

炼铁工艺

LIANTIE GONGYI JISUAN

计算

那树人 编著

冶金工业出版社

炼铁工艺计算

那树人 编著

北 京
冶金工业出版社
1999

内 容 提 要

本书主要内容包括炼铁工艺计算中的配料计算、物料平衡计算、热平衡计算及炼铁焦比等计算的意义、方法和算式,并配有例题计算予以说明。为指导使用计算机进行工艺计算,介绍了计算程序的编制及有关的计算框图。本书还围绕属于工艺计算内容的某些炼铁中常见的问题,如理论燃烧温度、富氧鼓风对高炉生产的影响、渣铁热焓计算、高炉区域热平衡及其计算中的“内热问题”以及高炉焦比与直接还原度的联合计算等,作出系统的论述和算式推导。修正了炼铁工艺计算中某些不够正确的观点或错误,介绍本书作者提出的一些比较先进实用的计算方法、原则。本书力求使炼铁工艺计算原理正确,方法新颖,计算简捷。本书作为钢铁冶金专业炼铁学课程的辅助教材,也可供炼铁设计、高炉生产操作和科学研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

炼铁工艺计算/那树人编著. —北京:冶金工业出版社,
1999.7

ISBN 7-5024-2333-8

I. 炼… II. 那… III. 炼铁-计算 IV. TF512

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 10892 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 董学经 美术编辑 王耀忠 责任校对 刘倩

北京梨园彩印厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1999 年 7 月第 1 版, 1999 年 7 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 8.125 印张; 218 千字; 251 页; 1-2500 册

25.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64013877

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

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

序 言

高炉炼铁工艺计算一向得到炼铁工作者的重视和关注，它对促进炼铁的教学、科研、设计、生产等起着重要作用。那树人教授长期从事钢铁冶金专业课的教学工作，致力于炼铁工艺计算方面的研究，取得了很好的成果。他完善和简化了一些复杂繁琐的炼铁工艺计算过程，修正了计算中某些错误的观点和计算，提出一些比较先进实用的方法、原则，介绍计算机程序的编制及有关计算框图，指导使用计算机进行工艺计算。在高炉区域热平衡计算中，他提出的方法简便、正确，关于“内热”的概念新颖、形象，揭示出高炉热交换的基本实质。在炼铁焦比计算中，采用“分解计算”的方法和煤气相对利用率的概念，清晰地解决了理论焦比与实际焦比之间的联系问题。那树人教授治学严谨，开拓创新，他提出的一些新的计算方法和新的观点，丰富了炼铁工艺计算，促进了炼铁技术的进步。

那树人教授结合自己长期的教学与科学研究的实践，撰写了多篇学术论文，在各级专业刊物上发表。在此基础上系统总结、精心雕琢，编写了这本《炼铁工艺计算》。全书行文流畅，条理清楚，概念准确，计算正确，把炼铁工艺计算推进到更为科学、更趋完善的程度。相信本书的正式出版无疑会成为从事炼铁事业人们的良师益友，也使炼铁工艺计算面目一新。

东北大学教授，博士生导师

杜鹤桂

1998.10.2 于沈阳

前 言

尽管高炉炼铁的历史很悠久,炼铁的工艺计算多属初等计算,但其计算内容多,计算工作量大,计算过程复杂繁琐,因而在以往的工艺计算中存在着这样那样的缺点甚至错误。本人长期从事钢铁冶金专业的教学工作,对炼铁工艺计算非常关注,且很有兴趣。本人多年来致力于炼铁工艺计算的研究,在国内有关刊物和本院学报上发表论文二十余篇,内容多是围绕炼铁工艺计算方面的工作成果。为了系统总结和完善炼铁工艺计算,为教学、设计、科研和生产服务,本人特编著了此书。

本书第一稿于1993年2月完成并作为讲义刊印,用于本院教学,收到良好效果,其后又对其作了多处修改补充,增添了一些新的内容,最终完成《炼铁工艺计算》的编写并正式出版。

本书侧重于常用的炼铁工艺方面的计算,力求概念清晰准确,原理正确无误,方法简捷实用。在工艺计算中,该繁则繁,宜简则简,务求使本书成为炼铁工艺计算领域的有力工具。本书中以下内容是本人有所创新,或者说与其它文献不同的,这里提出以飨读者:

