

高炉日常操作和低碳炼铁

黄发元

2020年8月 六盘水

一、高炉日常操作维护

1. 铁前各工序过程受控，原燃辅料数量、质量相对稳定
2. 设备故障、事故少，对高炉干扰少
3. 高炉操作水平提高，基本制度相对适宜

二、低碳炼铁几种路径

1. 坚持精料和优化高炉操作
2. 高炉喷吹高氢含碳气体或固体燃料
3. 氧气高炉
4. 熔融还原

一、高炉日常操作维护

高炉炼铁具有劳动生产率高和综合经济指标良好等优点，可以实现大规模、低成本生产，因此仍是当前和今后一段时间最主要的炼铁工艺。

炼铁工作者的主要任务：

1、安全顺稳 ---基础

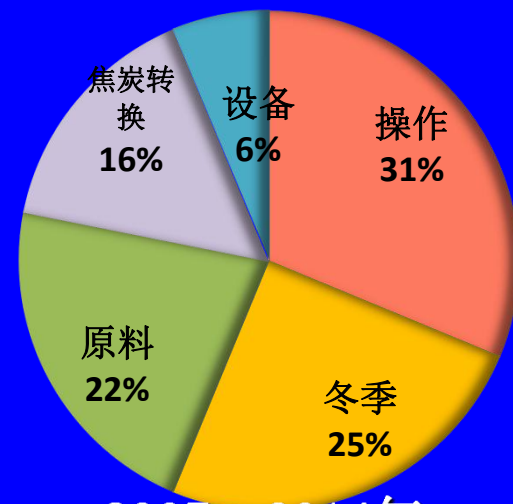
2、经济高效 ---目标
(高产、低成本、低碳绿色、长寿命)
内在关联 系统处理

高炉失稳的主要外部原因和炉内操作：

1、原燃料的数量、质量波动——资源、运输、天气、干熄焦或烧结设备检修平衡

2、高炉设备故障、事故 ——冷却壁漏水、大中小套直吹管、主皮带、溜槽、电控、热风煤气系统设备事故

3、高炉操作不当——应对失误、基本制度偏离（上下部气流、热制度、渣铁等）



2007—2014年
高炉炉况失常原因统计
某企业数十条案例

炉外是条件，炉内是关键

高炉稳定顺行关注重点

- (一)、铁前各工序过程受控，原燃辅料数量、质量相对稳定“料”
- (二)、设备故障、事故少，对高炉干扰少“环”
- (三)、高炉操作炉型监管，炉体冷却器漏水受控“机”
- (四)、高炉操作水平提高，基本制度相对适宜“法”

“人机料法环”五要素，炉内外兼顾

“管理不到位，技术难以发挥作用”

要有明白人
和听懂的人

铁前系统“统筹联动、稳定保供、精心操作”

(一)、铁前各工序过程受控，原燃辅料数量、质量相对稳定

1、关注槽下原燃料实物质量——目测检查，2次/班



烧透



氧化球团FeO含量

2、重点关注原燃料粉末率——筛

2.1 筛子给料量，t/h，筛网检查清理2次/班，入炉粉末（<5mm占比）

2.2 粉焦比：焦炭筛下粉量占比

2.3 粉烧比：烧结矿筛下粉量占比

2.4 槽位管理：每个仓槽位 $\geq 60\%$

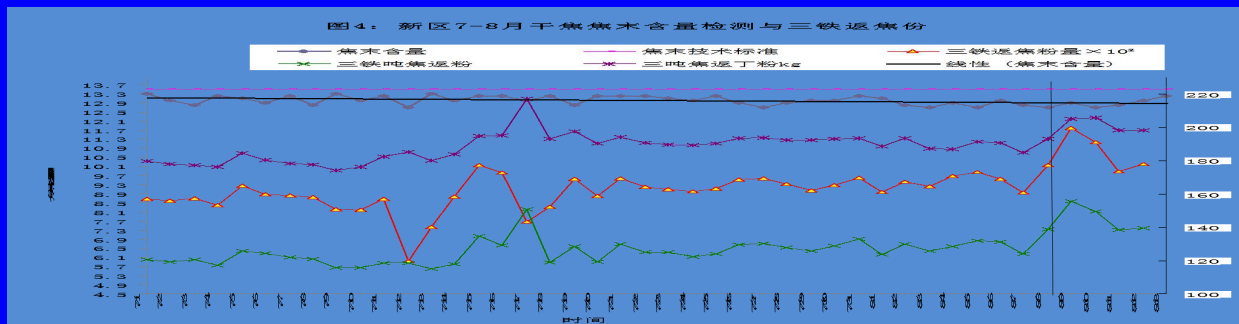
2.5 炉内产生粉末（RDI）

2.6 焦炭强度、平均粒度MS等。

例：筛网堵

焦末多，炉缸透气透液性差

休风灌风口、渣流动性差



3、以高炉为中心 系统统筹联动 预防为主

- “以高炉为中心” ，系统统筹联动，问题有人及时协调解决
- “长周期稳顺是最大的降本” 的理念
- 以铁水成本最低为目标，而不是以吨矿成本、吨焦成本或其他。

例：“点菜吃饭” ；吨原燃料成本—同等质量降采购成本才有意义

预防为主，以铁前的系统稳定保高炉顺稳，而不是被动应对为主，由事后被动调节应对，转变为事先策划预防控制。

道理都懂，关键要做到，难度不小——要认识到位、认真行动，是有作为的，很多问题是可以避免的，炼铁人要给决策者说明白。

3.1 通过小焦炉、烧结杯等试验研究，配煤、配矿根据性价比优化和减少同一品种供方数量，确保高炉、烧结、球团、焦化用煤、用焦、用矿结构基本稳定。

如炼焦煤由原来控制大煤种，改为控制到矿点；二类焦由十几家或更多，减少到几家相对稳定的战略供方；尤其国内精粉由十几家或更多减少到几家，并分堆，等等，掺假、劣质等不稳定因素和乱象得到改变。

3.2 优化原燃辅料均衡保供工作，细化单品种库存标准（含煤炭置换周期）、用料时间、采购到达时间，及时均衡到达，确保用料结构相对稳定和库存降低，运转高效有序，不因少数长期堆存而占库、变质，低价位时的低库存使得铁水成本贴近当期市场；

3.3 强化采购、验收、混匀、烧结、球团、焦化等过程控制，确保数量，稳定、提高质量；上道工序主动为下道工序服务；

3.4 持续跟踪和控制高炉有害元素负荷和富集

(1)、制定标准；(2)、监测分析；(3)、配料控制；(4)、操作控制(排锌碱)

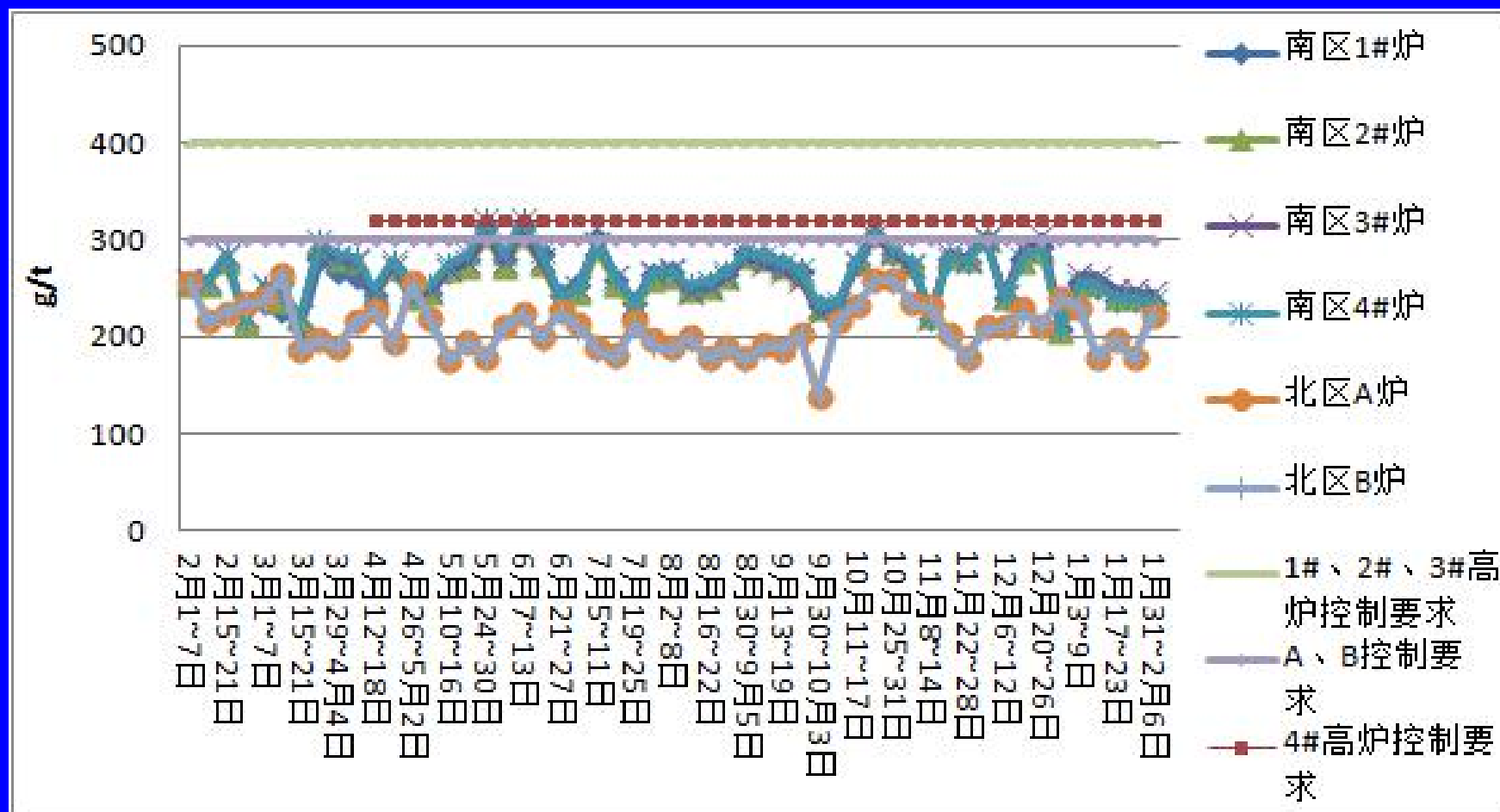
	锌负荷		碱金属负荷	
炉号	控制要求， g/t	2019年5月 锌负荷， g/t	控制要求， kg/t	2019年5月 碱金属负荷， kg/t
1#炉2500	<400	285	<4.0	3.322
2#炉2500		276		3.363
3#炉1000		280		3.464
4#炉3200	<320	288	<3.6	3.330
A炉4000	<300	200	<3.3	2.718
B炉4000		199		2.700

2019年12月高炉锌富集情况

项目	1#炉	2#炉	3#炉	4#炉	A炉	B炉
锌收入， g/t	263	267	276	267	216	216
锌支出， g/t	254	295	245	279	198	198
锌富集率	3.43%	-10.47%	11.06%	-4.59%	8.05%	8.05%

