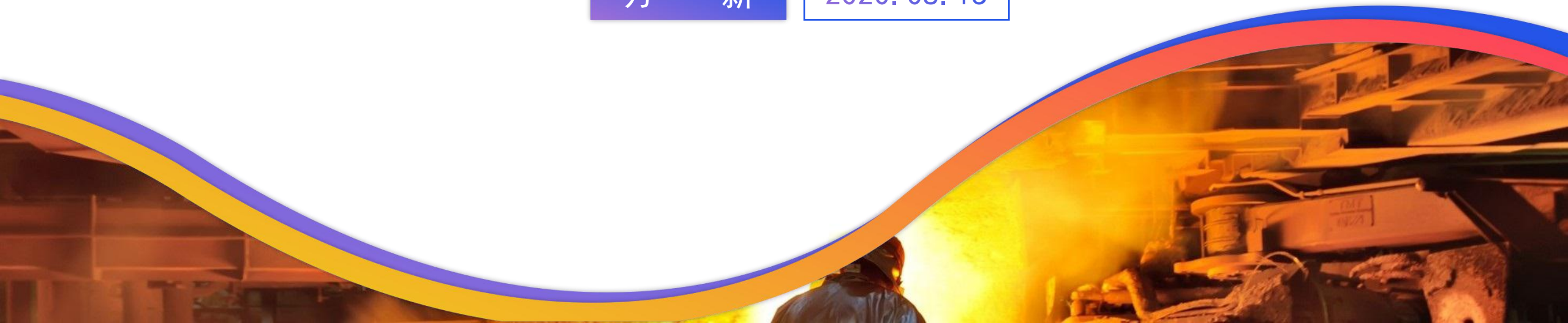


# 高炉炉料结构及冶金性能

第十二期全国炼铁、烧结、焦化、球团技术专题培训班

万 新

2020. 08. 15



# 目录

## CONTENTS

01

高炉炉料结构

02

铁矿石冶金性能

03

矿石还原的真相

04

关注块状带体积



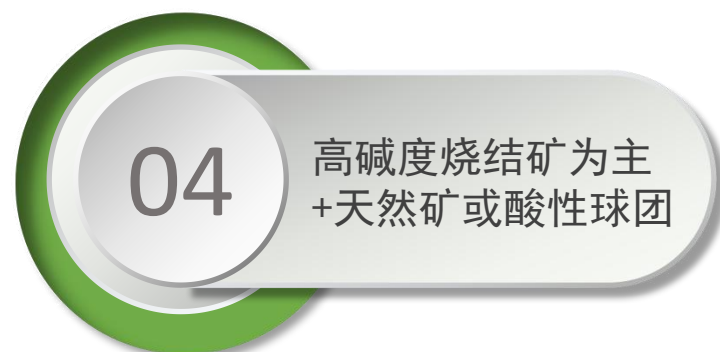
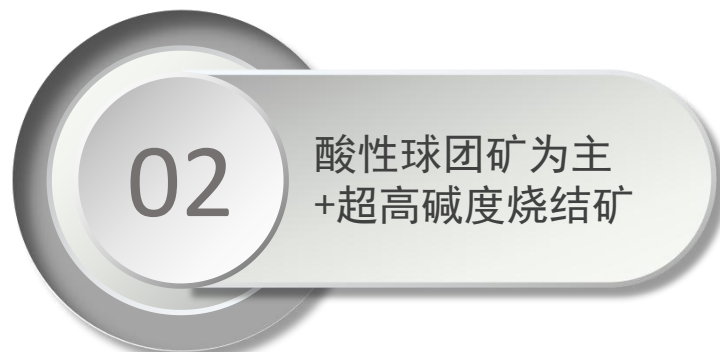


# 01

## 高炉炉料结构

炉料结构是否合理直接影响高炉焦比及其他技术经济指标。

# 一、高炉炉料结构 >>>



## 高炉炉料结构简介

北美产大量为低品位铁隧岩矿物，需细磨提高品位，故发展球团工艺并形成酸性球团矿为主炉料结构。

日本高炉炉料以进口为主，绝大部分加工成烧结矿，逐步形成了高监督烧结矿配加酸性炉料的结构。

西欧一些国家的高炉炉料结构近似于日本。

苏联开采贫矿居多，积累了使用细精矿烧结的经验，形成了以100%自熔性烧结矿为主，少量高炉酸性炉料的结构。后期发展碱性球团矿，为提高入炉球团比开展了探索。

# 一、高炉炉料结构 >>>



- 01
- 02
- 03

## 100% 的自熔性烧结矿

实践及研究证明此种自熔性烧结矿强度差，粉末多，并不是高炉炉料的合理结构。（50年代）

## 高碱度烧结矿配加天然矿

太钢、武钢、本钢、梅钢等采用高碱度烧结矿配加天然矿，取得了很好的效果。（70年代）

## 高碱度烧结矿配加酸性球团矿

81年杭州会议上提出该种炉料结构可能是我国高炉高产、低耗的合理炉料结构。（80年代）

.....

# 一、高炉炉料结构 >>>

随着经济社会的发展和工业技术的进步，炉料结构也会发生变化。球团比烧结矿而言，优势明显。

球团和烧结生产工序能耗分别为：25.59kgce/t和49kgce /t，先进企业球团工序能耗仅为烧结工序能耗的1/3左右。

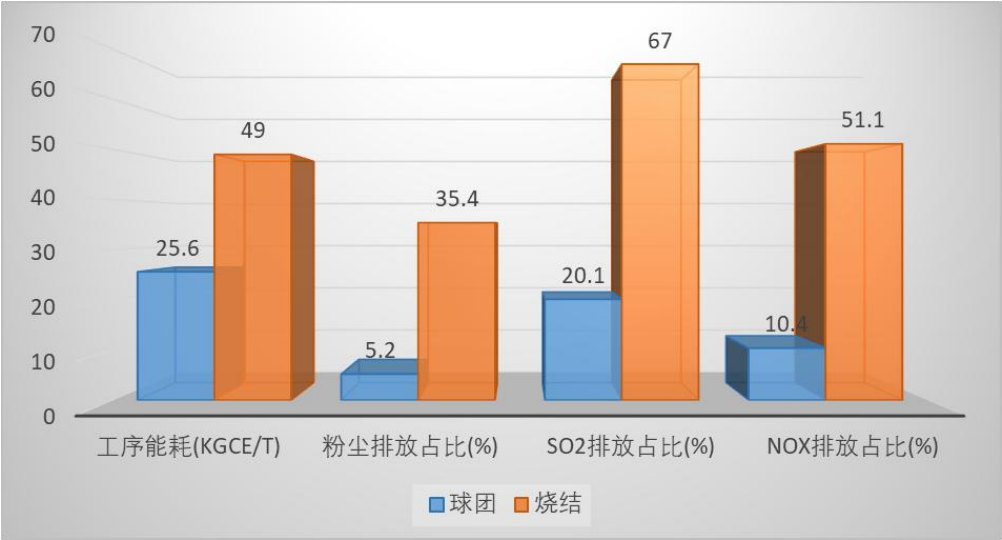
01

能耗低

02

各种污染物排放占钢铁流程总排放量中，球团工序的粉尘，SO2，和NOx排放占比分别是烧结工序的1/7、1/3、1/5。（固体燃料）

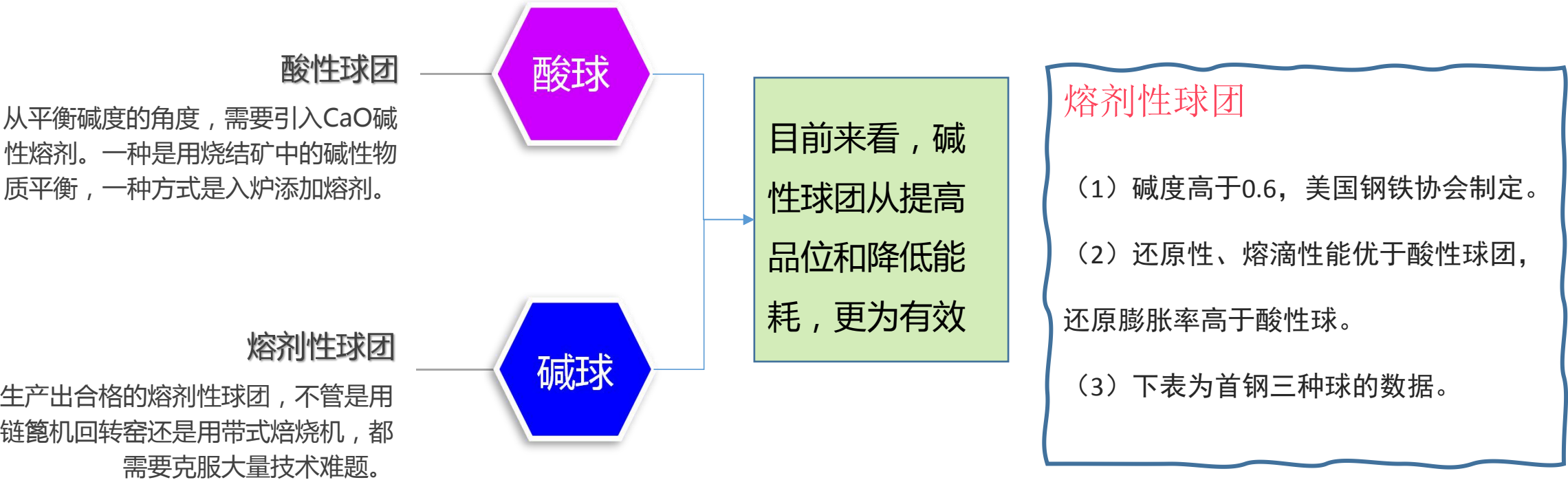
排放少



球团和烧结工序能耗及污染物排放占比对比图

球团在入炉料中的比例增加，也许是未来发展的必然！

# 一、高炉炉料结构 >>>



某厂熔剂性球团与酸性球团成分及性能指标对比

名称	TFe	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	S	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	抗压强度N/个	RI ( % )	RSI ( % )	碱度R2
熔剂性1	60.87	4.42	3.72	0.72	0.013	2.49	0.100	0.12	2316	87.58	20.81	0.84
熔剂性2	64.70	2.49	3.05	0.82	0.070	0.06	0.040	0.08	2733	81.14	22.20	1.24
酸性球	65.17	5.14	0.44	0.51	0.053	0.25	0.081	0.10	3120	67.73	13.09	0.09

