



高 炉 冶 煉

中 册

А. Н. 葆黑維斯涅夫, В. С. 阿勃拉莫夫 著
Н. И. 克拉沙甫則夫, Н. К. 列翁涅多夫

高 等 教 育 出 版 社





高 爐 冶 煉

中 冊

A. H. 葆黑維斯涅夫, B. C. 阿勃拉莫夫 著
H. H. 克拉沙甫則夫, H. K. 列翁涅多夫

李思再 李殷泰 陶少傑 譯校
杜鶴桂 范显玉 楊永宜

高 等 教 育 出 版 社

本書系根据苏联国立黑色与有色冶金科技書籍出版社(Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии) 出版的由葆黑維斯涅夫(А. Н. Похвиснев)、阿勃拉莫夫(В. С. Абрамов)、克拉沙甫則夫(Н. И. Красавцев)、列翁涅多夫(Н. К. Леонидов)等合著的“高爐冶煉”(Доменное производство) 1951年版譯出。原書經苏联黑色金屬冶金部教育司批准作为冶金中等专业学校教科書,有关高等学校学生及工程技术人员也可用作参考。

本書中譯本原分上下两册出版。下册已由我社在1954年出版。上册旧譯本原由前重工业出版社出版,自1959年起改由我社分上、中两册出版,并加以徹底修訂。

高 爐 冶 煉

中 册

А. Н. 葆黑維斯涅夫, В. С. 阿勃拉莫夫
Н. И. 克拉沙甫則夫, Н. К. 列翁涅多夫 著

李思再 李殷泰 陶少杰 譯校
杜鶴桂 范显玉 楊永宜

高等教育出版社出版 北京宣武門內承恩寺7号

(北京市書刊出版業營業許可証出字第051号)

京華印書局印刷 新华書店發行

統一書号 15010·766 開本 850×1168 1/32 印張 79/16

字數 166,000 印數 0001—5,500 定價(5) 0.95

1959年6月第1版 1959年6月北京第1次印刷

中册目录

第二部分 高爐过程

§ 36. 高爐过程概念	1
第六章 高爐里的机械作用和热交换作用	4
§ 37. 作用的一般特性	4
§ 38. 爐喉部分料的分布	6
§ 39. 高爐中爐料下降时的分布情形	12
§ 40. 爐料和煤气之間的热交换	14
第七章 高溫下爐料成分的变化	19
§ 41. 水分的蒸發	19
§ 42. 燃料中揮發物的揮發	20
§ 43. 碳酸盐的分解	22
第八章 高爐內的还原作用	24
§ 44. 一氧化碳和氢从固态相中还原氧化物的作用	24
§ 45. 用固体碳从固态相中还原氧化物	31
§ 46. 液相中氧化物的还原	33
§ 47. 硅酸盐中鉄的还原	34
§ 48. 还原反应理論上的几个問題	36
§ 49. 各种因素对还原反应的影响	38
§ 50. 高爐中鉄以外其他元素的还原	47
§ 51. 对鋼鉄質量有益和有害的元素	63
§ 52. 硫在高爐里的作用和去硫	65
§ 53. 直接还原和間接还原	73
§ 54. 气相中烟碳的析出	79
第九章 生鉄和爐渣的生成	82
§ 55. 鉄的渗碳作用	82
§ 56. 硅、鉍、磷和硫的进入生鉄	87
§ 57. 成渣作用	88
第十章 爐缸內的燃燒反应、冷風預热及富氧送風、干燥及蒸汽送風	108
§ 58. 高爐爐缸內的燃燒	108

§ 59. 風口前已还原元素的氧化現象	121
§ 60. 加热送風	124
§ 61. 富氧送風	127
§ 62. 干燥送風和蒸汽送風的应用	129
第十一章 煤气由爐缸向爐頂的运动	133
§ 63. 煤气的生成	133
§ 64. 煤气的温度和压力	138
§ 65. 高压操作	144
§ 66. 高爐内煤气化学成分的变化	148
§ 67. 高爐煤气成分的規律性	150
§ 68. 高爐煤气成分和煤气量的計算	152
§ 69. 根据煤气的成分計算高爐作业的指数	159
第十二章 高爐反应的物料平衡和热平衡	168
§ 70. 物料平衡	168
§ 71. 高爐过程的热平衡	174
§ 72. 热平衡計算古典方法的变革	194
第十三章 爐料計算	199
§ 73. 爐料計算的方法	199
§ 74. 爐料計算举例	203
第十四章 高爐冶煉产品	219
§ 75. 生鉄与鉄合金	219
§ 76. 爐渣	226
§ 77. 高爐煤气及爐塵	230
参考書目	233

