

颗粒流体系统的非线性行为

李静海 葛蔚 郭友良

(中国科学院化工冶金研究所 北京 100080)

摘要 本文讨论颗粒流体系统的研究现状和可能的发展方向。认为非线性行为是实现颗粒流体系统量化的难点所在,它可分为来源于颗粒流体相互作用的内在非线性和来源于外界影响和非理想物性的次生非线性。内在非线性引起系统内的自组织现象、分支现象和混沌运动,次生非线性则使得内在非线性的分析更加复杂。提出了认识非线性行为的两种可能途径:(1)把系统进行多方面的分解,即运动分解为极值和动态,能耗分解为可逆和耗散,过程分解为有序和无序,结构分解为不同尺度;(2)将该系统处理为尺度差别很大的两种介质的相互作用并进行计算机图形仿真。

关键词 非线性 颗粒流体系统 流态化 分解 计算机仿真 分支现象

Behavior Nonlinearity of Particle-fluid Systems

Li Jinghai Ge Wei Guo Youliang

(Multi-phase Reaction Laboratory, Institute of Chemical Metallurgy
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract This paper proposes that behavior nonlinearity should be the focus of future research of particle-fluid systems, which includes the intrinsic aspect resulting from particle-fluid interaction and the secondary aspect related to external factors and non-ideality of material properties. The intrinsic nonlinearity leads to bifurcation, chaos and self-organization, which is complicated further by the secondary nonlinearity. The concept of multiple resolution is proposed for analyzing such a complicated system, that is, the superficial motion into extremum and dynamic aspects, the total energy consumption into reversible and dissipative components, the whole process into ordered and disordered branches, and the global structure into different scales. Computer graphic simulation based on the assumption of two discrete media with different dimensions is also proposed to study nonlinear behaviors in the system.

Key words nonlinearity; particle-fluid system; fluidization; resolution; computer graphic simulation; bifurcation

一、学科简介

颗粒流体系统分散式和聚式两类。散式系统呈现均匀结构,颗粒均匀分布于流体中,随流体速度的增加,颗粒料层均匀平稳膨胀;而聚式系统则呈现非均匀结构,流体和颗粒分别聚集成稀、密两相,随流速的增加,这种非均匀两相结构会发生一系列转折性的变化,甚至突变。颗粒流体两相流研究的主要任务是认识这种非均匀的两相结构随操作条件变化而发生的一系列流域过渡,随流体和颗粒物理属性不同而发生的散式向聚式的演变和随边界条件不同而出现的流区空间分布的规律,并加以定量描述。

二、研究难点

流动结构不均匀性和状态多值性是颗粒流体系统的两个主要特征。目前,这一系统中出现的各种复杂现象的机理还不清楚,更没有形成统一的理论,定量计算往往不可能,因而,设备开发周期长,费用高,放大困难,有的过程长期处于试验阶段而难以放大,成为国民经济发展的瓶颈问题之一。然而,由于对设备性能和环境特性要求的不断提高以及一些新过程的出现,对颗粒流体反应器的需求日益增加。因此,在开发新型设备并对老设备进行技术改造的同时,建立统一理论,实现设备设计操作和放大的定量化是这一学科当前的主要任务。

实现颗粒流体系统研究定量化的主要难点在于其非线性非平衡特征,主要表现在:非均匀的耗散结构、非规则的颗粒形状和不均匀的粒径分布、随机和混沌过程以及放大效应等。

目前,模拟颗粒流体系统主要有三种方法,即将颗粒作为拟流体处理的拟流体模型、分别考虑流体密集的稀相和颗粒密集的密相中颗粒流体相互作用以及两相之间相互作用的两相结构模型、跟踪每个颗粒运动轨迹的颗粒轨道模型。这些方法各有优缺点,但目前都还无法对颗粒流体系统中的各种复杂现象定量化。存在的主要问题是:模型和现象差别较大,实验和模型过分简化等。此外,分析方法和测试手段的限制也是这一学科存在的困难之一。为此,注重学科交叉,更新研究内容,逐步实现定量化是该学科的发展趋势。

