

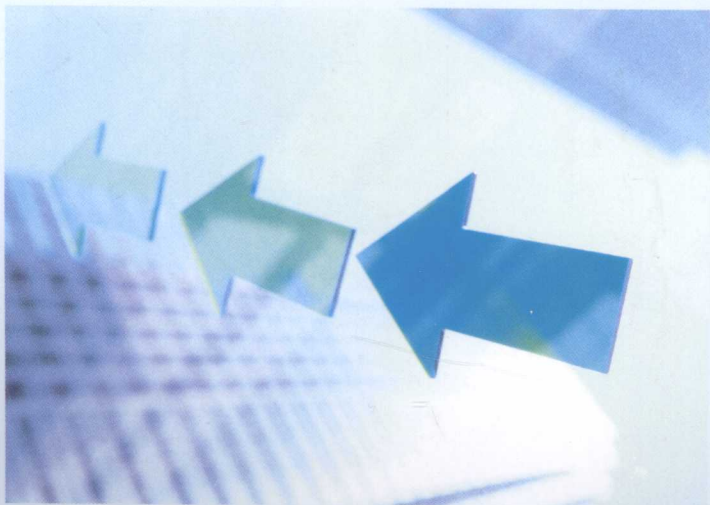
高等学校规划教材

GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

冶金课程工艺设计计算

(炼铁部分)

杨双平 主编



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

高等学校规划教材

冶金课程工艺设计计算

(炼铁部分)

杨双平 主编

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2009

内 容 提 要

本书主要根据高炉炼铁工艺设计的基本要求, 结合实际应用介绍了国内冶金行业具体的工艺与设备设计的计算实例。主要内容包括烧结物料平衡和热平衡计算、高炉炼铁综合计算及实例、高炉本体设计、高炉鼓风机工艺计算、高炉热风炉工艺计算。

本书是高等院校钢铁冶金专业本科教学用书, 也可作为冶金工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

冶金课程工艺设计计算: 炼铁部分/杨双平主编. —北京: 冶金工业出版社, 2009. 8

高等学校规划教材

ISBN 978-7-5024-4984-1

I. 冶… II. 杨… III. 高炉炼铁—设计—高等学校—教材 IV. TF

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 133593 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 马文欢 美术编辑 李 新 版式设计 张 青

责任校对 卿文春 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-4984-1

北京百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2009 年 8 月第 1 版, 2009 年 8 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 6.25 印张; 210 千字; 191 页; 1-2000 册

20.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100711) 电话: (010) 65289081

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

为适应目前中国冶金工业形势和技术发展的需要，同时为适应教育部高校专业目录的调整，根据冶金工程专业教学计划，多家院校开设了“冶金课程工艺设计”专业课，总学时数为2周，目的是为了学生系统学习冶金厂设计、冶炼工艺与设备设计计算的基本知识，培养学生分析和解决冶金工程实际问题的能力。为此，我们经过广泛调研，合作撰写了本书。

“冶金课程工艺设计”专业课是一门综合性的课程，它基于工程科学，但重点是应用。为把科研成果尽快转化为生产力，除了研究人员自身的理论素养和正确的开发方法外，了解设计的原理和方法是个重要因素。编者总结了多年来从事教学、科研及生产实践的经验，参阅了有关文献资料和手册，力求内容系统全面。全书以高炉炼铁工艺设计为主线，详细介绍了高炉炼铁工艺设计的基础知识、基本概念、设计思想、设计方法、设计步骤等，以使學生熟悉高炉炼铁工艺设计的原理、概念、方法。本书适用于高等院校冶金工程专业本科教学，也可作为冶金工程技术人员的参考书。

本书由杨双平担任主编，第1章、第3章由杨双平、张从容编写，第2章、第5章、第6章由杨双平、董洁编写，

第4章由杨双平编写。在全书的编写过程中，西安建筑科技大学冶金工程学院的领导给予了大力支持和关注，西安建筑科技大学冶金工程研究所的老师们也给予了很多帮助，在此一并表示衷心的感谢！