1. 矿石相对与绝对氧化度的概念,矿石氧化度与还原度的关系及计算;
2. 配料计算的实质,计算框图,现场某些不够正确计算的修正;
3. 直接还原度 r_d 的三种算法,用矿石含氧量及煤气成分计算 r_d 是宜于现场采用的简便有效的方法;
4. 鼓风含氧量、富氧率的正确算式,富氧鼓风对高炉冶炼影响的有关计算,碳素燃烧率及燃烧率系数的计算,鼓风动能的规范及几种算式;
5. 炉渣三元系相图的直角坐标表达,由此可准确计算炉渣矿物组成及其数量,物质热焓的正确算式,渣铁热焓及成渣热的计算;

EAA66/05

6. 高温区热平衡计算方法,高炉区域热平衡计算中的“内热”问题,含有内热因素的区域热平衡算式可以简化,高炉高温区热交还的实质;
7. 理论燃烧温度的三种算法,风温、煤比、富氧率变化对理论燃烧温度影响的计算,由理论燃烧温度计算限界喷煤量;
8. 用“分解法”计算焦比,由高炉高温区热平衡与浮士体间接还原的化学平衡列出方程,进行焦比与直接还原度的联合求解;煤气相对利用率的概念,实际焦比与理论焦比之间的联系,其它焦比计算方法的评介。

本书初稿曾请东北大学杜鹤桂教授审阅,杜先生提出了许多宝贵意见,并为本书写了序言,作者对此表示衷心的感谢。

本书初稿的计算机打字、排版、绘图等工作,得到了王军、赵团、张胤等几位老师的大力支持、帮助,对他们为本书的出版所付出的辛勤劳作表示深深的谢意。本书的正式出版,得到了一些厂矿领导和同行的大力资助,作者在这里表示衷心的感谢。

本人真诚希望,本书的正式出版能对炼铁工艺计算做出应有的贡献。

由于作者学识水平有限,书中还会存在着不足或错误之处,诚望读者赐教指正,本人不胜感谢。

那树人

1998.12. 于包头钢铁学院

目 录

第一章 原料成分的整理计算

1 元素存在的形态	1
2 矿石成分的补齐和平衡计算	3
3 计算程序设计	6
4 关于矿石氧化度的计算	10

第二章 配料计算

1 炉渣碱度的确定	16
2 元素在生铁、炉渣与煤气中的分配	17
3 配料计算方法	19
4 配料计算的几个有关公式	28
5 现场采用的几项计算	30
6 配料计算程序设计	44

第三章 直接还原度的计算

1 碳素平衡图	48
2 直接还原度 r_d 的计算	50
3 氢的还原度 $r_{i(\text{H}_2)}$ 的计算	55
4 关于煤气利用率的计算	56
5 算例	57

第四章 物料平衡计算

1 物料平衡计算的准备	63
2 物料平衡计算	64
3 高炉富氧鼓风的有关计算	74
4 鼓风动能的计算	84
5 物料平衡计算程序的编制	88

第五章 热平衡计算 (1) —— 全炉热平衡的计算

1 第一种全炉热平衡的计算	91
---------------------	----

2	第二种全炉热平衡的计算	98
3	两种热平衡计算方法对比表	103
4	热平衡指标的计算	106
5	关于平均热容及焓的计算	108
6	关于化学反应的热效应	125
第六章 热平衡计算 (II) —— 高温区热平衡的计算		
1	确定高温区的原则	127
2	高温区热量收支项目	129
3	高温区热平衡计算	130
4	讨论	134
5	热平衡计算程序的编制	135
6	高炉区域热平衡计算中的“内热”问题	136
7	关于理论燃烧温度的计算	143
第七章 炼铁工艺计算例题		
1	炼铁设计的工艺计算例题	157
2	某厂一号高炉热平衡测定的有关计算	179
第八章 炼铁焦比的计算		
1	炼铁焦比的工程计算	194
2	焦比同直接还原度的关系	203
3	其它焦比计算方法的评介	208
4	高炉焦比、直接还原度及炉顶温度的联合计算	217
5	炼铁设计的工艺计算程序	238
附 录		
附表 1	空气中饱和水蒸气含量	245
附表 2	各种气体的焓	247
附表 3	炼铁常用化学反应热效应对照	250