三、展 望

颗粒流体系统中的许多复杂现象都与其非线性非平衡特征相关,因而,认识非线性非平衡行为是实现颗粒流体系统定量化的关键。另一方面,由于传统方法已很难在这一领域有所突破,寻求新的研究方法也是当前这一学科的前沿。作者认为,计算机辅助实验应是研究颗粒流体系统的有效途径。以下是作者对以上两个方面的认识。

1. 非线性非平衡特性

颗粒流体系统中的非线性非平衡特征分为两类:一类是来源于颗粒流体相互作用的内在非线性;另一类则起因于外界和非规则因素,称为次生非线性。内在非线性导致系统内部复杂的流动结构,而次生非线性则使内在非线性的处理更加复杂,并引起放大效应。

(1) 内在非线性

内在非线性起源于颗粒和流体的相互作用,以 $Re = \frac{d_p u_f}{\nu_f} < 2$ 为例,当流体垂直向上通过颗粒料层时,流体流率与压力梯度之间的关系为:

$$\text{流体流率} = \frac{(\text{颗粒直径})^2 (1 - \text{颗粒浓度})^{-4.7} \text{压力梯度}}{18(\text{颗粒浓度})(\text{流体粘度})}$$

当流率很小时,系统处于固定床阶段,流体流率与压力梯度之间成线性关系。当流体速

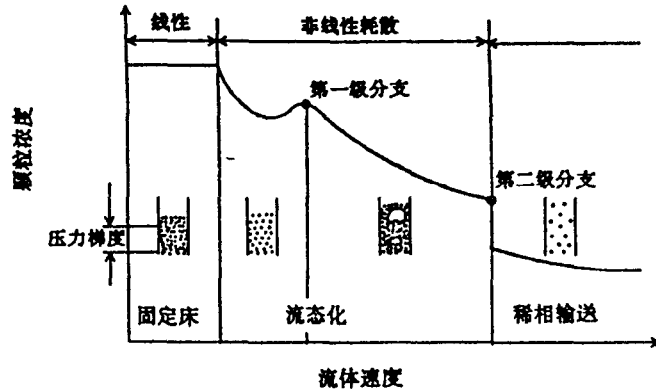


图1 颗粒流体系统中的非线性行为

度达到最小流态化速度时,料层开始膨胀,颗粒开始运动,两者的线性关系不再成立。当这种非线性因素增长到某一临界值时,系统内部结构发生突变,形成稀密两相耗散结构。这一系列变化也可以通过颗粒浓度-流速图形象地表现出来。当流体流率继续增加到另一临界值时,系统又由非均匀的两相结构突变为均匀的稀相输送。这一系列现象的机理在于颗粒流体在相互作用中既相互约束又相互协调。相互约束导致两者运动趋势互相排斥,而相互协调则使两者运动趋势互相配合。因此,存在三种可能的作用方式:颗粒完全控制的固定床、颗粒和流体协调的流态化和流体完全控制的稀相输送^[1]。这一变化过程中出现的非线性行为包括颗粒自组织形成的非均匀结构,分支现象引发的突变和多态过程以及局部分支现象导致的混沌现象等。由此可见,颗粒流体系统中的颗粒与流体的相互作用是一种典型的非线性非平衡过程,认识这一过程的困难在于现有理论无法提供非线性过程的稳定性判据^[2]和描述多种过程耦合而成的复杂现象的数学方法。目前看来,认识这种非均匀时空动态耗散结构的根本出路在于对这一系统进行多方面的分解:即将运动分解为极值和动态,能耗分解为可逆和耗散,过程分解为有序和无序,结构分解为不同尺度。这种分解的结果,使研究者可以从复杂的过程中找到有规律可循的成分,并有助于了解无规律的不同侧面。近期研究表明:非均匀的流态化状态满足熵增率最大的条件^[3],这一条件是否也适合于某些非线性非平衡过程,是一个值得进一步思考的问题。

