	1167	1301	1326	88	25	247
1.2	3.0	1072	1157	1328	1361	85	33	289

### 3.5 预热和提高球团强度

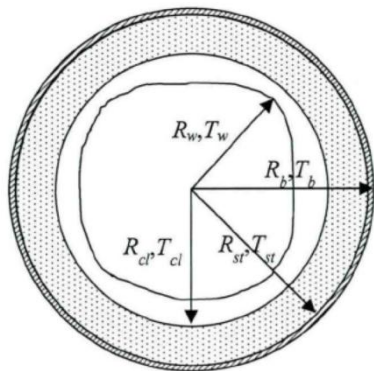


#### FeO含量与球团抗压强度的关系

- 球团矿中磁铁矿(FeO)与球团抗压强度、焙烧制度及成分有关
- 揭示焙烧球团磁性（磁铁矿含量）与其抗压强度的关系
- 开发磁通量（MPI）检测仪，通过MPI检测，预测和控制成品球团矿抗压强度
- 在年产825万吨球团厂获得应用



### 3.6 回转窑结圈预测



$$l_{rf} = R_{cl} - \exp \left\{ \left[ \left( T_w + \frac{\lambda_{rf0}}{\beta_{rf}} \right)^2 - \left( T_{cl} + \frac{\lambda_{rf0}}{\beta_{rf}} \right)^2 \right] \cdot \frac{\pi \beta_{rf}}{Q} \cdot R_{cl} \right\}$$

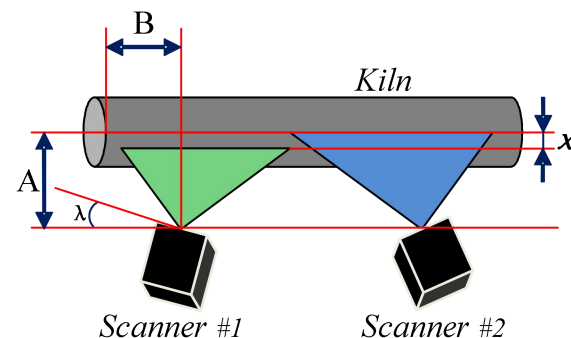
$T_b$  窑外壁温度,

$T_{cl}$  耐火材料与结圈物结合处的温度, 通过钢板的导热系数与耐火材料的导热系数求得,

$T_w$  窑内壁的温度

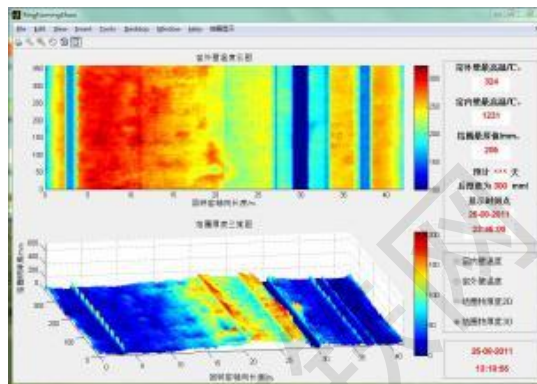
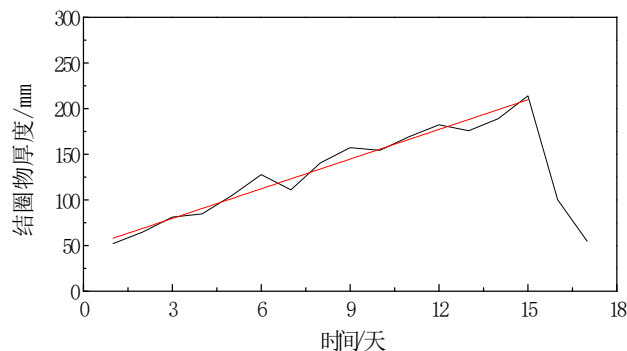
$\lambda_{rf}$  结圈物的导热系数,

$l_{rf}$  结圈物厚度的数值

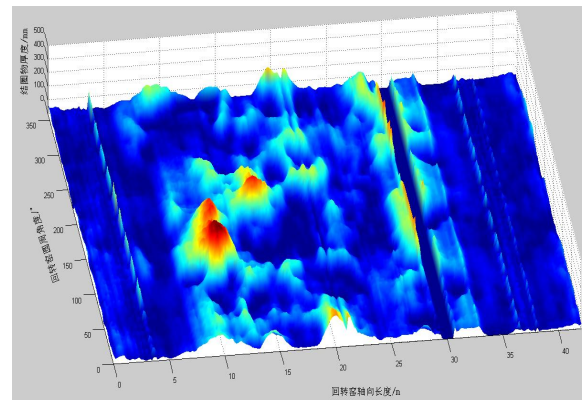


- ✓ 回转窑外表面的温度受窑内结圈物影响, 通过回转窑外壁温度红外连续的三维测定, 建立窑内结圈物厚度与分布数学模型, 可以有效的预测窑内结圈物厚度与分布, 从而实现结圈物生长厚度预测与可视化。
- ✓ 根据扫描距离与扫描角度之间的关系, 计算出补偿温度, 然后与红外探测器测得温度值相加得到轴向温度。基于MATLAB程序, 对结圈物厚度的数学模型进行程序化实现, 结合窑外表面温度的三维测定结果, 实现了窑内结圈物厚度分布的数值化

### 3.6 回转窑结圈预测



回转窑结圈厚度生长预测系统

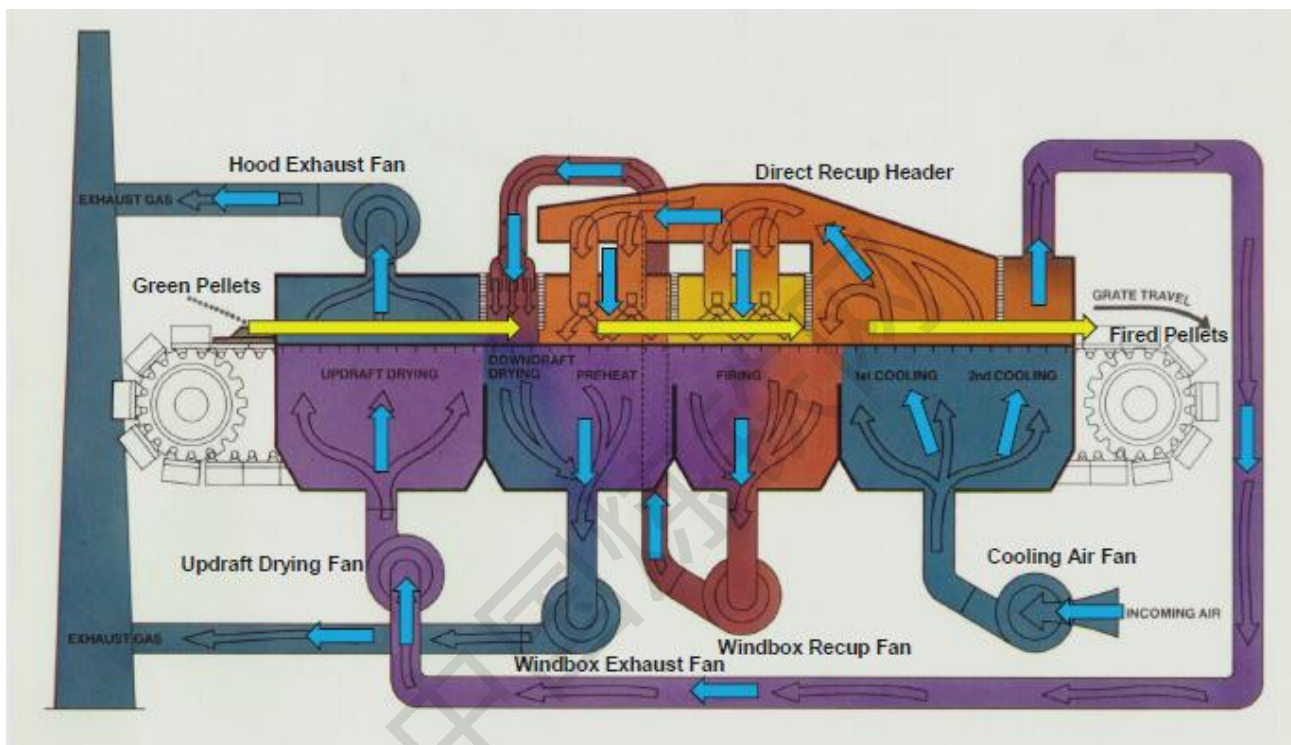


回转窑结圈厚度3D图

- ✓ 通过结圈历史厚度分析，利用结圈物厚度分布数值化结果，结合窑体轴向与周向坐标，**实现了回转窑内结圈物厚度的三维透视化**
- ✓ 在稳定生产的情况下，氧化球团回转窑内结圈物的生长基本呈**线性生长模式**，通过开发的回转窑结圈厚度生长预测系统，实现窑内“黑箱”系统透视化，**预测出结圈物生长趋势，至少提前7天预测出结圈物生长到一定厚度所需的天数**，这对指导及时处理初期结圈物、促进大型回转窑长期稳定运行有重要的现实意义。