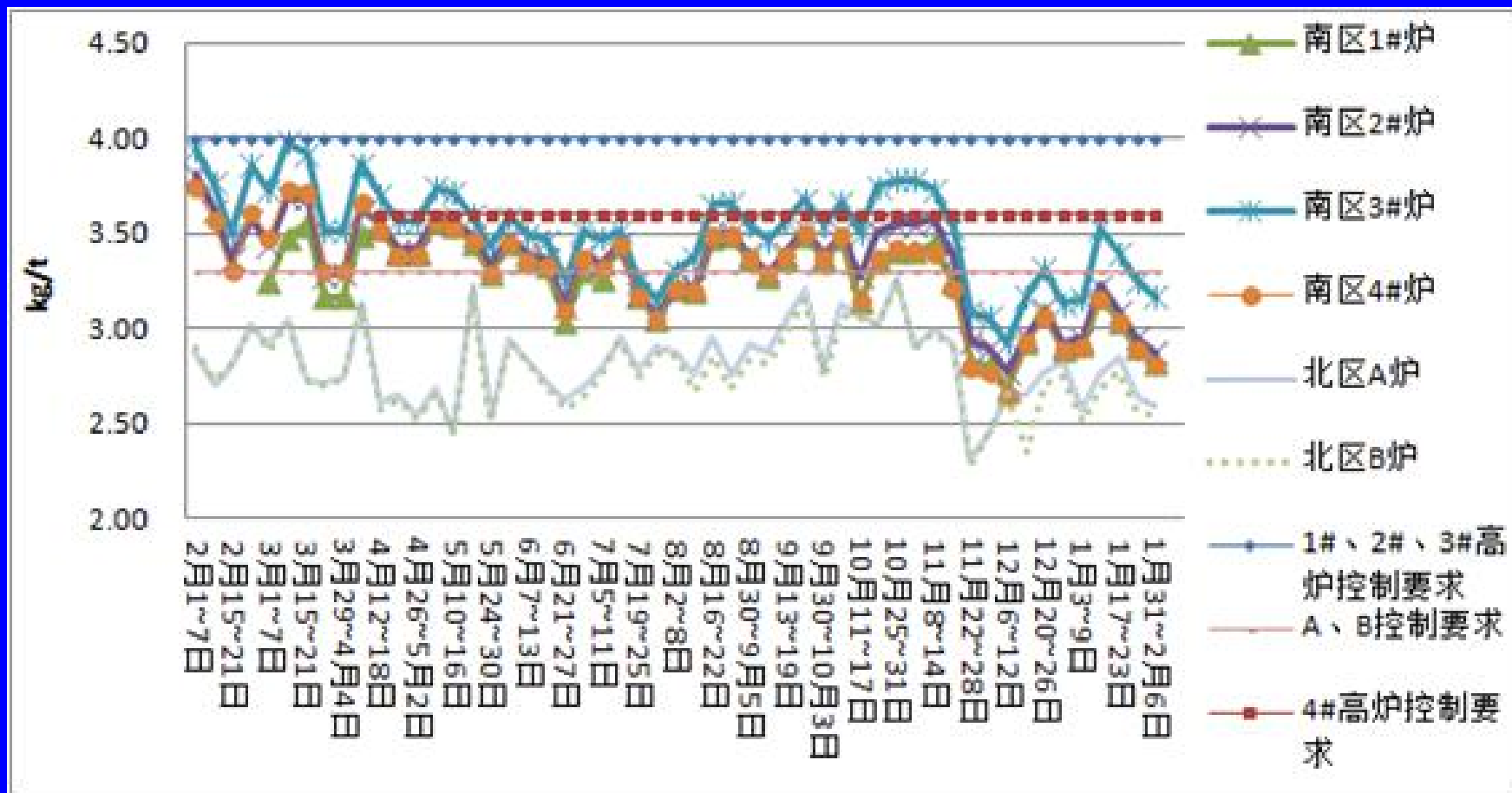
小高炉两道煤气流相对发展，排锌能力强，锌负荷可以高些。

持续跟踪和控制高炉有害元素负荷和富集



高炉入炉锌负荷趋势图

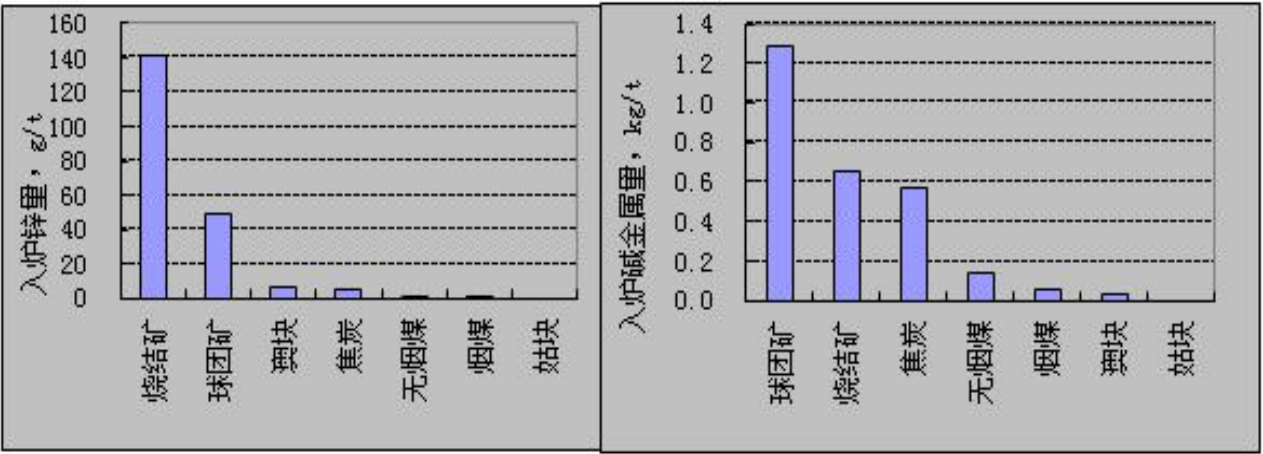
持续跟踪和控制高炉有害元素负荷和富集



高炉入炉碱金属负荷趋势图

高炉入炉有害元素来源分布（2019年5月）

品名	用量	锌含量	碱含量	入炉锌量计算		入炉碱金属量计算	
	kg/t	%	%	g/t	%	kg/t	%
烧结矿	1174	0.012	0.056	141	69.85	0.657	24.06
球团矿	326	0.015	0.395	49	24.25	1.288	47.12
澳块	125	0.005	0.028	6	3.10	0.035	1.28
姑块	0	0.017	0.023	0	0.00	0.000	0.00
焦炭	373	0.001	0.151	5	2.31	0.563	20.61
无烟煤	72	0.0010	0.192	1	0.36	0.139	5.08
烟煤	67	0.0004	0.076	0	0.13	0.051	1.86
合计				202	100.00	2.733	100.00

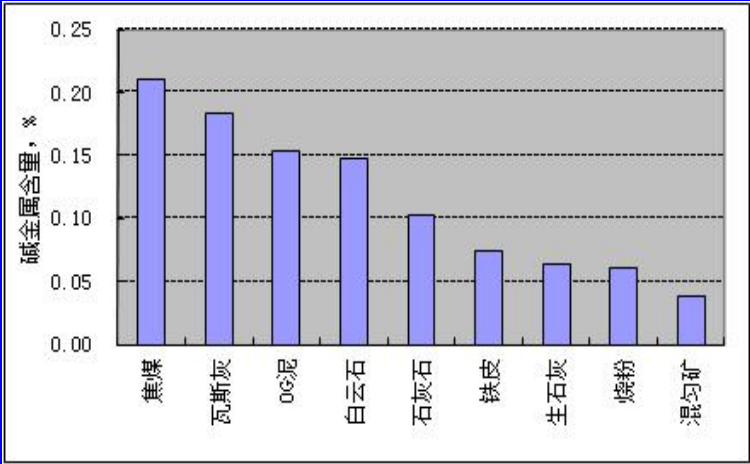
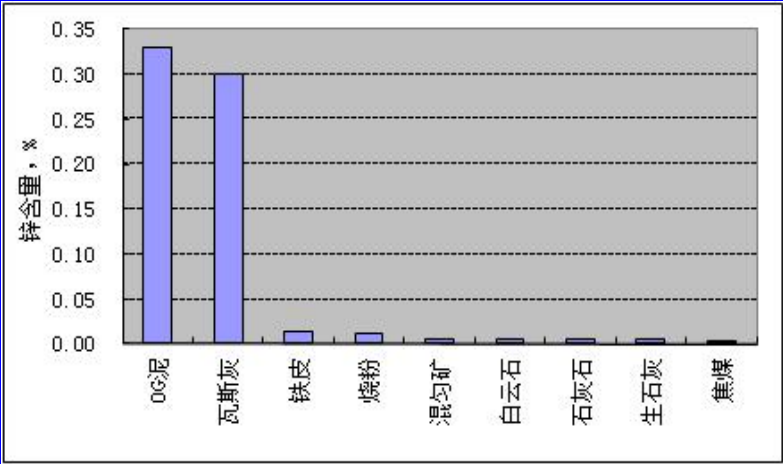


锌主要来源于烧结矿，碱金属主要来源于球团矿（粘结剂等）

烧结矿有害元素来源分布（2019年5月）

项目	配比,%	锌含量,%	碱含量,%	入炉锌量计算, g/t	入炉碱量计算, kg/t
混匀矿	67.90	0.005	0.021	45	0.188
烧粉	11.97	0.011	0.051	17	0.080
铁皮	0.84	0.013	0.074	1	0.008
瓦斯灰	0.45	0.300	0.184	18	0.011
OG泥	0.80	0.330	0.089	35	0.009
白云石	5.61	0.005	0.147	4	0.109
石灰石	4.38	0.005	0.102	3	0.059
生石灰	3.45	0.005	0.063	2	0.029
焦煤	4.60	0.003	0.210	2	0.127
合计				126	0.620

轻薄料
电炉灰
机头灰
外购焦废水抑尘
碱金属含量升高



尘泥绿色循环和开路

- 1) 大部分低锌冶金尘泥（干湿强混）参与原料混匀、回烧结利用
- 2) OG泥用管道输送到烧结混合机前，喷浆
- 3) 转底炉RHF处理含锌、含碳尘泥
- 4) 回转窑处理部分电炉灰等
- 5) 热电锅炉处理乳化液



3.5 非正常情况的预案准备，使过程受控

(1)、干熄焦系统、焦炉系统检修和皮带检修等，事先做好用焦平衡方案、提前备焦、做好过程保供，使用焦结构相对稳定，必要时适当-O/C。

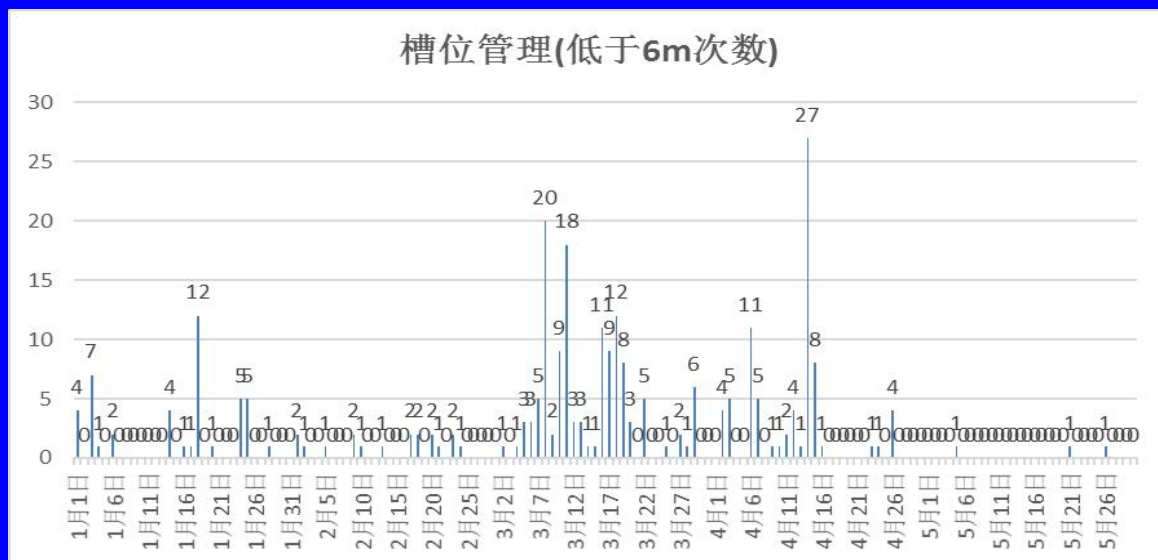
优化检修方案、压缩检修工期；

技术攻关，延长干熄焦系统、焦炉寿命；

增加干熄焦炉，实现全干熄焦，减少干湿转换对高炉的影响。

3.5 非正常情况的预案准备，使过程受控

- (2)、烧结机、链窑等检修，事先做好用矿平衡方案；
提前备烧备球、做好均衡保供；
优化检修方案、压缩检修工期。



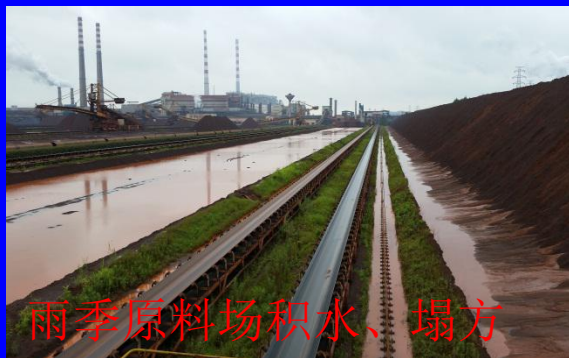
3.5 非正常情况的预案准备，使过程受控

(3)、南方雨季应对：块矿烘干、集装箱、雨布覆盖等，雨季来临前进行关键品种备料。

筒仓、大棚暨环保又解决雨季问题。



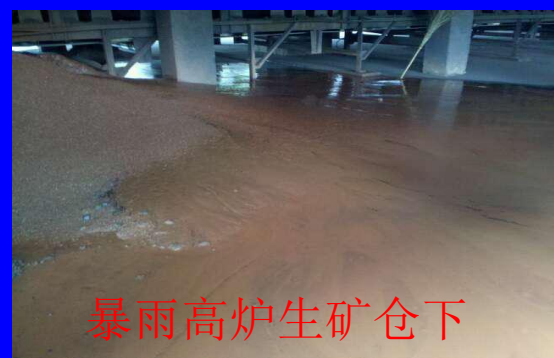
雨季重车压铁路桥、被堵



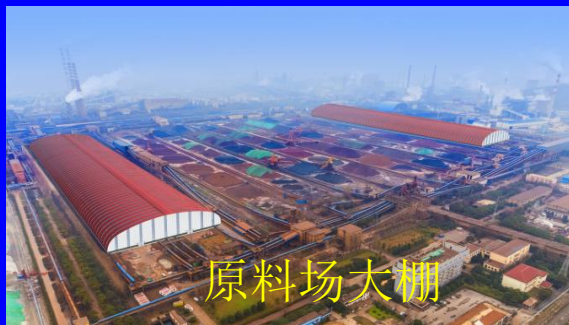
雨季原料场积水、塌方



暴雨烧结配料室下



暴雨高炉生矿仓下



原料场大棚



煤炭筒仓



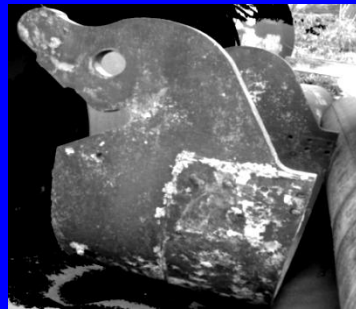
集装箱运卸焦炭

(二)、设备故障、事故少，对高炉干扰少

1 强化设备管理 备件质量、趋势管理、周期更换，减少故障和事故，快速反应，缩短抢修时间，减少对生产过程的干扰。

1.1 溜槽磨损、卡异物、脱落、编码器漂移、料闸开度异常等。

要检查十字测温、摄像、布料角度、圈数、时长等变化。实测溜槽角度、观测料面等。



(二)、设备故障、事故少，对高炉干扰少

1.2 中小套漏水要重视，及时更换，防止影响炉温、气流；

热风阀漏水要重视，及时更换，防止损坏耐材。

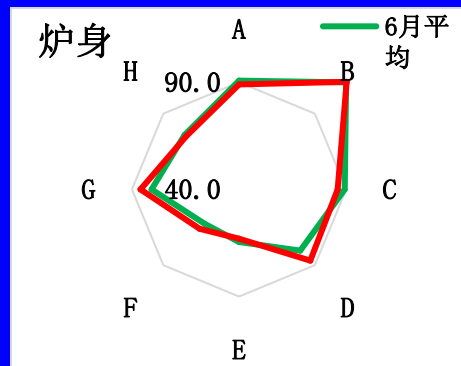
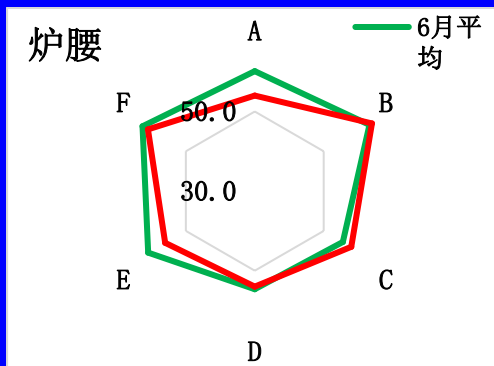
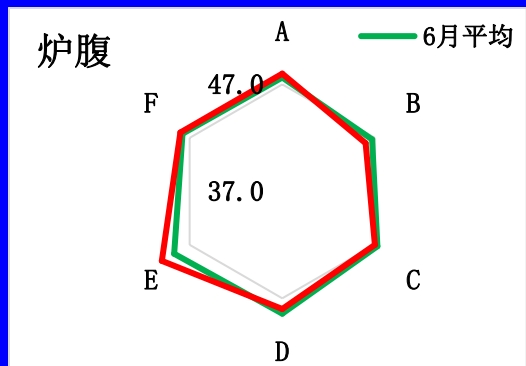
1.3 送风支管、热风煤气系统、炉前设备等的点检和维修，防止事故。



