

高炉富氧与喷 吹煤粉

汤清华
2024.2.

安钢厂区高炉群.2017

目录

- 高炉喷吹煤粉的作用
- 高炉喷煤工艺变化
- 高炉喷吹煤粉的安全
- 适合高炉喷吹的煤种
- 我国高炉喷煤发展简况
- 高炉喷煤冶炼及操作
- 富氧鼓风冶炼特征
- 高炉富氧喷煤强化冶炼
- 实现高炉喷煤比达到250kg/t.fe

冶金职业
技能培训

中国金属学会组织

丛书

高炉喷吹煤粉 知识问答

(第2版)

汤清华 王筱留 祁成林 等编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

高炉喷吹煤粉重要意义

高炉喷煤对现代高炉炼铁来说是革命性的新技术，也是高炉炼铁能否与其他炼铁方法竞争，继续生存和发展的关键技术。

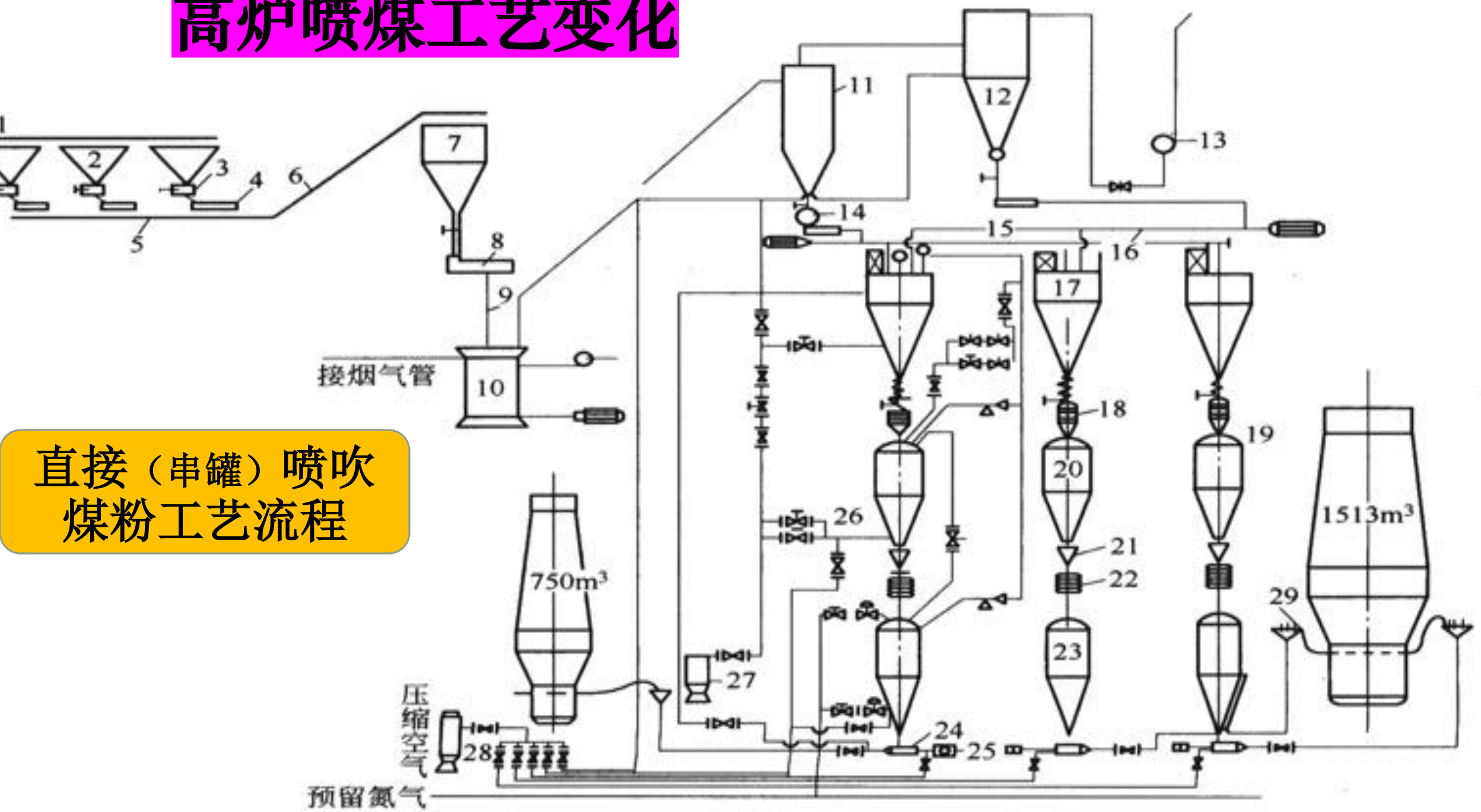
1. 以价格低廉的煤粉部分代替价格昂贵且日趋匮乏的冶金焦炭，降成本和优化资利用。
2. 喷煤是调剂炉况热制度的有效手段。
3. 改善炉缸工作状态，使高炉稳定顺行。
4. 煤粉气化分解会有降低 $t_{理}$ 现象，为高炉使用高风温和富氧创造了条件。
5. 比燃烧焦炭放出的氢气多，提高煤气还原能力和穿透扩散能力，有利矿石还原和高炉操作指标的改善。
6. 代替部分焦炭，缓和了焦煤的需求，减少了炼焦设备及投资。
7. 减少用焦也降低了炼焦生产对环的污染。

高炉喷吹煤粉的发展

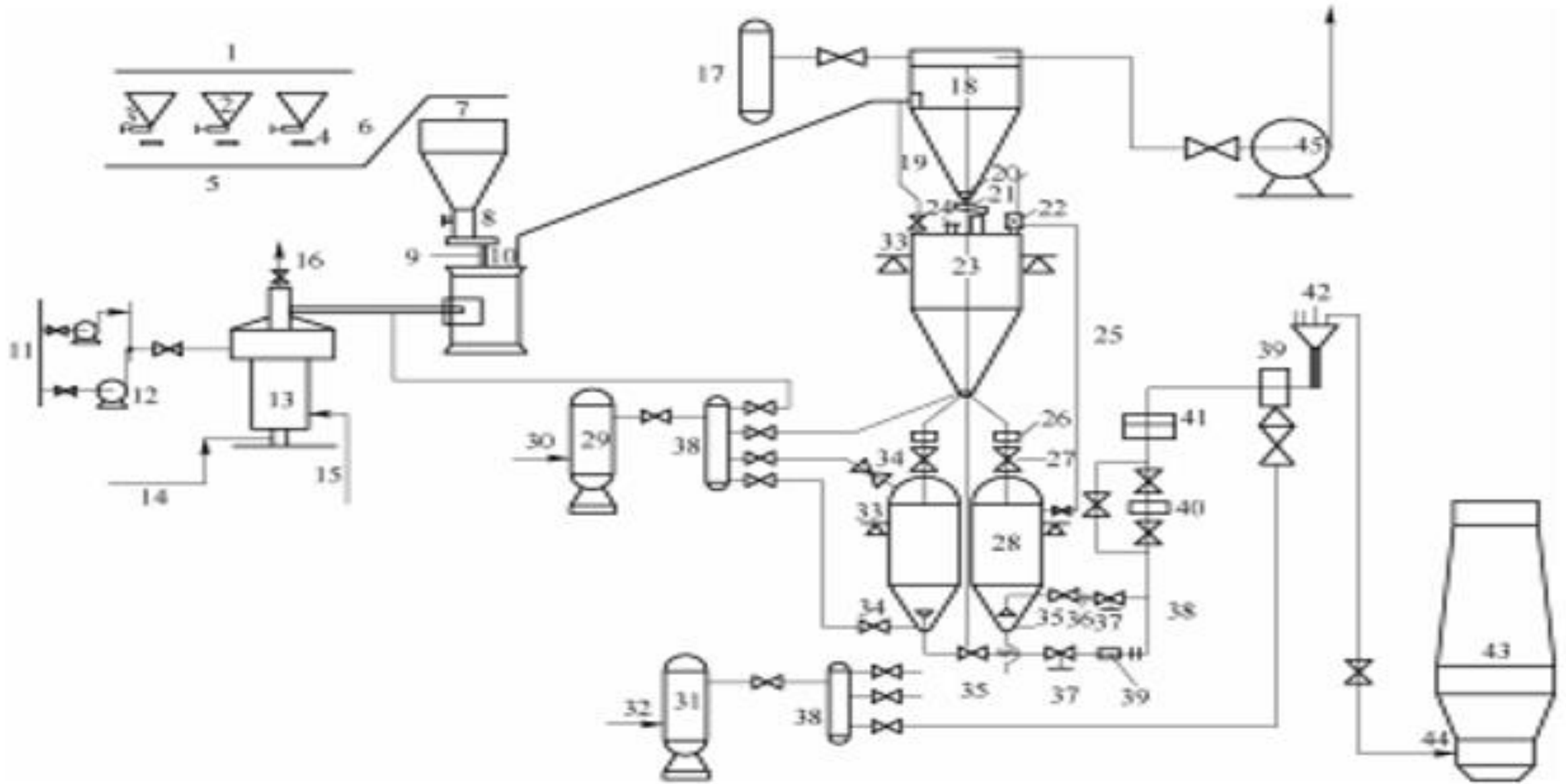
- 1840-1845年 法国马恩省铁厂喷吹木炭屑开始。 (1881年形成专利，直至20世纪60年代开始用于生产。
- 1961.1.美国阿姆克什兰厂第一套喷煤工业装置
- 1963初我国鞍钢和首钢都开始工业试验
- 20世纪60-70年代世界进展很缓慢，主要喷吹重油和天然气
- 此期间我国高炉喷吹煤粉的高炉座数和喷吹量均处于世界领先地位
- 高炉喷吹煤粉迅速发展是从第二石油危机以后

