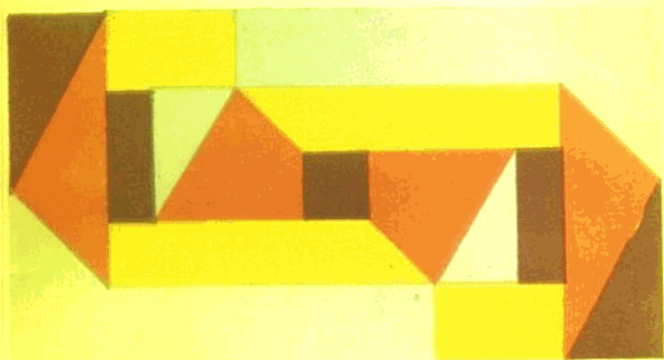
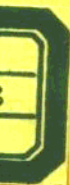




高炉冶炼过程控制模型

杨天钧 徐金梧 著



科学出版社

PDG



国家自然科学基金委员会资助出版

高炉冶炼过程控制模型

杨天钧 徐金梧 著

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书系统介绍高炉冶炼过程控制模型的基本理论和研究方法,侧重研究高炉冶炼过程数学模型和专家系统的基本规律。

作者根据近年来从事研究生教学和科学研究的体会及取得的成果,撰成此书。本书前四章分别讨论了四种高炉冶炼过程数学模型,即布料模型、软融带模型、煤气分布模型和炉体状态判断模型。第五章应用线性规划理论研究了高炉冶炼过程的多目标优化模型。后四章从专家系统和神经网络的基本知识入手,讨论了热状态判断专家系统、异常炉况判断专家系统和高炉冶炼过程专家系统的构成。本书的特点在于不拘泥于现代炼铁理论的工艺技术内容,而是重视炼铁理论与计算数学、线性规划、现代控制理论的结合,重视上述理论与高炉生产的结合,概念清晰,叙述细腻。

本书既是冶金过程控制理论的导论,又可作为进一步深入研究的出发点。可供从事钢铁冶金、热能工程和自动控制等领域研究工作的科研人员和工程技术人员参考,也可作为上述专业研究生、高年级学生和教师的教学参考书。

高炉冶炼过程控制模型

杨天钧 徐金梧 著

责任编辑 陈菊华

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1995年5月第 一 版 开本:850×1168 1/32

1995年5月第一次印刷 印张:7 1/8

印数:1—1050

字数:181 000

ISBN 7-03-004381-2/TF·31

定价:15.00 元

序 言

炼铁生产历史悠久，高炉技术源远流长。高炉炼铁同许多其他工业生产技术一样，也经历了一个由经验到理论，由低级到高级的发展过程。直至本世纪 20 年代初，高炉给人们的主要印象还不过是它那庞大的设备和巨大的生产能力，炼铁技术一直缺乏理论的指导，普遍被认为仅仅是以经验为主的冶金工艺。

进入 20 年代以后，情况发生了很大的变化。1927 年，P. 理查德提出炉料分层下降热传递分区模型；其后，又有 M. A. 巴甫洛夫和 A. H. 拉姆提出直接还原与间接还原概念以及高炉热平衡计算方法，B. I. 基泰耶夫提出高炉气固相热交换理论，A. 里斯特提出高炉操作线图，等等，奠定了炼铁理论的基础。人们一般认为，从 20 年代到 60 年代，是炼铁理论的一个重要发展时期。在这一时期，人们对铁矿石还原、炉料与气流运动、渣铁反应、热交换规律等等都有了比较深入的认识，建立起比较系统的经典炼铁理论。这一时期的理论中，已经有了不同形式的统计模型、操作线图、热力学模型和动力学模型，然而由于监测手段的不足和受到计算能力的限制，人们尚不能把这些理论工具付诸实际应用，通常仅能利用代数方程和图解进行理论上的阐述而已。

