

福武刚 等著 杜鹤桂 等译

高炉回旋区和 炉缸工作文集

冶金工业出版社

87
TF573
2

3

高炉回旋区和炉缸 工作文集

福武刚 等著

杜鹤桂 等译

冶金工业出版社



B

364100

内 容 简 介

本书从理论上探讨了高炉风口回旋区的气体动力学特性,研究了风口燃烧带数学模型,提出了对高炉下部工作状态的研究成果,此外还介绍了高炉炉缸工作经验,讨论了高炉喷吹煤油混合物的新工艺、高温区焦炭反应和结构变化等问题。这些研究成果对提高炼铁理论水平、改进研究方法很有参考价值,对指导高炉生产也有积极意义。

本书选译自《高炉炉缸和回旋区国际会议文集》(澳大利亚,1981年3月)(INTERNATIONAL BLAST FURNACE HEARTH AND RACEWAY SYMPOSIUM, 1981)。

高炉回旋区和炉缸工作文集

福武刚等著

杜鹤桂等译

冶金工业出版社出版

(北京东长安街22号邮政编码100881)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张 8 1/4 字数 218 千字

1986年11月第一版 1986年11月第一次印刷

印数00,091~1,960册

统一书号: 15062·4468 定价2.25元

译者的话

高炉炉缸和风口回旋区的物理、化学变化十分复杂,炉缸工作状态的好坏直接影响高炉的正常冶炼,炼铁工作者对此一向予以足够的重视,并作出了不懈的努力,探讨研究这方面的课题。但由于问题本身的复杂性和热态实验条件的限制,对有关这方面的课题的研究还不那么广泛,而且有待进一步深化。1981年3月,N.斯托德理尔教授组织在澳大利亚召开了“高炉炉缸和回旋区国际学术讨论会”,会议上讨论了高炉下部的工作状态,交流了研究成果,发表了有关这一课题研究的论文。为了向我国广大炼铁工作者介绍这方面的成果,推进我们的科研工作,提高科技水平,我们组织选译了会议文集的15篇文章,供有关同志参考。

选译的这些文章,在一定程度上反映了国际上有关炉缸和风口回旋区研究的成果,具有一定的代表性。例如,羽田野道春等人通过对回旋区气体力学的研究,应用回旋区热模型得出的煤气和焦炭燃烧、运动之间的模型,可以预测实际高炉的下部行为;B.K.杜尔诺夫等用建立的回旋区的动力学模型,描述了焦炭在回旋区运动、燃烧的重要特性;福武刚等提出了炉缸内气、固、液态的力学平衡关系,就如何保持适量的渣铁排放速率以及炉底无焦层对冶炼和炉底寿命的影响提出了新的见解,并指出了高炉连续出铁的重要性。此外,有的论文还讨论了焦炭在炉缸中的行为和高温区焦炭的反应及结构变化,这对炉缸工作状态的影响也是重要的。从这些文章中可以看出,把传热、传质、传动量以及数模化引入炉缸下部的研究工作所取得的成果,对提高炼铁理论水平,改进研究方法是很有帮助的,同时对指导高炉生产实践也是有积极意义的。

参加本书翻译工作的有东北工学院炼铁教研室杜鹤桂、杨兆祥、虞燕霞、张家驹、邓守强、施月循等同志,杜鹤桂、施月循负责审校。由于水平所限,书中难免有不妥和错误之处,请读者批评指正。

1985年10月

目 录

1. 高炉炉缸的排放	1
2. 高炉回旋区气体力学的研究	20
3. 高炉回旋区的范围及其与综合鼓风参数的关系	37
4. 高炉回旋区动力学模型的研究	43
5. 高炉风口燃烧带的数学模型	54
6. 高炉喷吹煤—油混合糊	69
7. 充填床中非均质液体排放的数学和物理模拟	81
8. 高炉炉缸中的铁水流动	102
9. 高炉炉缸气体力学和传热传质过程的数学模型 及其在冶炼分析上的应用	125
10. 高炉下部流体流动条件及耐火材料的侵蚀	133
11. 高炉风口区煤气运动机理	152
12. 使用高灰分焦炭冶炼的印度高炉炉腹和炉缸的 特征	164
13. 回旋区周围的型焦的破裂	181
14. 千叶钢铁厂1号高炉下部焦炭层和液体流的 剖析	193
15. 澳大利亚高炉高温区焦炭的反应和结构变化	209
参考文献	238