由于冶金工程涉及的知识面非常广泛，受编者水平所限，书中疏漏之处在所难免，恳请同行专家及读者指正。

最后向本书所引用的参考文献的作者表示感谢。

编 者

2009年5月于西安

目 录

1 烧结物料平衡和热平衡计算	1
1.1 烧结配料计算	3
1.1.1 烧结配料计算准备工作	3
1.1.2 烧结配料计算基本原则	5
1.1.3 烧结配料计算方法	6
1.1.4 烧结配料计算举例	27
1.1.5 现场配料及其调整计算	31
1.2 设计配料计算	38
1.2.1 设计计算项目及计算公式	39
1.2.2 设计配料计算举例	42
1.3 烧结过程的热平衡计算	47
1.3.1 热量收入项的计算	48
1.3.2 热量支出项的计算	49
2 高炉炼铁综合计算	53
2.1 原始资料的收集与整理	53
2.1.1 计算物料平衡前必须收集的各项资料	53
2.1.2 原始数据的整理	54
2.1.3 矿石的选配	66
2.1.4 高炉用原料、燃料的技术要求	68
2.2 冶炼条件的假定与计算	70
2.2.1 预定生铁品种及其成分	70
2.2.2 炉渣碱度的选择	70
2.2.3 送风制度的确定	71
2.2.4 冶炼强度的选择	71

2.2.5	燃料使用量	72
2.2.6	碎铁使用量	73
2.2.7	炉顶煤气温度及炉尘吹出量	73
2.2.8	计算中有关参数的选择	73
2.2.9	高炉直接还原度	74
2.2.10	直接还原度的计算	75
2.2.11	一氧化碳利用率的计算	82
3	高炉炼铁综合计算实例	84
3.1	配料计算	84
3.1.1	各种原始资料的整理	84
3.1.2	矿石的选配	88
3.1.3	冶炼条件的确定	89
3.1.4	根据铁平衡求铁矿石的需求量	91
3.1.5	根据 CaO 的平衡求石灰石用量	92
3.1.6	最终炉渣成分和数量计算	94
3.1.7	最终生铁成分计算	96
3.2	物料平衡	98
3.2.1	根据 C 的平衡计算风量	98
3.2.2	炉顶煤气成分及数量的计算	100
3.2.3	物料平衡表的编制	103
3.3	热平衡	104
3.3.1	热量收入项的计算	104
3.3.2	热量支出项的计算	106
3.3.3	能量利用的评定	112
4	高炉本体设计	114
4.1	高炉内型设计	114
4.1.1	高炉总年产量的计算	117
4.1.2	高炉有效容积的确定	117
4.1.3	高炉内型尺寸确定	118

4.2 高炉内衬设计	122
4.2.1 高炉炉底砌砖	123
4.2.2 高炉死铁层区域砌砖	123
4.2.3 高炉炉缸砌砖	125
4.2.4 高炉炉腹砌砖	127
4.2.5 高炉炉腰砌砖	128
4.2.6 高炉炉身砌砖	129
4.2.7 高炉炉喉钢砖选型	133
4.3 高炉炉体冷却设备	133
4.3.1 外部喷水冷却	134
4.3.2 冷却壁的选择	134
4.3.3 水冷炉底	135
4.4 高炉的钢结构	136
4.4.1 高炉本体钢结构	137
4.4.2 炉壳及炉体结构	137
4.4.3 支柱	137
4.4.4 炉体平台走梯	138
5 高炉鼓风机工艺计算	139
5.1 高炉入炉风量与鼓风机出口风量	139
5.2 高炉鼓风压力	140
5.3 高炉鼓风机能力的确定（鼓风机工况的计算）	141
5.4 鼓风机的选型	141
6 高炉热风炉工艺计算	143
6.1 内燃式热风炉	143
6.1.1 计算原始数据	143
6.1.2 燃烧计算	144
6.1.3 热平衡计算	148
6.1.4 蓄热室热工计算	149
6.1.5 热风炉流体阻损计算	163