第一章 原料成分的整理计算

在进行炼铁工艺计算时，需要用到完整的物料化学成分，但是现场给出的成分往往是不全的。比如铁矿石（天然矿或者烧结矿）给出的成分常常只有 Fe、Mn、P、S 等元素含量和 FeO 、 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 等几种化合物含量，直接用它们计算会造成较大的误差。因此，要进行准确的工艺计算，必须对给出的原料成分进行再加工计算，把原料成分补齐并平衡成 100%。

1 元素存在的形态

进行原料成分的补齐和平衡计算，首先要明确物料中各种元素存在的形态，只有将它们存在的形态确定后，才可能根据化学式作定量计算。

要确定元素存在的形态，应该了解掌握矿物学的有关知识。在补齐成分时，将复杂化合物按其组成分解为简单化合物，按简单化合物进行计算。

1.1 铁矿石

一般的天然矿中硫多以硫化物 (FeS_2 黄铁矿) 存在，有时也有硫酸盐（如 CaSO_4 ）。磷是以磷酸盐（如 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ）形态存在。对于含有硫酸盐、磷酸盐的矿石，在其成分表中应有 SO_3 、 P_2O_5 项。

天然矿中的锰可能以软锰矿 (MnO_2)、硬锰矿 ($k\text{RO} \cdot l\text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ，其中 RO 可能以 CaO 、 MgO 、 BaO 或 MnO) 形态存在，填写成分表时以 MnO_2 形式出现，其它的像褐锰矿 (Mn_2O_3)、黑锰矿 (Mn_3O_4) 较少。

对于人造富矿，因烧结或焙烧过程有脱硫作用，矿石中的硫以 FeS 形态存在，烧结矿或球团矿中不存在 FeS_2 。在人造富矿中锰仅以 MnO 形态存在。

对于含铜的矿石，天然矿中铜可能以黄铜矿 (FeCuS_2) 形态存

在，填写成分表时分别写成 FeS 、 CuS 两项。

对于含钒钛的矿石，钛可能以钛铁矿 (FeTiO_3)、金红石 (TiO_2) 形态存在，而钒则以 V_2O_5 存在。

对于某些生矿的烧损项，如果未指明是结晶水（如褐铁矿）而且数量不多时，可按 CO_2 （碳酸盐）处理；如果较多，可按先满足与其中的 CaO 及 MgO 结合的 CO_2 ，其余为结晶水这样处理。

对于烧结矿，如果烧结时配碳较多，可能有残碳存在，但在冷却过程中少量残碳能够烧掉，计算时可不考虑有烧损。若未指明是残碳，亦可按 CO_2 处理，特别是烧结矿碱度较高时，因熔剂配量较多，石灰石分解不完全，有 CO_2 存在是可能的。

1.2 焦炭

按以往的炼铁工艺计算，要求给出焦炭全分析成分，它们是：

- 1) 固定碳 (C)；
- 2) 灰分 (A)，其中有 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 FeO 、 FeS 、 P_2O_5 等；
- 3) 挥发分 (V)，其中有 CO_2 、 CO 、 H_2 、 N_2 、 CH_4 等；
- 4) 有机物 (O)，其中有有机氢、氮、硫等；
- 5) 游离水 (H_2O)。

前面四项为焦炭的干基分析含量，它们应满足

$$\text{C} + \text{A} + \text{V} + \text{O} = 100\%$$

湿法熄焦焦炭含有的游离水是外算的，它不包含在干基成分之内。

焦炭中的硫绝大部分以有机硫形态存在，少量硫以 FeS 形态存在。硫是焦炭的有害杂质，为表明焦炭质量的好坏及计算方便，焦炭的全硫含量常常单独给出。

$$\text{S}_{\text{全}} = \text{S}_{\text{有机}} + \text{FeS} \times 32/88 \quad (\%)$$

要对焦炭做上述成分的全分析是比较麻烦而困难的，也并非十分必要。现在焦炭生产厂家定期提供的分析成分包含以下项目：

- 1) 固定碳 (C)；
- 2) 灰分 (A)，其中有 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO ……；
- 3) 挥发分 (V)；

4) 全硫 ($S_{\text{全}}$);

5) 游离水 (H_2O)。

以及焦炭的氢、氮元素分析 (H^f 、 N^f)。

作为焦炭的干基分析应有如下关系

$$\text{固定碳 } C = 100 - \{A + V + S\}$$

此式虽非十分准确, 但能简化焦炭分析程序, 适应现场生产实际需要, 对炼铁工艺计算无大的影响, 这也是炼铁能源测定工作规定和允许的^[1]。

焦炭灰分中的铁应以 FeO 形态存在 (实际上是 Fe_2SiO_4 硅酸铁), 但往往给出的是 Fe_2O_3 , 这是在做焦炭分析时, 由于加热碳素燃烧而将其氧化成 Fe_2O_3 , 因此在整理焦炭成分时需将 Fe_2O_3 折算回 FeO 。