（二）、设备故障、事故少，对高炉干扰少

2、高炉操作炉型监管，炉体冷却器漏水受控

关注操作炉型变化：总水温差、总热负荷，不粘结，少脱落，圆周均匀、上下规整。

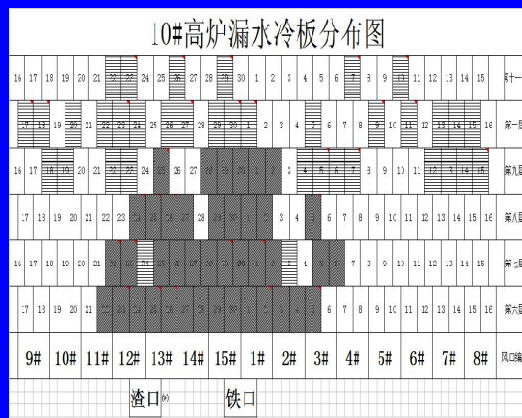


采用炉体冷却壁冷却水分区系统，可以按照炉体各部位的热负荷管理，必要时适当调整水流量及流速。

冷却壁耐材脱落、粘结。

2、高炉操作炉型监管，炉体冷却器漏水受控

关注操作炉型变化：冷却壁漏水控制不好，会发生炉墙粘结，影响气流、顺行。



2016年11月，上部冷却壁破损共96块。随着破损冷却壁数量增加、破损程度加重，控水难度加大。受漏水影响炉腹部位粘结，高炉操作炉型发生变化，操作调控难度加大，经常性出现管道、崩料、炉缸温度不足等现象。

2、高炉操作炉型监管，炉体冷却器漏水受控

及时功能修复：穿管、装圆柱冷却器+造衬

密度：**5**倍直径
相互依托

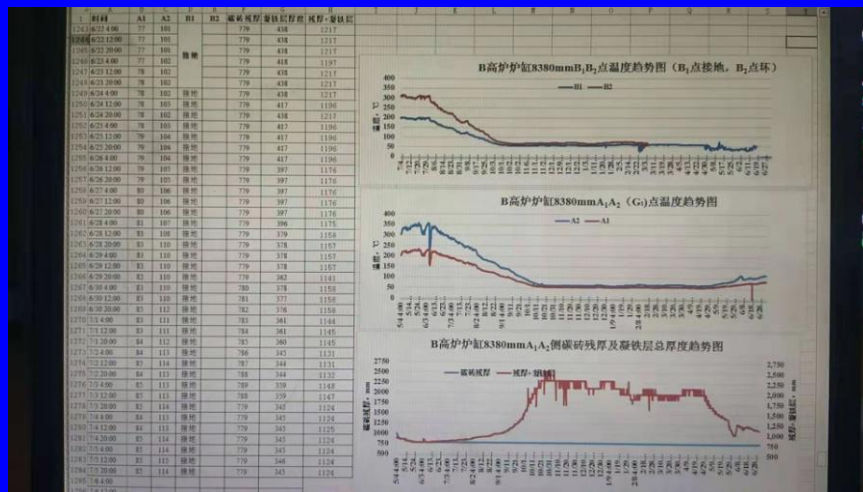


大修时冷却壁状况

3、高炉炉型监管，关注炉缸安全

关注炉缸侧壁温度、铁口周围，中心透液性（炉芯温度）等。

- 投产时就要关注，若干年后变化的应对；
- 特别是炉役末期操作时为了炉缸残存厚度的管理，在需要的位置增设侧壁热电偶对，监测炉缸残厚很重要；
- 高压水等强化冷却、灌浆堵气隙、护炉。



3、高炉炉型监管，关注炉缸安全

1) 残存厚度:

炉缸结构完好和一定的炭砖**残存厚度**（或凝结层）是炉缸安全的保证。

700、600、500mm作为4000高炉关注、警戒、危险管理值，500mm大修，1000高炉300mm大修。

关注、警戒、危险各阶段的措施亦不同。

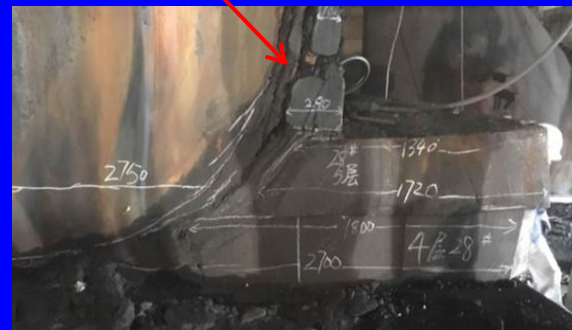
2) 热流密度:

根据残存厚度、耐材结构、疏松层及凝结层和导热系数计算耐材温度、热流密度管控值。

综合导热系数高，耐材温度、热流密度管控值亦应相应高点，与综合热阻有关。

3) 水温差:

相同炉缸结构（相同耐材导热系数）、相同残存厚度，水温差与冷却水量、冷却面积有关。



3、高炉炉型监管，关注炉缸安全

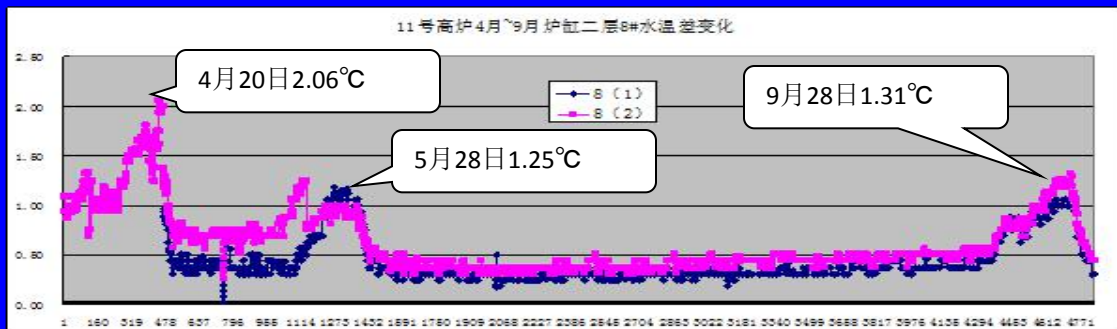
例：某高炉炉缸监管标准

内容		单位	正常值	预警值	警戒值	危险值	极限值
监控标准	炭砖残厚 (不含碳捣料)	mm	≥800	700	600	500	400
主要应对措施			监护	拆单、改高压水、 加强监控、护炉	强化护炉 或堵风口	堵风口 或休风凉炉	必要时人员撤离
				[Ti]0.10-0.15%	[Ti]0.15- 0.18%	做大修准备	立即停炉、大修
监控参考标准 (炭砖 λ=14.2 W/m.℃)	炭砖温度 (插入炭砖150mm)	℃	300	450	500	550	
	热流密度	kJ/m². S (kW/m²)	≤13	≥14.5	≥16.5	≥18.5	≥20
	水温差（单块冷却 壁面积1.54m2、高 压水流量32m³/h时）	℃	0.80	0.90	1.00	1.10	

3、高炉炉型监管，关注炉缸安全

例：某500m³高炉，2015年4月13日-20日；5月12日-28日；9月15日-28日炉缸二层8#冷却壁水温差三次升高到2.06、1.25、1.31℃，热流强度最高达到23.8

(kJ/(m²·s))，通过及时采取有效措施，快速降至正常范围内，维持运行，至2015年10月1日停炉，发现炉缸二层5#-11#冷却壁区域砖衬已侵蚀殆尽，仅剩余捣料层10mm，炉缸二层8#冷却壁处铁水已渗入到冷却壁，见图，**危险、侥幸**。贴片50℃。

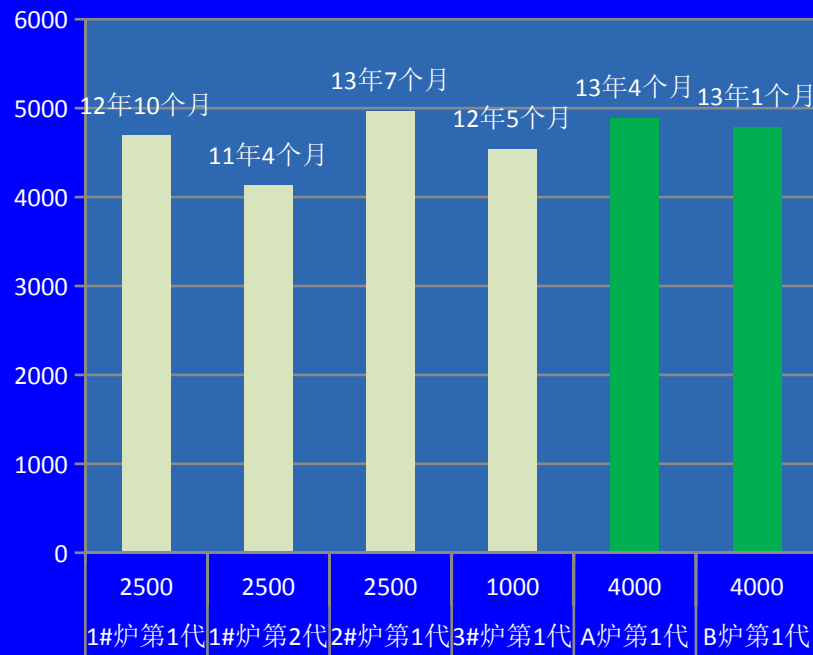


马钢高炉寿命情况

炉号	公称炉容, m ³	炉龄	单位炉容产铁, 吨/代
1#炉第1代	2500	12年10个月	9216
1#炉第2代	2500	11年4个月	9533
2#炉第1代	2500	13年7个月	11282
3#炉第1代	1000	12年5个月	11640
A炉第1代	4000	13年4个月(在产)	10285
B炉第1代	4000	13年1个月(无中修, 在产)	10234

截止到2020年6月

目标：高炉寿命≥15年，12000t/m³以上



（二）、设备故障、事故少，对高炉干扰少

4、设备大型化、智能化

炼铁系统的装备升级，“绿色发展、智慧制造”，宝武“四个一律”：“操作室一律集中、操作岗位一律机器人、运维一律远程、服务环节一律上线”。

开发智能炼铁技术，围绕智能机器人的使用、工业摄像智能监控系统、设备状态的智能诊断系统、5G运用，实现全自动在线检测、诊断预测、远程监视、远程集中控制或移动终端控制、数据自动采集大数据分析，降低设备故障与非计划检修，减少炼铁系统的人为操作失误，稳定高炉运行，提升效率。

环保智慧型料场、智慧型炼焦、智慧型烧结和球团、智慧型高炉，以及为智慧产线保驾护航的智慧型设备管理体系，具有大数据的集中管理和分析的专家操作系统。

通过智慧制造，将带来管理体系、工作流程发生深刻变革，All in One，ONE MILL。例：很多企业，如宝武系 宝钢股份、韶钢、鄂钢、武钢、马钢等的智慧集控中心建设。

（三）、高炉日常操作维护 基本制度相对适宜

日常操作，关键是管控好变化趋势

3.1 送风制度---最活跃的因素 影响一次气流分布的主要因素 善用者活

合适的BV、 O_2 、TP、BT、 T_f (2100~2300℃)

风口面积、 V (250~280m/s)、 E (110~140kJ/s)

炉内平均煤气流速:<2.8m/s

炉喉煤气流速:<1.0m/s

炉腹煤气指数:55-65 (标态)

炉内平均煤气流速 \propto 标态炉腹煤气量*
煤气温度/(煤气压力*工作容积/工作
高度*孔隙率)

风温、炉压等对煤气实际体积影响
较大

(数值仅供参考，炉子大小冶炼条件不同亦不同， ε 0.30-0.55)

煤气量增大，增加炉喉流速而炉料分布不稳定，因此成为管道的原因（焦炭流态化的煤气流速：1.8m/sec左右）。中心部、边缘部的煤气流速比平均流速快（平均流速 1.0m/sec 时中心部流速：1.4m/sec）

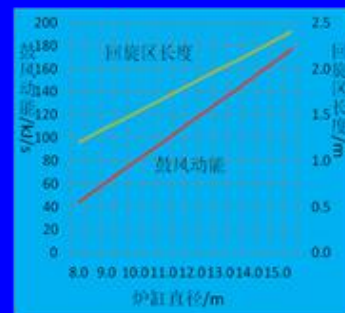
3.1 送风制度

送风设计：基本合适的动能（对标、参考、结合自身修正），各参数相互关联
强化：增加氧量和顶压，适当减少风量，煤气流速基本不增加，提煤、降焦、提产的路线图

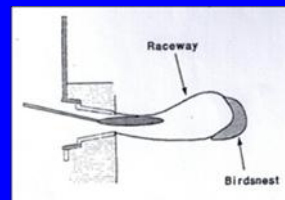
炉内平均煤气流速 \propto 炉腹煤气量 \propto 吨铁耗氧量（燃料比、吨铁耗风量（富氧率、含氮））

例：某4000高炉强化计划（房极文先生提供）

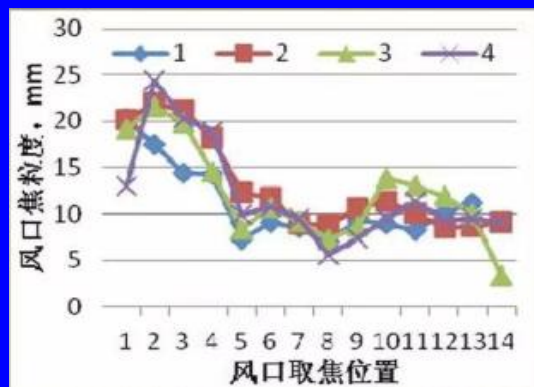
PCI (kg/t-p)	现在(143)	148	154	158	161	164
送风量(Nm³/min)	6350	6300	6250	6200	6150	6100
氧量(Nm³/h)	15000	17000	19000	21000	23000	25000
湿度(g/Nm³)	22	20	15	15	15	15
顶压(kg/cm²)	2.25	2.25	2.3	2.35	2.4	2.45
顶温(°C)	200	190	180	170	170	170
风温(°C)	1220	1220	1230	1230	1240	1240
Tf (°C)	2250	2260	2270	2280	2290	2290
风口风速(m/s)	270	270	268	267	265	265
风口面积(m²)	0.4605	0.4605	0.467	0.47	0.47	0.47
炉内煤气流速(m/s)	2.8	2.78	2.77	2.76	2.75	2.75
VBG(Nm³/min)	8500	8490	8480	8470	8460	8450
富氧率(%)	3	3.4	3.8	4.2	4.6	5.055
压差(kPa)	180	180	182	184	185	185
炉喉流速(m/s)	1.05	1.05	1	1	0.98	0.98
η_{co} (%)	48.3	48.5	48.8	49	49.2	49.3
S.L (m)	1.5	1.3	1	1	1	1
燃料比(kg/T-p)	505	504	503	500	498	498
O/C	4.5	4.6	4.8	4.8	5	5
出铁量(t/d)	8800	8800	8850	8880	8900	8900