进入 60 年代以后，监测手段和计算能力的提高为炼铁生产的理论研究注入了新的活力。高炉解剖研究揭示出许多过去难为人知的炉内状况，新出现的计算机技术使得大规模非线性数据处理成为可能，数值解析方法促进了描述高炉状况的偏微分方程组的求解，……所有这些，导致了现代炼铁理论的出现。正是依靠现代炼铁理论的成果，炼铁工作者和自动控制专家才得以共同进行高炉冶炼过程控制模型的研究，并成功地把这些模型用于指导高炉的实际操作，取得了很好的效果。

高炉冶炼过程控制模型,概括起来,可以归纳为以下三种类型。

1. 高炉冶炼过程数学模型。

高炉冶炼过程是一个在高温条件下发生的包含了物理过程、化学过程与传输过程的复杂过程。在此过程中,存在着气(煤气)、固(炉料)、液(液态渣铁)三相之间复杂的化学反应与物理过程;同时,不论沿高炉的高度方向还是沿半径方向,都存在着不均匀性。针对这些特点,研究工作者应用质量和能量守恒定律建立起高炉热平衡方程与物质平衡方程,依据化学热力学原理建立起化学平衡方程,依据化学动力学原理建立起化学反应速率方程,依据冶金过程传输原理建立起气固液三相的传热、传质和传动量方程。把这些方程根据高炉生产的实际要求按不同目的进行组合,人们便得到了高炉冶炼过程的种种数学模型,如高炉布料数学模型、高炉软融带数学模型、高炉煤气分布数学模型、高炉炉体状态判断模型等。按照上述理论建立起来的这些高炉冶炼过程数学模型,当高炉炉况稳定时,与生产实际甚为一致,用于指导高炉操作有良好效果。

2. 高炉冶炼过程优化模型。

由上述第一类模型我们虽然可以发现高炉冶炼过程各种参数之间的某些依存关系,但由于高炉生产的复杂性,我们常常无法依据这类模型有充分根据地来说明过程的机理,也无法知道过程各参数之间关系式的具体形式。为克服这一困难,人们依靠由大量高炉生产数据找出的主要参数之间的统计规律,从统计模型出发,按照现代炼铁理论进行必要的数据处理,选择恰当的目标函数和约束条件,借助线性规划理论,建立起又一类高炉冶炼过程控制模型,即高炉冶炼过程优化模型。作为数学模型的补充,优化模型在高炉生产中有着广阔的应用前景。

3. 高炉冶炼过程专家系统。

高炉冶炼是在密闭状态下进行的,过程参数大多无法直接观测,人们只能间接测定过程的输入量和输出量来了解高炉冶炼过程和对过程进行监控。对于这样一个“黑箱”,高炉冶炼专家的实际操作经验和凭借现代炼铁理论所总结的操作知识是十分重要

的。从 80 年代中期开始,随着计算机科学的发展和计算机技术被大量应用于高炉冶炼过程,人们把人工智能的研究成果之一——专家系统引入高炉炼铁生产,建立起各种各样的高炉冶炼过程专家系统,以推动实现高炉冶炼过程的控制。所谓高炉冶炼过程专家系统实际上是一类计算机软件系统,它根据计算机科学中的专家系统与神经网络原理,依靠由优秀高炉冶炼专家提供的经验和知识所建立的知识库,凭借系统的推理机进行逻辑推理和判断,去模拟高炉冶炼专家解决高炉冶炼过程中出现的各种复杂问题的能力,从而对高炉生产进行操作指导。高炉冶炼过程专家系统的出现解决了最优秀的冶炼专家不能亲临各生产现场指导的难题,对于防止操作人员误判断,实现高炉控制的标准化和规范化,将起到关键性作用。

如上所述,高炉冶炼过程控制模型以现代炼铁理论、自动控制理论和计算机技术为基础,由低级向高级发展,正在日臻完善,而且逐步形成了自己的一套比较系统的理论,并在生产中得到日益广泛的应用。

本书前四章逐章分别讨论四种高炉冶炼过程数学模型,即高炉布料模型、高炉软融带模型、高炉煤气分布模型和高炉炉体状态判断模型,重点放在根据现代炼铁理论来建立这些模型的方法,即高炉热平衡方程、物质平衡方程、化学平衡方程、反应速率方程和传输方程,这些基本方程在不同应用目的下的组合和应用。第五章应用线性规划理论将传统的统计模型发展成一种多目标高炉冶炼过程优化模型,这可以看成是数学模型的发展与补充。后四章从专家系统和神经网络基本知识的介绍入手,以此为基础,讨论高炉热状态判断专家系统和高炉异常炉况判断专家系统,最后还介绍了高炉冶炼过程专家系统的构成与应用。