1. 高炉炉缸的排放

福 武 刚 岡部俠児

(日本川崎钢铁公司研究室)

摘 要

本文回顾了炉缸排放理论和实践的发展。

在六十年代后期七十年代早期，高炉容积和顶压增大后，出铁速率增加，但炉缸排放又产生困难。改进炉缸排放首先是增加出铁次数，其次是降低出铁速率。这已被理论研究所证实。

本文讨论了焦炭床在炉缸内的状态以及影响因素和它对高炉操作的影响（例如“上浮”或“沉坐”到炉底）。焦炭床“沉坐”的目的在于使高炉顺行和减慢炉缸耐火材料的侵蚀速度。

当连续出铁成为大型高炉的标准操作后，基础理论研究又重新引起兴趣，本文讨论了进一步研究的前景（包括炉缸排放数学模型化）。

引 言

高炉内，铁和渣是连续生产的并存积在炉缸内，但它们是间歇排放的。由于良好的排放和“干”炉缸的获得对高炉作业十分重要，所以从炉缸排放渣铁成为高炉操作者的主要关心的事项之一。当炉缸内存留液体量增加时，高炉工作者经常遇到风压急剧增大，接踵而来的是炉料下降不规则。炉缸液体存留过多，被认为是大滑料的原因之一，随之造成炉缸大冻结（岡部俠児等，1980）。每当利用不同的改进高炉工艺的方法，而使高炉利用系数增加时，就感到有必要改进渣铁的排放工作。在日本六十年代后期和七十年代初期，当高炉尺寸急剧增大以及迅速普及提高高压操作时，这种需要就特别突出。为了应付产量增加，应当改进出

铁场设计（包括提供三个或更多的铁口）以及铁口泥的质量。

与此同时，在许多大型高炉中，渣口成为多余的，而全部渣铁都通过铁口排出。由于这种出铁操作的改变以及在高炉排放熔融产物的操作上遇到的困难，有必要对出铁期间炉缸熔融产物的流动进行研究。福武刚和岡部俠児（1976a, b）研究了出铁期间炉缸内炉渣的流动。他们推断，炉渣的存留比铁水更为容易，所以必须对炉渣的排放比对铁水的排放更关心。正如他们指出的，随着出渣速度和炉渣粘度的降低以及炉缸内焦炭床透气性的改善，存留的渣量减少了。

同他们的结果相一致，在操作上努力降低排放速率。目前，在很多大型高炉上几乎普遍地用几个铁口连续轮流地进行排放操作。原行明和田内森（1978, 1979）以及大野悟等（1981）对炉缸流动的兴趣进一步扩展到铁水的流动。他们除用数值模型外，还用试验模型来研究铁水的流动。铁水流动不仅与排放有关，而且与炉缸、炉衬的破损有关。炉缸内铁水流动的方式影响炉衬的热负荷分布，他们用放射性同位素作为示踪剂，研究了实际高炉炉缸中的流动。

本文作者将评论炉缸液体流动的研究工作，将讨论炉缸内焦炭床状态的变化与排放操作的关系，并进一步讨论了如何认识炉缸排放和如何更好控制出铁等问题。

炉缸排放试验

炉缸排放试验首先由下沼等（1971）作出，他们用一圆筒形容器作为高炉炉缸的模型。容器内盛水到一定平面，当水从管道（模型排出口）排出时，在模型内部管道开口处可以看到旋涡的形成。随着旋涡的形成，气体在容器里经过管道，和水一起流出。他们认为，旋涡的形成会造成出铁困难，并不能顺利地排出铁水。