6.2 球式热风炉	175
6.2.1 计算原始数据	176
6.2.2 燃烧计算	177
6.2.3 热平衡计算	183
6.2.4 蓄热室球床特性指数	188
6.2.5 球床（高度方向烟气、鼓风及助燃空气）温度	189
参考文献.....	191

1 烧结物料平衡和热平衡计算

烧结是粉料造块最重要的工艺方法。将精矿粉或富矿粉、燃料（焦末或无烟煤粉等）、熔剂（白云石、石灰石等）及其他辅助添加剂按一定比例加水混合并造成小球，混合料铺在带式烧结机的台车上，在一定负压下点火即开始烧结，整个烧结过程是在 $10 \sim 16\text{kPa}$ 或更高的抽风负压下从前到后、自上而下进行的。在烧结料中的燃料燃烧所产生的高温（约 1500°C 左右）下，混合料局部熔化生成液相，冷却后矿粉相互黏结在一起，形成坚实而多孔的烧结矿。

在焙烧过程中原料中的熔剂可伴随完成某些初步的造渣反应，使烧结矿的碱度 $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)$ 达到 1.6 左右，从而可使高炉入炉料少加或不加熔剂。同时，在烧结过程中可以去除原料中的有害杂质硫等，对原料中的其他有益元素也可进行综合回收。

烧结好的烧结矿经破碎、筛分（筛下的碎矿和粉矿可返回重新烧结）和冷却（使温度降到 100°C 左右），可成为品位高、化学成分稳定、碱度适宜、还原性好、有害杂质少、强度高、粒度均匀的烧结矿。

烧结过程可大致分为烧结料的准备、铺料（布料）点火烧结和产品处理三个工艺环节，其一般工艺流程如图 1-1 所示。

原料准备对烧结生产影响很大。备料工作的主要内容是破碎整粒、配料和混匀造球。烧结原料主要有矿粉（粗矿粉和富矿粉）、燃料（焦末和无烟煤）和熔剂（石灰石、白云石或生石灰、消石灰），其他如高炉和转炉炉尘、轧钢皮、铁屑、硫酸渣等都可作为烧结附加物。为了保证烧结过程顺利进行，改善烧结生产技术经济指标，对烧结原料的化学成分、粒度和水分等均应有一定的要求。含铁高的矿粉，对提高烧结矿的品位有利，所以一般要求：精矿的含铁量为 60% 以上（质量分数），且波动范围应在 1% 以内；富矿粉的含铁量为 45% ~ 50%（质量分数），含铁量波动也在 1% 以内。矿粉粒度过大，会降低烧结矿强度，对脱硫也不利，因此一般要求矿粉粒度在

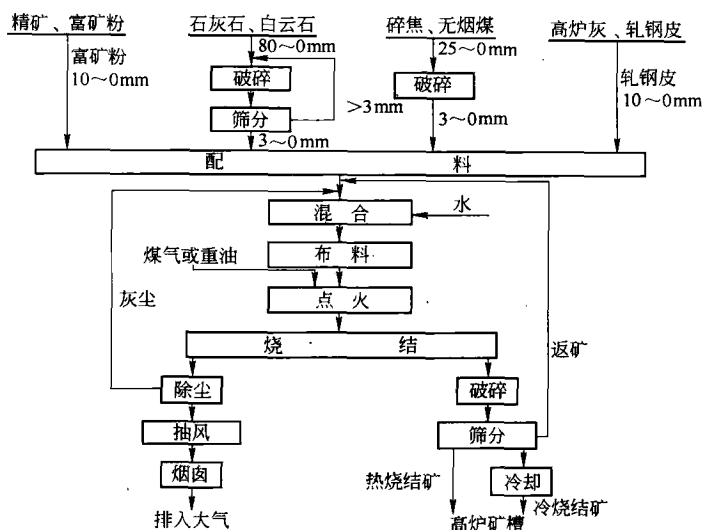


图 1-1 抽风烧结一般工艺流程

6mm 以下为宜。焦粉（或煤粉）和熔剂的粒度一般控制在 3mm 以下，过大或过小均不利于提高烧结矿产量和质量。烧结料含水分太高将影响整个烧结过程，通常控制在 10% 以内（质量分数）。

