

# 对深化流态化研究的几点看法

唐 晋

(国家自然科学基金委员会, 北京 100083)

许光文 李静海\*

(中国科学院化工冶金研究所, 北京 100080)

**[摘要]** 从研究对象和系统性质两方面分析了流态化学科的特点, 归纳了流态化研究在目前存在的问题和流态化发展带来的机遇, 对如何深化流态化研究提出了一些看法, 并建议了重点研究内容, 以期对流态化研究今后的发展提供参考。

**[关键词]** 流态化, 基础研究, 创新

流态化是颗粒在流体作用下产生的类似流体的流动现象。与固定床相比, 流态化操作中的颗粒与流体间的相互作用具有许多突出的优点, 如良好的传热、传质性能, 大的处理能力等等。因此, 自从本世纪 30 年代的第一台流态化设备成功投入运行以来, 经过多年的积累, 特别是近 20 多年来的发展, 流态化技术已应用到许多工业过程中, 成为能源转换、资源利用和环境保护等工业领域的重要单元操作, 不仅在煤炭、石油、矿冶等基础工业中发挥了作用, 而且也逐渐变为材料、生物工程等新兴工业的重要技术。

流态化技术是研究系统中颗粒流体的流动和传递规律及其在工业中的实际应用。我国在流态化技术研究中较好的基础, 近年来发展十分迅速, 并已占有一定的优势, 因此应优先发展, 但应注重发展策略, 真正解决一些关键性的问题, 保持优势。

为了促进我国流态化研究的发展, 在国家自然科学基金会的支持下, 于 1994 年 6 月由中国科学院化工冶金研究所和清华大学化工系在北京共同举办了“'94 海内外青年学者流态化前沿研讨会”。会议针对目前流态化领域面临的问题、挑战和发展机遇等组织了专题讨论。结合各国和所在单位在该领域的研究状况, 与会人员相互切磋, 共同讨论, 提出了许多富有启发性的观点和看法, 现将这些研讨成果整理成文, 供有关人员参考。

## 1 学科特点

虽然早在 30 年代流态化技术就已较成功地应用于工业实际, 但流态化成为一独立的学科则是近二三十年流态化应用迅速发展的结果。流态化技术在应用过程中不断解决所遇到的各种难题是促使流态化研究发展, 并独立为一门学科的直接动力, 而流态化系统的复杂性则是造成流态化研究滞后于流态化应用的主要原因。正由于流态化系统的复杂性, 它使得流态化学科的研究具

\* 1994 年度国家杰出青年科学基金获得者。

本文于 1995 年 10 月 20 日收到。

有许多自身的特点。首先,流态化学科研究的具体对象是一种特殊的颗粒流体系统,它具有:

**流型多样性** 颗粒通量、流体速度等操作条件不同,流化床中的颗粒流体流动可呈现不同的流型。例如,当颗粒通量固定时,系统在流体速度逐渐增大的过程中经历固定床、散式流化、鼓泡流化、湍动流化、快速流化和气力输送几个不同的领域。

**结构非均匀性** 流态化系统流动结构不仅呈现局部不均匀性,而且呈现整体不均匀性。局部不均匀表现为稀相和密相在同一点交替出现,即局部状态具有时间相依性;整体不均匀性表现为系统内部不同空间位置可以出现稀相或密相两种完全不同的结构,即整体状态具有空间相依性。非均匀结构共存使得系统在不同尺度上表现出不同的力学行为和传递特性。

**颗粒非规则性** 流态化操作的必须成分是固体颗粒,工业流态化系统所使用的颗粒在结构形态和粒度上都是不规则的,而现有理论和方法大多仅适用于规则的单一粒度系统,颗粒的非规则特性很少被考虑。因此,实用的流态化理论必须解决非规则颗粒系统的定量问题,但这一问题目前还几乎无进展。

