

高炉冶炼的 研究



冶金工业出版社

76
445
C5

高爐冶煉的研究

34431/01



高爐冶煉的研究

1960年 4 月第一版 1960年 4 月北京第一次印刷 3,515 冊
開本850×1168·1/32·字數210,000·印張 $9\frac{14}{32}$ ·定價 1.30 元
統一書號15062·2085 冶金工業出版社印刷廠印 新華書店發行

冶金工業出版社出版（地址：北京市燈市口甲45號）

北京市書刊出版業營業許可証出字第093號



目 录

論“M. A. 巴甫洛夫原則”	A. Д. 高特里勃	5
克利沃罗格矿石和燒結矿的还原性与块度 的关系	M. B. 魯戈夫佐夫, E. П. 別略柯娃, И. Б. 斯特拉施利柯夫	16
在連續加热条件下石灰石分解与其粒度 的关系	M. B. 魯戈夫佐夫, E. П. 別略柯娃, И. Б. 斯特拉施利柯夫	36
提高高爐产量及降低焦炭消耗量的途径	M. A. 沙坡瓦洛夫	43
冶炼强度对于高爐生产率和焦比的影响	A. H. 拉姆	87
高爐生产率与焦炭消耗量	A. П. 柳班, M. Г. 曼欽斯基	103
高爐中煤气运动的基本特点和 基本規律	M. A. 斯捷方諾維奇	120
酸性爐渣的粘度和焦炭高爐酸性渣操 作的可能性	B. И. 拉吉諾夫	159
加湿鼓风中氢参加还原过程的程度及 决定这个指标的方法	И. П. 肖米克	189
高爐內焦炭的破坏	M. Я. 奧斯特罗烏霍夫	199
高爐粘土磚在冶炼过程中的化学-矿物学的变化	Д. С. 別充金, Б. В. 依万諾夫, В. Т. 巴索夫	223
某些因素对氧化带大小的影响	Б. Н. 列賓等	248
高爐风口前焦炭燃烧过程的新研究	M. Я. 奧斯特罗烏霍夫, Л. З. 霍达克	263
富氧鼓风冶炼制鋼生鉄	И. П. 巴尔金等	277

76
445
C5

高爐冶煉的研究

34431/01



高爐冶煉的研究

1960年 4 月第一版 1960年 4 月北京第一次印刷 3,515 冊
開本850×1168·1/32·字數210,000·印張 $9\frac{14}{32}$ ·定價 1.30 元
統一書號15062·2085 冶金工業出版社印刷廠印 新華書店發行

冶金工業出版社出版(地址:北京市燈市口甲45號)

北京市書刊出版業營業許可証出字第093號

本书系根据苏联科学院出版社出版的“高炉冶炼的研究”（纪念 M. A. 巴甫洛夫院士九十岁诞辰文集）1957年版译出。中文版中对原书作了某些删增（删掉了四篇文章，另增加了三篇文章）。书内各篇文章主要是介绍了研究高炉冶炼过程的理论，这些理论对研究高炉生产过程有一定参考价值。

本书可供炼铁技术人员、高等和中等冶金院校师生参考。本书由王筱留、周元等同志译校。

目 录

論“M. A. 巴甫洛夫原則”	A. Д. 高特里勃	5
克利沃罗格矿石和燒結矿的还原性与块度 的关系	M. B. 魯戈夫佐夫, E. П. 別略柯娃, И. Б. 斯特拉施利柯夫	16
在連續加热条件下石灰石分解与其粒度 的关系	M. B. 魯戈夫佐夫, E. П. 別略柯娃, И. Б. 斯特拉施利柯夫	36
提高高爐产量及降低焦炭消耗量的途径	M. A. 沙坡瓦洛夫	43
冶炼强度对于高爐生产率和焦比的影响	A. H. 拉姆	87
高爐生产率与焦炭消耗量	A. П. 柳班, M. Г. 曼欽斯基	103
高爐中煤气运动的基本特点和 基本規律	M. A. 斯捷方諾維奇	120
酸性爐渣的粘度和焦炭高爐酸性渣操 作的可能性	B. И. 拉吉諾夫	159
加湿鼓风中氢参加还原过程的程度及 决定这个指标的方法	И. П. 肖米克	189
高爐內焦炭的破坏	M. Я. 奧斯特罗烏霍夫	199
高爐粘土磚在冶炼过程中的化学-矿物学的变化	Д. С. 別充金, Б. В. 依万諾夫, В. Т. 巴索夫	223
某些因素对氧化帶大小的影响	Б. Н. 列賓等	248
高爐风口前焦炭燃燒过程的新研究	M. Я. 奧斯特罗烏霍夫, Л. З. 霍达克	263
富氧鼓风冶炼制鋼生鉄	И. П. 巴尔金等	277