高炉喷煤工艺变化

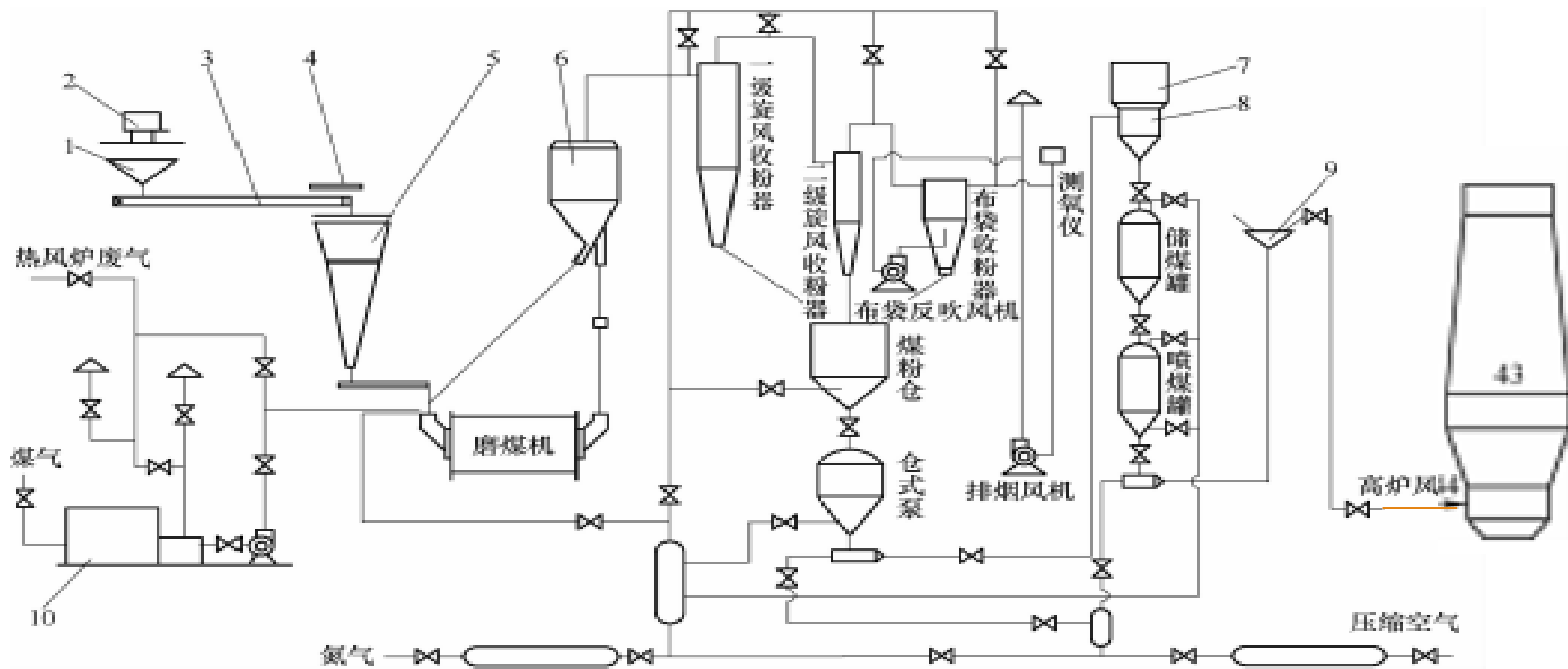
直接（串罐）喷吹煤粉工艺流程



直接（并罐）喷吹煤粉工艺流程



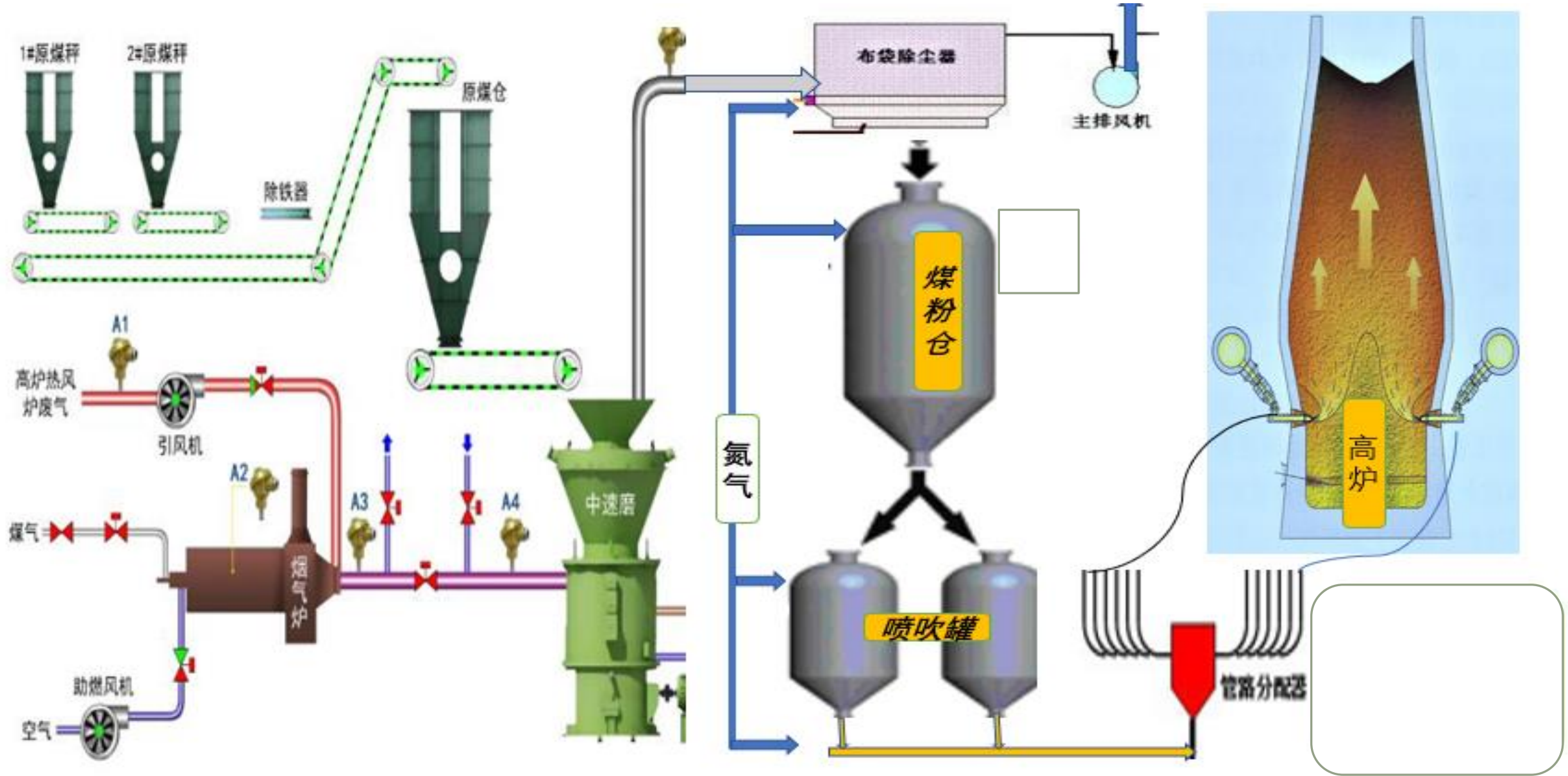
间接喷煤工艺流程

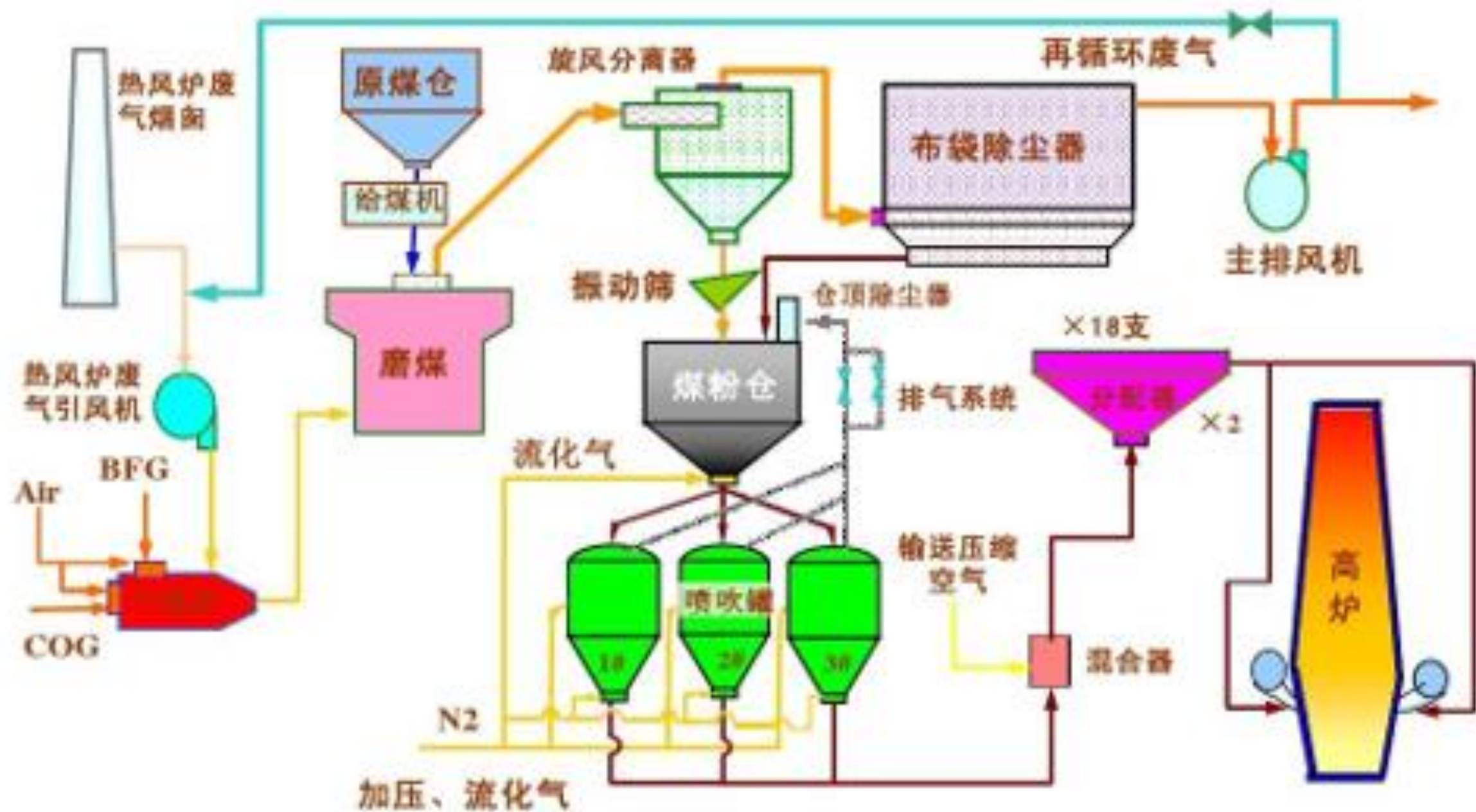


传统的间接喷煤工艺流程图

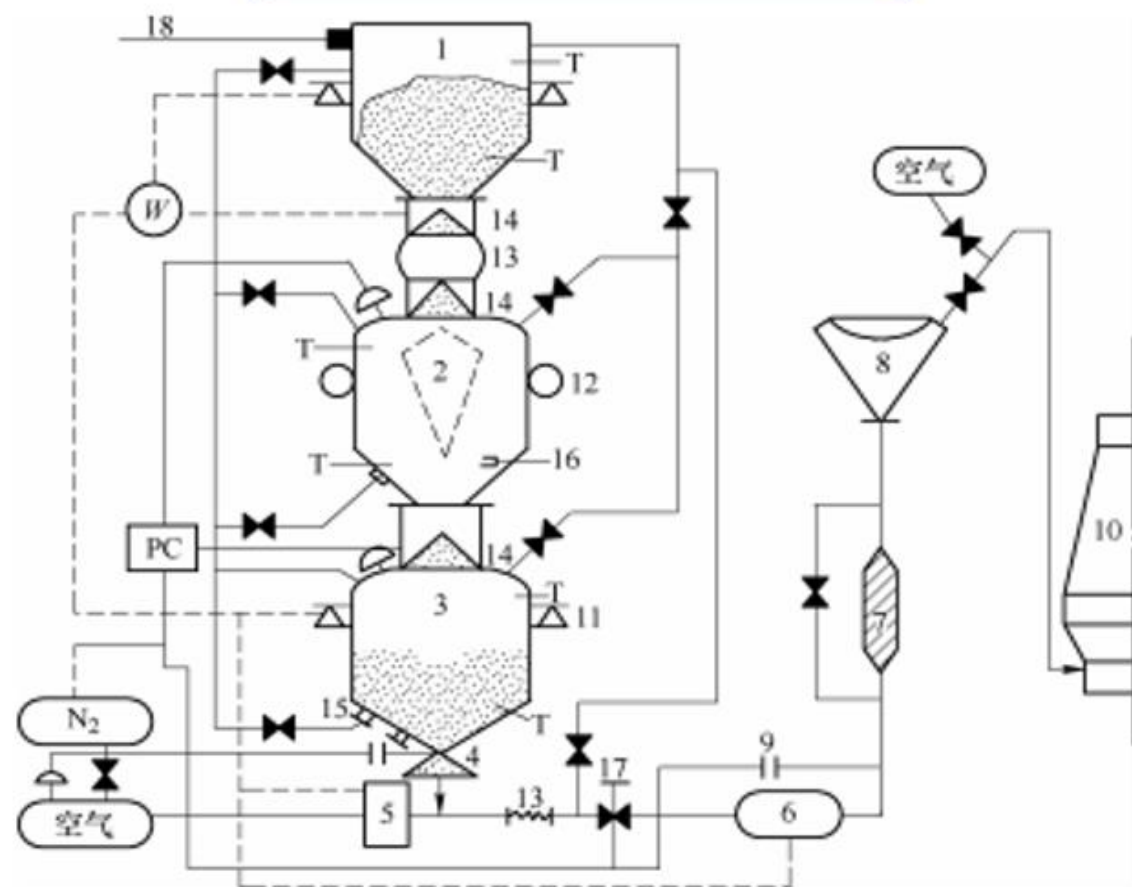
1—原煤槽;2—卸煤机;3—皮带运输机;4—电磁除铁器;5—原煤仓;6—粗粉分离器;7—布袋收粉器;8—收煤罐;9—分配器;10—燃烧炉

高炉喷吹煤粉工艺流程图





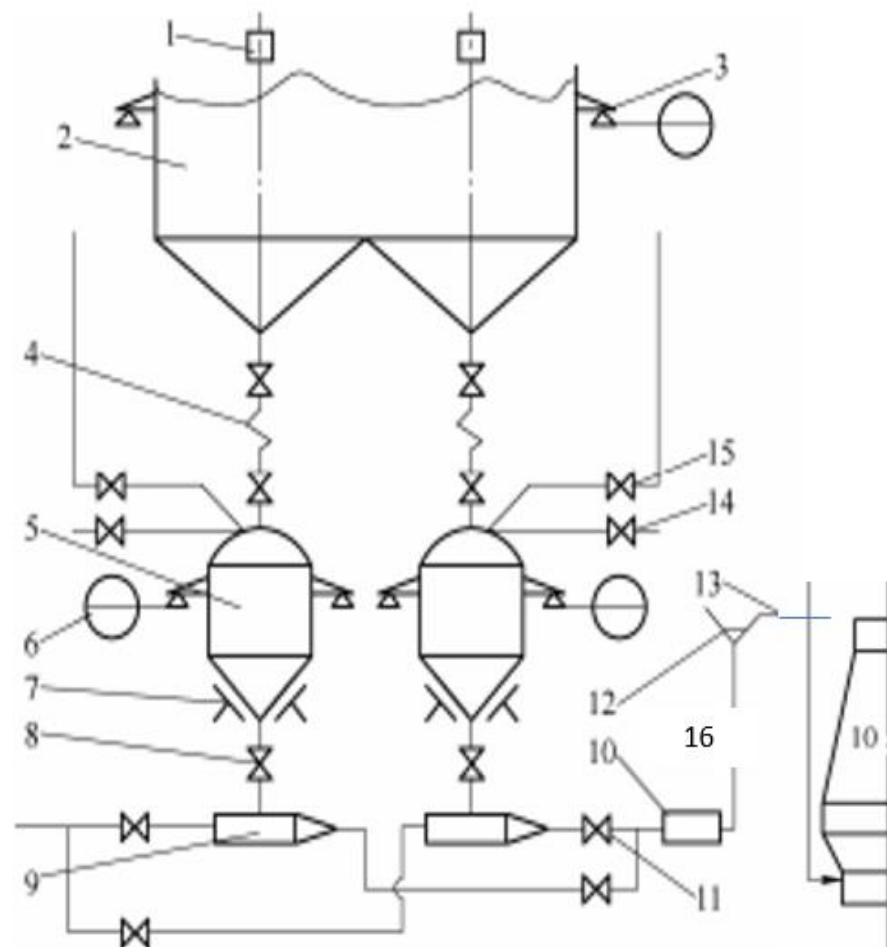
串罐式喷煤装置



串罐式喷煤装置

- 1—收煤罐；2—贮煤罐；3—喷煤罐；4—下煤阀；5—混合器；6—总管计量；
7—过滤器；8—分配器；9—喷吹压力计；10—高炉；11—电子秤；12—定位器；
13—软连接；14—摆动钟阀；15—流化器；16—料位计；17—安全切断阀；
18—输煤总管；W—连续计量；T—防爆电偶

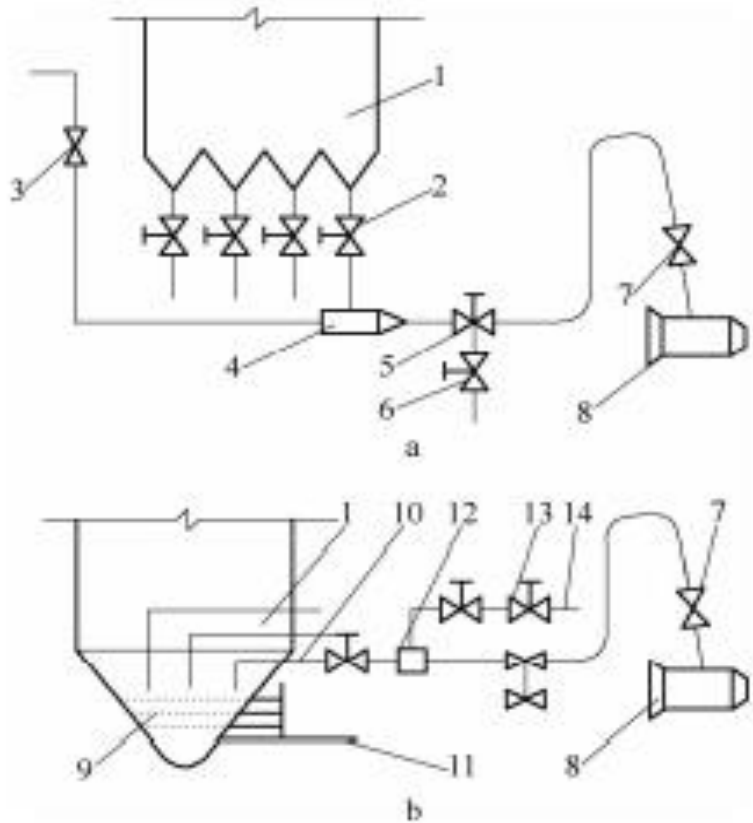
并罐式喷煤装置



并列式喷煤装置

- 1—下粉阀；2—煤粉仓；3—电子秤；4—软连接；5—喷煤罐；6—电子秤；
7—过滤器；8—下煤阀；9—混合器；10—高炉；11—切断阀；
12—分配器；13—喷煤支管；14—充压阀；15—放散阀

多管路喷吹煤粉工艺

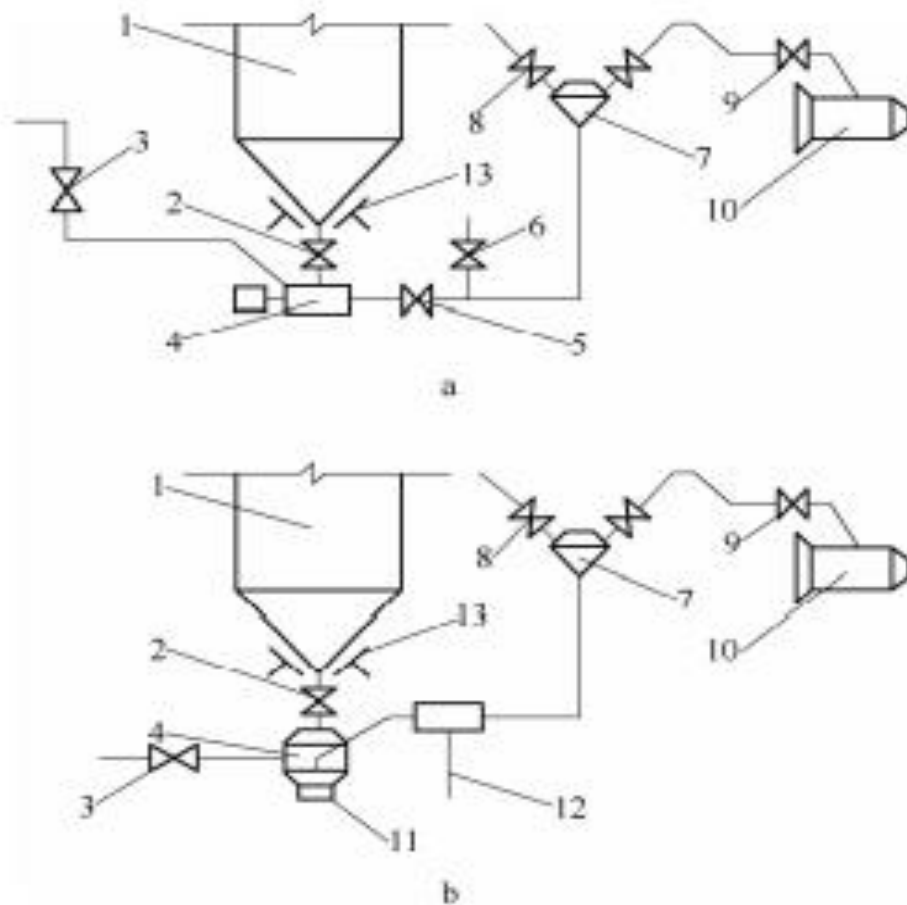


多管路喷吹煤粉工艺流程示意图

a—下出料；b—上出料

- 1—喷煤罐；2—下煤阀；3—压缩空气阀；4—混合器；5—三通旋塞阀；
6—吹扫阀；7—喷枪；8—高炉风管；9—流化板；10—煤粉导出管；
11—流化风管；12—合流管；13—二次风调节阀；14—二次风

单管路喷吹煤粉工艺



单管路喷吹煤粉工艺流程图

a—下出料；b—上出料

- 1—喷煤罐；2—下煤阀；3—压缩空气阀；4—混合器；5—自动切断阀；
6—吹扫阀；7—分配器；8—送煤阀；9—煤枪；10—高炉直吹管；
11—流化室；12—二次风；13—流化装置

高炉喷吹煤粉的安全

煤和煤粉为易燃、易爆物质，空气中存在自燃，着火点低即点火能量低、燃烧为链式爆燃反应，爆炸粉尘浓度范围宽。

燃料燃烧爆炸的三要素：有可燃物，有O₂存在，有最低点火能量。

安全措施关键点：使爆炸三要素不同时存在。

制粉喷吹系统的主要防火防爆措施：

- (1) 系统内气氛惰化，(烟气：系统内含O₂<12%)
- (2) 防止系统内部积粉
- (3) 防止静电和明火
- (4) 建筑厂房的安全
- (5) 受压容安全
- (6) 防爆与泄爆
- (7) 严格动火措施

什么煤适合高炉喷吹

◆不与炼焦争煤炭资源

◆无结焦性或不黏煤,不在枪头结焦 (焦质层 $Y < 10\text{mm}$)

◆低灰 (<12%)、低硫 (<0.8%)、有害杂质低、含水低的煤,

◆烟煤、无烟煤、瘦煤、气煤、半焦(兰炭), 混合煤

灰份低于焦炭灰份, 硫含量<1.0%, ZnO、K₂O、Na₂O、pb...., 结晶水太高的褐煤、泥煤不适宜制粉喷吹

◆煤的燃烧性能好、有效发热值高、煤灰的灰熔融特性温度高、煤粉的流动性能好、可磨性好(哈氏系数在60-90)。

➤喷入高炉的混合煤粉含水一般1.0—2.0%

➤粒度<200 (0.073mm)网目的大于 (无烟煤70-80%, 烟煤60-65%)。粒煤喷吹已很少见了

➤最佳的烟煤/无烟煤配比是7/3, 国外多喷吹100%的烟煤

➤当前我国多喷吹混合煤, 无烟煤(50-70%)/烟煤50-30%), 挥发份28-25%

我国煤的分类

大类	小类	分类指标及范围		大类	小类	分类指标及范围	
名称	名称	挥发分 $V_{daf}/\%$	胶质层厚度 Y/mm	名称	名称	挥发分 $V_{daf}/\%$	胶质层厚度 Y/mm
无烟煤		0 - 10		肥煤	2号焦肥煤	< 26	> 30
贫煤		> 10 - 20		气肥煤	气肥煤	> 37	> 25
瘦煤	1号瘦煤	14 - 20	0(成块) - 8	气煤	1号肥气煤	> 30 - 37	> 9 - 14
	2号瘦煤	14 - 20	> 8 - 12		2号肥气煤	> 30 - 37	> 14 - 25
焦煤	瘦焦煤	14 - 18	> 12 - 25		1号气煤	> 37	> 5 - 9
	主焦煤	> 18 - 26	> 12 - 25		2号气煤	> 37	> 9 - 14
	焦瘦煤	> 20 - 26	> 8 - 12		3号气煤	> 37	> 14 - 25
	1号肥焦煤	> 26 - 30	> 9 - 14	弱黏结煤	弱黏结1号	> 20 - 26	0(成块) - 8
	2号肥焦煤	> 26 - 30	> 14 - 25		弱黏结2号	> 26 - 37	0(成块) - 9
肥煤	1号肥煤	26 - 37	> 25 - 30	不粘煤		> 20 - 37	0(粉状)
	2号肥煤	26 - 37	> 30	长焰煤		> 37	0 - 5
	1号焦肥煤	< 26	> 25 - 30	褐煤		> 40	

注：从贫煤到长焰煤 8 个煤种统称为烟煤。

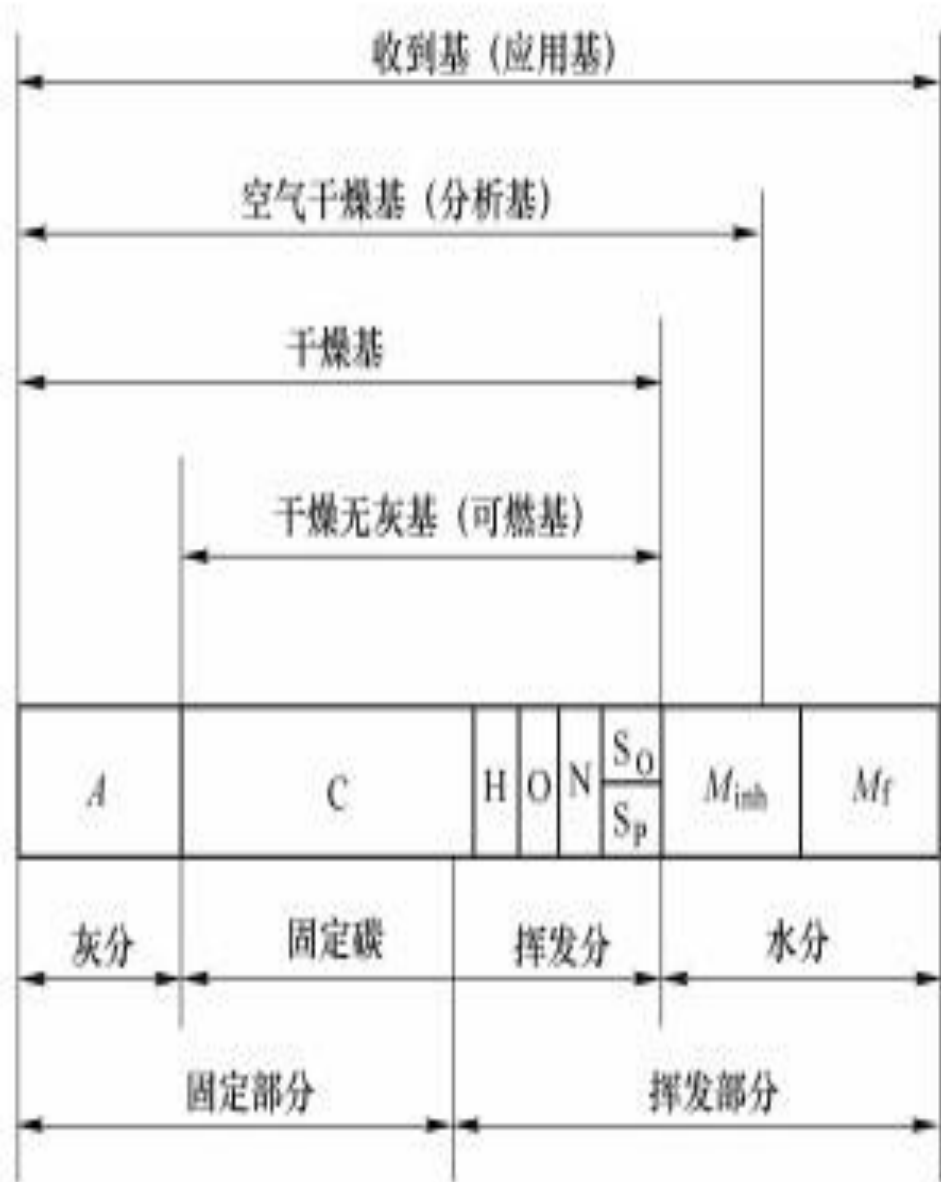


图 成分及表示方法

煤的组成:

有机物和无机物组成。主要可燃元素：碳（65-90%）、氢（2-7%）、氧3-5%，有时高达25%）氮（1-2%）、硫（10%）

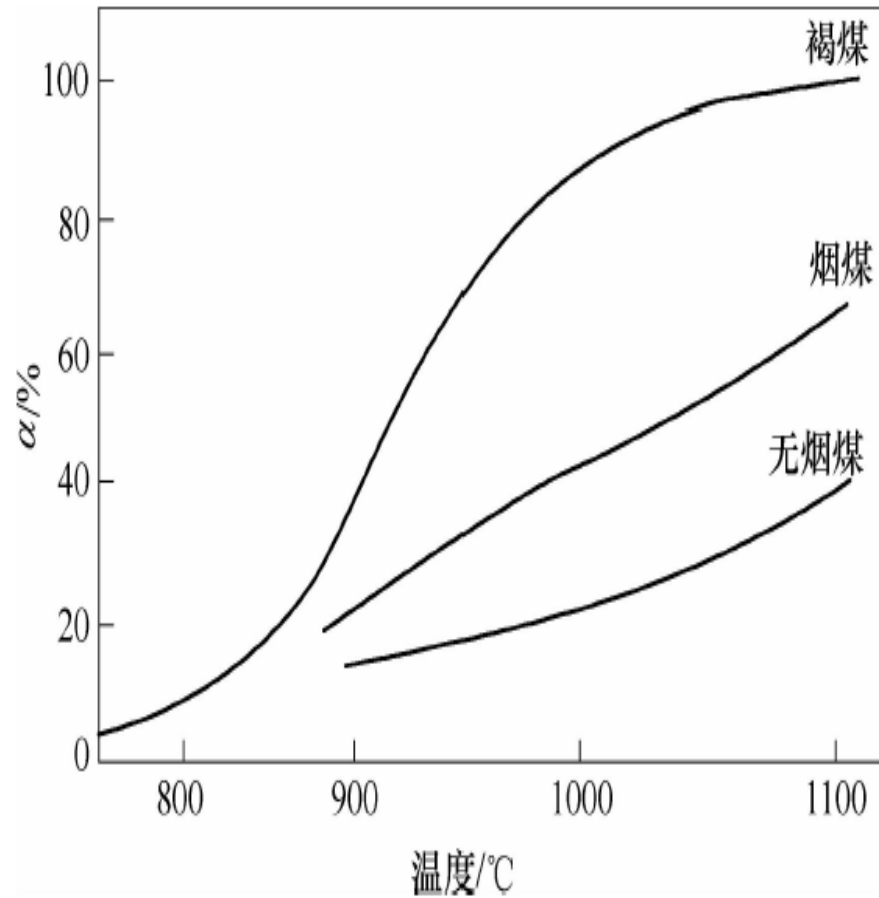
元素分析:

根据(GB/T476-2001, 干燥无灰基)测定煤中的：碳、氢、氧、氮、硫。
 $C_{ad}\% + H_{ad}\% + N_{ad}\% + O_{ad}\% + S_{ad}\% + A_{ad}\% + M_{ad}\% = 100\%$

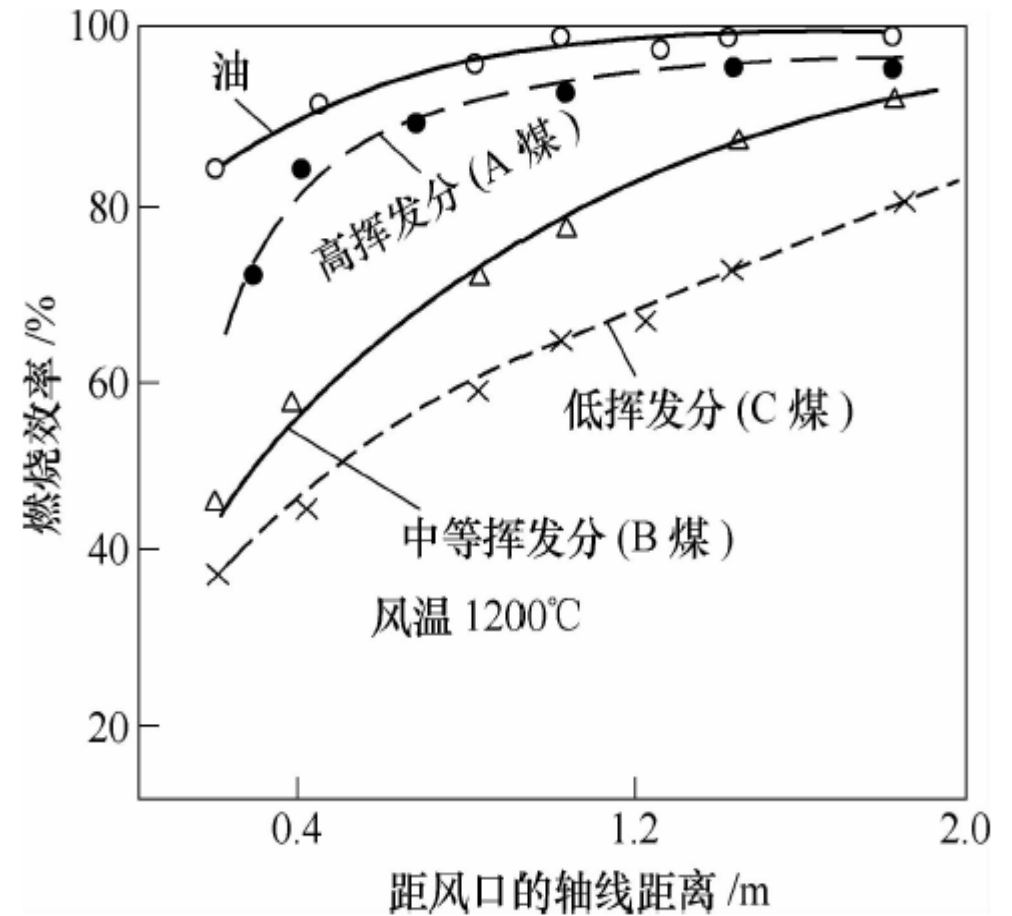
工业分析:

根据(GB/T212-2008)：水分、灰分、挥发分、固定碳
 $M_{ad}\% + A_{ad}\% + V_{ad}\% + FC_{ad}\% = 100\%$

煤的反应性



褐煤、烟煤及无烟煤的反应性曲线



几种燃料燃烧效率对比

我国高炉喷煤发展简况

➤ 1964.4. 我国鞍钢和首钢都开始工业试验

➤ 1964.5.30.鞍钢喷吹烟煤，（由发电厂螺旋泵输送至8高炉喷吹站再行多管路喷吹），发生安全事故。其后几本是喷吹无烟煤。

➤ 其后1965、1966首钢、鞍钢开始了喷吹无烟煤的工业生产。

➤ 1966年首钢高炉全年平均喷吹无烟煤159kg/t.铁，其中1BF年均达到225kg/t，4月份煤比达到279kg/t，创造了当时的世界记录。

➤ 其后因众所共知原因停滞了10年

➤ 二十世纪90年代前我国几乎都是喷吹无烟煤

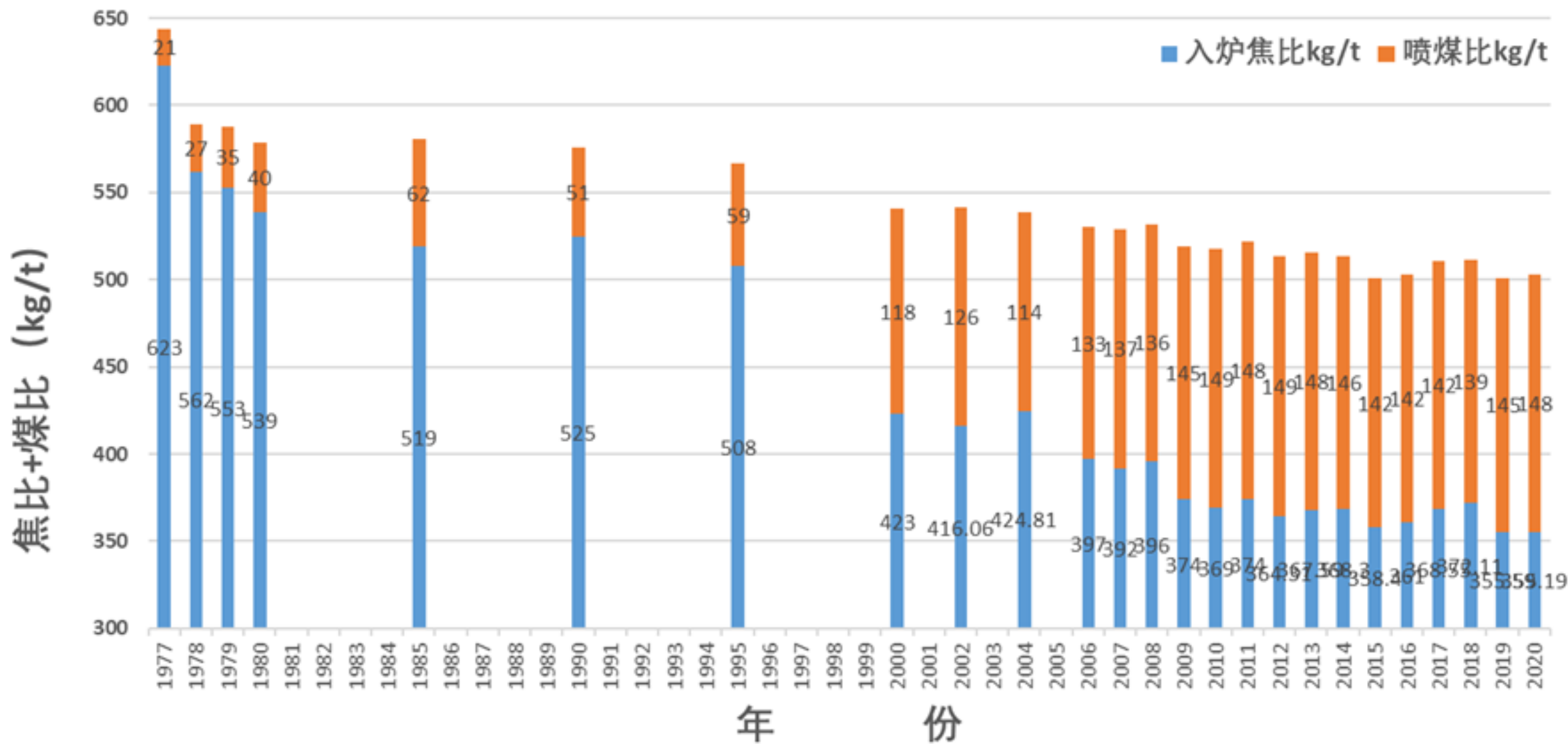
➤ 1989年鞍钢开始进行大量基础研究，并对喷煤工艺进行全面技术改造，解决了喷吹烟煤的安全问题。1990年试验喷吹烟煤成功。从此结束了我国喷吹单一无烟煤的历史。

我国高炉喷煤发展简况

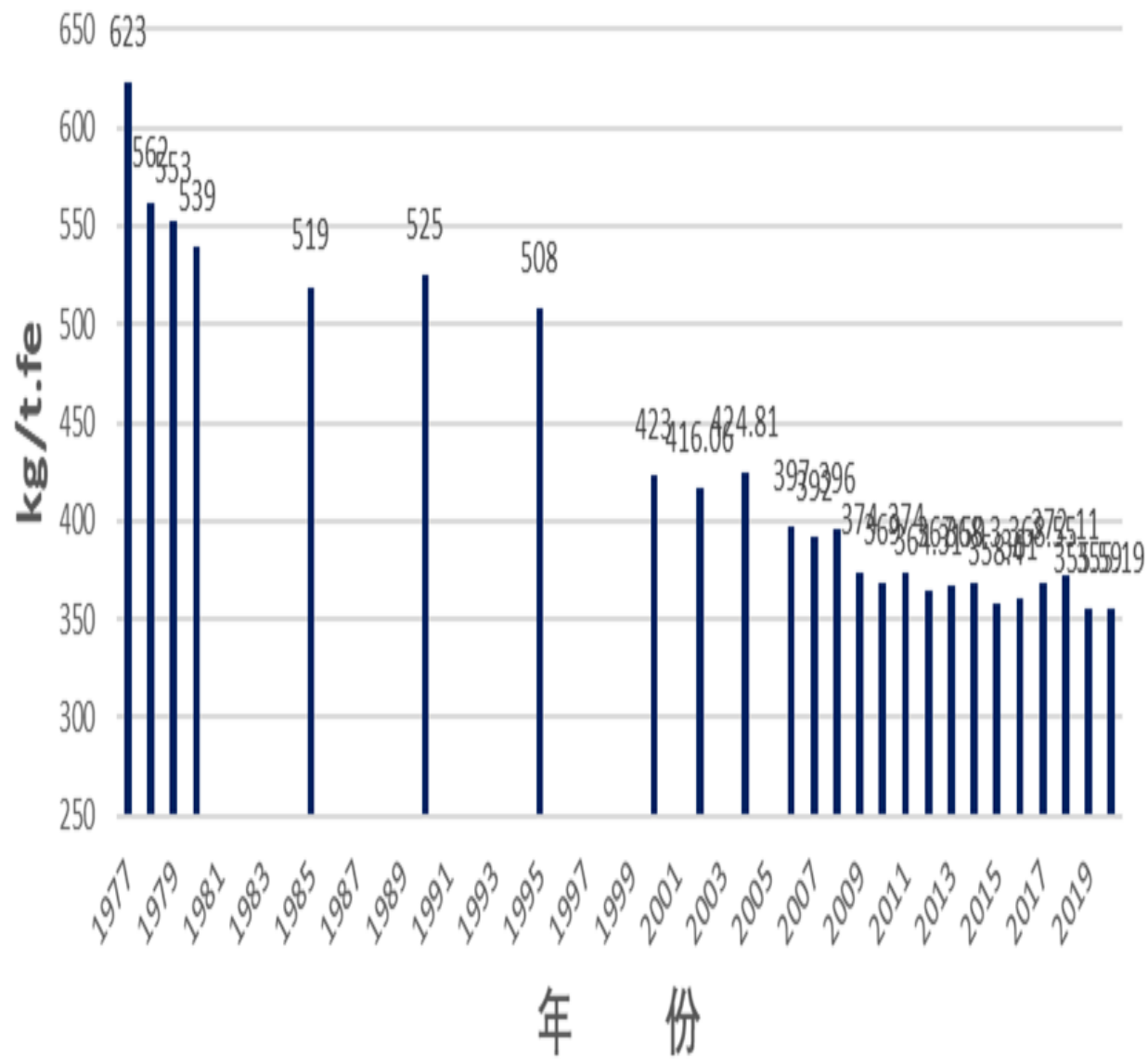
➤ 20世纪90年代以来，我国高炉喷煤或富氧喷煤技术发展更迅速：

- 1) 全国范围内推广高炉喷煤技术，并获得巨大经济效益，年喷煤粉1.2-1.5亿吨。
- 2) 新型制粉、喷吹工艺的形成和发展其装备水平提高，喷煤电耗降至25kw/h.t
- 3) 储量丰富的烟煤得到应用
- 4) 自动水平得到提高，实现智能喷吹
- 5) 高喷煤比不断提升和低富氧高煤比喷吹成功
- 6) 喷煤总量1990-1995年翻了一倍，达400万吨，近年稳定在1.5亿吨/年左右的喷吹量，相当于少建70个年产250万吨的焦化厂
- 7) 一批氧煤燃烧等新技术得到实现。
- 8) 高炉喷煤和富氧喷煤已成为炼铁系统工艺结构优化，低碳和能源结构优化的核心。

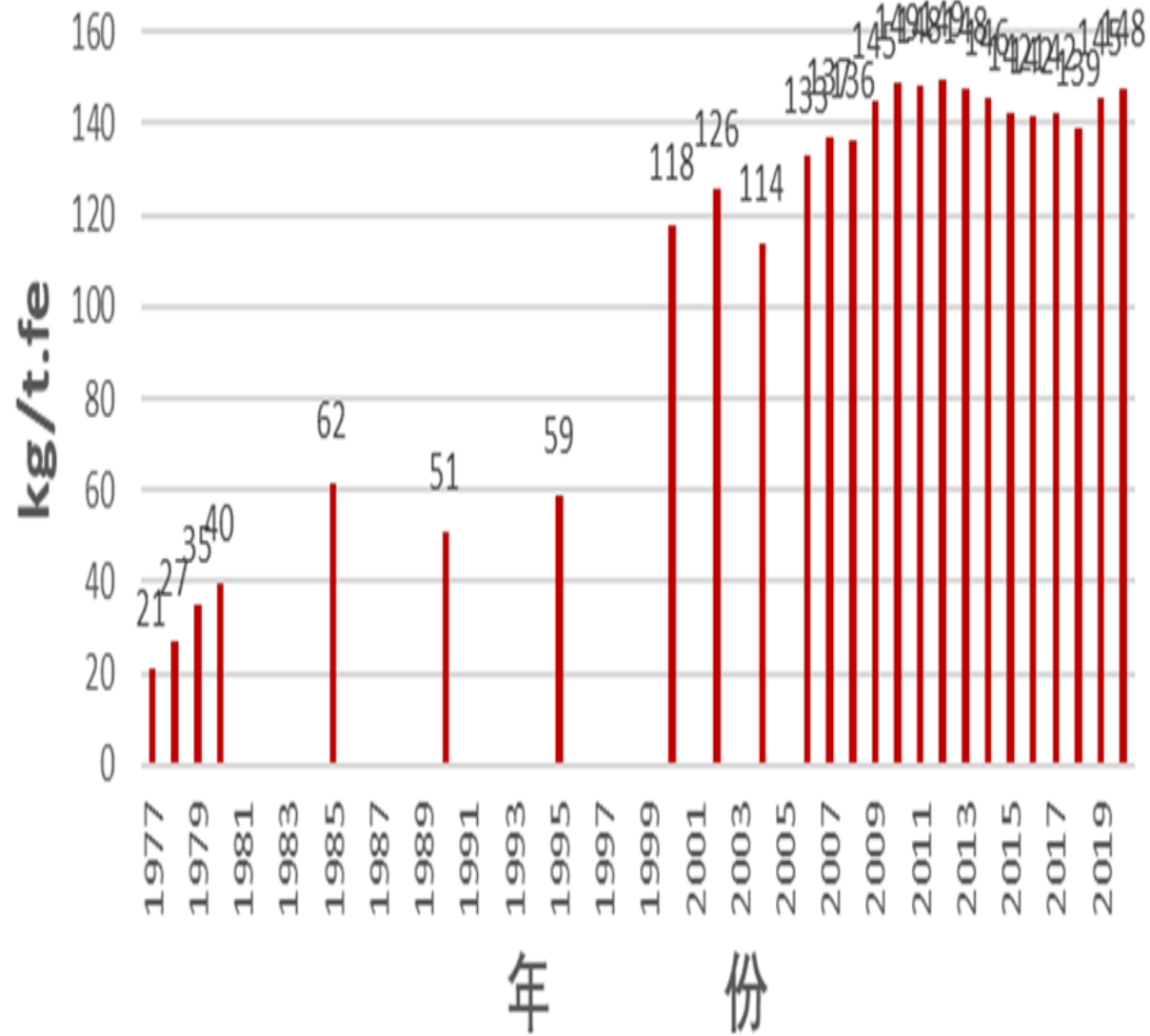
1977-2020年我国高炉平均入炉焦比与喷煤比变化



1977年以来全国高炉平均入炉焦比



1977年以来全国高炉喷煤比变化

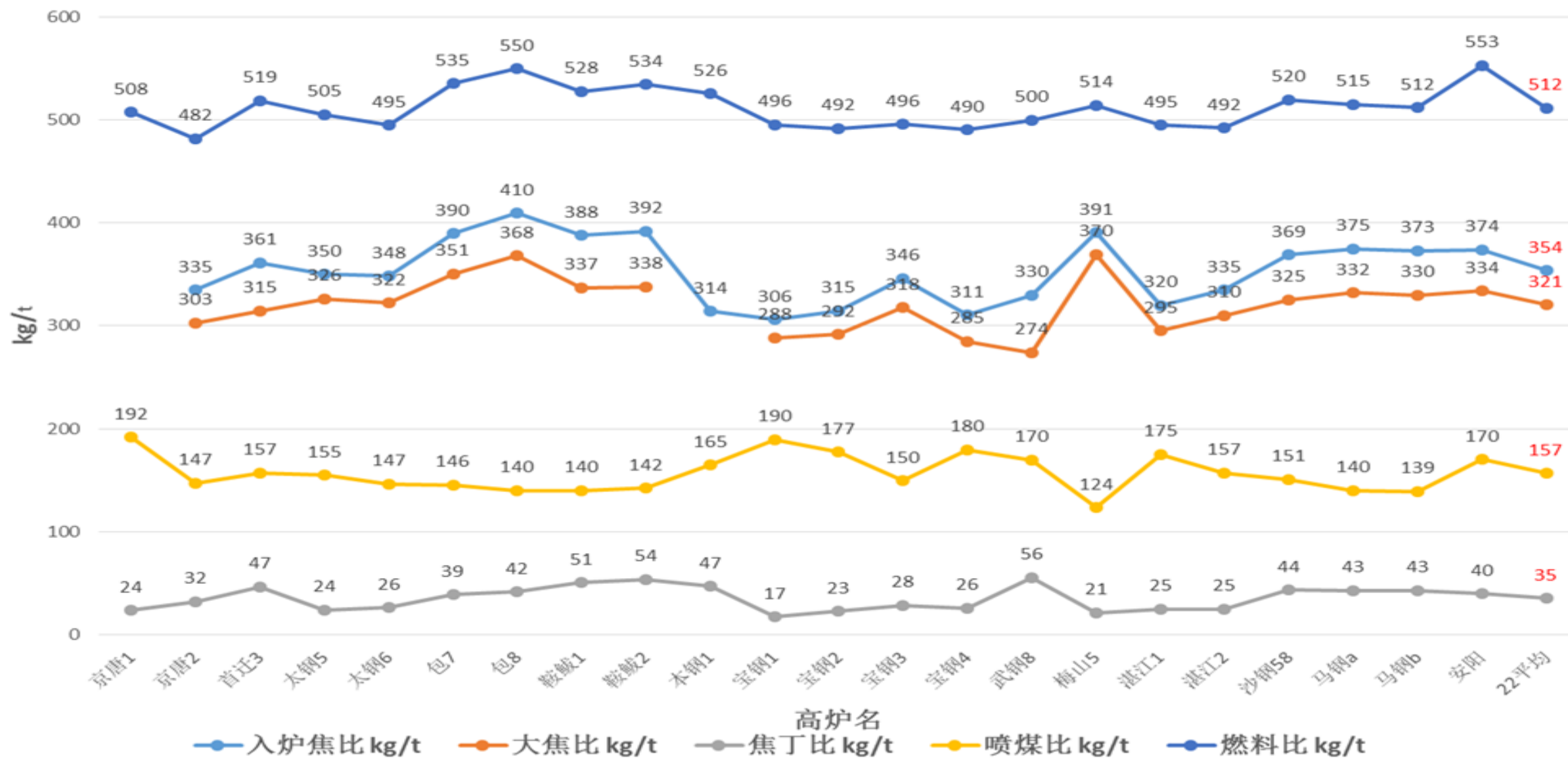


1978 ~ 2013 年我国高炉炼铁生产的铁产量与喷煤比的发展

年份	铁产量/万吨	焦比 /kg · t ⁻¹	喷煤比 /kg · t ⁻¹	年喷煤总量 /万吨	风温/℃
1978	3479	562	27.2	94.629	914
1980	3802	539	39.7	150.939	978
1985	4384	519	61.7	269.178	997
1990	6237	525	50.8	316.840	973
1995	10529	525	58.5	615.945	1023
2000	13101	423	118	1545.918	1034
2005	34473.2	412	124	4274.677	1084
2007	47660	392	137	6529.420	1125
2008	48322.56	396	136	6571.868	1133
2009	56863	374	145	8245.135	1158
2010	59560.10	369	149	8874.455	1160
2011	64542.93	374	148	9552.354	1179
2012	67010.17	363	150	10051.525	1183
2013	70897.07	362.63	149.1	10570.753	1170

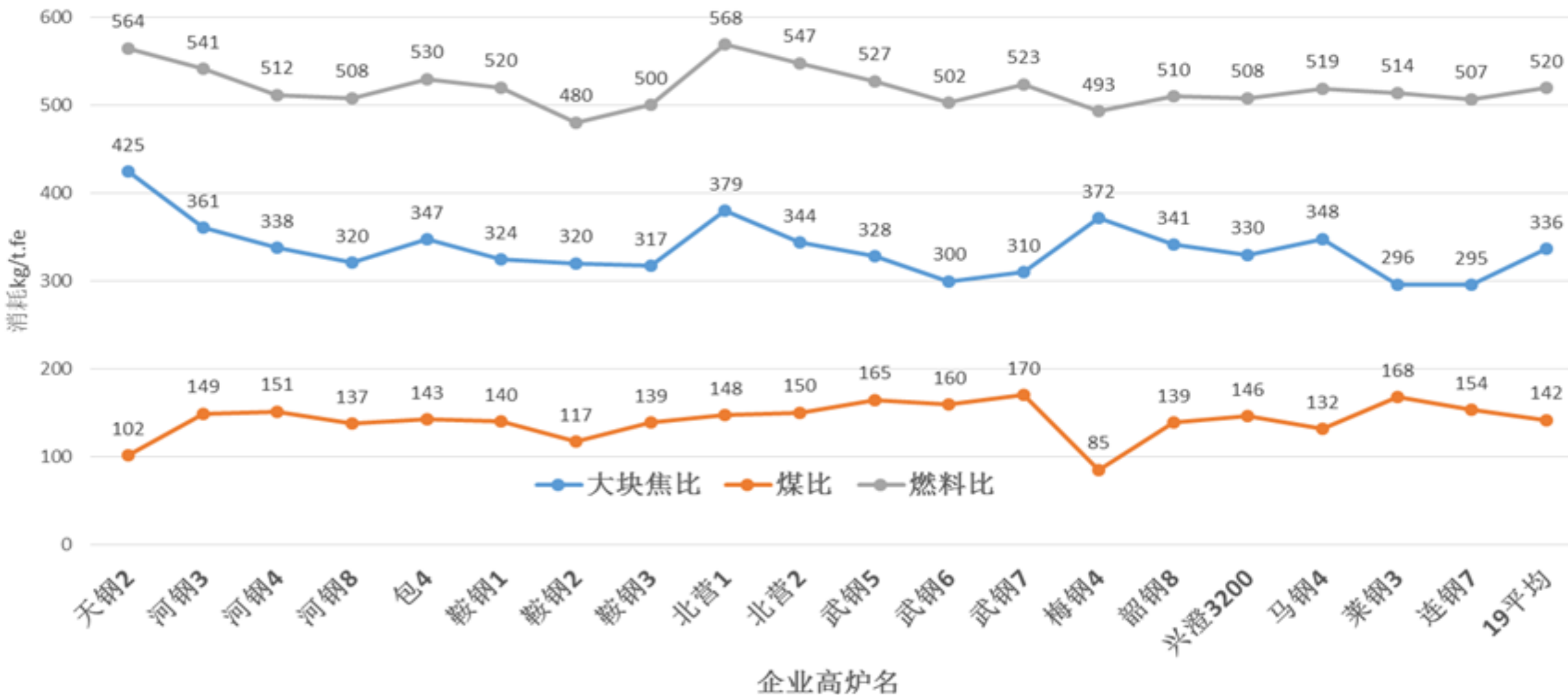
2019年6月22座4000以上高炉喷煤状况

2019.6.22座4000以上高炉燃料消耗



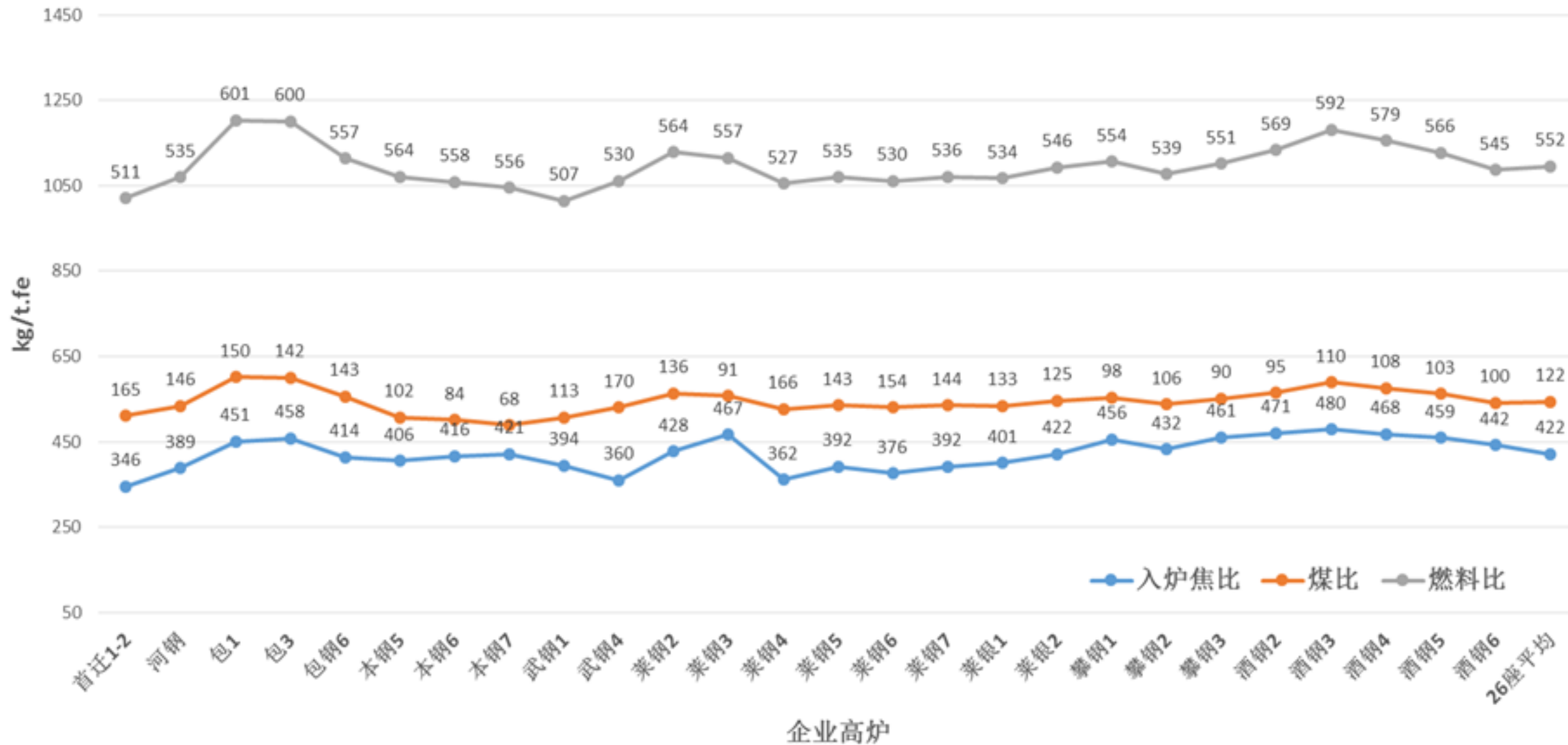
2018.1-12月19座3200高炉喷煤状况

2018.12.3200高炉燃料消耗



2018.1-12月26座2000级高炉喷煤状况

2018.12.2000级高炉燃耗



高炉喷煤冶炼及操作

喷吹煤粉对高炉的影响

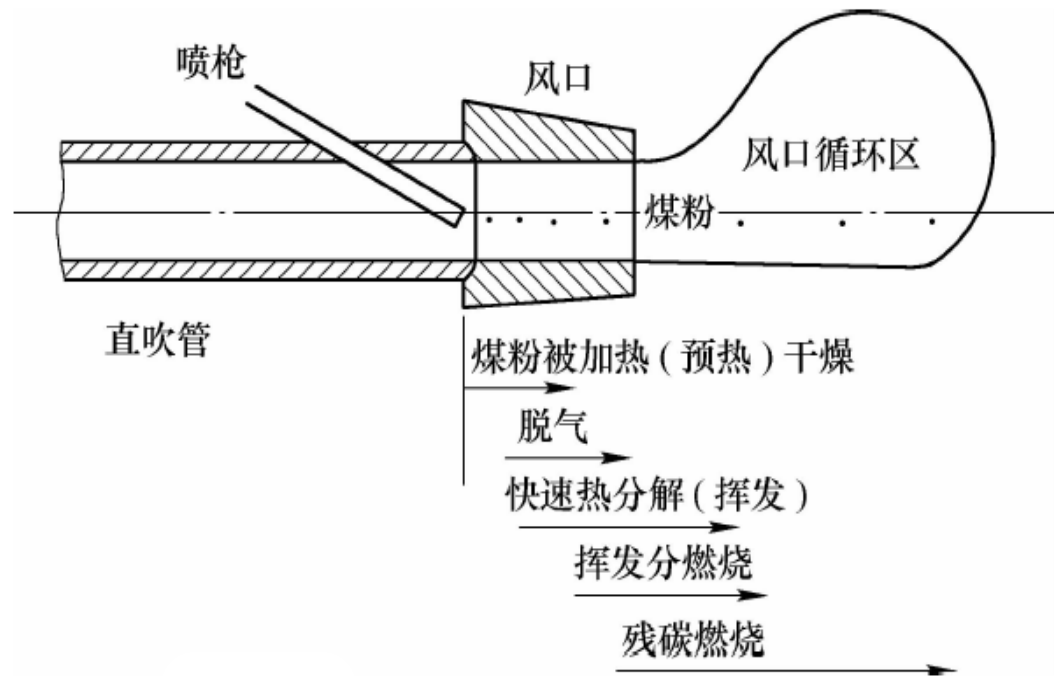
- ◆ 炉缸煤气量增加，鼓风动能增加燃烧带扩大，顶温升高
- ◆ $t_{\text{理}}$ 下降，而炉缸中心温度均匀并略有上升
- ◆ 料柱阻损增加，压差升高
- ◆ 间接还原发展直接还原降低
- ◆ “热滞后”，与喷吹燃料种类、炉容、冶炼周期、煤中含 H_2 等等有关(一般滞后2-4小时)
- ◆ 喷煤对冶炼周期延长
- ◆ 煤焦置换比： 1)理论置换比， 2)经验数据计算置换比

高炉喷煤冶炼及操作

风口前每1kg燃料产生的煤气体积

燃料	煤气体积(m ³)	Co+H ₂ (%)
焦炭	4.528	35.5
重油	5.918	49.0
煤粉(无烟煤)	4.458	40.8
天然气(m ³ /kg)	6.73	61.9
鞍钢用烟煤	4.71	43.65

煤粉在风口的燃烧过程



煤粉燃烧与气化示意图

鞍钢高炉喷吹用煤的粒度组成及比表面积

煤种	粒度组成/%					比表面积 $/\text{mm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$		燃点 $/^\circ\text{C}$
	>0.15 mm	0.15 ~ 0.125 mm	0.125 ~0.1 mm	0.1 ~ 0.075 mm	<0.075 mm	混合粒 度煤	<0.075 mm	
阳泉洗精无烟煤	4.0	5.0	10.0	12.0	69.0	4141	5740	395
太西无烟原煤	5.0	6.0	8.0	13.0	68.0	3640	5445	391
城子河洗精烟煤	7.0	5.0	14.0	12.0	62.0	5104	7035	337
峻德烟煤	6.0	4.0	8.0	12.0	70.0	5184	6810	359
榆林烟煤	8.0	4.0	8.0	7.0	73.0	—	—	273

毫秒级的停留时间和沉没射流

高炉喷煤冶炼及操作

● 热补偿:

用风温补偿: $t = \frac{Q_{分} + Q_{tc}}{V_{风} CP_{风}}$

热滞后:

● 热滞后时间估算 $\tau = \frac{V_{风}}{V_{批}} \cdot \frac{1}{n}$

● 冶炼周期延长

$$t = \frac{24V}{\xi \left(\frac{1}{\gamma_k} + \frac{M}{\gamma_0} \right) i_{\Sigma} V_u (1 - n)}$$

● 置换比:

a. 理论置换比

b. 经验数据计算置换比

c. 过去行业的鼓励政策引导的置换比

● 影响煤粉燃烧有哪些因素:

(1) 温度

(2) 煤粉粒度与比表面积(粒煤喷吹?)

(3) 氧的浓度

(4) 气--固两相流动

(5) 煤粉颗粒的本身结构

(6) 炭黑微粒的形成影响燃烧

高炉富氧鼓风的冶炼

◆ 富氧率 = $\frac{\text{富氧量}}{\text{风量} + \text{富氧量}}$ (%)

◆ 鼓风含氧 = 大气中含氧 + 富氧率

◆ 富氧方式

(1) 机前 (鼓风机) 富氧

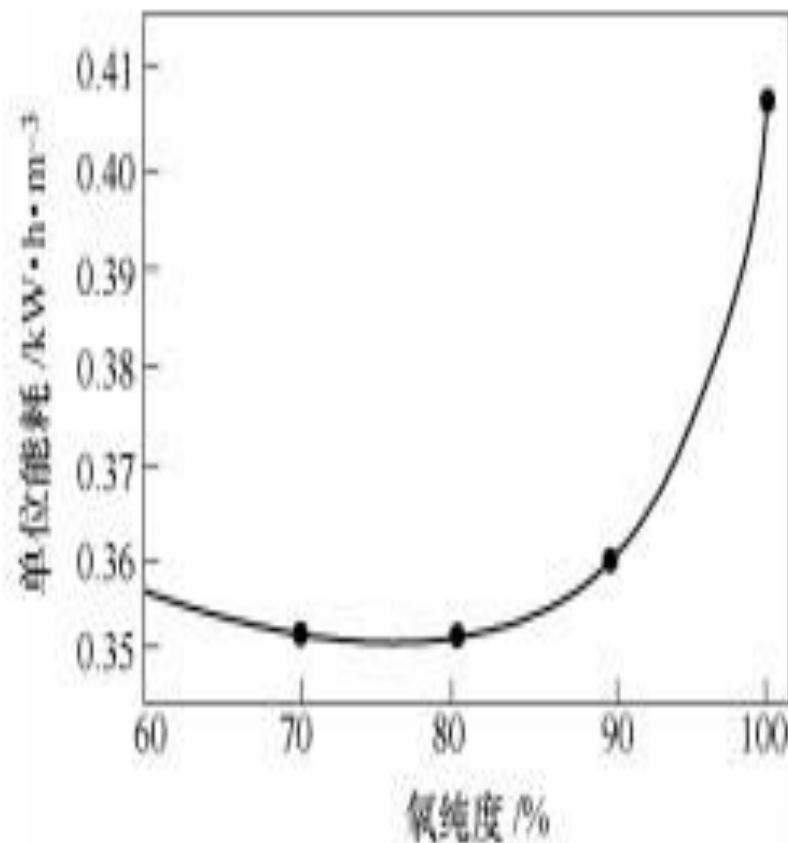
(2) 机后富氧 (高压)

(3) 氧煤枪或氧煤燃烧器

◆ 经济制氧浓度

a. 深冻空分

b. 分子筛 (浓度与成本低、机前)



纯度与单位能耗的关系

高炉富氧鼓风的冶炼特征

富氧鼓风对产量的影响

加氧即加风，燃料比不变则产量增加，即按固定风量操作且焦比不变

如提高含氧1%时， $a-a_0=\Delta a$,

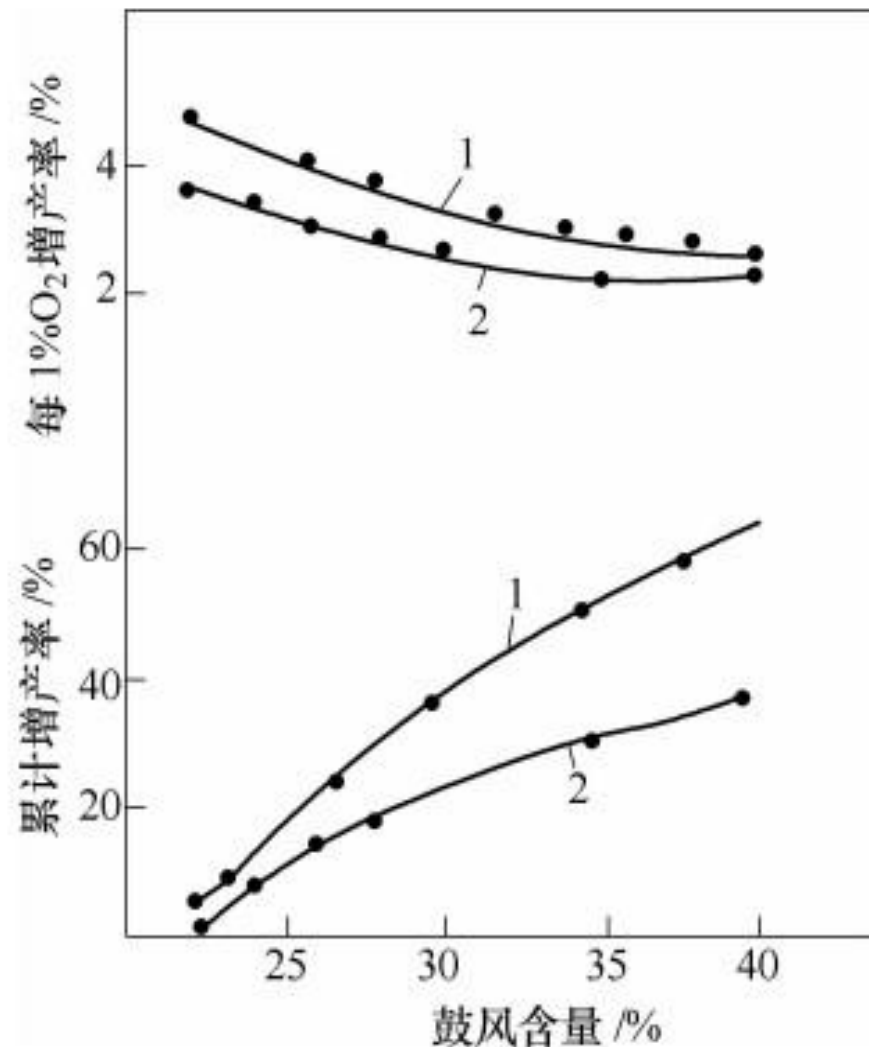
$$\Delta V = \frac{\Delta a}{a_0} = \frac{0.01}{0.21} = 4.76\%, \text{ 理论增产率}$$

随着富氧率升高增产率下降

富氧鼓风对焦比的影响:

富氧使吨铁风量减少，鼓风带入热量减少，不利降焦；煤气CO↑， $T_{\text{顶}} \downarrow$ 热能利用变化

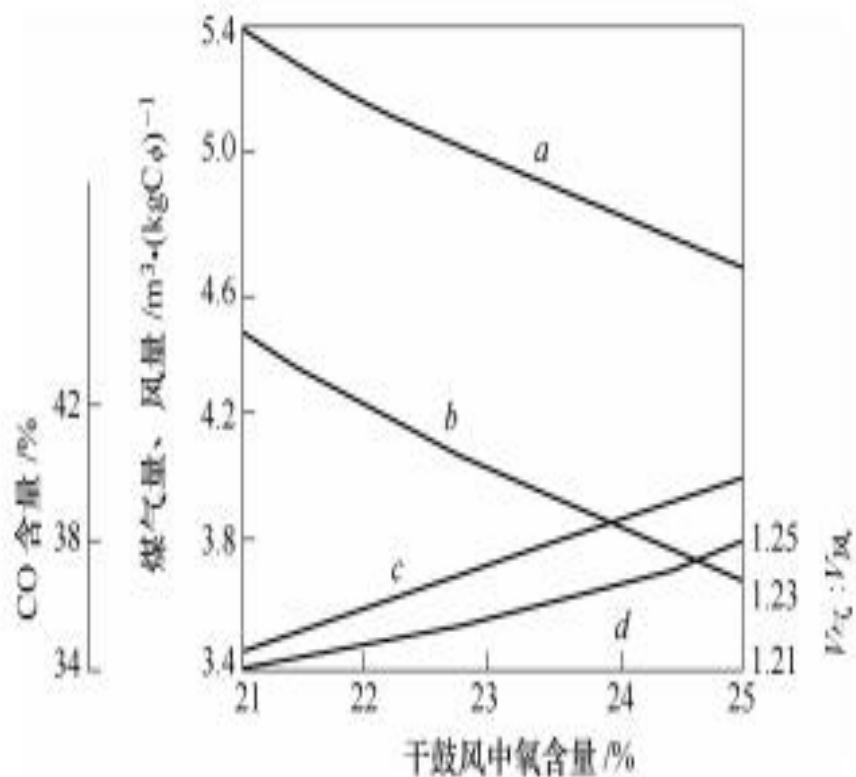
...要综合分析



富氧与增产率的关系

1—总风量（风量 + 氧量）不变；2—炉腹煤气量不变

高炉富氧鼓风的冶炼特征



富氧鼓风对风量、煤气量、煤气含 CO 量和煤气与鼓风体积比的影响

a—炉缸煤气量, m^3/kgC_ϕ ; b—风量, m^3/kgC_ϕ ; c—CO 含量, %; d— $V_{气} : V_{风}$;
 $V_{气}$ —煤气体积; $V_{风}$ —鼓风体积

① 理论燃烧温度 ($t_{理}$) 升高, 炉缸热量集中, 利于冶炼反应进行, 径向温度分佈不均, 高温区下移, 注意 $t_{理}$ 过高的不利 (喷煤、加湿)。

② 单位生铁煤气量减少, 允许提高冶强增产

③ 单位重量焦炭燃烧生成的煤气量减少, 改善炉内热能利用, 顶温降低。

④ 含氮量减少, CO 浓度相应增加, 热值升高

⑤ 如冶强不变, 进而引起边缘气流发展。

⑥ 高炉煤气热值升高

⑦ 鼓风带入的热量减少

富氧鼓风的冶炼特征

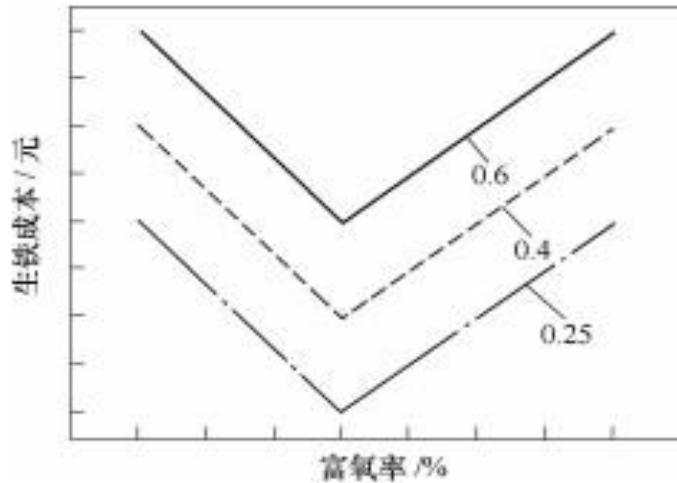
◆ 制约高炉富氧率的因素有哪些

a. 温度场分布, $t_{理}$ 过高(如2400-2500 °C)不采取措施, 冶炼难于进行, (富氧率超过14%-15% $t_{理}$ 可达3000 °C), 喷吹燃料和加湿来配合降 $t_{理}$ 。

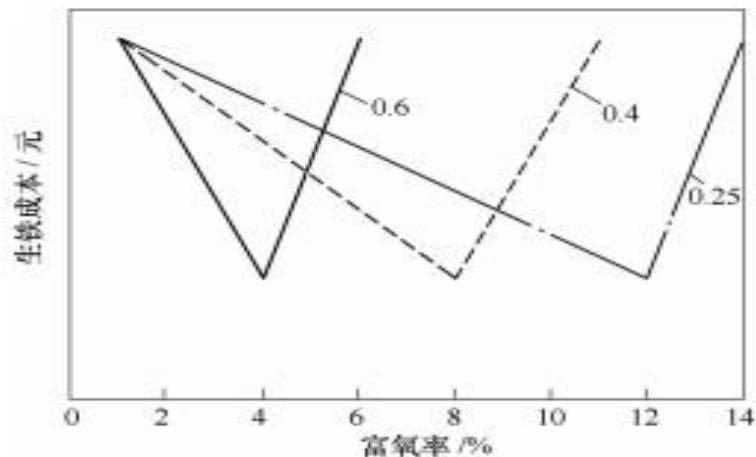
b. 氧气成本, 经济富氧率4%左右, 上限应控制在14%左右

◆ 合理利用氧气资源

◆ 开发低成本制氧技术



富氧率为4%时不同氧价格对生铁成本的影响



高炉生产维持在富氧率为4%时的生铁成本、富氧率与氧气成本的关系

高炉富氧喷煤强化冶炼---综合鼓风操作

■ 高炉综合鼓风：高炉采用喷吹燃料、高风温、富氧、控制湿份等

■ 高风温、富氧和喷煤对高炉冶炼过程大部分参数的影响是相反的，三者结合可互相**扬长避短**，更好地发挥高炉效率。

(1) 增加焦炭燃烧强度，大幅度增产

(2) 促使煤粉气化燃烧，不降 $t_{理}$ 而扩大喷吹量，进一步降焦

(3) 三者有机结合可改善高炉顺行。

■ 富氧喷煤操作特点：

a. 适宜的 $t_{理}$ ($2150 \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$)

b. 运用上下部调节控制合理煤气流分布(优秀: $\eta_{co} 52-54\%$)