**随机行为和混沌现象** 伴随着稀、密两相的交替变化,流态化系统(尤其是气固系统)的流动结构呈现随机和混沌变化,这种变化的描述及其与两相结构的耦合是流态化研究的前沿课题之一。

流态化研究对象的上述特性同时也是认识流态化系统的难点,它使流态化系统多相过程完全不同于单相流动,以非平衡非线性的耗散结构为重要特征,其中既存在极值行为所代表的有序过程,又存在随机行为所反映的无序过程。分析系统中这些复杂过程的理论和数学方法目前还很不完善,因而,这一学科中的突破性进展在很大程度上依赖于数学、物理等相关学科的最新成果。

其次,流态化学科研究的是一特殊的单元操作,所研究的系统具有以下特点:

**系统工程性强,且机理复杂** 流态化研究涉及的很多内容属于工程和工艺性问题,而过程的机理又十分复杂,很多重要问题至今仍不能解决。其根本原因是单相流动的研究方法在流态化系统中不再适用,因而,流态化系统的基础研究还远远落后于应用。只有加强这一学科的基础研究,才有可能产生新的构思和突破,促进这一技术的发展。

**分析方法和测试手段独特** 一方面,流态化的非均匀性使得这一系统的测试非常困难,常规的、商品化的测试技术大多只适用于单相均匀流动;另一方面,这一系统的时空动态特征更增加了测试工作的难度。然而,流态化学科的工程特性要求准确的测量,它是定量认识流态化系统的基础。因此,测试技术的研究在流态化学科领域中占有重要地位,需要开发适用其多相过程的新测试理论和新测试方法,这方面技术的进步将对这一学科的发展产生重要的影响。

**设备放大效应严重** 流态化系统的复杂流动结构及其颗粒流体间的相互作用与设备的规模密切相关,同样的物性和操作条件,在不同尺度的设备中可呈现截然不同的流型,表现不同的操作特性。这种设备效应即为通常所说的放大效应,由于未能实现对设备效应的定量认识,工业化设计目前仍停留在逐级放大的经验放大上。因此,加强放大效应规律的研究是实现流态化技术实用化、工业化的关键。

综合上述,流态化研究既具有工程学科复杂性,又拥有基础研究的难度。认识颗粒流体流动的流动规律和传递规律是流态化基础研究的任务,开发流态化技术的应用是流态化研究的最终目标。因此,流态化是一兼基础理论和应用开发、需要多学科交叉的年轻工程基础学

科，其研究成果对发展国民经济具有重要的作用。

## 2 发展现状

流态化学科的发展现状可归纳为“需求增，发展快，突破少”。“突破少”是流态化研究现存问题的必然结果，这些问题具体表现在：

**物理模型与现象具有差异** 流态化系统的主要特征是不均匀的两相结构共存及其时空动态变化。然而，目前这一系统的数学模型大都建立在拟流体模型的基础上，显然，把一个高度不均匀的系统作为均匀系统来分析是不合理的。尽管有的模型考虑到两相结构的特点，但这种两相结构的动态变化仍无法考虑，因此造成了模型和现象之间的差异。

**实验与模型过分理想** 目前已有的理论和实验都是基于均匀单一的球体颗粒，并大多只考虑时间平均参数的变化，而实际系统中存在的颗粒为具有很宽粒度分布的非球体颗粒，并存在复杂的瞬态变化。因此，已有理论和实验均作了一定的简化，其研究结果很难应用于实际设计和计算。

**研究缺乏新思想、创新少** 流态化研究的蓬勃发展使在世界范围内形成了一支强大的研究队伍和一批优秀的研究机构。但是，各个实验室所从事研究的内容却几乎都处在类似的水平上，特别是近年来创新很少。

造成流态化研究的这一现状的主要原因有三方面：一是流态化系统的复杂性使得研究难度极大；二是研究人员受传统思维方式的束缚较深，未能致力于寻求到解决问题的新方法；三是流态化的工程特性使得研究和开发需要相当大的投入，一般研究单位很难得到长期稳定的支持来从事系统的基础性研究和工业设备、工艺过程的开发。这些问题在我国流态化领域的研究中也十分严重，而且至今仍未得到研究者本身和有关管理部门的高度重视。