以后，福武刚和岡部俠児（1976, a）在以下假设情况下进行了炉缸排放的试验：

1) 当气体出现在出铁口时, 渣面形状决定停止出铁的时间;

2) 研究炉渣的流动;

3) 炉渣从铁口放出 (没有上渣);

4) 炉缸被焦炭充填, 炉渣穿过焦炭床流动。

如图1-1所示, 炉渣穿过焦炭床向出铁口流动时形成一个倾斜的渣面。因此气体经过铁口向外喷吹, 在出铁终了时存留着大量的炉渣。将试验结果总结为存留比 α 和流出系数 F_L 的关系, 示

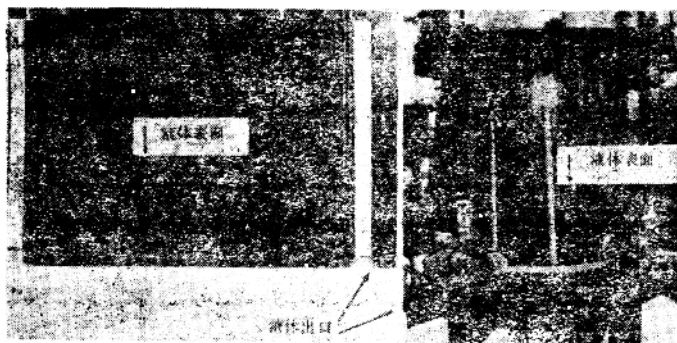


图 1-1 二维 (左) 和三维 (右) 模型中液体排放期形成的倾斜液面

于图1-2。存留比 α 即存留在炉缸内的渣量对放渣开始时的渣量之比。流出系数 F_L 用式 (1-1) 表示:

$$F_L = 180 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{1}{\phi^2 d_p^2} \frac{\mu}{\rho} \frac{v_0}{g} \left[\frac{D}{H} \right]^2 \quad (1-1)$$

式中: ε 为床空隙度; ϕ 和 d_p 分别为炉缸内焦炭的形状系数和直径 (m); μ 为液体粘度 (Pa·s); ρ 为液体密度 (kg/m³); v_0 为液体穿过炉缸空截面积的平均流速 (m/s); g 为重力加速度 (m/s²); H/D 为以炉缸直径 (D) 为基准, 液体层 (H) 的无量纲深度。

从图1-2和式 (1-1) 可看出, 在下列情况下增加存留比:

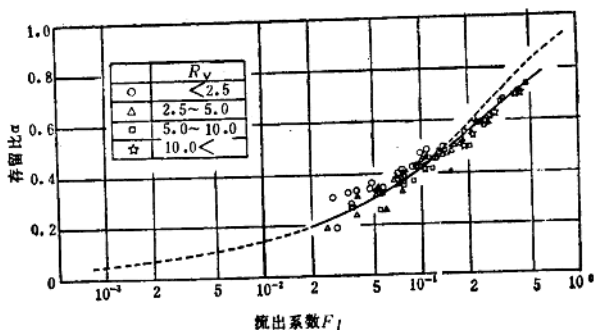


图 1-2 存留比和流出系数的关系

- 1) 增加液体流速 v_0 ;
- 2) 增加液体粘度 μ ;
- 3) 减低焦炭床的空隙度。

由于铁水粘度是炉渣的1/100, 可以认为, 铁水的存留量与炉渣相比是很低的。

存留比和流出系数的关系如图1-2所示。它与炉缸内炉渣的质量平衡结合在一起, 以便估计排放工况对炉渣存留量的影响(福武刚和岡部俠兒, 1976b)。例如, 炉渣粘度 μ 和出渣速率 P , 在出铁终了时对炉渣存留量 W 的影响, 如图1-3所示; 在出

