

火焰炉理论

〔乌克兰〕B. И. 古宾斯基 陆钟武 著

郭伯伟 译



NEUPRESS
东北大学出版社

火焰炉理论

[乌克兰]B. И. 古宾斯基 陆钟武 著

郭伯伟 译

东北大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

火焰炉理论/[乌克兰]古宾斯基(Губинский В. И.), 陆钟武著; 郭伯伟译.
沈阳: 东北大学出版社, 1996. 12
ISBN 7-81054-188-9

I. 火… I. ①古… ②陆… ③郭… II. 火焰熔化炉; 有色冶金炉-理论 N. TF806.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 24187 号

©东北大学出版社出版

(沈阳·南湖 110006)

铁岭市新华印刷厂印刷: 东北大学出版社发行

1996 年 12 月第 1 版 1996 年 12 月第 1 次印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 8.125

字数: 211 千字 印数: 1~1000 册

定价: 15.80 元

中文版前言

本书是火焰炉热工理论方面的一部专著,其中反映了 B. И. 古宾斯基和我以及我们的同事们的部分研究工作。这些研究工作是结合生产实际进行的,其成果大部分已用于工业生产。书中不少章节,早已成为火焰炉热工方面专业课的重要教学内容。

本书的俄文版脱稿于 1992 年,译成中文的过程中,未作任何增减。所以书中没有包括近几年来的研究成果,没有列出新的参考文献。

B. И. 古宾斯基博士、教授,是乌克兰国家冶金大学(原名特涅泊尔彼得洛夫斯克冶金学院,俄文缩写为 ЛМетИ)冶金炉热工与生态教研室主任、中国东北大学名誉教授。他是独联体国家最著名的几位冶金炉专家之一。也许有的读者早就知道,他所在的这个教研室在冶金炉学科的形成和发展过程中,占有重要位置。大名鼎鼎的已故学者 И. Д. 赛米金、Н. Ю. 泰依茨教授,曾先后长期主持这个教研室的工作。而继他们之后,现在领导这个教研室的就是古宾斯基。

七年前,在乌克兰我同 B. И. 古宾斯基教授第一次见面,那是一般性的拜访。1991年10月,他随团来东北大学(原名东北工学院)访问。在他做学术报告和参观实验室之余,我向他具体地介绍了我们在炉子热工方面发表的论文和著作。由于兴趣相同,语言相通,所以谈得很投机。这时,他手头正好有些即将完成的书稿,于是他提出了合作写书的想法。达成协议后,我们两人便分头准备。1992年10月,我应邀再次去乌克兰访问,带去了我写的书稿,并在他召集的教研室会议上介绍和讨论了这部书稿的全部内容。事后,我们又有几次书信来往,以确定全书的目录编排等具体事宜。这就是我

们二人合作写这本俄文版书的起因和大致过程。

我本人,在大学期间,学的是化学工程,研究生期间才专攻冶金炉学科,后又扩展为热能工程学科。我当时的指导教师是前苏联政府派到我国任教的两位教授,先是炼铁学教授 H. Г. 马汉尼克,后来是冶金炉教授 B. И. 米特卡林纳依。研究生毕业后,又有幸得到来东北大学任教的另一位冶金炉专家 И. С. 纳扎洛夫教授的指导和教诲。本书俄文版的前言中提到我在50年代与前苏联教授的交往,就是指我的这一段经历。这三位导师都已先后故去。我借此机会对他们表示崇高的敬意和深切的怀念。

本书的绪论是 B. И. 古宾斯基教授执笔的,我只是事先给他寄去了一份补充性的书面材料,其内容在俄文版的绪论中得到了反映。在译成中文时,我对绪论中的这段文字只作了少量修改。本书的第一篇是我写的,因此无所谓翻译问题。但绝大部分篇幅仍是中俄文对应的,第二篇、第三篇的作者是古宾斯基教授,译者是东北大学郭伯伟教授。翻译工作是按照忠实于原文的原则进行的,工作认真细致,保证了翻译质量。为此,我和 B. И. 古宾斯基对郭教授表示衷心感谢。东北大学博士生吕琳同志参加了本书的一些翻译和稿件整理工作,在此也一并致谢。

本书的俄文版和中文版,是分别在俄罗斯联邦的莫斯科机械工业出版社和中国东北大学出版社出版的。这两个出版社对本书的出版给予了大力支持,克服了许多困难。我代表本书作者和译者对这两个出版社表示诚挚的感谢。