作者自 70 年代末开始从事高炉冶炼过程控制模型的研究和研究生教学工作,先后在德国的亚琛(Aachen)工业大学和蒂森(Thyssen)钢铁公司、瑞典钢铁公司(SSAB)以及我国的鞍钢、宝钢、首钢和武钢进行过研究工作和现场试验,所得模型实际应用

于高炉，取得了比较满意的效果。为了推进高炉冶炼过程控制模型在我国的科学研究和实际应用，作者结合在北京科技大学培养研究生的经验，总结自己从事这项研究工作的体会和已经取得的部分成果写成本书，目的在于向我国钢铁冶金专业和自动控制专业的工程师和教师以及研究生和高年级学生提供一本关于高炉冶炼过程控制模型的比较全面而系统的专著。由于国内尚未出版过这一课题的著作，作者认定本书应具有“入门书”的性质，因而全书重点放在根据基本理论阐明模型的构造方法以及给出必要的数学推导，对于模型在高炉上的实际应用只作了扼要介绍。又由于高炉冶炼过程控制模型这一领域目前正在飞速发展，建议读者阅读本书时不必拘泥于书中给出的结论，而应把注意力集中于书中阐述的分析研究方法。

作者在十多年的研究工作中曾先后在不同问题上和不同时期得到许多人的合作、帮助与支持，这里无法一一列出他们的劳绩，而只能提到他们的名字。北京科技大学的前辈杨永宣、倪学梓、徐业鹏、黄务涤和刘述临诸位教授向作者提出过不少有益的建议，有敦促指导之功；汪政富、魏华强、左广庆、杨世山、吴铿、张开旗、赵民革、段国绵、高小强、张建良、杨尚宝、刘文全等研究生参加了上述研究工作和现场试验，均极勤勉；周渝生、苍大强、丁玉龙等不但参加了研究工作而且还为本书提供了丰富的资料；德国亚琛工业大学 H. 古登纳(Gudenau)教授、蒂森钢铁公司 B. 柯塔斯(Korthis)博士、瑞典钢铁公司 J.-O. 韦兆祥(Wikstrom)先生、日本钢管公司有山达郎先生、新日铁公司高本泰先生、首钢刘云彩、武钢于仲洁、鞍钢安云沛及李安宁、宝钢吴学贤诸先生通力协助，每获切磋之乐。值此付梓之际，特致感激之忱！

本书第1章至第5章由杨天钧撰写，第6章、第7章由徐金梧撰写，第8章、第9章由杨天钧、徐金梧合作撰写。作者因学识所囿，疏漏之处在所难免，企望专家学者指正。

杨天钧、徐金梧 谨识

1993年10月

术语符号表

A	比表面积, 炉喉截面积	s	长度, 收缩率
c	浓度, 比热容	T	温度
c_p	比热	t	时间, 冶炼周期
D	直径	u	隶属度
d	粒度, 直径	V	体积, 速度
E	鼓风动能	V_n	炉容
F	生铁生成量	v	炉料运动速度
F_n	阈值	W	料流宽度, 出铁量
f	阻力系数	w	连接权值
G	质量流速, 重量	X	优化变量, 状态变量
g	重力加速度	x	料面曲线坐标, 重量百分数, 体积百分数, 当量系数
H	料层高度, 热焓	y	料面曲线坐标
H_{L}	换热系数		
H_T	综合负荷	α	炉腹角, 对流换热系数
h	高度, 深度	β	炉身角
l	冶炼强度	γ	料流阀开口度, 重度, 间接还原率
K	焦比	ΔH	生成热
k	比例系数, 修正系数, 形状系数, 导热系数, 阻力系数	ΔP	压降
k_s	传热系数	δ	修正系数
L	料层厚度, 距离, 深度	ϵ	空隙率
l	长度	η	百分含量, 利用率, 炉料压缩系数, 学习速率, 反应热分配系数
m	质量	θ	炉料堆角
n	反应级别	λ	充分性系数
O	矿石消耗量	$\bar{\lambda}$	必要性系数
P	压力, 煤气浮力, 产量	μ	摩擦系数, 粘度
Q	流量, 重量, 反应热, 均方差, 神经元的阈值	ρ	密度
Q_c	透气性指数	τ	突触时延
q	热流密度, 热流强度	ϕ	大钟倾角, 炉料形状系数
R	生成速度, 化学反应速率, 热阻, 相关系数, 渣铁比		
R_{Fe}	铁水生成率		
r	半径		
S	面积, 精度, 炉渣量		