# 一、高炉炉料结构 >>>

## 高炉合理炉料结构

高炉炉料主要为含铁炉料、燃料和熔剂三种。高炉的含铁炉料也有三种，即烧结矿、球团矿和天然块矿。含铁炉料的优化是高炉工作者和钢铁企业最关心的问题。所谓炉料结构的优化，就是如何科学合理地搭配以上三种含铁炉料，**使得高炉冶炼的技术经济效果达到最佳状态**。含铁炉料在生铁的成本中占60%以上，因此，如何优化配料，是降低生铁成本，增加经济效益的关键。

可以认为，炉料结构的合理性受到高炉本身条件的影响，因此我们只能就一些宏观的条件作出评述。

# 一、高炉炉料结构 >>>

---

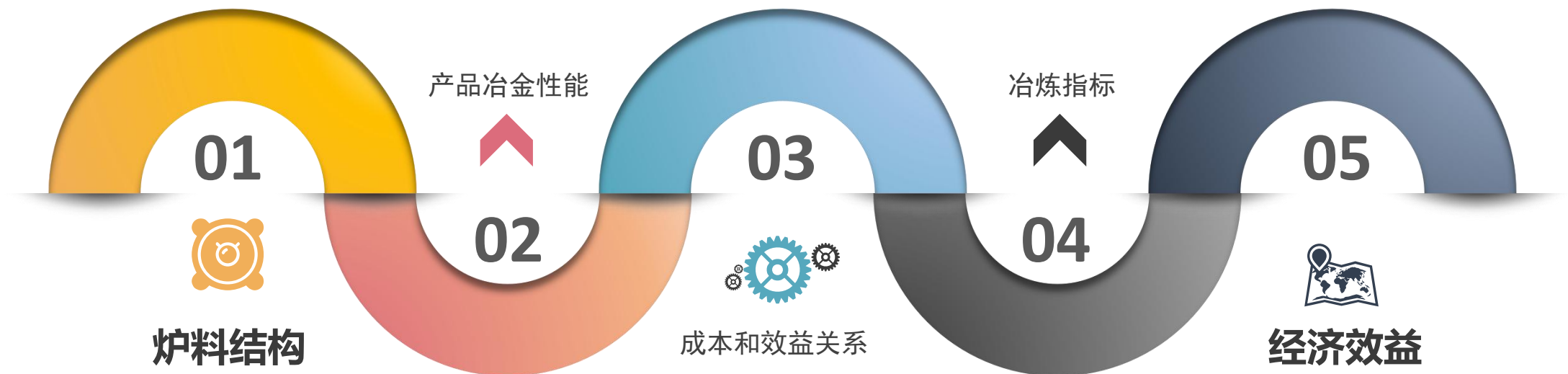
## 高炉炉料结构合理化的要求

- 1) 高炉在无熔剂入炉或少熔剂入炉的情况下，造出适宜碱度和适宜成分的高炉渣；
- 2) 炉料具有良好的高温冶金性能，能在炉内形成合理稳定的软熔带，利于高炉强化冶炼；
- 3) 炉料具有较高的综合入炉品位，能促进富氧大喷煤的实行；
- 4) 实现生产低成本。

# 一、高炉炉料结构 >>>

## 高炉炉料结构：效益优先原则

炼铁企业经营的最终目标是取得最大的经济效益。高炉炼铁的合理炉料结构，除了技术方面的因素之外，主要是经济效益起决定性因素。合理炉料结构的目的是为了改善冶炼指标，提高企业的经济效益。这就要求既要充分利用好本地的资源，又要对本地区资源的弊端加以控制；既要发挥本地矿的作用，又要用好外来矿。不少企业的生产实践证明，低成本不等于高效益。低成本只是企业的手段，而追求高效益才是企业的目的，在炉料问题上不能只考虑降成本，还应该从铁前的整体效益出发，考虑降低采购成本后可能会出现的问题。



# 一、高炉炉料结构 >>>

## 高炉炉料结构：碱度平衡原则

高炉炼铁要求将炉渣碱度控制在1.05~1.25。高炉冶炼要确保炉渣有好的流动性和较高的脱硫能力，以保证高炉生产的顺行。高炉无论以何种结构进行配料，最终总的炉渣碱度都要满足高炉正常生产的需求。

这一要求使得在讨论合理炉料的时候，必须要把碱性熔剂的用量和途径考虑清楚，而且其变化对效益的作用明显的。



# 一、高炉炉料结构 >>>

## 高炉炉料结构：炉料优势原则

各企业在进行炉料结构搭配的时候，应该了解各种含铁炉料的在冶炼时特点，通过合理的搭配，充分发挥各炉料其优点，减少炉料的负面影响。

合理炉料结构基础就是要求炉料自身性质较优，没有最佳的炉料质量，就不会有最佳的合理炉料结构。



# 一、高炉炉料结构 >>>

部分国家炉料结构情况

国家	高炉	炉容/m³	炉料结构/%			利用系数 t/（m³·d）	焦比 Kg/t	燃料比 Kg/t
			烧结矿	球团矿	块矿			
前苏联		2104	53.5	37.5	9.0	2.35	413	497
法 国	索尔梅2#	2175	75.0	17.0	8.0	2.33	447	
英 国	雷地卡1#	1573	65.0	35.0	0	1.71	492	
澳大利亚	纽卡斯特2#	890	73.5	17.0	9.4	1.92	483	514
荷 兰	艾莫依登7#	4470	39.8	52.3	7.9	1.63	405	463

\*各个高炉的经济技术指标差别比较大，提示我们要注意横向比较的条件。

# 一、高炉炉料结构 >>>

日本部分高炉炉料结构及技术经济指标

厂名	高炉容积 m³	利用系数 t·m <sup>-3</sup> ·d <sup>-1</sup>	块矿比 %	入炉熟料比/%			入炉料TFe %	焦比 kg·t <sup>-1</sup>	燃料比 kg·t <sup>-1</sup>	渣量 kg·t <sup>-1</sup>
				烧结矿	球团矿	合计				
神户 3号高炉	1845	2.19	13.3	86.7	0	86.7	59.31	385	491	275
室兰 2号高炉	2296	1.93	12.8	87.2	0	87.2	58.72	507	507	306
大分 1号高炉	4159	2.27	13.2	84.7	2.1	86.8	58.73	415	481	314
京滨 2号高炉	4502	2.29	15.6	75.2	9.2	84.4	58.57	452	508	314
水岛 3号高炉	3366	2.06	8.8	83.4	7.8	91.2	58.75	506	506	312

\*日本球团矿主要为酸性球团。

# 一、高炉炉料结构 >>>

西欧高炉炉料结构

国家	炉料结构		渣量 , kg/t
	烧结矿/%	球团矿/%	
瑞 典	0.5	99.5	146
德 国	51.1	48.9	184
荷 兰	48.0	52.0	205
芬 兰	73.7	26.3	203
比利时	87.0	13.0	259

\*西欧的炉料结构相对比较多元化。

# 一、高炉炉料结构 >>>

我国部分高炉典型炉料结构

单位	炉号	炉容 m³	熟料率 %	炉料结构			单位矿耗 kg	烧结矿碱 度
				烧结%	球团%	生矿%		
武钢	5	3200	89.7	72.1	17.6	10.3	1600	1.86
鞍钢	11	2580	99.84	69.12	30.72	0.16	1626	2.1
唐钢	3	2560	81.4	69.88	11.52	16.97	1652	1.96
涟钢	6	2200	85.5	63.8	21.7	14.5	1600	2.44
昆钢	6	2000	100	76.28	23.72	0	1646	1.85
邯钢	7	2000	85.63	64.89	20.73	14.38	1655	2.08
首钢	2	1726	87.15	73.39	13.76	12.85	1743	1.86
太钢	4	1650	96.15	79.64	16.51	3.85	1623	1.87
攀钢	4	1350	94.39	70.43	23.96	5.61	1985	2.23

# 一、高炉炉料结构 >>>

武钢5号高炉的炉料结构变化情

品种	比例	1995	1999	2001	2002	2003	2004
烧结矿	配比/%	74	70	70	69	68	68
	$\omega(\text{TFe})/\%$	55.86	56.71	57.62	58.77	57.90	57.73
	$\omega(\text{SiO}_2)/\%$	5.83	5.57	5.17	5.49	5.11	5.21
	碱度	1.76	1.76	1.75	1.61	1.75	1.74
球团矿	配比/%	18	17	17	20	22	23
	$\omega(\text{TFe})/\%$	64.01	64.36	65.84	66.66	66.60	66.57
	$\omega(\text{SiO}_2)/\%$	5.26	2.58	1.70	1.80	2.60	2.08
	碱度	0.37	0.63	0.49	0.27	0.20	0.25
澳矿	配比/%	3	5	3	1	3	1
南非矿	配比/%	1.0	3.0	5.5	7.5	2.5	3.0
海南矿	配比/%	3	5	3	1	3	4