虽然近年来流态化研究的突破性进展很少，但科学和经济的发展却使得流态化研究的需求在不断增加。首先，老问题需要新思想、新方法：在理论上，研究者已逐渐认识到仅靠传统方法已很难解决流态化领域的许多问题，诸如过程放大，反应器定量和一些重要现象的机理认识等，因此，新理论、新方法的探索和建立势在必行，而相关学科的发展为此提供了可能性，学科交叉因而尤为重要；在应用上，由于节能需求和环境保护标准的提高，现有的设备很难满足新的要求，急需寻求有效的方法对现有设备进行改进和更新。其次，新过程需要解决新问题：许多新过程，如生物技术，光、电磁记录材料，废物处理和超细粉材料等工业的兴起，增加了对流态化反应器的需求，但也提出了传统的理论和设备尚不能满足的一些新的工艺过程和技术要求。因此，开发新设备、新技术迫在眉睫，这不但为流态化应用技术的开发研究提出了挑战，同时也要求流态化基础研究具有新的突破以解决面临的各种新问题。

综上所述，流态化学科现在正处于总结过去、开拓未来方向和开发新型应用的关键时期，我们应抓住这一机遇，迎接其挑战，把我国流态化研究推向一个新台阶。在宏观管理上，应减少重复和分散性投资，集中物力、财力和人力开展一些对国民经济和流态化技术本身发展具有重大影响的突破性研究，创新性研究。

## 3 深化研究

根据流态化学科的特点和研究现状，深化流态化研究必须突破传统研究方法，在研究思

维、分析问题方式上开辟新路子,寻求新理论,吸收其它学科的最新研究成果;在应用开发上除满足传统工艺的要求外,要致力于各种新型工业领域的过程开发和设备设计。因此,促进流态化研究进一步发展的关键是不失时机地把握住这一研究方法、研究思维的转变,目前正在发生,且应予以充分重视的转变我们认为包括:

**研究深度由宏观向微观、由整体平均向局部瞬时发展:**仅对宏观现象的研究,如表观气、固速度、平均浓度、表观反应速度,表观停留时间等的认识已不能满足目前技术对该学科的要求。由于多相流的复杂结构,整体平均量的研究并不能从根本上揭示过程机理和描述过程变化规律,因此局部和瞬时结构参数及其变化规律逐步引起人们的重视,如局部瞬时速度、浓度、和扩散系数的测量,多相流微观动态图象的记录和分析,颗粒反应过程中表面形态的微观动态变化研究等。

**研究目标由现象描述向过程机理转移** 表观现象的描述不足以分析过程的本质特性,因此,流态化研究的目标已逐渐由现象描述转向对过程机理的认识,以实现通过认识过程的机理来有预见性地开发新的反应器,应用于新的工业领域。

**研究内容由单一性向多样化过渡** 随着科学技术的发展,传统的流态化反应器已不能满足某些特殊过程的要求。生物工程、材料科学、微电子和环境保护等一些新技术的兴起促进了三相流态化、超细粉流态化、超短接触流态化等新型过程的出现和发展。抓住这一过渡是将流态化应用推向新台阶的关键。

**研究方法由传统理论向多学科交叉开拓** 近年来,统计理论、分数维理论、非线性科学、摩擦学、流变学、表面物理化学等都被应用到流态化研究之中,以期解决传统研究方法所不能解决的问题,打破流态化研究数十年来停滞不前,重要现象不能从本质上解决现状。