写一本火焰炉理论的专著,是件十分困难的事。我们虽做了很大努力,但缺点错误在所难免,望广大读者不吝赐教。对于任何批评意见,我们都热烈欢迎。

陆钟武

1996年7月

俄文版前言

炉子作为一种高温热工设备,是冶金生产的基础。在技术、环保和经济等方面,人们对它的要求与日俱增。

本书第一篇是中华人民共和国东北大学陆钟武教授撰写的,第二篇、第三篇的作者是乌克兰国家冶金大家(原名特涅泊尔彼得洛夫斯克冶金学院)古宾斯基(Губинский В. И.)教授。以往,这两位作者一直是各不相关地分头从事与本书有关的研究工作。在东北大学与乌克兰国家冶金大学按照两校合作协议,进行科技交流和相互讲学的过程中,两位作者才意识到,他们的科学兴趣相同,科研成果互补。

古宾斯基感谢他的导师泰依茨(Тайц Н. Ю.)教授和赛米金(Семикин И. Д.)教授以及乌克兰国家冶金大学冶金炉热工与生态教研室的同事们,在同他们多年共事的过程中,本书的思路才得以成熟。

陆钟武教授认为有必要提到,由于他在50年代与前苏联教授们的交往,所以他本人才领会了前苏联炉子热工学派的主要观点。由于他掌握了俄语,所以他才学懂了冶金炉方面的俄文文献。陆钟武教授在中国是广为人知的冶金炉热工专家。他是中国金属学会的副理事长,是日本关西大学的名誉博士。

莫斯科钢和合金学院冶金热物理和热工教研室主任克里范金(Кривандин В. А.)教授和该教研室的缅西科夫(Меньшиков Р. И.)副教授,以及扎巴罗夫斯基工业学院的列丰(Ревун М. П.)教授等,对本书提出了许多宝贵意见和建议,在此一并致以衷心谢意。

В. И. 古宾斯基

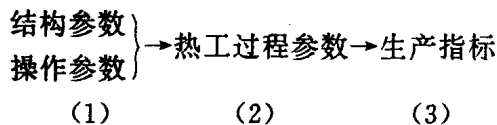
绪 论

20 世纪初格日迈洛(Грум-Гржимайло В. И.)奠定了火焰炉的理论基础。他强调要控制炉内气体的运动。这个基本观点在今天仍不失其实际意义。

在前苏联各位学者著作的影响下,炉子理论得以不断的发展,这些学者有:特涅泊尔彼得洛夫斯基的达布罗哈托夫(Дброхотов Н. Н.)、泰依茨(Тайц Н. Ю.)、赛米金(Семикин И. Д.)、果德法尔布(ГольдфарбЭ. М.)和罗森卡尔特(Розенгарт Ю. И.),莫斯科的格林科夫(Глинков М. А.)、伊万佐夫(Иванцов Г. Н.)和罗斯特科夫斯基(Ростковский С. Е.),叶卡捷琳堡的基塔耶夫(Китаев Б. И.)和他的学生们、季莫费耶夫(Тимофеев В. Н.)、涅夫斯基(Невский А. С.)、别洛夫(Белов И. В.)、卡瓦捷罗夫(Кавадеров А. В.)和什克利亚尔(Шкляр Р. Е.)等。欧美的学者在炉子理论的发展方面,也作出了重要的贡献,其中最著名的代表人物是荷兰国际火焰研究中心的创始人思林(Thrining M. W.)教授。

60年代格林科夫把炉子热工理论的研究工作概括为:“结合炉子的工作条件,相互联系相互制约地研究热交换、燃烧和气体运动等过程。”

本书作者之一陆钟武教授认为,火焰炉热工的研究对象是:在考虑生产工艺的前提下,研究下列(1)、(2)、(3)三类变量以及它们之间的相互关系:



炉子结构(几何形状、尺寸、筑炉材料的种类等)和热工操作(燃料

量、空气量、闸门开启度等)的变动,会影响到炉内的热工过程(传热、燃烧、气体运动),而热工过程的变动又会影响到炉子的生产指标(单位生产率、单位热耗、炉子使用寿命等)。人们的目的是提高生产指标,但人们所能直接规定或操纵的因素,既不是热工过程参数,也不是生产指标,而是结构和操作参数。所以重要的是,要在研究热工过程的基础上,弄清(1)、(3)两类变量之间的关系。

