

- Mechanisms of Turbulence, II, ed. by Fiedler, H., Springer-Verlag (1978), 273.
- [50] Reynolds, W. C., Computation of turbulent flows, *Ann. Rev. of Fluid Mechanics*, 8 (1976)。
- [51] Rodi, W., A new algebraic relation for calculating the Reynolds stresses, *ZAMM*, 56 (1976), 7219.
- [52] Schumann, U., Patterson, G. S., Numerical study of pressure and velocity fluctuations in nearly isotropic turbulence, *JFM*, 88, 4 (1978), 685.
- [53] Shaanan, S., Ferziger, J.H. and Reynolds, W. C., Numerical simulation of turbulence in the presence of shear NASA-CR-143349 (1975)。
- [54] Vollmers, H., Rotta, J. C., Similar solution of the mean velocity turbulent energy and length scale equations, *AIAA J.*, 15, 5 (1977), 714.
- [55] Warsi, Z. U. A. and Amlicke, B.B., Improved algebraic relation for the calculation of Reynolds stresses, *AIAA J.*, 14, 12 (1976), 1779.
- [56] White, F. M., *Viscous Fluid Flow*, McGraw-Hill, N.Y. (1974)。
- [57] *Turbulent Shear Flows, I*, (Sel. Papers from 1st Intern. Symp. on Turbulent Shear Flows), Durst, F., et al, ed., Springer-Verlag (1979)。
- [58] *Numerical Methods in Laminar and Turbulent Flow*, Taylor, C., et al, ed., Pentech Press (1978)。

## 关于物理化学流体力学

上海化工学院 戴千策

物理化学流体力学研究有化学变化发生、有热量传递、物质传递现象存在时的流体流动规律，是一门边缘学科。研究的内容既涉及流体运动对化学或物理化学变化的影响，也包括物理-化学因素对流体运动的影响。

伴有传热、传质、化学变化的流动，在航空、动力、化工、冶金等生产技术部门大量存在。举例来说，飞行器高速飞行时，气体分子在高温下解离发生化学反应；发动机（包括火箭发动机）和工业炉中燃料均相和非均相燃烧；黑色和有色金属冶炼；各种化学产品的制造则更是离不开均相或非均相流中的化学反应。

对上述现象的各个方面分别进行研究，在物理或化学的范围内早就开始。但联系起来考察彼此间的影响，进行综合分析，找出主要影响因素，不仅定性，而且力求定量，以此作为研究对象，形成物理化

学流体力学，建立起现代力学中一个新分支，是从50年代开始的。

古典流体力学假定流体质点处于热力学上的平衡状态，但有化学反应的系统，热力学上是不平衡的，存在所谓弛豫过程。流体流动中的弛豫，在物理化学中进行过广泛的研究，但着重弛豫过程的机理，而未考察弛豫过程对流体流动特别是气体流动的影响。随着高速飞行的发展，在古典流体力学领域工作的科学家，日益对弛豫过程影响流体流动感到兴趣，主要目的在于定量地搞清楚弛豫现象对流场的影响。正是在高速飞行技术发展的推动下，物理化学流体力学开始发展起来。50年代初期，美国力学家卡门提出空气热化学 (aerothermochemistry) 的名称，并认为火焰传播、爆震、点火、火焰稳定和冷熄等问题也都可以包括在这一范围内。60年代以来，研究更趋广泛，在历次国际燃烧会议上，在一些主要的航空科学，流体力学和燃烧学学术刊物上，反应流动规律的研究成果大量涌现，并有专门的书籍出版。如 W.H. Dorrance: *Viscous Hypersonic Flow*, F. A. Wil-