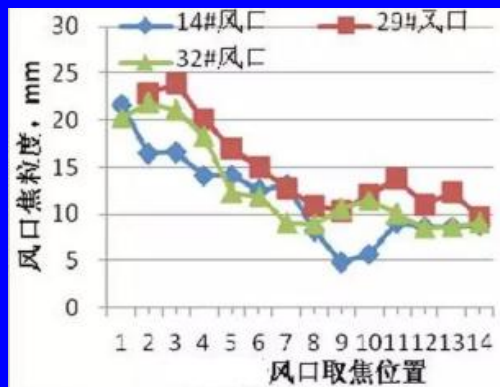
回旋区长度 $L=0.88+0.000093E-0.00031PCI/N$



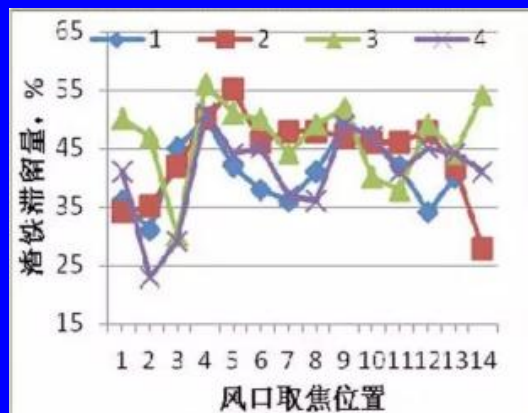
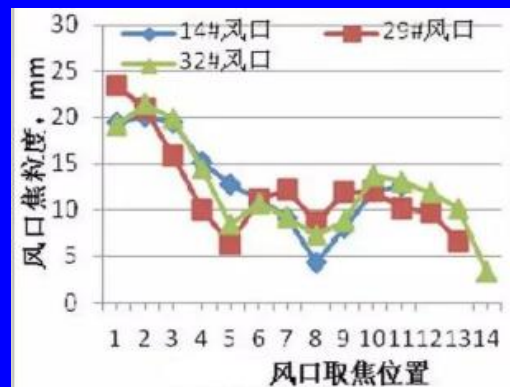
风口取焦（焦炭粒度变化、回旋区长度、透液性）



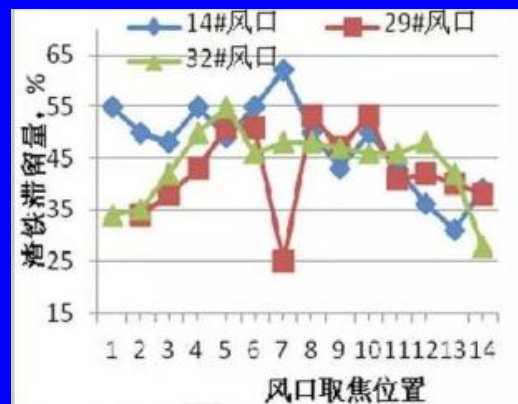
A炉32号风口取焦炭粒度变化趋势



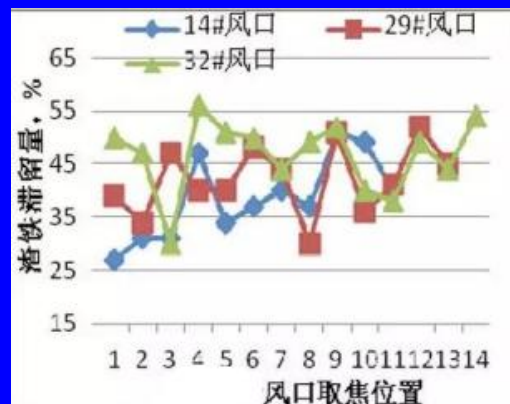
2017年3月24日风口取焦炭粒度变化趋势 2017年6月14日风口取焦炭粒度变化趋势



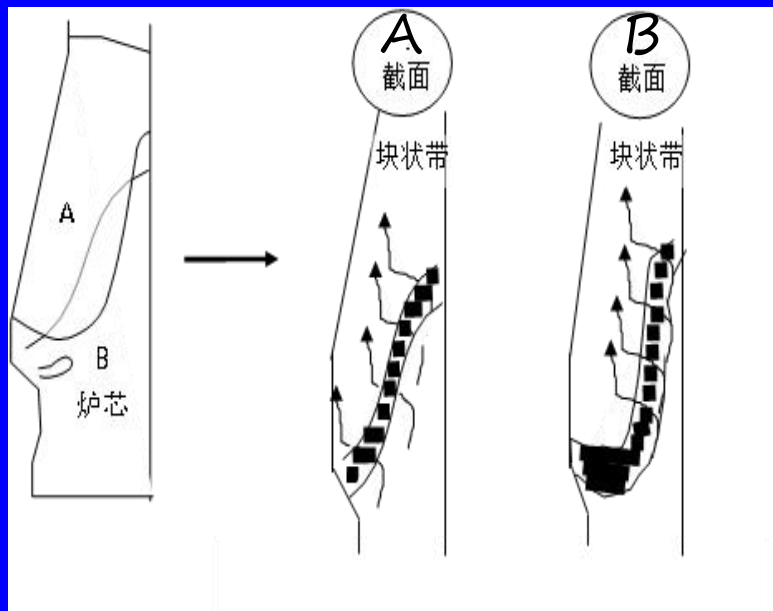
32号风口焦炭渣铁滞留量变化图
1--2015年7月23日 2--2017年3月24日
3--2017年6月14日 4--2017年8月10日



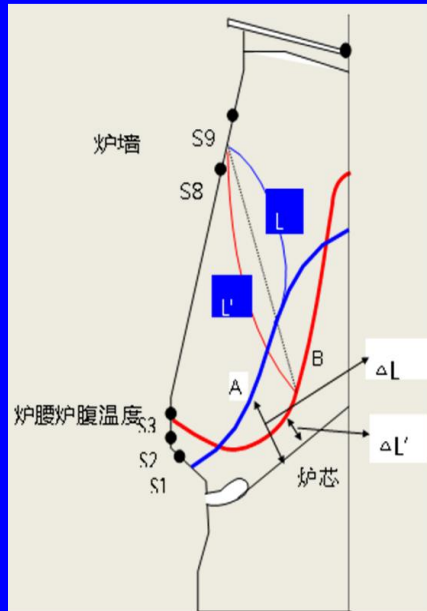
2017年3月24日风口焦渣铁滞留量变化 2017年6月14日风口焦渣铁滞留量变化



软熔带形状的变化 煤气流通过的形状



软熔带的形状与炉况的变化



- **A型**: ΔL 长、L 短
 - 炉芯与软熔带之间可确保空隙 (改善通气性)
 - 软熔带 ~ 炉墙间煤气容易流通
- **B型**: $\Delta L'$ 短、L' 长
 - 炉芯与软熔带之间空隙狭窄 (恶化通气性)
 - 软熔带 ~ 炉墙间煤气不易流通

?

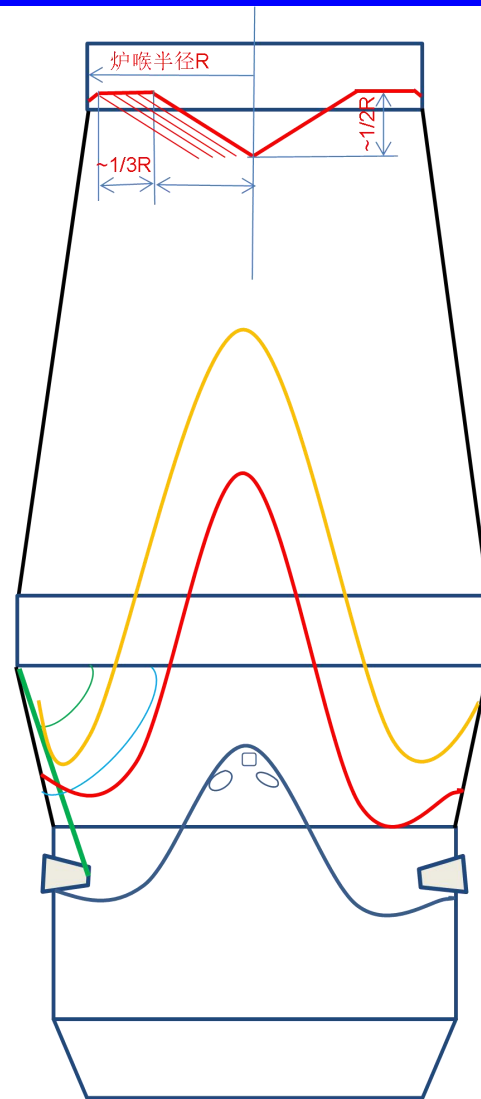
软熔带的形状:

取决于温度场的分布、
原燃料的分布和原料软熔滴
下性能等

是动态的平衡

A炉32号风口取焦分析

取样 编号	取样日期	粒度降解百分比 %	渣铁滞留量%		平均粒度mm	
		0-2.5m	0-2.5m	0-6.0m	0-2.5m	0-6.0m
1	2015年7月23日	65.79	39.8	40.5	14.78	11.27
2	2017年3月24日	55.68	43.2	45.4	18.77	13.66
3	2017年6月14日	64.62	46.8	45.8	15.02	12.44
4	2017年8月10日	60.47	38.4	40.9	16.89	12.23