## **4. 带式机焙烧球团技术**

## 4.1 带式焙烧机的一般特点



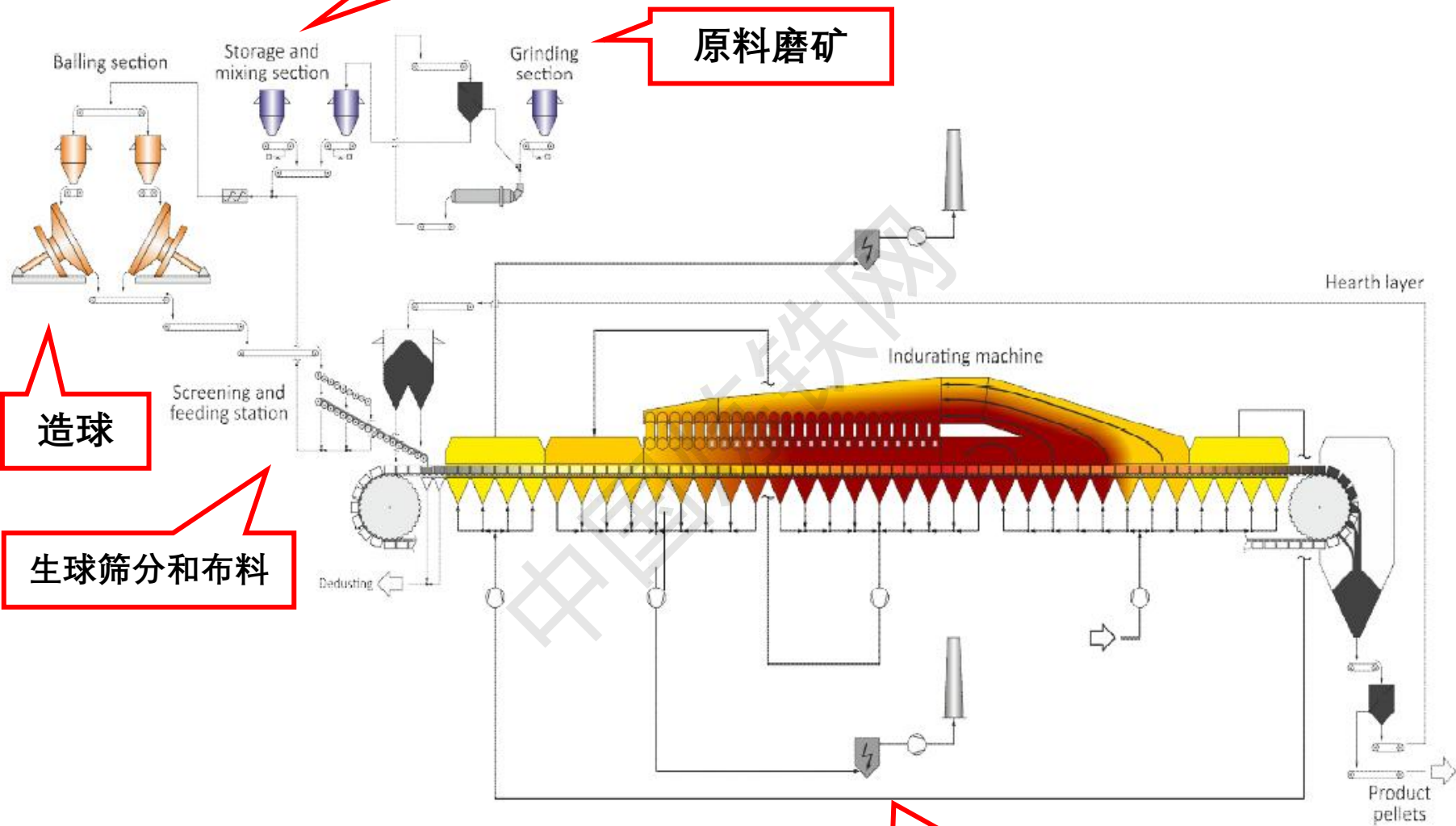
- 干燥、预热、焙烧、冷却均在一台设备上完成
- 设有铺底料、边料，料层厚度在300-500mm
- 烟气逐级循环利用，能耗低，排放少
- 球团相对静止（对预热球强度无要求，降低粘结剂用量），粉末产生少，无结圈，对铁原料适应性强（全赤铁矿、混合矿、磁铁矿、褐铁矿；铬铁矿；固废资源）
- 设备大型化、自动化程度高、作业率高

配矿混匀

原料磨矿

造球

生球筛分和布料

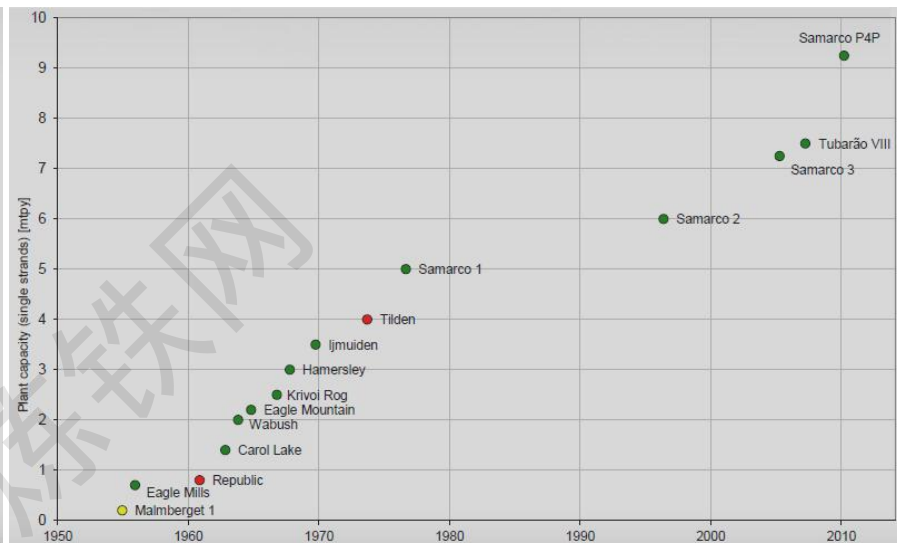


干燥、预热、焙烧、均热、冷却

## 4.2 大型带式焙烧机实例：SAMARCO 4球团厂



### SAMARCO 4: Pelletizing plant complex



#### Technical Key Data

Capacity	9 250 000 t/a
Availability	353 d/a
Grate Size	816 m <sup>2</sup>
Grate Factor	32.1 t/m <sup>2</sup> d

#### Commercial Key Data

Total Samarco investment	3.3 BUSD
Outotec contract value	427 MUSD
Execution Time	31 months

**SAMARCO球团生产引领带式机球团大型化**

## 4.2 大型带式焙烧机实例：印度TATA钢厂600万吨带式机



设计能力 (t) 6,000,000

日历工作日 (dpy) 330

面积 (m<sup>2</sup>) 768

利用系数 (t/d m<sup>2</sup>) 23.68

### 干燥与磨矿

干燥机 (Nos) 2

干燥机燃料(-- ) BF gas

球磨机 (tph) 433 \* 2 Nos

球磨规格(Ø\*L) 6.0m\*12.2m

造球盘 (Nos) 10

尺寸(Dia) (m) 7.5

筛分 (-- ) 辊筛

Coke oven gas (Kcal/Nm<sup>3</sup>) 4000

Blast furnace gas (Kcal/Nm<sup>3</sup>) 850

Coal tar (cal/kg) 8700

### 带式机参数

总面积 (m<sup>2</sup>) 192\*4 = 768

料层高度 (mm) 400

煤嘴 (Nos) 16 焦炉煤气 24个焦油

鼓风段 (m<sup>2</sup>) 60 7.81%

抽风段 (m<sup>2</sup>) 84 10.94%

预热段 (m<sup>2</sup>) 168 21.88%

焙烧段 (m<sup>2</sup>) 216 28.13%

冷却段 (m<sup>2</sup>) 240 31.25%

### 工艺特点：

- 世界首个使用焦油煤嘴
- 印度最长的带式机（192m），基准是Essar (Paradeep, India): 188m
- 产能 6mtpa 带式机，使用干式球磨工艺
- 使用风梁进行耐材散热

## 4.2 大型带式焙烧机实例：印度TATA钢厂600万吨带式机



球团矿产品性能与技术指标（不同类型球团产品）

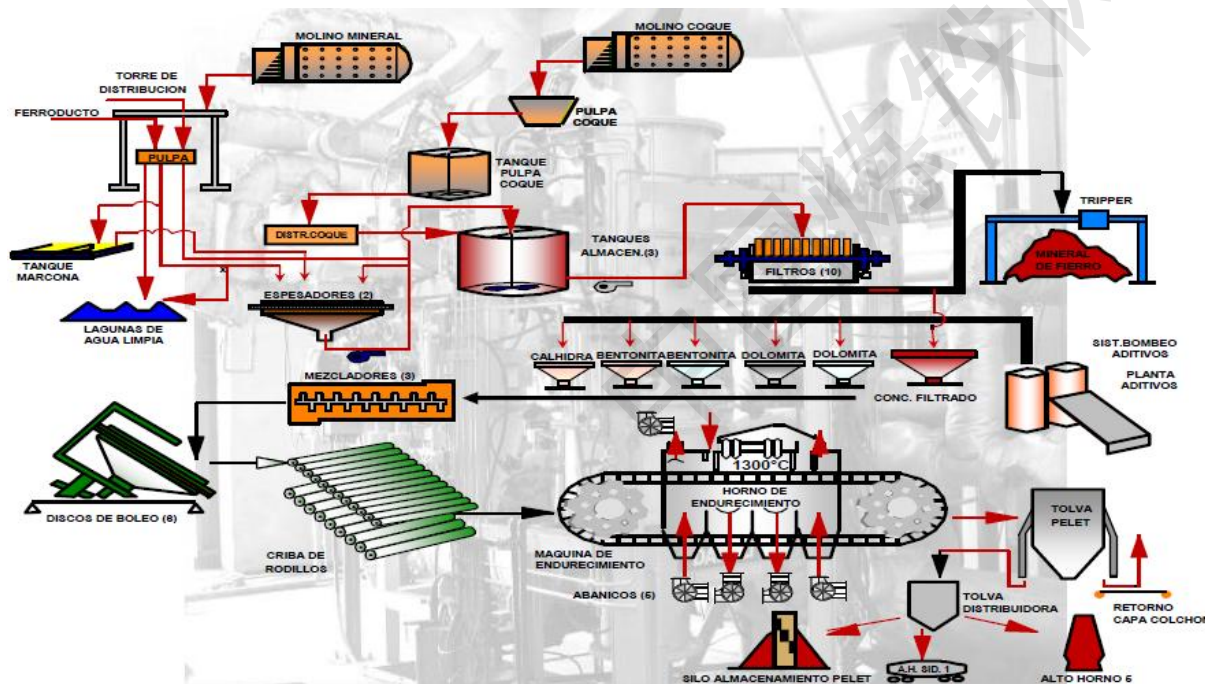
			Olivine flux	Limestone flux	Limestone flux (more)	Olivine + Limestone
Chemistry	CaO	(%)	0.1	0.4	0.8	0.7
	MgO	(%)	0.9	0.2	0.2	0.5
	CaO/SiO <sub>2</sub>	(ratio)	0.02	0.2	0.4	0.25
Feed	Carbon	(%)	1.1	1.2	1.2	1.1
	Bentonite	(%)	0	0.36	0.42	0.4
	Blaine number	cm <sup>2</sup> /gm	3232	3140	3262	3000
Pellet Quality	Mean size	(mm)	12.6	11.8	12.4	12
	Tumbler index	(%)	88	92	93	94
	Abrasion index	(%)	10	6.3	6	5
	Avg CCS	(kg/P)	135	185	216	221
	Swelling index	(%)	18	14	17	16
	RDI	(%)	35	6	4	3
Others	Feed rate	(tph)	425	681	795	870
	Productivity	(t/m <sup>2</sup> /d)	14	25	27	26
	Heat supply	(MJ/t)	1060	960	980	915

