

重庆科技学院



# 毕业论文

题 目 高炉炼铁成本核算模拟程序的研究

学 院 冶金与材料工程学院

专业班级 冶金 2010-04

学生姓名 李 鹏 学号 20010440466

指导教师 高绪东 职称 讲 师

评阅教师 杨治立 职称 教 授

2014 年 6 月 8 日

## 学生毕业设计（论文）原创性声明

本人以信誉声明：所呈交的毕业设计（论文）是在导师的指导下进行的设计（研究）工作及取得的成果，设计（论文）中引用他（她）人的文献、数据、图件、资料均已明确标注出，论文中的结论和结果为本人独立完成，不包含他人成果及为获得重庆科技学院或其它教育机构的学位或证书而使用其材料。与我一同工作的同志对本设计（研究）所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

毕业设计（论文）作者（签字）：

年 月 日

## 摘 要

节约能源降低高炉炼铁成本,是提高钢铁企业经济增长的重要途径,面对原材料、燃料、动力等价格的不断上涨,高炉炼铁由于其较高的成本面临着越来越重的挑战,降低高炉炼铁成本已迫在眉睫。

本文的任务是高炉炼铁成本核算的模型研究,即通过建立数学模型,采用理论计算和程序编写相结合的方式,利用 VC 编写出能够计算高炉炼铁成本、炉渣碱度、物料平衡、热平衡等参数的程序。将编程所得计算结果与理论研究相结合发现,目前高炉炼铁成本主要由原材料(矿石、燃料、熔剂等)、人工以及动力组成,而影响高炉炼铁成本的因素有多个,如:高炉容积、入炉矿石品位、原燃料质量、炼铁设备等,这些因素或单一影响或与其它因素一起相互影响着高炉炼铁成本。降低高炉炼铁成本有两个较为有效的方法,一是使用高品位的矿石,它能降低燃料比,从而达到降低炼铁成本的目的;二是使用合理的动力设备,避免不必要的动力浪费。

**关键词:** 高炉炼铁 成本核算 程序

## ABSTRACT

Reduce the cost of the blast furnace to save energy, iron and steel enterprises is an important way to improve economic growth in the face of rising raw materials, fuel, power and other prices, the blast furnace due to their higher costs facing increasingly serious challenges to reduce ironmaking costs is imminent.

Task of this paper is to study the blast furnace costing model, namely through the establishment of a mathematical model, using theoretical calculations and a combination of programming, using VC can calculate the cost of the blast furnace slag alkalinity, material balance, heat balance, etc. parameters of the procedure. The resulting calculation program combines theoretical study found that the current cost of the blast furnace is mainly composed of raw materials (ores, fuel, flux, etc.), composed of labor and power, and the factors affecting the cost of blast furnace ironmaking there are multiple, such as: blast volume , grade of ore into the furnace, the quality of raw materials and fuels, iron equipment, the impact of these factors or a single or together with other factors affecting each other ironmaking costs. Reduce the cost of the blast furnace has two more effective methods, one using high-grade ore, which can reduce fuel ratio, so as to achieve the purpose of reducing the cost of iron; Second, the use of reasonable power equipment, to avoid unnecessary power waste .

**Keywords:** Blast furnace ironmaking; Costing; Program

## 目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
1 绪论.....	1
1.1 高炉炼铁成本核算的目的及意义.....	1
1.2 国内高炉炼铁发展现状.....	1
1.3 国外高炉炼铁的发展现状.....	2
2 高炉炼铁成本影响因素分析.....	6
2.1 炉料结构.....	6
2.2 高炉燃料.....	6
2.3 高炉设备及操作.....	7
3 配料计算.....	9
3.1 原始原料.....	9
3.1.1 混合矿石成分.....	9
3.1.2 燃料成分及用量.....	9
3.1.3 熔剂成分（石灰石）.....	9
3.2 各已知参数.....	10
3.3 炼铁计算.....	10
4 物料平衡计算.....	14
4.1 已知参数.....	14
4.2 风量计算.....	14
4.2.1 风口前燃烧的碳量 C 风.....	14
4.2.2 风量计算.....	15
4.2.3 煤气成分及数量计算.....	15
4.2.4 编制物料平衡表.....	17
5 热平衡计算.....	18
5.1 热量收入.....	18
5.2 热量支出.....	19
5.2.1 氧化物分解与脱硫.....	19
5.2.2 碳酸盐分解热.....	21
5.2.3 水分分解热.....	22
5.2.4 喷吹物分解热.....	22
5.2.5 炉料游离水的蒸发热.....	22

5.2.6 生铁带走热 .....	22
5.2.7 炉渣带走热 .....	22
5.2.8 炉顶煤气带走热 .....	22
5.2.9 外部热损失（包括散热和冷却水带走热） .....	23
5.3 热平衡指标计算 .....	23
6 程序编写 .....	25
6.1 输入物料及参数的编写 .....	25
6.2 输出物料的编写与计算 .....	28
7 总结 .....	31
参考文献 .....	32
致 谢 .....	33
附录 .....	34
附录 1 输入参数代码图 .....	34
附图 2 输出物料代码图及计算公式 .....	37

# 1 绪论

## 1.1 高炉炼铁成本核算的目的及意义

在钢铁企业中，高炉炼铁的成本控制将直接影响企业的利益及竞争力。在炼铁成本中，原材料及燃料占了85%左右，动力和工资福利约15%<sup>[1]</sup>。本文通过建立数学模型并编程，着重研究了原材料以及燃料对高炉炼铁成本的影响。高炉炼铁是钢铁生产中重要的一环，编制程序主要是针对原材料及燃料对高炉炼铁成本的影响进行研究，再结合调查分析动力及动力设备对炼铁成本的影响。通过对这些影响因素的总结研究，期望找到能有效降低高炉炼铁成本的方法，对降低高炉炼铁成本有着一定参考作用。同时，编制的程序也能计算物料平衡，热平衡等，对高炉炼铁生产也有着一定指导作用。

## 1.2 国内高炉炼铁发展现状

钢材由于其通用性及可回收利用性，与其他材料相较，炼铁的原料铁矿石价格低廉而易得，钢铁属于可持续使用节约型资源，钢铁已成为确保现代经济可持续发展的重要材料。1996年我国的钢铁产量突破1亿t后，经过10年的发展，我国生铁产量翻了两倍，一举提升到了世界产铁量的首位。我国生铁的产量在2005年超过了3亿吨，远远超过世界钢铁大国历史最高产量，成为世界钢铁生产第一大国<sup>[2]</sup>。高炉部分经济技术指标接近或达到了世界先进水平。

目前，世界上钢铁生产主要通过三种工艺流程：一是通过废钢的循环利用采用电弧炉冶炼工艺；二是直接还原铁矿石生产海绵铁然后由电弧炉进行炼钢；三是以原料铁矿石进行高炉炼铁和转炉炼钢的联合流程<sup>[3]</sup>。另外，也有少部分钢铁企业采用熔融还原法进行铁水生产，并将生产的铁水通过转炉进行炼钢冶炼生产。

钢材的由于其较低的成本，优异的可回收利用性，以及应用灵活使用广泛等优点成为了支持现代工业化社会发展及可持续利用的基础材料。钢材是一种拥有高度灵活性的可回收利用材料，在各个行业尤其是在能源与环境技术、机械制造与设备、建筑以及桥梁建造、交通运输、机械工程以及包装领域中得到广泛使用。

目前，我国拥有高炉高达1350座，其中高炉容积高于2000m<sup>3</sup>的高炉达100座。据统计，2008年重点大中型钢铁企业高炉情况见表1<sup>[4]</sup>。

表 1 重点钢铁企业高炉情况

年	2008		2007	
数量	座数	能力, 万 t/年	座数	能力, 万 t/年
3000m <sup>3</sup> 以上	19	5630	16	4715
2000-2999m <sup>3</sup>	46	8589	40	7432
1000-1999m <sup>3</sup>	89	9870	64	6971
300-999m <sup>3</sup>	332	17552	309	15982
101-299m <sup>3</sup>	27	679	41	920
合计	513	42320	483	36629

2009 年我国新建的大于 500m<sup>3</sup> 以上容积的高炉达 34 座, 其中包括有曹妃甸新建高炉容积为 5500m<sup>3</sup>; 沙钢新建某高炉容积达 5800m<sup>3</sup>; 鞍钢鲅鱼圈新建某高炉容积达 4038m<sup>3</sup>, 武钢新建某高炉容积达 3800m<sup>3</sup>, 并新建容积达 3200m<sup>3</sup> 高炉 6 座, 新建容积为 2500~2800m<sup>3</sup> 的高炉 5 座, 新建容积为 1000~1780m<sup>3</sup> 的高炉 10 座, 以及正在建设的容积超过 530m<sup>3</sup> 的高炉达到 17 座, 容积大于 1000m<sup>3</sup> 以上的高炉达 13 座。

我国的钢铁工业体现在不同层次并存的样貌<sup>[5]</sup>。我国钢铁企业目前不同层次并存的样貌主要体现在: (1) 钢铁企业之间技术相差较大, 有的钢铁企业具有较为先进的技术, 而有的钢铁企业技术相对落后造成炼铁成本的增加; (2) 钢铁企业之间生产规模(高炉容积大于 3000m<sup>3</sup> 和容积低于 500m<sup>3</sup> 的高炉) 相差极大, 有的高炉容积高达 5000m<sup>3</sup> 以上, 而有的钢铁企业高炉容积还不到 1000m<sup>3</sup>, 而且我国大部分高炉容积都低于 1000m<sup>3</sup>, 严重限制了钢铁的产量; (3) 钢铁企业之间设备存在着差距, 有的钢铁企业设备较为先进, 而有的钢铁企业设备较为落后, 造成了炼铁成本的增加; (4) 各钢铁企业之间的环保水平也存在着巨大的差距, 部分钢铁企业为了省钱对钢铁生产所产生的污染物不进行处理, 随意排放到自然环境中, 造成了恶劣的环境污染。现在, 中国来说, 我国钢铁企业之间这些不同层次的钢铁企业并存这一现象将会严重阻碍我国的工业化生产进程并且会严重影响到我国钢铁行业的发展, 所以改变我国钢铁企业不同层次并存这一现象是我国高炉炼铁发展的重中之重。

### 1.3 国外高炉炼铁的发展现状

国外高炉炼铁的技术进步体现在高炉的高效化、低燃料比、高炉长寿、环保等方面<sup>[6]</sup>。

#### (1) 环保

随着科技的发展, 现代人们越来越重视环保问题, 而钢铁的冶炼与生产期间会排放出大量的污染物, 对环境造成较大的污染, 因此, 人们对于改变钢铁高污染、高能耗这一现状的呼声越来越高。目前, 无论是国内还是国外都对现有的炼铁工艺都进行



一定的改进来减少对环境的污染，而国内外现在正在研发的各种非高炉炼铁工艺也都十分重视环保的问题。目前，欧洲和北美分别采用了两种不同的方法来改进高炉对环境的污染作用。

烧结工序有两大作用，因此欧洲目前应用了烧结工序这一方法。这两大作用分别是：

①烧结工序可以生产出质量较高的烧结矿，可以使高炉炼铁具有较高的高效性；

②烧结工序可以将钢铁生产所产生的废料进行处理，然后进行循环利用，大大的提高了原料的使用率。

而烧结工艺却会产生大量的有害气体如  $\text{SO}_2$ 、 $\text{CO}_2$  以及氮的各种氧化物，并会产生大量的粉尘，欧洲为了解决烧结的这些缺点对烧结的工艺流程进行了大量的改进，并保证了烧结的可持续性。目前，欧洲的钢铁企业正在使用的烧结工艺技术较传统工艺主要改变的有三个方面：

①优化烧结工艺技术

要对现有的烧结技术进行优化，其难度无疑是很高的，欧洲的钢铁企业采用的方法是：利用活性碳的吸附性，将烧结产生的烟气通过活性炭进行处理，能够有效吸收烟气中的有害气体，降低烟气排放对大气的污染，并且已经应用到了工业生产中，起到了良好的作用。

②烧结所产生的废气进行循环利用

对烧结工艺所产生的废气进行循环利用主要是通过收集风箱中的烟气，然后排放到烧结料层，这一方法能够有效减少烧结烟气的排放，烧结料层会吸收粉尘中硫的氧化物，分解掉废气中的有害气体如氮的氧化物，二恶茵等。而烟气中的 CO 可作为烧结的燃料，即达到了净化废气的目的又有效得减少了固体燃料碳的使用。目前，欧洲也将废气循环使用这一技术应用到了工业生产当中，通过实践发现这一技术能够降低高达 50% 的废气以及 45% 的粉尘。

③改善烧结末端处理技术

烧结末端处理技术是烧结废气排放之前最后的处理技术，通过末端处理技术能再次降低废气及粉尘的排放量。目前，欧洲所采用的末端处理技术是对烧结废气通过湿法进行净化，Airline 系统是湿法处理中较为有效的一种，并在工业生产中进行了实践应用，能够有效降低烟气的排放量。

欧洲通过采用改善烧结工序的方法来达到降低烟气排放的目的，而北美则采用了与欧洲完全相反的方法：取消烧结工序，不在使用烧结矿为高炉原材料。北美的高炉采用的原料 90% 为球团矿，然后加入部分废钢、球团粉末、铁氧化物废料以及一些转炉渣来进行高炉生产。

在废料排放方面，日本做的更为彻底。他们将原本需要排放的转炉粉尘进行处理，并且还收集了人们废弃的塑料进行处理，作为高炉的原材料进行使用，促进了高炉废

料的零排放。

## (2) 降低废气 CO<sub>2</sub> 的排放量

以煤为主的高炉炼铁过程是 CO<sub>2</sub> 排放的主要源头<sup>[7]</sup>，随着温室效应的日趋严重，降低 CO<sub>2</sub> 的排放以及引起了世界各国的重视，在德国，钢铁企业已经承诺将在 2012 年前比 1990 年降低 CO<sub>2</sub> 排放量 22%，在京都议定书中日本计划钢铁厂排放的 CO<sub>2</sub> 量比 1990 年减少 10.5%<sup>[8]</sup>。目前，西方国家在炼铁生产中采用的降低 CO<sub>2</sub> 排放的主要方法有两点：

### ① 增加废钢比

通过增加废钢在炼钢生产中所占的比例可以有效减少炼钢对铁水的要求，能有效降低炼铁生产中所排放的 CO<sub>2</sub>。而这一方法已经在欧洲各国得到了广泛的应用，并且对于减少 CO<sub>2</sub> 的排放有着明显的效果。

### ② 研发新技术减少 CO<sub>2</sub> 的排放

目前，世界各国都在积极研发减少 CO<sub>2</sub> 排放的新技术，而且有的国家已经取得了一定的成效：能够有效减少 50% 左右的 CO<sub>2</sub> 排放。而目前最为有研究意义并且相对其他减排方法较为容易实现的方法有：

- A. 回收高炉以及转炉渣的余热；
- B. 使用木炭作为高炉炼铁的原材料；
- C. 使用木炭、废弃塑料或废弃燃料作为高炉炼铁的喷吹物。

## (3) 延长高炉寿命

对于延长高炉寿命这一方面，北美和欧洲相对较为突出<sup>[9]</sup>。其中，北美改善了高炉的工艺和设备来延长高炉的使用寿命，主要方法有：

① 延长炉衬的使用寿命，主要方法是安装冷却器，对炉衬内部损坏区域通过喷补和压浆的方法进行修补，并使用了产自北美的优质焦炭和原材料，较大的提高了高炉炉衬的使用寿命；

② 对高炉炼铁的生产工艺进行改进，主要改进了其稳定性；

③ 对高炉的部分区域进行升级改造，其中包括对高炉实行改建或扩建以及出铁厂改建，选用更为优质的冷却系统、活动炉喉以及无钟炉顶，在材料使用方面选用了更为优质的耐火材料。

而欧洲在延长高炉使用寿命方面所采用的方法有：

① 采用先进的监测技术对炉缸内部进行监测，结合数学模型，监测炉缸内部炉衬的磨损状态。通过先进的监测技术可以提前预知炉衬的损坏情况及损坏部位，能及时有效的对炉衬进行修复，提高了炉衬的使用寿命；

② 对高炉炼铁的生产工艺进行改进，主要表现在工艺控制上，渣铁流动会对高炉炉缸造成损坏，所以应当选择较为合理的渣铁流动方式，以降低炉缸的磨损，既提高了高炉炉缸的使用寿命又节约了修复炉缸的成本，可谓是一举两得；

③对高炉内部炼铁所产生的气流控制其分布，使用更为优质的耐火材料和冷却能力更为突出的冷却系统，能有效降低高炉内部的磨损情况，同时，也对损坏部位进行及时的维修；

④设计更为优质耐用的炉缸：首先使用高性能微孔炭砖作为炉缸侧壁，能够使炉缸更快的冷却；然后采用陶瓷杯进行保护起来的不定型石墨做成的炉底，能有效扩大死铁层深度并提高冷却系统的强度，避免损坏。

#### (4)降低高炉燃料比

对于高炉炼铁而言，降低高炉的燃料比一直以来都是各个钢铁企业的目标。目前，欧洲高炉的燃料比最低可达 440kg/t，煤比最低达 210kg/t，焦比最低值可达到 220kg/t。目前，欧洲大多数钢铁企业都开始使用小焦进行高炉生产，而使用小焦也可以有效降低焦比。

相比于欧洲的钢铁企业普遍使用小焦来降低焦比，北美则通过喷吹不同类型的气体来降低燃料比。其中，喷吹物主要包括了：煤粉、天然气、焦炉煤气、焦粉，也有的钢铁企业采用喷吹混合物的方式，如：天然气+焦油、天然气+焦粉、天然气+煤粉。北美通过这种独特的喷吹方式来代替焦炭，以达到降低燃料比的目的。

根据 05 年调查显示，北美高炉燃料比构成分别为：油：11 kg/tHM，焦炉煤气：4 kg/tHM，焦炭：366 kg/tHM，煤比：53kg/tHM，焦油：5kg/tHM，小焦：27kg/tHM，天然气：15 kg/tHM。

#### (5)提高高炉产量达到高效

目前，随着高炉炉容越来越大，高炉越来越大型化，人们开始重视了高炉的高效性，期望提高高炉的利用率。在提高高炉利用率这一方面，日本目前做的较为突出。而日本的高炉炉容提升速度也最为快速，拥有多座炉容达 5000m<sup>3</sup> 以上的高炉，世界上最大高炉，炉容达 5775m<sup>3</sup> 的高炉也出自于日本。

相比于日本，欧洲自 1990 年以后，高炉的数量大为减少，但是炉容以及炉缸直径却增大了很多，高炉平均炉容达 2100m<sup>3</sup>，北美高炉的平均高炉容积为 1800m<sup>3</sup>。

提高高炉产量使之达到高效的另一方法是提高高炉的利用系数，目前，国外普遍采用提高高炉的富氧率的方法来提高高炉利用系数。为了保证高炉冶炼时能供应充足的氧气，大多数钢铁厂都在炼铁厂内建立了制氧设备来生产氧气。相比于北美，欧洲的富氧率更高，越为北美的两倍，高达 10%，生产率达 70 t/m<sup>2</sup>/d 甚至以上，而美国为了提高高炉的产量，采用的是将废铁和废钢直接还原后加入高炉中作为入炉燃料进行高炉冶炼，通过使用这一方法，美国的部分高炉的利用系数高达 4.0t/m<sup>3</sup> 甚至以上。

## 2 高炉炼铁成本影响因素分析

### 2.1 炉料结构

对于高炉冶炼(特别是大型高炉)的冶炼要求来说,炉料结构应当着力发展“精料”的方法,通过“精料”的方法来提提高炉炼铁的各个经济技术指标,从而达到降低高炉炼铁生产成本的要求<sup>[10]</sup>。

高炉炉料结构的“精料”方法具有三个核心的要求:第一是降低渣比,提高矿石品位;第二是必须具有良好的冶金性能以及优越的冷、熟态指标;第三是炼铁原料中的有害成份例如 S、P、K、Na、等含量应当较低<sup>[11]</sup>。从国内外高炉发展状况来看,有主要两个方面可以实现高炉炉料的精料:一是通过购买质量较好品味较高的铁矿石,提高高炉入炉料的品味,上海的宝钢就是利用的这种提高入炉矿石品味的方法,通过系统分析上来看,这是在我国比较科学可行并且合理的方法,也适用于我国的绝大多数钢铁企业;二是购买成本相对较低的劣质低品味矿石,但是这一方法需要有很好的劣质原材料料的使用技术进行支持,以免因为炉料品味和质量的降低对高炉的顺行形成影响。在适用劣质低品位矿石方面,日本就做得很好,而且日本的劣质原材料料的使用技术在全世界都处于较为领先的水平,所以日本的钢铁企业大多会采用这种适用劣质低品位矿石的方法来降低高炉炼铁的生产成本。对于我国的国内钢铁企业而言,应当根据自身的企业条件合理的选用“精料”方法,对于我国绝大部分钢铁企业来说,选择购买高品位矿石相比于购买低品位矿石更加有利于企业的发展,因为目前我国的绝大部分钢铁企业都还没有劣质低品位原材料的使用技术,所以在使用劣质低品位的原材料时难度相对较大,往往会得不偿失,从降低冶炼成本来说选择第一种方法会更为合理。但是不管我国钢铁企业会选择哪种“精料”之路,进入高炉的炉料(烧结矿、球团矿)都必须要保证具有较高的品味,所以应当在炉料进入高炉之前进行一定的技术处理,争取尽量提高高炉的入炉料得品味。目前对于我国国内的钢铁企业而言,应当根据自身企业条件所掌握的技术合理的选择高炉炉料的“精料”方案,同时,也应当加快对劣质低品位原料使用技术的研究与开发,以达到降低炉料结构成本的目的。

### 2.2 高炉燃料

要保证高炉炼铁的稳定顺行,高炉中的燃料焦炭是降低消耗的关键。高炉中焦炭具有四个作用<sup>[11]</sup>:一是高炉炼铁的热量来源(发热剂);二是具有还原作用;三是具有渗碳作用;四是高炉炉料的骨架作用。其中最主要的三大作用是:骨架作用和发热剂(及热量来源)以及产生还原气体 CO 的还原作用。对于大型高炉而言,对于焦炭的冷热态性能具有较高的要求,良好的焦炭质量也是保证高炉能够稳定顺行的基础<sup>[12]</sup>。高炉中的另一燃料煤粉可以替代焦炭的发热作用和还原作用,但对煤粉有着一定

的要求,包括高含量的固定碳、低灰份、低 S 量以及很高的可磨性指数,只有达到这些要求才能保证喷吹煤粉的高置换比以及带入较低含量的有害元素。

降低焦炭成本可以通过采购质量差的劣质煤或减少配煤中的焦煤比例来实现,但如果使焦炭质量降低,无法保证高炉的稳定顺行,不仅不会降低高炉综合成本,反而会使成本增加。对于这个问题,目前也有着与炉料结构一样的两种解决方案:一是宝钢模式——精料方针,可以抓住当前煤碳资源大幅降价的机遇,采购优质煤,增加炼焦配煤中优质焦煤比例、提高焦炭质量,确保高炉稳定顺行、指标提高,从而降低高炉生产的系统成本;二是日本模式——有劣质煤炼焦技术支撑,采购价格更低的劣质煤来炼焦,但能够保证焦炭质量,满足高炉对焦炭的要求,这对焦化的要求很高<sup>[13]</sup>。

目前,大多数国内钢铁企业消化劣质原燃料的技术水平不够,采用“宝钢模式”的原燃料结构是相对合理的,对于降低高炉系统成本是有利的。不过就长远来说,世界性资源、能源的紧张很难缓解,日本模式是发展的必然道路,宝钢早就开始了消化劣质原燃料方面的技术攻关工作,增加技术储备,向日本模式发展,这是高炉炼铁发展的方向。大力节能降耗,发展循环经济,并提出着力提高单炉产量、降低燃料比(高风温、大量喷吹煤粉等措施)、环境友好和实现精料等为促进中国高炉炼铁技术科学发展的主要途径<sup>[14]</sup>。

总起来说,无论采购什么样的配煤结构,确保焦炭和喷吹煤粉满足高炉要求这个核心是不能动摇的,劣质原燃料使用技术要加大开发力度,在拥有了这种技术的前提下可以通过大量使用劣质原燃料来进一步降低高炉生产成本。

### 2.3 高炉设备及操作

随着原燃料条件的变化和高炉炼铁的发展,高炉操作也碰到了一些新的问题,目前比较突出的主要有如下几个方面:

(1)“善待高炉与高炉自强”科学理念的确立,是高炉高效冶炼的前提。

(2)高炉的稳定顺行和指标优化是高炉工作者的永恒课题,既要维持好高炉顺行,又要克服求稳怕乱的思想,积极探索降低消耗的途径。

(3)大型高炉先进操作理念的确立:“顺行为基础,充沛活跃的炉缸为核心,全风为生命线”的先进操作理念如何理解与推进。

(4)如何应对市场资源短缺造成原燃料质量下滑的问题。如何建立高炉应对机制和技术支撑体系。

(5)在高炉日益大型化、自动化、信息化的模式下如何建立高效的高炉管理体系、高炉专家系统的理解与应用。应当正确理解高炉专家系统的作用,高炉专家系统以实现自动化、标准化操作为目的,是进行过程控制、纠正偏差和技术开发的工具、平台,是提高判断和决策效率的工具。目前高炉专家系统的应用不理想,主要“人”的使用、维护不到位,专家系统推广应用的关键就是“人”的应用、维护和完善<sup>[15]</sup>。

(6)开发劣质原燃料的使用技术(即原燃料处理技术的开发),确保精料方针不变。

高炉炼铁的炉料有铁矿石,燃料,熔剂,鼓风等,炼铁原料一直都是高炉生产的基础。所谓“七分原料,三分操作”或者“四分原料,三分设备,三分操作<sup>[16]</sup>”都说明了原料在高炉炼铁中起着的重要作用,有专家在总结我国炼铁的技术进步和生产指标的改善时说:70%得益于炉料质量的改善。因此寻求更为合理的炉料结构和提高原料质量仍然是当今炼铁工作者的重要任务<sup>[17]</sup>。

### 3 配料计算

#### 3.1 原始原料

- (1) 混合矿石成分;
- (2) 燃料用量及成分;
- (3) Fe、Mn、P 等元素分配率;
- (4) 生铁中[Si]、[S]成分的含量。

##### 3.1.1 混合矿石成分

表 3.1 混合矿石成分

Fe	Mn	P	S	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO <sub>2</sub>	MnO	CaO
56.03	0.102	0.045	0.046	69.99	8.96	0.03	0.02	8.99
MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	FeS <sub>2</sub>	FeS	烧损 CO <sub>2</sub>	合计	用量
2.40	6.94	1.29	0.11	0.03	0.08	1.16	100	

##### 3.1.2 燃料成分及用量

- (1) 焦炭成分

表 3.2 焦炭成分

C <sub>固</sub>	灰分 (12.17)							挥发分	有机物	合计	全 S	H <sub>2</sub> O
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	FeO	FeS	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>					
85.63	5.65	4.83	0.76	0.12	0.75	0.05	0.01	0.90	1.30	100.0	0.52	4.8

表 3.3 挥发分及有机物成分与含量

成分	挥发分					有机物		
	CO <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	S
含量%	0.33	0.33	0.03	0.06	0.15	0.40	0.40	0.5

- (2) 煤粉成分

表 3.4 煤粉成分

C	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	S	灰分				
						SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	FeO
77.48	4.35	4.05	0.79	0.42	0.66	7.48	3.42	0.60	0.30	0.45

##### 3.1.3 熔剂成分 (石灰石)

表 3.5 熔剂成分

成分	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	合计	成本
含量	54.11	1.16	0.80	0.13	43.80	100	

### 3.2 各已知参数

#### (1) 各元素分配率

表 3.6 元素分配率

元素	Fe	Mn	P	S
生铁	0.997	0.5	1.0	
炉渣	0.003	0.5	-	
煤气	-	-	-	0.06

#### (2) 已知生铁成分

表 3.7 已知生铁成分

成分	Si	Mn	S	P	C	Fe	合计
%	0.35		0.03			95.00	100

#### (3) 未知数设定

表 3.8 未知数设定

铁矿石加入量 kg	铁矿石用量 kg/t	焦炭用量 kg
$M_{ore}$	$M_{矿}$	$M_{焦炭}$
煤粉用量 kg	焦比 kg/t	煤比 kg/t
$M_{煤粉}$	K	M

### 3.3 炼铁计算

#### 1. 铁矿石用量

$$M_{生铁总量} = [M_{ore} \times \omega[Fe]_{矿} + M_{焦炭} \times \omega[Fe]_K + M_{煤粉} \times \omega[Fe]_M] \times 0.997$$

$$M_{矿} = \frac{M_{ore}}{M_{生铁总量}} \times 1000$$

由于加入高炉的原材料，铁矿石和焦炭都会有一定的损耗，铁矿石的机械损伤一般为 0.5%，水分损失为 0；焦炭的机械损伤为 0.5%，水分损失为 4.8%；煤粉机械损失和水分损失为 0。所以铁矿石和焦炭的实际用量应大于干料用量。因此可以列出每吨生铁炉料实际用量表。



表 3.9 每吨生铁炉料实际用量表

名称	干料用量	机械损失%	水分%	实际用量
铁矿石	$0.995 \times M_{\text{矿}}$	0.5		$M_{\text{矿}}$
焦炭	$0.947 \times K$	0.5	4.8	$K$
煤粉	$M$			$M$
共计				

## 2. 生铁成分核算

$$\omega[Fe]_{\text{铁}} = 95\%$$

$$\omega[P]_{\text{铁}} = \left[ M_{\text{矿}} \times \omega[P]_{\text{矿}} + K \times \omega[P]_K + M \times \omega[P_2O_5]_M \times \frac{62}{142} \right] \times 10^{-3}$$

$$\omega[Mn]_{\text{铁}} = M_{\text{矿}} \times \omega[Mn]_{\text{矿}} \times 0.5 \times 10^{-3}$$

$$\omega[Si]_{\text{铁}} = 0.35\%$$

$$\omega[S]_{\text{铁}} = 0.03\%$$

$$\omega[C]_{\text{铁}} = 100\% - \omega[Fe]_{\text{铁}} - \omega[P]_{\text{铁}} - \omega[Mn]_{\text{铁}} - \omega[Si]_{\text{铁}} - \omega[S]_{\text{铁}}$$

根据以上公式进行编程计算，可得出生铁成分计算结果。

## 3. 碱度计算

$$(1) \text{矿石、燃料带入的 CaO 量为: } M_{\text{矿}} \times \omega[CaO]_{\text{矿}} + K \times \omega[CaO]_K + M \times \omega[CaO]_M$$

矿石、燃料带入的  $SiO_2$  量（扣除还原 Si 消耗的）:

$$M_{\text{矿}} \times \omega[SiO_2]_{\text{矿}} + K \times \omega[SiO_2]_K + M \times \omega[SiO_2]_M - 10^3 \times \omega[Si]_{\text{铁}} \times \frac{60}{28}$$

(2) 石灰石有效熔剂性

$$CaO_{\text{有效}} = \omega[CaO]_{\text{溶}} - R \times \omega[SiO_2]_{\text{溶}}$$

(3) 石灰石用量范围计算（碱度范围 0.95~1.2）

$$\phi = \frac{\left( M_{\text{矿}} \times \omega[SiO_2]_{\text{矿}} + K \times \omega[SiO_2]_K + M \times \omega[SiO_2]_M - 10^3 \times \omega[Si]_{\text{铁}} \times \frac{60}{28} \right) \times R}{CaO_{\text{有效}}}$$

$$\frac{M_{\text{矿}} \times \omega[CaO]_{\text{矿}} + K \times \omega[CaO]_K + M \times \omega[CaO]_M}{CaO_{\text{有效}}}$$

当  $R=0.95$  时  $CaO_{\text{有效}}=53.35\%$ ， $\Phi$  有最小值， $R=1.2$  时  $CaO_{\text{有效}}=53.15\%$ ， $\Phi$  有最大值。

$$\phi_{\min} = \frac{\left( M_{\text{碎}} \times \omega[\text{SiO}_2]_{\text{碎}} + K \times \omega[\text{SiO}_2]_{\text{K}} + M \times \omega[\text{SiO}_2]_{\text{M}} - 10^3 \times \omega[\text{Si}]_{\text{铁}} \times \frac{60}{28} \right) \times R}{53.35\%} - \frac{M_{\text{碎}} \times \omega[\text{CaO}]_{\text{碎}} + K \times \omega[\text{CaO}]_{\text{K}} + M \times \omega[\text{CaO}]_{\text{M}}}{53.35\%}$$

$$\Phi_{\min} = [(M_{\text{碎}} \times 6.94\% + K \times 5.65\% + M \times 7.48\% - 1000 \times 0.35\% \times \frac{60}{28}) \times 0.95 - (M_{\text{碎}} \times 8.99\% + K \times 0.76\% + M \times 0.60\%)] / 53.35\% =$$

$$\phi_{\max} = \frac{\left( M_{\text{碎}} \times \omega[\text{SiO}_2]_{\text{碎}} + K \times \omega[\text{SiO}_2]_{\text{K}} + M \times \omega[\text{SiO}_2]_{\text{M}} - 10^3 \times \omega[\text{Si}]_{\text{铁}} \times \frac{60}{28} \right) \times R}{53.15\%} - \frac{M_{\text{碎}} \times \omega[\text{CaO}]_{\text{碎}} + K \times \omega[\text{CaO}]_{\text{K}} + M \times \omega[\text{CaO}]_{\text{M}}}{53.15\%}$$

$$\Phi_{\max} = [(M_{\text{碎}} \times 6.94\% + K \times 5.65\% + M \times 7.48\% - 1000 \times 0.35\% \times \frac{60}{28}) \times 1.2 - (M_{\text{碎}} \times 8.99\% + K \times 0.76\% + M \times 0.60\%)] / 53.15\%$$

#### 4 终渣成分

##### (1) 含 S 量

$$\text{炉料含 S 量: } m(S)_{\text{炉料}} = M_{\text{碎}} \times \omega[S]_{\text{碎}} + K \times \omega[\text{全S}]_{\text{K}} + M \times \omega[S]_{\text{M}}$$

$$\text{生铁含 S 量: } m(S)_{\text{铁}} = 1000 \times \omega[S]_{\text{铁}}$$

$$\text{进入煤气的 S 量: } m(S)_{\text{煤气}} = [M_{\text{碎}} \times \omega[S]_{\text{碎}} + K \times \omega[\text{全S}]_{\text{K}} + M \times \omega[S]_{\text{M}}] \times 0.06$$

进入炉渣的 S 量:

$$m(S)_{\text{渣}} = m(S)_{\text{炉料}} - m(S)_{\text{煤气}} - m(S)_{\text{铁}} = [M_{\text{碎}} \times \omega[S]_{\text{碎}} + K \times \omega[\text{全S}]_{\text{K}} + M \times \omega[S]_{\text{M}}] \times 0.94 - \omega[S]_{\text{铁}}$$

$$(2) \text{ 终渣 FeO 量: } m(\text{FeO})_{\text{渣}} = M_{\text{碎}} \times \omega[\text{Fe}]_{\text{碎}} \times \frac{0.003}{0.997} \times \frac{72}{56}$$

$$(3) \text{ 终渣 MnO 量: } m(\text{MnO})_{\text{渣}} = M_{\text{碎}} \times \omega[\text{MnO}]_{\text{碎}} \times 0.5 \times \frac{71}{55}$$

(4) 终渣 SiO<sub>2</sub> 量:

$$m(\text{SiO}_2)_{\text{渣}} = M_{\text{碎}} \times \omega[\text{SiO}_2]_{\text{碎}} + K \times \omega[\text{SiO}_2]_{\text{K}} + M \times \omega[\text{SiO}_2]_{\text{M}} - 1000 \times \omega[\text{Si}]_{\text{铁}} \times \frac{60}{28} + \phi \times \omega[\text{Si}]$$

(5) 终渣 CaO 量:

$$m(\text{CaO})_{\text{渣}} = M_{\text{碎}} \times \omega[\text{CaO}]_{\text{碎}} + K \times \omega[\text{CaO}]_{\text{K}} + M \times \omega[\text{CaO}]_{\text{M}} + \phi \times \omega[\text{CaO}]_{\text{溶}}$$

(6) 终渣 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 量:

$$m(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{渣}} = M_{\text{碎}} \times \omega[\text{Al}_2\text{O}_3]_{\text{碎}} + K \times \omega[\text{Al}_2\text{O}_3]_{\text{K}} + M \times \omega[\text{Al}_2\text{O}_3]_{\text{M}} + \phi \times \omega[\text{Al}_2\text{O}_3]_{\text{溶}}$$

(7) 终渣 MgO 量:

$$m(MgO)_{\text{渣}} = M_{\text{矿}} \times \omega[MgO]_{\text{矿}} + K \times \omega[MgO]_K + M \times \omega[MgO]_M + \phi \times \omega[MgO]_{\text{溶}}$$

炉渣总量为:

$$m_{\text{渣总量}} = m(S)_{\text{渣}} + m(FeO)_{\text{渣}} + m(MnO)_{\text{渣}} + m(SiO_2)_{\text{渣}} + m(CaO)_{\text{渣}} + m(Al_2O_3)_{\text{渣}} + m(MgO)_{\text{渣}}$$

根据以上计算公式进行编程，可计算得出终渣成分及碱度。

## 4 物料平衡计算

### 4.1 已知参数

- 1) 原料全分析并校正为 100%;
- 2) 生铁全分析;
- 3) 各种原料消耗量;
- 4) 鼓风湿度;  
鼓风湿度  $f=1.5\%$ , 即  $1.2\text{g}/\text{m}^3$ 。
- 5) 选择直接还原度或煤气成分  
直接还原度  $r_d=4.5$ 。
- 6) 假定焦炭和喷吹物含 C 总量的 1.2% 与  $\text{H}_2$  反应生成  $\text{CH}_4$ 。

### 4.2 风量计算

#### 4.2.1 风口前燃烧的碳量 C 风

根据碳平衡得:

$$m(\text{C})_{\text{风}} = \sum m(\text{C})_{\text{燃}} - \omega[\text{C}]_{\text{铁}} \times 10^3 - \sum m(\text{C})_{\text{直}} - m(\text{C})_{\text{CH}_4}$$

式中  $m(\text{C})_{\text{风}}$  —— 风口前燃烧的 C 量, kg;

$\sum m(\text{C})_{\text{燃}}$ ,  $\sum m(\text{C})_{\text{直}}$ ,  $m(\text{C})_{\text{CH}_4}$  —— 分别为燃烧带入 C 量, 直接还原耗 C 和生成  $\text{CH}_4$  的 C 量, kg;

$\omega[\text{C}]_{\text{铁}}$  —— 生铁含 C 量, %。

燃料带入固定碳  $\sum m(\text{C})_{\text{燃}} = K \times 85.63\% + M \times 77.48\%$

溶于生铁的碳  $= 1000 \times \omega[\text{C}]_{\text{铁}} = m(\text{C})_K + m(\text{C})_M =$

直接还原耗碳

$$\begin{aligned} \sum m(\text{C})_{\text{直}} &= m(\text{C})_{\text{Mn}} + m(\text{C})_{\text{Si}} + m(\text{C})_{\text{P}} + m(\text{C})_{\text{Fe}} \\ &= 1000 \times \left( \omega[\text{Mn}]_{\text{铁}} \times \frac{12}{55} + \omega[\text{Si}]_{\text{铁}} \times \frac{24}{28} + \omega[\text{P}]_{\text{铁}} \times \frac{60}{62} + \omega[\text{Fe}]_{\text{铁}} \times r_d \times \frac{12}{56} \right) \end{aligned}$$

生成  $\text{CH}_4$  耗碳:  $m(\text{C})_{\text{CH}_4} = \sum m(\text{C})_{\text{燃}} \times 0.012$

则风口前燃烧的 C 量:

$$m(C)_{\text{风}} = \sum m(C)_{\text{燃}} - \omega[C]_{\text{铁}} \times 10^3 - \sum m(C)_{\text{直}} - m(C)_{\text{CH}_4}$$

$$C \text{ 在风口前的燃烧率: } c'_{\text{风}} = \frac{m(C)_{\text{风}}}{\sum m(C)_{\text{燃}}}$$

#### 4.2.2 风量计算

$$\text{根据氧平衡可得 (V}_{\text{风}}): V_{\text{风}} = \frac{\sum m(C)_{\text{燃}} \times c'_{\text{风}} \times 0.933 - Q_{O_2}}{0.21 + 0.29f}$$

其中

风口前燃烧的 C 所需氧量 ( $m^3$ ) 为:

$$\sum m(C)_{\text{燃}} \times c'_{\text{风}} \times 0.933 = m(C)_{\text{风}} \times 0.933 \quad (\sum m(C)_{\text{燃}} \text{ 为燃料带入 C 量, } c'_{\text{风}} \text{ 为 C}$$

在风口前的燃烧率)

燃料带人氧量:

$$Q_{O_2} = \left[ V(O)_{\text{煤}} + \frac{16}{18} \times V(H_2O)_{\text{煤}} \right] \times \frac{22.4}{32} = M \times \left( \omega[O_2]_{\text{煤}} + \frac{16}{18} \times \omega[H_2O] \right) \times \frac{22.4}{32}$$

$$\text{鼓风含氧浓度为: } 0.21 + 0.29f = 0.21 + 0.29 \times 0.015 = 0.2144$$

$$\text{每吨生铁鼓风量: } V_{\text{风}} = \frac{m(C)_{\text{风}} \times 0.933 - Q_{O_2}}{0.2144}$$

#### 4.2.3 煤气成分及数量计算

(1) 甲烷

$$\text{CH}_4 \text{ 由燃料中 C 生成 CH}_4 \text{ 量: } V(CH_4)_C = m(C)_{\text{CH}_4} \times \frac{22.4}{12}$$

$$\text{焦炭挥发含 CH}_4 \text{ 量: } V(CH_4)_K = K \times V(CH_4)_K \times \frac{22.4}{16}$$

$$\text{进入煤气的 CH}_4 \text{ 量: } V(CH_4)_{\text{煤气}} = V(CH_4)_C + V(CH_4)_K$$

(2) 氢气

入炉总  $H_2$  量 = 鼓风带入  $H_2$  + 焦炭带入  $H_2$  + 煤粉带入  $H_2$

$$\text{即 } V(H_2)_{\text{总量}} = V_{\text{风}} \times f + (K \times \omega[H_2]_K + M \times \omega[H_2]_M)$$

设在喷吹条件下有 40% 的  $H_2$  参加还原。则参加还原的  $H_2$  量为:

$$V(H_2)_{\text{还原}} = V(H_2)_{\text{总量}} \times 40\%$$

$$\text{生成 } CH_4 \text{ 的 } H_2 \text{ 量: } V(H_2)_{CH_4} = V(CH_4)_C \times 2 = m(C)_{CH_4} \times \frac{22.4}{12} \times 2$$

$$\text{进入煤气的 } H_2 \text{ 量: } V(H_2)_{\text{煤气}} = V(H_2)_{\text{总量}} - V(H_2)_{\text{还原}} - V(H_2)_{CH_4}$$

$$r_{i_{H_2}} = \frac{V(H_2)_{\text{还原}} \times \frac{2}{3} \times \frac{56}{22.4}}{m_{\text{铁}} \times \omega[Fe]_{\text{铁}}} \times 100\% = \frac{V(H_2)_{\text{还原}} \times \frac{56}{33.6}}{950} \times 100\% \quad (\text{假定用 } H_2 \text{ 还原的铁氧化物中, } 1/3 \text{ 是用于还原 } Fe_3O_4, 2/3 \text{ 是用于还原 } FeO)$$

(3) 二氧化碳

$$\text{由 } Fe_2O_3 \rightarrow FeO \text{ 生成的 } CO_2 \text{ 量: } V_1 = M_{\text{矿}} \times \omega[Fe_2O_3]_{\text{矿}} \times \frac{22.4}{160}$$

$$\text{由 } FeO \rightarrow Fe \text{ 生成的 } CO_2 \text{ 量: } V_2 = 1000 \times \omega[Fe]_{\text{铁}} \times (1.0 - r_d - r_{i_{H_2}}) \times \frac{22.4}{56}$$

$$\text{由 } MnO_2 \rightarrow MnO \text{ 生成的 } CO_2 \text{ 量: } V_3 = M_{\text{矿}} \times \omega[MnO_2]_{\text{矿}} \times \frac{22.4}{87}$$

另外,  $H_2$  中参加还原反应与同体积  $CO$  所参加的反应相当, 所以  $CO_2$  生成量中应减去参加还原反应  $H_2$  量, 间接还原生成  $CO_2$  量为:

$$V(CO_2)_{\text{间接还原}} = V_1 + V_2 + V_3 - V(H_2)_{\text{还原}}$$

各种炉料分解或带入的  $CO_2$  量:

$$V_4 = V(CO_2)_K + V(CO_2)_{\text{矿}} = K \times \omega[CO_2]_K \times \frac{22.4}{44} + M_{\text{矿}} \times \omega[CO_2]_{\text{矿}} \times \frac{22.4}{44}$$

$$\text{煤气中总 } CO_2 \text{ 量: } V(CO_2)_{\text{总量}} = V(CO_2)_{\text{间接还原}} + V_4$$

(4) 一氧化碳

$$\text{CO 风口前碳燃烧生成 } CO \text{ 量: } V(CO)_{\text{风口}} = m(C)_{\text{风}} \times \frac{22.4}{12}$$

$$\text{元素直接还原生成 } CO \text{ 量: } V(CO)_{\text{直}} = \sum m(C)_{\text{直}} \times \frac{22.4}{12}$$

$$\text{焦炭挥发分中 } CO \text{ 量: } V(CO)_K = K \times \omega[CO]_K \times \frac{22.4}{12}$$

$$\text{间接还原消耗 } CO \text{ 量: } V(CO)_{\text{间接还原}} = V(CO_2)_{\text{间接还原}}$$

$$\text{煤气中总 } CO \text{ 量: } V(CO)_{\text{总量}} = V(CO)_{\text{风口}} + V(CO)_{\text{直}} + V(CO)_K - V(CO)_{\text{间接还原}}$$

(5) 氮气

氮气由鼓风、焦炭及煤粉带入, 总量为:

$$V(N_2)_{\text{总量}} = V_{\text{风}} \times (1-f) \times 0.79 + K \times \omega[N_2]_K \times \frac{22.4}{28} + M \times \omega[N_2]_M \times \frac{22.4}{28}$$

煤气总量为:

$$V_{\text{煤气总量}} = V(CH_4)_{\text{煤气}} + V(H_2)_{\text{煤气}} + V(CO_2)_{\text{总量}} + V(CO)_{\text{总量}} + V(N_2)_{\text{总量}}$$

根据以上计算方法, 通过编程可计算出煤气组成。

#### 4.2.4 编制物料平衡表

(1) 鼓风量计算:

$$\begin{aligned} 1m^3 \text{鼓风质量} &= 1m^3 \text{氧气质量} + 1m^3 \text{氮气质量} + 1m^3 \text{水的质量} \\ &= \frac{0.21 \times 0.985 \times 32 + 0.79 \times 0.985 \times 28 + 0.015 \times 18}{22.4} \\ &= 1.28(kg/m^3) \end{aligned}$$

$$\text{全部鼓风质量: } m_{\text{鼓风}} = V_{\text{风}} \times 12.8$$

(2) 煤气质量计算:

1m<sup>3</sup> 煤气质量:

$$\begin{aligned} m_{1m^3 \text{煤气}} &= 1m^3 \text{甲烷质量} + 1m^3 \text{氢气质量} + 1m^3 \text{二氧化碳质量} + 1m^3 \text{一氧化碳质量} + 1m^3 \text{氮气质量} \\ &= \frac{V(CH_4)_{\text{煤气}} \times 16 + V(H_2)_{\text{煤气}} \times 2 + V(CO_2)_{\text{总量}} \times 44 + V(CO)_{\text{总量}} \times 28 + V(N_2)_{\text{总量}} \times 28}{V_{\text{鼓风}} \times 22.4} \end{aligned}$$

$$\text{全部煤气质量: } m_{\text{煤气}} = V_{\text{煤气}} \times m_{1m^3 \text{煤气质量}}$$

(3) 水分计算:

$$\text{焦炭带入水分: } m(H_2O)_K = K \times \omega[H_2O]_K$$

$$\text{煤粉带入水分: } m(H_2O)_M = M \times \omega[H_2O]_M$$

$$\text{H}_2 \text{还原水分: } m(H_2O)_{\text{还原}} = V(H_2)_{\text{还原}} \times \frac{18}{22.4}$$

$$\text{水分总质量: } m(H_2O)_{\text{总量}} = K \times \omega[H_2O]_K + M \times \omega[H_2O]_M + V(H_2)_{\text{还原}} \times \frac{18}{22.4}$$

根据以上计算方法, 编程后可编制出物料平衡表。

## 5 热平衡计算

### 5.1 热量收入

已知的原始条件:

鼓风温度 1100℃; 炉顶温度 200℃; 入炉矿石温度 80℃。

(1) 碳的氧化热

由碳氧化生成 1m<sup>3</sup> 的 CO<sub>2</sub> 放热为:  $Q_1 = \frac{33410.66}{22.4} \times 12 = 17898.57(kJ/m^3)$

由碳氧化生成 1m<sup>3</sup> 的 CO 放热为:  $Q_2 = \frac{9797.11}{22.4} \times 12 = 5248.45(kJ/m^3)$

碳的氧化热为:  $Q_{C氧化热} = Q_1 \times V(CO_2)_{间接还原} + Q_2 \times (V(CO)_{总量} - V(CO)_K)$

(2) 热风带入热

1100℃ 的干空气和水蒸气比热容分别为  $c_{空气} = 1.426kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$  及

$c_{水蒸气} = 1.742kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$

热风带入热:  $Q_{热风} = (V_{风} \times (1-\varphi) \times c_{空气} + V_{风} \times \varphi \times c_{水蒸气}) \times T_{鼓风}$

其中:

$V_{风}$  为每吨生铁鼓风量

$\varphi$  为鼓风湿度

$c_{空气}$  为干空气的比热容

$c_{水蒸气}$  为水蒸气的比热容

(3) 成渣热

炉料中 CaO 及 MnO 以碳酸盐形式存在, 在高炉中生成钙铝硅酸盐时, 1kg 放出 1130.49kJ 的热量。

铁矿石中的 CaO 含量为:  $m(CaO)_{矿} = m_{矿} \times \omega(CO_2)_{烧损} \times \frac{56}{44}$

$\omega[CO_2]_{烧损}$  表示铁矿石中得 CO<sub>2</sub> 烧损含量。

成渣热:  $Q_{成渣热} = m(CaO)_{矿} \times 1130.49$

(4) 铁矿石带入物理热

铁矿石带入的物理热为:  $Q_{物理热} = m_{矿} \times c_{矿} \times T_{矿} = m_{矿} \times 1.0 \times 80$



其中： $c_{\text{矿}}$ 表示矿石在80℃时的比热容为1.0kJ/(kg·℃)  
 $T_{\text{矿}}$ 表示矿石温度为80℃

(5) H<sub>2</sub> 氧化放热

H<sub>2</sub> 氧化热为： $Q_{H_2\text{氧化热}} = V(H_2)_{\text{还原}} \times c_{H_2}$

其中： $V(H_2)_{\text{还原}}$ 表示H<sub>2</sub>氧化量

$c_{H_2}$ 表示1m<sup>3</sup>H<sub>2</sub>氧化成H<sub>2</sub>O放热

(6) CH<sub>4</sub> 生成热

1kgCH<sub>4</sub> 生成热为： $c_{CH_4} = \frac{77874.4}{16} = 4867.15(kJ)$

CH<sub>4</sub> 生成热为： $Q_{CH_4\text{生成热}} = V(CH_4)_C \times \frac{16}{22.4} \times c_{CH_4}$

其中： $V(CH_4)_C$ 表示燃料中C生成CH<sub>4</sub>量

冶炼 1t 生铁的总热量为：

$$Q_{\text{总收}} = Q_{C\text{氧化热}} + Q_{\text{热风}} + Q_{\text{成渣热}} + Q_{\text{物理热}} + Q_{H_2\text{氧化热}} + Q_{CH_4\text{生成热}}$$

## 5.2 热量支出

### 5.2.1 氧化物分解与脱硫

(1) 铁氧化物分解热：设焦炭和煤粉当中的 FeO 以硅酸铁的形式存在着，铁矿石中有 20%FeO 以硅酸铁形态存在，其余以 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 形态存在。

$$m(FeO)_{\text{总硅酸铁}} = m_{\text{矿}} \times \omega[FeO]_{\text{矿}} \times 20\% + K \times \omega[FeO]_K + M \times \omega[FeO]_M \text{ 去除渣}$$

中的 FeO， $m(FeO)_{\text{渣}}$ ，它也以硅酸铁的形式存在。

余下的 FeO 含量为： $m(FeO)_{\text{硅酸铁}} = m(FeO)_{\text{总硅酸铁}} - m(FeO)_{\text{渣}}$

$$m(FeO)_{\text{四氧化三铁}} = m_{\text{矿}} \times \omega[FeO]_{\text{矿}} - m_{\text{矿}} \times \omega[FeO]_{\text{矿}} \times 20\%$$

$$m(Fe_2O_3)_{\text{四氧化三铁}} = m(FeO)_{\text{四氧化三铁}} \times \frac{160}{72}$$

$$m(Fe_2O_3)_{\text{自由}} = m_{\text{矿}} \times \omega[Fe_2O_3]_{\text{矿}} - m(Fe_2O_3)_{\text{四氧化三铁}}$$

根据 1kg 铁氧化物分解热，可以算出总的分解热。

$$Q(FeO)_{\text{硅酸铁分解热}} = m(FeO)_{\text{硅酸铁}} \times q_{FeO\text{硅酸铁}} = m(FeO)_{\text{硅酸铁}} \times 4075.21$$

$$\begin{aligned} Q_{(Fe_3O_4)_{\text{分解热}}} &= (m_{(FeO)_{\text{四氧化三铁}}} + m_{(Fe_2O_3)_{\text{四氧化三铁}}}) \times q_{Fe_3O_4} \\ &= (m_{(FeO)_{\text{四氧化三铁}}} + m_{(Fe_2O_3)_{\text{四氧化三铁}}}) \times 4799.98 \end{aligned}$$

$$Q_{(Fe_2O_3)_{\text{分解热}}} = m_{(Fe_2O_3)_{\text{自由}}} \times q_{Fe_2O_3} = m_{(Fe_2O_3)_{\text{自由}}} \times 5152.94$$

以上式中:

$q_{FeO_{\text{硅酸铁}}}$ 、 $q_{Fe_3O_4}$ 、 $q_{Fe_2O_3}$  分别表示分 FeO 硅酸铁、 $Fe_3O_4$ 、 $Fe_2O_3$  单位质量的分解热, 并分别为  $4075.21\text{kJ}/(\text{kgFeO}_{\text{硅酸铁}})$ 、 $4799.98\text{kJ}/(\text{kgFe}_3\text{O}_4)$ 、 $5152.94\text{kJ}/(\text{kgFe}_2\text{O}_3)$ 。

$$Q_{\text{铁氧化物总分解热}} = Q_{(FeO)_{\text{硅酸铁分解热}}} + Q_{(Fe_3O_4)_{\text{分解热}}} + Q_{(Fe_2O_3)_{\text{分解热}}}$$

(2) 锰氧化物分解热

$MnO_2 \rightarrow MnO$  的分解热为:

$$Q_{MnO_2 \rightarrow MnO} = m_{\text{矿}} \times \omega[MnO_2]_{\text{矿}} \times q_{MnO_2} = m_{\text{矿}} \times \omega[MnO_2]_{\text{矿}} \times 2629.44$$

式中:  $q_{MnO_2}$  表示单位质量  $MnO_2$  的分解热为  $2629.44\text{kJ}/(\text{kgMnO}_2)$ 。

$MnO \rightarrow Mn$  的分解热为:

$$Q_{MnO \rightarrow Mn} = 1000 \times \omega[Mn]_{\text{铁}} \times q_{MnO} = 1000 \times \omega[Mn]_{\text{铁}} \times 7362.84$$

式中:  $q_{MnO}$  表示单位质量  $MnO$  的分解热为  $7362.84\text{kJ}/(\text{kgMn})$ 。

锰氧化物分解总热为:  $Q_{\text{锰氧化物分解热}} = Q_{MnO_2 \rightarrow MnO} + Q_{MnO \rightarrow Mn}$

(3)  $SiO_2$  分解热

$SiO_2$  分解热为:

$$Q_{SiO_2 \text{分解热}} = 1000 \times \omega[SiO_2]_{\text{铁}} \times q_{SiO_2} = 1000 \times \omega[SiO_2]_{\text{铁}} \times 30288.76$$

式中:  $q_{SiO_2}$  表示单位质量  $SiO_2$  的分解热, 为  $30288.76\text{kJ}/(\text{kgSi})$ 。

(4)  $Ca_3(PO_4)_2$  分解热

$Ca_3(PO_4)_2$  的分解热为:

$$Q_{Ca_3(PO_4)_2 \text{分解热}} = 1000 \times \omega[P]_{\text{铁}} \times q_{Ca_3(PO_4)_2} = 1000 \times \omega[P]_{\text{铁}} \times 35756.98$$

式中:  $q_{Ca_3(PO_4)_2}$  表示单位质量  $Ca_3(PO_4)_2$  的分解热, 为  $35756.98\text{kJ}/(\text{kgP})$ 。

## (5) 脱硫耗热

由于 CaO 和 MnO 的脱硫耗热差别极大,分别为 5041.23kJ/(kgS)和 8039.4kJ/(kgS),因此,取其渣中成分比例 ( $\omega[\text{CaO}]_{\text{渣}} : \omega[\text{MgO}]_{\text{渣}}$ ) 来计算平均脱硫耗热。

1kg 硫的平均耗热为:

$$\begin{aligned} Q_{\text{平均耗热}} &= q_{\text{CaO}} \times \frac{\omega[\text{CaO}]_{\text{渣}}}{\omega[\text{CaO}]_{\text{渣}} + \omega[\text{MgO}]_{\text{渣}}} + q_{\text{MgO}} \times \frac{\omega[\text{MgO}]_{\text{渣}}}{\omega[\text{CaO}]_{\text{渣}} + \omega[\text{MgO}]_{\text{渣}}} \\ &= 5041.23 \times \frac{\omega[\text{CaO}]_{\text{渣}}}{\omega[\text{CaO}]_{\text{渣}} + \omega[\text{MgO}]_{\text{渣}}} + 8039.04 \times \frac{\omega[\text{MgO}]_{\text{渣}}}{\omega[\text{CaO}]_{\text{渣}} + \omega[\text{MgO}]_{\text{渣}}} \end{aligned}$$

式中:  $q_{\text{CaO}}$ 、 $q_{\text{MgO}}$  分别表示 CaO、MgO 脱单位质量的硫所消耗的热量,分别为 5041.23kJ/(kgS)和 8039.4kJ/(kgS)。

$$\text{脱硫耗热为: } Q_{\text{脱硫耗热}} = m(\text{S})_{\text{渣}} \times Q_{\text{平均耗热}}$$

氧化物分解和脱硫总耗热为 (1) ~ (5) 项热耗之和, 即

$$Q_{\text{氧}} = Q_{\text{铁氧化物总分解热}} + Q_{\text{锰氧化物分解热}} + Q_{\text{SiO}_2\text{分解热}} + Q_{\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{分解热}} + Q_{\text{脱硫耗热}}$$

## 5.2.2 碳酸盐分解热

由  $\text{CaCO}_3$  分解出 1kg 的  $\text{CO}_2$  需要热量 4044.64kJ, 由  $\text{MgCO}_3$  分解出 1kg 的  $\text{CO}_2$  需要热量 2487.08kJ。

$$\text{铁矿石中得 } \text{CO}_2 \text{ 量为: } m(\text{CO}_2)_{\text{矿}} = m_{\text{矿}} \times \omega[\text{CO}_2]_{\text{烧损}}$$

$\omega[\text{CO}_2]_{\text{烧损}}$  表示铁矿石中烧损  $\text{CO}_2$  的含量。

由于矿中  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{MgCO}_3$  以比列分配的, 则

由  $\text{CaCO}_3$  分解  $\text{CO}_2$  的质量:

$$m(\text{CO}_2)_{\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CO}_2} = m(\text{CO}_2)_{\text{矿}} \times \frac{\omega[\text{CaO}]_{\text{矿}}}{\omega[\text{CaO}]_{\text{矿}} + \omega[\text{MgO}]_{\text{矿}}}$$

由  $\text{MgCO}_3$  分解  $\text{CO}_2$  的质量:

$$m(\text{CO}_2)_{\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{CO}_2} = m(\text{CO}_2)_{\text{矿}} \times \frac{\omega[\text{MgO}]_{\text{矿}}}{\omega[\text{CaO}]_{\text{矿}} + \omega[\text{MgO}]_{\text{矿}}}$$

碳酸盐分分解热:

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{碳酸盐分解热}} &= m(\text{CO}_2)_{\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CO}_2} \times q_{\text{CaCO}_3} + m(\text{CO}_2)_{\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{CO}_2} \times q_{\text{MgCO}_3} \\
 &= m(\text{CO}_2)_{\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CO}_2} \times 4044.64 + m(\text{CO}_2)_{\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{CO}_2} \times 2487.08
 \end{aligned}$$

$q_{\text{CaCO}_3}$ 、 $q_{\text{MgCO}_3}$  分别表示  $\text{CaCO}_3$  分解出 1kg 的  $\text{CO}_2$  需要的热量和  $\text{MgCO}_3$  分解出 1kg 的  $\text{CO}_2$  需要的热量，分别为 4044.64kJ 和 2487.08kJ。

### 5.2.3 水分分解热

$$Q_{\text{水分分解热}} = V_{\text{风}} \times \varphi \times q_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{风}} \times 1.5\% \times 10806.65$$

式中： $V_{\text{风}}$  每吨生铁的鼓风量； $\varphi$  鼓风湿度=1.5%； $q_{\text{H}_2\text{O}}$  单位体积  $\text{H}_2\text{O}$  的分解热为 10806.65kJ/( $\text{m}^3\text{H}_2\text{O}$ )。

### 5.2.4 喷吹物分解热

$$Q_{\text{喷吹物分解热}} = K \times q_{\text{煤}} = K \times 1256.1$$

$q_{\text{煤}}$  表示单位质量煤的分解热，为 1256.1kJ/(kg 煤粉)。

### 5.2.5 炉料游离水的蒸发热

$$Q_{\text{炉料游离水的蒸发热}} = K \times \omega[\text{H}_2\text{O}]_K \times q_{\text{蒸发热}} = K \times \omega[\text{H}_2\text{O}]_K \times 2595.94$$

$q_{\text{蒸发热}}$  表示 1kg 水由 20℃ 变成 100℃ 水蒸气所吸收的热量，为 2595.94kJ。

### 5.2.6 生铁带走热

$$Q_{\text{生铁带走热}} = 1000 \times \Delta_r H_{\text{生铁}} = 1000 \times 1172.36 = 1172360(\text{kJ})$$

$\Delta_r H_{\text{生铁}}$  为生铁的焓值，取 1172.36kJ/(kg 铁)。

### 5.2.7 炉渣带走热

$$Q_{\text{炉渣带走热}} = m_{\text{渣总量}} \times \Delta_r H_{\text{渣}} = m_{\text{渣总量}} \times 1758.54$$

$\Delta_r H_{\text{渣}}$  表示炉渣的焓值，取 1758.54kJ/(kg 渣)。

### 5.2.8 炉顶煤气带走热

200℃ 时炉顶煤气各个成分的比热容 ( $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{C})$ ) 如下表 5.1 所示：

表 5.1 200℃ 时炉顶煤气各个成分的比热容

$\text{CO}_2$	$\text{CO}$	$\text{N}_2$	$\text{H}_2$	$\text{CH}_4$	$\text{H}_2\text{O}$
1.787	1.313	1.313	1.302	1.82	1.519

则干煤气比热容为:

$$c_{\text{干煤气}} = \omega[\text{CO}_2]_{\text{渣}} \times c_{\text{CO}_2} + \omega[\text{CO}]_{\text{渣}} \times c_{\text{CO}} + \omega[\text{N}_2]_{\text{渣}} \times c_{\text{N}_2} + \omega[\text{H}_2]_{\text{渣}} \times c_{\text{H}_2} + \omega[\text{CH}_4]_{\text{渣}} \times c_{\text{CH}_4}$$

干煤气带走热为:

$$Q_{\text{干煤气带走热}} = V_{\text{煤气总量}} \times c_{\text{干煤气}} \times T_{\text{炉顶温度}}$$

式中:  $V_{\text{煤气总量}}$ 、 $c_{\text{干煤气}}$ 、 $T_{\text{炉顶温度}}$  分别表示煤气总量、干煤气比热容和炉顶温度。

水蒸气带走热为:

$$Q_{\text{水蒸气带走热}} = m(\text{H}_2\text{O})_{\text{总量}} \times \frac{22.4}{18} \times c_{\text{H}_2\text{O}} \times \Delta T = m(\text{H}_2\text{O})_{\text{总量}} \times \frac{22.4}{18} \times 1.519 \times 100$$

$m(\text{H}_2\text{O})_{\text{总量}}$ 、 $c_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 $\Delta T$  分别表示水蒸气的总量、水的比热容( $1.519 \text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ )

及水的温度变化量( $100^\circ\text{C}$ )。

$$\text{炉尘带走热为: } Q_{\text{炉尘带走热}} = m_{\text{炉尘}} \times c_{\text{炉尘}} \times T_{\text{炉顶温度}} = m_{\text{炉尘}} \times 0.8374 \times 200$$

$m_{\text{炉尘}}$ 、 $c_{\text{炉尘}}$  分别表示炉尘质量以及炉尘比热容, 并取炉尘比热容为  $0.8374 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

$$\text{煤气带走热为: } Q_{\text{炉顶煤气带走热}} = Q_{\text{干煤气带走热}} + Q_{\text{水蒸气带走热}} + Q_{\text{炉尘带走热}}$$

前 8 项支出热之和为:

$$Q_{\text{支出}} = Q_{\text{氧}} + Q_{\text{碳酸盐分解热}} + Q_{\text{水分分解热}} + Q_{\text{喷吹物分解热}} + Q_{\text{炉料游离水的蒸发热}} \\ + Q_{\text{生铁带走热}} + Q_{\text{炉渣带走热}} + Q_{\text{炉顶煤气带走热}}$$

### 5.2.9 外部热损失 (包括散热和冷却水带走热)

$$\text{外部热损失为: } Q_{\text{外部热损失}} = Q_{\text{总收}} - Q_{\text{支出}}$$

根据以上计算方法, 可编程列出热收入和热支出, 编制热平衡表。

## 5.3 热平衡指标计算

碳的热能利用系数:

$$KC = \frac{\text{碳的氧化热 (包括燃料烧成CO和CO}_2\text{发出的热量)}}{\text{除进入生铁外的碳全部燃烧成CO}_2\text{所放出的热量}} \times 100\%$$

热量有效利用系数  $K_T$  :

$$K_T = \frac{\text{高炉总热量收入} - (\text{煤气带走热量} + \text{外部热损失})}{\text{高炉总热量收入}} \times 100\%$$
$$= \frac{Q_{\text{总收}} - (Q_{\text{炉顶煤气带走热}} + Q_{\text{外部热损失}})}{Q_{\text{总收}}} \times 100\%$$

根据该计算方法可通过编程得出碳的热能利用系数以及热量有效利用系数。

## 6 程序编写

程序采用 VC++ 编写，首先建立输入物料表格，编写各输入物料的代码，然后编写输出物料表格及代码，最后添加计算公式，键盘输入各输入物料的含量，编程得到输出物料含量，并检验输出物料含量是否合理。

该程序能在手动输入原料、燃料含量的情况下自动输出炼铁成本、生铁成分、炉渣成分、煤气成分、以及物料平衡热平衡等，对降低高炉炼铁成本有一定的参考作用。

### 6.1 输入物料及参数的编写

#### (1) 编写铁矿石成分输入各成分含量

成分%			
Fe	56.03	MnO	0.02
Mn	0.102	CaO	8.99
P	0.045	MgO	2.4
S	0.046	SiO2	6.94
Fe2O3	69.99	Al2O3	1.29
FeO	8.96	P2O5	0.11
MnO2	0.03	FeS2	0.03
FeS	0.08	烧损CO2	1.16
合计	100	用量	3400
成本	159.8		

图 6.1 铁矿石成分及含量

#### (2) 编写焦炭成分输入各成分含量

**焦炭成分**

成分%					
灰分	10.56	挥发分	0.9	有机物	1.3
SiO2	5.65	CO2	0.33	H2	0.4
Al2O3	4.83	CO	0.33	N2	0.4
CaO	0.76	CH4	0.03	S	0.5
MgO	0.12	H2	0.06		
FeO	0.75	N2	0.15		
FeS	0.05				
P2O5	0.01	合计	100	用量	700
				成本	480.5

Buttons: OK, Cancel

图 6.2 焦炭成分及含量

(3) 编写煤粉成分输入各成分含量

**煤粉成分**

成分%			
C	77.48	灰分	12.25
H2	4.35	SiO2	7.48
H2O	0.79	Al2O3	3.42
O2	4.05	CaO	0.6
N2	0.42	MgO	0.3
S	0.66	FeO	0.45
合计	100	用量	310
		成本	120.1

Buttons: OK, Cancel

图 6.3 煤粉成分及含量

(4) 编写熔剂成分输入各成分含量



熔剂成分

成分%			
CaO	54.11	CO2	43.8
MgO	1.16	合计	100
SiO2	0.8	用量	0
Al2O3	0.13	成本	15.99

Buttons: OK, Cancel

图 6.4 熔剂成分及含量

(5) 编写控制参数

控制参数

生产类型	炼钢生铁	工作容积m3	2500	目标Si含量	0.35	目标S含量	0.03
生产环境设定		热风性能		煤气增加	0		
铁水	1480	温度	1100	富氧	0		
渣	1510	温度下降	45.5	H2利用率	0.4		
炉顶煤气	200	压力	130	C-CH4比	0.012	热损失模型	自由热损失
铁矿石	80	湿度	12	直接还原率	0.45		
周围环境	25						

Buttons: OK, Cancel

图 6.5 控制参数

(6) 编写 200℃ 煤气各组分比热容

200°C时煤气比热容

成分kJ/(m3●℃)

CO2	1.787	H2	1.302
CO	1.313	CH4	1.82
N2	1.313	H2O	1.519

Buttons: OK, Cancel

图 6.6 200℃ 煤气各组分比热容

(7) 编写元素分配率

元素	Fe	Mn	P	S
生铁	0.997	0.5	1	0
炉渣	0.003	0.5	0	0
煤气	0	0	0	0.06

图 6.7 元素分配率

## 6.2 输出物料的编写与计算

(1) 编写生铁成分并计算结果

成分%	
Si	0.35
Mn	0.09
S	0.03
P	0.08
C	4.45
Fe	95
合计	100

图 6.8 生铁成分

(2) 炉渣成分及含量

成分	S	FeO	MnO	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	合计	R
kg	1.64	3.67	1.18	150.1	165.07	46.57	43.99	412.22	1.09
%	0.39	0.89	0.28	36.41	40.04	11.29	10.67	100	1.09

图 6.9 终渣成分及含量

(3) 煤气成分及含量

成分	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	N <sub>2</sub>	合计	V风	V鼓风/V风
m <sup>3</sup>	10.07	59.5	342.89	404.64	989.34	1806.44	1270.13	1.42
%	0.55	3.29	18.98	22.39	54.76	100		

图 6.10 煤气成分及含量

(4) 物料平衡

序号	收入项	kg	序号	支出项	kg
1	原燃料	2327.25	1	生铁	1000
2	鼓风	1770.66	2	炉渣	415.76
			3	煤气	2606.2
			4	水分	64.11
			5	炉尘	9.67
	合计	4097.91		合计	4095.74

相对误差%

图 6.11 物料平衡

(5) 热平衡

热平衡表								计算
序号	收入项	kg	%	序号	支出项	kg	%	返回
1	碳的氧化热	8286916.56	73.59	1	氧化物分解与脱硫	8123302.67	72.13	
2	鼓风带入热	2177111.21	19.33	2	碳酸盐分解	77327.07	0.68	
3	成渣热	29936.84	0.26	3	水分分解	224238.17	1.99	
4	炉料物理热	143494.71	1.27	4	喷吹物分解	205992.8	1.82	
5	H <sub>2</sub> 氧化热	586811.54	5.21	5	游离水蒸发	49809.06	0.44	
6	CH <sub>4</sub> 生成热	36536.83	0.32	6	铁水带走	1172360	10.41	
				7	炉渣带走	731133.49	6.49	
				8	煤气带走	557802.25	4.95	
				9	外部热损失	118842.17	1.05	
	合计	11260807.69			合计	11260807.69		

图 6.12 热平衡

(6) 其它输出成分

输出				计算
焦比	369.35	生铁产量	1895.18	返回
煤比	163.57	碳的热能利用系数	0.61	
成本	483.8	热量有效利用系数	0.82	
碱度	1.09			
矿比	1794.02			

图 6.13 其他输出结果

## 7 总结

高炉炼铁成本主要由原材料、燃料、动力、工资福利和制造费用等部分组成，其中原材料、燃料和动力占总成本的 90% 以上。编程采用固定炼铁设备以及员工工资福利的方式，主要从原材料和燃料两个方面对炼铁成本的影响。运行程序发现，随着铁矿石品位升高，焦比下降，产量提高，提高焦炭质量也能降低入炉焦比。结合动力对高炉炼铁的影响发现，能有效降低高炉炼铁成本的措施有：

(1) 提高矿石品位：主要方法有购买高品位精矿粉，以及增加进口矿比例。矿石品位变化对生铁的成本影响如下：

原料成本变化=品位升高后吨铁消耗×品位升高后铁矿石价格-原矿石吨铁消耗×原矿石价格

(2) 提高焦炭质量：采购优质煤，增加炼焦配煤中优质焦煤比例、提高焦炭质量，确保高炉稳定顺行、指标提高，降低入炉焦比，可直接降低高炉炼铁成本；

(3) 使用合理的动力设备，充分发挥动力设备的能力，减少吨铁动力消耗，尽量避免不必要的动力消耗。

## 参考文献

- [1] 王炜, 薛正良. 高炉精料与炼铁成本的研究[J]. 中国冶金, 2006(5): 41-43.
- [2] 杜鹤桂. 我国高炉炼铁生产现状及未来发展分析[J]. 鞍钢技术, 2006(5): 1-5.
- [3] Peter Schmoele, Michael Peters, Hans Bodo Luengen. 高炉炼铁的发展现状与展望[J]. 世界钢铁, 2013(1): 1-9.
- [4] 王维兴. 2009年国内外炼铁技术进展评述[J]. 炼铁技术通讯, 2010(1): 1-7.
- [5] 沙永志. 国外炼铁状况及我国炼铁发展方向[J]. 2008年全国炼铁生产技术会议暨炼铁年会论文集2008.
- [6] 刘文权. “十二五”时期炼铁转型和技术升级[C]. //中国金属学会. 2012年全国炼铁生产技术会议暨炼铁学术年会文集. 无锡: 2012(3): 234-239.
- [7] Wang C, Ryman C, Dahl J. Potential CO<sub>2</sub> emission reduction for BF-BOF steelmaking based on optimized use of ferrous burden materials[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2009, 3(1): 29-38.
- [8] 邹忠平, 项钟庸, 赵瑞海, 罗云文. 国内外高炉炼铁技术的发展现状和趋势[J]. 中国金属学会冶金技术经济学会第11界学术年会. 北京: 2011: 21-28.
- [9] 刘德楼. 降低高炉炼铁成本的探讨[J]. 第十一届全国炼铁原来学术会议. 贵阳: 2009.
- [10] 张寿荣. 炼铁系统节能——我国钢铁工业21世纪技术进步的重点[J]. 钢铁, 2005, 40(5): 1-4.
- [11] 魏建新. 降低炼铁系统能源消耗的实践[J]. 冶金能源, 2006, 2(2): 11-14.
- [12] 杨天钧, 左海滨. 中国高炉炼铁技术科学发展的途径[J]. 钢铁, 2008(1): 1-5.
- [13] 张寿荣, 银汉. 中国高炉炼铁的现状和存在的问题[J]. 第二届中德(欧)冶金技术研讨会论文集. 2007.
- [14] 周飞雄. 降低杭钢炼铁成本探讨[J]. 炼铁技术通讯, 2003(5): 2-5.
- [15] 郭勇文. 降低广钢高炉炼铁成本主要途径探讨[J]. 冶金从刊, 2011(1): 43-47.
- [16] 刘巍, 张茂辉, 王奕群. 炼铁工序的成本控制[J]. 河北冶金, 2002(5): 56-58.
- [17] 梁中渝. 炼铁学[M]. 北京: 冶金出版社, 2009.
- [18] 那树人. 炼铁计算. 北京: 冶金工业出版社, 2007.

## 致 谢

通过这次毕业设计，我学到了很多，学会如何查找资料，如何写论文，如何整理思路，更重要的是学会了严谨的学术态度。在此，我衷心感谢我的指导老师高绪东老师，在高老师孜孜不倦的教诲和细心的引导下，我才能在毕业设计学到珍贵的经验和宝贵的知识。高老师总是在我们犯迷糊或犯错时候，为我们指点迷津，为我们开拓思路，感谢高老师为我所做的一切，您辛苦了。

感谢我可爱的室友们，在我最艰辛的时候给我很大的帮助，在精神上给我巨大的鼓励，才能使我不畏艰险、认认真真的去探索知识，谢谢你们。

感谢在生活上和精神上帮助、支持我的人，衷心的感谢你们。

## 附录

### 附录 1 输入参数代码图

#### (1) 铁矿石代码

成分%			OK			
Fe	m_TFe	MnO	m_TMnO	FeS	m_TFeS	Cancel
Mn	m_TMn	CaO	m_TCaO	烧损CO2	m_TCO2	
P	m_TP	MgO	m_TMgO	合计	m_THJ	
S	m_TS	SiO2	m_TSiO2	用量	m_More	
Fe2O3	m_TFe2O3	Al2O3	m_TAl2O3	成本	m_TUSD	
FeO	m_TFeO	P2O5	m_TP2O5			
MnO2	m_TMnO2	FeS2	m_TFeS2			

附图 1.1 铁矿石代码表代码图

#### (2) 焦炭成分代码

成分%				OK				
灰分	m_KHF	挥发分	m_KHFF	有机物	m_KYJW	C固	m_KC	Cancel
SiO2	m_KSiO2	CO2	m_KCO2	H2	m_KH2	全S	m_KS	
Al2O3	m_KAl2O3	CO	m_KCO	N2	m_KN2	H2O	m_KH2O	
CaO	m_KCaO	CH4	m_KCH4	S	m_KS			
MgO	m_KMgO	H2	m_KH2					
FeO	m_KFeO	N2	m_KN2					
FeS	m_KFeS							
P2O5	m_KP2O5	合计	m_KHJ	用量/kg	m_MK	成本/¥	m_KUSD	

附图 1.2 焦炭成分代码图

#### (3) 煤粉成分代码



煤粉成分	
成分%	
C	m_MC
H2	m_MH2
H2O	m_MH2O
O2	m_MO2
N2	m_MN2
S	m_MS
合计	m_MHJ
灰分	m_MHF
SiO2	m_MSiO2
Al2O3	m_MAl2O3
CaO	m_MCaO
MgO	m_MMgO
FeO	m_MFeO
用量	m_MM
成本	m_MUSD

附图 1.3 煤粉成分代码图

(4) 熔剂成分代码

熔剂成分	
成分%	
CaO	m_RCaO
MgO	m_RMgO
SiO2	m_RSiO2
Al2O3	m_RAl2O3
CO2	m_RCO2
合计	m_RHJ
用量	m_MR
成本	m_RUSD

附图 1.4 熔剂成分代码图

(5) 元素分配率代码

元素	Fe	Mn	P	S
生铁	<input type="text" value="m_YFe"/>	<input type="text" value="m_YMn"/>	<input type="text" value="m_YP"/>	<input type="text" value="m_YS"/>
炉渣	<input type="text" value="m_YFe"/>	<input type="text" value="m_YSMn"/>	<input type="text" value="m_YSP"/>	<input type="text" value="m_YSS"/>
煤气	<input type="text" value="m_YMFe"/>	<input type="text" value="m_YMMn"/>	<input type="text" value="m_YMP"/>	<input type="text" value="m_YMS"/>

附图 1.5 元素分配率代码图

(6) 200℃时煤气比热容代码

成分kJ/(m <sup>3</sup> ·℃)	
CO <sub>2</sub>	<input type="text" value="m_BC02"/>
CO	<input type="text" value="m_BCO"/>
N <sub>2</sub>	<input type="text" value="m_BN2"/>
H <sub>2</sub>	<input type="text" value="m_BH2"/>
CH <sub>4</sub>	<input type="text" value="m_BCH4"/>
H <sub>2</sub> O	<input type="text" value="m_BH20"/>

附图 1.6 200℃煤气比热容代码图

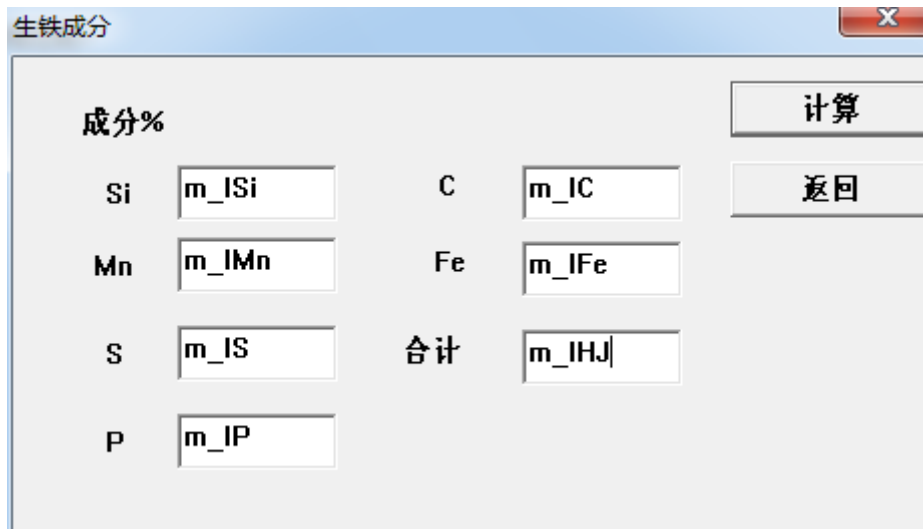
(7) 控制参数代码



附图 1.7 控制参数代码图

## 附图 2 输出物料代码图及计算公式

(1) 生铁成分代码及计算公式



附图 2.1 生铁成分图及计算公式

计算公式:

$m\_ISi = m\_C14$ ; //铁水中 Si 含量

$m\_IMn = m\_MKB * m\_TMn * 0.5 / 1000$ ; //铁水中 Mn 含量

$m\_IS = m\_C20$ ; //铁水中 S 含量

$m\_IP = ((m\_MKB * m\_TP + m\_K * m\_KP2O5 * 62 / 142) / 1000)$ ; //铁水中 P 含量

$m\_IC = 100 - m\_ISi - m\_IMn - m\_IS - m\_IP - m\_IFe$ ; //铁水中 C 含量

$m\_IFe = 95$ ; //铁水中 Fe 含量

$m\_IHJ = 100$ ; //铁水总量 100%

(2) 终渣成分代码及计算公式

成分	S	FeO	MnO	SiO2	CaO	Al2O3	MgO	合计	R
kg	m_SS	m_SFe	n_SMnO	n_SSiO2	m_SCaO	_SAI2O3	n_SMgO	m_SHJ	m_SR
%	m_SWS	_SWFeO	SWMnO	SWSiO2	_SWCaO	SWAl2O3	_SWMgO	n_SWHJ	m_SWR

附图 2.2 终渣成分及计算公式

计算公式:

$m_{SS} = ((m_{MKB} * m_{TS} / 100 + m_K * m_{KS} / 100 + m_M * m_{MS} / 100) * (1 - m_{YMS}) - 100 * m_{IS}) / 2$ ; // 炉渣中 S 的质量

$m_{SFeO} = 950 * 0.003 * 72 / (0.997 * 56)$ ; // 炉渣中 FeO 的质量

$m_{SMnO} = m_{MKB} * m_{TMn} * m_{YSMn} * 71 / 5500$ ; // 炉渣中 MnO 的质量

$m_{SSiO2} = m_{MKB} * m_{TSiO2} / 100 + m_K * m_{KSiO2} / 100 + m_M * m_{MSiO2} / 100 + m_{MR} * 10 * m_{RSiO2} / m_{MZL} - 10 * m_{ISi} * 60 / 28$ ; // 炉渣中 SiO2 的质量

$m_{SCaO} = m_{MKB} * m_{TCaO} / 100 + m_K * m_{KCaO} / 100 + m_M * m_{MCAO} / 100 + m_{MR} * 10 * m_{RCaO} / m_{MZL}$ ; // 炉渣中 CaO 的质量

$m_{SAI2O3} = m_{MKB} * m_{TAI2O3} / 100 + m_K * m_{KAI2O3} / 100 + m_M * m_{MAI2O3} / 100 + m_{MR} * 10 * m_{RAI2O3} / m_{MZL}$ ; // 炉渣中 Al2O3 的质量

$m_{SMgO} = m_{MKB} * m_{TMgO} / 100 + m_K * m_{KMgO} / 100 + m_M * m_{MMgO} / 100 + m_{MR} * 10 * m_{RMgO} / m_{MZL}$ ; // 炉渣中 MgO 的质量

$m_{SHJ} = m_{SS} + m_{SFeO} + m_{SMnO} + m_{SSiO2} + m_{SCaO} + m_{SAI2O3} + m_{SMgO}$ ; // 炉渣总质量

$m_{SR} = m_{SCaO} / m_{SSiO2}$ ; // 炉渣碱度

$m_{SWS} = 100 * m_{SS} / m_{SHJ}$ ; // 炉渣中含 S 量

$m_{SWFeO} = 100 * m_{SFeO} / m_{SHJ}$ ; // 炉渣中含 FeO 量

$m_{SWMnO} = 100 * m_{SMnO} / m_{SHJ}$ ; // 炉渣中含 MnO 量

$m_{SWSiO2} = 100 * m_{SSiO2} / m_{SHJ}$ ; // 炉渣中含 SiO2 量

$m_{SWCaO} = 100 * m_{SCaO} / m_{SHJ}$ ; // 炉渣中含 CaO 量

$m_{SWAl2O3} = 100 * m_{SAI2O3} / m_{SHJ}$ ; // 炉渣中含 Al2O3 量

$m_{SWMgO} = 100 * m_{SMgO} / m_{SHJ}$ ; // 炉渣中含 MgO 量

$m_{SWHJ} = 100$ ; // 炉渣总量 100%

(3) 物料平衡代码及计算公式

序号	收入项	kg	序号	支出项	kg
1	原燃料	m_WS1	1	生铁	m_WZ1
2	鼓风	m_WS2	2	炉渣	m_WZ2
			3	煤气	m_WZ3
			4	水分	m_WZ4
			5	炉尘	m_WZ5
	合计	m_WSHJ		合计	m_WZ6

相对误差% m\_WWC

附图 2.3 物料平衡代码

计算公式:

$m\_WS1 = m\_MKB * 0.995 + m\_K * 0.947 + m\_M$ ; //原燃料质量

$m\_WSHJ = m\_WS1 + m\_WS2$ ; //输入物料总量

$m\_WZ1 = 1000$ ; //铁水质量

$m\_WZ2 = m\_SHJ$ ; //炉渣质量

$m\_WZ3 = m\_GHJ$ ; //煤气质量

$m\_WZ4 = m\_K * m\_KH2O + m\_M * m\_MH2O + (m\_GV * m\_f + (m\_K * m\_KH2 + m\_M * m\_KH2)) * 0.4 * 18 / 22.4$ ; //水分质量

$m\_WZ5 = m\_MKB * 0.005 + m\_K * 0.053$ ; //炉尘质量

$m\_WZHJ = m\_WZ1 + m\_WZ2 + m\_WZ3 + m\_WZ4 + m\_WZ5$ ; //输出物料总量

$m\_WWC = (m\_WSHJ - m\_WZHJ) / m\_WSHJ$ ; //相对误差

(4) 热平衡代码及计算公式

热平衡表							
序号	收入项	kg	%	序号	支出项	kg	%
1	碳的氧化热	m_HS1	m_HSW1	1	氧化物分解与脱硫	m_HZ1	m_HZW1
2	鼓风带入热	m_HS2	m_HSW2	2	碳酸盐分解	m_HZ2	m_HZW2
3	成渣热	m_HS3	m_HSW3	3	水分分解	m_HZ3	m_HZW3
4	炉料物理热	m_HS4	m_HSW4	4	喷吹物分解	m_HZ4	m_HZW4
5	H2氧化热	m_HS5	m_HSW5	5	游离水蒸发	m_HZ5	m_HZW5
6	CH4生成热	m_HS6	m_HSW6	6	铁水带走	m_HZ6	m_HZW6
				7	炉渣带走	m_HZ7	m_HZW7
				8	煤气带走	m_HZ8	m_HZW8
				9	外部热损失	m_HZ9	m_HZW9
	合计	m_HSHJ			合计	m_HZHJ	

附图 2.4 热平衡代码

计算公式:

$m_{HS1}=17898.57*(m_{MKB}*m_{TFe2O3}*22.4/160+(1000*m_{IFe}*(1-m_{rd})-(m_{GV}*m_f+(m_K*m_{KH2}+m_M*m_{MH2}))*0.4*56/33.6)*22.4/56+m_{MKB}*m_{TMnO2}*22.4/87-(m_{GV}*m_f+m_K*m_{KH2}+m_M*m_{MH2})*0.4)+5248.45*(m_{GCO}-m_K*m_{KCO}*22.4/12);$ //碳的氧化热

$m_{HS2}=(m_{GV}*(1-m_f)*1.426+m_{GV}*m_f*1.742)*m_{TGF};$ //鼓风带入热

$m_{HS3}=m_{MKB}*m_{TCO2}*56*1130.49/44;$ //成渣热

$m_{HS4}=m_{MKB}*m_{TKS};$ //炉料物理热

$m_{HS5}=(m_{GV}*m_f+m_K*m_{KH2}+m_M*m_{MH2})*0.4*10806.65;$ //H2 的氧化热

$m_{HS6}=(m_K*m_{KC}+m_M*m_{MC})*0.012*16*4867.15/12;$ //CH4 生成热

$m_{HSHJ}=m_{HS1}+m_{HS2}+m_{HS3}+m_{HS4}+m_{HS5}+m_{HS6};$ //热收入总量

$m_{HZ1}=(m_{MKB}*m_{TFeO}*0.2+m_K*m_{KFeO}+m_M*m_{MFeO}-m_{SFeO})*4075.21+m_{MKB}*m_{TFeO}*0.8*4799.98*232/72+m_{MKB}*m_{TFe2O3}*0.2*5152.94+m_{MKB}*m_{TMnO2}*2629.44+1000*7362.84*m_{IMn}+1000*(m_{ISi}*30288.76+m_{IP}*35756.98+m_{IS}*(5041.23*m_{SCaO}/(M_{SCaO}+m_{SMgO})+8039.04*m_{SMgO}/(M_{SCaO}+m_{SMgO})));$ //氧化物分解与脱硫热

$m_{HZ2}=4044.64*m_{MKB}*m_{TCO2}*m_{TCaO}/(M_{TCaO}+m_{SMgO})+2487.08*m_{MKB}*m_{TCO2}*m_{TMgO}/(M_{TCaO}+m_{SMgO});$ //碳酸盐分解热

$m_{HZ3}=m_{GV}*m_f*10806.65;$ //水分分解热

$m_{HZ4}=m_K*1256.1;$ //喷吹物分解热

$m_{HZ5}=m_K*m_{KH2O}*2595.94;$ //游离水蒸发热

$m_{HZ6}=1000*1172.36;$ //铁水带走热

$m_{HZ7}=m_{SHJ}*1758.54;$ //炉渣带走热

$m_{HZ8}=(m_{GCO2}*m_{BCO2}+m_{GCO}*m_{BCO}+m_{GN2}*m_{BN2}+m_{GH2}*m_{BH2}+m_{GCH4}*m_{BCH4})*m_{GHJ}*200+m_{WZ4}*m_{BH2O}*100*22.4/18+m_{WZ5}*0.8347*200$ ; //煤气带走热

$m_{HZ9}=m_{HSHJ}-(m_{HZ1}+m_{HZ2}+m_{HZ3}+m_{HZ4}+m_{HZ5}+m_{HZ6}+m_{HZ7}+m_{HZ8})$ ; //外部热损失

$m_{HZHJ}=m_{HSHJ}$ ; //热支出总量

$m_{HSW1}=100*m_{HS1}/m_{HSHJ}$ ; //碳的氧化热在热收入中所占比值

$m_{HSW2}=100*m_{HS2}/m_{HSHJ}$ ; //鼓风带入热在热收入中所占比值

$m_{HSW3}=100*m_{HS3}/m_{HSHJ}$ ; //成渣热在热收入中所占比值

$m_{HSW4}=100*m_{HS4}/m_{HSHJ}$ ; //炉料物理热在热收入中所占比值

$m_{HSW5}=100*m_{HS5}/m_{HSHJ}$ ; //H<sub>2</sub> 的氧化热在热收入中所占比值

$m_{HSW6}=100*m_{HS6}/m_{HSHJ}$ ; //CH<sub>4</sub> 生成热在热收入中所占比值

$m_{HZW1}=100*m_{HZ1}/m_{HZHJ}$ ; //氧化物分解与脱硫热在热支出中所占比值

$m_{HZW2}=100*m_{HZ2}/m_{HZHJ}$ ; //碳酸盐分解热在热支出中所占比值

$m_{HZW3}=100*m_{HZ3}/m_{HZHJ}$ ; //水分分解热在热支出中所占比值

$m_{HZW4}=100*m_{HZ4}/m_{HZHJ}$ ; //喷吹物分解热在热支出中所占比值

$m_{HZW5}=100*m_{HZ5}/m_{HZHJ}$ ; //游离水蒸发热在热支出中所占比值

$m_{HZW6}=100*m_{HZ6}/m_{HZHJ}$ ; //铁水带走热在热支出中所占比值

$m_{HZW7}=100*m_{HZ7}/m_{HZHJ}$ ; //炉渣带走热在热支出中所占比值

$m_{HZW8}=100*m_{HZ8}/m_{HZHJ}$ ; //煤气带走热在热支出中所占比值

$m_{HZW9}=100*m_{HZ9}/m_{HZHJ}$ ; //外部热损失在热支出中所占比值

(5) 煤气成分代码及计算公式

成分	CH4	H2	CO2	CO	N2	合计	V风	V鼓风/V风
m <sup>3</sup>	m_GCH4	m_GH2	m_GCO2	m_GCO	m_GN2	m_GHJ	m_GV	m_GWV
%	_GWCH4	_GWH2	_GWC02	_GWC	_GWN2	m_GWHJ		

附图 2.5 煤气成分代码

煤气质量计算公式:

$m_{GCH4}=(m_K*m_{KC}+m_M*m_{MC})*0.012*22.4/12+m_K*m_{KCH4}*22.4/16$ ; //

煤气中 CH<sub>4</sub> 的含量

$m_{GH2}=(m_{GV}*m_f+(m_K*m_{KH2}+m_M*m_{MH2}))*0.6-(m_K*m_{KC}+m_M*$

$m\_MC) * 0.012 * 2 * 22.4 / 12$ ; // 煤气中 H2 的含量

$m\_GCO2 = (m\_MKB * m\_TFe2O3 * 22.4 / 160) + (1000 * m\_IFe * (1 - m\_rd) - (m\_GV * m\_f + (m\_K * m\_KH2 + m\_M * m\_MH2) * 0.4 * 56 / 33.6)) * 22.4 / 56 + m\_MKB * m\_TMnO2 * 22.4 / 87 - (m\_GV * m\_f + (m\_K * m\_KH2 + m\_M * m\_MH2) * 0.4) + m\_K * m\_KCO2 * 22.4 / 44 + m\_MKB * m\_TCO2 * 22.4 / 44$ ; // 煤气中 CO2 的含量

$m\_GCO = ((m\_K * m\_KC + m\_M * m\_MC) * 0.988 - 1000 * m\_IC) * 22.4 / 12 + m\_K * m\_KCO * 22.4 / 12 - ((m\_MKB * m\_TFe2O3 * 22.4 / 160) + (1000 * m\_IFe * (1 - m\_rd) - (m\_GV * m\_f + (m\_K * m\_KH2 + m\_M * m\_MH2) * 0.4 * 56 / 33.6)) * 22.4 / 56 + m\_MKB * m\_TMnO2 * 22.4 / 87 - (m\_GV * m\_f + m\_K * m\_KH2 + m\_M * m\_MH2) * 0.4)$ ; // 煤气中 CO 的含量

$m\_GN2 = m\_GV * (1 - m\_f) * 0.79 + m\_K * m\_KN2 * 22.4 / 28 + m\_M * m\_MN2 * 22.4 / 28$ ; // 煤气中 N2 的含量

$m\_GHJ = m\_GCH4 + m\_GH2 + m\_GCO2 + m\_GCO + m\_GN2$ ; // 煤气总量

$m\_GV = (((m\_K * m\_KC + m\_M * m\_MC) * 0.988 - 1000 * m\_IC - 1000 * (m\_IMn * 12 / 55 + m\_ISi * 24 / 28 + m\_IP * 60 / 62 + m\_IFe * m\_rd * 12 / 56)) * 0.933 - m\_M * (m\_MO2 + m\_MH2O * 16 / 18) * 2.4 / 32) / (0.21 + 0.29 * m\_f)$ ; // 每吨生铁鼓风量

$m\_GWV = m\_GHJ / m\_GV$ ; // 煤气总量与鼓风量的比值

$m\_GWCH4 = m\_GCH4 / m\_GHJ$ ; // 煤气中 CH4 所占的百分比

$m\_GWH2 = m\_GH2 / m\_GHJ$ ; // 煤气中 H2 所占的百分比

$m\_GWCO2 = m\_GCO2 / m\_GHJ$ ; // 煤气中 CO2 所占的百分比

$m\_GWCO = m\_GCO / m\_GHJ$ ; // 煤气中 CO 所占的百分比

$m\_GWN2 = m\_GN2 / m\_GHJ$ ; // 煤气中 N2 所占的百分比

$m\_GWHJ = 100\%$ ; // 煤气总量 100%

(6) 其他输出参数代码及计算公式



附图 2.6 其他输出代码



计算公式:

$$m_{MZL} = (m_{More} * m_{TFe} * 0.995 + m_{MK} * (m_{KFeO} * 56/72 + m_{KFeS} * 56/88) + m_{MM} * m_{MFeO} * 56/72) * 0.00997; // \text{生铁总量}$$
$$m_K = 100000 * m_{MK} / ((m_{More} * m_{TFe} * 0.995 + m_{MK} * (m_{KFeO} * 56/72 + m_{KFeS} * 56/88) + m_{MM} * m_{MFeO} * 56/72) * 0.997); // \text{焦比}$$
$$m_M = 100000 * m_{MM} / ((m_{More} * m_{TFe} * 0.995 + m_{MK} * (m_{KFeO} * 56/72 + m_{KFeS} * 56/88) + m_{MM} * m_{MFeO} * 56/72) * 0.997); // \text{煤比}$$
$$m_{MKB} = 100000 * m_{More} / ((m_{More} * m_{TFe} * 0.995 + m_{MK} * (m_{KFeO} * 56/72 + m_{KFeS} * 56/88) + m_{MM} * m_{MFeO} * 56/72) * 0.997); // \text{冶炼每吨生铁所耗的铁矿石量}$$
$$m_{RN} = m_{HS1} / ((m_K * m_{KC} + m_M * m_{MC}) * 0.988 - 1000 * m_{IC}); // \text{碳的热能利用系数}$$
$$m_{RL} = 100\% * (m_{HSHJ} - (m_{HZ8} + m_{HZ9})) / m_{HZHJ}; // \text{热量有效利用系数}$$