软熔带



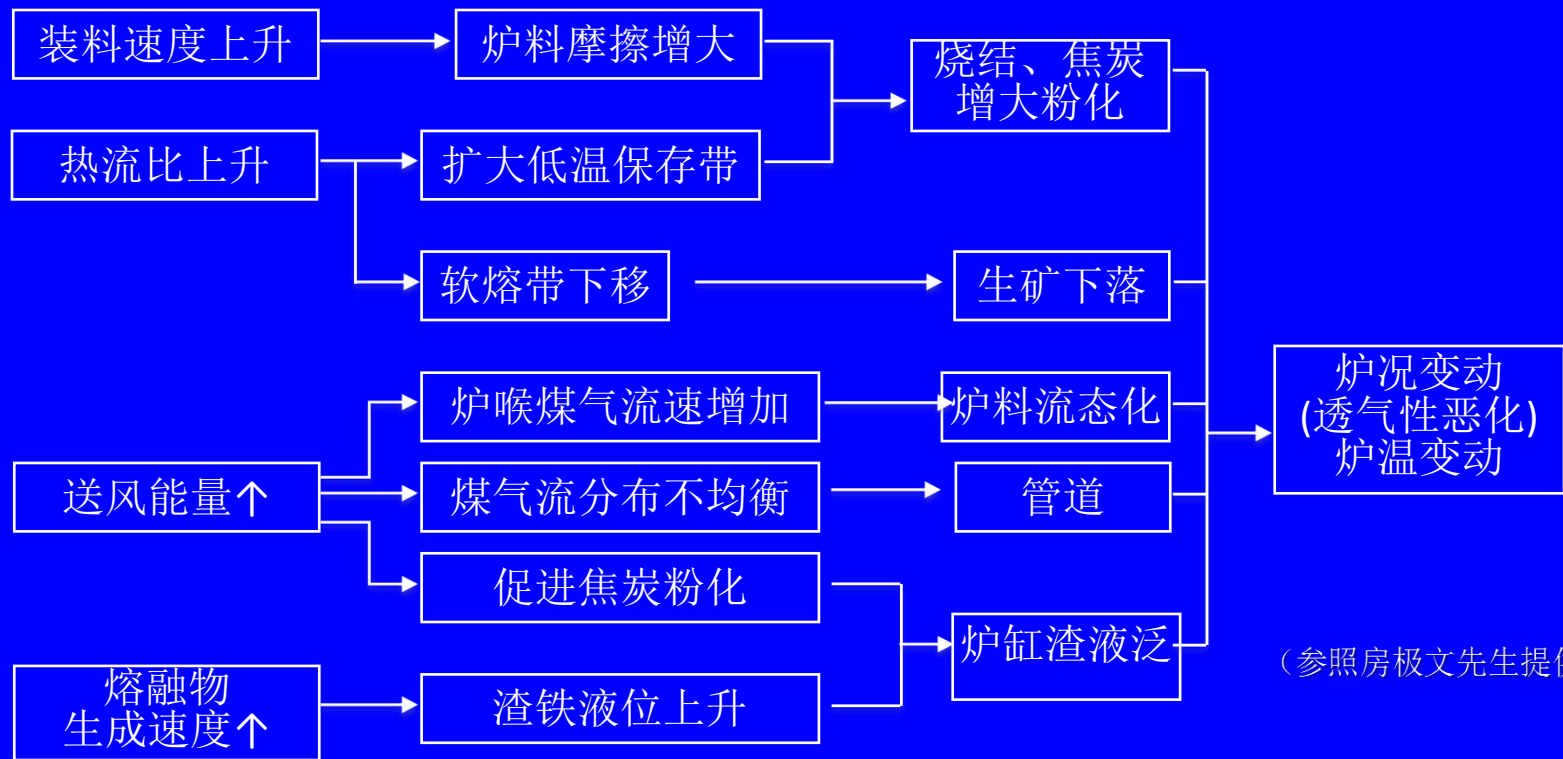
软熔带气窗（焦炭层）

软熔带软熔（矿石层）

提产操作

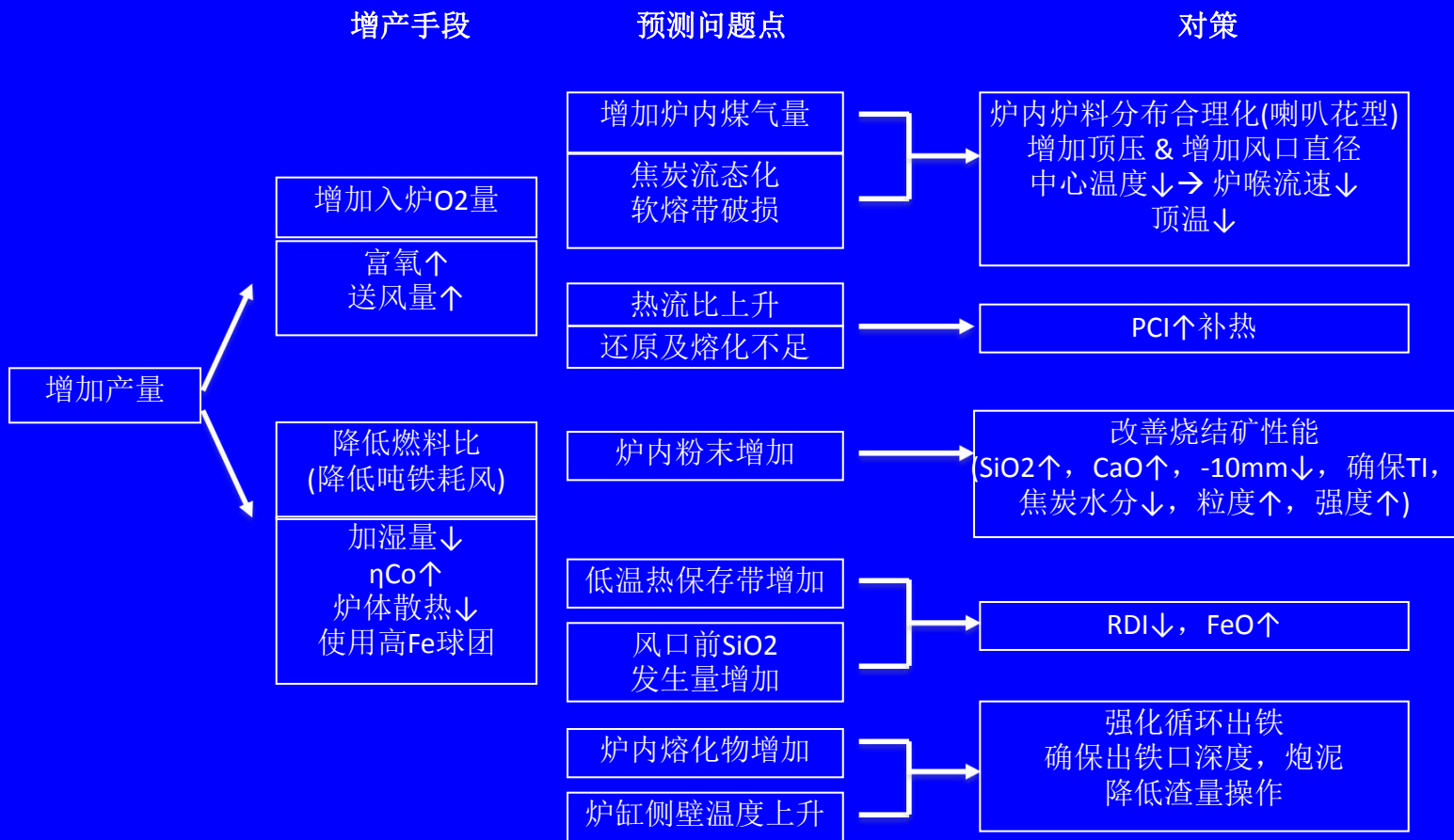
提高 η_v ，在限定的容积下单位时间内怎么让铁矿石高效还原是关键，为此，一般增加单位时间入炉的氧量、降低能耗、减少吨铁耗风量。

提产操作时炉内的变化



(参照房极文先生提供材料)

提产操作问题点及对策



煤气流分布：高产操作时，热流比变化，随着料速增加，软熔带下移，所以，要确保稳定的中心流，同时维持适当边缘煤气流很重要。中心流、中间流、边缘流的合理气流分布，高产操作时为维持稳定的炉况需要确保一定程度的中间流，半径方向O/C分布均匀化。料快，热流比变化，边缘部温度降低和还原率降低，软熔带根部热量不足，下移，炉缸温度很重要。

3.1 送风制度

送风参数的使用：高炉开炉、休复风恢复、炉况处理，衡量指标、用风时机的把控等很关键。

- 1) 低风量时间不宜长，高[Si]、低PT
- 2) BV小，BT不宜高，要提PT，用BV比BT有效
- 3) 操作参数偏离正常值时间不宜长

正常风量时[Si]与PT成正比；但

低风量时高[Si]、PT不一定高。

例：1、2，低BV、

高[Si]、铁水粘沟事故

复风、开炉：

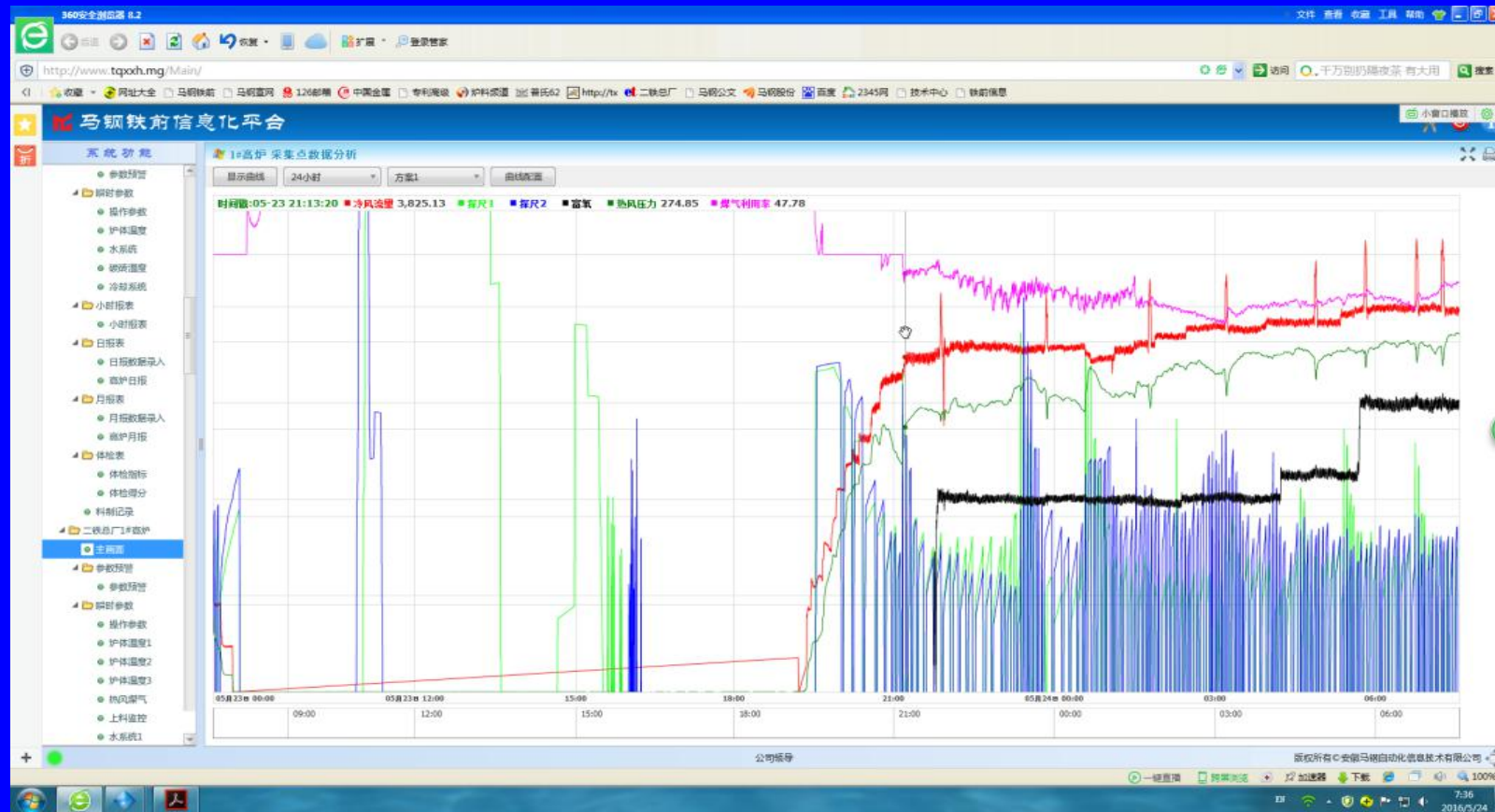
引煤气、风容比达**1.0**（约正常风量的**60%**）以下的时间要尽可能短，最好在**2-3h**以内达成。

送风初期，液态渣铁生成较少，有休风料在炉腹、软熔带和中心料堆相对“干净”，透气性好，便于加风。

炉温允许、“压量关系”基本合适即可加风，小风量时探尺和风压是否走齐不是衡量指标，也是走不齐的。

高炉休复风:

一定冶炼条件下找到基本适宜的制度，外界变化后适当应对调整，但操作参数偏离正常值时间不宜长



例: 休复风

低风量
组合料
高[Si]
铁水粘沟

3.2 装料制度，上部调剂--易出问题环节

高炉炉料分布调整的目标是

- ① 依靠改善炉内透气性来提高生产效率
- ② 依靠提高炉内煤气利用率来降低燃料比（低碳）
- ③ 依靠抑制炉体热负荷来延长炉体寿命
- ④ 依靠改善炉芯透气、透液性来延长炉缸侧壁部寿命
- ⑤ 预防塌料、悬料、管道、风口曲损、炉芯污染等事故。

上部控制气流的方法一般是变更装料模式、变更料线、变更批重等，来控制半径方向O/C分布。

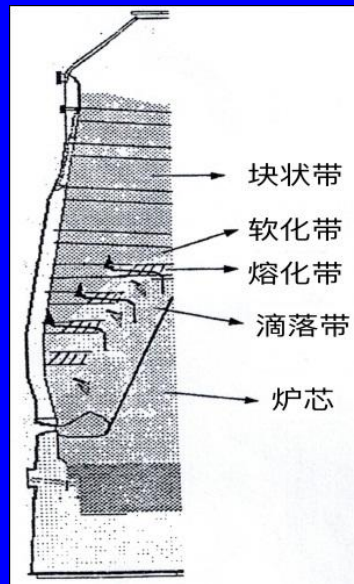
十字测温：

边缘流W：边缘温度平均/顶温平均值，边缘矿焦比

中心流Z：中心5点温度之和/顶温平均值，中心矿焦比

中间矿焦比：高于中心和边缘，但炉喉部位焦层平均厚度一般不小于

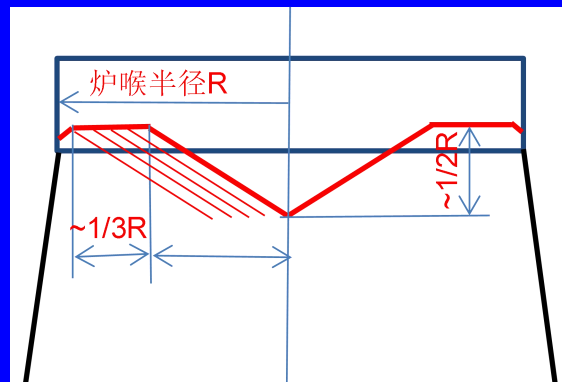
500mm，炉腰部位焦层厚度不小于200mm（气窗），有人为了恢复炉况走极端，把焦布在两头是不可取的（气窗堵了、间接还原差）。



3.2 装料制度

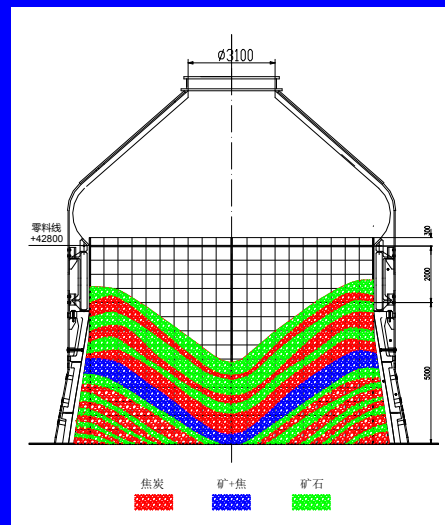
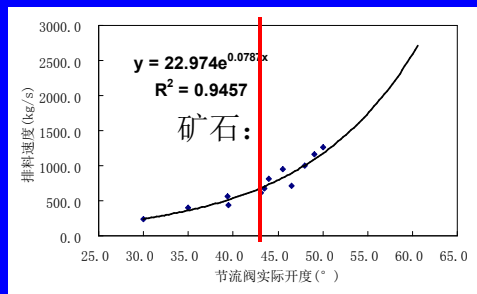
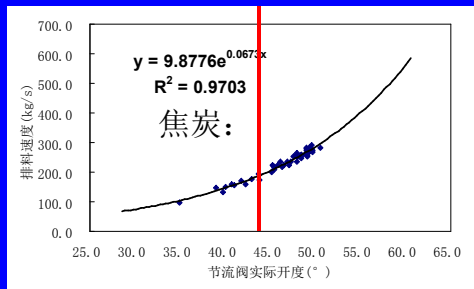
每次休风时观察测量料面形状

- 落点位置：一般最外侧100-300mm左右
- 平台宽度：约1/3半径,1/2面积，层状，混合层
- “两道”气流分配， $Z/W \approx 16 \sim 25$ ，半径方向上O/C分布，大小高炉不同， η_{co} 45~52%，煤气利用好坏反映在铁水温度PT 1450~1550℃。
- 圈数、料流大小（料流阀开度在中位附近，粒度）



等面积分几个（一般8-12个）档位。

实测某4000高炉料流调节阀开度与排料流量的关系式



某4000高炉实测料面

3.2 装料制度

例：落点位置很重要
“两道”气流



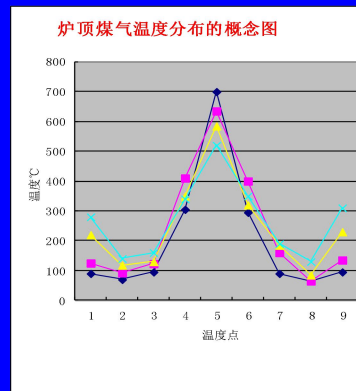
落点距炉墙太远，易失常
易炉凉， η_{co} 低 37%-45%
消耗高 FR 530-550

恢复操作不当，组合焦，频繁高[Si]，7%、低炉温，石墨碳堆积，烧坏风口小中大套等

3.2 装料制度

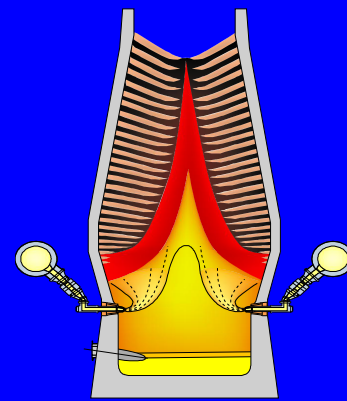
- 落点最外侧100-300mm，边缘要有气，所谓的“喇叭花”型
- “两道”气流分配，中心流/边缘流

