

沸腾层过程

〔苏联〕 П. Н. 费安米亚尼科夫 合著
Н. Ф. 沃尔科夫
董庆和译

中国工业出版社

817
817

沸 腾 层 过 程

[苏联] Н. И. 赛罗米亚特尼科夫 合著
В. Ф. 沃尔科夫
董 庆 和 译



1977.11.18
中国工业出版社

Н. И. Смирнитников, В. Ф. Волков
ПРОЦЕССЫ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ
МЕТАЛЛУРГИЗДАТ
СВЕРДЛОВСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
СВЕРДЛОВСК-1959

* * *

沸 騰 层 过 程
董 庆 和 译

*

冶金工业部科学技术情报产品标准研究所书刊編輯室編輯
(北京市市口21号)

中国工业出版社出版 (北京德胜门内大街10号)
北京市书刊出版业营业登记证出字第110号

中国工业出版社第四印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $7^{3/4}$ ·字数184,000
1965年3月北京第一版·1965年3月北京第一次印刷
印数0001—2,680·定价(科六)1.20元

*

统一书号: 15165·3304 (冶金-542)

本书系统地阐述了近年来在苏联和国外关于沸腾层过程所积累的理論資料和实验資料，討論了沸腾层工艺过程的流体动力学基础，热交换与质交换問題，以及沸腾层中的焙烧、干燥、气化和燃烧等过程。书中引述了作者在沸腾层的流体动力学、沸腾层结构、沸腾层中細粒燃料的气化和燃烧等方面所取得的研究成果。

本书供从事于研究在各种工艺过程中应用沸腾层問題的生产技术人员及科学工作者閱讀，并可供有关专业的高等学校师生参考。

序 言

現時，以应用沸騰层为基础的方法已是在有色冶金和黑色冶金中广泛应用的工艺方法之一。利用沸騰层或假液化层的原理，可以使这样一些过程簡化和强化，如鋅精矿和黄鉄矿的焙烧，許多重金属、輕金属、稀有金属和稀散金属的生产，細粒燃料的气化和燃烧，各种物料的干燥，以及其它許多种工艺过程。

由于沸騰层的应用为工业开辟了广闊的前途，促使研究人員对沸騰层中的流体动力学、热交换与质交换、催化、吸附、化学过程，进行全面的 research，并制定这些过程的計算基础。苏联和国外許多科学团体和工业单位，通过研究工作积累了許多經驗，并获得了一些有意义的成果。总结这些經驗和成果，已經是一项时机完全成熟的任务。

在这方面已經完成了某些工作。在苏联和国外的科学技术杂志中和研究院的著作中，对这个题目中的个别問題发表了一些有意义的材料。曾經召开过一些專門性的會議，会上总结了业已完成的研究，并制定了今后的研究任务。

然而，将所有这些丰富的理論材料和实验材料在单独的专题論著中系統地加以总结，就我們所知，作者們所做的还是第一次尝试。

作者编写本书，沒有打算全面地闡述这个题目中的所有問題。书中闡述得最詳細的是过程的原理，而在大量的工艺过程中，討論到的只是沸騰层中的焙烧、細粒燃料的气化和燃烧、干燥。本书有意識地省略了沸騰层中的化工工艺和热裂过程的問題，它們在本题目中是一个独立的、份量很大的部分。在本书中，由作者独自完成研究工作的許多問題占很大的篇幅。

为了叙述上的方便，本书分为两部分。第一部分是討論形成沸騰层的流体动力学基础和沸騰层的結構、热交换与质交换原

07790

IV

理，闡明几种主要过程的計算方法。所有这些都是一般性問題，因此，本书的第一部分对研究沸騰层的任何专业的人員都是有用的。

本书的第二部分講述具体应用到沸騰层的某些工艺过程。同时，特別着重闡明对冶金工业和热力工程具有发展前途的过程。

在編写本书时，特別注意了術語和基本定义，因为在有关沸騰层的专业文献中，会碰到一些同是一个概念而具有迥然不同名称的情况。此外，有許多術語显然是不够恰当的。根本解决这个問題的办法应当是舍弃这些術語，而采用新的、更具有概括性的，或者虽然是在特定的条件下使用，但却是更恰当的術語。然而要做到这一点，只有在新術語經過全而討論后才有可能。因此，作者对这个問題采取了权宜的解决办法，即利用現在最通用的術語和約定的代号，并且在书末列出代表符号表。