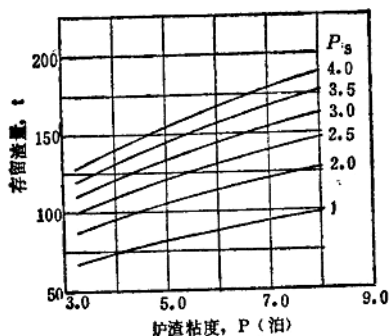


图 1-3 炉渣粘度和炉渣排放速率对存留量的影响

渣开始对渣层高度 H_s 的影响如图1-4所示。这些图表明，炉渣存留量和渣层高度，二者均随炉渣粘度或放渣速度的增加而增加。增加出渣次数对降低渣层高度是有效的。图1-5表明，当增加出铁速率时，增加出铁次数，保持渣层高度恒定；在保持出铁次数不变时，渣层高度随放渣速率增加而增加。

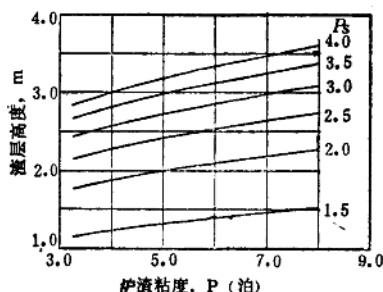


图 1-4 炉渣粘度和出渣速率对渣层高度的影响

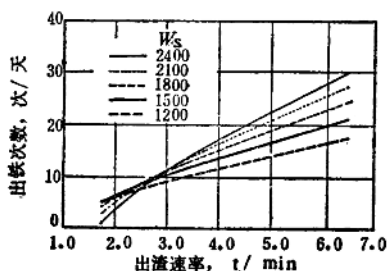


图 1-5 出铁次数和出渣速率的关系 (H_s 保持恒定)

用近似相关法（福武刚和岡部俠兒，1976b）定量地估算，出铁工况对渣层高度的影响如方程（1-2）和（1-3）所示：

$$H_s = A(N_t D_T)^{-0.4757} (1440 P_s / W_s - 1)^{0.3234} W_s^{0.737} \mu_s^{0.2598} \quad (1-2)$$

$$H_r = A'(N_t D_T)^{-0.1288} (1440 P_s / W_s - 1)^{0.2569} W_s^{0.5645} \mu_s^{0.4377} \quad (1-3)$$

式中 H_s 和 H_r ——分别为出铁开始和终了时的渣层高度

(m);

N_t ——出铁次数 (1/天);

D_r ——炉缸直径(m);

P_s ——出渣速率 (t/min);

W_s ——产渣量 (t/d);

μ_s ——炉渣粘度 (P);

A 和 A' ——比例常数。

计算焦炭床透气性的影响时用 μ_s 代替床体阻力系数 f_k :

$$f_k = \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{1}{\phi^2 d_p^2} \quad (1-4)$$

式(1-2)和(1-3)表明,遵守下列条件,可实现良好的排放:

- 1) 低排放速率,导致出铁时间长;
- 2) 低炉渣粘度;
- 3) 炉缸内焦炭床良好的透气性。

当这些条件不能满足时,增加出铁次数以保持低的液体平面。

分析操作结果表明,约有开始放渣时积存渣量的50%在放渣终了时存留在炉缸内。如果在煤气吹出时堵铁口,存留铁水就不重要了。

炉缸排放与高炉操作关系的讨论

一、改变出铁操作

图1-6为大小不同高炉典型的出铁图表。高炉A、B、C各有一个出铁口,同时用传统放上渣操作,随之经铁口出铁。高炉D和E分别有2个和4个铁口。渣口不放上渣。

由图1-6表明,仅有一个出铁口的小高炉采取先“放上渣,后出铁”的操作,而多铁口的大型高炉仅用铁口操作。此外,近代大型高炉连续出铁已成为正常的操作(高炉E)。

随着高炉结构和操作的改善,出铁操作也在改变。随着产量

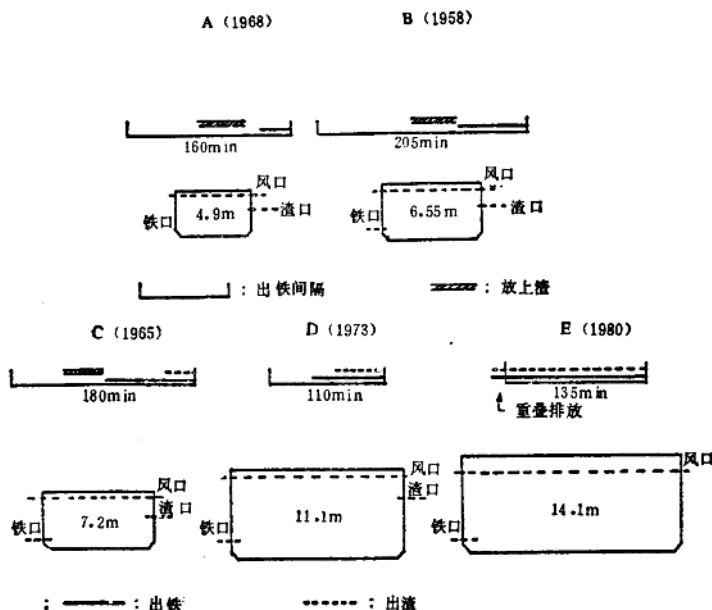


图 1-6 不同大小高炉的炉缸尺寸和出铁图表

的增加首先要解决二个或更多的铁口 (N.E.希普; J.波茨特; T.汉纳, 1967)。1962年日本第一座用两个铁口的高炉开炉生产。以后, 几乎所有建造的高炉有两个或更多的铁口。随着两个铁口的使用, 减少了排放的上渣量。在一些高炉上, 排放上渣已成为正常的出铁操作。日本高压炉顶的高炉, 1963年首次生产。在六十年代后期和七十年代早期, 增大高炉容积和提高顶压后, 单位容积的产量急剧增加。高压操作的引入增加了出铁的困难; 随着风压的增加, 排放上渣就更困难了, 而在高压的大高炉中出铁工作普遍做得较为粗放。

正如已经表明的, 或是降低出铁速率或是增加出铁次数都可以改进排放。目前更多的高炉增加了出铁次数。图 1-7 (嶋田骏郎, 1971)给出了名古屋 3 号高炉(炉缸直径11.7m, 3个铁口,

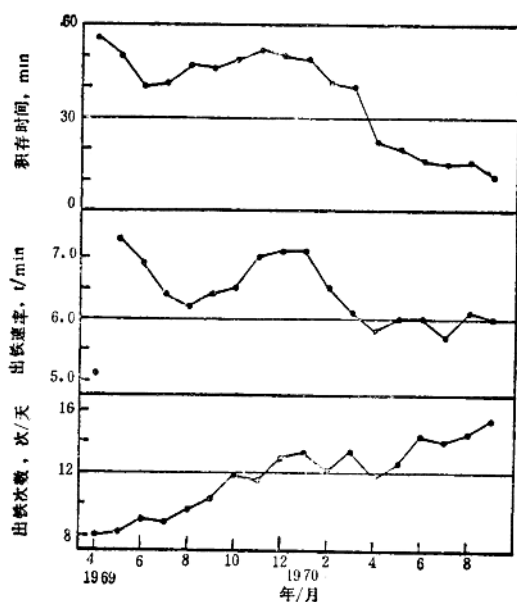


图 1-7 名古屋 3 号高炉出铁条件的变化
(嶋田骏郎, 1971)

最高顶压 2.5kg/cm^2) 改变出铁速率和出铁次数的一个例子。报告提出, 要获得利用系数超过 $2.4\text{t/m}^3\cdot\text{d}$ 必须增加出铁次数。这个图清楚地显示向连续出铁方向发展是一种趋势。在出铁实践中对借改进铁口炮泥质量和出铁操作来改善出铁口的使用期的方法, 曾不断地进行试验。到七十年代末已实现了较少出铁次数的连续出铁。

表1-1示出了川崎钢铁公司千叶厂 6 号高炉最近的出铁数据。在每天少于 12 次出铁情况下形成了连续出铁。要注意的是, 很多

表 1-1 千叶6号高炉最近出铁操作的结果

日 期	1979年3月	1979年9月	1980年3月	1980年9月
出铁累计时间 (min/d)	1630	1540	1610	1500
出铁次数 (次/天)	13.9	11.8	10.7	10.9