915MJ/t=  
31.3kg.e/t

## 4.2 大型带式焙烧机实例：墨西哥综合钢厂AHMSA 球团厂



墨西哥综合钢厂 AHMSA ( Altos Hornos de Mexico ) 球团厂 1984 年投产，设计能力年产 300 万吨熔剂性球团



### 球团质量指标要求

化学成份：

- 62-63.7%Fe
- 3.7-4.3%CaO
- 1.1%MgO
- 1.2-3.2%FeO
- R2=1.0-1.16

物理性能：

- TI=93-95.13%
- AI=4.25-6.5%
- CCS=2560N/P

## 4.2 大型带式焙烧机实例：墨西哥综合钢厂AHMSA 球团厂



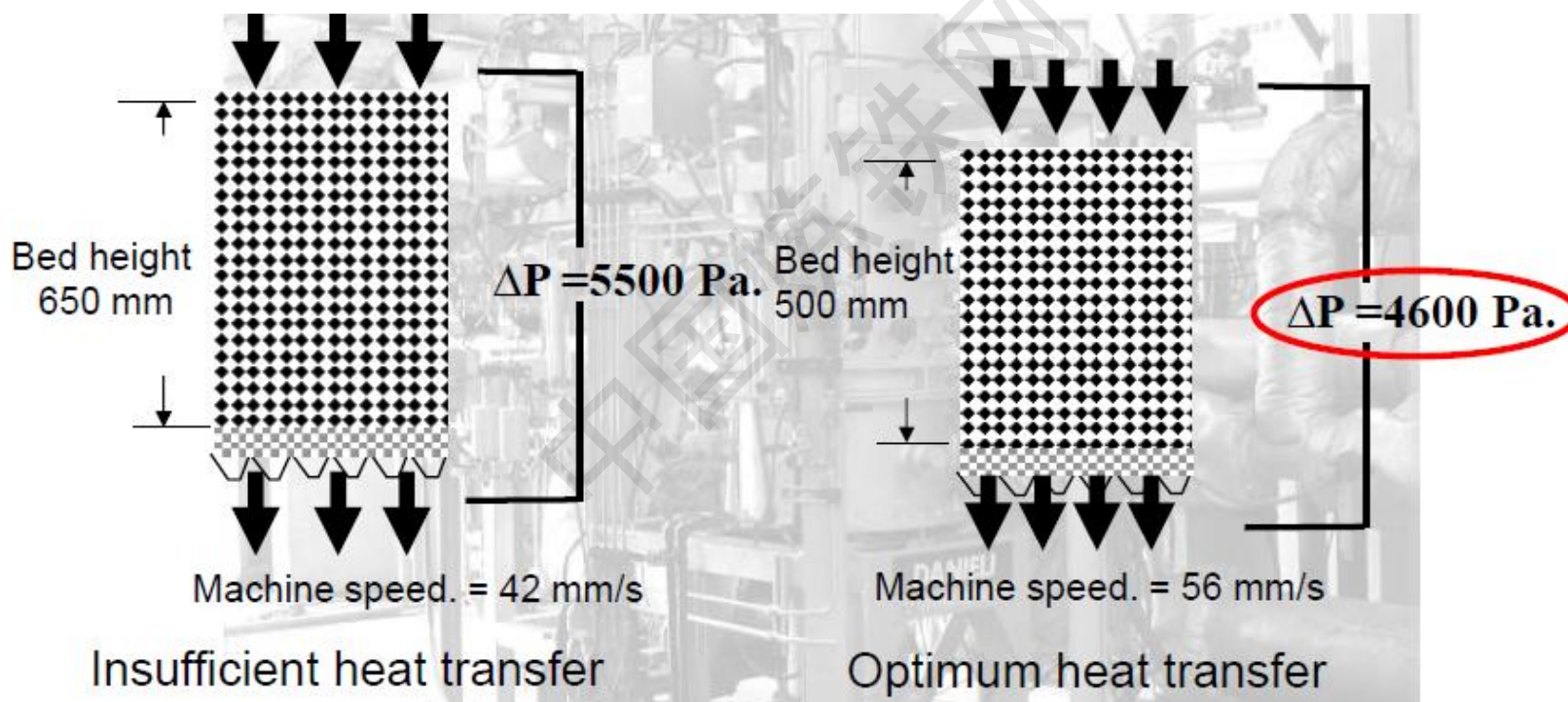
**原料优化：**铁精矿品种：磁铁矿+赤铁矿，优于100%磁铁矿  
 添加剂：3.95%白云石，2.1%石灰石，0.5%膨润土，0.8-1.2%焦粉

DATOS	HERCULES CON MINERAL MAGNETICO					
	1610 PG	1810 PG	1710 PG	1810 PG	1810 PG	2010 PG
<b>MINERAL</b>						
Hercules	77%	77%	77%	77%	77%	77%
Durango	6%	6%	6%	6%	6%	6%
Imp. Brasil	0%	0%	0%	0%	17%	0%
Imp. Magnetation	17%	17%	17%	17%	0%	17%
<b>ADITIVOS</b>						
Dolomita	3.95%	3.95%	3.95%	3.95%	3.90%	3.95%
Calhidra	2.10%	1.60%	1.85%	1.55%	1.40%	1.00%
Bentonita	0.50%	0%	0.50%	0.50%	0.50%	0.50%
Coque	0.82%	0.82%	1.20%	0.86%	0.82%	0.89%
<b>PELET VERDE</b>						
% H2O	9.50	9.50	9.85	9.00	9.25	9.50
% C.Fijo	0.70	0.70	1.02	0.73	0.70	0.76
R.C.Humedo	2.40	2.07	2.09	2.05	2.03	1.82
R.C. Seco	4.40	4.28	4.18	4.28	4.69	4.36
# Caldas	6	6	12	6	10	7
<b>PELET PRODUCTO</b>						
% SiO2	3.67	3.58	3.82	3.79	2.95	3.89
% Al2O3	0.67	0.74	0.74	0.69	0.74	0.82
% CaO	4.27	3.89	4.20	4.10	3.70	3.69
% MgO	1.06	1.10	1.05	1.10	1.10	1.10
% P	0.118	0.115	0.123	0.121	0.119	0.129
% MnO	0.22	0.21	0.21	0.22	0.18	0.22
% TiO2	0.35	0.30	0.32	0.30	0.34	0.33
% FeT	62.53	63.52	61.94	62.33	63.70	62.51
% Fe++	6.12	2.46	3.16	3.00	1.20	2.18
% SiO2	0.007	0.003	0.029	0.005	0.005	0.004
IB2	1.16	1.09	1.10	1.08	1.25	0.95
I. Tumbler	92.90	93.80	93.74	94.69	92.92	95.13
I. Abrasion	6.50	5.85	5.84	4.34	6.73	4.25
R. Compresion - S	198	188	144	181	256	217
R. Compresion - M	180	187	142	131	246	263
R. Compresion - I	125	123	124	140	221	190
<b>DATOS PLANTA</b>						
Factor Parrilla	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0
Dias op. / Ano	339	339	339	339	339	339
Ton / Dia	13,456	13,456	13,456	13,456	13,456	13,456
MMTPA	4.56	4.56	4.56	4.56	4.56	4.56