目 录

序言.....	i
第一章 高炉布料数学模型.....	1
§ 1.1 高炉无料钟布料模型.....	1
§ 1.1.1 无料钟炉顶设备及开炉布料实测.....	2
§ 1.1.2 炉料运动和炉料分布的数学模型.....	3
§ 1.1.3 高炉布料预测模型的实际运行.....	8
§ 1.2 高炉炉料层状分布模型.....	10
§ 1.2.1 基本假设.....	10
§ 1.2.2 料面堆尖位置的计算.....	10
§ 1.2.3 高炉炉料料面堆角及炉料层状分布的计算.....	16
§ 1.2.4 高炉炉料层状分布模型的程序设计.....	24
§ 1.2.5 高炉炉料层状分布的模拟.....	26
第二章 高炉软融带数学模型.....	34
§ 2.1 高炉软融带监测方法.....	34
§ 2.2 炉料与煤气的质量平衡方程和传热方程.....	36
§ 2.2.1 基本假设.....	36
§ 2.2.2 基本方程.....	36
§ 2.3 炉料下降速度及边界条件的确定.....	40
§ 2.3.1 高炉每个圆筒截面重心及炉料下降速度.....	41
§ 2.3.2 上边界插值运算, 每个圆筒炉顶煤气成分及温度的求解.....	43
§ 2.4 由物料平衡和热平衡代数方程组计算软融带的形状与位置.....	45
§ 2.4.1 物料平衡计算.....	46
§ 2.4.2 热平衡计算.....	46
§ 2.4.3 H_2 利用率与 CO 利用率的关系.....	49
§ 2.5 高炉软融带数学模型及其应用.....	49

第三章 高炉煤气分布数学模型	53
§ 3.1 高炉煤气分布数学模型的建立	53
§ 3.1.1 散料床煤气运动方程——厄根方程	53
§ 3.1.2 高炉煤气分布的基本方程	54
§ 3.1.3 高炉煤气分布的边界条件	60
§ 3.1.4 炉料软化熔融条件下的范宁公式	61
§ 3.2 高炉煤气分布数学模型的有限差分方法	62
§ 3.2.1 计算网格的划分	63
§ 3.2.2 数学模型的差分格式	63
§ 3.3 高炉煤气分布数学模型的程序设计	69
§ 3.4 高炉煤气分布的模拟计算	70
第四章 高炉炉体状态判断模型	76
第五章 高炉冶炼过程优化模型	85
§ 5.1 高炉生产数据的采集与处理	85
§ 5.1.1 高炉生产数据采集	86
§ 5.1.2 高炉生产数据处理	88
§ 5.2 高炉冶炼过程优化方程	89
§ 5.3 高炉冶炼过程多目标优化模型的建立	97
§ 5.3.1 目标函数及优化变量、状态变量	97
§ 5.3.2 优化模型的约束条件	99
§ 5.3.3 多目标优化模型的结构	101
§ 5.4 高炉冶炼过程多目标优化模型的应用	104
§ 5.4.1 产量目标优化的运行结果	104
§ 5.4.2 成本目标优化的运行结果	105
§ 5.4.3 焦比目标优化的运行结果	107
§ 5.4.4 炉料品位目标优化的运行结果	109
§ 5.4.5 多目标综合优化的运行结果	110
第六章 专家系统基础	114
§ 6.1 专家系统的基本思想	115
§ 6.2 专家系统的基本结构	116
§ 6.3 专家系统比较理想的结构形式	117