由于矿粉的含铁量和其他化学成分常有较大的波动，为了保证烧结质量均匀，成分稳定，以利于高炉冶炼，需要进行很好的配料和混匀作业。配料就是将各种烧结原料按其不同的数量比例进行配合。燃料配量一般不超过 6%，熔剂视碱度要求而定。配料设备采用圆盘给料机。配好的料运到混料机混合均匀，同时加水润湿造成小球，以改善烧结料层的透气性。当含铁料以细磨精矿为主时一般采用两次混合，以富矿粉为主时一般采用一次混合就可以了，其混料设备多采用圆筒混料机。

经过破碎、配料和混匀造球后的烧结混合料，随即运往烧结机头部，并由专用布料设备向台车箅面进行布料，布好的料层在通过煤气点火器下部时，即被点火抽风烧结。由于抽风机的作用台车下部风箱内产生一定的负压，这时大气中的空气被吸入料层，并使其中的燃料迅速燃烧而产生大量的热量，当温度达 $1200 \sim 1600^{\circ}\text{C}$ 时形成液相体系。在其后的冷却过程中，这些液相体系仍使矿粉固结成块。

烧结机是一条由许多金属结构台车密排而成的槽形链带，链带与

抽风箱之间是密封的。台车链带依靠传动装置驱动机头大齿轮运行，在机尾则靠摆架机构使台车下行时不发生碰撞。台车倾翻卸矿之后，倒置进入返回的下行倾斜轨道，并借车身自重滑行。轨道倾角一般为 3° 左右。当空载台车滑行至机头下部时，再由机头大齿轮将其依次啮合提升，并将车体又复反转过来恢复到受料位置再次接受布料。如此往复，连续作业。所得烧结矿经破碎、筛分和冷却处理后，便成为高炉成品烧结矿产品。产生的烧结废气由台车下部各抽风箱汇总进入集气总管，并在抽风机前部进行除尘处理之后由烟囱排入大气。

在烧结生产中准确地进行配料计算，是获得冶金性能良好的烧结矿的重要条件之一。

烧结配料计算，就是在一定的用料计划情况下，考虑到各种原料的搭配，根据已知的原料成分和规定的烧结矿成分（含铁量、 $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)$ 、S 及 MgO 含量等）确定合适的混合料配料比例。

烧结热平衡计算，就是在一定的烧结工艺条件下，根据已知的烧结矿成分，定量计算各项热量收入和支出的平衡关系及其各子项所占的比例数据，借以考察烧结矿生产过程中的热量利用情况，进一步确定改善热量利用和提高产品质量的技术途径。

1.1 烧结配料计算

正确进行配料计算和现场配料操作是保证烧结矿质量的关键环节之一。

1.1.1 烧结配料计算准备工作

配料计算前需做的准备工作有：

(1) 调查原料的种类（铁矿、熔剂、燃料、工业废弃物）、来源的可靠性和数量；

(2) 对各种原料均需取样分析化学成分，并测定烧损，还要测定其物理性质（物理水、粒度组成、密度等）；

(3) 了解炼铁车间对烧结矿主要成分(TFe、MgO、碱度)的要求；

(4) 对各原料化学成分、分析数据进行数据处理，凡是原料成分分析出的各氧化物的质量分数之和不是 100%，都需进行处理，最后使其成为 100%。表 1-1 为原料成分的数据处理计算表。

注意：在计算化学成分中各氧化物之和时，在分析时，对有的成分，化验出的结果只报出了某元素，这时需将报出的元素折算成该元素的化合物（见表 1-2 中列出的元素在烧结料中存在的形态）后，再进行各化合物总和的计算。