liams: Combustion Theory等, 分别就高速飞行, 燃烧方面介绍了化学反应流动系统的基础理论。70年代以来, 西方有一些科学家鉴于能源危机的冲击, 从提高能源利用率, 节约能源消耗出发, 在命名为燃烧的流体力学会议上呼吁打破传统的流体力学范围, 对存在传热、传质和反应时的流动加强研究。在苏联, 也较早开展了物理化学流体力学方面的研究工作。40年代末期出版了Д.А.Франк-Каменецкий的《化学动力学中的扩散与传热》一书, 提出要将化学动力学、流体力学、物质传递与热传递结合起来, 建立新的边缘科学, 并给出了化学流体力学的名称。认为这样的研究能得出许多重要的结论, 创造出研究反应速度的新方法, 并可借研究化学过程阐明流体力学问题。学科的内容包括三个分支: 1. 扩散动力学: 研究热因素可以忽略时, 扩散在非均相化学反应中的作用; 2. 燃烧理论: 研究均相放热反应时热传递的作用; 3. 非均相反应理论: 研究最复杂情况下扩散与传热同时作用下, 反应进行的规律。50年代末期, 出版了В.Г. Левич的《物理化学流体力学》并很快出第二版, 除包括上述内容外, 还介绍了有电现象, 毛细现象存在时的物理化学流体力学。

随着化学工业的大型化自动化最优化, 需要建立过程的数学模型, 这就愈益要求了解化工过程的机理, 亦即了解化工过程及设备中流动的传热、传质和反应的规律。50年代中期以来, 许多著名的化学工程刊物如化学工程科学, 工业与工程化学(基础), 美国化学工程师会刊等都登载了不少研究化工设备中流体流动的文章, 分析均相特别是非均相情况下流动对传热、传质及反应的影响。

值得注意的是, 1976年8月第十四届国际理论与应用力学会议报告了四篇物理化学流体力学方面的论文。1976年5月在基辅举行第四届全苏理论与应用力学大会, 液体与气体力学大组提出的长远方向包括了化工问题。会议9个小组中有三个组分别从湍流、多相流、化工过程中离散介质力学等方面报告了物理化学流体力学的有关内容, 探讨了燃烧过程中各相的相互作用, 有化学反应、传热、传质的气液湍流的流体力学, 离散介质理论的现代方法等。谢道夫的总报告中, 讲述现代力学特点时提到, 以前物理学家和化学家从事的许多传统问题(各种扰动的传播, 状态方程, 分子运动论等)现在力学家也在搞了。并认为化学反应动力学的许多成果, 应归功于力学方面的理论和实验; 力学研究的重心已移到模拟的问题和新问题

的良好提法上, 列举了25个非古典模型, 涉及化学流体力学领域的就有: 含固体微粒的液体和气体悬浮体模型, 含气泡的液体模型, 考虑相变、化学反应、传热、扩散、粘性等多相混合物模型。1977年7月在英国伦敦牛津大学举行了物理化学流体力学第一次国际会议, 同年12月出版了会议论文集。1978年11月在美国Purdue大学举行第二次会议。1978年9月在南斯拉夫举办二相能量及化学系统中动量热量物质传递讨论班。这样频繁的国际学术活动表明, 物理化学流体力学已经引起了力学界及有关工程界的重视。

## 二

物理化学流体力学对工业建设和国防建设都有巨大实际意义, 现略述三方面情况如下。

1. 由于喷气技术以及动力工业发展的需要, 强化和控制燃烧过程已成为一个重要的工程技术问题。燃烧过程的控制因素不仅是化学反应或甚至不主要是化学反应, 而主要是流动、扩散和传热及其与化学反应相互影响的问题, 亦即涉及物理化学流体力学的研究。这方面的进展有可能逐渐减少动力装置设计中的经验成分, 也有可能提出新的燃烧方案, 以满足更特殊情况下工作的要求。在可以预见的未来数十年内, 能量仍将主要来自矿物燃料<sup>1)</sup>, 因而尽可能提高燃烧效率, 降低燃料消耗, 即使改进不算很大, 由于每年燃料消耗量很大, 所得到的经济效益也将很大。事实上目前燃烧效率还大有提高的可能。此外, 据统计, 形成大气污染的主要来源是燃料的燃烧过程。因此, 进一步弄清燃烧机理, 以求实现无污染或少污染燃烧, 对环境保护极为有益。

