

● 张蕴璧 编著

流态化选论

● 西北大学出版社



780211

9

流 态 化 选 论

张 蕴 璧

西 北 大 学 出 版 社

流 态 化 选 论

张蕴璧

西北大学出版社出版发行

(西安市太白路)

新华书店经销 西安电子科技大学印刷厂印刷

850×1168 毫米 1/32 开本 7.5 印张 1 插页 168 千字

1989 年 11 月第 1 版 1989 年 11 月第 1 次印刷

印数 1-2000

ISBN7-5604-0105-8/T·2 定价: 3.00 元

内 容 提 要

本书着重综述了固体颗粒的物理性状;流化床的类型、应用、研究情况;以及气固流化床中的气泡行为等内容,主要作为高等学校师生的教学参考书,同时也可供从事流态化工作的科研和工程技术人员参考。

前 言

1961年，由华东化工学院等院校编写的“化工过程及设备”一书，第一次将流态化作为一种化工过程写入教材。这一章虽然很短，但是它涉及的基本概念、过程机理及设备计算引起了广大读者的关注。七十年代后期，相继出版了多种化工类教材，流态化作为两相流动物系被编写进“化工原理”。进行流态化操作的一类反应器，也以流化床反应器为题被编写进“化学反应工程”。同时，在综合性大学和高等师范院校化学系的“化学工程基础”教材中也都涉及到了流态化的内容；另外，从历届的国内外学术会议所反映的发展趋势看，流态化的应用范围，已不再限于化工和石油加工，逐渐扩展至能源、环保、机械等多个学科领域。因此汇集并整理有关资料，已成为化学、化工专业广大师生和许多同行的共同愿望。

目前，国内这方面的专著较少，一些有价值的参考材料多散见于国内外的杂志中，由于教学和科研工作的需要，这里搜集了目前教材中一些没有涉及和限于篇幅不可能多作介绍的内容，结合本校流态化方面的部分科研工作，初步汇集成册，并附有较多的参考文献，以便读者作进一步阅读时参考，这就是编写本集子的目的。

本书包括五章。第一章绪论介绍概况；第二章介绍颗粒参数的测定方法，这是科研工作中首先需要解决的问题，各种教材中只介绍了这些参数的定义及计算方法，如何测定，则未提

及；第三章主要介绍各种不同类型流化床的结构、特点、性能和应用范围；第四章介绍目前流态化领域的应用研究现况，旨在介绍一些有希望但尚不成熟的研究工作，以期引起同行们的兴趣，多做工作，早出成果；最后还收进气泡行为一章。气泡行为国外报道颇多，国内教材限于篇幅，不可能详细介绍，本书选择了一些较成熟的材料，作系统整理，并给出原始文献。

流态化领域内，无论理论研究或实际应用都发展较快，因此值得整理的资料很多，由于经费所限，出版困难，故试选上述内容提供给读者。

本书承蒙沈阳化工研究院王尊孝高级工程师和天津大学胡宗定教授审阅，提出许多宝贵意见；在编写过程中得到许多同行的热情鼓励；另外，全书由郭旗同志绘制插图，在此一并致谢。由于水平所限，错误和不妥之处在所难免，恳请大家批评指正。

作 者

1988年9月

目 录

前 言

第一章 绪论	1
§ 1-1 简要历史	1
§ 1-2 与国民经济的密切关系	5
§ 1-3 流化床的优缺点	9
§ 1-4 流态化操作分类	11
§ 1-5 流态化技术的现状和研究方向	14
第二章 固体颗粒的物理性状	21
§ 2-1 颗粒尺寸	21
§ 2-2 颗粒的几何形状与球形度	38
§ 2-3 密度和空隙率	50
第三章 流化床的类型	61
§ 3-1 床型结构	61
§ 3-2 颗粒尺寸与床型	90
§ 3-3 流化状态与床型	97
第四章 流态化技术应用研究	108
§ 4-1 气固流化系统	108
§ 4-2 液固流化系统	147

第五章 气固流化床的气泡行为	170
§ 5-1 引言	170
§ 5-2 气泡的形成及其形状	173
§ 5-3 气泡模型	188
§ 5-4 气泡的上升速度	197
§ 5-5 气泡尺寸	205
§ 5-6 气泡的测试方法	209

第一章 绪 论

固体颗粒没有流动性，若采取某种措施使颗粒也能像流体一样呈现流动状态，这种操作过程就称为固体流态化。进行流态化操作的设备很多，其中可以发生化学反应，如各种流化床反应器；也可以进行某种物理过程，如流化床干燥器等。