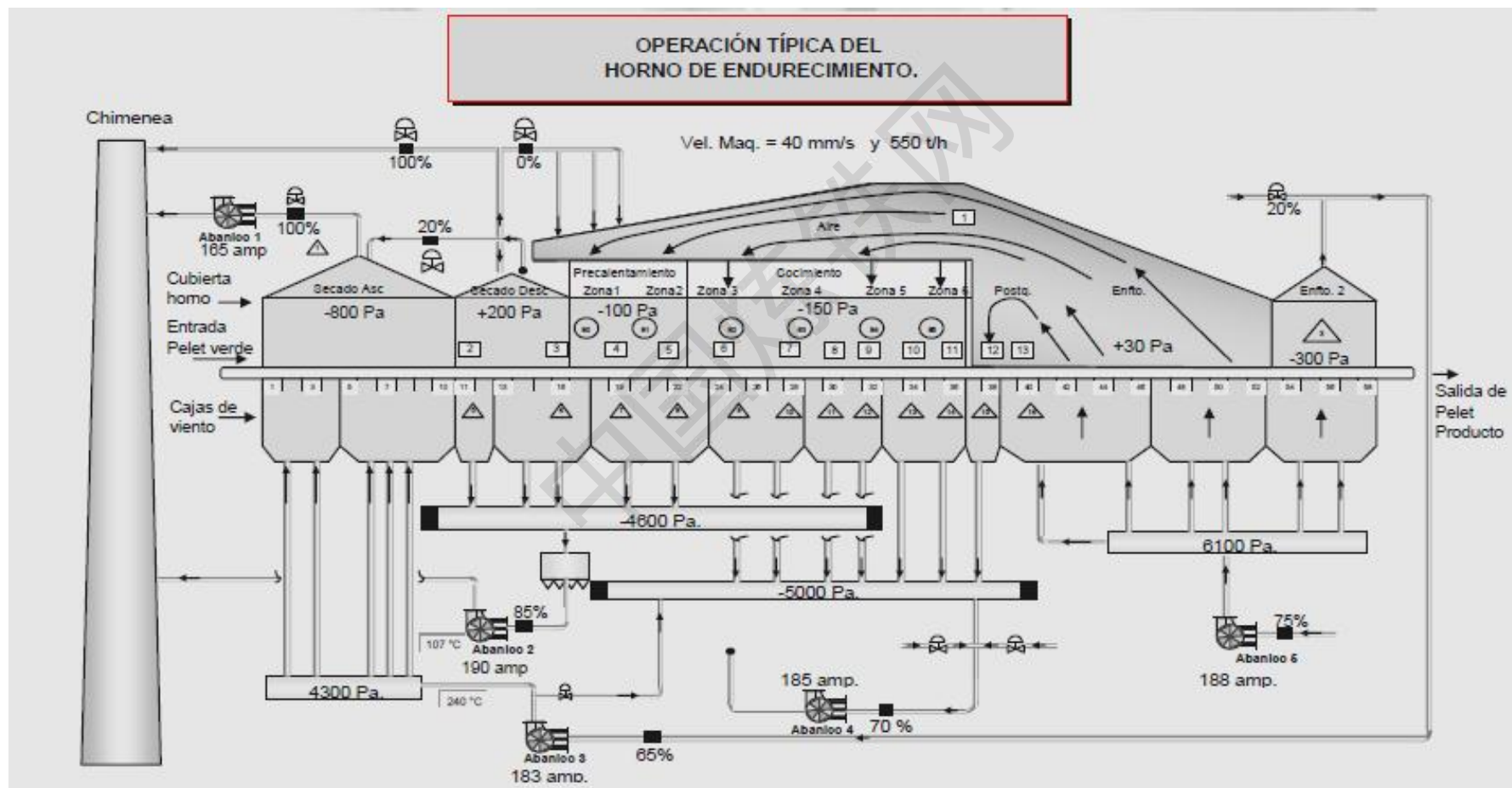
## 4.2 大型带式焙烧机实例：墨西哥综合钢厂AHMSA 球团厂



**高料层焙烧：**没有对现有风机进行更新，料层高度达到 500 mm左右



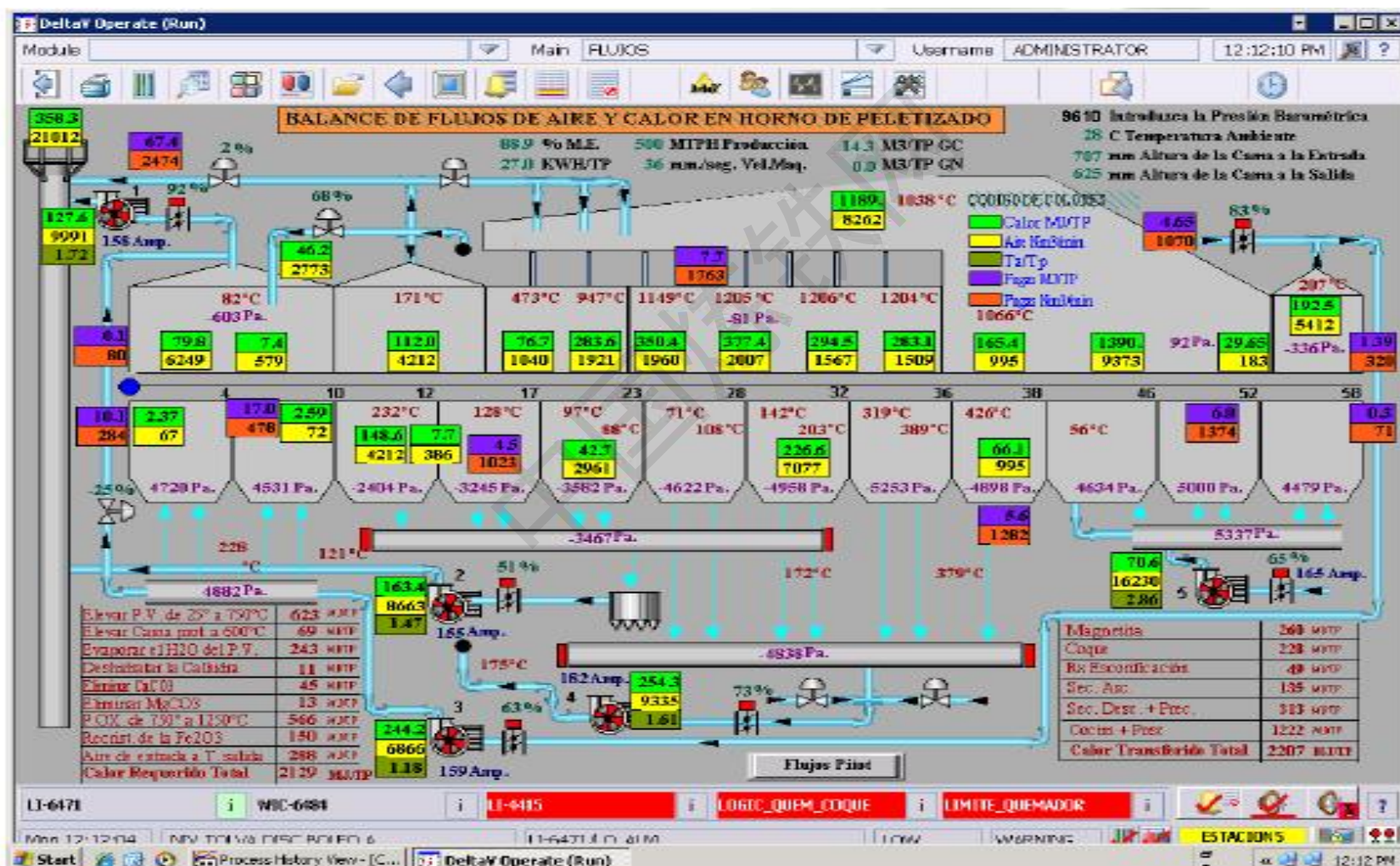
## 带式机气流走向及压力分布



## 4.2 大型带式焙烧机实例：墨西哥综合钢厂AHMSA 球团厂



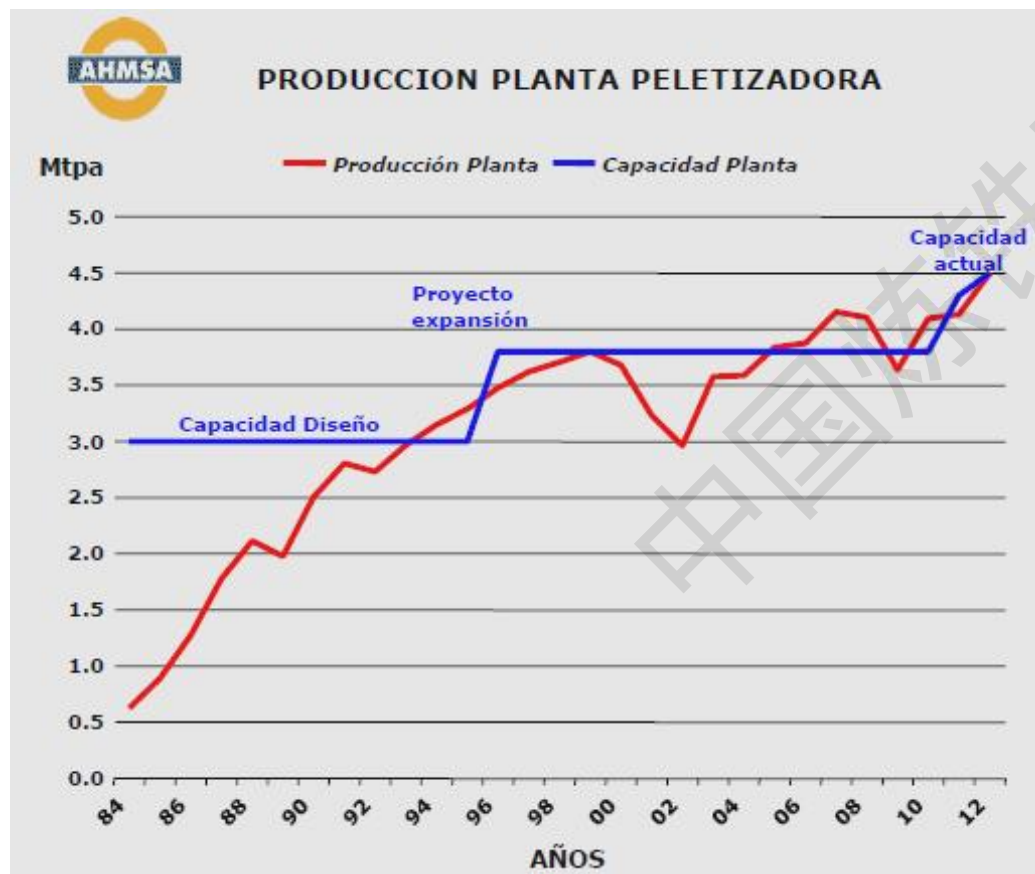
### 温度分布优化



## 4.2 大型带式焙烧机实例：墨西哥综合钢厂AHMSA 球团厂



### 球团矿产量增长情况



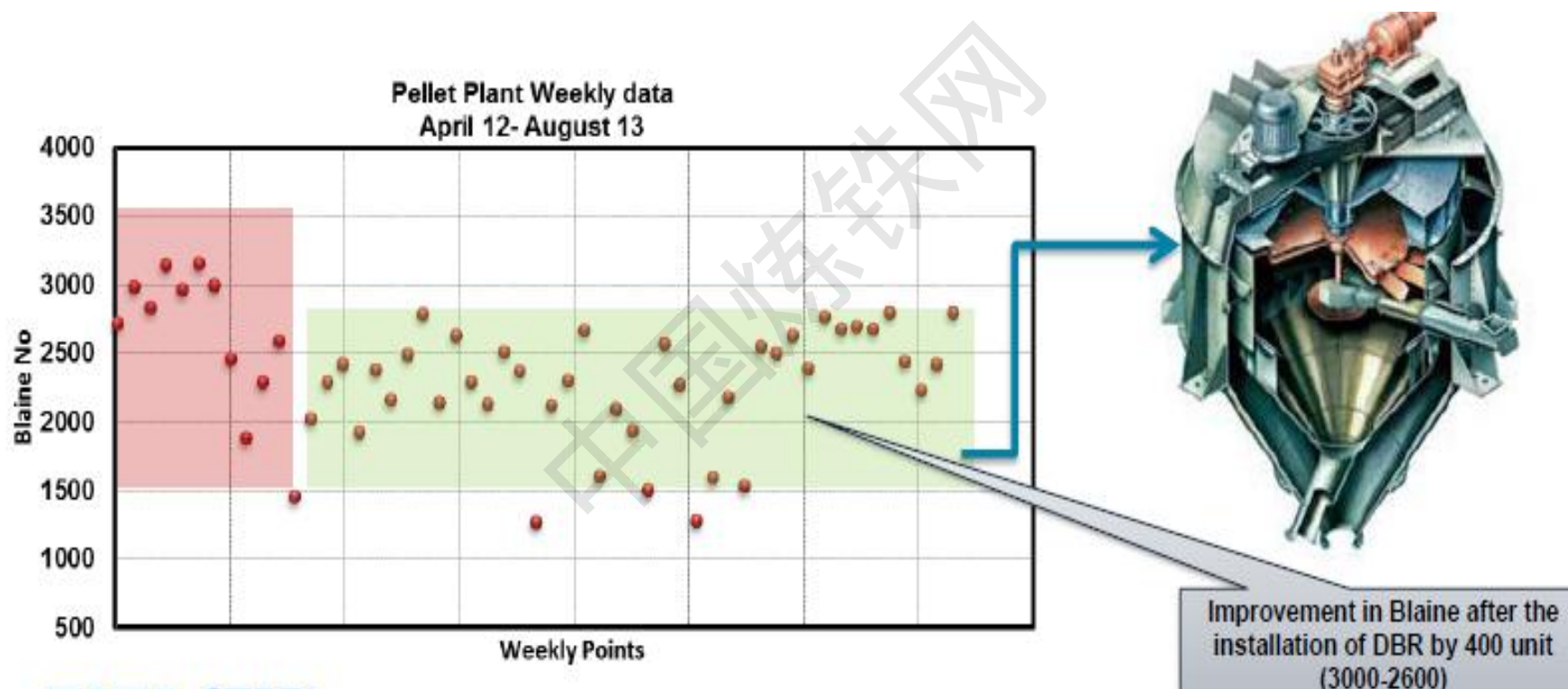
AHMSA Pelletising plant Electrical Energy Consumption		
Year	Specific consumption	% saving
2009	52.76 kWh/t	
2010	47.10 kWh/t	10.7%
2011	46.94 kWh/t	11.0%
2012	44.08 kWh/t	16.5%