2. 金属冶炼、化工生产、石油炼制过程及设备内流动、传热、传质及化学反应之间的相互影响, 目前了解得还不十分清楚。因此在工程设计中有很多设备的设计仍用经验数据和经验方法。尤其化学反应器, 迄今相当多的情况还是先在实验室设备中进行反应动力学的实验, 选择合适的反应操作条件和设备类型, 然后逐渐放大。随着化学反应工程学的发展, 目前已有一定的理论指导, 但由于问题复杂, 设备由小到大, 可能流型改变, 混和情况不同, 相间接触面积有异, 并因而引起传热、传质和反应情况的改变, 以致放大规律还未完全掌握。电子计算机技术发展之后, 放大方法已经取得了重大突破, 借数学模拟可以实现万倍至几万倍的高倍数放大, 但这首先要求建立过程

1) 目前世界上99%的能量来源于矿物燃料的燃烧, 即使在今后若干年原子能和其他能源的利用会有所发展, 但主要还是来自矿物燃料的燃烧, 并且估计到本世纪末矿物燃料消耗量将为目前的2—3倍。

的数学模型,为此弄清过程的机理十分必要。结合上述工艺过程和设备,开展物理化学流体力学研究,有助于阐明过程机理,为模型建立,为改善和创制新型生产设备打下良好基础。这对发展生产技术,实现由实验室实验直接过渡到工业生产,以节约人力物力加快发展速度,起到较大的促进作用。

3. 飞行器高速飞行,头部受到激波强烈压缩时,气体大部分动能转化为热能。边界层内温度迅速升至很高,气体分子被分解,产生新的分子和离子。气流中这些化学反应改变流场性质。飞行器表面或发动机喷管在高温气体作用下产生烧蚀现象,这里既涉及固体材料受热后的相变如熔化、蒸发,也有气相反应。研究高速飞行时的这类物理化学流体力学问题,显然对于飞行器的良好设计和结构改进是必不可少的。

### 三

物理化学流体力学研究的内容颇为广泛,研究结果分散登载在流体力学、传热传质学、燃烧学、航空、动力、化学工程等期刊上。要对这门学科的主要内容和研究现状作出全面概括分析颇感困难,这里只选择一些方面略作叙述,借以说明这门学科的大致轮廓。

**1. 燃烧化学流体力学** 提起研究有化学反应的流动,自然容易想到燃烧。确实,物理化学流体力学和燃烧的研究有密切的关系,但两者并不等同。一方面,物理化学流体力学中研究的有不涉及燃烧的流动过程,另一方面,处理燃烧问题可以从不同角度进行,例如,燃烧的研究可以包括燃烧化学(高温平衡和化学动力学),燃烧物理(火焰光谱、火焰中电离现象),以及与具体燃烧装置有关的工程技术问题。这些都超出了物理化学流体力学的范围。下面所述的是与燃烧有关的若干流体力学问题。

**a. 层流燃烧理论** 层流状态下的燃烧是最早研究的。它较易进行数学处理,研究所得的结果和发展的概念,对燃烧中其他许多研究又都是有用的,因此从事这方面的研究一直较多,并且颇有进展。一般分为预混和未预混燃烧两类进行研究,后者又称为扩散火焰,研究得更多些。对未预混燃烧的某些较简单的情况,守恒方程结合适当的化学动力学方程和数据,进行求解,已可预测燃烧速度、温度分布、浓度分布等,并对反应级数、可逆反应、活化能的影响进行了详尽的探讨,起燃、熄灭条件、复杂火焰结构亦有不少论述。对未预混系统和预混系统中化学动力学机理是否相同,当流场几何特征不同时,反应动力学对燃烧速率的影响,在理论和实践上都是有意义的,但目