本著作是总结这方面的材料的初次尝试，缺点自然是难免的。因此，讀者們的所有意見、希望和建議，对作者來說都是极为宝贵的。

书中的序言、緒論、第二、三、四、七、八章，由技术科学博士 Н. И. 賽罗米亚特尼科夫(Сыромятников)教授編写；第一、五、六章，由技术科学副博士 В. Ф. 沃尔科夫(Волков)副教授編写。

目 录

序言

緒論	1
----	---

第一章 沸騰层的流体动力学	7
---------------	---

基本原理	7
------	---

沸騰层流体动力学的定量規律	14
---------------	----

沸騰层阻力的确定	25
----------	----

形成沸騰层所需流体速度的确定	27
----------------	----

沸騰层存在的极限速度的确定	28
---------------	----

第二章 沸騰层的结构	30
------------	----

平均的结构特性	30
---------	----

問題的分析解法	33
---------	----

筒形室中沸騰层结构的实验研究	36
----------------	----

錐形室中沸騰层结构的实验研究	42
----------------	----

流体非等温性的影响	45
-----------	----

第三章 沸騰层的热交换与质交换	48
-----------------	----

热交换的特点	48
--------	----

沸騰层中固体粒子与气体間的热交换	52
------------------	----

热交换器表面与沸騰层間的热交换	58
-----------------	----

沸騰层的传热	71
--------	----

輻射的影响	72
-------	----

沸騰层的质交换	73
---------	----

第四章 沸騰层热交换过程的計算	78
-----------------	----

連續加料沸騰层的热交换計算	78
---------------	----

有热损失和內热源存在时的热交换計算	87
-------------------	----

間歇加料沸騰层中粒子的加热与冷却的計算	88
---------------------	----

連續加料式与間歇加料式的沸騰层设备在过程强度上的比較	91
----------------------------	----

內部热阻力的影响	94
----------	----

設置在沸騰层中的热交换器的計算	98
-----------------	----

第五章 沸騰焙燒	103
----------	-----

VI

焙烧概述	103
过程的特点	104
国立有色金属科学研究所的实验室研究和半工业性研究	104
工业试验炉的研究	107
沸腾炉的基本类型和结构	110
多膛炉改建成沸腾焙烧炉	120
沸腾炉的自动化	123
锌精矿沸腾焙烧的经济效果	126
提高锌精矿沸腾焙烧过程指标的可能性	127
改用沸腾炉焙烧时焙砂的分级和运输方案可能的变化	131
水泥熟料的沸腾烧制	135
第六章 細粒燃料的沸腾气化	142
过程的特点	142
沿沸腾层高度上的气化过程动力学的试验研究	143
气化过程的分析计算方法	149
細粒燃料沸腾气化工工业法的发展	156
吉阿普式试验煤气发生炉	160
頁岩的沸腾气化	165
焦油渣的沸腾气化	170
甫尼基式煤气发生炉	171
第七章 燃料的沸腾燃烧	175
喷气燃烧室	175
无烟煤粉和焦屑的试验	182
乌克兰褐煤的试验	185
車利雅賓斯克煤的实验室试验	187
半工业设备的试验	194
頁岩的试验	199
細粒燃料在活动炉栅上沸腾燃烧的研究	201
工业运用沸腾燃烧室的经验	203
沸腾燃烧室在工艺设备上的应用	209
第八章 沸腾干燥和沸腾精选	214

干燥设备的各种方案.....	214
沸腾干燥的计算.....	221
沸腾精选.....	225
附录 主要符号表.....	229
参考文献.....	232

