

GAOLU GONGYI JISUAN

● 全泰铉 吕庆 李福民 编著

高炉工艺计算

● 河北科学技术出版社

高 炉 工 艺 计 算

全泰铉

吕康 李福民 编著
江苏工业学院图书馆
藏书章

河北科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

高炉工艺计算/全泰铉,吕庆,李福民编著. —石家庄:河北科技出版社,2005

ISBN 7 - 5375 - 3240 - 0

I. 高... II. ①全... ②吕... ③李... III. 高炉—
工艺计算 IV. TF572

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 076981 号

高炉工艺计算

全泰铉,吕 庆,李福民 编著

出版发行	河北科学技术出版社出版发行
地 址	石家庄市和平西路新文里 8 号(邮编:050071)
印 刷	河北理工大学印刷厂
经 销	新华书店
开 本	880 × 1168 1/32
印 张	5.375
字 数	134000
版 次	2005 年 12 月第 1 版 2005 年 12 月第 1 次印刷
定 价	15.00 元

<http://www.hkpress.com.cn>

前 言

尽管高炉冶炼这一古老的炼铁生产方式受到来自各种非高炉炼铁的挑战,但它仍以其完善的工艺和系统的理论,牢牢地占据着钢铁生产领域的主导地位,至今仍保持着继续发展的势头,冶炼指标不断得到改善,达到前所未有的水平。尤其是近年来不断提高喷煤量,一些先进高炉焦比已突破 400kg 大关,继续向更低的水平迈进,立志要达到极限焦比。如果这一理想能实现,那么高炉生产完全可以与任何非高炉炼铁法抗衡。因此,继续深入进行高炉冶炼工艺及理论研究工作,是非常必要的。今后进一步改善高炉冶炼指标的方向可归纳为以下几方面:

(1) 精料,主要目标是提高品位,减少渣量,改善还原性,降低直接还原度。虽然原料的重要性人人皆知,但是当前国内大部分高炉所用的原料质量仍有许多问题,因此,改善原料质量仍然是今后相当长的时间内摆在炼铁工作者面前的艰巨任务;

(2) 富氧大喷煤,用一般煤来取代焦炭,从而大幅度降低成本,提高高炉生产的竞争力;

(3) 提高风温,达到 1200 ~ 1350℃;

(5) 改善高炉操作,探索出精料,富氧大喷煤,高风温,高顶压下的最佳操作制度;

(6) 高炉长寿,力争一代炉龄超过 15 年。

研究表明,鼓风参数与喷煤量及原料条件对高炉冶炼指标的影响,是可以通过计算来预测的。计算的根据是高炉冶炼过程的物料平衡与热平衡。正确进行物料平衡与热平衡计算,是分析计算各种因素对冶炼指标影响的基础。因此,本书用较大的篇幅介绍了物料平衡与热平衡计算方法,在此基础上介绍了冶炼指标的图解分析法及各种因素影响焦比的分析算法。本书第九章给出本计算分析的程序及计算结果。从这些计算结果中可以观察到各种因素影响高炉冶炼指标的规律。

在讲到高炉冶炼过程的计算分析法时,不能不提前苏联学者拉姆教授。早在 20 世纪 40 年代,他已提出后来称之为拉姆联合计算法的过程算法,至今仍被炼铁界普遍采用,堪称平衡模型计算法的典范。他的晚年所著《现代高炉过程的计算分析》(王筱留,徐建伦译,冶金工业出版社,1987 年出版)一书是他一生研究工作的总结。本书作者在多年的教学中和本书的编写过程中,从该书学到不少东西,谨向该书的作者与译者致谢。

编 者

2005 年 7 月

目 录

第一章 高炉工艺计算法概述	(1)
第二章 高炉冶炼指标	(6)
第三章 有关热力学数据	(14)
第四章 高炉内物质与热量的转移	(27)
一、高炉内物质转移	(27)
二、高炉内热量转移	(33)
第五章 高炉配料计算	(36)
一、简易配料计算法	(36)
二、计算实例	(39)
三、联合计算法	(42)
四、计算实例	(53)
第六章 物料平衡方法及计算实例	(59)
一、生产中高炉的物料平衡计算方法	(59)
二、新设计高炉的物料平衡计算方法	(63)
三、物料平衡计算实例	(70)
第七章 热平衡方法及计算实例	(76)
一、全炉热平衡计算方法	(76)
二、高温区热平衡计算法	(86)
三、热平衡计算实例	(88)
四、通过热平衡计算理论焦比	(94)
第八章 高炉冶炼过程图解分析	(98)

一、巴甫洛夫图	(98)
二、Rist 操作线	(103)
三、操作线计算实例	(117)
第九章 风参数与喷吹物对冶炼指标的影响	(121)
一、风温对冶炼指标的影响	(121)
二、鼓风湿度对高炉冶炼指标的影响	(124)
三、富氧鼓风对冶炼指标的影响	(127)
四、喷煤对高炉冶炼指标的影响	(130)
五、鼓风参数与喷煤量对冶炼指标综合影响计算软件	(137)
第十章 各种因素对焦比影响的计算分析	(148)
一、矿石出铁量与脉石成分对焦比的影响	(148)
二、熔剂用量对焦比的影响	(151)
三、焦炭灰分与含硫量对焦比的影响	(152)
四、生铁含 Si 量对焦比的影响	(154)
五、铁的直接还原度对焦比的影响	(155)
六、矿石金属化率对焦比的影响	(157)
附录 主要符号	(160)
参考文献	(165)

第一章 高炉工艺计算法概述

高炉冶炼过程的计算分析法(或简称高炉工艺计算)是炼铁冶金学的重要组成部分,它是根据物理化学及冶金热力学与动力学原理,对高炉内的物理化学反应及传质、传热过程进行计算分析,在给定冶炼条件下确定全部冶炼指标,预测采用某种新的冶炼技术(如富氧鼓风、喷吹燃料等)或冶炼条件发生重大变化(如大幅度提高风温、采用高品位矿石、改变炉料结构等)时,可能达到的冶炼指标,并且指明优化高炉操作及进一步改善冶炼指标的方向与限度。正确的计算方法,可省去耗资巨大的冶炼试验,直接通过计算获得必要的数据,为新技术的应用与推广提供科学依据。在为新建高炉确定炉容与炉型、选择各大系统主要设备的容量与工艺尺寸、计划动力供应与运输能力时,也离不开基于“物质不灭定律”与“能量守恒定律”的这种计算分析。

各种冶炼指标当中,最重要的指标是焦比。它是代表高炉能耗高低的基本指标,其他许多指标都是由它派生出来的,如风量、煤气量、煤气成分、渣量、相对产量等,焦比一旦被确定,这些指标亦随之确定。因此,通过计算弄清各种因素对焦比的影响并确定两者之间的定量关系,是高炉工艺计算中的核心问题。

计算焦比的依据是炉内热平衡。虽然焦炭在炉内的作用不局限于提供热量,还有还原剂与保证料柱透气性的骨架作用,但当前条件下,决定焦比的限制性因素是单位生铁的热量需要,因此,可以根据热平衡确定焦比。为此,需要建立以焦比因素为待解未知数的热平衡方程,同时计算全部热支出。

在简易计算中,计算焦比的热平衡方程如下:

$$Q_{\text{入数}} \times C_F = Q_{\text{CU}} \quad (1-1)$$

式中: $Q_{\text{入数}}$ —风口前燃烧每 1kg C 的有效热收入,它等于 1kg C 在风口前的不完全燃烧热与鼓风物理热减去炉顶煤气带走的热量之和(kJ/kg C)。

C_F —风口前燃烧的碳(kg/t Fe)。

Q_{CU} —全部热支出,不包含炉顶煤气带走的热量(kJ/t Fe)。

通过上述热平衡方程解出风口前燃烧的碳 C_F 之后,再加上根据选定条件计算的进入生铁中的碳 C_e 与直接还原消耗的碳 C_d ,三者之和就是单位生铁所消耗的焦炭中的 C。根据焦炭的含 C 量把它换算成为焦炭量,就是焦比。

为了利用上述热平衡方程式来计算焦比,必须选定炉顶温度和炉内铁的直接还原度 r_d ,并且由于热支出中亦含有与焦比有关的炉渣带走的热量与石灰石分解热等项,所以须把它列成含有未知数的求和式之后,进行同类项合并的代数运算,才能解出焦比。

在拉姆创立的联合计算中,计算焦比的热平衡方程如下:

$$q_{\text{KSH}} \times K = -q_{\text{PSH}}/e_p \quad (1-2)$$

式中: q_{KSH} —加石灰石以后的焦炭自由热(kJ/kg 焦);

K —焦比(kg/kg Fe);

q_{PSH} —加石灰石之后的矿石自由热(kJ/kg 矿);

e_p —矿石理论出铁量(kg/kg 矿)。

只要按选定条件计算出 q_{KSH} , q_{PSH} 和 e_p ,就可以用上式解出焦比 K 。因式 1-2 中的 q_{KSH} 和 q_{PSH} 值受各种冶炼条件,如风温、富氧度、矿石成分、焦炭成分等因素的影响,所以,用上式可以进行各种因素对焦比影响的分析计算。本书将重点叙述这种分析计算方法。

计算时,以下三项指标是必须选定的:

- ①炉顶温度 t_d ;
- ②铁的直接还原度 r_d ;
- ③外部热损失占热收入的分数 Z 。

计算的准确性几乎完全取决于上述三项指标选定的可靠性。迄

今,描述各种冶炼条件与上述三项指标之间关系的普遍适用的数学模型尚未问世,因此,目前只能采用经验公式。拉姆在这方面做出了出色的工作,对前苏联绝大部分高炉进行调查统计的基础上,提出一整套经验公式(见本书第九章),计算结果与生产实际相当吻合,本书采用了这些经验公式。

国内外许多文献的作者认为:通过高温区热平衡来计算焦比,较全炉热平衡来计算焦比更准确。理由是,在高炉上部区热交换进行的比较彻底的情况下,边界处炉料与煤气温度差很小(只有 $20 \sim 50^{\circ}\text{C}$)并且很稳定,不像在全炉热平衡中必须选定的炉顶温度那样,随冶炼条件的变化而发生很大的波动。但实际上,在上部热交换区内炉料粒度组成与分布及其运动状态极不均匀的情况下,上部热交换区内进行的热交换并不总是那样彻底,以至于边界处炉料与煤气之间的温度差也会发生很大波动,并非在无论何种冶炼条件下总能保持在 $20 \sim 50^{\circ}\text{C}$ 的水平。因此,区域热平衡一定比全炉热平衡更准确的论断缺乏充分的根据。本书在计算理论焦比及分析各种因素对焦比的影响时,采用了全炉热平衡。

热平衡有三种不同的计算方法:第一种叫热工法;第二种叫格留涅尔法;第三种叫奥盖尔曼法。从能量守恒的角度来看,三者没有本质上的不同,均可以做到收入与支出的平衡。三种热平衡计算法的主要区别在于热收入项中对燃料燃烧放热量的不同理解上:第一种计算方法认为燃料的低发热量就是它的收入;第二种计算方法认为按燃料在炉内燃烧过程中实际形成的 CO_2 和 CO 数量来计算它的热收入;第三种计算方法认为只按风口前燃烧的 C 放出的热量来计算它的热收入。由于对燃料燃烧放热量的上述不同理解,所以,三种热平衡中分别出现不同的热支出项,第一种热平衡中有氧化物的分解热、炉顶煤气热值及未燃烧碳的热值;第二种热平衡中有氧化物的分解热;第三种热平衡中有炉内反应吸热。根据计算分析的不同目的,可以采用不同的热平衡计算法。对高炉整体进行热工分析时,采用第一种热平衡较方便;对焦比的影响因素进行计算分析时,可采用第

二种和第三种热平衡。本书在进行鼓风参数与喷吹量对高炉冶炼指标影响的综合分析时,采用了第二种热平衡,在高炉冶炼过程的图解分析中,采用了第三种热平衡。

近年来,在散料—气体动力学、化学反应动力学和热交换规律的基础上,开发冶炼过程动力学—数学模型的研究工作发展迅速,出现许多描述高炉冶炼过程的数学模型。根据这种模型,不仅可以确定各种冶炼条件下的冶炼指标,还可以确定高炉三维空间内温度、煤气浓度、速度、压力和矿石还原度的分布。这些模型都是由高炉内发生的各种物理化学过程的微分方程组和它们在时间和高炉空间内的积分程序组成的,如果这种微分方程组的分析解可靠,就可以通过它来确定各种因素对焦比的影响。

但是,炉内发生的各种特征值具有不确定性和对这些过程的研究资料极缺的现实,使得对这些微分方程组分析解的可靠性不高。到目前为止,在创建数学模型时要遇到的以下几方面的障碍和困难是不能克服的:

(1) 针对炉料在高炉半径方向上的不均匀分布,以及这种不均匀性对热交换、氧化物的还原和碳的气化反应等的影响的不确定性和随机性变化,大部分模型试图用平均值来计算,但是,在化学反应速度和热交换与煤气和炉料数量的比值不成直线关系的情况下,用平均值计算,难以得出正确的结论。

(2) 千差万别的原料条件下,在上部热交换区确定一个普遍适用、稳定的热交换系数是很困难的,在各种不同条件下的热交换系数差别很大,从而计算的结果也势必产生很大差别,难以产生统一的标准。

(3) 至今无法正确测定成渣带以下炉渣在焦炭缝隙中间的流动速度和从成渣带到风口中心线之间的停留时间,无法测定液态渣铁与煤气之间的热交换系数,也难以确定液相区影响铁硅还原的各种因素,而这些数据是建立数学模型不可缺少的。

(4) 对还原数据影响极大的矿石有效孔隙度难以确定。矿石中的孔隙千差万别和在各种不同孔隙中的扩散机理完全不同的情况

下,实际上无法确定所谓的有效孔隙度,因而用它来正确描述还原过程也是不可能的。

(5)影响焦炭气化反应速度的各种因素难以确定,因而建立正确描述直接还原反应的数学模型是非常困难的。

由于上述各种原因,用动力学—数学模型来分析计算高炉冶炼过程的可靠程度大大下降。而热平衡模型中却不存在这种问题,因为它是根据过程的始态和末态参数来进行分析计算的,不受过程本身的影响,并且计算也比动力学—数学模型简单的多。本书采用了热平衡模型,通过热平衡模型,主要进行各种因素对冶炼指标影响的分析计算,并给出进行这种计算的微机程序及计算结果。读者通过阅读本书,可解决以下诸问题:

- ① 配料计算、物料平衡、热平衡及理论焦比的计算方法;
- ② 鼓风参数、喷吹量和原料成分等各种因素对焦比影响的计算方法及计算实例;
- ③ 当冶炼条件发生变化时,如何通过计算来确定各种冶炼指标变化,并根据计算提供的数据确定操作制度;
- ④ 在给定冶炼条件下,确定全部冶炼指标;
- ⑤ 明确改善冶炼指标的方向与限度。

第二章 高炉冶炼指标

描述高炉冶炼过程诸特征和评价炉内还原反应完成情况的各种指标,包括以下各项:

(1) 焦比(K)—单位生铁的焦炭消耗量(kg/t 或 kg/kg)。

焦比高低直接反映高炉冶炼技术水平及生铁成本的高低,也是当前市场经济的环境下高炉生产有无竞争力的主要标志,因为高炉所用原材料中焦炭价格最高,在生铁成本构成中所占的份额最大,因此,它始终是高炉冶炼过程中理论研究及生产操作人员最关注的指标。焦比不是可以任意选定的,它取决于各种冶炼条件,取决于炉内热平衡。它是一个综合性的指标,炼铁生产过程的各个环节都是影响焦比的因素,包括原料、风温、操作水平、炉型、冷却方式、各种设备的运转状况、操作人员的技术水平和责任心等等,因此,必须全面优化炼铁生产组织,不断提高技术水平和管理水平,方可达到理想的焦比指标。

(2) 喷吹量(S)—单位生铁喷吹物的数量(kg/t 或 kg/kg)。

从风口喷入各种含碳物料,以此取代从炉顶装入的焦炭,从而大幅度降低焦比,这是从 20 世纪 50 年代开始兴起的炼铁技术史上的一大突破。从理论上讲,焦炭在高炉冶炼过程中的发热剂和还原剂作用,完全可以用风口喷吹物来代替。喷吹燃料技术的发展,为大幅度降低焦比,达到炼铁工作者梦寐以求的极限焦比(即保证炉内透气性所需要的骨架作用的最低焦比)展示了美好前景。因此,自从喷吹燃料技术出现以来,开展广泛深入的研究,不断探索提高喷吹量的途径,成为炼铁工作者所追求的一项主要目标。

从风口喷入的燃料主要有重油、煤粉、天然气、焦炉煤气等,究竟

喷吹何种燃料,取决于各地区的资源状况。对中国来说,喷吹煤粉最具现实意义。

当前国内外高炉喷煤量的限制性因素是如何使煤粉在风口前氧化区内全部燃烧和如何创造使大量煤气顺利通过并充分进行还原和传热过程的良好料柱透气条件。

(3) 喷吹燃料的置换比(S_x)—在高炉生产中,单位喷吹物取代焦炭的数量(kgK/kg)。

置换比大小取决于高炉冶炼条件、操作状况、鼓风参数、燃料种类、燃料成分、燃料在风口前的燃烧率、煤气利用率等因素。根据这些条件的不同,置换比在很大范围内波动。为了充分发挥喷吹燃料的作用,不仅要提高喷吹物的数量,而且必须不断提高其置换比。喷吹燃料时,置换比是不可忽视的重要指标。

应区别三种不同形式的置换比:

① 以不喷吹燃料时期为基准的置换比,即:

$$S'_x = \Delta K/S = (K_0 - K)/S \quad (2-1)$$

式中: K_0 —不喷吹时的焦比(kg/t 或 kg/kg)。

② 在喷吹过程中,喷吹量从 S_1 提高到 S_2 时的置换比,即:

$$S''_x = (K_1 - K_2)/(S_2 - S_1) \quad (2-2)$$

式中: K_1, K_2 —喷吹量 S_1 和 S_2 时的焦比(kg/t 或 kg/kg)。

③ 根据焦比与喷吹物之间的函数关系 $K = f(S)$,通过微分运算而得的理论置换比,即:

$$S^*_x = dK/dS \quad (2-3)$$

只有喷吹量与焦比之间成直线关系时,上述三种置换比才相同。实际上,置换比是随着喷吹量的增加而递减的,因此三者有差别。

(4) 综合焦比($K_{\text{综}}$)—把喷吹量按置换比换算成焦炭量之后,单位生铁的焦炭消耗量(kg/t 或 kg/kg),即:

$$K_{\text{综}} = K + S_x \times S \quad (2-4)$$

由上述定义可见,它是高炉喷吹燃料的情况下,正确反映其能耗高低的指标。

(5) 直接还原度 r_d 。

它是描述炉内直接还原发展程度的指标,也是炉内 C 的燃烧反应的完全程度的指标。因为炉内直接还原的发展程度反映煤气化学能的利用情况,它直接影响单位生铁的热消耗量,所以,它是影响焦比的重要因素之一,在计算分析中,它是不可缺少的一个指标。有如下三种定义:

① 巴甫洛夫定义的炉内铁的直接还原度 r_d —在炉内还原产生的全部铁中,以直接还原方式产生的铁所占的分数。下这种定义时,先假定从铁的高级氧化物还原到 FeO 的过程全部是间接还原,即认为铁的高级氧化物不参加直接还原,也不从铁的高级氧化物中直接还原产生铁,炉内铁的产生是从 FeO(包括从铁的高级氧化物中还原产生和矿石中原有的 FeO)的还原开始的,其中一部分以间接还原的方式还原,余下部分进入高温区以直接还原的方式还原。只要矿石不直接进入高温区,而是在缓慢下降的过程中逐渐受上升气流的加热和还原,那么上述假定是完全符合实际的。

$$r_d = Fe_d / Fe_{\text{还}} \quad (2-5)$$

或者

$$r_d = \frac{56}{12} C_{dFe} / Fe_{\text{还}} \quad (2-6)$$

② 炉内氧化物还原的直接还原度 R_d —在炉内氧化物还原夺取氧的过程中,以 CO 的形式夺取的氧占还原夺取全部氧量的分数。即:

$$R_d = O_d / O_{\text{还}} \quad (2-7)$$

③ 炉内总的直接还原度 $\bar{R}_d$ —在炉内氧的气化过程中,以 CO 的形式转入煤气中的氧占全部气化氧量的分数。即:

$$\bar{R}_d = O_{CO} / O_{\text{气化}} \quad (2-8)$$

根据上述三种不同定义,可以建立如下关系式:

$$R_d = (r_d \cdot O_{\text{II}} + O_{\text{III}}) / O_R \quad (2-9)$$

$$\bar{R}_d = (r_d \cdot O_{\text{II}} + O_{\text{III}} + R_{CO_2} \cdot O_{\text{IV}}) / (O_R + O_{\text{IV}} + O_V) \quad (2-10)$$

式中: O_d —直接还原夺取的氧量(kg/t, kg/kg);