$Z/W \approx 16 \sim 25$



高炉边缘温度要上翘

2014.9 A炉	C	41.9	40.4	38.4	36.3	34.2	31.6	29.1						
	O	41.9	40.4	38.4	36.3	34.2	31.6	29.1						
	C		3	3	2	2	2	2			14	35.6	0.6	1.5m
	O		2	3	3	3	2				13	36.2		1.5m
2018.9 A炉	C	41.8	40.2	38.2	36.2	33.9	31.2	28.1						
	O	41.8	40.2	38.2	36.2	33.9	31.2	28.1						
	C	2	2	2	2	2	2	2			14	35.7	0.5	1.4m
	O		2	4	4	3	2				15	36.1		1.4m
2019.7 A炉	C	41.8	40.4	38.4	36.3	33.9	31.2	28.1						
	O	41.8	40.4	38.4	36.3	33.9	31.2	28.1						
	C		3	3	3	2	2	2			15	35.4	1.1	1.50m
	O		3	4	4	3	2				16	36.5		1.50m



配图取自马丁先生资料

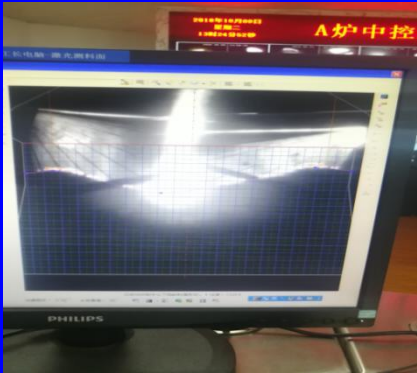
3.2 装料制度 例：BFA

2010年开始中心加焦，2013年逐步减少中心焦量，同时拓宽布料平台，以期改善指标。

高炉生产实践表明，中心加焦、“平台+漏斗”，都能实现高炉稳定顺行和指标改善。

一般中心加焦，冶炼条件变化时反应不敏感，消耗高10kg/t左右。若过分依靠中心气流，容易造成边缘过重，时间长易失稳。

“平台+漏斗”的模式，在稳定中心气流的前提下，适当疏松边缘气流，形成“两道气流”，压差低，能实现高炉长周期稳定顺行，消耗低，冶炼条件变化时反应敏感。



时间	常用布料制度				角差	料线
2007~2008年	C987654	222222	098765	23322	1.46°	1.3m
2009年	C10987654	2222222	098765	23332	0.18°	1.3m
2010~2012年	C987651	222224	098765	23332	5.89°	1.3m
2013年	C10987651	2222222	01098765	123332	2.49°	1.3m
2014年3月	C10987651	3322222	01098765	233321	2.76°	1.5~1.6m
2019年7月	C987654	333222	098765	24432	1.10°	1.5m

11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
43.6	42.1	40.1	38	35.9	33.6	31	28	24.5	20.5	13.5

3.3 热制度及渣铁制度

PT、[Si]、R2、R3、R4 渣铁流动性、炉缸工作状态及铁水质量
炉渣在四元相图粘度较低且较稳定的区域、熔化性温度合适。

日常操作：平衡好炉温、及时出净渣铁、控制好入炉料是最基本的工作，也是最重要的工作。

3.3 热制度及渣铁制度

出渣铁

及时出净，避免憋风，憋渣气流乱，8h以上，炉顶放散阀，憋铁烧风口等

(1) 出渣铁流量略大于生成量，钻头大小、铁次（~10），不具备连续出铁条件的小炉子，铁次多（~18）

(2) 大炉子多铁口循环出，有利于周向均匀、中心透液性（炉芯温度）

(3) 保持铁口深度相对稳定（每次出铁观察开口机铁口深度、或用吹氧管测等），逐步增减，炮泥质量和计数

(4) 出渣铁时间、间隔、重叠等

(5) 试设备、沟、泥套、罐检查等

例：某高炉出
渣铁管理

(6) 开口位置要准确 (中心定位钩)

例：开口
烧坏冷却壁
闷炮烧坏



多个钻孔位



烧坏铁口区冷却壁

(四)、高炉稳定顺行评价



高炉体检运行评价风险防控体系建立与实施

项目	序号	指标名称	单位	指标类别	分值
指标检查	1	日产量	t	一类指标	4
	2	燃料比	kg/t	一类指标	4
	3	煤比	kg/t	一类指标	4
	4	全焦负荷O/C		一类指标	4
送风参数	5	风压稳定性	kPa/30min	一类指标	4
	6	压差	kPa	一类指标	4
	7	透指		一类指标	4
	8	实际风速	m/s	二类指标	3
	9	鼓风动能	kg m/s	二类指标	3
	10	Tf	℃	二类指标	3
煤气流监控	11	炉顶温度	℃	二类指标	3
	12	顶温极差	℃	二类指标	3
	13	炉喉钢砖温度	℃	二类指标	3
	14	炉喉钢砖温度极差	℃	二类指标	3
	15	CCT	s	二类指标	2
	16	十字测温边缘	℃	三类指标	2
	17	煤气利用率	%	三类指标	2
	18	控尺差	m	三类指标	2
	19	崩料、坐料次数	1次/日	三类指标	2
	20	日出铁次数	次	三类指标	2
渣铁处理	21	铁口温差	℃	三类指标	2
	22	来渣时间	min	三类指标	2
	23	日出铁间隔>40min的次数	次	三类指标	2
	24	PT	℃	三类指标	2

项目	序号	指标名称	单位	指标类别	分值
铁水炉渣	25	[C]	%	三类指标	2
	26	[Si]	%	三类指标	2
	27	[Ti]	%	三类指标	2
	28	αSi	%	三类指标	2
	29	(MgO)	%	三类指标	2
	30	R2		三类指标	2
炉体炉缸监控	31	(Al2O3)	%	三类指标	2
	32	炉腰温度(6X)	℃	四类指标	1
	33	炉缸水温差平均值	℃	四类指标	1
	34	炉缸水温差最大值	℃	四类指标	1
原燃料质量检查	35	焦炭 M40	%	四类指标	1
	36	焦炭 M10	%	四类指标	1
	37	焦炭 CRI	%	四类指标	1
	38	焦炭 CSR	%	四类指标	1
	39	焦炭水份	%	四类指标	1
	40	日焦粉量	t/d	四类指标	1
	41	粉焦比	kg/t	四类指标	1
	42	入炉筛丁比	kg/t	四类指标	1
	43	烧结返粉	kg/t	四类指标	1
	44	一次灰比	kg/t	四类指标	1
有害元素检查	45	瓦斯灰含C	%	四类指标	1
	46	球团		四类指标	1
	47	Zn负荷	g/t	四类指标	1
	48	碱负荷	kg/t	四类指标	1
					100

判别高炉的顺行参数及相应控制范围

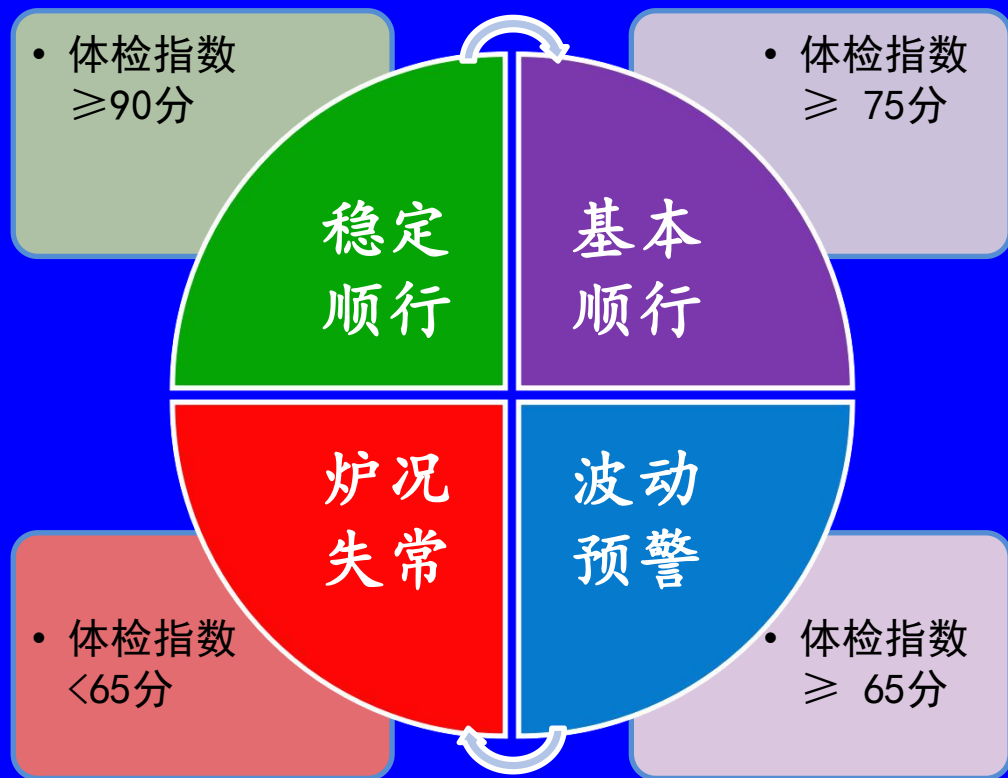
项目	好	注意	坏
△P, kPa	150-170	171-185	≥186 ≤149
K值	2.10-2.50	2.51-2.70 1.95-2.09	≥2.71 ≤1.95
σ _{BP} , kPa	≤35	36-55	≥56
η _{co} , %	50.5-52.5	49.5-50.5 52.5-53.5	≥53.5 ≤49.5
△SD, mm	≤35	36-60	>60
3S+D, 次数	0	≤3	>3

5H+3S+D 顺行指数

H-悬料, S-崩料, D-滑料

摘自2014年第4期《炼铁》

高炉体检运行评价风险防控体系建立与实施



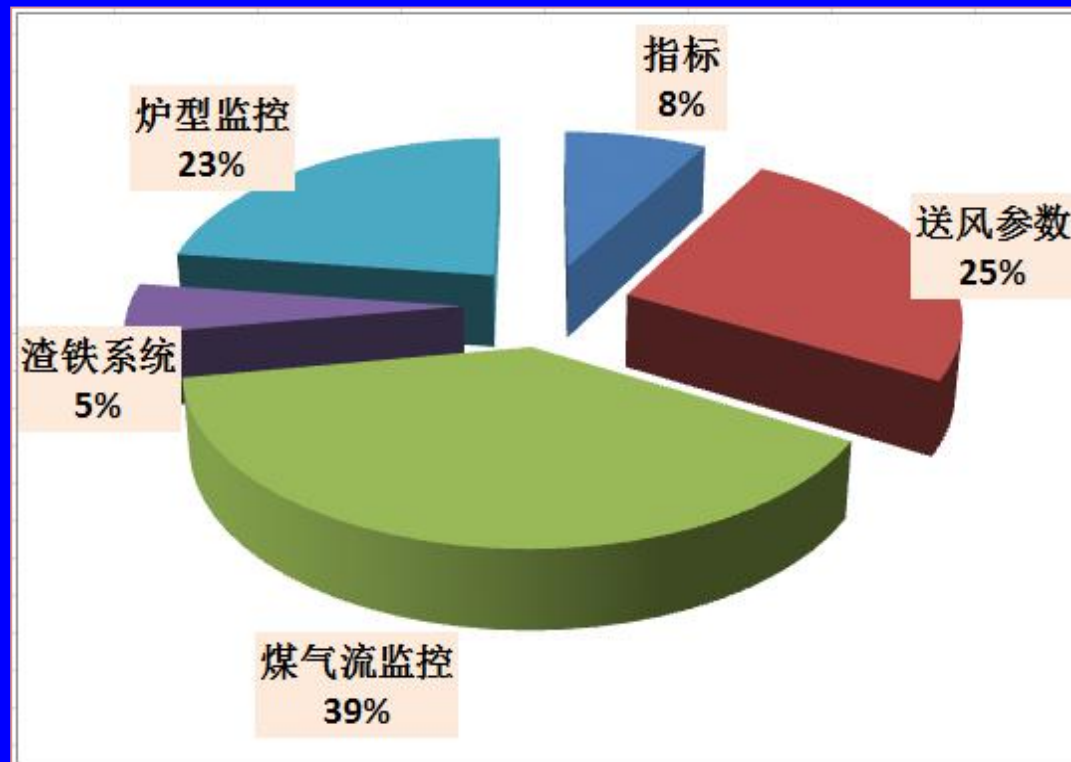
$$S = \sum_{i=1}^n (T_{\text{顺行判断参数}})$$

S—体检指数



高炉体检失分项管控

分丢哪儿了？

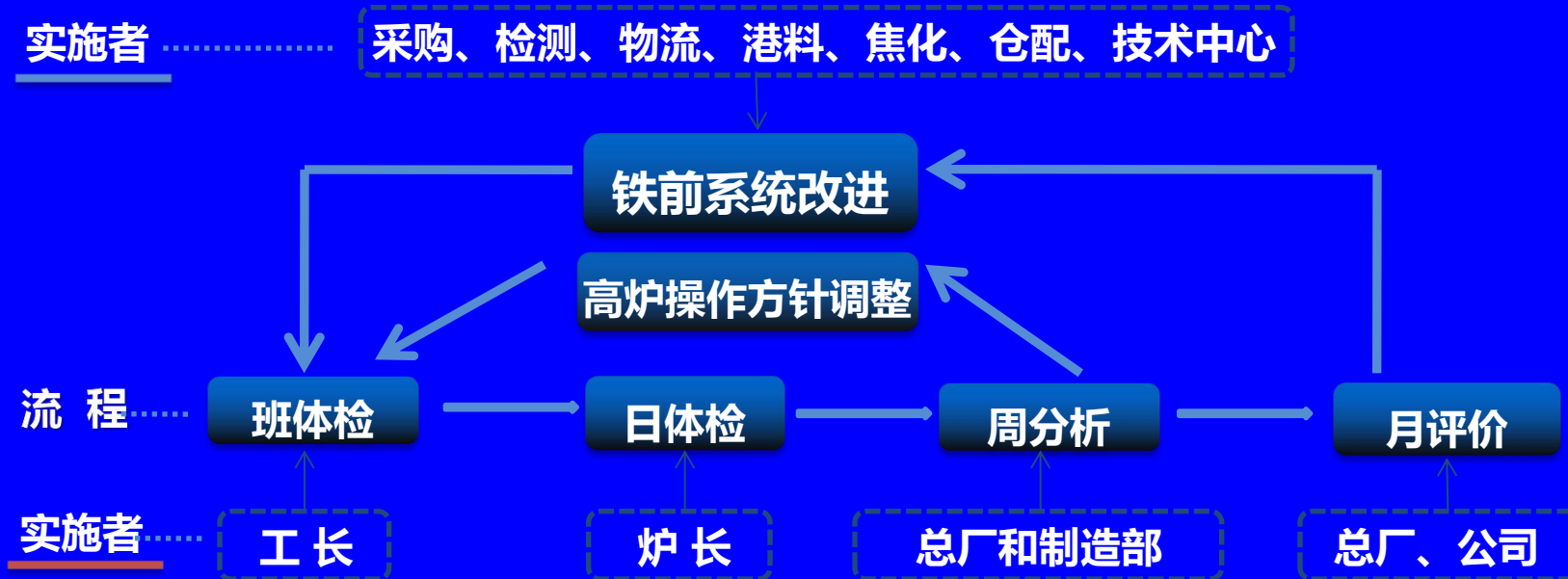


针对主要失分项

分析措施改善

高炉体检运行评价风险防控体系建立与实施

四级体检体系



高炉体检运行评价风险防控体系建立与实施

通过体检，数据化、规范化代替经验化、模糊化，及时发现问题、及时预警，更关键是快速反应和应对、及时协调解决出现的问题，形成了铁前事事有应答，件件有人管的全方位、无死角“保姆式”服务保障机制。