情况下出铁开始时就来炉渣；同样出渣也是连续的。

二、炉缸内焦炭床的状态

图1-8表明了解剖高炉炉缸内焦炭床的状态(神原等,1976)。图中焦炭床或是沉坐在炉缸底部，或是浮在铁水池里，并且焦炭浸入铁水池中心比边缘要深些。

焦炭床浸入炉缸渣、铁池的深度取决于力的平衡，即气体和液体的重力和浮力。图1-9图解表示了力的平衡，散料体的重力或垂直力随高度而减小，在回旋区上部区域，固体料压力被上升

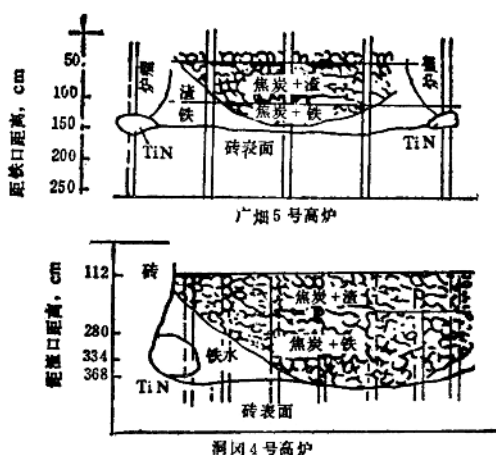


图 1-8 解剖高炉的炉缸状态 (神原等, 1976)

气流的浮力所抗衡，因此固体在回旋区对液体表面的压力与中心区域比是很低的。液体的浮力随着焦炭床浸入深度的增加而增

加。

炉缸内焦炭床的范围或者焦炭床是否沉坐在炉缸底部或浮在渣铁池中，取决于以下诸因素：

- 1) 炉缸截面上回旋区相对的大小；
- 2) 炉缸内液体高度或数量。

由于回旋区大小不随高炉大小有明显的变化，当高炉容积增大时，回旋区的相对大小是减小了的。因此，如示意图 1-10 所示，焦炭床在大高炉情况下很可能沉坐在炉缸底部，在小高炉情况下，焦炭床很可能浮起。

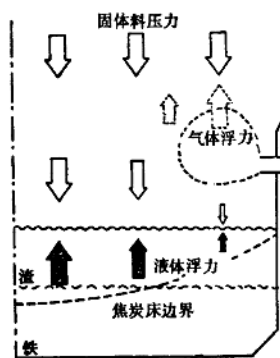


图 1-9 作用在炉缸焦炭床上力平衡示意图

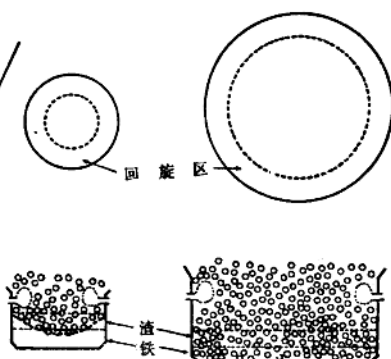


图 1-10 大小高炉炉缸状态示意图

三、炉缸排放条件对高炉操作的影响

如图 1-6 所示，改变出铁操作也可认为同炉缸内焦炭床状态的变化有关。

表 1-2 给出了图 1-6 所示的各高炉之间出铁数据的比较。炉缸充填系数 h_f 是一个参数，它表示在前次出铁终了和本次开始放上渣或出铁之间的时间内，被存积的渣铁量所占的炉缸容积。 h_f 可用式 (1-5) 计算出：

$$h_f = Q_{Pr} T_s / V_b \quad (1-5)$$

表 1-2 各高炉之间出铁数据的比较 (参看图1-6)