O_{co} —气化氧中以 CO 的形式转入煤气中的氧量(kg/t, kg/kg);

$O_{还}$ —还原夺取的全部氧(kg/t, kg/kg);

$O_{氧化}$ —气化进入煤气中的全部氧(kg/t, kg/kg);

O_I —从铁和锰的高级氧化物中夺取的氧(kg/t, kg/kg);

O_{II} —从 FeO 还原到铁的过程中夺取的氧(kg/t, kg/kg);

O_{III} —从合金元素的还原中夺取的氧(kg/t, kg/kg);

O_{IV} — $CaCO_3$ 分解产生进入煤气中的 CO_2 中的氧(kg/t, kg/kg);

O_V — $CaCO_3$ 以外的碳酸盐分解产生进入煤气中的 CO_2 中的氧(kg/t, kg/kg);

$$O_R - O_R = O_I + O_{II} + O_{III}$$

(6) 冶炼强度。

广义上讲,冶炼强度就是高炉内焦炭的燃烧速度。因为炉内焦炭的燃烧速度直接决定单位时间内产生的煤气量、煤气的上升速度、煤气在炉内的停留时间及炉料的下降速度等诸项指标,所以,以下各项指标均可看做冶炼强度指标:

- ① 每 $1m^3$ 高炉有效容积每昼夜燃烧的焦炭数量 $I_K(t/m^3 \cdot d)$;
- ② 每 $1m^3$ 高炉有效容积单位时间内通过的煤气量 $I_m(m^3/m^3 \cdot min)$;
- ③ 煤气在炉内的停留时间 $\tau(sec)$;
- ④ 炉料在炉内的停留时间 $\tau(h)$;
- ⑤ 昼夜炉料的周转次数 $24/\tau(次)$;
- ⑥ 标准状态下,煤气上升的空炉速度 $W_0(m/sec)$ 。

根据它们的定义,可以导出这些指标之间的下列关系:

$$I_m = I_K \cdot V_K / 1.44 \quad (2-11)$$

$$\tau' = 60 \cdot \varepsilon \cdot \rho / I_m \cdot \theta \quad (2-12)$$

$$W_0 = I_m \cdot H / 60 = I_K \cdot V_K \cdot H / 86.4 \quad (2-13)$$

$$24/\tau = I_K [1/\gamma_K + (1/\gamma_P)(P/K)] \quad (2-14)$$

式中: V_K —煤气发生量(m^3/kg 干焦);

ε —炉料平均空隙度;

p —炉内煤气平均压力(kPa);

$\theta = (t + 273)/273$;

t —炉内煤气平均温度(°C);

H —炉料有效高度(m);

γ_K, γ_P —焦炭和矿石在炉内的平均堆比重(t/m³);

K, P —焦炭和矿石批重(t/批)。

(7) 风温(t_F)—鼓风温度(°C)。

风温高低决定鼓风带入的物理热,它取代焦炭在风口前燃烧放出的热量,是降低焦比的主要因素之一。鼓风物理热来自热风炉蓄热室,而热风炉蓄热室中的热量是燃烧炉顶煤气而得的,因此,实际上鼓风物理热是焦炭在风口前燃烧产生的热量的循环利用,提高风温意味着提高焦炭燃烧放出能量的利用率。

鼓风物理热包括干空气热焓和鼓风中水分的热焓,因为两者的比热值相差很大,所以需分别计算。另外,鼓风的水分在风口前分解吸热,降低热收入,因此常计算去掉水分分解吸热量以后的干风温度:

$$t_{\text{干}} = t_F - \frac{q_{H_2O} \cdot f}{C_0^*} (1 - \eta_{H_2}) \quad (2-15)$$

式中: $t_{\text{干}}$ —干风温度(°C);

t_F —实际鼓风温度(°C);

q_{H_2O} —水分分解热(kJ/m³);

f —鼓风水分(m³/m³);

C_0^* —风温 t_F 下的鼓风比热(kJ/m³·°C);

η_{H_2} —炉内 H_2 利用率。

(8) 风量(V_{FFe})—单位生铁入炉风量(m³/kg)。

单位生铁入炉风量取决于风口前燃烧的 C 。因此风量大小反映高炉燃料比。风量是高炉冶炼过程中的主要物质收入之一,是进行物料平衡计算及决定高炉鼓风机容量的主要参数,因此,风量也是高炉冶炼过程中的一个重要的能耗指标。