論 ‘M. A. 巴甫洛夫原則’

A. Д. 高特里勃

1894年 M. A. 巴甫洛夫第一次发表了他在1891—1893年所做的“克里姆考夫斯克工厂高爐冶炼过程的研究”的文章^[1]，文章中提出了加风温（或提高风温）导致燃料节省 E 的公式：

$$E = \frac{a+b}{kw} \cdot 100\%,$$

其中 a ——热风带来的补充热量；
 b ——风温改变所导致的热量消耗的变化；
 k ——高爐热能有效利用系数；
 w ——用冷风或低风温冶炼 1 公斤生铁所需的热量。

后来 M. A. 巴甫洛夫进一步推論了这个公式，并指出它不仅可以用于确定提高风温的效果，而且可以用于确定任何导致热能和燃料消耗量改变的效果。例如富氧鼓风对燃料消耗的影响，M. A. 巴甫洛夫在研究了这个問題和分析了按 A. H. 兰姆法計算的相应結果后指出，在利用热能有效利用系数作計算时，能得到上述相同的結論。对爱林維尔特所发表的关于干风影响焦炭消耗量的計算，M. A. 巴甫洛夫也作了同样的評論^[2]。

M. A. 巴甫洛夫在推論了自己的公式后說：“高爐有效热能利用系数愈低时，任何降低高爐冶炼中热量消耗的因素促使燃料节省也愈多”^[2]。这个原則，按理应称为“M. A. 巴甫洛夫原則”，但 M. A. 巴甫洛夫却称它为“奥盖尔孟原則”，因为奥盖尔孟发表过相类似的意見，但奥盖尔孟的意見仅述及了热风的影响，並沒有加以推論^①。

① “……在高爐內燃料热能利用愈完善，加热鼓风所能节省的燃料愈少，反之亦然……”。这就是奥盖尔孟的結論，他並沒有引出計算公式，因而它仅是定性地述及热风的影响。同时，根据奥盖尔孟的意見 K 不是高爐的热能有效利用系数（像巴甫洛夫推出的那样），而是說明在高爐內使用冷风或热风时热能利用程度的系数。

虽然应用“原则”来分析高爐过程及在技术計算中很有用但是实际上“原则”和公式应用得不多。而在近年来出版的高爐冶炼教科書（1952年出版）及炼鉄数学参考書里几乎完全没有引用，或仅随便地提了一下，没有用具体的例子来加以說明。

我們認為“M. A. 巴甫洛夫原则”和表示这个原则的公式可以应用并得到正确的結果，仅仅需要对公式中几个数值的概念做下列的訂正：

1. 由公式可知，增加高爐的热量消耗 (w)，应当导致燃料节省量的降低，根据“原则”它們之間的关系是：爐内热利用的情况愈坏，节省的燃料愈多，而 w 值較大时恰好說明热利用不好，这似乎說公式是不适应于“原则”，但这仅仅是表面上和形式上的矛盾。首先“原则”中所指的不是相对的而是绝对的热量节省（和与它相适应的燃料消耗量）： K 值愈小， $\frac{a+b}{K}$ 就一定就愈大，并且相对的燃料节省 $E = \frac{a+b}{kw}$ 也服从于这个原则，当 w 增大时， K 值不可能保持不变，它是降低的，因为在单位热量消耗增大时（不改变原料成分），热的利用变坏。我們不能孤立地研究公式中的每一个因素，因为其中一个因素的改变，必然导致其他数值的变化，随着 w 的上升，不仅 K 发生变化，而且 a 和 b 也发生变化。因此形式地从 w 是分段这一标志做出 w 对 E 影响的結論是不正确的。

实际上应用成分比較稳定的原料，生产同样品种生鉄时，公式中的 kw 不可能有很大的改变，因为 kw 是两个子質因素的乘积，其中一个增大时另一个将减小，反之亦然。但是如果 b 增加（相应地减小 w ，不改变 kw ）， E 的数值不能保持不变，因为分子必然会减小：如果 w （总的热能收入）减小，这就意味着燃料消耗量的减小，单位生鉄需要的鼓风量减少，从而由风带入的热量也减少（风的加热情况不变时）。所以在任何影响焦炭消耗的情况下（即使 kw 不变时），热能利用系数的提高就会引起节省的热量 E 降低。这就証明巴甫洛夫原则和公式表示是一致的。