1.3 煤粉

高炉喷吹燃料的煤粉是种复杂的碳氢化合物, 一般给出的工业分析 (干基) 有含碳量 (有的亦称固定碳) 及灰分、挥发分、硫、水分含量, 有时也用到煤粉的碳、氢、氧、氮、硫的元素分析。这里应该提及的是煤粉工业分析的含碳量与元素分析的碳素含量两者是不同的, 要注意它们的使用。

由于喷煤数量不多, 而且煤粉制备时又将其加热烘干, 煤粉的含水量至多 1% 左右, 为简化计算, 可将煤粉中的 H_2O 按化合水处理。

2 矿石成分的补齐和平衡计算

为便于应用计算机进行工艺计算, 有必要将使用原料的化学成分列成规范的表格。表 1-1 列出普通铁矿石可能含有的成分。

表 1-1 矿石成分表 (样表)

项 目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
成 分	TFe	Mn	P	S	Fe_2O_3	FeO	CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3
项 目	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
成 分	MnO	MnO_2	FeS	FeS_2	SO_3	P_2O_5	CO_2	H_2O	Σ	游离水

2.1 矿石成分的补齐计算

以烧结矿为例, 给出的成分是 TFe、Mn、P、S 四种元素的含量及 FeO、CaO、MgO、SiO₂、Al₂O₃ 等五种化合物的含量。补齐成分的计算如下:

1) 由 Mn 计算 MnO $MnO = Mn \times 71/55$

2) 由 P 计算 P₂O₅ $P_2O_5 = P \times 142/62$

3) 由 S 计算 FeS $FeS = S \times 88/32$

如果矿石中含 SO₃ 则应预先给出, 这时要计算 SO₃ 中的硫量, 再从总硫量中扣除, 然后计算 FeS 含量。

4) 由 FeO、FeS 及 TFe 计算 Fe₂O₃

$$Fe_{(FeO)} = FeO \times 56/72$$

$$Fe_{(FeS)} = FeS \times 56/88$$

Fe₂O₃ 中的铁量为

$$Fe_{(Fe_2O_3)} = TFe - (Fe_{(FeO)} + Fe_{(FeS)})$$

Fe₂O₃ 含量则为

$$Fe_2O_3 = Fe_{(Fe_2O_3)} \times 160/112$$

经过以上计算, 烧结矿 (或者球团矿) 的成分就补齐了。如果是天然矿应由 Mn 计算 MnO₂, 由 S 计算 FeS₂, 计算方法是类似的。对于天然矿石的烧损项 (第 17、18 两项), 应注意矿石的种类, 可能同时含有 CO₂ 和结晶水。

2.2 矿石成分的平衡计算

矿石成分补齐后要求和。表 1-1 中第 1~4 项为元素含量, 第 5~18 项为化合物含量 (元素含量寓于化合物之中), 第 19 项为组成矿石的各种物质之和, 因此它应为

$$n_{19} = \sum_{i=5}^{18} n_i$$

一般说来, 补齐后的矿石成分之和 (n_{19}) 常常是不等于 100% 的。如果用这样的成分作后面的工艺计算, 会产生较大的误差。因此, 要对矿石成分进一步加工, 把它们平衡成 100%。

这里首先要对补齐后的矿石成分作判断, 看看原始数据是否可

靠。如果 $|100 - n_{i9}| > 3\%$ ，这表明该种矿石的化验分析是不够准确的，偏差过大，应该重新分析；如果 $|100 - n_{i9}| \leq 3\%$ ，则表明偏差较小，在允许的范围内，可以进行矿石成分的平衡计算。

矿石成分的平衡计算通常有两种方法：

(1) 按各组分的分析误差进行调整。采用这种方法时，尽量用造渣各组分的分析误差来调整，因为分析中各造渣组分的相对误差（表 1-2）比 TFe 的大，同时它们对物料平衡中矿石用量及热平衡中铁氧化物分解（或还原）耗热影响较小^[2]。

表 1-2 矿石成分的分析误差范围（%）

成 分	TFe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	P	S
误 差	±0.50	±0.30	±0.25	±0.40	±0.25	±0.05	±0.005	±0.005