§ 1-1 简 要 历 史

流化床首次大规模地在工业上应用，是温克勒(Fritz Winkler)的流化床粉煤气化，此法于1922年获得德国专利。第一台煤气发生炉，高13米，截面积12米²，于1926年顺利投入运行。二十世纪二十年代以前，工业生产上制造水煤气是将块状的煤放在卧式或立式炉内通入空气及水蒸汽进行气化，工业上称为固定床气化。固定床中使用的煤块要求一定的尺寸，而且要均匀，而天然煤矿开采出来的煤不仅有块煤，还混有大量的煤粉。对于劣质煤，如泥煤、褐煤，则煤粉更多，于是形成了日趋尖锐的块煤供应不足与大量造气需要之间的矛盾。人们分析了固定床中的气化过程，认为煤粉间的空隙率小，气体通过的阻力很大，无法进行适宜操作，而且固定床传热效果较差，不适用于高放热反应，在此分析的基础上经过大量的研究、改进，终于诞生了流化床粉煤造气。

从现代观点来看，温克勒煤粉炉耗气量高，并且由夹带造

成的碳损失很大(超过 20%), 可认为是效率很低的。随着世界石油用量的增加, 温克勒炉已逐渐被其它以石油为原料的发生炉所代替, 但它却是流化床的第一次工业应用。

1940 年前后, 由于第二次世界大战的影响, 航空汽油的需要量剧增, 而当时在石油炼制工业上还是采用固定床催化裂化, 催化剂置反应器内不动, 反应和再生过程交替地在同一设备中进行, 属于间歇操作, 并且催化剂寿命较短, 需要不断地进行再生, 为进行连续生产, 不得不采用两套装置, 轮换操作。由于再生过程是放热反应, 生成大量的反应热, 设备温度很高, 而固定床的传热能力较差, 为了解决传热问题, 设备曾作过多次改进, 以至结构很复杂, 并且钢材消耗量大, 操作麻烦, 设备的生产能力受到了很大的限制。

为了解决这个矛盾, 四十年代初期出现了流态化催化裂化。美国麻省理工学院和美孚石油公司(SOD Co.)最早开发了流化催化裂化(FCC)过程。第一台工业规模的 SOD-I 型流化催化裂化装置于 1942 年正式投入运行。在流化床内进行的催化裂化, 是利用高速石油蒸汽的动能, 使催化剂粒子在设备内呈流态化, 这样不但使设备传热效果大为改善, 结构大大简化, 处理能力大大增加, 而且不需使用成型的催化剂(催化剂成型工作量很大), 使用粉状催化剂即可。此外, 催化剂输送方便, 采用气流输送, 催化剂可以自动连续地由反应器流到再生器, 再由再生器流到反应器, 实现了生产的连续化, 成为石油催化裂化的新工艺, 在石油工业上得到了广泛的应用。1944 年美国道尔-奥立佛公司将流态化技术应用于黄铁矿焙烧、石灰石煅烧以及颗粒物料的干燥等。

近二、三十年来, 流态化技术的应用与研究更趋广泛, 不

仅应用于石油炼制，而且在化工、冶金、制药、原子能、动力、环保等许多工业和工程领域中都得到了日益广泛的应用。

我国在五十年代初期，对流态化技术的研究和应用即进行了许多工作。最早的应用实例是流态化焙烧。1955年南京化工公司采用流态化技术焙烧黄铁矿以产生二氧化硫并制造硫酸；1957年在葫芦岛流态化焙烧精锌矿生产氧化锌和二氧化硫获得成功。这是我国流态化技术发展史上两个最早的例子。根据气体和固体颗粒间两相换热的研究，我国在1967年成功地发展了在工业规模的流态化焙烧炉中焙烧汞矿以提取金属汞的过程。目前在设备设计和操作技术上都取得了成功的经验。

我国石油资源丰富，生产能力不断提高，目前，我国石油年产量已超过一亿吨。石油开采量的不断提高，需要更有效的炼油设备与之相匹配。我国第一台自行设计和制造的流态化催化裂化装置已于1965年建成并投产，生产能力约为150吨/时，随后又建成了一些规模更大的装置。在流态化催化反应器中，萘氧化制取苯酐和丙烯氨氧化制取丙烯腈是两个应用流态化技术较为典型的例子。目前这类反应装置，据1982年的报道^[2]有一百二十多个，如糠醛氧化制顺丁烯二酸酐、松节油氨氧化制对苯二甲腈、以及丙烯腈、氯乙烯、醋酸乙烯、甲基氯硅烷、苯胺、异烟酸等的生产都使用了流化床。