(2) 次生非线性

内在非线性是认识颗粒流体相互作用规律的难点所在,而次生非线性则使这一规律在实际应用过程中更加复杂。这方面的非线性主要来自两个方面:非理想的物性和放大效应。

工业过程中的颗粒物料均具有粒度分布并为非规则形状的颗粒。由于在流速一定的前提下,流体对颗粒的曳力与直径并非成线性关系,它与颗粒形状的关系更加复杂。目前使用的简单的几何因素平均直径和颗粒形状系数并不能表达这种复杂的非线性关系,从而对不同实验结果的比较和研究结果的应用带来了很大的困难。解决这一难题的出路在于定义平均直径时要考虑颗粒流体之间的相互作用机理或将粒度分布作为参数代替模型中的颗粒直径。对于非规则形状的处理,目前可以通过分数维理论定义不同形状的维数。然而,如何在

所定义的维数中考虑形状对颗粒流体相互作用的影响,又是一个有待解决的问题。

放大效应产生的机理在于:在不变的操作条件下,颗粒流体系统中的过程随设备结构和规模的变化而发生变化。对于单相流动而言,流速一定时,管径的变化可导致层流向湍流的过渡,这种简单的放大效应在颗粒流体系统中由于颗粒的存在更加复杂化。同时,由于不均匀结构的存在,基于平均流速的雷诺数不再是这种突变发生的唯一的控制参数,而必须进一步考虑的是颗粒流体之间的其它相互作用。此时,基于因次分析的传统相似理论不再适用,而颗粒流体的其它相互作用机理必须包括在分析之中。事实上,解决这一困难问题的途径包括对设备结构和规模变化导致的分支现象的认识。而这又必须基于对径向颗粒及速率分布机理的理解。

2. 计算机辅助实验(图形仿真)

目前,分析非线性非平衡过程的理论还不完善,研究颗粒流体系统的实验手段还很有限,然而计算机技术的发展却为研究颗粒流体系统提供了另一机遇——计算机图形仿真。

目前计算机仿真都是根据唯象描述模型(如 N-S 方程组)进行演算,尽管能逼真地描述许多流动现象,但毕竟不是对两相流中的直接的物理过程(颗粒及流体分子各自和相互的作用)的直接描述,因此不能作为一种彻底的“实验”方法。理想的方法是根据直接的物理图景建立模型。颗粒流体系统本质是由尺度相差很大的两种离散颗粒介质组成的,而且即使认为同种粒子不可分辨,也仍能保持现象基本不变,因此其不同规模上的行为应能获得统一描述。虽然计算机还无力模拟一个与实际同等规模的系统,但小规模模拟应仍能反映出一些实际系统的深层次性质,通过对小系统的计算机实验和对大系统的物理实验,我们将有可能发现唯象模型所难以预测的非线性行为的规律及其机理,建立起直接基于最底层的物理过程的新的描述框架。

计算机图形仿真的优点是避开了复杂的非线性过程和机理的描述,物理概念明确,可采用并行算法,边界易处理等。作为一种新的研究方法,希望能够部分取代常规实验,不仅作为过程放大的辅助手段,而且也作为一种有效的分析手段,用于认识一些用常规实验无法研究的复杂过程。

参 考 文 献

- [1] Li Jinghai, Kwauk M., Reh L., in *Fluidization VI* (eds. Potter O E and Nicklin J), Engineering Foundation, New York, 1991, p. 83.
- [2] Gage D H, Schiffer M, Kline, S J, Reynolds W C, in *Non-Equilibrium Thermodynamics Variational Techniques and Stability* (eds. Donnelly R J, Herman R, Prigogine I), The University of Chicago Press, Chicago and London, 1966, p. 283.
- [3] Li Jinghai, Kwauk M., *Particle-fluid Two-phase Flow—the Energy Minimization Multi-scale Method*, Metallurgical Industry Press, Beijing, 1994.