# 一、高炉炉料结构 >>>

鞍钢近期高炉炉料结构情况

高炉	有效容积m³	炉料结构方式	入炉品位%	利用系数 t/(m³·d)	综合冶炼强 度t/(m³·d)	煤比kg/t	综合焦比 kg/t	人造富矿 kg/t
4#	1000	自熔性烧结矿	53 . 65	1 . 468	0 . 877	84	591	1827
		高碱度烧结矿 + 酸性球团矿	56 . 31	1 . 934	1 . 047	136	537	1660
7#	2557	自熔性烧结矿	54 . 32	1 . 475	0 . 826	91	552	1895
		高碱度烧结矿 + 球团矿	56 . 94	1 . 670	0 . 913	136	534	1621
10#	2580	高碱度烧结矿 + 球团矿	58 . 52	2 . 331	1 . 131	145	481	1531
11#	2580	高碱度烧结矿 + 球团矿	58 . 78	2 . 151	1 . 069	133	493	1544

\*鞍钢高炉的入炉情况比较有代表性，其炉料结构经历了自然碱度烧结矿、酸性烧结矿、自熔性烧结矿、高碱度烧结矿搭配酸性球团矿(或酸性烧结矿)四个时代。

# 一、高炉炉料结构 >>>

## 高炉炉料结构小结

综合来看，各种高炉炉料结构基本还是围绕主要的几种形式进行变化调整，我国高炉炉料结构主要还是以高碱度烧结矿为主，搭配酸性炉料，酸性炉料可为球团矿或块矿。最佳的高炉炉料结构应使高炉达到优质、高产、低耗和低成本的目的。

实践证明，使高炉获得良好经济效益的高炉炉料结构必须具备以下条件：

高炉炉料结构必须具备以下条件

保证熟料比前提下，高炉渣能获得适宜的碱度和成分；

炉料冶金性能好，有合理稳定的软熔带且利于高炉强化；

具有较高综合入炉品位，能促进富氧大喷吹等强化手段实施；

有利于降低生产消耗，实现生产成本的降低。



# 02

## 铁矿石冶金性能

良好冶炼效果的炉料结构，除了受到技术要求的影响，同时也受经济环境的制约。

## 二、铁矿石冶金性能 >>>

### 铁矿石冶金性能

**广义：**铁矿石冶金性能包括含铁品位、机械强度、粒度组成、还原性、低温还原粉率（或指数）、化学成分、软化及熔滴性能、有害杂质等。

**特指：**一般习惯是指需要通过高温装置测定的与冶炼相关的铁矿石性能指标。常用的包括还原性指数、低温还原粉化指数、荷重软化特性、热裂指数、还原膨胀指数等等。这些性能指标多数对检测方法进行了规范（包括ISO和GB），使用多采用推荐使用。

## 二、铁矿石冶金性能 >>>

冶金性能指标	标准名称	标准号
低温还原粉化指数 RDI	铁矿石 低温粉化试验 静态还原后使用冷转鼓的方法	GB/T 13242-2017
	高炉炉料用铁矿石 低温还原粉化率的测定 动态试验法	GB/T 24204-2009
还原性指数 RI	铁矿石 还原性的测定方法	GB/T 13241-2017
	高炉用铁矿石 用最终还原度指数表示的还原性的测定	GB/T 24189-2009
	高炉用铁矿石 荷重还原性的测定	GB/T 24530-2009
	高炉炉料用铁矿石 低温还原粉化静态试验 第1部分：与CO、CO2、H2和N2的反应	GB/T 31923.1-2015
	高炉炉料用铁矿石 低温还原粉化静态试验 第2部分：与CO和N2的反应	GB/T 31923.2-2015
荷重软化性能	铁矿石 高温荷重还原软熔滴落性能测定方法	GB/T 34211-2017
块矿热裂指数DI	铁矿石 热裂指数的测定方法	GB/T 10322.6-2004
还原膨胀指数RSI	高炉用铁球团矿 自由膨胀指数的测定	GB/T 13240-2018
球团抗压强度	高炉和直接还原用铁球团矿 抗压强度的测定	GB/T 14201-2018

\*当前，我国高炉入炉原料的矿石冶金性能检测基本都有对应的标准进行规范。

## 二、铁矿石冶金性能 >>>

### 注意标准的选择

当前我国与世界冶金行业企业交流频繁，当我们在阅读相关技术文献时，一定要知道相关数据来源执行的标准。

最典型的是我国GB低温还原粉化指数（RDI）和日本JIS低温还原粉化指数（RDI）是完全不同的，GB采用+3.15mm所占百分数，JIS采用-3mm所占百分数。

**国际标准化组织（ISO）标准**

**美国材料试验协会（ASTM）标准**

**日本工业标准（JIS）**

**德国钢铁研究协会（VDE）标准**

**英国标准协会（BSI）标准**

**前苏联国家标准（ГОСТ）标准**

## 二、铁矿石冶金性能 >>>

### 冶金性能指标的应用

目前来讲，行业对入炉矿石的冶金性能的控制没有一个统一标准。在一些资料中进行的規定，都是一些相对比较宏观的范围。

【例1】铁烧结矿，YB/T 421-2014

对烧结矿等级进行了分类。

【例2】高炉炼铁工艺设计规范，GB 50427 -

2008

工艺设计中部分冶金性能进行了規定。

品级		转鼓指数 (+6.3mm)	低温还原粉化指数 RDI (+3.15mm)		还原度指数 RI	
优质铁烧结矿		≥72.00	≥72.00		≥78.00	
一级铁烧结矿 (R≥1.5)		≥68.00	≥72.00		≥78.00	
二级铁烧结矿 (R≥1.5)		≥65.00	≥70.00		≥75.00	

炉容级别 m³		1000	2000	3000	4000	5000
烧结矿	转鼓指数 (+6.3mm)	≥68%	≥72%	≥76%	≥78%	≥78%
	含 FeO	≤9.0%	≤8.8%	≤8.5%	≤8.0%	≤8.0%
球团矿	强度, N/个	≥2000	≥2000	≥2000	≥2500	≥2500
	转鼓指数 (+6.3mm)	≥86%	≥89%	≥92%	≥92%	≥92%
	RDI	≥65%	≥80%	≥85%	≥89%	≥89%
	膨胀率	≤15%	≤15%	≤15%	≤15%	≤15%
块矿	热爆裂性能 DI	—	—	≤1%	≤1%	≤1%

## 二、铁矿石冶金性能 >>>

### 企业自定冶金性能控制

经过40年来的发展（周取定教授于1980年应《国外铁矿粉造块》编写组要求编写“国外烧结矿、球团矿冶金性能检验方法”算起），目前各个企业都对入炉原料冶金性能控制制定了企业标准，形成了制度化的操作控制规范。

总的来说，注重入炉料冶金性能，对稳定高炉操作起到了积极作用。但是当需要向更高目标迈进时，需要知道所以然的问题，就显得越来越突出。

两个例子：

- （1）通常高炉烧结矿RDI控制不小于60%，但为什么40-45%的钒钛烧结矿，冶炼没有任何问题？
- （2）高炉焦炭反应后强度CSR%一般不小于65%，为什么有的大高炉焦炭远小于此值，却照常正常冶炼？

## 二、铁矿石冶金性能 >>>

### 冶金性能指标的局限性

(1) 冶金性能检测方法的发展。以低温还原粉化指标为例，各个国家的方法有些差异，但大致相似。说明这些冶金性能的检测方法被冶金专家广泛接受。

(2) 目前指标的应用思考。一般来说生产中这些冶金性能指标的稳定，可以作为高炉操作的必要条件。但是，当我们想要通过这些指标去解析高炉过程，可能它就会显现出局限性。

日本钢铁厂 (JIS) :

还原设备中将500g粒度15~20mm的试样，在成分CO30%，N<sub>2</sub>70%的煤气中（温度550℃，流量15L/min）还原30min，然后在林德转鼓中测量粉化率。指标粉化率。

德国奥特弗莱森研究协会(Othfresen)

该法使用的旋转反应管，反应管在加热及还原过程中以每分钟10转的速度旋转。加热到500℃。试样用CO24%、CO<sub>2</sub>16%及N<sub>2</sub>60%的混合气体还原，流量15L/min。指标粉化率。

德国钢铁厂试验方法

煤气成分为CO20%，CO<sub>2</sub>20%，N<sub>2</sub>60%，流量为20L/min (标态)，还原时间为60min，还原温度为500℃，在2中冷却。。以大于6.3mm，大于3.15mm及小于0.5mm的百分含量作为评价标准。

英国钢铁研究协会

与德国奥特弗莱森研究协会实验方法相似，为动态还原方法。

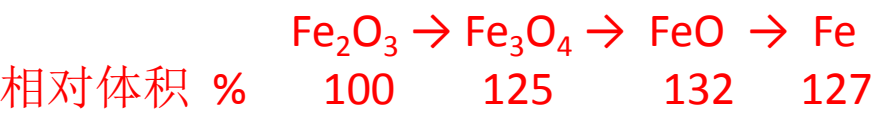
## 二、铁矿石冶金性能 >>>

### 关于低温还原粉化指标的讨论

烧结矿冶金性能指标是衡量其品质好坏的标准，其中很重要的一项指标就是烧结矿的低温还原粉化指标。随着高炉向大型化发展，炉料透气性就显得尤为重要，而高炉上部的炉料粉化情况直接影响高炉的透气性，关系到高炉能否顺行，因此，烧结矿的低温粉化性能引起了炼铁界的高度重视。