流态化技术在液固系统方面应用的典型例子当推散状颗粒浸取和洗涤。我国对流态化浸取和洗涤的研究始于1959年。二十多年来，基础研究和工业应用开发相辅相成。由于流态化浸取和洗涤操作借水力进行，因此不需要机械搅拌；同时，由于固体颗粒和液体连续逆向流动，在一个单独的洗涤柱中就能够建立浓度梯度，因而避免了习用的浸取和洗涤工艺中需要逐

够建立浓度梯度，因而避免了习用的浸取和洗涤工艺中需要逐级处理的复杂操作过程。

为了交流我国流态化技术在研究和应用方面的经验，1962年在北京召开了第一届全国流态化学术讨论会，这说明我国在六十年代初期，在流态化方面就具有一定的研究水平和生产能力。七十年代末，国内恢复了正常的学术活动后，全国性学术会议先后召开过三次；另外为加强国际学术交流，自1982年起，每三年召开一次中日流态化学术交流会，现将历届会议时间和地点列后：

表 1-1 全国流态化学术交流会

届 数	时 间	地 点
第一届	1962 年 8 月	北京
第二届	1980 年 12 月	北京
第三届	1984 年 4 月	太原
第四届	1987 年 4 月	兰州

表 1-2 中日流态化学术交流会

届 数	时 间	地 点
第一届	1982 年	杭州
第二届	1985 年	昆明
第三届	1988 年	北京

这些会议充分显示了我国在流态化反应工程方面的力量和水平。论文涉及的范围很广，有理论研究方面的，如流化床的

流动特性、传热、传质、数学模型和放大等；有关于测试方法和仪器的研制，如电容探头、激光测试、光导纤维的应用等；有关于床型的探讨，如锥形状、环流床、磁场流化床、电场流化床等。应用研究的内容更多，诸如流态化焙烧、劣质煤气化、三废处理等，应用领域日趋广泛。上述情况说明我国在流态化领域中已具有深厚的理论基础和丰富的实践经验。

§ 1-2 与国民经济的密切关系

流态化技术作为一门基础技术学科已经渗透到国民经济的许多部门，在化工、石油、冶金、能源、原子能、材料、轻工、机械和环保等各领域中都可以找到它的卓越贡献，是基础技术学科在为工业生产服务中取得显著成效的学科之一。由于流态化技术应用领域的不断扩展，再加上其内在规律的复杂性，许多问题尚待研究，因而目前和将来都是化学工程学科最活跃的研究领域之一。

目前，在我国国民经济建设中重要的流态化反应工程课题有：^[1]

一、矿物资源的综合利用

我国金属矿产资源相当丰富，但其特点多为共生矿，即多种金属共生混杂。有些矿产资源，如铁矿，多为贫矿，因此面临着首先将矿石富集，然后分别提取的问题。这类问题主要涉及加工处理固体物料的过程，它的主要任务是探索在高温条件下操作的流化床反应器的行为，并结合具体矿产资源进行新工艺及新设备的开发研究。具体课题如下：

(一) 铁矿石直接还原新工艺和设备的研究，解决高温下

颗粒的粘结问题。

(二) 贫铁矿流态化磁化焙烧推广研究。

(三) 流态化选择性焙烧的研究，为综合利用共生矿开创一条新的途径。

(四) 流态化氯化、氟化焙烧工艺的开发，着重解决氯气氟气消耗，含氯含氟尾气污染及设备腐蚀等问题。

(五) 矿物及焙砂的流态化浸取及浸取液从矿物表面及孔隙中的洗涤，并研究多粒度颗粒在流化床反应器中的行为。

(六) 明矾石综合利用过程的开发。

二、煤的加工

煤是我国能源和化工的重要原料，在煤的开采、加工过程中，流态化技术起着重要作用。当前有待开发的研究项目有：

(一) 煤的长距离水力输送、水煤浆稳定性、减阻剂及输送管结构的研究。

(二) 流态化煤的干馏和半焦煤气化过程的开发，特别是气化过程排渣技术的研究。

(三) 细粒度页岩的流化干馏工艺和设备研究。

(四) 高压流化床气、液、固三相反应器内进行煤的直接加氢液化研究。

(五) 煤的流态化气化、高温除尘及燃气轮机发电联合流程的开发，为更合理地利用煤碳资源开辟新途径。

(六) 煤的流化燃烧技术的研究。应特别重视大型电厂流化床锅炉和新型燃烧设备(如加压流化燃烧、快速床流化燃烧等)的开发。提高煤的利用率、降低粉尘的带出以及有害物质(如硫、氧化氮等)的污染等问题。