§ 6.4 知识表示	119
§ 6.4.1 逻辑表示法	119
§ 6.4.2 规则表示法	121
§ 6.4.3 框架表示法	124
§ 6.4.4 语义网络	127
§ 6.5 知识的运用和处理	128
§ 6.5.1 逻辑推理	128
§ 6.5.2 搜索策略	131
§ 6.6 不精确推理	135
§ 6.6.1 模糊推理	136
§ 6.6.2 概率推理	140
第七章 神经网络	145
§ 7.1 神经网络的发展概况	146
§ 7.2 神经元与神经网络模型	147
§ 7.2.1 神经元结构	147
§ 7.2.2 神经元数学模型	149
§ 7.2.3 神经网络的基本类型	152
§ 7.2.4 神经网络的基本特征	154
§ 7.3 前向网络	155
§ 7.3.1 感知器	155
§ 7.3.2 多层前向网络和 BP 算法	156
§ 7.4 反馈网络	163
§ 7.4.1 Hopfield 网络	164
§ 7.4.2 双向联想记忆网络	167
§ 7.5 自组织网络	169
§ 7.6 神经网络的设计	172
第八章 高炉热状态判断专家系统	174
§ 8.1 高炉热状态判断参数选取及数据处理	175
§ 8.1.1 监测数据的平滑处理	176
§ 8.1.2 复合参数的计算	178
§ 8.1.3 特征参数的二次处理	179
§ 8.2 知识处理及知识库	180

§ 8.2.1 知识的处理	180
§ 8.2.2 知识库的构成	183
§ 8.3 推理机和不精确推理方法	185
§ 8.4 专家系统的知识自动获取(自学习)系统	187
§ 8.5 解释及显示功能	190
第九章 高炉异常炉况判断专家系统与高炉冶炼过程专家系统	193
§ 9.1 高炉异常炉况判断专家系统的构成	193
§ 9.2 高炉冶炼过程专家系统的发展	202
§ 9.2.1 川崎 AGS 系统的基本思路	202
§ 9.2.2 运行参数和变动量的逻辑关系	207
§ 9.2.3 专家系统运行参数和变动量的评价	211

第一章 高炉布料数学模型

高炉生产的目标是在尽可能长的一段炉龄时间(10年或更长)内生产出尽可能多的铁水,而且生铁质量要好,消耗要低,即要求优质、低耗、高产、长寿。高炉冶炼过程控制模型,归根结蒂,是用作判断炉况、指导操作,从而控制高炉冶炼过程实现上述高炉生产目标的手段。为了建立这样的控制模型,必须根据现代炼铁理论,探讨高炉内部铁矿石等原料和燃料的蒸发及分解和还原过程、渣铁反应以及燃料的燃烧和气化反应,研究高炉逆流散料床中的动量和热量的传输规律。具体到高炉操作上,则首先要搞清高炉内的布料规律、软融带性态、煤气分布规律以及生产高炉的炉体状态。因此,建立高炉内冶炼过程这种规律的数学模型,是建立一切过程控制模型的前提。

在现代化的大型高炉上,普遍采用无料钟装料设备,因为它比钟式装料设备和钟阀混合式装料设备布料方式更加灵活,更便于维修。有的高炉即使采用了钟式装料设备,但加装了炉喉导料板以改善炉料分布。本章讨论高炉无料钟布料模型和装有炉喉导料板的高炉炉料层状分布模型的建立。

§ 1.1 高炉无料钟布料模型

高炉无料钟装料设备布料灵活,可以实现环形、螺旋形、扇形以及定点等多种布料方式,而且高炉的上部调节手段灵活多样。然而,布料方式和布料参数的选择和确定将决定炉内炉料的分布状况并对煤气流产生影响。目前,对料面形状进行检测的装置尚不完善,通常是通过对煤气进行取样分析来对布料调节间接作出评价,因此,有必要研究无料钟布料时炉内炉料的分布规律,并开发