当各组分之和小于 100% 时，按正偏差调整，调整后仍不足 100%，可把偏差归为烧损项；如果各组分之和大于 100%，则按负偏差调整。

对焦炭灰分分析亦可采用此法调整（参考文献 [2]）。

用这种方法调整成分是比较合理的，但只适用手算，人为凑成的因素较重。

(2) 按矿石各组分均衡扩大或缩小。这种方法就是把误差均衡地分摊在各项组分上，其计算式是

$$n'_i = n_i / n_{i9} \times 100\%$$

式中 n_i —— 平衡前的各项成分含量，%；

n'_i —— 平衡后相应项成分含量，%。

采用这种方法调整矿石成分，看起来计算量较大，但若采用计算机计算还是很方便实用的，计算结果也十分精确。当采用前一种方法，有时会出现误差大于分析误差的情况，这时还需用这种方法予以调整。此外还需注意，无论采用哪种方法，当矿石中化合物项含量变动后，相应的元素含量亦要随之变动，只有这样矿石的成分才是正确的。

2.3 煤气成分的调整

现场的工艺计算中要用到高炉煤气成分，而煤气分析中常常含有 0.2%~0.4% 的 O_2 ，有时高达 0.8%。这部分 O_2 不是高炉煤气本身含有的，而是由取样或分析时带入的，同时也带入了一部分 N_2 ，因此需要把它们扣除，然后再调整成 100%^[3]。

[例题 1] 取样分析后煤气成分为 (%)

CO_2	CO	H_2	CH_4	N_2	O_2	Σ
14.9	28.9	1.2	0.6	54.2	0.2	100

煤气成分的调整计算：

$$0.2\% \text{ 的 } O_2 \text{ 带入的 } N_2 \text{ 量为 } 0.2\% \times 79/21 = 0.75\%$$

扣除带入的 O_2 、 N_2 后剩余成分为 $100 - 0.2 - 0.75 = 99.05(\%)$

因此： CO_2 含量 = $14.9/0.9905 = 15.0(\%)$

$$CO \text{ 含量} = 28.9/0.9905 = 29.2(\%)$$

$$N_2 \text{ 含量} = (54.2 - 0.75) / 0.9905 = 54.0(\%)$$

调整后煤气成分为 (H_2 、 CH_4 含量少，无大变化)，%

CO_2	CO	H_2	CH_4	N_2	Σ
15.0	29.2	1.2	0.6	54.0	100

3 计算程序设计

包括原料成分整理计算在内的炼铁工艺计算，计算数据量庞大，计算项目众多，计算过程繁杂，而且前后互相联系相互影响。采用人工手算的方法既花时间，耗费精力，又不容易正确无误。如果某些数据选取不够合理，或因中间发生错误，需要返工重新计算。因此，炼铁工艺计算使用计算机就十分必要而迫切了。

3.1 计算程序包含的内容

一般说来，高炉冶炼使用矿石种类较多，矿石成分需要整理计算。而高炉使用的燃料（焦炭和煤粉）单一，其成分又较简单，在程序里可不安排它的计算。

矿石成分整理计算程序应该包含：

- (1) 根据矿石种类的不同，进行不同的成分补齐计算；
- (2) 矿石成分累加求和，并对原始数据的合理性进行判断，把可以调整的矿石成分平衡成 100%；
- (3) 根据高炉冶炼的要求进行配矿，求出综合（或混合）矿石成分，以备后续工艺计算使用。

3.2 计算程序编制原则

使用计算机进行工艺计算，重要的问题是计算模型和计算框图的编制。计算所用的数学模型是计算的根柢，它关系到计算是否正确合理，这要求计算者对炼铁工艺计算有清楚透彻的了解，并能很好掌握计算机语言。计算框图是计算程序的骨架，它表明计算机运行的顺序和计算的内容。计算框图的合理性关系到计算程序的合理性。因此，在编制计算程序之前，要根据计算内容设计出正确的计算框图，再根据框图编制计算程序。

矿石成分计算程序可设立矿石成分数组，采用循环语句编制。矿石成分数组的容量依据所用原料的种类和所含成分的数目确定。通常用数组的行表示矿石的种类，数组的列表示矿石的成分。高炉冶炼若使用熔剂，熔剂亦应占据相应的行列。为满足配矿的需要，矿石成分数组要多设一行。