打破信息壁垒，消灭信息孤岛，信息化平台实现信息共享；

二、低碳炼铁

面对煤炭总量、总碳耗的限制 绿色发展、智慧制

（一）坚持精料和优化高炉操作：

1.1 高炉精料 技术是高炉高效化冶炼的前提与基础，减少脉石和灰分、减少水分、减少有害元素等——降低能耗、运费、提高产量等。高炉低碳炼铁的重点是降低燃料比。

降低原料 SiO_2 一个百分点，则可少配 CaO （或 MgO ）约1.2~1.35个百分点，入炉品位可有效提高，关键是要解决低 SiO_2 烧结问题，一般 $\text{CaO}/\text{SiO}_2=1.8-2.0$ 、 $\text{SiO}_2 4.7\%\sim 5.1\%$ 烧结矿质量不错，烧结矿 SiO_2 低于4.6%要有一定的烧结措施，优化配料，通过试验选择：高温烧结性能同化性（与 CaO 反应形成液相的能力）好、液相生成数量及其流动性高；粘结相自身强度高，易生成稳定的SFCA的烧结用含铁原料等。低碳、厚料层（有的900mm以上）、慢速烧结，热风烧结，喷煤气蒸汽等烧结技术。

有人说球团矿品位比烧结矿高不少，其实扣除烧结矿钙镁后差别没那么大，因此球团矿 SiO_2 要降低，最好3%以下。现在将烧结镁转移到球团值得试。

焦炭质量对高炉的影响极其重要：高炉炉况稳顺、高炉喷煤量、高炉产量和消耗。焦炭的灰分、强度和粒度指标等。焦炭是决定软熔带气窗、风口回旋区和炉缸中心死料堆透气透液性的关键因素。空隙度变小，透气性或透液性差，造成炉况不顺，塌料、管道、悬料等，严重影响生产，燃料比升高，产量降低。

1.2 优化高炉操作 提高风温，改进热风炉系统及其结构，选用优质耐火材料，采用先进换热技术，使热风炉寿命达到~30年，烧单一高炉煤气，稳定达到风温1200℃以上。顶燃式热风炉，风温全送，使风温与热风炉拱顶的温度差稳定在80℃-100℃（短焰、高效换热、并联、热均等）。

在优化矿石与焦炭性能基础上，改进布料，将煤气利用率提高到50%-51%的先进水平。

优化高炉炼铁系统的设备配置与装备升级，实现设备大型化、自动化，稳定高炉运行，降低设备故障与非计划检修；开发智能炼铁技术，减少炼铁系统的人为操作失误，提升效率。

有效实施二次资源与能源的回收利用，提高利用效率，实现节能减排。

（二）喷吹高氢含碳气体或固体燃料：

2.1 喷吹焦炉煤气等，以氢替碳 焦炉煤气在国内被认为是最有潜力的高炉喷吹燃料之一，尤其是钢铁联合企业。

早在20世纪70年代，本钢、徐钢和鞍钢等进行过高炉喷吹焦炉煤气试验和生产。

2013年5月9日，中冶东方的专利技术“高炉喷吹焦炉煤气系统”在辽宁省后英集团海城钢铁有限公司2座580 m³高炉得以应用。焦炉煤气喷吹量维持在50 m³/t HM左右，置换比为0.45~0.50，高炉正常，喷吹焦炉煤气效果逐步显现。

国内研究表明，高炉喷吹焦炉煤气后，高炉上部温度水平降低，软熔带收窄且位置下移，H₂还原FeO反应速度加快，间接还原加强，富氢还原率提高。当喷吹50 m³/t HM焦炉煤气时，生铁产量提高30.12%，焦比和固体还原剂消耗量分别降低12.44%和9.18%，高炉碳素净排放减少8.61%，能量利用效率提高，吨铁生产成本降低。

2.2 喷吹废塑料、橡胶等

① 喷吹塑料能充分利用废旧塑料资源，塑料对焦炭的置换比大于1.1，可以增加高炉煤气的发热值。与高炉喷煤相结合，可以大改善煤粉燃烧条件，利于风口前物料的快速燃烧。

② 喷吹橡胶的燃烧率要高于煤粉，通常在相同条件下橡胶的燃烧率是煤粉的2-3倍。

③ 喷吹煤粉、兰炭等降低炼铁碳耗的作用有限。

(三) 氧气高炉：脱除 CO_2 的顶煤气循环氧气高炉炼铁，可降低碳消耗24%左右。

3.1 与传统的高炉炼铁相比，氧气高炉采用全氧鼓风，由于煤气中 N_2 的体积分数大幅度下降到2%左右，煤气中的 CO 、 CO_2 体积分数将比传统高炉体积分数提高一倍以上，分别达到50%、40%以上， H_2 浓度也提高到8%左右。

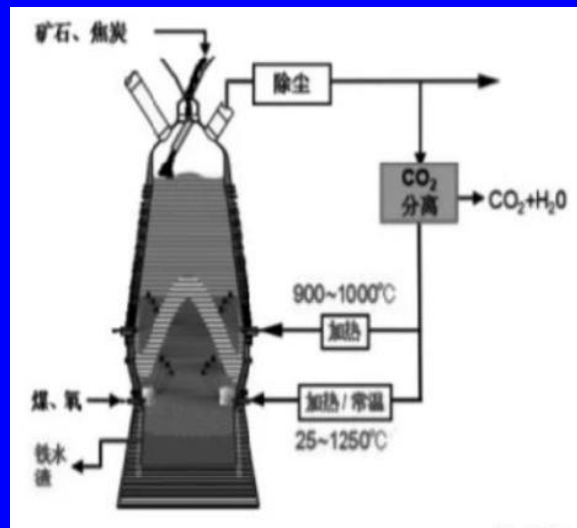
3.2 氧气高炉炼铁特点：

(1) 采用全氧鼓风，煤气中低体积分数的 N_2 使得 CO 、 CO_2 分离提纯的成本大幅降低。煤气中 CO_2 体积分数的大幅提升还为降低大气碳排放而做的 CO_2 捕集封存和资源化利用提供了可能；

(2) 采用顶煤气循环，可大幅度降低燃料比；

(3) 可大幅度提高喷煤量，降低焦比；

(4) 可大幅度提高生产效率。



顶煤气循环氧气高炉
工艺流程示意图

氧气高炉炼铁

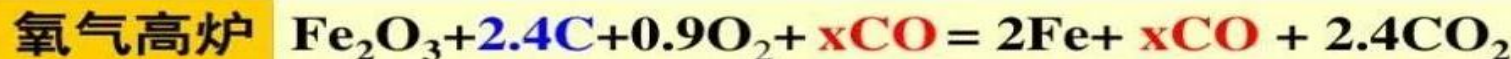
减碳潜力分析：为什么用全氧？



节能40%

热空气
↓
氧气

低品位煤气
↓
高品位煤气



实际节能25%

纯二氧化碳

3.0C (扣除制氧能耗、CO₂分离能耗、煤气输出余能)

氧气
高炉
优势

- 节能~25%
- CO₂减排~25%
- 焦炭消耗减少~50%

技术
经济
瓶颈

- 低成本CO₂分离
- 煤气加热

全氧炼铁：能源梯级转化的关键技术

传统高炉炼铁用空气，大量过剩煤气： $\sim 27\% \text{CO}$, $22\% \text{CO}_2$, $\sim 51\% \text{N}_2$

- ◆ 热值低，发电效率低 $\sim 23\%$
- ◆ CO_2 分离成本高，难于化工

全氧炼铁：熔融还原炼铁
氧气高炉炼铁

煤气： $\sim 50\% \text{CO}$, $\sim 8\% \text{H}_2$,
 $\sim 40\% \text{CO}_2$, $\sim 2\% \text{N}_2$

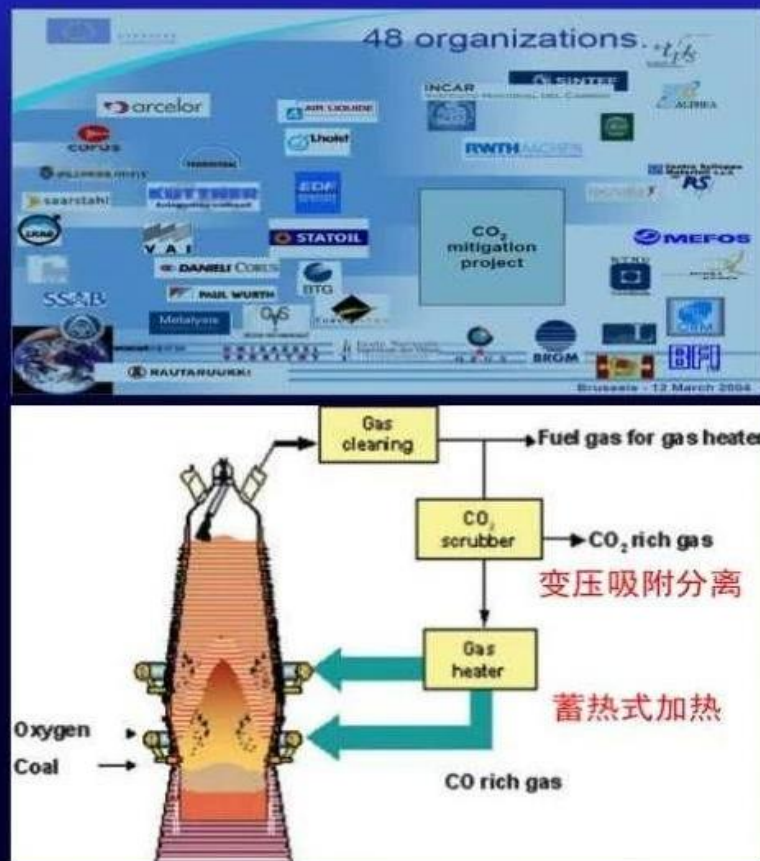
- ◆ 热值高，燃气发电效率高
- ◆ CO_2 分离成本低，便于化工



微信号: wechat

氧气高炉炼铁进展

- 2004年欧盟启动了超低CO₂排放的新一代钢铁流程计划，其核心是氧气高炉炼铁。
- 2008年完成了8m³氧气高炉试验：
 - 碳消耗减少24%
 - 焦比210kg/t铁
 - CO₂减排
 - ◆ 26%（无CO₂捕集封存）
 - ◆ >50%（有CO₂捕集封存）



3.3 氧气高炉炼铁工业试验

- ① 1986年日本NKK公司（4m³试验高炉）和住友开展过单纯氧气高炉（无煤气循环）的试验。
- ② 1985~1990年俄罗斯曾 将图拉 2#1033m³高炉改造为顶煤气风口喷吹的氧气高炉（无炉身喷吹），并开展了13次工业试验。
- ③ 2007年瑞典在9m³试验高炉开展过顶煤气循环氧气高炉的试验研究。
- ④ 我国的炼铁工作者对氧气高炉进行了长期的理论分析和实验研究，从理论上证明了全氧鼓风炼铁的可行性。

2009年6月钢研总院先进钢铁流程及材料国家重点实验室与五矿营钢合作在营钢建设了一座8m³ 氧气高炉，进行了工业化试验，迈出了我国全氧鼓风炼铁工业试验第一步。试验共进行了三个阶段：第一阶段试验实现了顺利出铁，设备连续运行15天，吨铁喷煤量达到了 300kg/t；第二阶段试验连续运行了23天，主要解决了氧煤喷吹装置的冷却和容易出现悬料的问题，吨铁喷煤量达到了450kg/t；第三次试验连续运行了18 天，进行了炉身喷吹焦炉煤气试验，吨铁焦炉煤气喷吹量为180m³/t，喷煤量降低到400kg/t，实现了预期目标。

⑤ 2020年7月15日，宝武集团新疆八一钢铁有限公司氧气高炉点火开炉，第一阶段的工业试验正式启动。

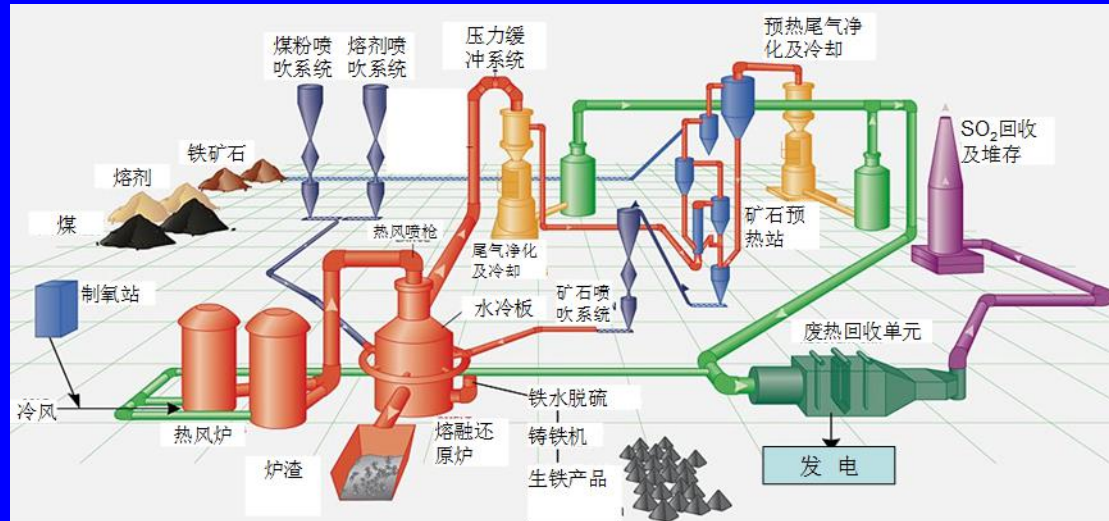
宝武为推进高炉炼铁工艺低碳、高效冶炼技术进步，以八钢原 2#高炉（430m³）系统为基础，通过设备改造、技术提升和分阶段实施，搭建了一个具备煤气脱除CO₂、煤气加热、高富氧、顶煤气循环等功能的氧气高炉低碳炼铁工业试验平台。通过系统研究，探索钢铁行业低成本运营和低碳高效的发展模式。