#### (1) 铁矿石低温还原粉化机理

烧结矿发生低温还原粉化的根本原因是：烧结矿中的再生 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 在低温（ $400^\circ\text{C} \sim 600^\circ\text{C}$ ）时，由 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 还原成 $\gamma\text{-Fe}_3\text{O}_4$ ，由于前者为三方晶系六方晶格，而后者为等轴晶系立方晶格，在还原气体作用下发生了晶格的转变，造成了结构的扭曲，产生极大的内应力，导致在机械作用下严重的破裂。还原过程中产生的内应力主要是由烧结矿中赤铁矿逐级还原时体积膨胀引起的。



## 二、铁矿石冶金性能 >>>

### 关于低温还原粉化指标的讨论

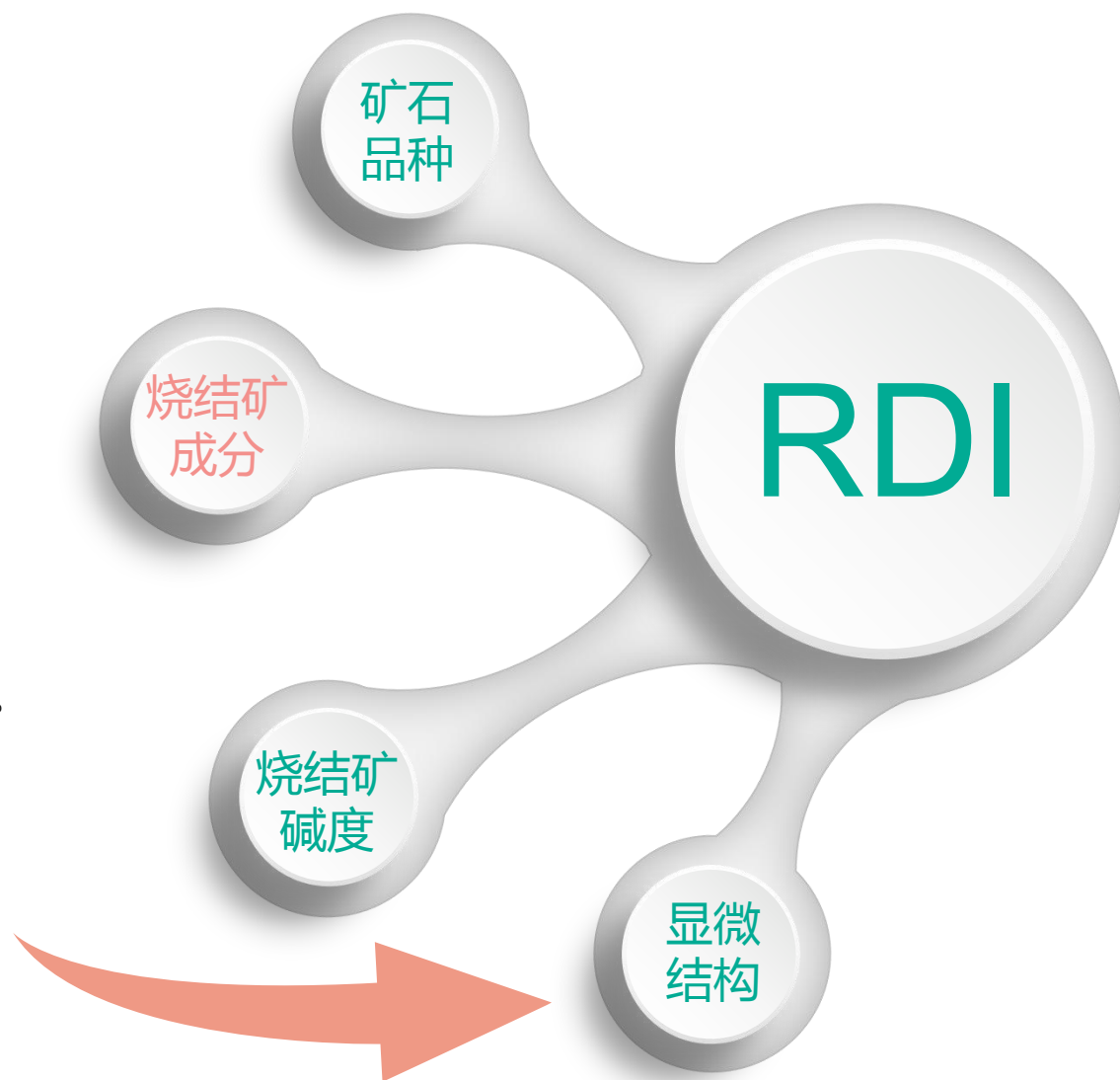
#### (2) 低温还原粉化性能的影响因素

A。一般以赤铁矿为原料的烧结矿低温还原粉化率较高，以磁铁矿为原料的烧结矿低温还原粉化率较低。

B。烧结矿中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TiO}_2$ 会使烧结矿粉化性能变差，碱金属最后会进入烧结矿的玻璃相，引起玻璃相韧性的减弱，容易产生断裂，致使低温还原粉化增加。

C。碱度的升高矿物组成发生明显变化，铁酸钙数量增多，导致赤铁矿和玻璃相数量则减少，再生 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量也相对地减少。但碱度过高又会导致应力集中而加剧低温还原粉化。

D。烧结工艺过程的控制是最容易忽略的影响低温还原粉化因素，尤其是粉尘污泥的影响、有效风量及漏风率的影响，都需要正确评估。



## 二、铁矿石冶金性能 >>>

### 关于低温还原粉化指标的讨论

#### (3) 卤化处理改善烧结矿低温还原粉化性能

喷洒卤化物溶液可减轻Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>向Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>还原的剧烈程度，从而削弱膨胀应力的集中，达到抑制低温还原粉化目的，明显降低低温还原粉化率。

温度升高到600~800℃时卤化物会气化，烧结矿的表面和微气孔又能与还原气体接触，因此不会影响烧结矿的还原性。

卤化物进入煤气会对煤气管道系统造成腐蚀，此问题必须给予特别关注。

矿石低温还原粉化指标测定

送样单位: 重庆钢铁股份有限公司


样品编号: S1-0321

收样时间: 2014-3-21

实验时间: 2014-3-22

所属项目: 原燃料性能检测

联系人及电话:



ChongQing University of Science and Technology  
City of University.ChongQing  
CHN  
401331  
023-65023702

执行标准	GB / T 13242-91
------	-----------------

496.5
30.2
65.1
16.2

矿石低温还原还原粉化指标测定

送样单位: 重庆钢铁股份有限公司


样品编号: S1-0321-CaCl2

收样时间: 2014-3-12

实验时间: 2014-3-17

所属项目: 原燃料性能检测

联系人及电话:



ChongQing University of Science and Technology  
City of University.ChongQing  
CHN  
401331  
023-65023702

执行标准	GB / T 13242-91		
反应前试样质量	505.2	反应后剩余质量	498.0
M <sub>D1</sub> ,g	303.7	RDI <sub>+6.3</sub> ,%	61.0
M <sub>D2</sub> ,g	95.2	RDI <sub>+3.15</sub> ,%	80.1
M <sub>D3</sub> ,g	48.8	RDI <sub>+0.1</sub> ,%	10.1

RDI,%

80.10

项目负责人签名:

打印按钮

%

65.08

关于低温还原粉化指标的讨论

(4) 对 RDI 检验数据的误差认识

在实际工作中经常会遇到同一个样的实验误差比较大，可以阅读标准附录A，按照其中的规定进行处理。

需要理解这种情况产生是正常的，因为烧结矿的均质性是比较差的，只要按照标准中的规定处理就没有问题。

表 A1			
还原粉化指数平均值 $RDI$ %( $m/m$ )	$ x_1 - x_2 $ 极差范围		
	A	B	C
100	—	—	—
95	1.5	1.8	2.0
90	3.0	3.6	3.9
85	4.5	5.4	5.9
80	6.0	7.2	7.8
75	7.5	9.0	9.8
50	7.5	9.0	9.8
25	7.5	9.0	9.8
20	6.0	7.2	7.8
15	4.5	5.4	5.9
10	3.0	3.6	3.9
5	1.5	1.8	2.0
0	—	—	—

$|x_1 - x_2| \leq A$ ，则取两次结果的平均值。  
 $A < |x_1 - x_2| \leq B$ ，，则进行第三次试验，得出  $x_3$ 。此时，若  $|x_{\max} - x_{\min}| \leq B$ ，  
则取三次结果平均值；若  $B < |x_{\max} - x_{\min}|$ ，则做第四次试验。

### 关于低温还原粉化指标的讨论

#### (5) 实验过程中的几个问题

在实验检验的过程中，高温还原炉使用会遇到一些问题，提出共参考：

- A. 定期校准中心热电偶。低温还原粉化实验对温度的敏感性一般，但还是需要定期校准为好。
- B. 对气氛组成最好在线监测。气氛的影响是显著的，有条件的话对煤气成分进行在线监测，最起码过程中一定要定期分析气体成分。
- C. 如果使用发生炉煤气一定要对出口气体流量进行监控，避免堵塞造成还原反应气体量不足。

## 二、铁矿石冶金性能 >>>

### 参与企业RDI攻关的体会

- (1) 烧结矿碱度到1.9提高到2.0;
- (2) 循环污泥等物料13%降到3%;
- (3) 控制烧结矿铝硅比小于0.3;
- (4) 适当提高FeO水平;