- 设计产量300万吨
- 2007年达到415万吨
- 2012年达450万吨，利用系数由27.1 增加到 29.2 t/m<sup>2</sup>·d
- 电耗降低16.5%

### 4.3 强化带式焙烧技术: (1) 比表面积控制方法

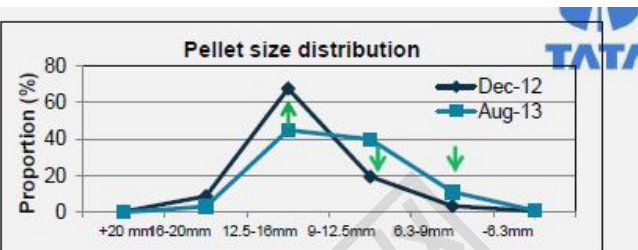
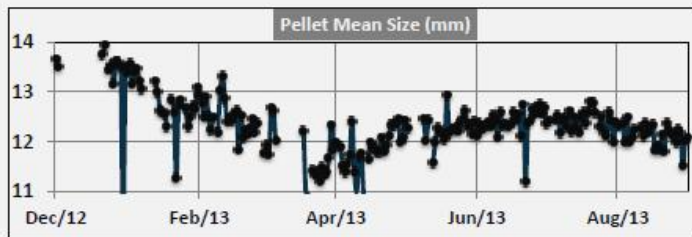


安装**DBR分级机**，强化干式分级，控制比表面积在2000-2500cm<sup>2</sup>/g

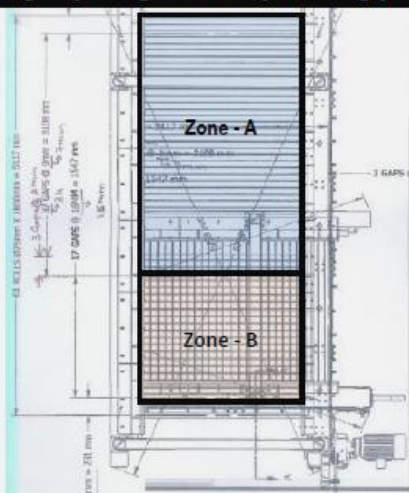


印度TATA钢厂600万吨带式机球团

## 4.3 强化带式焙烧技术：(2) 生球平均粒度控制



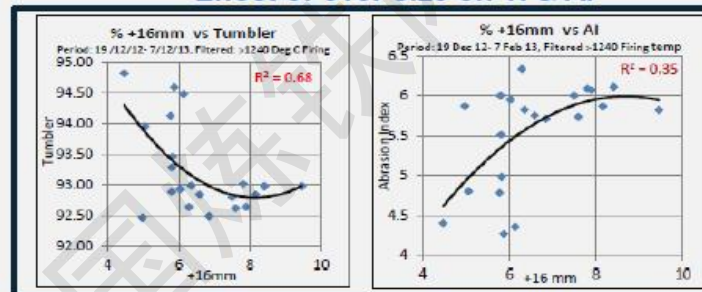
Strengthening Daily management activity for roller gap adjustments



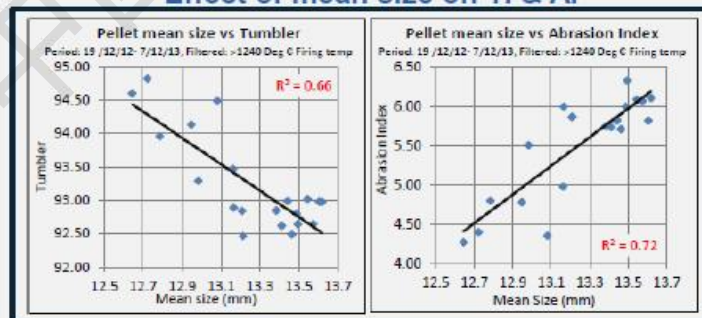
- 34 gaps adjusted from 9mm to 7mm and 3 gaps from 9mm to 2mm - Zone A
- 17 gaps adjusted from 16mm to 15mm - Zone B

TATA STEEL

Effect of over size on Ti & AI



Effect of mean size on Ti & AI



+16mm增加,  
TI下降, AI  
升高

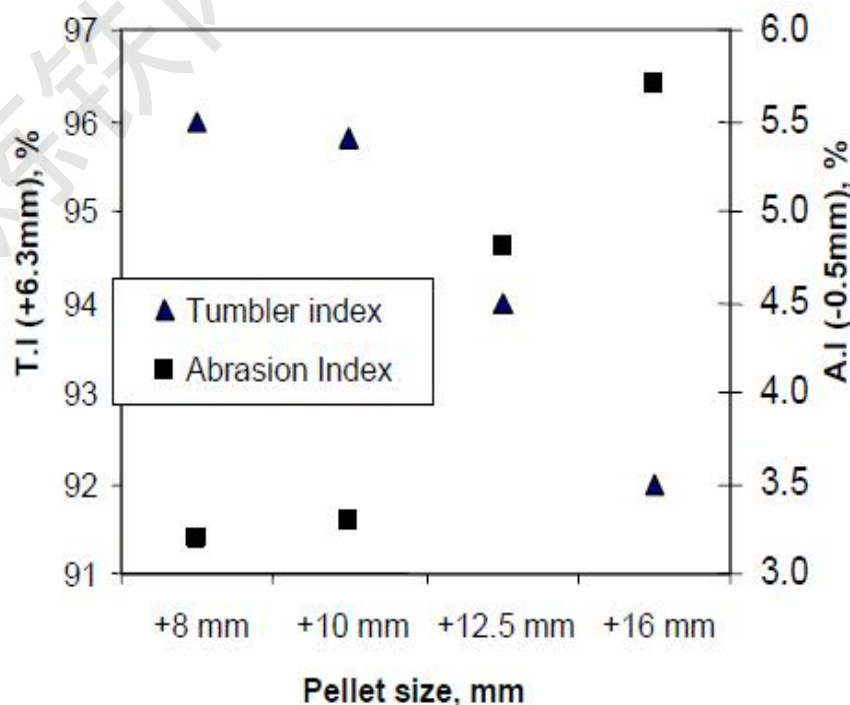
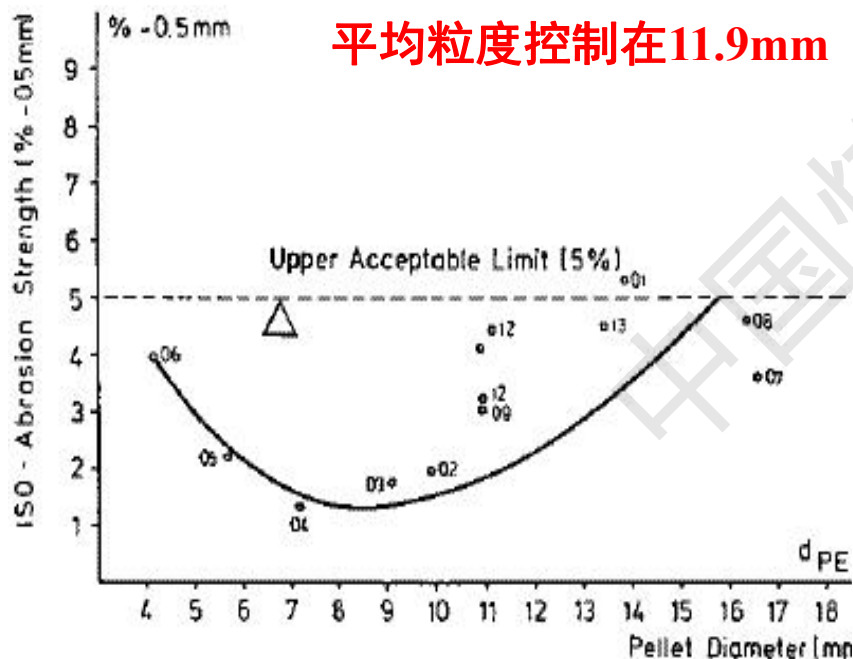
平均粒度增  
加, TI下降,  
AI升高

印度TATA钢厂600万吨带式机球团

### 4.3 强化带式焙烧技术: (2) 生球平均粒度控制



Vale 的 Fabrica 球团厂年产4Mt（碱度0.75），产量 $30\text{t/m}^2\text{d}$ ,  $\text{AI}(< 0.5\text{ mm})$  指标差成为 Fabrica 球团矿产量的限制性环节



### 4.3 强化带式焙烧技术： (2) 生球平均粒度控制



加拿大IOC将球团粒度控制在9.5-12.5 mm大于75%



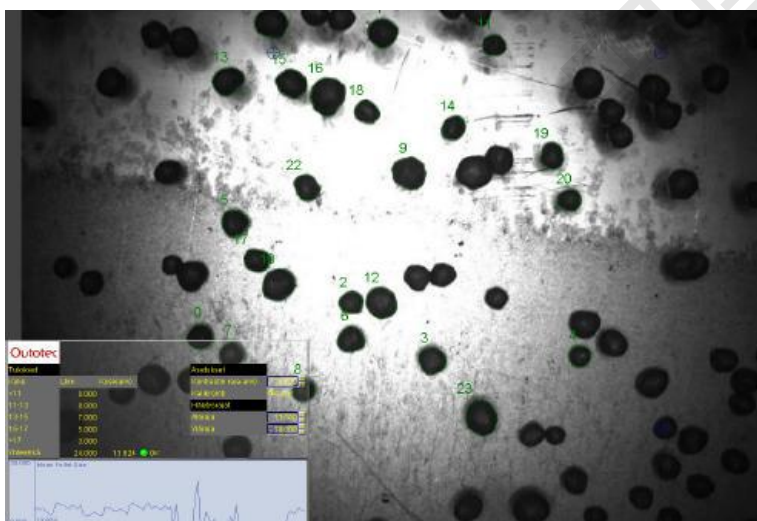
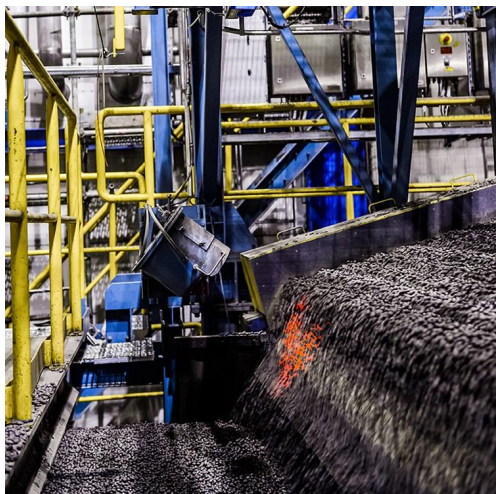
球团粒度对其还原性的影响