炉子的结构和操作之间,必须相互适应;各个热工过程之间也必须互相配合。同样,各生产指标之间也互相关联。在炉子热工理论的研究工作中,要十分重视同一类变量之间的相互关系。在其他条件不变的情况下,炉子生产率的变动将引起炉子热效率的变动。为了提高炉子热效率,炉子生产率波动必须限制在某一合理范围内。

研究炉子的最优化问题,不应孤立地着眼于炉子本身,还应包括炉子前后的设备,因为它们在生产流程中是相互关联的。如研究轧钢厂的加热炉,应该与轧机联系起来考虑。降低钢坯的加热温度,一方面能减少加热炉的燃耗,另一方面则会增加轧机的电耗。如降低加热温度并维持在合理范围内,可使加热炉和轧机的总能耗下降;如加热温度过低,就会使总能耗增加。所以应权衡得失,寻求最优方案。

炉子理论的目标,是使设计出来的炉子能符合全部工艺要求和生态学要求、具有先进的技术经济指标,也就是说炉子理论是炉子的设计理论。

炉子理论的主要手段是建立热交换和质交换相关热过程的数学模型。

就炉子理论的现状而言,常用的有代表性的计算方法有:被吸收性气体隔开的灰体和非灰体系统中的辐射热交换计算;在已知的线性或非线性外部热交换条件下,以求解导热微分方程式为基础,用数值法和解析法计算物料的加热;薄材和厚材加热的简化工程计算法;物料的层式计算法等。至于有限空间内的燃料燃烧和气

体运动过程的研究和理论概括工作,则至今较为薄弱,虽然在流股的流动以及气体和液体燃料的火炬燃烧方面,已经有了为数不少的实验数据。

用现代的计算机技术,已经能够同时进行火焰炉中的热交换和质交换计算。在用段法进行炉子的计算时,就可用这种方法。

在炉子计算中,广泛应用段法的障碍是,人们对炉膛中热交换和质交换过程方面的知识不足。段法的思想是先进的,但不易求得计算中所需要的气流速度和析热场数据,先进的想法与可能性之间存在着不适应性。

段法的数学模型至今还很少能把气流速度和燃料燃烧析热场的理论算法包括进去。因此,用物理模拟的方法来研究炉内温度场和气体循环,仍是炉子理论研究的现实方法。重要的问题是要把气体的冷态模型与炉子热工作的热态模型结合起来,研究它们之间的相互关系。作为一个实例,本书讨论了一座均热炉的综合实验方法和结果,其中既有水力模型实验,又有应用放射性示踪元素在火力模型上所做的实验。在综观炉子的物理模拟、工业实验以及复杂数模运算实验等结果的基础上,认为应该致力于开发简化的、工程技术的炉子数学模型,其中能考虑到燃料燃烧、气体运动和热交换等具体条件。本书就是这种处理方法的一个例子。

在炉子的工程技术算法中,近似地采用了两种理想的热量分布模型,即室式模型和层式模型。

在计算室式炉内热交换时,我们假设在整个炉膛空间内任何时刻的气体温度总是均匀的,这个温度可以是直接设定的,也可以通过炉子的热量计算出来。因此在室式模型中,或假设气体的混合速度为无穷大,从而使炉子空间内的热量分布绝对均匀,或假设燃料的供入和燃烧产物的排出都是均匀分布的。通常,出于结构上的考虑,炉子总是集中地供给燃料,集中地排出燃烧产物,因此,可以认为室式模型只是炉子自由空间内气体混合的理想化了的模型。

在进行直通式炉、顺流式炉和逆流式炉的传热计算时,采用一

维层式模型,其实质是:炉子呈通道状,其中气体连续不断地顺着通道流动。假设宏观上的气团一个接着一个,在不互相掺混的情况下,把前面的气团向前推进。在炉子的横截面上任意一点的气体温度都认为是相同的平均温度。这样,层式模型就是一种理想的模型,气体在其横向进行混合,纵向进行平推,也就是说炉内气体纵向的混合速度为零,而横向的混合速度为无穷大。

我们甚至可以将室式模型称为“理想掺混制度”,将层式模型称为“理想的平推制度”。而“理想掺混”和“理想平推”是我们从化学工艺学中借用来的术语。

炉子理论的任务之一,是研究可用来计算炉内热量传递净速率的简化的气体运动模型和气体的热工作模型。模型必须与实际条件相接近,但必须简单,使之在运算中只需要知道关于气体运动和燃料燃烧方面最基本、最重要的特性。