### 达钢烧结矿冶金性能优化技术研究 项目研究报告



四川省达州钢铁集团有限责任公司  
重庆科技学院 冶金资源高效利用与清洁生产研究所  
2019年1月8日



# 03

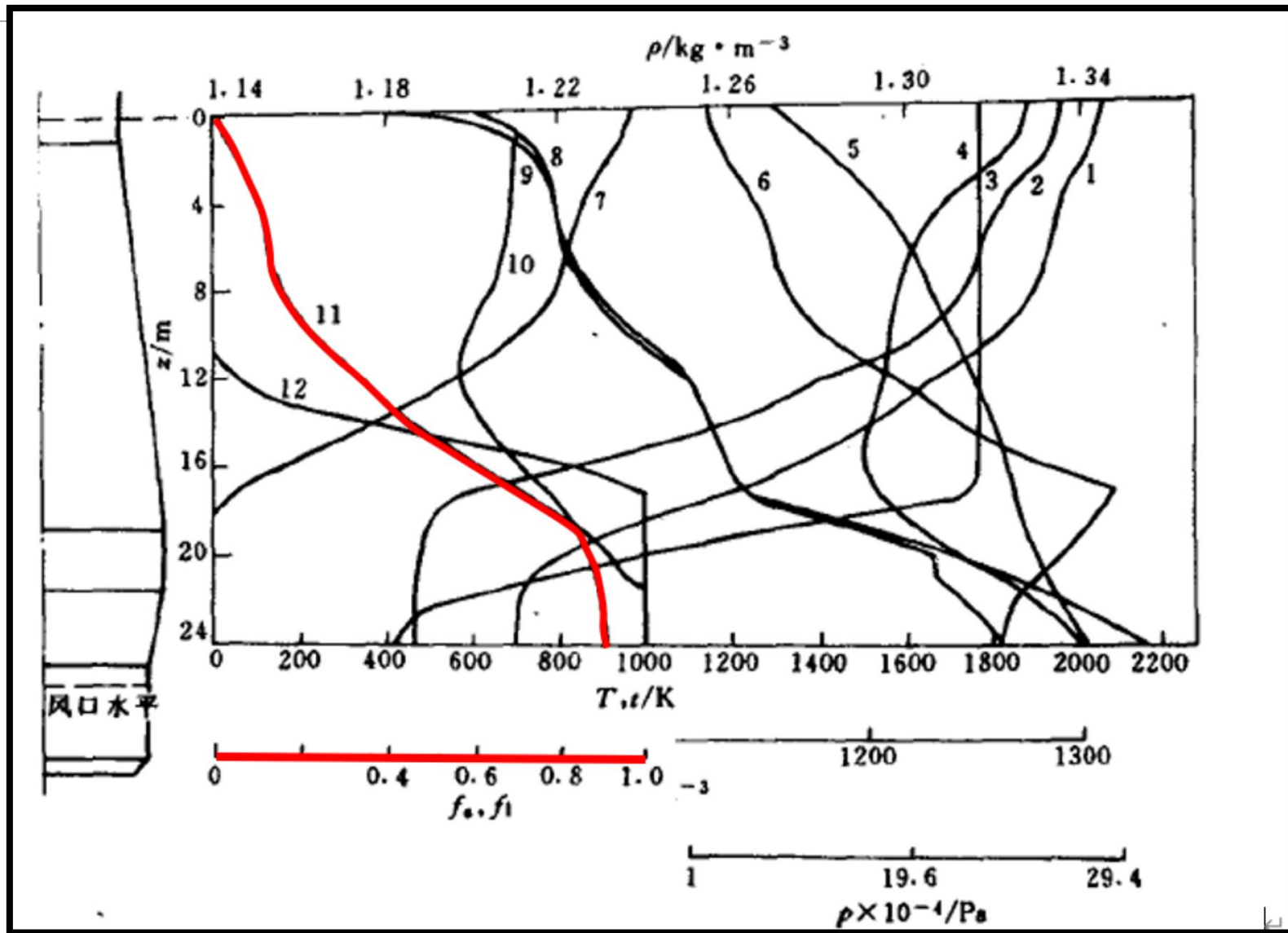
## 矿石还原的真相

铁矿石中铁氧化物与气体还原剂 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ 之间的反应难易程度称为铁矿石的还原性。

### 三、矿石还原的真相

#### 题目的由来

关于“矿石还原的真相”只是因为想将铁矿石的还原性指数与高炉内的矿石还原进程联系起来。现在各个企业通过GB/T 24530-2009测定的烧结矿还原性基本在60-80%，这需要我们分析还原在高炉内实际的进展情况。



张玉柱教授计算高炉炉况（红线11为铁矿石反应率）

铁矿石到达软融带时反应率不超过40%

### 三、矿石还原的真相

#### 高炉解剖揭示的矿石还原进程

右图是取自张建良的《高炉解剖研究》一书，下图来自神原健二郎的《高炉解体研究》，结论类似。。

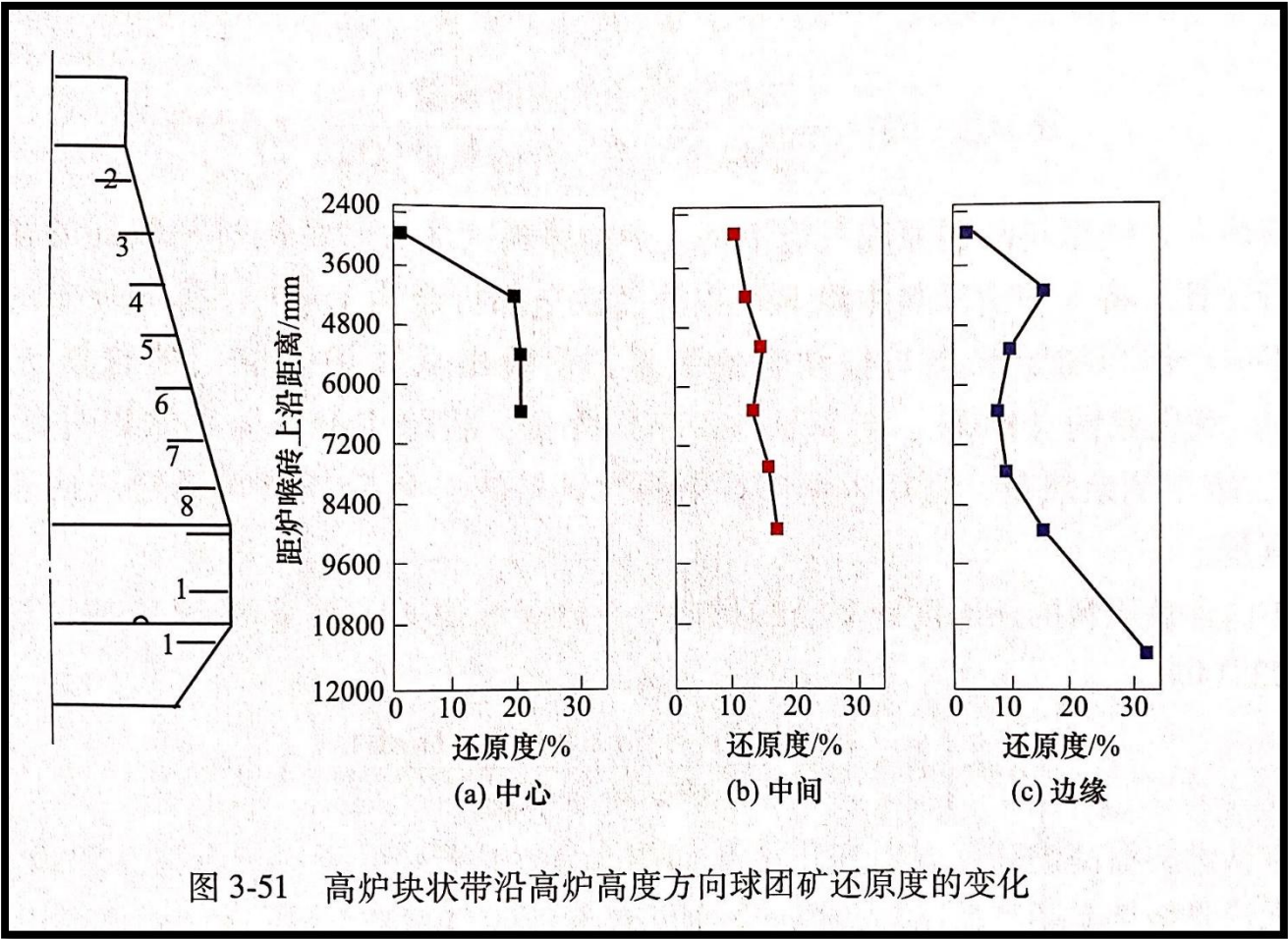
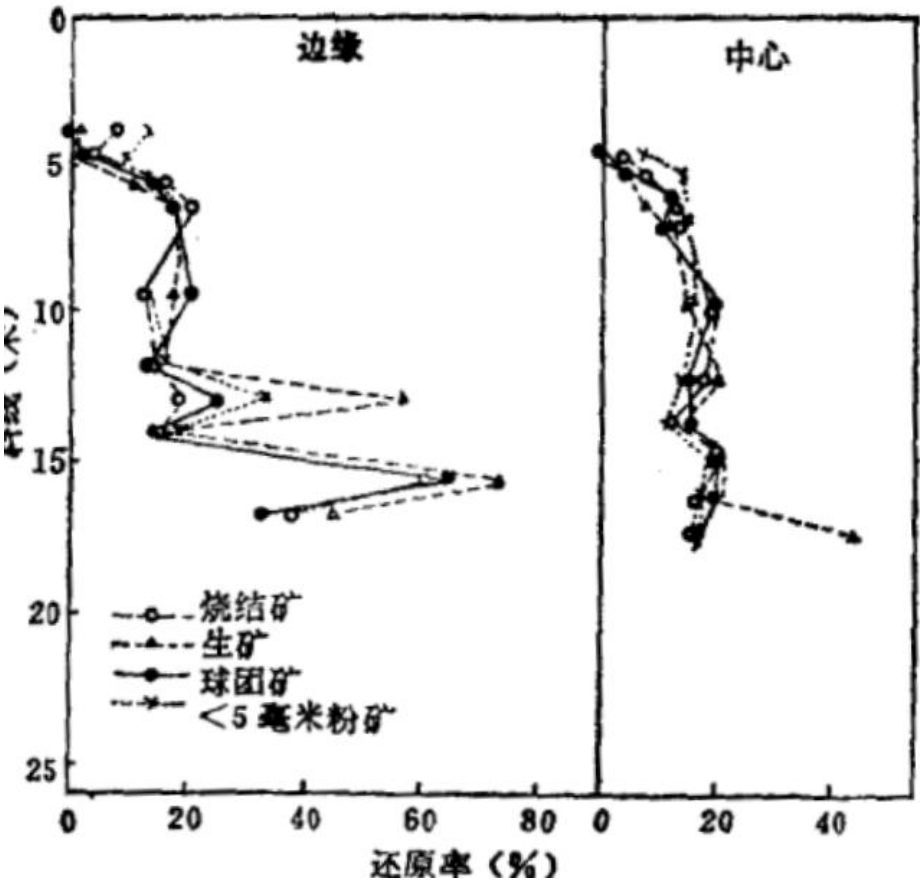