## 4.3 强化带式焙烧技术： (2) 生球平均粒度控制



中南大学  
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

### Outotec生球粒度控制技术



### 激光摄影仪+图像软件分析

- 获得的生球平均粒度信息，用于自动调整造球和焙烧等相关参数，控制生球粒度，保证生球和成品球团质量
- 减少劳动定员

### 4.3 强化带式焙烧技术：(3) 内配燃料技术



碳在赤铁矿球团焙烧中的作用：

- **燃烧供热**，提供球团内部固结所需热量，降低总燃料消耗；
- **优化球团固结**，通过将部分活性较低的原生 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 还原为 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ，再氧化成活性较高的次生 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，促进球团 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 再结晶固结；
- **改善成品球团冶金性能**，增加球团孔隙率，提高其还原性

国外部分带式机球团厂采用内配燃料技术对球团矿产量的影响

序号	球团厂	能力(MTPA)		原料	添加量 (%)	利用系数( $\text{t}/\text{m}^2/\text{d}$ )		增产 (%)
		设计	实际			设计	实际	
1	巴西	2.5	4.7	赤铁矿	1.44	15.9	28.8	81
2	CORUS	2.5	4.3	赤+磁	1.28	17.6	29.5	72
3	委内瑞拉	3.3	4.0	土质赤铁矿	0.85	19.3	23.5	22
4	巴西	3.5	4.2	赤+磁	1.02	20.1	22.7	13

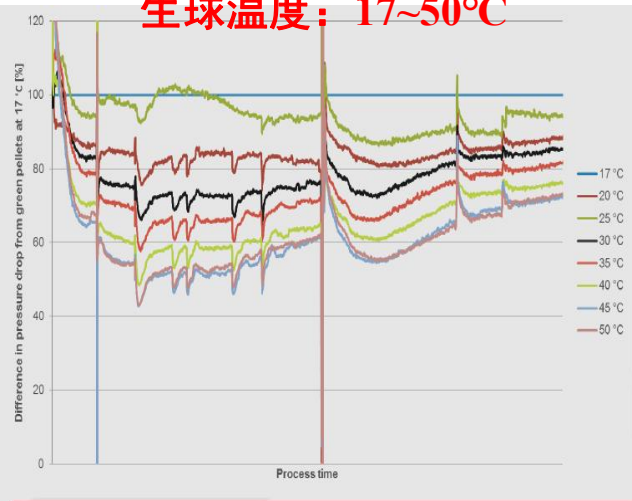
**燃料类型**：焦粉、无烟煤等；**球团固定碳含量**：与原料有关，通常 $\leq 1.2\%$

### 4.3 强化带式焙烧技术：(4) 调控生球温度



- 生球温度越高，料层压力降越低
- 生球温度越高，成品球团抗压强度越高
- 生球温度越高，成品球团转鼓强度越高

生球温度：17~50℃

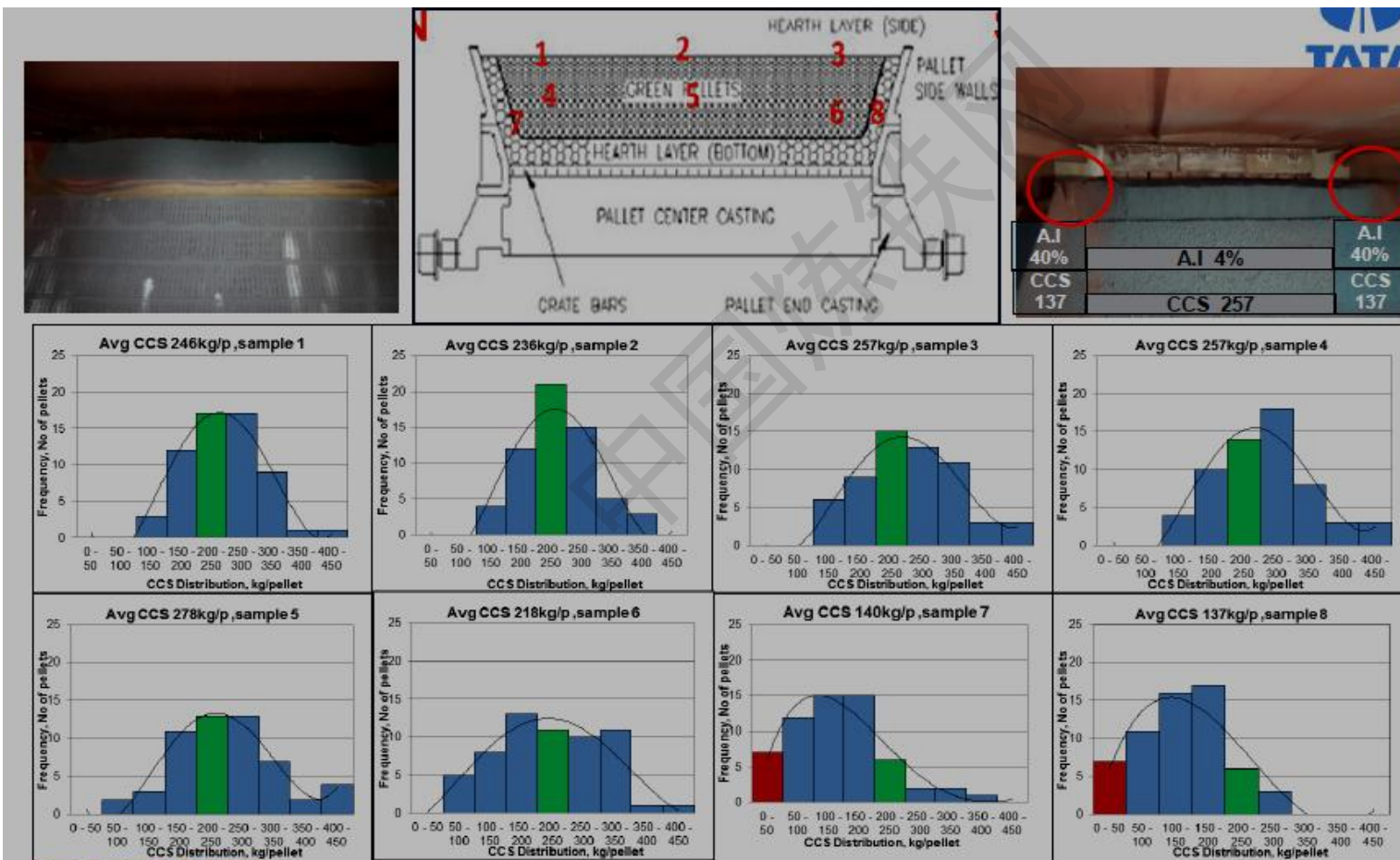


LKAB研究带式机上生球温度对焙烧过程的影响（焙烧杯研究结果）

## 4.3 强化带式焙烧技术: (5) 优化温度场分布



印度TATA钢厂检测带式机上不同部位球团，强度存在较大差别

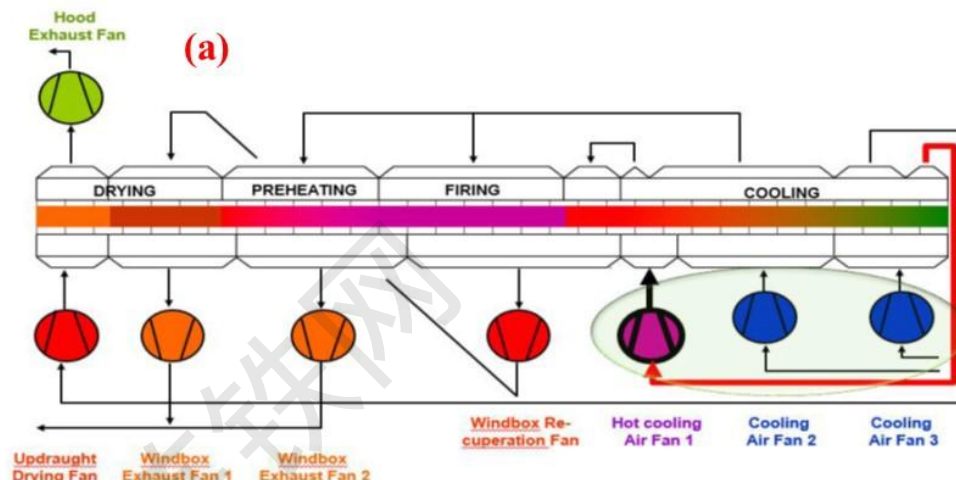


提高球团均匀性

### 4.3 强化带式焙烧技术： (5) 优化温度场分布



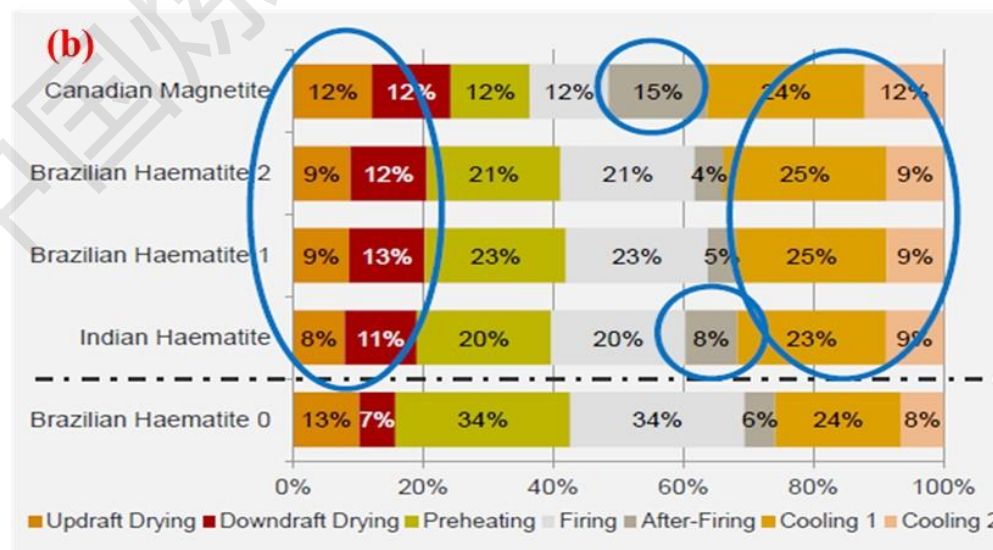
- 图(a)，通过利用回热烟气对高温球团矿进行冷却，使冷却段开始部分的温差较小，减少对球团结构的“热冲击效应”；