这样，根据原则和公式广义的解释（按 M.A. 巴甫洛夫的），可以认为 a 是热平衡收入项中的全部变量，而 b 是支出项的全部变量。在所有的计算中，由于支出项的改变而使燃料消耗改变时，必需对 a 的数值作相应的改变（由于 b 的变化引起的），改变了单位生铁消耗的风量，同时热风带入的热量 a 也变了，这些就进一步引起燃料消耗量的改变。

2. 在编制热平衡表使用最普遍的方法中，在直接应用开始到终了状态的原则时，还原反应的热效应是单独计算的，氧化物分解热在支出项中，而已氧化成 CO 和 CO_2 的热在收入项中。实际上这些热量在高炉中是相抵消的，它们既不影响冶炼过程，也不影响燃料消耗。关于实际热平衡的正确概念所指的热量是冶炼过程中实际支出和收入的热量。爐身中放热反应放出的热量是較小的（例如： $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{MnO}_2$ 和 FeO 用 CO 还原的结果），可以忽略不计，这样高炉中实际表示热量收入和支出的数量 w ，很明显比普通计算的热量小。

如果认为 1 公斤焦炭烧成一氧化碳放出 2340 卡热（假定一半炭以不定形状存在，另一半炭以石墨状态存在），则需要消耗 4.44 米³ 干风，其比热在一般加热的情况下平均约 0.325 卡/米³·°C，那么炼 100 公斤生铁在风口前烧掉碳量 C_0 的公式如下：

$$w = (2340 + 4.44 \times 0.325 t_x) C_0$$

或： $w = (2340 + 1.44 t_x) C_0$ 千卡/100 公斤生铁；
式中 t_x —— 风温。

这种情况下加热的焦炭（到 1400~1500°C）所带入爐缸的热量没有计算，因为是循环热（焦炭在上层吸收的热量重新带回爐缸）。

3. 所谓爐子的热能有效利用系数是有效热消耗量和总热耗量的比值，有效热耗量是指不包括热损失在内的全部热耗量，这种情况下，爐喉煤气和冷水带走的和辐射到大气中的热量是属于热损失。可见 M.A. 巴甫洛夫还合理地把全部爐料水份蒸发（并最

后加热到爐喉煤氣溫度)所消耗的热量也列入到热損失中,因为在高爐上部区域的条件下,蒸发水蒸气消耗的热量是依靠煤氣中的热量而获得的,如果是干“爐頂”,即在爐料中没有水份(結晶水或物理吸附水),爐喉煤氣將带走了所有的热量;而这个热量实际上包括煤氣中热含量及水份蒸发和加热所需的热量。这样,最后一项同样是帶入爐喉的热量(呈隱蔽的形态)。按上述的意見水化物分解的热量(如果爐料中存在有)也应列为热損失。因此这个过程也是在爐身上部进行,而消耗的热量是从爐喉煤氣中取得。

这样会产生一个问题,碳酸盐的分解热和在碳酸盐中二氧化碳与燃料中碳素的相互作用的热($\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$)是否也应列为热損失。借助于溫度——热量的图表所做的高爐热平衡分析指出,消耗于 CaCO_3 分解反应有关的那部分热量不是用的煤氣中的热量,而是反应本身的热量。因此是直接地与后者有連系的(虽然像大家所知道的它不一定是后者的必然属性),这个过程不能够算是热損失,而是工艺損失,这就是应该属于有效热消耗(从热平衡观点看来)的道理仅有部分消耗在碳酸盐分解成石灰和在中溫区二氧化碳还原的热量是取自煤氣的热量,因此应当和蒸发热一样是属于热損失。但是,确定这些損失的大小是不可能的,因此石灰石分解成石灰时消耗的全部热量算作有效热消耗。鎂、錳、鉄等元素的碳酸盐的分解是在較低的溫度下进行类似于結晶水的分解和物理水的蒸发,这个过程中热量的消耗应该属于热損失(但在中溫区分解出来的 CO_2 和C相互作用的热不算)。

4. 現在来討論 b 值,必須指出:还原时热消耗量的变化,应当考虑到(相应于第二条所采用的方法)直接还原和間接还原的变化,那应考虑到按还原最終方程式所消耗于直接还原的热量变化。关于爐喉帶走热量变化的計算的問題我們專門来討論一下,影响这个数量的原因很多:

第一:爐喉帶走的热量是随着爐身截面煤氣分布和煤氣利用

的改变而增加或减小。例如爐料准备程度的变化；爐料分布和再分布的变化；爐瘤的出現和消除；料線改变或風量及其流速的改变，在所有这些情况下，煤气利用的改变会直接引起燃料消耗量的改变，并应当作为热量消耗的因素，列入公式分子中（列入b項）。

第二：爐喉煤气带走的热量，随着鉄和錳氧化程度的变化而增加或减少（因为高价氧化物的还原应该是放热反应），这些煤气带走热量的变化由于温度的变化在計算热利用时是不可能估計到的，因为这些热量与高爐过程本身消耗的热量无关，它們或者增加或者减少煤气带走的热量，但它决不会影响高爐的热平衡、燃料消耗量和它燃烧时給出的热量利用。按照上面这个理由，水份的蒸发和結晶水的分解，不应計算在公式的分子中，因为这个热量不能反映出主要工艺过程的热量的利用和碳的消耗量。

第三：爐喉带出的热能随着爐料和煤气中水当量的改变而变动，在爐身中仅有简单的热交换的地区，爐料温度由 t_0 到 t_1 ($t_1 - t_0$)，的变化大于上升煤气温度从 t'_1 到 t'_0 ($t'_1 - t'_0$)，因为煤气的水当量 (w_g)，說是比爐料的水当量 (w_s) 大。

由热平衡得出：

$$w_s (t_1 - t_0) = w_g (t'_1 - t'_0),$$

由此得出

$$\frac{t_1 - t_0}{t'_1 - t'_0} = \frac{w_g}{w_s}.$$

不难看出（在将煤气和爐料的比热的一般数值代入时）， w_g 总是比 w_s ① 大。

因此

$$t_1 - t_0 > t'_1 - t'_0.$$

例如，如果爐料由 0° 加热到 900°C （超过这个简单热交换界限，过程将复杂化：石灰石的分解，直接还原和熔化），則煤

① 一公斤生鉄原料消耗量約 3.2 公斤，他們的比热約为 0.22 $w_s = 3.2 \times 0.22 \approx 0.7$ 。一公斤生鉄煤气的消耗量約 3.5 米³，它的比热为 0.33 $w_g = 3.5 \times 0.33 \approx 1.16$

所以 $\frac{w_g}{w_s} \approx 1.65$ 。

气在相应的区域温度下降少得多。譬如下降 600°C 即由 1000°C 降到 400°C ，这样任何更好地利用煤气热能的方法，都不能降低这个温度^①。爐喉带走的热量是不可避免的，而成为过程本身的特性。在这种情况下只有改变水当量比值才能降低爐喉的温度，也就是降低了单位生鉄燃料消耗量，但这并不是燃料消耗量降低的原因，而是它的結果。如果在上式中取 $t_0 = 0$ 就会很明显地看出我們討論的結果：

$$\frac{q_1}{t_1 - t_0} = \frac{w_g}{w_s} \cdot$$

从而爐喉的温度^②

$$t_0' = t_1' - t_1 \cdot \frac{w_s}{w_g} \cdot$$

由此可知，在爐料不变的情况下 ($w_s = \text{常数}$)，保持原来的爐料中煤气的分布及料錢的高度，只有降低单位生鉄煤气的数量，或換句話說：降低单位生鉄焦炭消耗量，干煤气的爐喉温度才能降低。

因此，如果减少爐喉煤气的热损失是降低燃料消耗量的原因（第一种情况），那么热损失的数量应計算在公式的分子中，如果爐喉温度的改变是由于爐料氧化程度变化的結果，那么就無論如何也不能計算在內，由于爐喉带走的热减少而降低了热损失（第二种情况），只应在确定有效热能利用系数时 (k) 計算进去，但未包含在分子中，如果它是由于其他的原因而供燃料的消耗量降低（第三种情况），那么即不計算在分子中也不計算在分母中（但在进一步的計算中，应当注意 K 值的影响）。

提高风的温度，而使爐喉带走的热量减少，显然是第三种情况的一个例子，燃料消耗量是由风温提高而降低的。这样单位生

① 生产炼鋼生鉄和鑄造生鉄时，爐喉煤气的实际温度是比较低的，这是由于有一部分热量消耗于使水蒸发，并提高蒸汽的温度到爐喉温度；这个数值较大，其結果或者使煤气利用变坏，或者提高鉄的氧化程度。