表 1-2 烧结原料中某些元素存在形态

原料名称	元素名称	该元素存在形态
精矿、富矿粉	硫[S]	FeS_2 或 SO_3
焦 粉	硫[S]	有机 S；少部分 FeS
石灰石	硫[S]	$[\text{SO}_3]$
焦 粉	铁[Fe]	FeO

注：磷在所有原料中均以 P_2O_5 形态存在。

数据处理方法之一：用原料成分中的各氧化物的质量分数之和 99.643，分别去除分析得出的各元素或化合物的质量分数，再乘以 100%（例如 $(61.22 \div 99.643) \times 100\% = 61.44\%$ ），就得到经数据处理后的质量分数。

数据处理方法之二：该方法是按化验的允许偏差范围表 1-3，变动分析结果，最后使各氧化物（或化合物）质量分数之和为 100%。变动分析数据应符合下表中所示的各元素或化合物的允许误差范围。

表 1-3 烧结原料各组分分析误差允许范围表

组 分	TFe	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	P	S
允许误差/%	± 0.5	± 0.3	± 0.25	± 0.4	± 0.25	± 0.05	± 0.005	± 0.005

若分析数据相差太大，要查是分析问题，还是原料本身的特殊情况，属哪种原因造成。

1.1.2 烧结配料计算基本原则

烧结配料计算的基本原则有：

- (1) 各原料有计划搭配使用，合理利用矿物资源；
- (2) 力求烧结矿成分满足炼铁车间提出的要求；
- (3) 烧结矿具有足够的机械强度和良好的还原性。

1.1.3 烧结配料计算方法

烧结配料计算方法有联立方程算法、分析算法等。

1.1.3.1 联立方程算法

首先规定烧结矿的含铁量、碱度和燃料量。含铁量取决于原料品位；碱度主要取决于高炉炉料结构中配加烧结矿后使高炉可以实现不加石灰石的要求；燃料配用量则主要是通过试验或者参照类似生产条件进行确定。然后根据“物质守恒”原理，按不同成分的平衡关系列出一系列方程并求解。这些方程主要是：

按 Fe 的平衡可列方程（以单位质量烧结矿计）

$$w(\text{Fe})_{\text{烧}} = \sum w(\text{Fe})_i \times i \quad (1-1)$$

按碱度的平衡可列方程

$$RO \times \sum w(\text{SiO}_2)_i \times i = \sum w(\text{CaO})_i \times i \quad (1-2)$$

按 MgO 的平衡可列方程

$$w(\text{MgO})_{\text{烧}} = \sum w(\text{MgO})_i \times i \quad (1-3)$$

上列式中， $w(\text{Fe})_{\text{烧}}$ 和 $w(\text{MgO})_{\text{烧}}$ 为烧结矿 Fe 及 MgO 含量（质量分数）； RO 为碱度； i 为单位质量烧结矿的有关原料用量（如矿粉、石灰石、白云石及燃料等）； $w(\text{Fe})_i$ 、 $w(\text{SiO}_2)_i$ 、 $w(\text{CaO})_i$ 及 $w(\text{MgO})_i$ 为各原料中相应成分之含量。

列出的方程式数应同求解的未知数相等。为了简化计算，有些原料用量可预先确定（如燃料、白云石等），以下举例说明。

A 联立方程算法一

例 1 某烧结厂的原料成分如表 1-4 所示，根据生产经验使用表 1-4 中所列原料时，100kg 干混合料配入燃料量为 5kg，白云石 8kg，炉尘 9kg，要求烧结矿的碱度 $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2) = 1.8$ ，计算出：

- (1) 100kg 干混合料中粉矿和石灰的干料用量各是多少 kg；
- (2) 将计算出的结果和原来已知的原料用量，按各原料的物理水含量，换算成湿料配入；
- (3) 计算出烧结矿的全铁质量分数，烧结矿中硫的质量分数。