（四）熔融还原

4.1、Hismelt工艺：

是一种直接使用粉矿、粉煤的铁浴熔融还原炼铁工艺。省去了对环境污染较重的烧结、炼焦、球团等铁前工序。可以用来处理企业内部产生的尘泥等。

该工艺于1982年由力拓开始研发, 2003年1月开工建设HIs melt示范工厂, 2005年4月开炉, 2008年12月停产。2012年奎那那的HIs melt工艺装置搬迁至中国山东墨龙。



Hismelt工艺流程图

墨龙Hlsmelt

中国山东墨龙已经开发出了能够稳定运行3个月以上的墨龙Hlsmelt工艺，实现粉矿、粉煤生产高温液态的铁水。

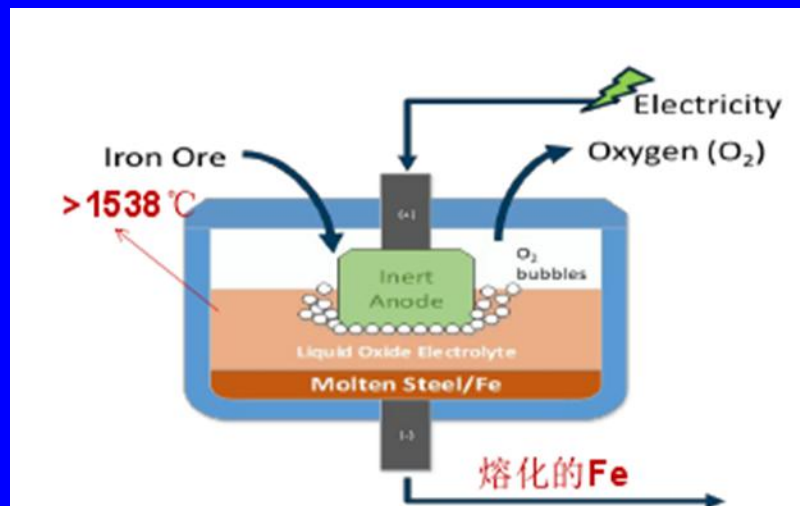
墨龙Hlsmelt入炉含铁原料综合品位为50%-61%，渣铁比为400kg/t（渣中含水15%），含铁物料经回转窑设备预热（750℃）预还原后，由喷枪喷入熔融还原炉，煤粉和熔剂也由喷枪喷入。主要入炉原料用量为含铁物料（1.6t/tHM）、煤粉（0.855t/ tHM）、白云石（0.1 t/tHM）、石灰（0.11t/ tHM）。

配套3座热风炉，富氧（30%-40%）热风（1000-1200℃）从炉顶喷入。入炉风量为140 000m³/h，煤气量为232 000m³/h，最大日均产量为1930t/d。

其产品中磷元素质量分数为0.015%-0.030%，基本不含硅、锰等元素，硫质量分数为0.030%-0.095%，其他五种五害元素（铅、锡、砷、锑和铋）含量小于0.001%。

[选自炼铁，2018，37(2)：56-60]

4.2、熔融氧化物电解还原



熔融氧化物电解（MOE）过程示意图

美国炼铁降碳：

1、熔融铁氧化物电解（麻省理工MIT研发25年，波士顿电冶金公司）。

目前水平：4976kWh/t Fe，
(17.9GJ/t Fe)；MOE目标：3500kWh/t Fe，
(12.6GJ/t Fe)；理论极限值：
2660kWh/t Fe，(9.6GJ/t Fe)。

2、新型闪速炼铁工艺（美钢协）一种使用精矿粉和天然气直接闪速还原的炼铁技术。相比于高炉炼铁工艺，有望降低32%~57%的燃料消耗以及61%~96%的CO₂排放[4]。

（五）低碳炼铁发展探讨

目前以高炉炼铁为主要工艺流程，兼顾发展新型炼铁工艺技术。

高炉炼铁降低碳消耗的方法为开发喷吹高含氢的气体或固体燃料，如焦炉煤气、废旧的塑料或橡胶等。

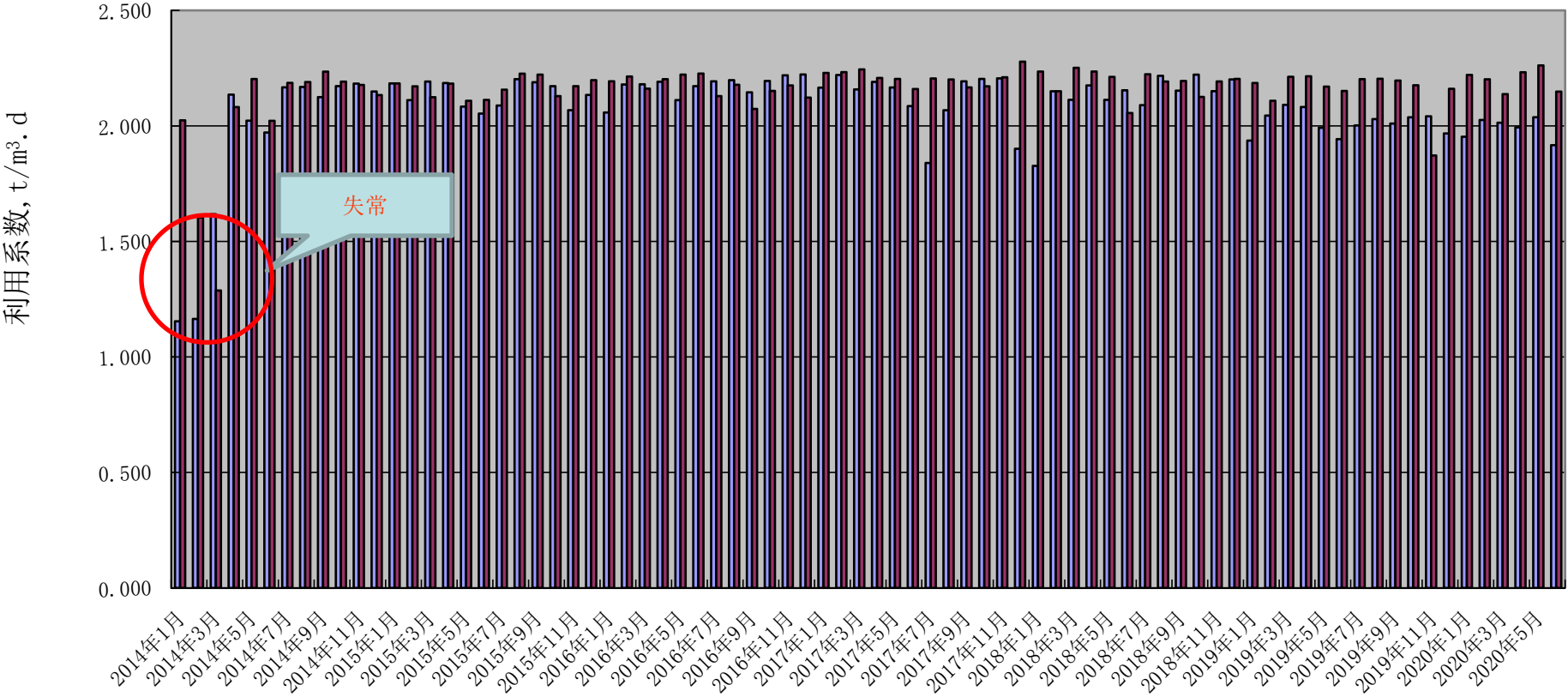
应发展低碳炼铁环保方面最有优势的氢冶炼、氧气高炉与HIsmelt工艺等。

氢能源冶炼是国内外钢铁工业降碳减排发展的方向，目前还处在如何经济地大规模制取氢气研究阶段。氧气高炉炼铁与现有高炉较为兼容。

马钢AB高炉（4000m³）近年利用系数

2014. 1-2020. 6

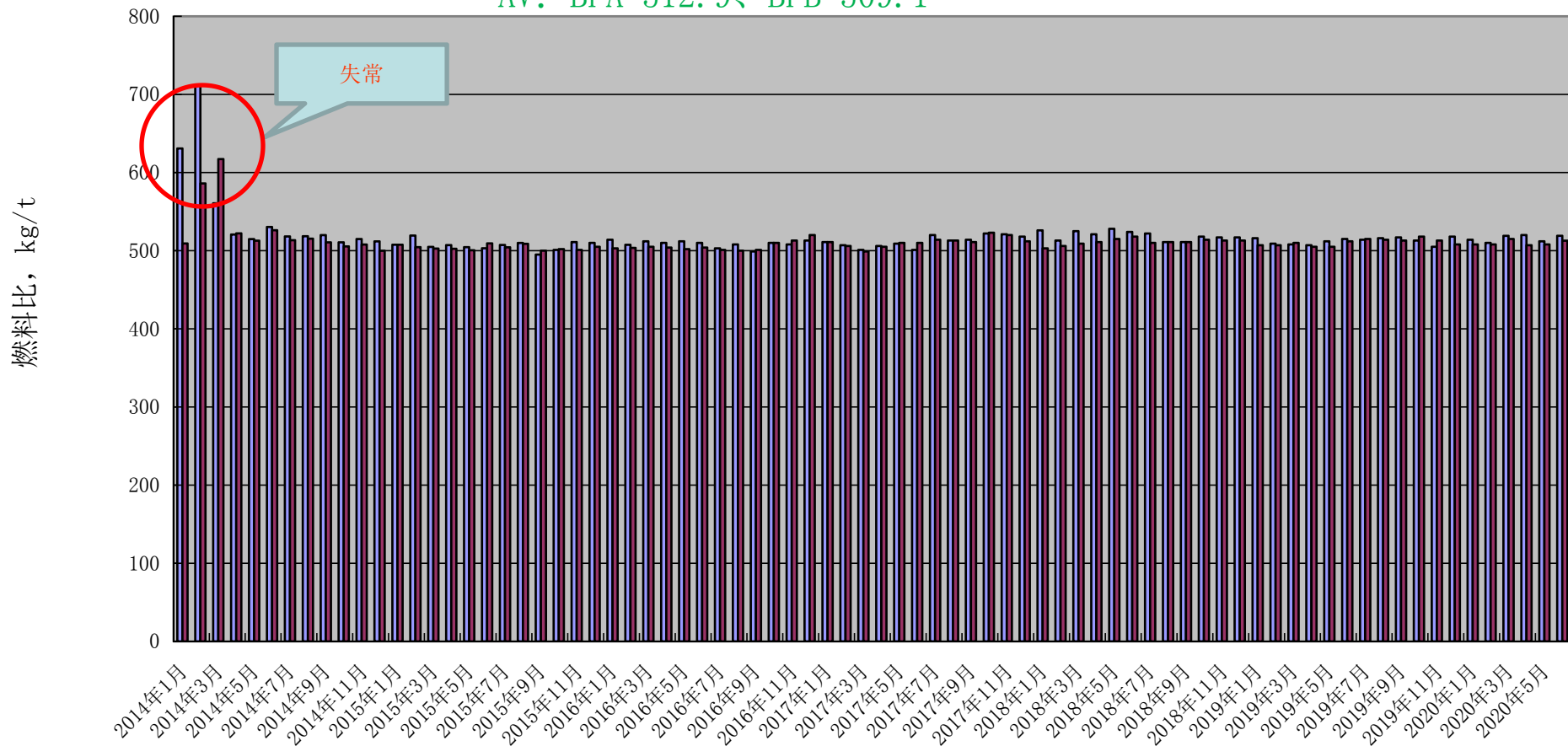
AV: BFA 2.105、BFB 2.177



马钢AB高炉（4000m³）近年燃料比

2014. 1-2020. 6

AV: BFA 512.9、BFB 509.1



380m²烧结生产指标

年份	层厚mm	机速m. min-1	作业率%	入炉量, 万吨	入炉比%	烧结负压kPa	工序能耗	固体燃耗
2010	885	2.05	96.44	736.77	73.00	-16.9		53.18
2011	892	1.93	96.75	726.72	72.43	-16.1		53.45
2012	901	1.83	95.48	710.53	70.09	-15.7		51.74
2013	898	1.75	96.17	735.37	70.65	-15.3		53.97
2014	893	1.67	90.17	665.16	70.86	-14.1	54.22	52.16
2015	897	1.63	97.29	732.54	71.92	-13.7	53.41	53.30
2016	910	1.59	97.38	740.97	71.98	-13.4	51.42	52.78
2017	910	1.53	92.82	710.24	71.84	-13.9	51.48	53.18
2018	902	1.52	97.23	705.69	70.46	-14.8		51.05
2019	900	1.42	96.85	696.80	70.93	-13.6		48.24

380m²烧结矿品质

年份	TFe	转鼓	吨铁返粉	返矿配比	含粉	R σ n	FeO σ n	RDI+3.15
2010	57.31	77.85	256	33.5	2.05	0.066	0.588	
2011	56.80	78.45	239	32.7	2.02	0.060	0.587	
2012	56.58	79.05	234	31.5	2.02	0.060	0.508	
2013	56.33	78.59	225	29.2	2.12	0.058	0.475	
2014	56.58	78.83	201	27.3	2.12	0.060	0.469	70.18
2015	57.10	78.97	194	25.5	2.10	0.037	0.329	72.82
2016	57.30	80.45	161	24.5	2.17	0.040	0.343	73.30
2017	57.20	80.69	147	24.8	2.12	0.041	0.343	77.81
2018	57.42	80.37	151		2.03			71.35
2019	57.28	80.50	163		2.02			68.47

欢迎交流指正
谢谢！