由于人造富矿与天然矿所含成分是不完全相同的，计算程序要有判断矿石种类（是生矿还是熟矿）的功能，以便施行不同的计算。一个比较简便的方法就是用结晶水含量项（如表 1-1 第 18 项）作判别项，对于熟矿该项等于零，而对于生矿可先赋予较大的数值（注意：生矿的真实烧损项含量先写入 CO_2 含量项中）。

3.3 计算框图

假定高炉使用普通矿石冶炼，矿石中不含有特殊元素。所用的矿石有烧结矿、球团矿、天然富矿及石灰石，它们的成分按表 1-1 形式排列。这种情况下，矿石成分整理的计算程序可参考图 1 编制。

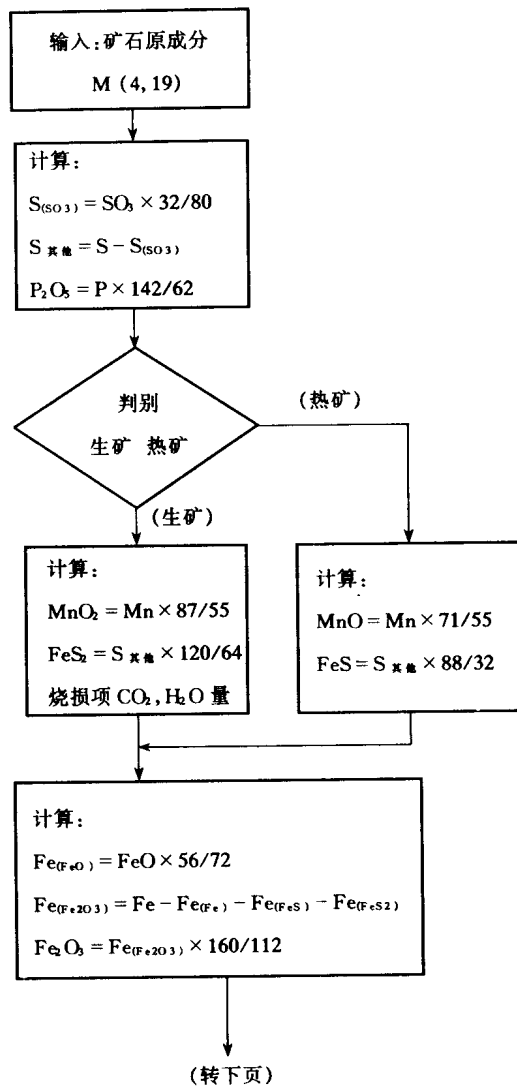
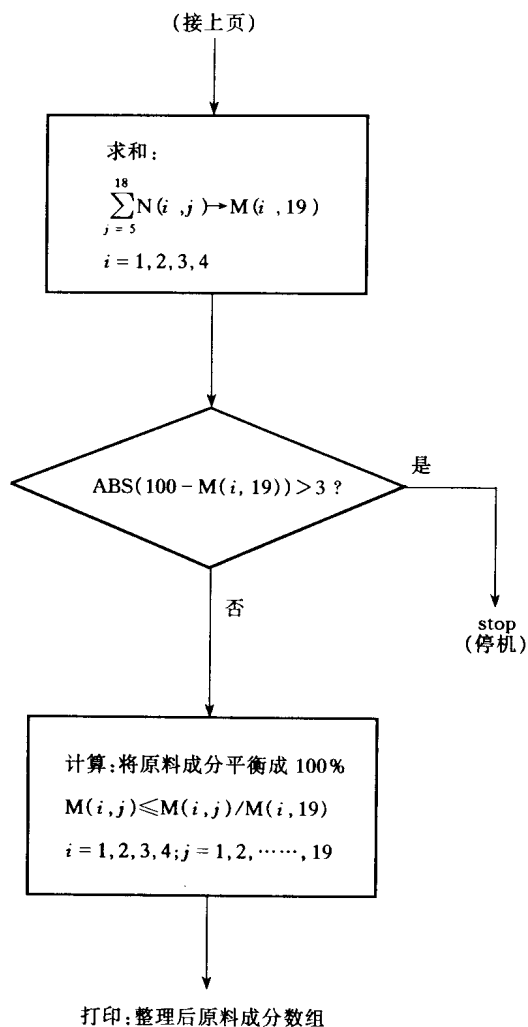


图 1 矿石成分



整理计算框图