第二部分 高爐过程

§ 36. 高爐过程概念

高爐过程是高爐里許許多多的各种各样的过程的总称。这些过程,特别是它們的相互作用,到目前为止还不能說是都已經研究透徹了。尽管高爐冶煉已有 500 年以上的历史,尽管进行过一系列广泛而又詳細的實驗(这些實驗的相当大一部分是俄国人,特别是苏联冶金学者做的),但始終还没有能建立一套理論,可据以确定一系列可能从数量上算出当时高爐过程进行的情况和它以后又将怎样發展的規律。

高爐里的过程是多种多样的,又各屬於不同的范畴(机械作用,热交换作用,和化学反应),这就是妨碍建立这种理論的主要原因。

研究高爐过程的冶金学者在研究錯綜复杂的現象时,通常应用如下的方法:把高爐里發生的各种現象分組和归类,在實驗室里研究各組的現象,直接在高爐上进行冶煉过程的研究,然后把这些結果綜合和归納起来。

在高爐中,从装进高爐里去的原料(矿石、熔剂和燃料)冶煉出各种产品(生鉄、爐渣、高爐煤气和爐塵)。在冶煉过程中,原料在爐子里由上向下漸漸下降,而焦炭在風口燃燒所生成的气体則自下向上上升。

这样,我們首先可以把高爐过程中关于爐料和气体运动的一部分——机械作用分出来。

原料在高爐里下降时与热的气流接触而逐漸受热。因此,我

們如把高爐看成是一個熱交換系統，就可以從高爐過程里分出一類——煤氣和爐料間的熱交換作用。

原料受熱時，其化學組成也漸漸改變。這類過程我們也同樣可以分出來加以研究。

最後，高爐內還進行着最主要的某些元素的還原反應，由於這些元素的還原而得到生鐵，本來與這些元素結合在一起的氧氣則同碳化合生成碳的氧化物而進入煤氣。這些還原作用也可以另成一組提出來研究。

與還原的同時高爐里還有着兩種化學過程，一種是碳化物的形成——滲碳作用，另一種是脈石和熔劑的熔化——成渣作用。

同時還需要研究在高爐爐缸的特殊情況下焦炭的燃燒過程。

這些就是構成高爐過程主要的幾組過程，也就是在高爐冶煉上從原料獲得成品的主要過程。

上述過程的極大部分已經有了足夠詳細的研究，它們或多或少地給與了深入窺察高爐中各種現象真相的可能性。關於高爐反應理論的現代情況，世界上高爐冶煉權威蘇聯科學院院士巴甫洛夫描述得很好。他說：

“坦白地說，到目前為止我們還不能全部明了。我研究高爐冶煉已 55 年了，現在仍將盡全力和我的學生們繼續進行高爐冶煉的研究”。

一點也不錯，象巴甫洛夫所指出來的，我們已經知道得很多，但並不是全部。

對高爐過程深刻的了解是許許多多研究工作者，首先是蘇聯的究研工作者們精心工作的結果。

早在 19 世紀末，巴甫洛夫研究高爐冶煉的生產，最先在俄國的高爐上提出了高爐的物質平衡和熱平衡，這成了以後一切高爐工作者的藍本。而在計算的方法方面和正確程度方面比蘇聯以外

其他国家著名的煉鐵工作者象貝爾,奧蓋爾孟,格留涅爾等的平衡計算高明得多。

他比較早地從本質上深刻化了關於熱風對高爐過程發展的影響的概念。

巴甫洛夫更訂出了全世界都公認的計算高爐尺寸的方法。他的偉大著作——煉鐵學,第二部分,高爐過程——已經出了六版,這是高爐冶煉科學方面唯一批判修訂和綜合許許多多關於高爐過程研究工作的書籍。

索考洛夫最先在高爐冶煉史上進行了一些鐵礦還原的系統研究,他差不多在50年前就開始了這工作。在蘇維埃政權下建立起來巨大的工廠實驗室,冶金研究院和高等學校里的研究組進行了巨大的關於蘇聯鐵礦和燒結礦的冶煉性質的研究工作。有系統地研究了烏拉爾鐵礦,西伯利亞鐵礦,克里浮角的鐵礦,庫爾變質磁鐵礦,克爾金礦產地的鐵礦。赫利洛夫礦產地的鐵礦,中央工業區的鐵礦和其他許多地方的鐵礦。