- 图(b)，针对不同原料特性，对带式焙烧机各区温度分布进行优化设计。

- 优化鼓抽干燥段的划分
- 延长均热段
- 增加冷却时间

- ✓ 减少热能消耗
- ✓ 提高球团质量



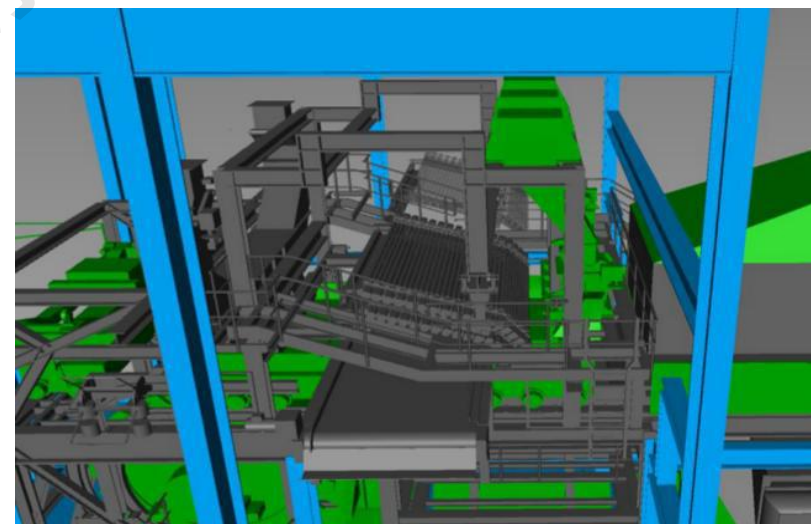
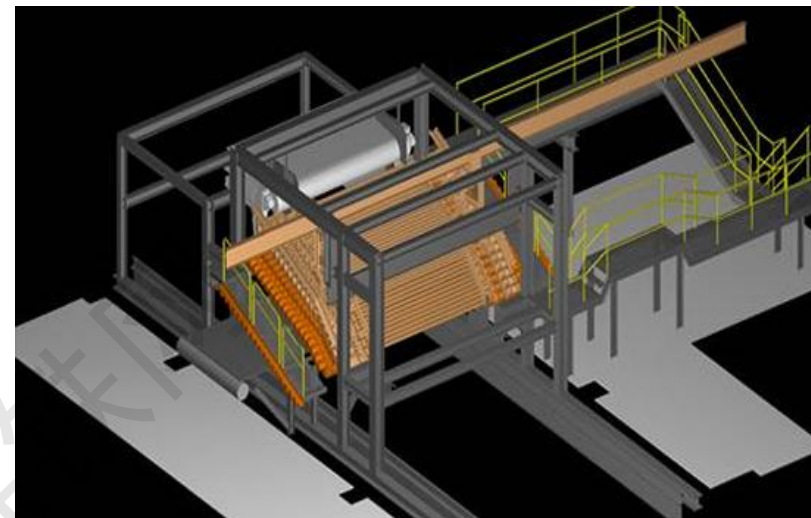
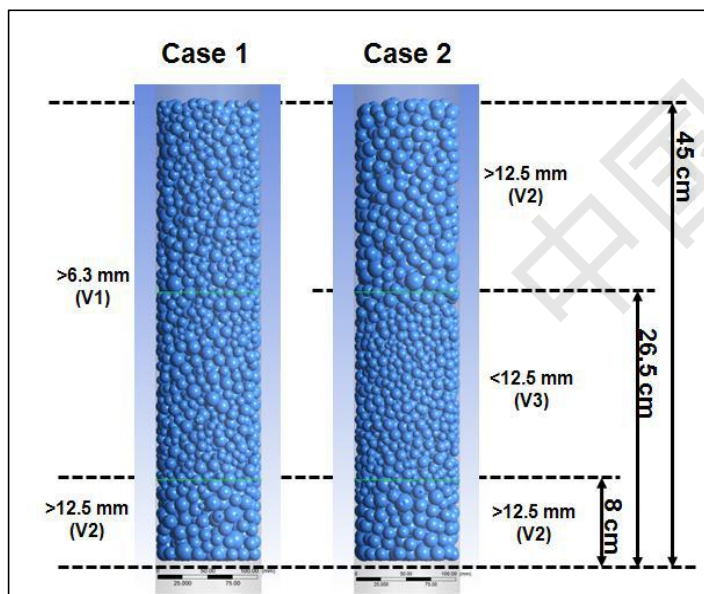
带式焙烧机各区温度分布的优化

## 4.3 强化带式焙烧技术：(6) 双层辊筛



### 优点：

- 更有效地筛分粒度偏小的物料
- 优化料层球团分布，改善焙烧机料层透气性
- 从而改善成品球团的产质量，降低能耗



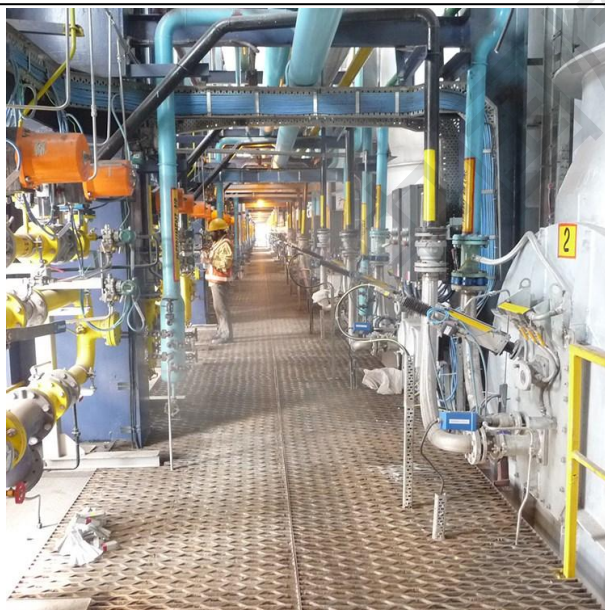
分级布料辊筛和料层布料效果示意图

## 4.3 强化带式焙烧技术：(7) 双燃料烧嘴



### 技术特点：

- 对燃料适应性强，焦炉煤气、高炉煤气、混合气甚至煤焦油，搭配柴油、天然气、液化石油气中一种，从而降低燃料成本；
- 可自动点火，实现在线烧嘴在线启停；火焰监测，实现熄火自动识别、自动吹扫，保证生产安全；空气过剩系数低至15%以下，降低NO<sub>x</sub>的产生；先进阀组及控制系统，实现单个或单组烧嘴温度自动控制。
- 低热值煤气的应用？



带式机现场安装的双燃料烧嘴

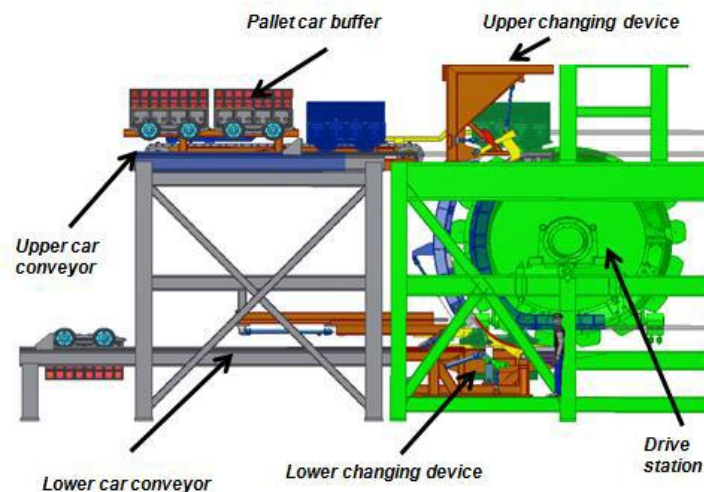
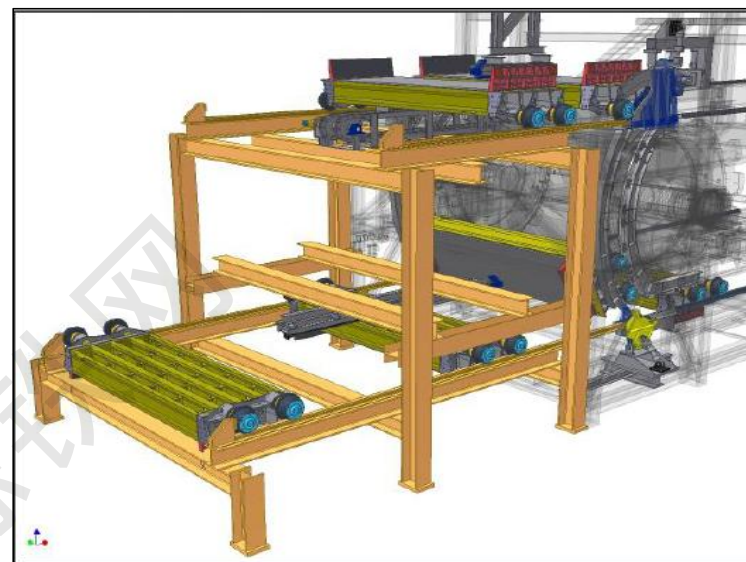
## 4.3 强化带式焙烧技术：(8) 台车自动更换系统



开发出连续更换台车系统，替代  
基于起重机的台车更换系统

技术特点：

- 最大限度减小停机及其对过程的干扰
- 提高作业率，无需在更换台车时暂停焙烧机
- 降低维护费用，提高安全性
- 设计紧紧凑，并能改型



## 4.3 强化带式焙烧技术：(9) 风冷梁



### 开发工作：

用专门设计的耐火材料和钢结构替代焙烧烟罩上的纵向和横向水冷梁，以支撑单独的墙体

### 效果：

- 取消焙烧机上的整个水冷系统 (大约 $800\text{m}^3/\text{min}$ )
- 由于小的冷却塔，泵送系统及冷却水泵而减少投资费用
- 减少了工厂运行费用，提高了球团质量