在沸騰層中的細粒物料或粉狀物料的固體粒子，由於受氣流或液流的流體動力的影響，在沸騰層所占有的體積內做着紊亂的循環運動。從這一體積中被帶走的固體粒子可能是完全沒有，也可能是極少量的，這只決定於送進沸騰層中的固體粒子大小的差別。

沸騰層的體積總是比密實的不動層的體積要大些。這兩個體積之比稱為沸騰層的膨脹度（*степень разбухания* 或 *степень раздутия*）。膨脹度是粒子在沸騰層中的運動和攪動強度的基本特性之一。已經查明，此膨脹度同流體的質量速度、液體或氣體的物理性質、粒子大小，以及另外一些因素有關。

沸騰層的另一個很重要的特性就是流體的臨界速度。達到這個速度，細粒物料層由不動狀態進入“沸騰”狀態。這個速度的大小主要是決定於粒子的尺寸、密度，以及氣體或液體的物理性質。

沸騰層中粒子的攪動強度及其活動程度，對於正確地組織工藝過程有很大的意義。粒子的攪動強度愈大，則沸騰層中溫度和濃度的分布愈均勻。對於一批燃着的燃料粒子在空氣流中運動的條件進行研究的實驗證明，如果在粒子表面上各處多相反應的速度不相同，那麼這些粒子就會受到兩種不平衡的力即浮力和反力的作用，而使粒子的運動強度和料層的膨脹度增大。

只要膨脹度不超過一定的數值，增大流體的流速，沸騰層的狀態仍然是穩定的。如果繼續增大流體的流速，就會在沸騰層中生成氣泡，由沸騰室中帶走的粒子量增多，終於使沸騰層中的工藝過程遭到破壞。因此，存在着某一個完全固定的、最適宜的流體動力學狀態。在這種狀態下，過程的穩定性及其一些主要指標是最好的。

沸騰层中粒子的强烈的相对运动，是沸騰层基本的和带原则性的特点，这一特点被用来使許多工艺过程机械化、自动化和提高过程的强度。例如，沸騰层具有与液体类似的流动性，因此它能够自动地从反应装置的一个工作室轉移到另一个工作室中。

粒子在搅动和相互碰撞时，产生紊流脉动（*турбулентная пульсация*），这种紊流脉动保证了过程的强化，并促使沸騰层中的温度和浓度趋于一致。

然而，粒子的紊乱运动，除了对沸騰层中的工艺过程产生有利的影响之外，还应当指出，这种运动也会引起一些不良后果。例如，由于固体粒子、液体或气体的搅动使温度和浓度趋于一致，会降低温度梯度和浓度梯度，而使沸騰层中的热交换与质交换的速度减慢。粒子相互碰撞时颗粒又会变小，因此在催化剂的沸騰层设备中，不得不定时地更換催化剂。在沸騰燃烧室和沸騰煤气发生炉中，由于燃料粒子与渣粒子的搅动，而难于掌握不結渣的正常状态。

正确地安排工艺过程，上述缺点可以局部或全部克服。

沸騰层的一个非常重要而有趣的特点，就是它的流体动力学阻力实际上与流体的速度无关。研究証明，沸騰层的最大阻力約等于单位栅板面积上的固体粒子重量。沸騰层的这一特点，就以下两方面來說非常重要。

第一，沸騰层的阻力与重量之間存在的直綫性关系，可使我們通过測定沿沸騰室高度上的压力分布来判断沸騰层的空隙率和粒子浓度变化的規律。

第二，沸騰层的流体动力学阻力与流体的速度无关，可使我們增大设备的生产率，而无須顧慮克服这种阻力会过多地增大能量消耗。

由于沸騰层的流体动力学决定着沸騰层中一切过程的特点和强度，因此，研究这一学科是一項极为重要的任务，并且早已引起研究人員的注意。

用細粒物料过滤液体时所形成的沸騰层过程，早为 A.M. 門捷

列夫所发现。在本世紀 20 年代开始研究沸騰层,是由于出現了沸騰煤气发生炉。近 10~15 年来,研究的范围发展得特別广,而現在無論在苏联或国外都有許多科学团体和个别科学家在进行研究。