煉焦化學的巨大成就,在幾個斯大林五年計劃的年代中以優質焦炭保證了高爐冶煉方面的巨大發展。

在巴甫洛夫的熱誠領導下,曾經在大高爐上進行了一些高爐冶煉的實驗性研究,推翻了某些國家的冶金家們關於不宜建築大高爐的錯誤結論。

現代關於高爐過程的理論相當大一部分是以蘇聯的研究為基礎的,實質上是以巴甫洛夫院士為首的蘇聯冶金學者們建立起來的。

第六章 高爐里的机械作用和热交换作用

§ 37. 作用的一般特性

在高爐里自下向上升的气流和自上向下降的料柱形成两个相反方向的运动，这一运动的性質对高爐冶炼具有巨大的意义。必須使煤气的热能够充分地傳給料柱，同时也必須使煤气的还原能力能够在高爐里尽可能完全地使用。

如果煤气不是从整个爐子的截面上通过，而是在某一些地方通过得特別多，譬如沿着爐牆或是在爐子中心部分通过得特別多时，那么煤气当然不可能很好地和全部爐料發生作用。同时煤气的热能和化学能（还原能力）也将不可能有效地应用。

液体和气体的运动定律在水力学和气体力学里研究过，气体和液体运动时将损失压力。压力损失与它們通过的过道的長度和周長成正比，而与过道的截面积成反比，因此在圓形的过道里，压力的损失与过道的長度成正比，而与过道的直徑成反比。

此外，压力损失与气体速度的某次方成正比，——方次的多少根据运动的性質不同而改变，如气体运动接近層流时，方次接近 1，如为渦流时則方次接近 2。

因为高爐里煤气的压力损失不因为通过的过道不一样而不同，所有各个过道里压力的损失都是一样的，都相当風口煤气压力和爐喉煤气压力的差。因此从各个过道里通过的煤气的量和速度就不一样，过道寬的通过的煤气比較多，狹的通过的就少。

煤气过道的大小及其曲折度首先决定于原料的塊度和均匀度。塊子大的形成的过道也大，而曲折則要小一些。在塊度不均匀的情况下，小塊将堵在大塊构成的孔隙里，而使过道縮小。如果

塊度均勻的話就不會有這樣情形。

即使是同樣大小塊子的原料放在一起時，也可能放得或是比較緊密些或是比較疏松些。當堆積散砂性的物質（例如砂子）時可以很好地說明這一點。假如用同樣直徑的圓球堆在一起，那麼很明顯象圖 122 那樣放法最松，而象圖 123 的放法最密。根據這些圖形可以計算出圓球間空隙對於總體積的比率來。

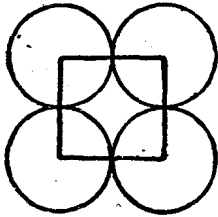


圖 122. 同樣直徑圓球放得最松時的圖形。

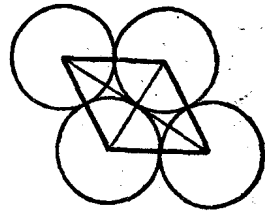


圖 123. 同樣直徑圓球放得最密時的圖形。

按圖 122 那樣的放法，每 8 個球可以組成一個每邊長 $2d$ 的正方體，沿着每兩個圓的連心綫切開可以得到一個每邊長 d 的正方形，這個正方形的體積是 d^3 ，而这里面有 8 塊從 8 個直徑 d 的圓球上切下來的角。每塊的體積是一個圓球的 $\frac{1}{8}$ 。因此在放得最松的情況下，物體占有的體積為總體積的

$$\frac{\pi d^3}{6} \times \frac{100}{d^3} = 52.3\%$$

而空隙的體積為

$$100 - 52.3 = 47.7\%$$

差不多相當於總體積的一半。

在放得最密的情況下，正方形的邊變斜了，成了一個銳角為 60° 的菱形。這樣，依着連心綫切開時也是得到一個菱形體（圖 124），这里面從 8 個球上切下來的大小不同的 8 塊可以互相填補起來成一個整個的球體，它的體積與原來圓球的體積相等。菱形

体的体积根据它的边长 d 和锐角 θ 来决定

$$V = \frac{d^3 \sin^2 \theta \sqrt{1 + 2 \cos \theta}}{1 + \cos \theta} \quad (44)$$