## 4.3 强化带式焙烧技术: (10) 动力学模型开发及CFD 优化

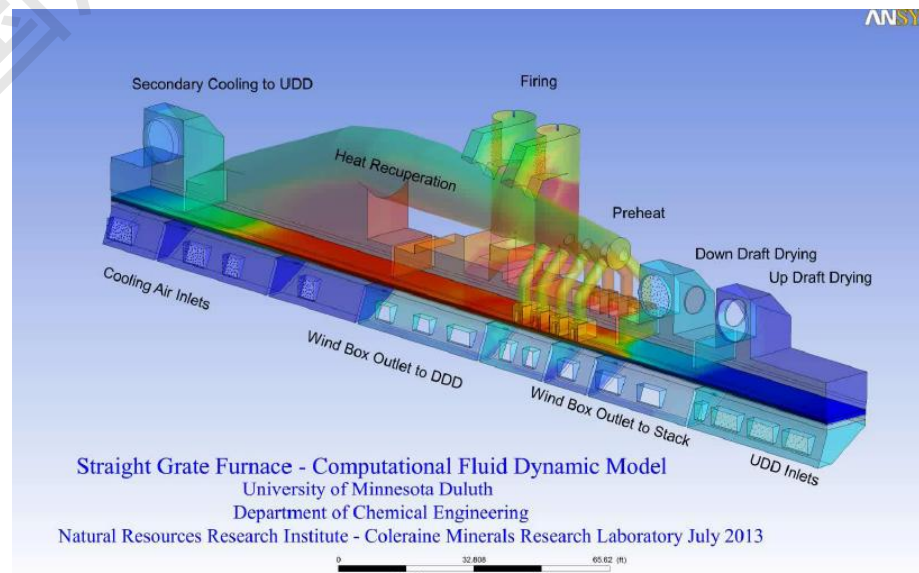
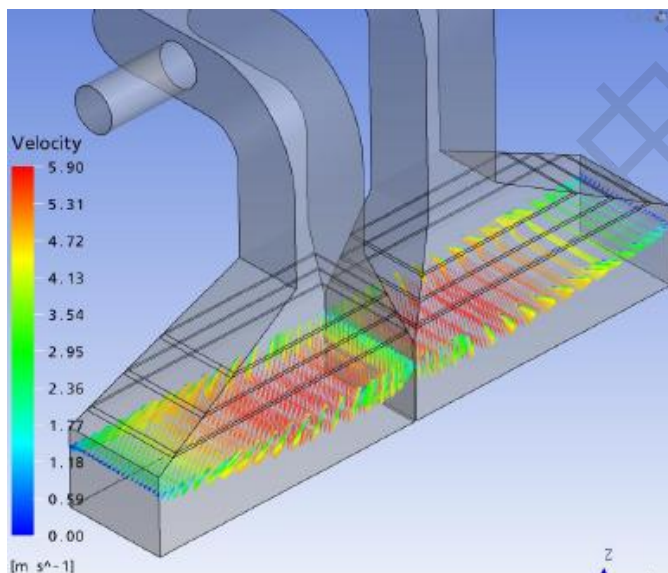


### 开发工作:

验证和优化关键管路系统设计, 以获得温度分布、流速及压力降的最佳值

### 效果:

- 减少管道压力损失, 相应减少电耗
- 改善工厂生产条件
- 提高对气流敏感设备的效率, 如静电除尘器及风机

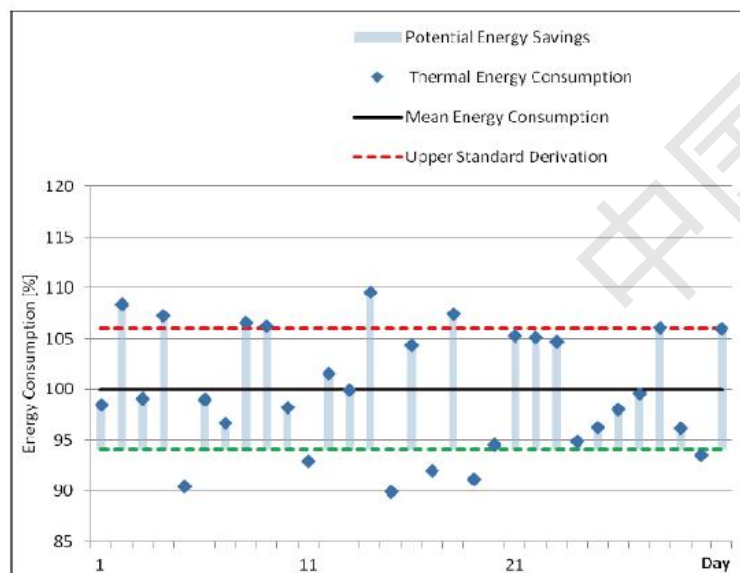


## 4.3 强化带式焙烧技术：(11) 智能制造

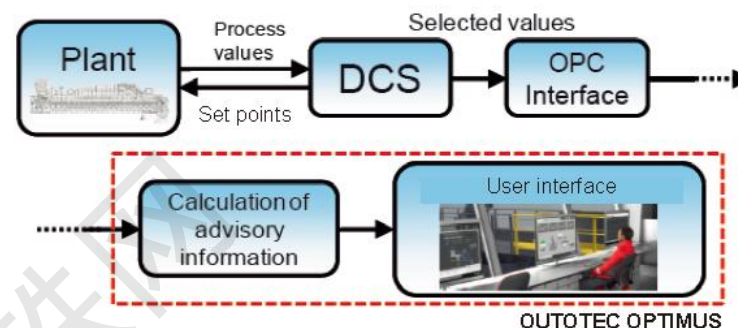


### 优点：

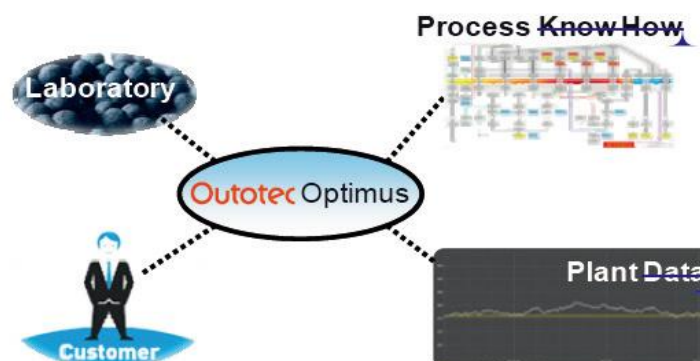
- 系统帮助操作人员更有效的运行工厂；
- 稳定操作，提高产量和能效，降低运行成本。



Outotec Optimus可节省带式焙烧能耗5%左右



### Outotec Optimus专家系统与集成控制原理



### Outotec Optimus系统与大数据采集来源

到2030年未来引领钢铁生产过程中球团领域亟需攻克<sup>1</sup>的工艺或重大装备的关键核心技术（1）复杂球团原料预处理技术（2）低成本多品种球团生产技术（3）超大型带式焙烧机球团绿色智能制造技术（4）高比例球团矿冶炼技术

## 难点

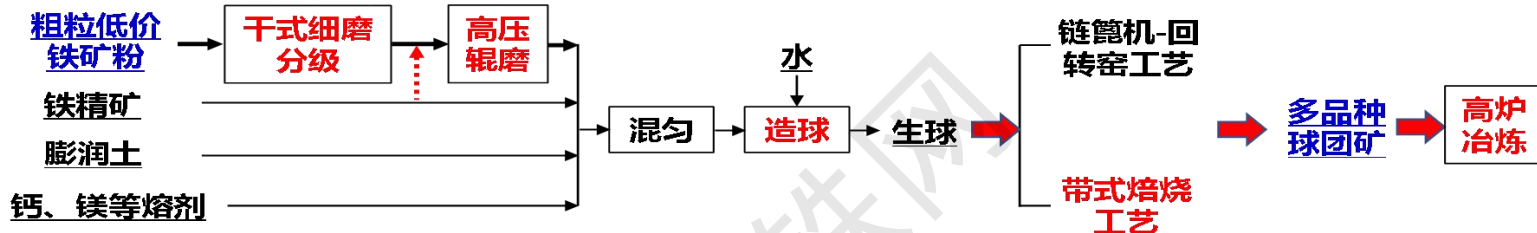
铁矿粉粒度粗 可磨性差  
过滤脱水难 磨矿流程长

球团原料单一  
球团品种少、生产成本低

带式机工艺燃料适应性差  
智能制造水平低

球团入炉比例低 渣量大  
焦比高

## 工艺路线



## 关键技术

① 复杂球团原料  
预处理技术

② 低成本多品种  
球团生产技术

③ 超大型带式焙  
烧机球团绿色智  
能制造技术

④ 高比例球团矿  
冶炼技术

## 研究内容

- (1) 不同球团原料的可磨性
- (2) 细磨物料的过滤脱水性能
- (3) 干式细磨分级工艺优化
- (4) 干式细磨与高压辊磨工艺的匹配
- (5) 大型干式细磨分级设备研制

- (1) 粗粒低价矿粉的磨矿预处理
- (2) 混合料造球及球团焙烧性能
- (3) 低成本多品种球团工业试验
- (4) 球团生产技术经济分析

- (1) 生球粒度检测与控制系统
- (2) 新型高效低氮燃烧技术
- (3) 优化台车结构和材质设计
- (4) 焙烧过程优化控制技术

- (1) 多品种球团矿的冶金性能
- (2) 高比例球团的炉料结构和冶炼行为
- (3) 布料规律及装料制度优化
- (4) 高炉热工制度优化
- (5) 炉渣性能与造渣制度优化

## 预期目标

开发出大型干式细磨分级设备；与湿式球磨-高压辊磨预处理技术相比，新技术投资降低30%，球团原料预处理加工成本减少20%以上

推广应用低成本多品种球团生产技术，不同碱度和MgO含量球团矿产量达5000万吨

设计出规模为600万t/a以上带式焙烧机，预计推广应用10条线；年新增球团矿产量5000万吨，球团矿生产节能20%以上，设备作业率提高10%以上。

高炉入炉球团矿比例由目前的15%左右提高到65%，并在50%炼铁厂推广应用高比例球团矿冶炼技术。

## 最终目标

提高球团原料供应保障水平，实现多品种球团矿生产的低成本、规模化和智能制造，为钢铁冶炼提供优质原料，推动我国钢铁工业的低碳、绿色、高质量发展提供重要的依据和技术支撑。

# 结论及展望

- 球团矿在未来将进一步延伸至钢铁原料产业链的各个消费端，其产量将继续增加并有一个很大的提升空间，高炉使用球团矿比例会继续提高，这对推动我国钢铁工业低碳、绿色、高质量发展具有重要的现实意义。
- 球团原料来源变广、性质复杂化，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得到广泛应用。特别是球磨与其联合使用处理烧结粗粉，进一步扩大了球团原料来源；同时球团原料的优化配矿理论与技术将引起重视。
- 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伴随着带式焙烧机的推广应用而快速发展。
- 带式焙烧机工艺在我国将得到快速发展，并能实现核心技术和装备国产化、大型化，这是为了能够更好地适应资源劣质化，节能减排和降低生产成本，同时也是为了满足产量不断扩大的需要。



中南大學  
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

谢谢！  
请各位专家批评指正！