表 1-4 烧结原料化学成分

原料 名称	各化学成分的质量分数/%														物理水 /%	
	TFe	Mn	P	S	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Mn ₃ O ₄	P ₂ O ₅	SO ₃	烧损	Σ	
粉 矿	48.43	0.31	0.51	0.41	55.60	12.26	6.10	14.31	2.03	3.03	0.43	1.17	1.00	5.1	100	5
炉 尘	38.10		0.02	0.1	43.10	10.20	10.63	12.60	1.32	2.65		0.045	0.25	19.50	100	11
石 灰	0.37			0.01	0.53		51.30	2.37	0.44	2.58			0.025	42.77	100	3
白云石							29.00	1.30	2.50	19.00				48.20	100	2
无烟煤							1.16	9.87	6.41	0.48				82.10	100	7.0

注:无烟煤的灰分含量为 17.93%;灰分中 $w(\text{SiO}_2) = 55.10\%$, $w(\text{CaO}) = 6.48\%$, $w(\text{MgO}) = 2.67\%$, $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 35.75\%$ 。表中所列的无烟煤中 CaO、SiO₂、Al₂O₃、MgO 的质量分数为无烟煤中灰分的质量分数 17.93% 分别与灰分中的 CaO、SiO₂、Al₂O₃、MgO 的质量分数相乘而得(例如 $17.93\% \times 55.10\% = 9.87\%$, 其他计算与此相同)。

解:

(1) 根据表 1-4 中数据和本例已确定的已知数, (燃料量 5kg/100kg 干混合料, 碱度 $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2) = 1.8$, 白云石 8kg/100kg 干混合料; 炉尘 9kg/100kg 干混合料), 可列出方程式 (1-4)、式 (1-5):

设粉矿用量为 $X\text{kg}$, 石灰用量为 $Y\text{kg}$

$$X + Y + 5 + 8 + 9 = 100 \quad (1-4)$$

$$\frac{Xw(\text{CaO}) + Yw(\text{CaO}) + 5 \times w(\text{CaO}) + 8 \times w(\text{CaO}) + 9 \times w(\text{CaO})}{Xw(\text{SiO}_2) + Yw(\text{SiO}_2) + 5 \times w(\text{SiO}_2) + 8 \times w(\text{SiO}_2) + 9 \times w(\text{SiO}_2)} = 1.8 \quad (1-5)$$

将表 1-4 中数据代入式 (1-5) (其中的 $w(\text{CaO})$, $w(\text{SiO}_2)$ 为各原料的 CaO 和 SiO_2 的质量分数) 并化简得:

$$X + Y = 78 \quad (1-4a)$$

$$\frac{6.10X + 51.3Y + 5 \times 1.16 + 8 \times 29 + 9 \times 10.63}{14.3X + 2.37Y + 5 \times 9.87 + 8 \times 1.3 + 9 \times 12.60} = 1.8 \quad (1-5a)$$

$$X + Y = 78 \quad (1-4b)$$

$$19.64X - 47.034Y = 21.8 \quad (1-5b)$$

解方程组, 得:

$$X = 55.35 (\text{矿粉用量}) \text{ 干基}$$

$$Y = 22.65 (\text{石灰用量}) \text{ 干基}$$

(2) 现将计算出的矿粉用量、石灰用量与已知的无烟煤用量、白云石用量、炉尘用量, 按照它们的物理水含量换算为该原料的湿料配比, 其计算如表 1-5 所示。

表 1-5 烧结矿生成量和各原料湿料配比计算

原料名称	粉矿	石灰	白云石	炉尘	无烟煤	Σ
100kg 干混合料各原料用量/kg 或干配比/%	55.35	22.65	8	9	5	100
各种原料的烧损/%	5.10	42.77	48.20	19.50	82.10	
各原料生成的烧结矿量 ^① /kg	52.527	12.963	4.144	7.245	0.895	77.774