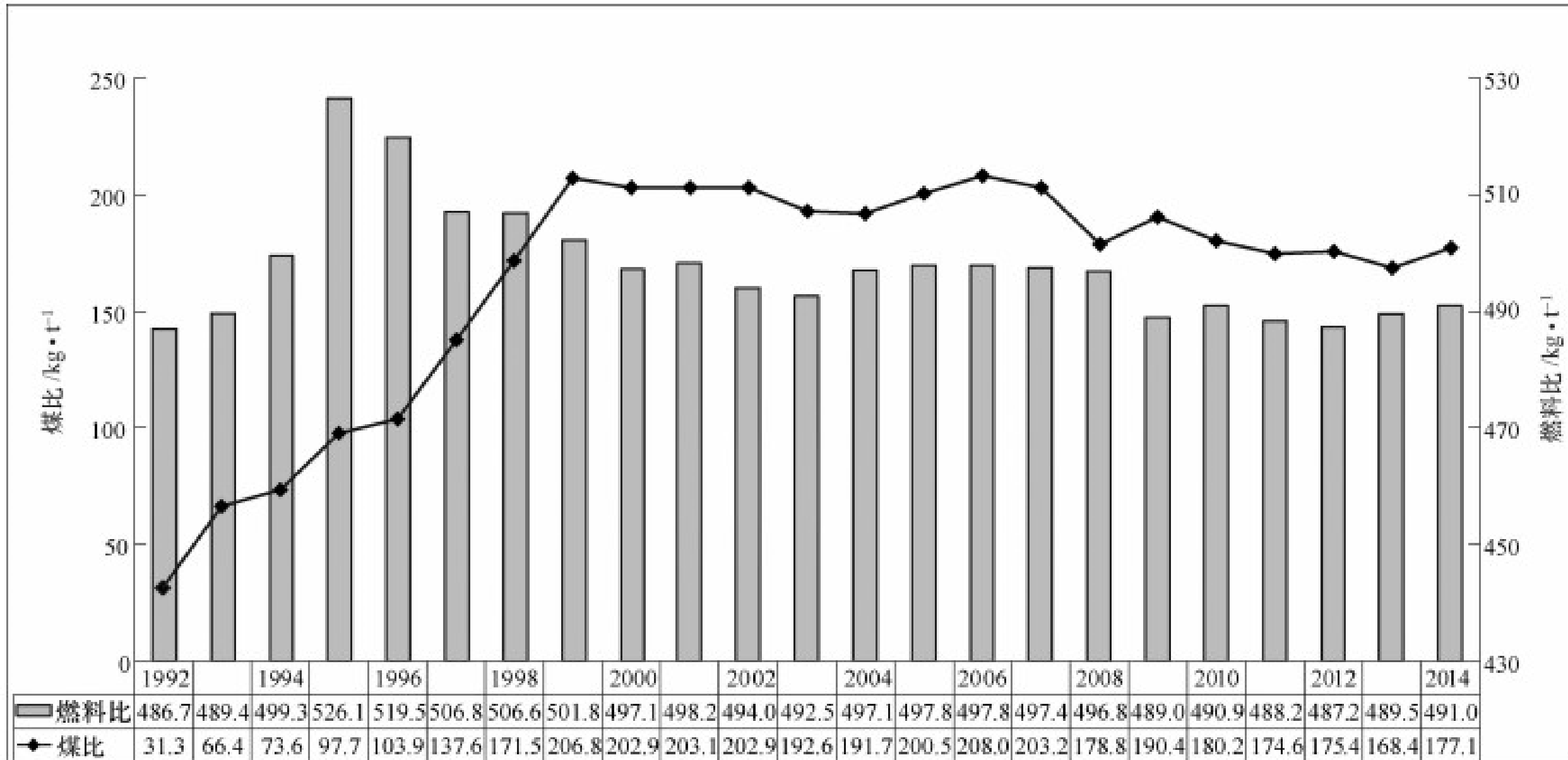
c. 提高煤粉燃烧率

d. 改善料柱的透气性

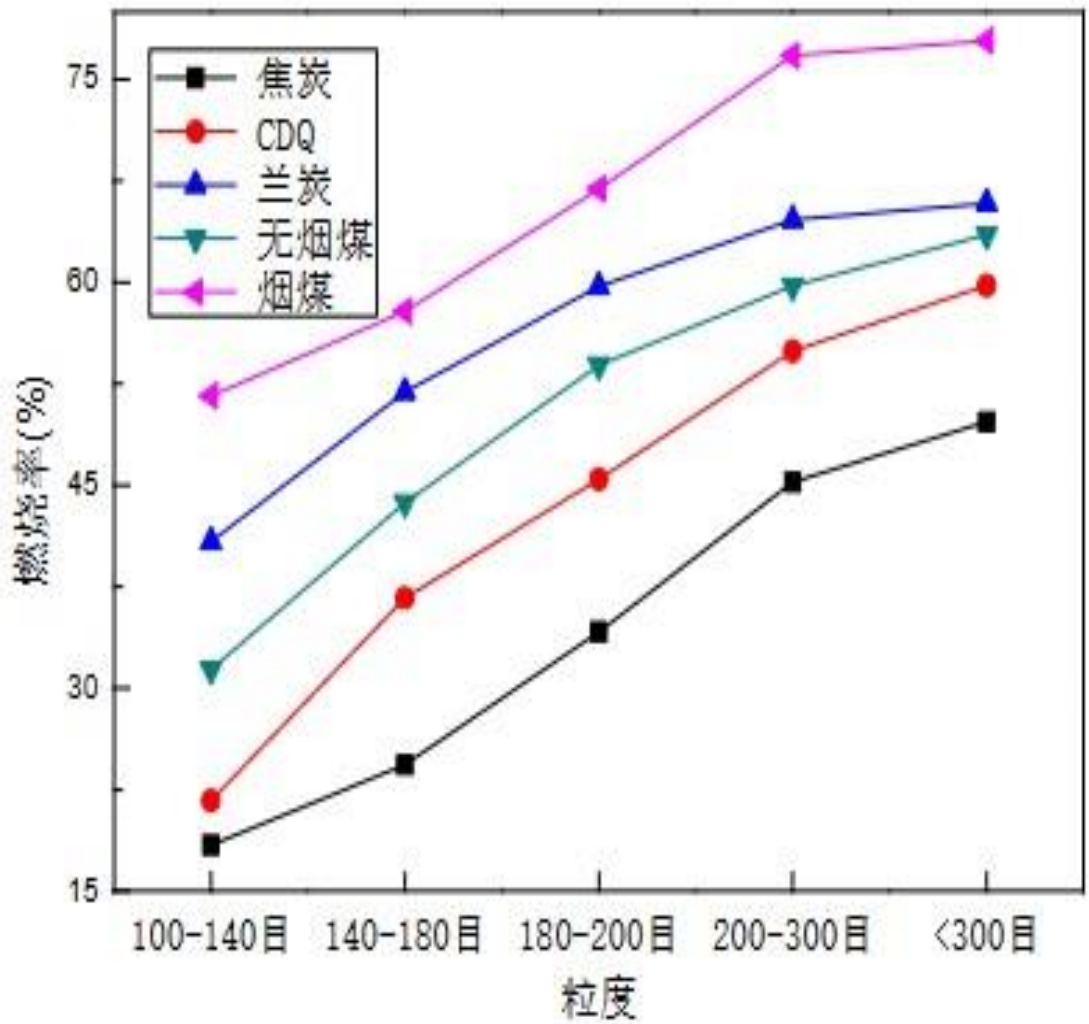
e. 维持一定的氧过剩系数

单独富氧、喷煤、高温对高炉冶炼的影响

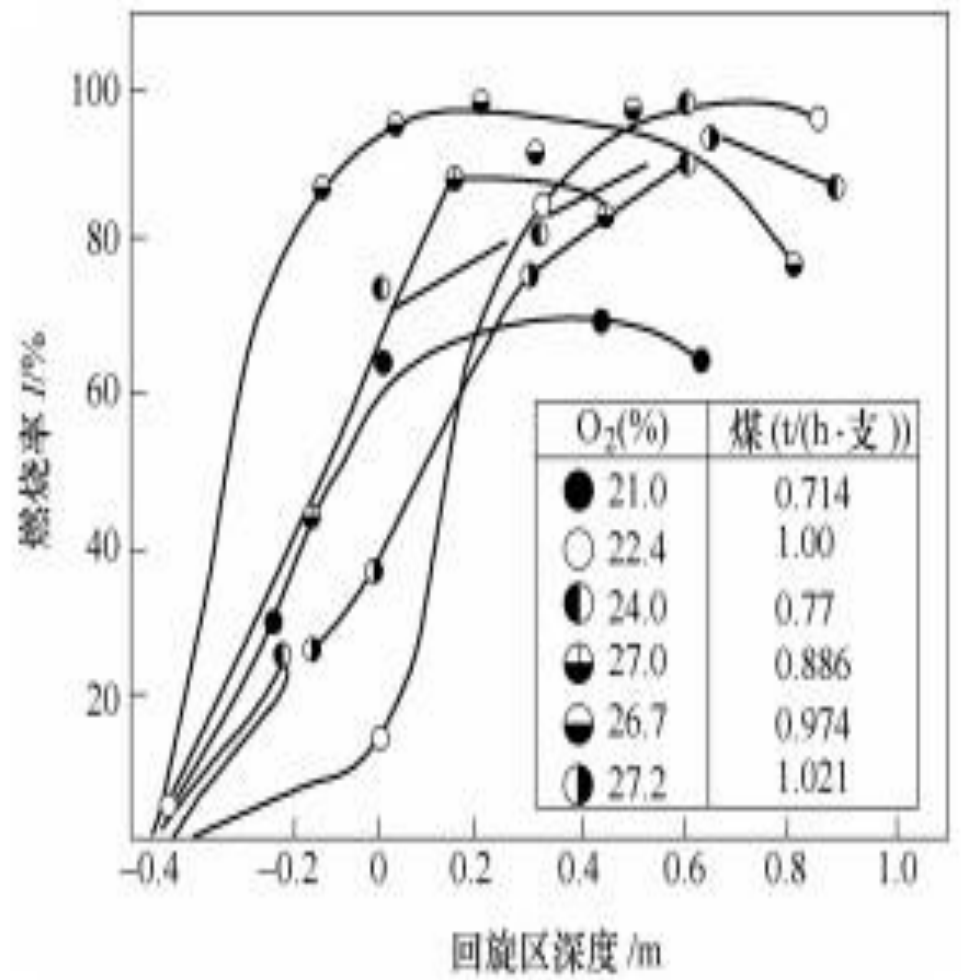
影响参数	喷煤	富氧	高温
碳燃烧	--	加快	加快
理论燃烧温度	降低	升高	升高
热量收入	略有减少	减少	增加
燃烧1kgC的煤气量	增加	减少	不变
燃烧1kgC的煤气量	增加	减少	不变
温度场分布：高温区	--	下移	下移
温度场分布：中温区	--	扩大	扩大
温度场分布：炉顶温度	升高	降低	降低
间接还原	发展	基本不变	略有升高
气体力学因素	变坏	变好	变坏
焦比	降低	基本不变	降低
产量	基本不变	升高	升高



宝钢历年(1992 ~ 2014 年)燃料比与煤比的进展

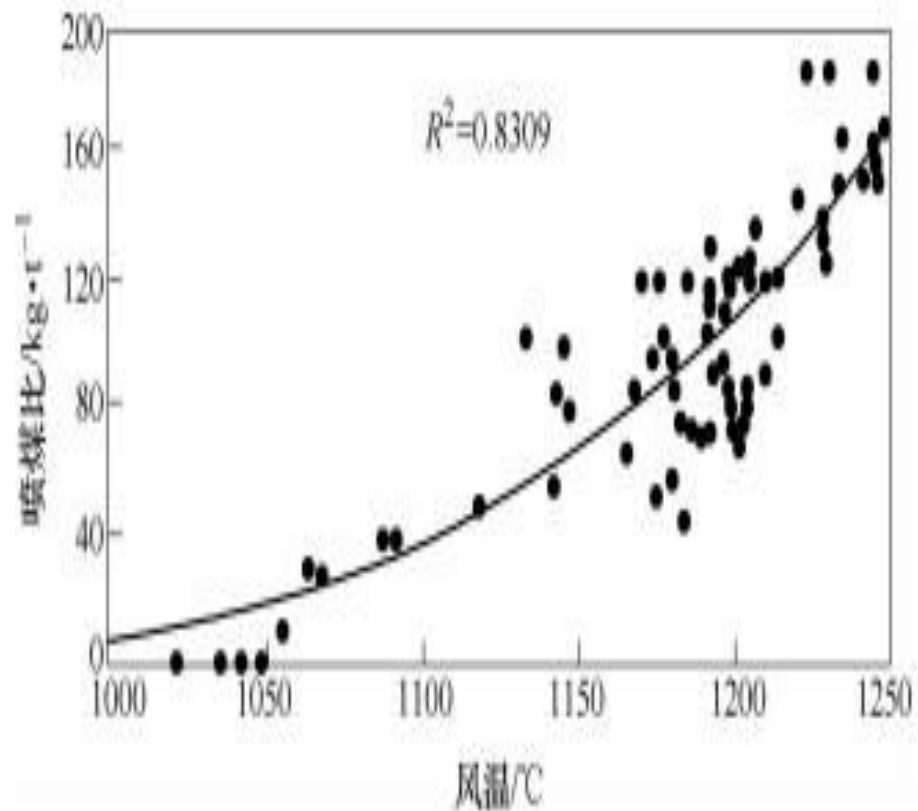


单煤不同粒度的煤粉燃烧率

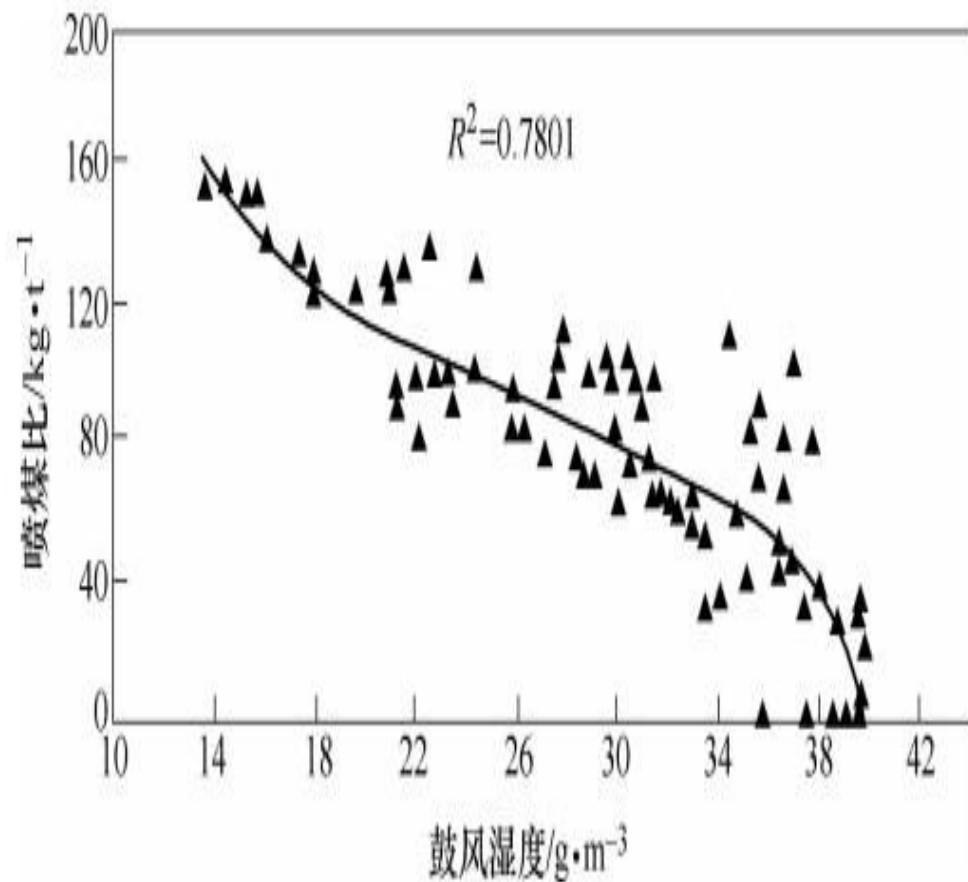


不同鼓风含氧量时，风口回旋区煤粉燃烧率的变化
(鞍钢2号高炉生产中风口取样测定结果)

高炉富氧喷煤强化冶炼



宝钢高炉喷煤比与风温的关系



宝钢高炉鼓风湿度与喷煤比的关系

高炉富氧喷煤强化冶炼

制约高炉喷煤量的因素:

a. 风口前的燃烧行为

b. 炉缸状态

c. 高炉顺行

e. 置换比

喷煤量的确定和经济喷煤比

确定喷煤量时应考虑条件:

1) 精料程度、

2) 焦炭质量、

3) 风温水平、

4) 富氧率高低、

5) 鼓风湿度、

6) 置换比

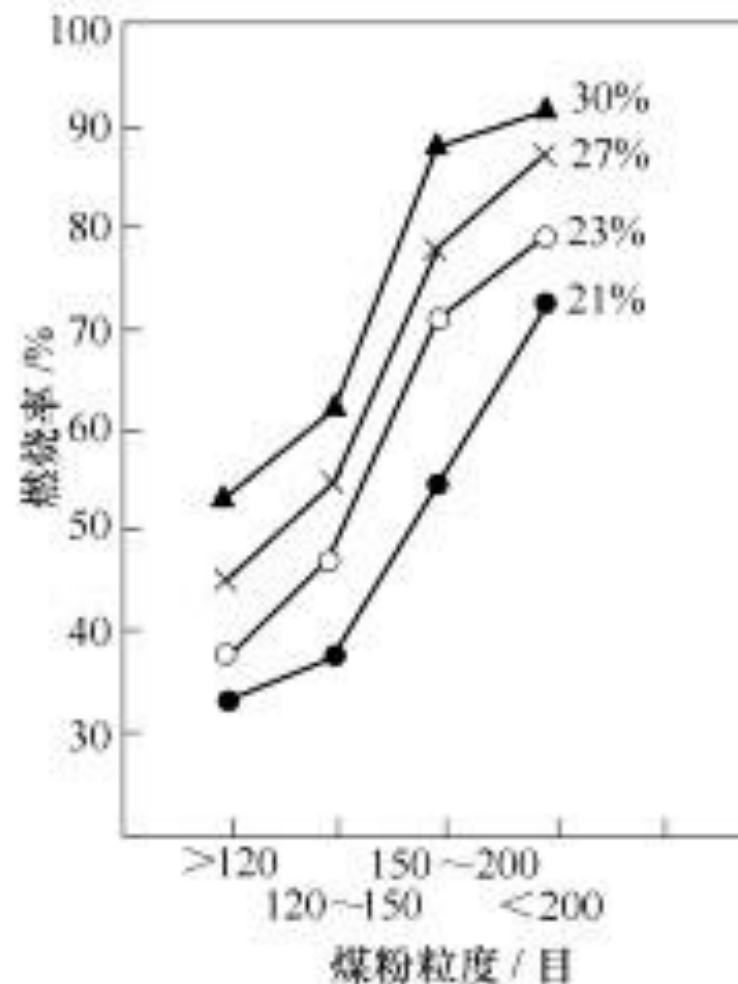


图 6-2 粒度对燃烧率的影响

(曲线旁百分数为氧含量, 煤粉量为 8g/min)

努力实现高炉喷煤比达到250kg/t.fe

高炉工作者努力做到：燃料比小于500kg/t.fe，其中焦比低于250kg/t.fe，煤比高于250kg/t.fe

着眼点要在优良的冶炼条件和先进的冶炼技术上下功夫：

冶炼条件：渣量<280kg/t.fe，焦炭： M_{40} 为90%， M_{10} <5%，平均粒度54mm

风温1200-1250 °C，富氧3.5%-6%，调湿鼓风，均匀喷吹

高超的操作技术：a.炉子稳定顺行

b.三次煤气流分布合理

c. η_{co} 达到0.52-0.54

很多高炉已实现，有的只是不能长期稳定实现。如数座5000m³级高炉已实现燃料比<500kg/t.fe，煤比200kg/t.fe以上。

伟大的高炉！

· 产量：30~550 万吨/年

高炉最低燃料比：418kg/t

418 kg= 315kg(焦炭) + 103kg(天然气)

炉料：75%球团+25%(热压块+废钢)

提示：条件不同，没有绝对可比性

启示：没有人限制高炉吃什么炉料、喷什么燃料，除了我们自己！

当前世界最大高炉：炉缸直径：16.1m，内容积：6100m³？

提议我国建6666m³高炉)

谢谢聆听 请批评指正



鞍钢七、十一，十高炉 2004.9.