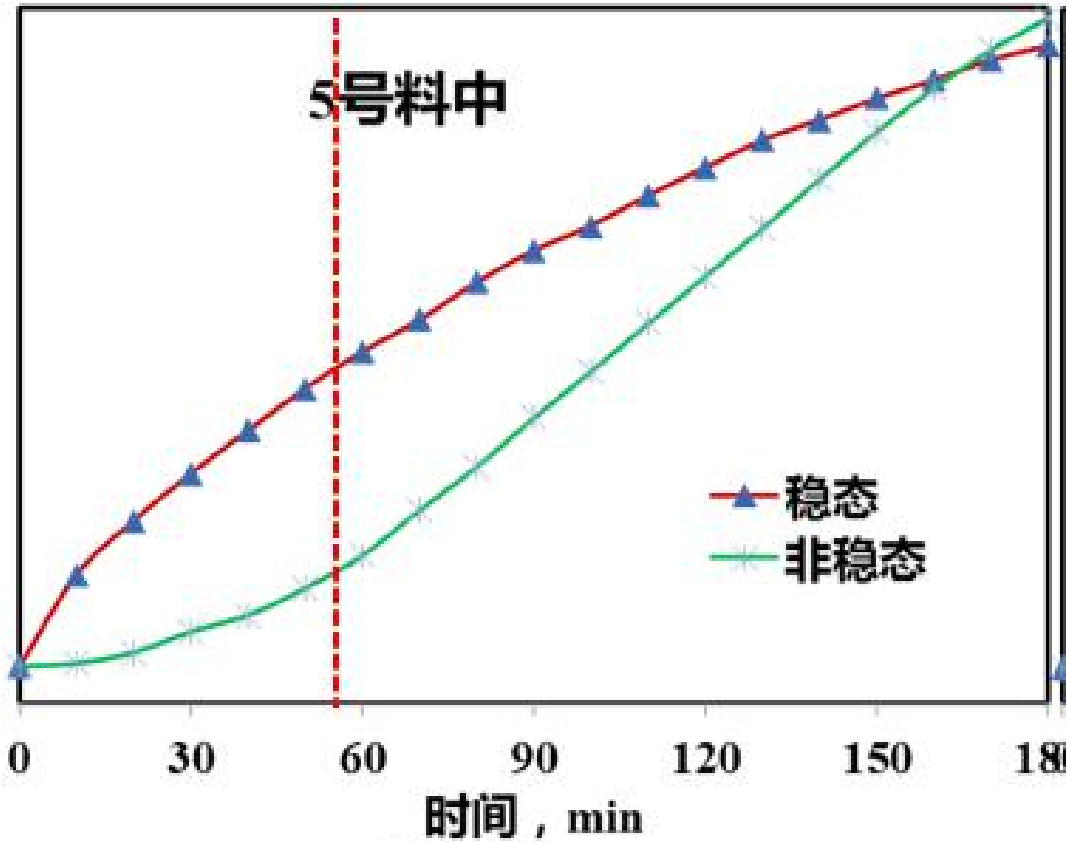
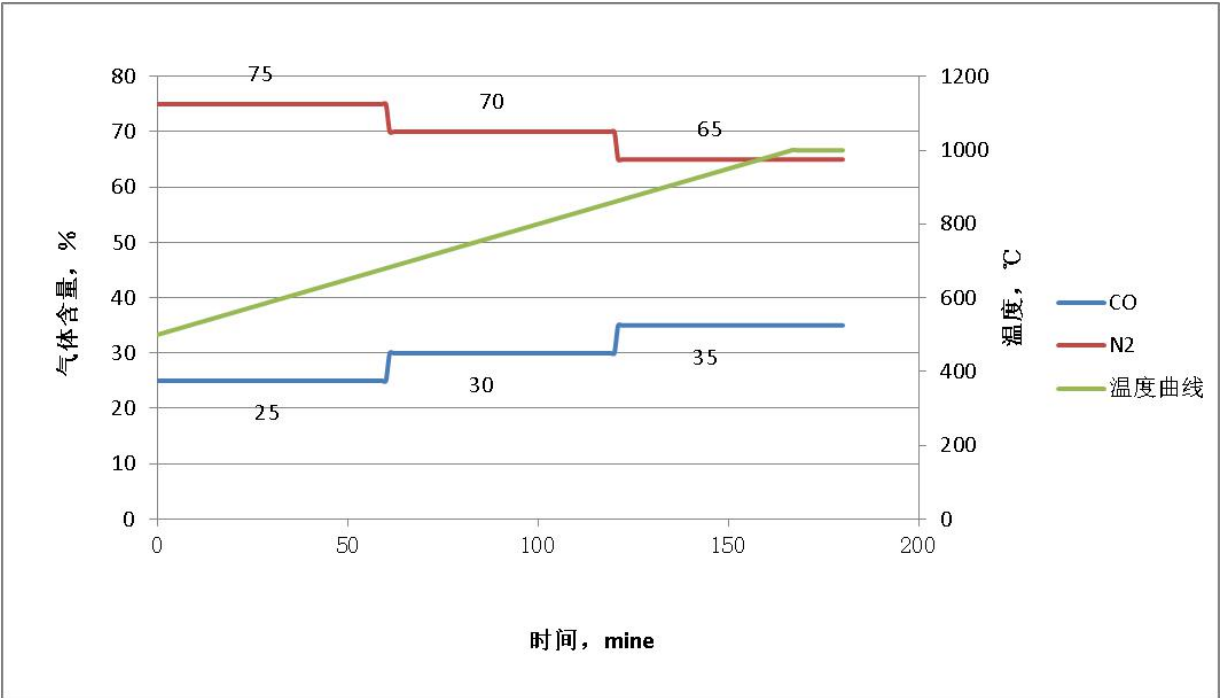
图 3-51 高炉块状带沿高炉高度方向球团矿还原度的变化

解剖结果表明，实际在软融带之前，铁矿石的还原度不会超过40%，与张玉柱教授计算的结论相似（日本人研究得出高炉冷却过程形成的再氧化率为20-25%）。此结果表明，剩下的还原可能是在“液-固”或“液-液”反应完成的。

### 三、矿石还原的真相 >>>

#### 铁矿石还原性的应用

目前对还原性对高炉冶炼过程的影响描述都过于笼统，无非认为高还原性指数的铁矿石对发展间接还原有理。但如何有利？下限的依据是什么？基本没人说得清楚。



国标和非标准还原性指数对比

# 三、矿石还原的真相 >>>



## 铁矿石还原性的应用

在温度<700℃的区域内，由于温度低反应速度很慢，间接还原不可能得到很大的发展，从减少烧结矿还原粉化的角度看，也不希望低温区的还原速度高。因此，依靠提高烧结矿低温还原性来改善煤气能量利用是不现实的。

在700~1100℃范围内，由于温度处于较高水平，为还原反应的快速进行创造了条件。中温还原性好，则矿石由块状带进入软熔带之前FeO含量就低，具有较高的软化温度和滴下温度，软熔区间也窄，有利于扩大高温块状带体积，发展间接还原，从而提高煤气利用率（ $\eta_{co}$ ）。

铁矿石不仅要求900℃中温还原度RI高，也要求在1100℃以上高温时还原性好。一般认为，中温还原性好的铁矿石在高温区仍可保持较好的还原性。

## 三、矿石还原的真相 >>>

### 铁矿石还原性的影响因素

#### (1) 碱度对还原性的影响

烧结矿的碱度对烧结矿还原性能影响较大。碱度为1.2时，烧结矿的粘结相以CS ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) 为主，且大多为玻璃质，抑制烧结矿的还原。当碱度提高到1.4时，生成了CF ( $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ )，此时CS和CF共存，还原性有所提高。随着碱度的继续提高，烧结矿中铁酸钙量逐渐增多，从而烧结矿的还原性也逐渐提高。

#### (2) $\text{SiO}_2$ 对高温还原性的影响

研究指出，烧结矿的还原性随烧结矿中 $\text{SiO}_2$ 含量的增加而降低。因为 $\text{SiO}_2$ 含量增高，增大了烧结时液相粘度及表面张力，对气流阻力增大，降低了烧结矿的气孔度，易形成致密的烧结矿。这虽有利于提高烧结矿的强度，但不利于改善烧结矿的还原性。