当 $\theta = 60^\circ$, 菱形体体积 $V = \frac{d^3}{\sqrt{2}}$, 物体占有的体积为总体积的

$$\frac{\pi d^3}{6} \times \frac{100}{\frac{d^3}{\sqrt{2}}} = 73.7\%,$$

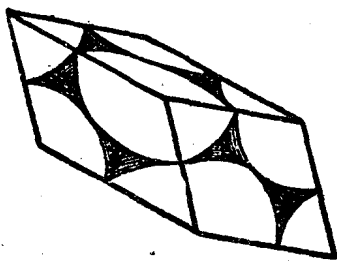


圖 124. 放得最密时切出来的菱形体。

而空隙的体积为 $100 - 73.7 = 26.3\%$ 。比上面一种情形小得很多。

很明显, 在实际情况下空隙体积的大小, 将在这两个极端情况的中間波动。当块度不均匀时, 大块間的空隙会被小块填满, 那么空隙所占的相对体积, 可能比块度均匀而装得最密时孔隙所占的体积还要小。在这种情况下料的透气性就降低, 換句話說爐料对煤气通过的阻力增加。

从这里我們知道在爐喉部分爐料最初的分布对煤气在高爐截面上分布情形的影响很大。假如在爐喉部分塊状的料都分布在高爐的四周, 那么極大部分煤气都将沿着爐牆上升。所以高爐工作者應該善于評定爐料在爐喉部分的分布情况, 并能在某种程度上控制这种分布情况。

§ 38. 爐喉部分料的分布

現在所有高爐的爐喉部分都是密閉的, 那里有几个煤气出口使煤气从这里沿着煤气管到煤气除塵部分去, 經過除塵以后作燃料用。

从前当用爐喉直徑小的开口高爐冶煉时，用人工装料很容易保持爐喉部分料的正确分布。象巴甫洛夫所指出来的：“在認真操作的情况下，随时随地注意整个爐喉面上煤气分布的情况，根据煤气的火焰来判別它們量的多少和溫度的高低（溫度的变动很容易看出来），人們可以及时地采取措施阻止气流集中一边的現象，然后，确实遵守經驗給与的布料方法，就完全可以保持高爐操作的均匀”。

現代閉口高爐是用装料机械来装料和布料的（通常用料斗和料鐘式布料装置），这是英国冶金学者巴利首先在 19 世紀 50 年代中应用的，所以有时把它称为巴利布料装置。

布料装置由不能移动的装料料斗和用来封閉料斗下部的料鐘所組成（圖 125）。当料鐘下降时，在料斗与料鐘間构成一个空隙，料就沿着料鐘滾下，向着爐牆的方向落入高爐，再从这里分布到整个爐喉的截面上。