**研究手段逐步高技术化** 计算机技术、光纤技术、激光、超声、电子等新技术的发展,为流态化研究提供了先进的测试手段和分析方法,使深入了解流态化多相流反应器内的流动规律和传递规律成为可能。

根据上述,建议把下列研究内容列为流态化学科近期的重点课题,并在管理上予以优先考虑和安排:

**非均匀结构和时空动态行为** 非均匀结构和时空动态行为是实现流态化反应器量化的难点所在,也是化学工程研究中一个最突出的问题。为了在这方面有所突破,必须借助于非线性动力学,混沌理论,耗散结构理论等新的研究方法。研究内容包括:多态现象和系统稳定性,局部和整体非均匀性机理,动态变化对传递和反应过程的影响,微观混合,自组织现象等等。

**非规则颗粒系统中的传递和反应** 对非规则颗粒系统内传递和反应规律的表征是反应器定量必须解决的问题。研究内容包括:非规则颗粒反应动力学,非规则颗粒粒度,传递和反应参数的预测等。

**新理论新方法的探索** 开发高技术的测试手段,配合交叉学科的最新进展,如计算机辅助实验、混沌理论、非线性非平衡热力学等,建立分析和模拟流态化反应体系中流动、传递和反应的复合模型,逐步实现定量化设计和放大。

**新反应器的研究和开发** 根据基础理论研究,建立优化反应器和放大反应器的方法和准则;结合不断发展的工业需求,开发新型工艺过程和工艺设备,这些都是流态化研究今后的关键内容之一。针对我国油少煤多的能源结构、稀土丰富的资源状况和超细颗粒技术的发展和需要,

开发各种节能、高效、低污染的新型流态化燃烧器也应是我国流态化领域不可忽视的研究方向。

## SEVERAL VIEWS ON THE FURTHER DEVELOPMENT OF FLUIDIZATION RESEARCH

Tang Jin

(National Natural Science Foundation of China, Beijing 100083)

Xu Guangwen      Li Jinghai

(Institute of Chemical Metallurgy, Chinese Academy of Sciences, Beijing 10080)

**Abstract** In this paper, the characteristics of fluidization in both the object of research project and the properties of the system are analysed, The present problems and opportunities with the development of fluidization are summed up. Some viewpoints and the contents of study are suggested on deepening the fluidization technique. The paper will be a valuable reference for the further development of fluidization discipline.

**Key words** fluidization, basic research, innovation

· 信 息 ·

### 简 讯

“863”计划十周年成果展览会于1996年4月1—9日在北京举行。国家自然科学基金委员会负责实施的“高技术新概念新构思探索项目”的部分成果参展。

高技术新概念新构思探索项目是国家《高技术研究发展纲要》的组成部分，要求：

- (1) 为高技术研究发展计划目标的实现提供新理论、新技术。
- (2) 服务于高技术发展目标，支持和促进有关主导领域的学科发展。
- (3) 为2000年以后的高技术发展提供科学储备。

此类项目设立的目的是鼓励创新，其资助经费占总经费的2%，由国家自然科学基金委员会负责受理自由申请、评审资助和检查实施。

1987年以来，共资助1 310项，资助金额8 071.86万元。承担项目负责人的所在单位59%为高等院校，41%为科研机构。年龄在35岁以下的项目负责人的比例，逐年增加，1987年仅为3.3%，1995年已达25.4%，表明有越来越多的年轻科学工作者正在成长起来，投身于高技术的探索研究，并成为骨干力量。

在资助项目中，科学工作者学术思想活跃，努力创新。绝大部分项目进展良好，有些已取得了创新性的成果，提出了有重要价值的科学概念。有些项目在科学前沿上作了创造性的探索，获得了有价值的科学积累。一些项目已纳入“863”计划相关主题，也有一些项目的研究成果从不同侧面推动和促进了“863”相关领域学科的发展，从学术或技术上配合和支持了“863”计划的实施，体现了高技术新概念新构思探索项目与“863”计划各领域的相互关系。

江泽民、李鹏等党和国家领导人参观了展览。