② 取自 B. H. 基太也夫的相似公式（見 3, 10 頁）。参考文献（見原文 32 頁）。

鉄煤气数量减少了，它的温度也降低了。在这种情况下由于减少了爐喉中带走的热量，高爐中发生的反应就获得了相应的热量，是否可以認為这些热量的利用将进一步降低燃料的消耗量？那么在提高热风温度前燃料消耗量是相当高的（ w_r 較大），高爐喉煤气温度也高，而爐喉中失掉热量无论如何也无法得到利用。現在爐喉中損失的变小，并不是因为从前爐喉中損失的热量利用有所改善，而是因为减少了煤气量——热的导体。减少爐喉中所降低的热損失的热量，不能用于反应过程，也不会引起热量和燃料进一步的降低——因为风温提高后煤气量（焦炭消耗量）降低了，这一部分热也就沒有带进高爐，当这部分热进入高爐后，它必然要損失在爐喉中，因为在爐身中沒有使用这部分热能的利用值。这样在計算因加热空气而节省的燃料时，不应在 b 項中計算爐喉所降低的热量。

5. 按照公式是进行热量計算，而求得的是燃料的节省。热量节省改成燃料节省，在原則上是不对的。因为它们不一定总是成正比，可是实际情况下这一点未必能够引起很大的差别。但是应该指出，从数学的观点来看公式是不够正确的。它帶有一系列的假設，而且不一定說明数量和現象之間的关系。可是作为工程公式，就很快地进行实际計算方面，它已完全符合要求了。而且从上面概括的討論中可以看到它尚能正确地反映出数量的关系。

按热量計算的 E 值应列入风口前燃烧的碳量（ N_c ），这样比列入全部燃料消耗量更为合适，而所得 E 值小，因为前者是真正地、与热平衡成正比（这可以从上面介绍的計算 w 的方法中看出）。

举几个应用 M. A. 巴甫洛夫公式来确定 a 、 b 改变对燃料消耗量影响的例子：

第一个例子： a 值的改变可能是由于鼓风加热程度改变的结果，将上面介绍的 w 值代入公式，并将 E 以分数表示：

$$E = \frac{a+b}{k(2340+1.445a)C_0} \quad (1)$$

由此风口前燃烧碳量的节省。(绝对值)

$$E \cdot C_0 = \frac{a+b}{k(2340+1.44t_R)} \quad (2)$$

設风温提高 Δt_R , 所以是 $t_R + \Delta t_R$. 这时风口前燃烧的碳量是 C'_0 .

提高风温时代入的附加热量:

$$a = 1.44 C'_0 (t_R + \Delta t_R) - 1.44 C_0 t_R, \quad (3)$$

$$\text{同时} \quad C'_0 = C_0 - E C_0. \quad (4)$$

将 C'_0 代入 (3). 式中, 解括弧得

$$a = 1.44 (C_0 \Delta t_R - E \cdot C_0 t_R - E \cdot C_0 \Delta t_R).$$

$$\text{所以} \quad E \cdot C_0 = \frac{1.44 (C_0 \Delta t_R - E \cdot C_0 t_R - E \cdot C_0 \Delta t_R) + b}{k(2340 + 1.44 t_R)}.$$

化簡这个方程式得:

$$E \cdot C_0 = \frac{1.44 C_0 \Delta t_R + b}{k(2340 + 1.44 t_R) + 1.44 (t_R + \Delta t_R)}.$$

假定直接还原度不改变, 爐渣和鉄水温度保持不变, 并根据上述看法不計算爐喉带走的热量, 那么只有冷却水带走和进入大气中的热量的变化才能計算入 b 值, 在預先确定碳消耗量的节省之后, 再进行計算风加热这一单独因素的影响是更为方便些。使风温从 500°C 升高到 600°C ($t_R = 500^\circ\text{C}$; $\Delta t_R = 100^\circ\text{C}$), 而风温升高前风口碳的消耗量是 $C_0 = 65$ 公斤, 在采用普通的方法进行热平衡計算时 [2], 随着冶炼条件的不同, 热損失一般是 500 到 1000 卡/公斤生鉄 (炼鋼生鉄或鑄造生鉄), 最常見的是 600~900 卡/公斤·生鉄。把按开始和終了状态的計算結果列入到平衡表中 ($w = 2700 \sim 4000$ 卡/公斤), 它們約占 20~25%, 也就是 k 在 75~80% 的范围内 (0.75~0.8), 在我們所举的例子里, 当 $w = (2340 + 1.44 \times 500) \times 0.65 \approx 2000$ 卡, 那么同样的热損失就約占 30~45%, $k = 55 \sim 70\%$ (0.55~0.7) 取其平均值为 0.6.

那么不考虑 b 时的近似值为: