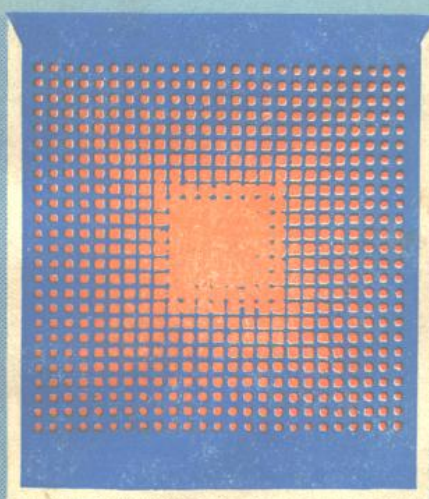


现代高炉过程的 计算分析

[苏] A. H. 拉姆 著

王筱留 徐建伦 译



冶金工业出版社

76.2115
327

现代高炉过程的计算分析

[苏]A.H.拉姆 著

王筱留 徐建伦 译

zk553/01

冶金工业出版社

内 容 简 介

本书较详细地介绍了作者所创立的高炉过程计算方法(即拉姆联合算法),该算法是以物料平衡和热平衡,以及考虑综合鼓风参数的影响后的经验公式为基础的。书中分析了炉料性能、间接还原发展程度、冶炼强度、煤气压力、鼓风温度和湿度、富氧率以及喷入炉缸和炉身的各种还原性气体等重要工艺参数对高炉冶炼指标的影响。

本书的阅读对象是从事高炉生产的工程技术人员和科研工作者,对钢铁冶金以及相应专业的研究生、高年级学生是一本很有价值的参考书。

本书译自苏联冶金出版社1980年出版的A.Н.Рамм教授所著的СОВРЕМЕННЫЙ ДОМЕННЫЙ ПРОЦЕСС(ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ)一书。

现代高炉过程的计算分析

(苏)A.Н.拉姆 著

王筱留 徐建伦 译

*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 11 字数 287 千字

1987年 11 月第一版 1987年 11 月第一次印刷

印数00,001~3,100册

统一书号: 15062·4410 定价3.25元

前 言

在最近几十年内，高炉生产的技术，如同黑色冶金的其他领域一样，以前所未有的速度向前发展着。高炉日产量超过万吨，利用系数高于 2.5 吨/米³·昼夜，焦比低于 400 公斤/吨生铁等创纪录的指标，对于30年前最有远见的专家来说也属于梦想。在这些成就的基础上和世界年产量以接近5亿吨/年的速度增长的情况下，预言高炉冶炼在短时间内将被非高炉冶炼法——直接还原代替而损失其生命力是不现实的，至少是为时过早的。

近年来，在世界工业先进国中，苏联的炼铁生产在产量上占第一位，在冶炼指标方面亦名列前茅。

最近几十年中，使高炉冶炼指标取得显著改善的主要措施为：（1）精料，首先是矿石的高度精选，使高炉冶炼的渣量降低到 $200\sim 300$ 公斤/吨生铁，其次是采用熔剂性烧结矿和球团矿的炉料结构，从而取消石灰石入炉；（2）向炉缸喷吹各种代替焦炭的还原性物料；（3）提高风温至 $1200\sim 1350^{\circ}\text{C}$ ；（4）富氧到风中含氧 $30\sim 40\%$ ；（5）提高炉顶煤气压力达到 $150\sim 250$ 千帕。

本书试图就上述和其他一些因素对高炉冶炼结果的影响进行系统分析，并尽可能详尽地概括和综述这方面的生产经验和研究成果。

本书对各种因素影响的计算分析尤为重视。作者过去曾创造了高炉过程计算法（即拉姆联合计算法——译者注），这种方法在苏联的科研单位和设计院的研究和设计工作中得到广泛应用，但至今由于印刷发行的限制，广大科技人员和专家很少能获得这一计算手册，从而希望再版发行。在本书的第一篇中作者阐述了这个方法，并作了某些必要的改进。对于不同生产条件和操作制度下的现代高炉，该方法的计算结果与生产实际结果很吻合。这样可以认为这种计算方法可作为预测手段，用于评价未试验过的操

作制度的高炉冶炼效果。

作者对本书文稿的准备和出版作过各种帮助的苏联黑色冶金部副部长B.A.樊契科夫，列宁格勒加里宁工学院炼铁教研室B.Г.曼钦斯基教授、K.K.斯柯琴副教授、高级研究员Л.А.别亚洛依和E.И.拉依赫等同人，以及技术科学副博士Я.Б.卡尔毕洛夫斯基等表示深切的感谢。

本书第十三章是同Я.Б.卡尔毕洛夫斯基合写的。

译 者 的 话

苏联科学技术博士，列宁格勒工业学院冶金系教授 A.H.拉姆是苏联著名的炼铁学者。他一生从事炼铁生产、设计、教学与科研工作，发表了大量有关高炉过程及炼铁原理的论文与专著。早在三十年代中期，拉姆教授从热力学基本原理出发，结合高炉过程，研究高炉物料平衡与热平衡，创立了高炉联合配料算法。这一算法被世界各国高炉工作者在炼铁生产的设计、教学与科研工作中广泛应用，并誉为“拉姆算法”。之后，随着炼铁生产工艺技术的发展与更新，拉姆教授不断补充、完善与发展这一算法，并对影响高炉过程主要判据的各种新的技术与工艺因素及时做出科学的计算与分析。这对高炉生产实践发展起到极为重要的理论分析与指导作用。

五十年代末，当第一代电子计算机刚进入工业应用阶段，拉姆教授率先着手应用电子计算机进行高炉过程计算、分析与控制的研究。随着苏联天然气资源的大量开发与应用，他积极倡导高炉喷吹天然气；在同时研究采用富氧鼓风技术可促使高炉大幅度增产基础上，他在六十年代初提出高炉综合鼓风新概念，并详尽地从理论计算上分析了综合鼓风技术对高炉过程变化的有利影响，提出了确定各项喷吹与鼓风参数的计算依据，为顺利地发展高炉喷吹新技术作出了重大的贡献。

拉姆教授自六十年代起就悉心研究高炉炉身喷吹裂化燃料及再生高炉煤气循环喷吹新技术。他所领导的列宁格勒工业学院炼铁教研室，三十多年来在炼铁还原扩散动力学及机理探讨方面做了大量创造性的理论与实验研究工作，受到国际炼铁界的重视，其研究成果得到广泛的引用。

拉姆教授晚年所著《现代高炉过程的计算分析》（苏联冶金出版社1980年出版）一书是他毕生科研成果的结晶。该书的出版

对高炉工作者学习、了解与掌握现代高炉生产技术的理论与实践无疑有极大的帮助。

在高炉过程计算，高炉冶炼指标的确定，各种因素对高炉冶炼结果影响分析，直接还原与间接还原发展，冶炼强度以及目前广为发展的高炉喷吹新技术等重大理论与实际问题上，本书综合评论了近二十年来各种有关文献的报道，详尽地阐明了作者从事上述方面研究的丰富的创造性的理论成果，并列举大量科学计算公式数据与图表以及生产试验验证的结果。

译者三十年前曾直接受到拉姆教授多年的学业上的培养与指导，深感他治学严谨，研究造诣极深，诲人不倦。因而，向国内炼铁科技工作者介绍拉姆教授晚年著作，译者以为既是作为作者学生的一种责任，亦想对我国高炉生产的理论研究与实践起到一些促进作用。

本书第一部分四章及第二部分前六章由王筱留同志翻译，第二部分后三章及结论由徐建伦同志翻译，王筱留同志作全书译文总校对。

译 者
一九八三年八月

主要符号

符 号	含 义	单 位	
		国际单位制	工程单位制
$c_{O_2}, c_{CO_2}, c_{H_2O}$	双原子气体、 CO_2 和 H_2O 的平均比热	千焦耳/米 ³ ·°C	千卡/米 ³ ·°C
CO_2, CO, H_2	炉顶煤气中各组分的数量	米 ³ /公斤生铁	米 ³ /公斤生铁
CO_2, CO, H_2	炉顶煤气中各组分的含量	小数, %	小数, %
$\overline{CH_4}, \overline{C_2H_6}$	往炉缸喷吹的气体的组分含量	小数, %	小数, %
$\overline{CO}, \overline{H_2}, \overline{CO_2}$	往炉身喷吹的气体的组分含量	小数, %	小数, %
$(\overline{C}), (\overline{H}), (\overline{O})$	喷吹燃料中各组分的总含量	米 ³ /米 ³ (公斤)	米 ³ /米 ³ (公斤)
C_K, H_K, N_K	焦炭中各组分的含量	公斤/公斤, %	公斤/公斤, %
$[C], [P]$	生铁中各组分的含量	公斤/公斤, %	公斤/公斤, %
$(CaO), (FeO)$	炉渣中各氧化物的含量	公斤/公斤, %	公斤/公斤, %
C_O	焦炭中气化碳的数量	公斤/公斤生铁	公斤/公斤生铁
C_ϕ	风口前燃烧的焦炭中的碳量	公斤/公斤生铁	公斤/公斤生铁
C_ϕ	同 上	公斤/公斤炉料	公斤/公斤炉料
C_d	直接还原消耗的碳量	公斤/公斤生铁	公斤/公斤生铁
C_d	同 上	公斤/公斤炉料	公斤/公斤炉料
CO_1, H_{21}	间接还原消耗的 CO 和 H_2 量	米 ³ /公斤生铁	米 ³ /公斤生铁
CO_1, H_{21}	同 上	米 ³ /公斤炉料	米 ³ /公斤炉料
CO_2, H_{22}	进入间接还原区的 CO 和 H_2 量	米 ³ /公斤生铁	米 ³ /公斤生铁
e	理论出铁量	公斤/公斤炉料	公斤/公斤炉料
Φ	熔剂消耗量	公斤/公斤生铁	公斤/公斤生铁
Φ_m	同 上	公斤/公斤炉料	公斤/公斤炉料
φ	形状系数	—	—

续表

符 号	含 义	单 位	
		国际单位制	工程单位制
Fe, P, CaO	元素和氧化物的数量	公斤/公斤生铁	公斤/公斤生铁
Fe, P, CaO	元素和氧化物在炉料中的含量	公斤/公斤, %	公斤/公斤, %
t_d	扣除风中水分分解耗热后热风的焓	千焦耳/米 ³ 干风	千卡/米 ³ 干风
t_c	进入风口燃烧带的焦炭中碳的焓	千焦耳/公斤	千卡/公斤
t_ϕ	风口煤气的焓	千焦耳/米 ³	千卡/米 ³
t_s	喷吹燃料的焓	千焦耳/米 ³ (公斤)	千卡/米 ³ (公斤)
k	干焦比	公斤/公斤生铁	公斤/公斤生铁
O_I, O_{II}, O_{III}	从易还原氧化物, FeO 和难还原氧化物中夺取的氧量	公斤/公斤生铁	公斤/公斤生铁
O_R	从被还原氧化物中夺取的总氧量	公斤/公斤生铁	公斤/公斤生铁
O_d, O_i	直接和间接还原夺取的氧量	公斤/公斤生铁	公斤/公斤生铁
p_K, p_p, p_ϕ	炉顶、炉腰和风口水平面处的煤气压力	千帕	大气压, 公斤/厘米 ²
p	高炉产量	吨/昼夜, %	吨/昼夜, %
q_c	焦炭中碳在风口前燃烧放出的热量	千焦耳/公斤 C_ϕ	千卡/公斤 C_ϕ
q_{c_d}	直接还原消耗的碳给出的热量	千焦耳/公斤 C_d	千卡/公斤 C_d
q_{CO}, q_{H_2}	CO, H ₂ 间接还原时放出的热量	千焦耳/米 ³	千卡/米 ³
q_s	喷吹燃料给出的热量	千焦耳/米 ³ (公斤)	千卡/米 ³ (公斤)

续表

符 号	含 义	单 位	
		国际单位制	工程单位制
q_0'	炉料放出气体带走的热量	千焦耳/公斤生铁	千卡/公斤生铁
$\bar{q}$	热当量	千焦耳/公斤炉料	千卡/公斤炉料
$\bar{q}_{\kappa \cdot \phi}$	考虑熔剂需要后的焦炭的热当量	千焦耳/公斤焦	千卡/公斤焦
Q_0'	有效热消耗	千焦耳/公斤生铁	千卡/公斤生铁
$Q_{\text{P} \cdot \phi}$	不计焦中硫和灰分造渣的有效热消耗	千焦耳/公斤生铁	千卡/公斤生铁
$Q_{\text{K} \cdot \phi}$	焦炭中硫和灰分造渣的有效热消耗	千焦耳/公斤焦炭	千卡/公斤焦炭
$Q_{\text{s} \cdot \phi}$	喷吹燃料中硫和灰分造渣的有效热消耗	千焦耳/公斤燃料	千卡/公斤燃料
Q_e, Q_u	生铁和炉渣的焓量	千焦耳/公斤	千卡/公斤
r_d	M·A·巴甫洛夫定义的直接还原度	—, %	—, %
R_d, R_i	直接和间接还原从氧化物中夺取的氧量	—, %	—, %
$\bar{R}_d, \bar{R}_i$	直接和间接还原从炉料中夺取的氧量	—, %	—, %
$\overline{RO}$	游离碱性氧化物的含量	公斤/公斤炉料	公斤/公斤炉料
s	喷吹燃料消耗量	米 ³ (公斤)/公斤铁	米 ³ (公斤)/公斤铁
s_1	向炉缸喷吹的气体燃料量	米 ³ /公斤生铁	米 ³ /公斤生铁
s_2	向炉缸喷吹的液体或固体燃料量	公斤/公斤生铁	公斤/公斤生铁
s_3	向炉身喷吹的气体量	米 ³ /公斤生铁	米 ³ /公斤生铁
t_d, t_r	风温和炉顶煤气温度	°C	°C
O_N	炉料碳酸盐中CO ₂ 的氧量	公斤/公斤生铁	公斤/公斤生铁

续表

符 号	含 义	单 位	
		国际单位制	工程单位制
t_{s1}, t_{s2}, t_{s3}	喷吹燃料的温度	°C	°C
t_{reop}	理论燃烧温度	°C	°C
u	理论渣量	公斤/公斤炉料	公斤/公斤炉料
U	相对渣量	公斤/公斤生铁	公斤/公斤生铁
v_d', v_r'	风量和形成的风口煤气量	米 ³ /公斤C _φ	米 ³ /公斤C _φ
$\overline{v_d}, \overline{v_r}$	同 上	米 ³ /米 ³ (公斤) 喷吹燃料	
v_d, v_r	同上(总和)	米 ³ /公斤C _φ	
V_d	干风消耗量	米 ³ /公斤生铁	
V_r	形成的干炉顶煤气量	米 ³ /公斤生铁	
V_r'	同上, 还包括间接还原形 成的水蒸气	米 ³ /公斤生铁	
w_C	焦炭中碳燃烧成 CO 放出 的热量	千焦耳/公斤C	
w_{CO}, w_{H_2}	CO氧化成CO ₂ , H ₂ 氧化成 H ₂ O时放出的热量	千焦耳/米 ³	
w_s	喷吹燃料在风口前燃烧放 出的热量	千焦耳/米 ³ (公 斤)	
$v_{p, \phi}$	炉料中矿石和熔剂部分的 体积	米 ³ /吨铁	
W	炉顶煤气带走的热量	千焦耳/公斤生 铁	
Z	外部散热损失	千焦耳/公斤生 铁	
z	外部散热损失占炉缸总热 收入的部分	—	
α	CO参加间接还原的部分	—	
γ	气体的重度	公斤/米 ³	
$\gamma_s, \gamma_p, \gamma_{\text{ш}}$	焦炭, 矿石和炉料的堆比 重	吨/米 ³	

续表

符 号	含 义	单 位	
		国际单位制	工程单位制
Δ	直接还原多消耗的热量	千焦耳/公斤 C_d	
ε	炉料的空隙度	—	
θ	磁铁矿还原最佳温度 (第 六章)	$^{\circ}\text{C}$	
θ	煤气的绝对温度	K, K/273	
$\eta_{\text{CO}}, \eta_{\text{H}_2}$	CO和 H_2 的利用率	—, %	
$\eta_{\text{Mn}}, \eta_{\text{P}}$	元素回收率	—	
χ	气化碳量(第二章)	公斤原子碳/公 斤原子 O_R	
χ	直接还原多消耗的焦炭量 (第六章)	公斤焦/公斤 C_d	
λ	喷吹燃料的成分特性等于 $0.2(\bar{C}) + 0.9(\bar{H})$	米 ³ /米 ³ (公斤)	
ν	炉料金属化程度 $\text{Fe}_{\text{金属}}/$ $\text{Fe}_{\text{总和}}$	—, %	
ξ	H_2 和CO利用率比值	—	
ξ	炉料有效重量系数 (第七 章)	—	
σ	喷吹燃料量	米 ³ (公斤)/公斤 C_ϕ	
φ	鼓风湿度	米 ³ H_2O /米 ³ 干 风	
$\psi_{\text{CO}_2}, \psi_{\text{H}_2\text{O}}$	结晶水和 CO_2CaO 分解率	—	
ψ	阻力系数(第七章)	—	
χ	风口前燃烧焦炭的气化部 分 C_ϕ/C_0 (第二章)	—, %	
χ	循环系数(第十三章)	—, %	
ω	鼓风中含氧量	米 ³ O_2 /米 ³ 干风	

注：单位换算系数：1千卡=4.187千焦耳；1千卡/米²·时· $^{\circ}\text{C}$ =1.163瓦/米²·K；

1大气压=9.80665×10⁴帕≈0.1兆帕。

目 录

前言

主要符号

第一篇 高炉过程计算

第一章 计算方法发展的简要评述	1
1. 高炉冶炼的全炉热平衡	1
2. 区域热平衡	5
3. 按全炉和区域热平衡进行计算的可靠性	8
4. 高炉过程的动力学—数学模型	10
第二章 评价高炉内还原反应进程的准数	16
1. 准数的分类及其相互关系	16
2. 各准数的极限值	18
3. 利用不同准数计算焦比	20
第三章 参考资料	23
1. 热化学数据和热容	23
2. 烧结配料计算用数据	26
3. 高炉配料计算用数据	28
4. 焦比和炉顶煤气成分计算用数据	31
5. 产量计算用数据	44
6. 不同冶炼区域的高炉操作指标	44
第四章 高炉冶炼技术指标的确定	45
1. 联合算法	45
2. 简化算法	52

第二篇 各种因素对高炉冶炼指标的影响

第五章 物料因素	65
1. 富矿粉和精矿粉造块生产的熔剂性产品的应用	65
2. 矿石出铁量和脉石成分对焦比的影响	71
3. 焦炭矿物杂质的影响	74
4. 烧结矿和球团矿	76

5. 部分金属化的铁矿石和人造富矿的应用	82
第六章 直接和间接还原的发展程度	90
1. 直接还原发展程度对高炉冶炼的焦比和其他指标的影响	90
2. 理论上可能的最低焦比	92
3. 一氧化碳分解反应的影响	102
4. 关于格留涅尔原则	103
第七章 冶炼强度	110
1. 冶炼强度指数和它们之间的关系	110
2. 高炉内煤气的压头损失	111
3. 最高的冶炼强度	119
4. 冶炼强度对产量和焦比的影响	121
5. 冶炼强度对间接还原发展的影响	126
第八章 炉顶煤气压力	129
1. 压力对冶炼强度和产量的影响	130
2. 压力对焦比的影响	135
3. 压力对炉尘吹出量的影响	139
4. 压力对生铁成分的影响	140
第九章 鼓风加热	144
1. 鼓风加热引起的冶炼过程的变化	144
2. 鼓风加热对高炉冶炼指标影响的生产试验资料	149
3. 风温对高炉冶炼指标影响的计算分析	151
4. 炉缸喷吹补充燃料时鼓风加热的效果	161
5. 关于鼓风加热的极限和“最佳”范围	162
第十章 鼓风湿度的变化	168
1. 大气湿度	170
2. 鼓风湿度对高炉过程的影响	173
3. 鼓风湿度对高炉冶炼指标影响的实际生产资料	182
4. 鼓风湿度对焦比影响的计算分析	184
第十一章 富氧鼓风	188
1. 提高鼓风中氧浓度引起的高炉行程的变化	189
2. 试验性冶炼的结果	196
3. 富氧鼓风对高炉冶炼指标影响的计算分析	206

第十二章 向炉缸喷吹未转化燃料	209
1. 喷吹补充燃料对高炉行程的影响(概论)	210
2. 喷吹天然气	219
3. 喷吹焦炉煤气	250
4. 喷吹液体燃料	257
5. 喷吹粉状固体燃料	270
第十三章 向炉缸和炉身喷吹热还原性气体	283
1. 概述, 对热还原性气体参数的要求	283
2. 热还原性气体的制取方法	284
3. 工业性试验研究的结果	291
4. 喷吹热还原性气体时高炉冶炼的计算指标	307
结论	324
参考文献	327

第一篇 高炉过程计算

第一章 计算方法发展的简要评述

1. 高炉冶炼的全炉热平衡

创立高炉过程计算法,并将其用于以最大的可靠性预测给定冶炼条件下的全部冶炼指标,乃是过程理论的极重要课题。在新高炉及其辅助设备,以及整个冶金企业的运输和动力等的设计中,这些计算的作用是极关键的。近年来,在创立和发展高炉冶炼的新操作方法方面,例如鼓风富氧同时喷吹各种燃料和还原性物料,它的意义更大。用相当准确的计算来预测冶炼结果可提前得出最适宜的冶炼制度,并可取消费用昂贵的工业性冶炼试验,至少可以大大缩小试验研究的规模。鉴于目前正在进行高炉过程自动控制系统的研制,按各种渠道计算过程的动力学特性具有特别重要的意义,因为在生产高炉上通过实测来确定这些特性是相当困难的。

在计算确定的诸值中,焦比的意义最大,它始终是高炉冶炼的理论研究者和实际操作人员最关心的指标。计算这一指标的必要手段是过程的热平衡。

1839年G. 镑静最先试图描述“高炉内热量分配的状况”,为此他首次在费吉尔哈根的一座容积不大的木炭高炉上,对高炉炉身不同高度平面上的煤气成分进行了研究。在这第一个热平衡中炉料加热的温度取为 2000°C ,未考虑热风带入的热量和散热损失,过分缩小了还原耗热,而铁水和炉渣的熔化耗热则按收支的差值算出。这个热平衡的意义仅在于它相当正确地确定了炉顶煤气化学热值与所消耗木炭的热能之间的比值。

二十五年后,德·瓦特爾又完成了一个热平衡计算。尽管这

个热平衡也存在着一些错误，以及热化学数据不足和精确性较差，但是德·瓦特尔的计算对今后这个领域的研究工作起了不小的影响，因为他首次采用了“始态和终态”原则，根据这个原则，变化的热效应只与系统的始态与终态有关，而与变化所经历的途径无关。这样对还原反应可以分别用氧化物的分解热（热支出）和碳的氧化热（在热收入中与碳在风口前燃烧热一起计算）来计算其热效应。德·瓦特尔意识到他所采用方法的重要意义，因而在19年以后才出版的书中他还写明了自己的优先权，但又补充说明Л.贝尔和Л.格留涅尔“在他之后比他更好地”从事于这个问题的研究。

Л.贝尔完成的热平衡使用了较可靠的热化学数据并补充了德·瓦特尔热平衡中没有的热支出项目（铁以外的其他元素的还原，碳酸盐分解，冷却水带走的热量和散热损失等）。Л.贝尔认为碳酸盐分解是在高温下进行的，分解出来的 CO_2 被焦炭的碳所还原，由此消耗的碳量与碳酸盐中的碳量相等。焦炭中所有其余的碳，他称之为“风口前燃烧的碳”，部分形成一氧化碳以后还原氧化铁而转变成二氧化碳。因此他在热支出中列入渗入铁水的碳燃烧耗热和碳酸盐中 CO_2 还原耗热两项。这种计算的结果与采用始态和终态原则以来的结果并无差别（这个原则由德·瓦特尔创立，后来贝尔以至格留涅尔均延续使用）。在以后的研究工作中，贝尔广泛应用热平衡来分析比较不同自然冶炼条件下的高炉操作结果，以及各种因素对焦比的影响和节焦的各种可能性。

关于直接还原的作用问题，贝尔并没有提出明确的概念，格留涅尔第一个提出了这个问题。他创造了根据炉顶煤气成分确定直接还原耗炭的方法和根据碳氧平衡计算风量的新方法（在这之前一直使用碳氮平衡法）。如果不考虑热化学数据的更新和风量，煤气量由重量单位改为体积单位这两个方面，格留涅尔建议的热平衡编制法一直广泛使用至今，没有发生多大的变化。

几乎与格留涅尔同时P.奥盖尔曼建议了另一种编制热平衡的方法。它与前者的差别在于热收入项中计算的并不是碳在高炉内