在从事研究沸騰层流体动力学的苏联学者中,应当提到的有 З.Ф. 楚汉諾夫 (Чуханов), С.Н. 奥勃利雅德奇科夫 (Обрядчиков), И.М. 費道罗夫 (Федоров), О.М. 托杰斯 (Тодес), М.К. 皮斯明 (Писмен) 等人。

苏联学者們的研究結果証明, 沸騰层中粒子的紊乱运动, 是由于流体对料层中各个粒子的作用在時間上不同而引起的。这一作用力的大小, 在不存在反力的条件下, 平均說来只不过等于粒子的重量。在每一瞬間, 这一作用力的变化情况是可能大于也可能小于粒子的重量。

由于作用力的大小和方向在变化, 使得粒子間的距离发生变化。这时所产生的紊流脉动, 就其范围來說, 能达到反应装置的半径那样大。

脉动速度的绝对值, 取决于流体的物理性质和速度、粒子的大小、形状和密度, 以及反力的大小 (产生反力, 是由于粒子表面上强烈析出气体的多相反应在粒子表面各处的反应速度不同)。此时, 流体速度的变化影响脉动速度的情况, 是当流体速度取一定的极限值时, 脉动速度达最大值, 而其他所有决定热交換和质交換过程强度的常数, 将具有最适宜的数值。善于正确地計算并且保証这些最适宜的条件, 有很大的实际意义。

对于正确地計算和設計沸騰层设备來說, 測定沸騰层結構特性的方法具有很大的意义。現在, 多相过程的动力学都是依沸騰层的平均浓度和平均空隙率来計算的。然而如果考虑到粒子間的距离, 以及沸騰层的水隙率, 是随紊流脉动变化的, 那就未必能将整个高度上的沸騰层結構看成是相同的。倒不如說最好做相反的假定。何況, 研究証明, 在一定条件下, 沿沸騰层高度上的压力、粒子浓度和空隙率的分布, 可按照不同規律 (从直綫規律到

指数規律)变化。

沸騰层的热交换、质交换过程的研究,是同流体动力学的研究紧密相关的。近年来苏联和国外的学者們在这方面取得了較大的成就。特別应当提到的是И. М. 費道罗夫, А. В. 雷科夫 (Лыков), Н. А. 沙霍娃 (Шахова), О. М. 托杰斯, А. В. 切乔特金 (Чечеткин), Д. И. 奥罗奇科 (Орочко), Е. И. 霍道罗夫 (Ходоров), С. С. 查布罗茨基 (Забродский), М. С. 沙尔洛夫斯卡娅 (Шарловская) 等人的研究工作。

根据已經做过的研究,可以确定热交换与质交换过程的基本規律,找出决定这些过程的强度的因素,并且得出供計算用的經驗关系式。

大多数研究人員在自己的研究中都利用以相似原理为基础的物理过程模拟法。然而,其中也有某些人仍未能遵守相似原理的基本要求,因此,总结已有文献中关于热交换及质交换的材料,有很大困难,而以实用为目的选择計算方程式和經驗数据时,則应特別仔細,并且一定要遵守相似原理的一切要求。

当計算沸騰层中的热交换和某些质交换过程时,只要料层高度在100毫米左右,粒子大小在3~5毫米以下,而上述过程几乎能在沸騰层中全部完成,且最終溫度差和浓度差可認為等于零,則問題的解决将更簡易。在这种情况下,繼續增大料层高度对过程已不会产生影响,而过程对料层高度來說似乎已趋于自动模型化。

前面已經提到,沸騰层中固体粒子、气体或液体的强烈攪动会造成不利条件,即降低平均溫度差和反应剂浓度。研究証明,如果沸騰层热交换器或接触器按分段式逆流原理来設計,則这种缺点在某种程度上可以避免。