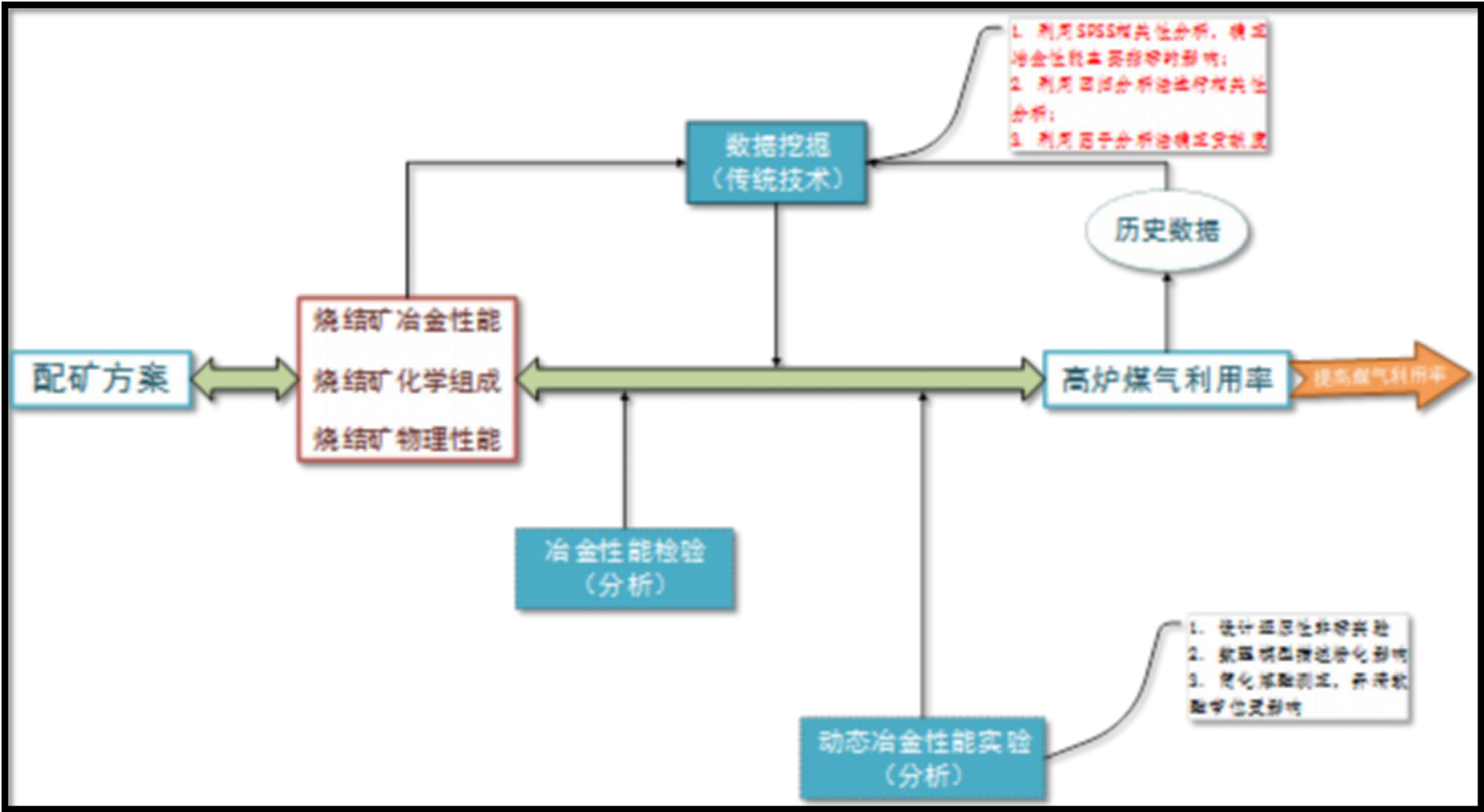
#### (3) $\text{FeO}$ 对高温还原性的影响

降低 $\text{FeO}$ ，既可使烧结矿中最易还原的 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量提高、最难还原的铁橄榄石含量减少，又可使烧结矿气孔率增加，从而提高烧结矿的高温还原度。

### 三、矿石还原的真相 >>>

#### 关注铁矿石还原性与煤气利用率的关系

基于高炉煤气利用率提升为目标，提出并系统研究高炉温度气氛条件下烧结矿还原-软熔机制，拓宽并完善了烧结矿冶金性能与高炉状态变化适应性，揭示烧矿冶金性能与高炉煤气利用之间的内在关系。





# 04

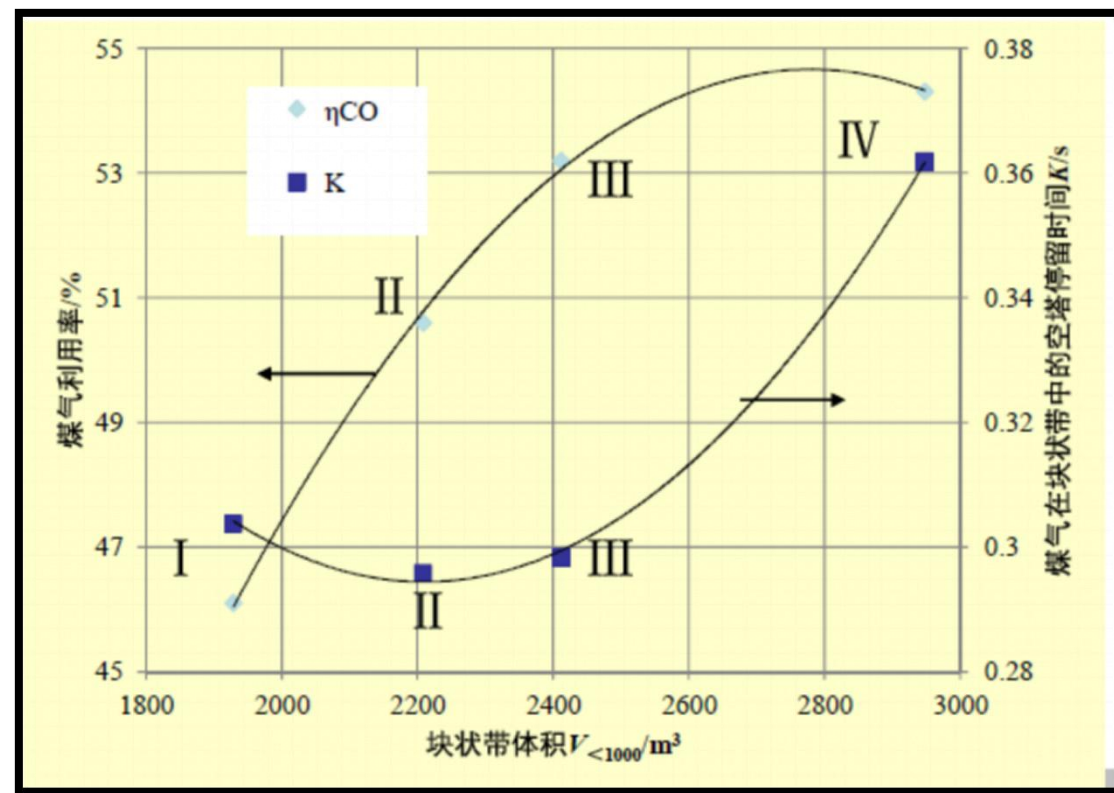
## 关注块状带体积

实践证明，块状带的体积比与煤气利用率 and 好地正相关。

## 四、关注块状带体积 >>>

### 煤气利用率与块状带体积比-铁矿石荷重软化性能

铁矿石不是纯物质的晶体，没有一定的熔点，而是具有一定范围的软熔区间。在高炉冶炼过程中，炉料在连续下降过程中，在上升气流的作用下，随着温度不断的升高，铁矿石不断地被还原、加热，并软化熔融。在高炉内部，炉料从开始软化到滴落的区域称为软熔带，软熔带的位置、形状和厚度对高炉操作有显著影响，它决定了高炉内煤气的分布状况，并与高炉操作的稳定性有密切关系。此外软熔带的高度对铁水的含硅量也有较大影响，而高炉含铁炉料的还原、软化、熔融是形成软熔带的基本条件，因此，研究和掌握含铁炉料的软化、熔化及滴落性能具有重要的意义。



取自王筱留和项中庸两位先生的报告，  
数据来自‘铁&钢’1976.