高 炉	A	B	C	D	E
年 份	1968	1958	1965	1973	1980
炉缸直径 (m)	4.9	6.55	7.2	11.1	14.1
炉缸容积 (铁口到渣口) (m^3)	18.9	80.9	107.9	343.5	663.6
铁口数 (-)	1	1	1	2	4
生铁产量 (t/d)	761	890	1700	6200	10500
渣量 (kg/t)	350	450	320	315	310
出铁次数 (次/天)	9	7	8	13	11
存积期时间 (min)	70	95	50	40	连续出铁
容积产量 (m^3/min)	0.150	0.198	0.322	1.16	1.96
炉缸充填系数 h_f (-)	0.556	0.232	0.149	0.135	—

式中 Q_{Pr} ——渣铁容积产量 (m^3/min);

V_h ——铁口和风口间的炉缸容积 (m^3)。

如果假设炉缸被焦炭床充填, 则要保证高炉正常操作的最大炉缸充填系数可以算出。假设:

1) 最大液面高度为铁口和风口平面间距的0.8倍, 即在不妨碍高炉操作的情况下, 有80%的炉缸容积被液体产物所占有;

2) 铁口平面以上的炉渣存留比为0.5, 即在出铁终了时, 存留渣量为炉缸有效容积的一半;

3) 炉缸内焦炭床的有效空隙度为0.35; 静态液体滞留量 (≈ 0.08) 必须从干床的空隙度 (≈ 0.43) 中扣去。

因此, 液体存积最大容积 = 炉缸容积 $\times 0.8 \times (1 - 0.5) 0.35 = 0.14$ 炉缸容积。这样, 在炉缸工作条件下, 炉缸充填系数实际上高于0.14的高炉是不能操作的。在以上三种假设中, 最后一种假设对焦炭床状态的变化最敏感。如果假设焦炭床浮起, 则平均空隙度随焦炭床浸入深度的减少而增加, 直到1为止。

从上节讨论表明, 焦炭床在小高炉的情况下, 很可能浮起, 而从表1-2所示的炉缸充填系数看, 在A、B高炉的情况下, 焦炭床很可能浮起。可以放上渣这一事实表明, 液面明显地高于渣口, 由此也有助于焦炭床的浮起。在小高炉操作中经常观察到炉

料下降速度与出铁同时出现的周期性变化。这种变化同浮起的焦炭床有关，如下所述：

1) 出铁期间，当渣、铁量减少时，液体的浮力降低；

2) 随着液体浮力减小，焦炭床下沉，并促使炉料过度下沉，同时增加了下降速度；

3) 在渣铁存积期间，液体浮力增加时，推动焦炭床向上。

由于炉缸内焦炭床上有一料柱，焦炭床的向上运动不是自由的。虽然焦炭床在存积期间的行为远未清楚，但炉缸焦炭量的减少或者是由于以下三种过程，或者是三种过程的综合引起的：

1) 化学反应消耗的碳量；

2) 尼希 (Nishio) 等 (1977) 提出的死料柱运动；

3) 焦炭朝向回旋区的运动 (成田贵一等, 1980)。

要注意到，如 2)，3) 所示的，焦炭床的向上运动仅在液面超过一定限度时发生，因为液体浮力的增加可能被焦炭床的摩擦力所抵销。在出铁时，炉料很快下降会破坏高炉内连续而稳定的工作状态。这种不规则的炉料下降的影响可从二方面加以分析。

首先是直接结果，熔融带的高度很快变化。这意味着炉缸热量的很快变化。

第二，炉料下降形式的变化，导致炉料分布的改变。出铁时，炉料急剧下降所引起的一个改变煤气流很明显的信号，在图 1-6 和表 1-2 (河野正人等, 1972) 中 A 高炉已有报道。

由此，具有沉坐在炉底的稳定焦炭床是近代高炉的先决条件之一。

回顾近 20 年高炉工艺的发展，总结炉缸排放条件的变化如下：

1) 过去的生产实践对单铁口的小高炉来说，是“放上渣和出铁”的出铁操作，炉缸内焦炭床或多或少浮在渣铁熔池里，炉料下降速度和出铁同时出现的周期性变化是不可避免的后果。

2) 随着高炉容积的加大，装备两个或更多的铁口成为共同的作法，同时更多的炉渣经铁口放出，在一些情况下，炉渣已停