相应的预测模型。本节在开炉布料实测结果的基础上,针对无料钟高炉,研究炉料分布的预测模型,以实现对于炉内料面形状以及径向矿焦比分布的预测。

§ 1.1.1 无料钟炉顶设备及开炉布料实测

国内 1200m³ 级高炉无料钟炉顶设备一般采用并罐式结构,现在即以这种设备为例进行讨论。这种炉顶设备的有关参数和技术特点如下:单料罐容积为 22m³;料流阀为八角形,采用普通电磁阀和步进电机两种控制方式;布料溜槽长 3m(炉喉直径 6.4m),溜槽倾角正常工作范围 10°—55°,倾动速度每秒 0.18°—1°,旋转速度每分钟 8 圈;炉顶装有左右两个链锤式探尺,在炉喉处常装有十字形径向温度分布检测装置;装料程序由不同型号可编程控制器控制,也可以手动操作。

在开炉状态下,对于布料状况实际测定以下内容:1)料流阀排料时间;2)溜槽倾角及布料圈数;3)炉料运动轨迹;4)料面形状(堆尖位置、堆角等);5)径向粒度分布。

作者根据上述测定结果,进行数学处理,得到料流阀排料量(Q)与料流阀开口度(γ)之间有如下关系:

对于焦炭:

$$\begin{cases} Q = 0.0103\gamma - 0.1939 & (20^\circ \leq \gamma \leq 50^\circ) \\ Q = 3.374 \times 10^{-4} \gamma^{1.755} & (\gamma > 50^\circ) \end{cases} \quad (1.1)$$

对于矿石:

$$\begin{cases} Q = 0.0113\gamma - 0.2216 & (20^\circ \leq \gamma \leq 44^\circ) \\ Q = 3.363 \times 10^{-5} \gamma^{2.379} & (\gamma > 44^\circ) \end{cases} \quad (1.2)$$

两式中排料量或者说流量 Q 的单位是 t/s。

关于料面形状,实测结果表明,单环布料有如下布料规律:

(1) 在料面堆尖处和高炉中心处(即料面最低位置),料面轮廓线的切线斜率为零。

(2) 在高炉的中心侧,料面的内堆角(θ)除了与炉料的种类和特性(形状系数)有关外,主要与料线深度(h)有关。根据实测

数据进行回归计算,得到如下关系式:

对于焦炭:

$$\theta = 39.47 - 3.025h \quad (1.3)$$

对于矿石:

$$\theta = 41.13 - 2.984h \quad (1.4)$$

两式中内堆角 θ 的单位是度,料线深度 h 的单位是 m。

(3) 靠炉墙侧,料面的外堆角除了与炉料的种类和特性以及料线深度有关外,还与堆尖距炉墙的距离有关:堆尖离炉墙越近,外堆角越小。

测定炉料的径向粒度分布,采用了一种能够从整个料层厚度内取出炉料试样,而且可以保证其自然粒度分布状态的简单而实用的取样装置。对试样进行筛分分析的结果表明,单环布料的粒度偏析十分明显,粒度分布主要与堆尖位置有关,而且以堆尖为顶点近似呈抛物线分布,而抛物线的曲率则与原始粒度的组成及炉料在料面上的滚动距离有关。

使用同样的取样装置,还实测了无料钟高炉内矿焦混合层的形成状况。对矿石试样进行筛分分析,发现部分试样中含有少量焦炭,但其含量均在3%以下。这表明,当矿石装在焦炭层上面时,由于矿石的冲击作用而引起的焦炭层塌落现象并不明显。

实测结果还表明,沿径向的矿焦比分布主要与矿石和焦炭两者堆尖的相对位置有关,而且批重越小,这种依赖关系越明显。

5.1.1.2 炉料运动和炉料分布的数学模型^[1-3]

1. 炉料运动轨迹模型

高炉无料钟装料设备的简图如图 1.1 (图中单位为 mm)。炉料由料流阀口以速度 v_1 排出,在叉形斜溜槽内作加速运动,再以速度 v_2 斜抛进入锥形漏斗及中心喉管。当炉料离开中心喉管并与旋转溜槽碰撞时,运动方向发生改变,以初速度 v_3 在旋转溜槽内运动。到达溜槽末端,速度为 v_4 , 并以此速度布向炉内。