在沸騰层质交换的理論和实践方面的研究工作中,应特別提到的是关于气化和干燥方面的研究。

由 А. С. 普列德沃吉捷列夫 (Предводителев), З. Ф. 楚汉諾夫和 Л. Н. 欣特林 (Хитрин) 所創立的苏联学派,奠定了密实层

和气悬浮体 (газовзвесь) 中固体燃料的燃烧和气化的现代理论基础。Л. Н. 西杰尔科夫斯基 (Сидельковский), Х. И. 柯洛德采夫 (Колодцев) 和 В. Л. 查尔科夫 (Жарков) 根据这一理论基础, 通过对沸腾层中气化过程的研究得出结论: А. С. 普列德沃吉捷列夫提出的对沸腾层问题的分析解法是可以普遍应用的。在这里必须考虑到, А. С. 普列德沃吉捷列夫的解法是在料层内的孔道中气体为层流运动的情况下得出的, 它完全没有考虑气体沿沸腾层高度上的搅动作用。

对于干燥过程中的热交换与质交换, И. М. 费道罗夫, А. В. 雷科夫, Т. Ф. 塔干采娃 (Таганцева) 等人曾确定了该过程的基本动力学特性, 查明了进行干燥最适宜的条件, 提出了计算和设计沸腾干燥设备的方法。在这一方面进一步的研究任务, 则是积累和核实已经获得的成果。

除了理论研究和实验研究以外, 近年来许多国家开始在工业规模上掌握了应用沸腾层的各种新的工艺方法。而且掌握这些方法的速度相当快, 以致常常超越了在这方面的科学探索。

沸腾层原理的应用在有色冶金中特别具有发展前途。在过去的 10~15 年里, 苏联有色金属工业还没有掌握像矿石沸腾焙烧法这样的先进工艺过程。现在, 苏联各炼锌厂的所有工业焙烧炉都已采用沸腾层操作。这里必须指出, 沸腾焙烧炉是一种简便的、完全机械化的设备, 它能保证过程有很高的强度, 并能提高工艺水平和劳动生产率。

在化学工业和石油工业中, 沸腾层原理已被用来使苯氧化成邻苯二甲酐, 用于催化裂化和在煤气发生炉中气化细粒燃料。此外, 一些应用催化剂沸腾层的工艺方法, 也正在进行研究并且逐步应用到工业中。同时, 由于沸腾层原理应用在许多场合下都是相当先进的, 所以在一些老的工厂中, 正在用沸腾层设备代替密料层设备。

然而, 并非所有的技术部门都像冶金工业和化学工业那样, 迅速地在工业规模上掌握了沸腾层。例如在燃烧技术中, 沸腾层

的应用就很迟緩。其原因是由于科学研究开展得不够，以及細粒燃料在沸騰层中燃烧时难于掌握不結渣状态。

沸騰燃烧室和沸騰煤气发生炉中排渣之所以困难，是由于炉渣会与未反应的燃料摻混。为了克服这一缺点，早在 1949 年 Н. И. 賽罗米亚特尼科夫就提出了縱向移动沸騰层的燃烧室。在这种設備中，打算从空間上将供应燃料和排除炉渣的部位分开，以避免燃料和炉渣相混，同时也便于进行連續的燃烧过程。在他設計的这种燃烧室中曾試驗过車利雅賓斯克 (Челябинск) 褐煤和机割泥煤。1956 年曾报导过，法国在工业上成功地掌握了类似的燃烧室。

Х. К. 特魯烏 (Труу), Л. Н. 西杰尔尼科夫斯基 (Сидельниковский), П. В. 巴甫洛維奇 (Павлович), Ю. П. 謝列斯琴 (Шелестин) 和另外一些人，对細粒燃料的沸騰燃烧过程进行过实验室的、半工业性的和工业性的研究。在烏拉尔工学院，在 Н. И. 列謝琴 (Решетин) 的倡議下，开始由 Н. С. 賽罗米亚特尼科夫和 В. Ф. 沃尔科夫进行了这项研究工作。