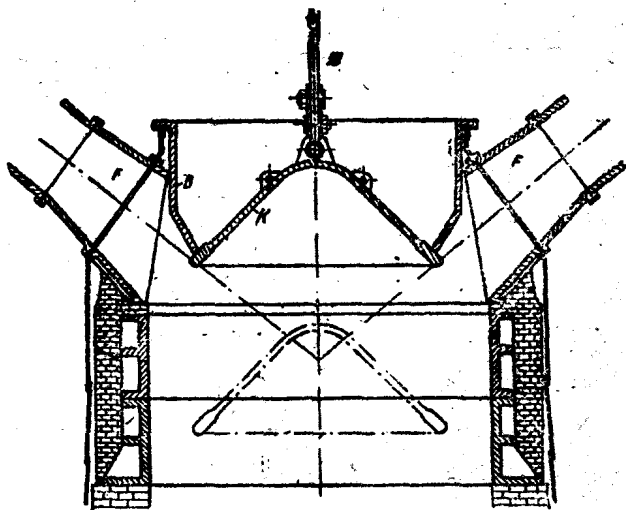


圖 125. 装料装置略圖。

从选矿技术上已经知道，同样成分而不同块度的物料从斜面上滚下来时将按照块度分离开。如果块度相同而成分不同，那么比重自然也不同，在滚下时就将按照成分分离开。

这种现象是由于同样成分而不同大小的物料下落时的轨迹不一样，它们都是抛物线，但有的陡一些，有的则平一些。这种现象同样发生于同样块度而不同比重的物质上。

在第一种情况中比较粗的颗粒与在第二种情况中比较重的颗粒落下时，所成的抛物线都比较平一些，因而落得更靠近炉墙。

这样，当原料从料钟上落下时就按照粒度大小有一定程度的分层现象。

当料堆尖靠近炉墙时料向炉子中心分布，这时料层表面和水平线构成一个一定的角度，造成周围高中间低的漏斗形。

假如炉喉直径、料钟直径和落下高度（料钟与下降时料钟下缘的距离）间的关系使料恰好落在炉墙旁边，那么漏斗的边缘将直接靠着炉墙。

当落下高度一定时如果炉喉直径与料钟直径相差很大，那么

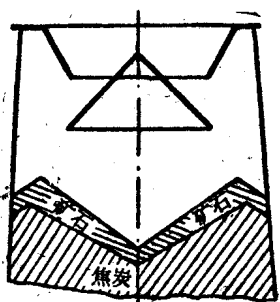


图 126. 炉喉直径与料钟直径相差很大时炉料的分布。

炉料落下时所成的环形料顶将离开炉墙一些距离。一部分料从这里滚到炉子中心，另一部分料则滚向炉墙（图 126）。

由于料的滚落，又一次在某种程度上按照块度分开，大块滚向堆脚，碎块则留在堆尖上。这样大部分大块滚向炉子中心，而另一部分大块则滚向炉墙（假如不紧靠着炉墙的话），集中在堆尖上的则都是碎块。

由于分类的结果造成炉子截面上各部分对煤气通过的阻力不

一样,因为爐子中心部分料的塊度比較大一些,所以料的透气性也比较爐子的周圍部分要好一些。

用料斗和料鐘布料时,高爐內爐料分布的一般情形即如上述。因为在高爐里靠近爐牆部分的透气性总比較大些,同时煤气通过的路徑也比较短,此外如果寬度一样,靠近爐牆的圓环面积終要比靠近爐中心的圓环面积大,所以这种布料方式不能說是不合适。这样用料斗和料鐘布料时能够矯正煤气自然沿着爐牆上升的趋向。这就是料斗和料鐘在今天仍应用得最广,仍算是焦炭高爐(甚至是最大的高爐)的最好布料裝置的原因。

我們都知道,当把带散砂性的物質堆在一个四周沒有擋栏的平板上时,它将堆成一个圓錐形。这一圓錐对水平面的角,叫做該物質的堆角,这个角通常几乎是不变的。

茲将一部分带散砂性物質的堆角列举于下:

塊度 12—120 毫米的矿石	43°—40°30'
塊度 12—120 毫米的燒結矿	42°—40°30'
石灰石	42°—45°
焦炭	48°
天然湿度的沙粒	40°
天然湿度的土	45°
干燥礫石	35°—40°

根据上面的数字可見,焦炭、矿石和石灰石的堆角都很相近,都在 40° 左右。从这里可以看到在高爐里按次装进各种料时,各層料面都将是平行的。

但是在 19 世紀 80 年代中法国冶金学者特·伐节尔首先用一个直徑为 3.2 米的模型做实验,实验的結果告訴我們在高爐里面堆角要比較小些,特別是焦炭。焦炭在高爐里的堆角仅为 26°,而矿石的堆角則为 36°—43°。

其后,大家就都直接在高爐里进行实验,在开爐前装料的时候

來測量爐料的堆角。特別是蘇聯的研究工作者們(葆辛,高爾特司金,亦甫列夫夫,奧列司庚及其他研究工作者)做了若干精密的測量,都証明了焦炭在高爐里的堆角是減小了,而且更正確地測出了爐料在高爐里的堆角。例如根據亦甫列夫夫在馬格尼托哥爾斯克工廠高爐里所測定的結果,焦炭的堆角為 29° 左右,礦石的堆角為 38° 左右。

關於在高爐里堆角減小的原因,直到最近才由蘇聯研究工作者高爾特司金給與解答。他推导出下述單體圓球在高爐內從料鐘上落下時的公式(根據力學公式):

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \alpha_0 - k \times \frac{h}{r} \quad (45)$$