三、石油的加工

石油的催化裂化在我国已形成了较大的生产能力，是对国民经济发展有一定影响的工业项目。它面临的任务是进一步完善 70 年代开发的催化裂化反应器床型(如同轴式超再生提升管催化裂化装置)，深入分析查明其流化特性，使其装置能完全适应新型分子筛催化剂的特点。并且开发适应于渣油、重油的催化裂化新工艺和相应设备，具体问题列举如下：

(一) 改善提升管反应器内催化剂与油气的接触。进行催化剂在管内轴向、径向分布的测定；改善催化剂分布及催化剂引入的结构型式等问题。

(二) 改善再生器催化剂停留时间分布，提高再生器内烧焦强度，降低再生器催化剂的含碳量。

(三) 再生器内 TDH 的确定；催化剂的磨损、夹带和回收，进一步降低催化剂损失问题。

(四) 重油、渣油催化裂化新工艺和新设备的研究，包括提升管快速分离结构的改进，再生器取热技术和烧焦罐的研究等。

(五) 高密度催化剂湍动流化规律的研究。

四、材料工业

流态化反应器在有机及无机材料生产中，都占有重要的地位。气-固相催化反应器是基本有机化工产品的重要生产装置。三大合成材料——塑料、橡胶和纤维单体如：丙烯晴、丁二烯、氯乙烯和醋酸乙烯酯等都是采用这类反应器生产的。同时也用于其它有机物如苯酐、顺丁烯二酸酐、苯胺、三聚氰胺及多种农药的生产。当前对这类反应器需要解决的课题是如何在增加处理能力的同时，提高反应转化率和选择性，并且掌握反应器的放大规律。具体课题如下：

(一) 细粒床、构件床、多层床、快速床等各种床型的基础研究, 为数学模型提供可靠的、直接测定的参数计算式。

(二) 新工艺的开发和已有设备的改造。如流化床铁系催化剂、丁烯氧化脱氢制备丁二烯工艺的开发、丙烯腈流化床反应器的改造和农药百草清等工程开发。

(三) 乙烯、丙烯等气相聚合生产聚乙烯、聚丙烯流化床反应器的开发。如解决高压反应器固相物料引入、引出的问题。

(四) 新型催化-再生复合反应器床型的探索研究。其目的除用以保持催化剂良好活性状态外、亦可利用反应组合, 进行分离操作。

(五) 多晶硅、有机硅等产品流化床反应器的开发, 主要是针对高密度、易粘结、超细粒子流化行为、加压流化和放大方法的研究。

(六) 氢氧化铝的流态化焙烧技术的开发。

(七) 石灰、水泥(如低温燃烧页岩水泥)、陶粒、膨胀砂等建工材料的流化法生产工艺及工程的开发。

五、环境工程

由于流态化反应器具有高处理能力、低阻力降和良好的相间接触, 故在环保工程中逐渐被采用, 如:

(一) 对有害气体流化床吸附和脱附过程的开发, 特别是着重发展处理量大, 有害成分浓度低的废气处理新过程和设备。

(二) 流态化电极处理污水的研究, 特别是处理含量极微但对生物危害极大的重金属污水。

(三) 流态化生化反应器(如固定酶反应器)处理含有机物

质的污水，特别是石油化工厂中排放的废水。

(四) 流态化焚烧炉处理工业废气、废水和城市垃圾，并向城市供应煤气、供热或向化工厂供应原料气的过程开发。

§ 1-3 流化床的优缺点

流态化技术所以能够得到比较广泛地应用，是因为它具有一些突出的优点：

一、由于床层内流体和颗粒剧烈搅动混合，使床层温度均匀，避免了局部过热(或局部反应不完全)现象。同时，由于颗粒的热容远比同体积气体的热容大(约大 1000 倍左右)，所以，可以利用循环颗粒作为传热介质，大大简化了反应器的结构。同时，由于传热效能高，床内温度均匀，特别适合于一些热效应较高的反应及热敏性物料。

二、固定床为了避免压力降过大，一般不能采用细小的颗粒或粉末状固体，而在流化床中则常用 $30-100\mu\text{m}$ 的小颗粒，因此流化床中的相间接触面积很大。并且由于颗粒的剧烈运动，使两相表面不断更新，因此床内的传热及传质速率很高，这对于以传热或传质速率控制的化学反应或物理过程是非常有利的，可大幅度地提高设备的生产强度，能进行大规模生产。

三、由于固体颗粒的运动，使金属器壁与床层之间的传热系数大为增加，要比没有固体颗粒存在的情况下大数十倍，甚至上百倍，因此便于向床内输入或取出热量，所需的传热面积却较小。