前面提到，沸騰层問題不仅对有色冶金工业和化学工业是一个极为迫切的問題，对于国民經济的其他許多部門，首先是黑色冶金工业，也是如此。

特别是細粒矿石在沸騰层中的直接还原，对于黑色冶金來說是一个有前途的問題。在这方面已經进行了一些研究，預計不久将順利地完成。沸騰层应用在矿石的干燥、精选、分級和冶炼前的制备中，也是很有前途的。

应用沸騰层强化废热鍋炉中的热交换是一个很重要的問題。利用瀋料沸騰层的工业炉蓄热室是有前途的。最后，在耐火材料沸騰层中可以进行气态和液态燃料及其他燃料的高度强化的无焰燃烧。

沸騰层的流体动力学

基本原理

具有一定粒度组成的細粒物料层，由靜置状态进入活动状态，取决于料层孔道中的气流或液流的流体动力学条件。这一转变是在一种完全固定的流体速度 w'_* ，即所謂沸騰层临界速度下实现的。使流体速度繼續增大并超过此临界速度，沸騰层的体积增大，細粒物料粒子的运动更激烈。在某一个速度 w''_* ，即所謂极限速度或带出速度（скорость выноса）下，沸騰层进入悬浮状态，并随流体被带出沸騰室。在 w'_* 到 w''_* 的范围内，沸騰层处于稳定状态。确定这个速度范围，对进一步分析和計算沸騰层流体动力学，是一个十分重要的問題。

沸騰层的形成过程，及其主要特性随流体速度的变化，可用图 1 中的曲綫來說明。

图 1 上部的曲綫，表示細粒物料层高度的变化同增大流体速度的关系。在此，流体速度是按沸騰室的总截面来計算的。

由曲綫可以看出，在 ab 段，流体速度的增大，并不使料层的高度增大。料层处于不动状态。有关这种料层的基本流体动力学特性，在 Н.М. 查沃龙科夫（Жаворонков）[1] 等人的著作中有所論述。

在 b 点，流体速度达到临界值，料层即由不动状态而轉为“沸騰”状态。从这时起，繼續增大流体速度就会使料层的体积和高度增大。沸騰层的这种状态一直保持到流体速度达到第二极限—— w''_* 为止。在 c 点，沸騰层被带出沸騰室。曲綫 bc 段即相当于沸騰层的范围。在这个范围内的沸騰层流体动力学，曾为 Н.М. 費道罗夫[2]，Н.А. 沙霍娃[3]，М.К. 皮斯明[4]，Л.А. 亚科宾（Ако-

пян) 和 А. Г. 卡薩特金 (Касаткин) [5], Н. И. 斯密爾諾夫 (Смирнов) 和李德艾 (Ли Де Эп) [6], Г. Б. 弗雷什捷特 (Фройште-тер) [7], Н. И. 賽羅米亞特尼科夫 [8~10] 等人研究过。

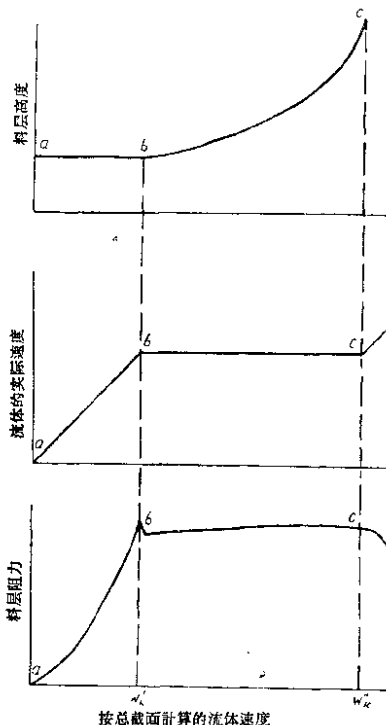


图 1 沸腾层形成的范围

图 1 中部的曲线，表明流体在料层空隙中实际速度的变化与按沸腾室总截面计算的气体或液体运动速度的变化之间的关系。由图可以看出，在密料层中，这个速度是按直线规律变化的；而