本书第二篇、第三篇,论述了把炉内气体介质和金属二者的温度场联系起来的工程算法,其中考虑了炉内气体的运动轨迹、气体的循环倍数、炉气的换向、火焰中燃料的燃烧速度等因素。这样就可以更自觉地去选择和寻找控制炉内温度场的方法,去评价炉子在调整热负荷分配时炉子工作的有效性。

在研究各种计算方法时,我们不得不在“更精确些”和“更简单些”二者之间作出选择。本书侧重于给出一种计算固体温度场的较省时的数值-解析法,它是与炉气和金属之间的一维热交换相关联的。

这种处理问题的简化方法,完全符合炉内热交换和质交换方面现有的科学知识水平,也完全符合解决实际问题的需要,即热量分配可调的炉子设计工作的需要。

本书讨论了一个可调火焰的例子,火焰的方向呈周期性的变化,从而使炉子自由空间内热量的分配能比较均匀。这种方法在上部单烧嘴均热炉上,就表现为煤气喷嘴可摆动的燃烧装置。因此,研究热量分配发生周期性变动情况下的不稳定气流问题,就成为

必需的了。

直通式加热炉的计算和调控的理论基础,是关于气流与运动中的固体层之间热交换的数学描述。运动层中物体的加热理论,还有待进一步研究,其中包括针对现代化多段直通炉的工作条件进行的研究在内。直通炉的计算方法,要估计到辐射热交换和对流同时存在的这个特点,估计到热源的作用和各段交界处气体的作用,因而也要估计到炉长方向上气体比热容的变化。炉子生产率和装料温度的波动,在轧钢生产中是很有代表性的,所以研究热过程的过渡过程的规律是很重要的。直通炉内气体运动层中物体加热计算的解析法和数值-解析法见本书第8章。

总之,现代炉子热工理论,一定要把热交换的研究工作同影响炉气中热量分配的各因素紧密地结合起来。在设计炉子时以及对其进行技术效果评价时都要考虑这些因素的作用。

目 录

中文版前言

俄文版前言

绪论

第一篇 火焰炉热工行为的研究(解析法和经验法)

第1章 炉子各段燃料分配固定不变的火焰炉热工行为 (2)

1.1 解析法 (2)

1.2 经验法 (9)

第2章 炉子各段燃料分配可变的火焰炉热工行为..... (14)

2.1 炉子模型..... (14)

2.2 数学模型..... (15)

2.3 计算结果及讨论..... (18)

第3章 火焰炉热工行为的实验研究..... (25)

3.1 在实验炉 A 上所做的研究工作 (25)

3.2 在实验炉 B 上所做的研究工作 (31)

第4章 火焰炉热工行为研究结果的工业应用..... (41)

4.1 在燃料分配固定不变的火焰炉上经验公式的应用
..... (41)

4.2 在燃料分配可变的火焰炉上研究结果的应用..... (44)

4.3 轧钢工序能耗..... (47)

4.4 加热温度与轧钢工序能耗.....	(52)
第一篇的参考文献	(55)

第二篇 估计气体循环的炉子热工

第5章 气体运动一维模型及炉气热工.....	(56)
-------------------------------	-------------

5.1 理想掺混流和理想平推流制度下的炉气热工.....	(57)
5.2 气体运动的循环制度 再循环倍数.....	(64)
5.3 估计气体循环和燃烧条件的炉气热工方程式.....	(69)
5.4 关于层式热交换原理对高温加热炉的适用性.....	(77)
5.5 沿气流内部对流和辐射热交换的作用.....	(82)

第6章 炉气热工的实验研究和炉膛内温度场的控制方法	(86)
---	-------------

6.1 炉气循环的研究任务和研究方法.....	(86)
6.2 上部单烧嘴均热炉内气体运动的模化.....	(98)
6.3 炉气热工的模化	(104)
6.4 均热炉沿长度方向温度场的控制	(108)
6.5 采用摇摆式烧嘴的均热炉	(112)

第7章 非移动厚材炉料在气流中加热的加热理论问题	(125)
--	--------------

7.1 气流中炉料加热理论研究的任务和方法	(125)
7.2 无析热条件下气流-非移动炉料体系中的热交换 精确解析解	(127)
7.3 非移动炉料的热交换计算方法	(133)
7.4 无析热条件下气流-非移动炉料体系中的热交换 近似解析解	(136)