式中: α_0 ——爐料的自然堆角,

α ——爐料在高爐里的堆角,

r ——爐喉半徑,

h ——高爐爐料從料鐘上落下的高度,

k ——系數(與爐料的性質有關,它表示出爐料落下時在碰着爐牆或堆尖後剩餘下來促使料塊沿漏斗面滾落的部分能量)。

公式(45)和很多實驗數字完全符合,它正確地說明了在高爐里堆角減小的現象。

無論在粒度方面和彈性方面焦炭比礦石都要大,容易從爐牆或是堆尖上彈回來,所以焦炭的 k 值增加了,而 α 則減小。

當落下高度很大時(在開爐以前裝料時都可以遇到這樣機會),礦石層和焦炭層差不多都是平鋪的。根據公式(45),當 h 的值很大時 α 角將大為減小。

當爐喉半徑很大時(即在大高爐內),高爐內的堆角和自然堆角的差應該比較小,這一點也得到了實驗的證明。例如上面提到

的亦甫列麦夫在馬格尼托哥爾斯克工厂爐喉直徑 6.1 米的高爐內測定的堆角的大小，要比特·伐节尔在直徑 3.2 米的模型里所測定的堆角更接近自然堆角得多。

因为高爐內焦炭的堆角比矿石的堆角小，所以高爐內焦炭層和矿石層并不相互平行，而是成楔形的形状，焦炭層在爐中心部分較厚，在靠近爐牆部分較薄，矿石層則在靠近爐牆部分較厚，在接近爐中心的部分較薄（圖 127）。

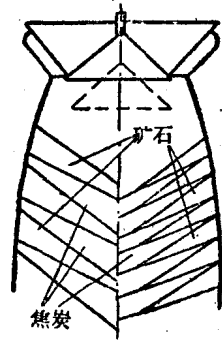


圖 127. 高爐內矿石和焦炭成楔形層狀的分布情况。

所以，当高爐爐喉直徑大、每批矿石的量不足时，就有矿石不能达到爐中心部分的危險性。在大高爐开爐以前曾見到过这种現象（圖 128）。

假如高爐里的料一直这样分布，那么从高爐中心升上来的煤气里將不会有 CO_2 ，因为 CO_2 只有在煤气里的 CO 与矿石發生作用时才能生成。但在实际情况下，即使是在最大的高爐中，也經常看到靠近爐牆部分气体通过得多、而有时候也在某一截面上从高爐中心部分通过的煤气里含 CO_2 的量很多的情况。

所以有人說在大高爐上必須用一种特殊裝置的布料器，使每批矿石的一部分能到达爐中心的說法

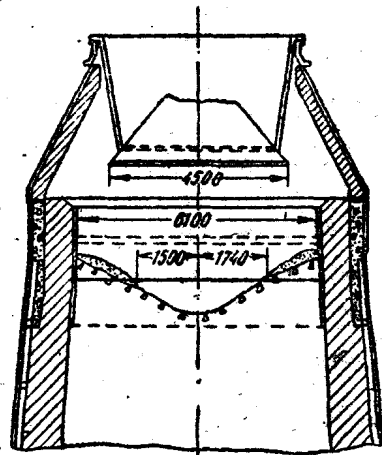


圖 128. 开爐前大高爐中料的分布情况。

是不對的。

關於礦石為什麼能夠到達爐中心(有時甚至很多)的問題有一些假想的解釋。

首先是如公式(45)所指出來的,當高爐爐喉直徑增大時,焦炭和礦石在高爐里的堆角都應該逐漸接近於自然堆角,因此它們兩者之間也將逐漸接近。其次,蘇聯研究工作者巴索夫和列德哥提出了這樣一個假說:在氣流速度大的地方的小粒礦石將被吹到氣流速度小的地方,亦即吹到料鐘下面的部分去。因為受到鐘的影響,煤氣出口都在爐的四周,所以煤氣都趨向高爐的四周流出。由於煤氣改變方向所產生的離心力把小塊擲向高爐中心(這種說法並不是十分可靠的——譯者注)。

假如每批礦石量還不是十分少的話(每批礦石都不能布滿整個截面),那麼這些因素(可能還有一些其他因素)能夠使相當量的礦石到爐中心去。

大部分的現代焦炭高爐操作時都是靠近爐牆部分煤氣通過得多,這一點說明了爐子中心確實是有礦石。所以要改變布料設備的裝置,使得部分礦石能夠到達爐中心的意見,不曾得到廣泛的支持。在蘇聯蘇洛庚曾創造出過這樣的特種布料裝置。

§ 39. 高爐中爐料下降時的分布情形

假如在高爐截面上各部分爐料下降的速度都一樣的話,那麼正在操作中的高爐爐喉部分料的分布情況將完全和開爐前分布情況一樣。但事實並不如此。在正在操作的高爐上根據檢尺^①所測定的料綫位置,我們可以知道高爐截面上各個不同點爐料下降的速度是不一樣的。

由於蘇聯巴甫洛夫研究組工作人員在大高爐馬格尼托哥爾斯

① 關於檢尺,請參看“高爐操作”一章。