对炉料在无料钟装料设备中的运动进行分析,可以求出炉料

在旋转溜槽末端的运动速度及炉料重心的位置。

炉料离开溜槽后受重力及煤气阻力的作用。在炉料中直径小于 5mm 的粉末被筛除的情况下,煤气阻力可以忽略。炉料离开溜槽后的运动可以分解为沿 x 方向和 y 方向的匀速运动以及沿 z 方向的自由落体运动(见图 1.2)。在炉料离开旋转溜槽的瞬间,其重心(C)的 z 坐标位置为 z_0 , 在三个坐标方向上的速度分量分别为 $v_{x_0}, v_{y_0}, v_{z_0}$ 。设炉料从溜槽末端落到料面的高度为 h , 则炉料在空间下落运动的时间为

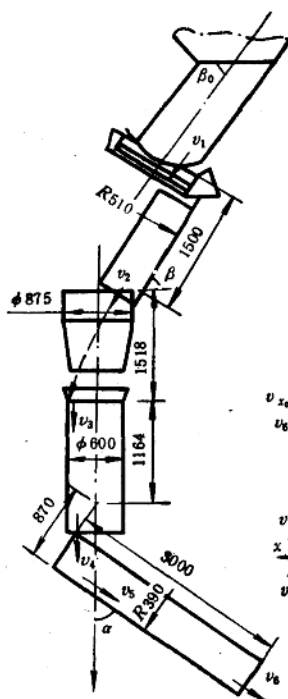


图 1.1 无料钟设备简图

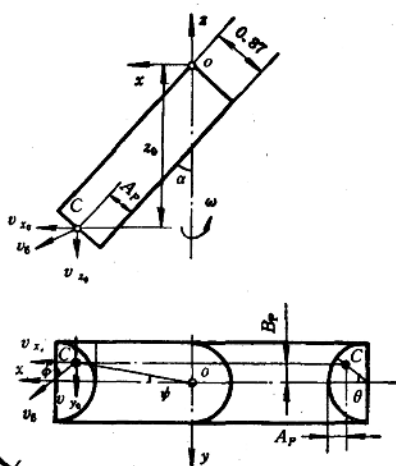


图 1.2 炉料离开溜槽时运动的示意图

$$t = (\sqrt{v_{x_0}^2 + 2gh} - v_{x_0})/g \quad (1.5)$$

式中 g 为重力加速度。

由于炉料在 x 和 y 两个方向都是作匀速运动，它在下落过程中沿 x 和 y 方向移动的距离分别为

$$x = v_{x_0} t \quad (1.6)$$

$$y = v_{y_0} t \quad (1.7)$$

由炉料在两个水平方向移动的距离，便可以求出炉料重心落点到炉心的距离 x_n 。

这样求出的炉料重心的落点位置，可以认为是主料流的落点位置。用同样方法，可以求出料流截面上任一质点的落点位置。选择图 1.3 中的任意三点 E, F, G ，其相应落点位置分别记为 x_{ne}, x_{nf}, x_{ng} 。取其中最小值记为 $\min\{x_{ne}, x_{nf}, x_{ng}\}$ ，则它与主料流落点位置 x_n 之差就构成料流的内侧（即靠近炉心一侧），其宽度为

$$W_L = x_n - \min\{x_{ne}, x_{nf}, x_{ng}\} \quad (1.8)$$

这样，我们便可以求出炉料运动轨迹。

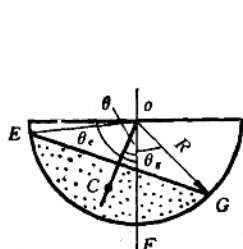


图 1.3 溜槽末端料流截面

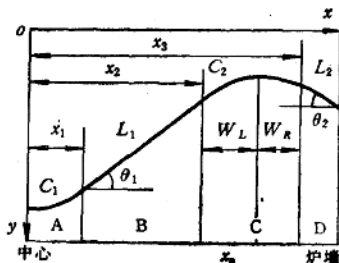


图 1.4 料面轮廓分解图

2. 炉料分布模型

以开炉时对布料的实测结果为依据，在炉料运动轨迹模型的基础上，便可以建立起炉内炉料分布的模型。

先来说明建立模型的依据和有关假设。