7.5 有析热条件下气流-非移动炉料体系中的热交换	(143)
第8章 多段直通式炉内炉料在气流中加热的加热	
理论问题	(148)
8.1 问题的提出 (符号说明)	(148)
8.2 气相中有热量源和质量源的逆流稳定态热交换	(151)
8.3 在波动过程中多段炉的非稳定态热交换	(157)
 第三篇 估计气体循环及燃烧条件的炉子热工 和物料加热的数值-解析计算方法	
第9章 给定介质温度条件下物料加热的数值-解析	
计算方法	(163)
9.1 计算方法的实质和算法的建立	(164)
9.2 平板、圆柱体和球体的计算公式的推导 (初始温度为抛物线分布)	(170)
第10章 第2类边界条件下物体加热问题的数值-解析解法	
.....	(175)
10.1 单层平板 对称加热	(175)
10.2 无限长圆柱体 对称加热	(181)
10.3 单层平板 非对称加热或冷却	(182)
10.4 多层平板 非对称加热	(184)
10.5 有限长圆柱体	(186)
10.6 空心圆柱体	(188)
10.7 固体物料床层中的非线性热交换问题	(191)

第11章 估计炉气循环制度和燃料燃烧条件的炉子热工 数学模拟	(196)
11.1 有炉气循环和炉气换向的炉内对流加热模型	(197)
11.2 炉料对流加热的分析.....	(203)
11.3 炉料加热的辐射-对流模型	(208)
11.4 有气体循环和换向的均热炉热工.....	(216)
11.5 采用陶瓷换热器的均热炉热工.....	(224)
11.6 周期装料的热处理炉热工(理想掺混流制度下)	(234)
第二篇和第三篇的参考文献	(242)

第一篇

火焰炉热工行为的研究 (解析法和经验法)

炉子的热工行为是指炉子的生产指标随炉子的结构参数和操作参数变化的规律。在炉子结构一定的情况下,研究火焰炉热工行为的中心内容是炉子的生产率、热效率、单位热耗(都是生产指标)随热负荷(操作参数)变化的规律。

在研究火焰炉热工行为时,要注意区分炉子不同的供热制度。所谓供热制度,这里是指沿炉长方向各段的供热分配。它对炉子的生产指标有较大影响。本篇分别研究了两种不同供热制度下的火焰炉热工行为。

第一种供热制度——在炉长方向上炉子各段供热量的分配是固定不变的,即供热点的个数、位置以及各点供给热量的比例等都是固定不变的,它们都不随炉子的生产率的高低和热负荷的大小发生变化。凡是只有一个供热点,或虽有若干个供热点但它们都是联动操作的炉子,都只能实现这种供热制度。在这种供热制度下,炉子生产率的变动会使炉子热效率发生较大波动。

第二种供热制度——在炉长方向上炉子各段供热量的分配是可变的。操作者可以按照炉子生产率的高低去调整沿炉长方向的供热分配。凡是在炉子长度方向上有若干个供热点,而且它们各自的供热量都可以单独调节的炉子,都可以实现这种供热制度。在这种供热制度下,生产率的高低对炉子热效率的影响较小。

从理论上研究火焰炉的热工行为,要对结构和操作参数、热工过程参数和生产指标等三类变量进行综合的研究。用经验法进行研究,则不必涉及热工过程参数,直接以实测数据为依据,确定炉子的结构和操作参数(第一类变量)与生产指标(第三类变量)之间的关系。本篇所采用的研究方法,既有理论的,也有经验的。

本篇第1章既用解析法又用经验法,研究了第一种供热制度下火焰炉的热工行为。

第2章以一座多点供热连续加热炉的模型为对象,用数模法,研究了可以实现第二种供热制度的火焰炉热工行为。

第3章介绍了在中国东北大学热能工程系试验炉上进行的火焰炉热工行为的实验研究工作。

第4章是火焰炉热工行为研究结果的工业应用。

第1章

炉子各段燃料分配固定 不变的火焰炉热工行为

1.1 解析法

用解析法研究火焰炉热工行为的主要内容是:导出炉子热效率(或有效热)方程式和炉膛废气出口温度方程式。前者说明炉子的生产率、单位热耗与结构、操作之间的关系;后者说明炉膛系统中热交换终点温度与炉子工作状况之间的关系。

火焰炉热工行为的解析式是在建立炉膛热平衡和热交换联立方程式的过程中得到的。