## 四、关注块状带体积 >>>

### 软熔带的形状与特点

Λ	形状像倒写的V。特点是：中心温度高，边沿温度低，煤气利用较好，对炉墙维护有利，而且对生铁脱硅和脱硫以及高炉冶炼过程一系列反应有着很好的影响。
V	形状像V，其特点刚好与倒V形相反。边沿温度高，中心温度低，煤气利用不好，而且不利于炉缸一系列反应。
W	其特点与效果介于两者之间。

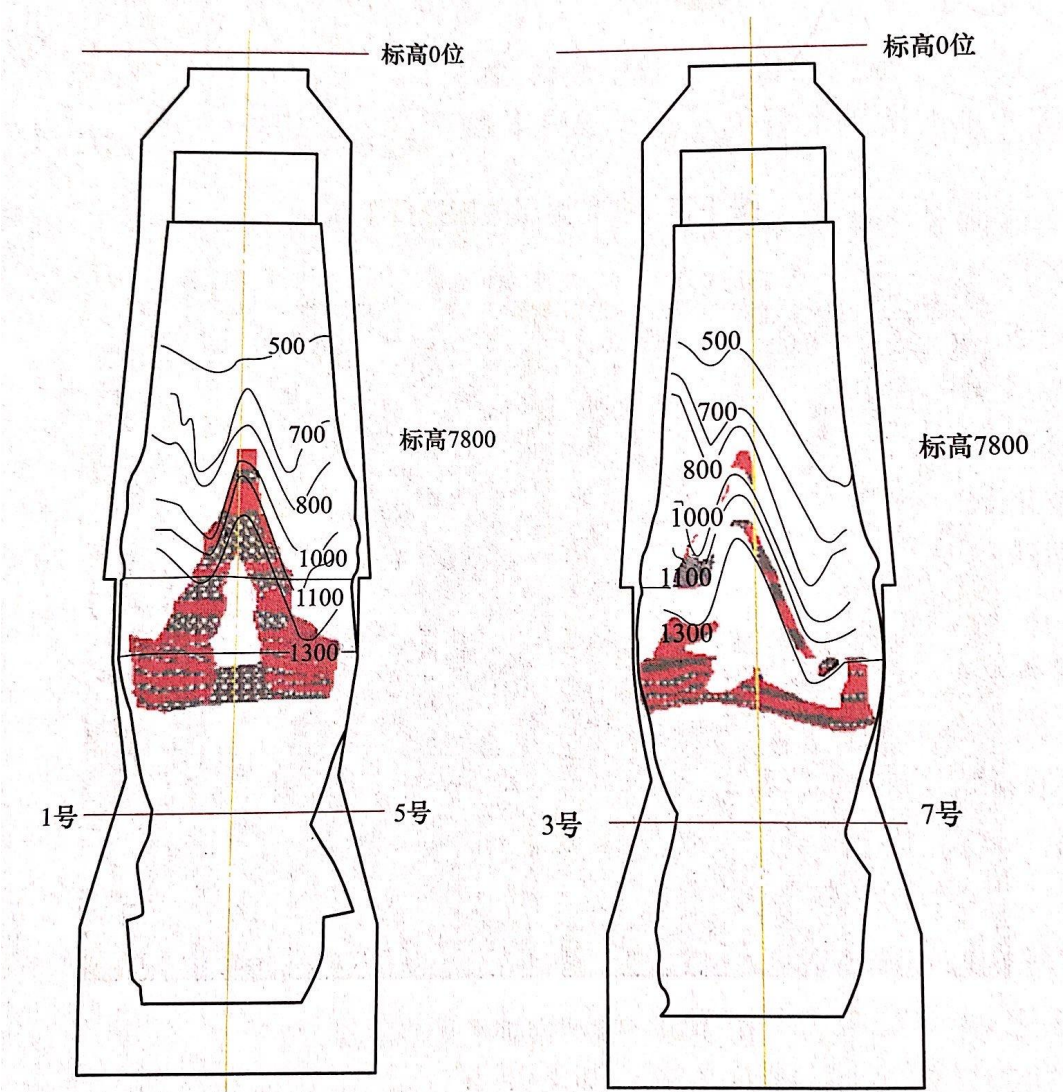


图 3-22 不同风口方向高炉软熔带纵剖面图

## 四、关注块状带体积 >>>

### 软融带对高炉冶炼的影响

一般我们认为矿石软融性能影响着块状带的大小（体积），从而影响着煤气利用率。但同时还需要注意，软融带的熔融层还影响着高炉内煤气流和温度场的分布。

描述软融带，一般有几个特征量（温度）即可。

软融带高度：主要通过开始软化温度（ $T_{10\%}$ ）描述软融带高度位置，通常要求该值不低于 $1100^{\circ}\text{C}$ 。软熔带高度上移（ $T_{10\%}$  减小），块状带的体积则减小，即矿石的间接还原区相应减小，煤气利用变差，焦比升高；反之，软熔带高度位置降低（ $T_{10\%}$  增大），可以提高煤气利用率，降低焦比，但是高炉透气性不好。

软熔带厚度：主要通过软融温度区间（ $\Delta T$ ）来描述，当厚度较大含有较多的焦炭夹层，供煤气通过的断面积大，煤气通过的阻力减小；反之若焦炭夹层较少，煤气通过时阻力增大。

所以，较高的软熔带，高炉透气性好，属于高产型，一般利用系数较高；较矮的软熔带，煤气利用率好，属低焦型，燃料比较低。

## 四、关注块状带体积 >>>

### 软熔性能的影响因素

#### (1) 送风制度对软熔带的影响

风速增大， $V \rightarrow M \rightarrow W \rightarrow \Lambda$ （风速大于3.5，均为 $\Lambda$ ），反之风速减小， $\Lambda \rightarrow W \rightarrow V$ 。改变风口直径可影响软融带根部位置和厚薄变化。

#### (2) 料制度对软熔带的影响

料批增大层数减少且料面趋平坦，认为边沿矿层厚度增加幅度大于中心，易于形成倒V型软熔带。

#### (3) 脉石成分及数量的影响

高炉的操作条件对软熔带的位置、形状与厚薄有一定的影响，但是矿石的软化及熔滴特性才是起决定性作用的因素。

#### (4) 铁矿石还原性能

烧结矿还原性好，易还原出金属Fe则进入渣中的FeO相应减少，使烧结矿具有较高的软熔温度。

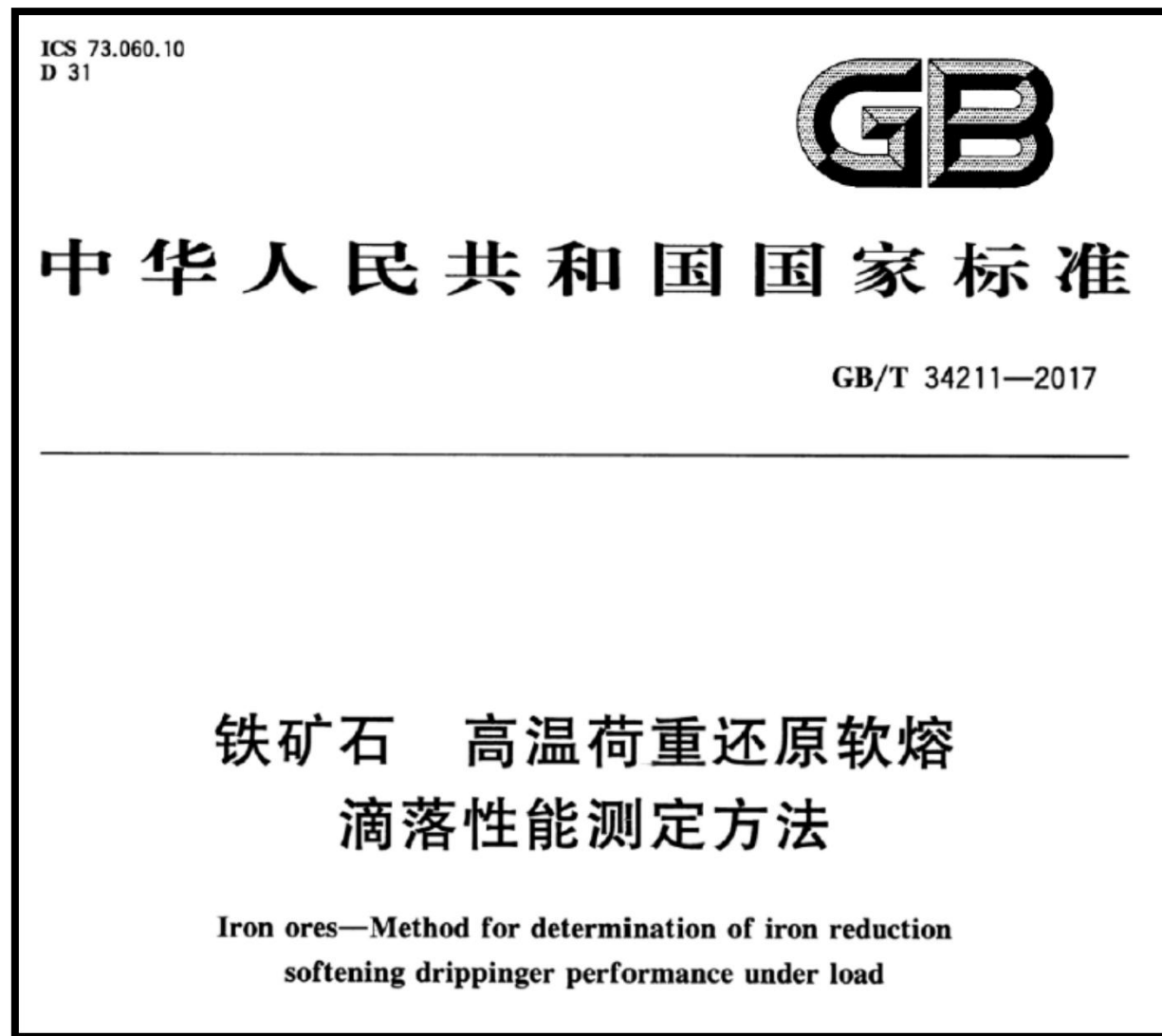
#### (5) 碱度的影响

通常碱度高则荷重软化的特征温度相应提高，原因可能是高熔点的C2S更容易形成。

## 四、关注块状带体积 >>>

### 实验方法

2017年这个实验方法的标准已经颁布，试样的方法基本沿用整合了过去国内各个研究机构的方法，以后会有一个统一标准为专业人员所用。





# 202

# 感谢!

第十二期全国炼铁、烧结、焦化、球团技术专题培训班

万 新

2020. 08. 15

# 0