前还研究得不够充分,尚未能作出确切的回答。

**b. 湍流燃烧理论** 实际情况下的燃烧多数是湍流,因而湍流燃烧理论的研究早就受到重视。湍流运动已很复杂,加上传热、传质和化学反应,问题就更加复杂。所以湍流燃烧理论往往落后于等温湍流理论。定性来看,湍流对燃烧的影响较易清楚。湍流不仅增加能量传递,增加火焰表面积,而且形成新的起燃中心,大大提高了火焰传播速率,但至今还没有完全搞清其机理,定量估计火焰传播速率还有不少困难,必须在颇大的程度上依靠实验进行研究。不仅进行过湍流火焰整体性质的测量(如燃烧速度、火焰高度等),而且采用了若干特殊技术来考察湍流火焰结构。用纹影法观察,发现湍流火焰纹影照片中出现的皱纹,与层流火焰有着明显的区别;还用高速摄影方法拍摄直接火焰照片;热线风速仪测量火焰内湍流强度;以及其他一些光学电学方法观测湍流火焰。大量实验资料的积累,为湍流燃烧理论的提出打下了基础。已经提出的湍流火焰模型大体分两类:1) 皱折层流火焰模型:这是最著名的分子传递模型,认为湍流的显著效应是使分子传递所需的火焰表面积增大。2) 湍流传递模型:按强调的重点不同,分为大尺度旋涡模型和小尺度旋涡模型。前者用相同于层流火焰的方法处理,只是分子传递系数以湍流传递系数代替。后者认为高度发展的湍流中,燃烧着的小尺度旋涡的运动是湍流火焰传播的主要机理,而且强调旋涡内化学诱导时间和旋涡寿命相对量级的重要性,这种理论认识到,湍流微结构的深入了解对发展湍流火焰理论是必要的。这几种模型都有一定的实验依据。但从现代对湍流结构的认识来看,微尺度 $Re_\lambda = u' \lambda / \nu$ ( $u'$ 为脉动速度, $\lambda$ 为泰勒微尺度, $\nu$ 为运动粘性系数)在湍流火焰理论中应是一个重要参数。当 $Re_\lambda$ 值高时,小尺度结构是起着重要作用的。当理论还很不完善时,将实测的 $u_t/u_b$ 对 $Re_\lambda$ 关联是较好的( $u_t$ 、 $u_b$ 分别为湍流速度和燃烧速度);了解燃烧室中 $Re_\lambda$ 的值对估计燃烧性能是有益的。看来只有湍流理论的发展,才能使湍流燃烧机理得到进一步的解决。

**c. 燃烧振荡** 伴随着燃烧过程的随机压力脉动,称为燃烧噪声,是一种污染,近年来引起了广泛的研究兴趣。不过振荡燃烧方面最大的问题还是周期振荡,常称为燃烧不稳定性。在发展军用固体燃料火箭中,对燃烧振荡曾进行了大量的研究,对它的起因和影响有了一定认识,但尚未完全解决,无论对流体还是固体燃烧振荡,均需进一步研究。

**d. 二相燃烧** 90%的矿物燃料是液体或固体,因此燃烧系统中二相流是经常遇到的。如对液体燃料的情况,就有许多流体力学问题需加阐明。液体燃料需

雾化成液滴后进行燃烧,了解这种雾化了的液滴燃烧系统,需作三个方面的研究:1)单一液滴的燃烧机理;2)液滴群的力学行为:雾化机理、液滴分裂合并、液滴大小分布等;3)液滴群与气体之间的相互作用。第一方面相对来说稍简单些,现在已可给出较为普遍适用的燃烧速率计算公式;雾化机理基本清楚,液滴大小的分布虽然尚无令人满意的理论分析,但亦有经验半经验的关联式可供使用,在这基础上可以计算燃烧效率;第三方面的问题,即考虑液滴与气体相互作用,则比较复杂,作过一定简化后建立的基本方程组对一些简单的情况,可以求解,给出了一些重要结论(如燃油喷射速度、液滴尺寸、蒸发速率与燃烧室长度的关系等),对燃烧室的设计是有价值的。

对固体颗粒(如煤粉)的燃烧有类似情况。当前二相燃烧系统的重要课题是探索新的燃烧方式,以实现充分燃烧,既提高燃料的利用率,又减少污染。例如,研究燃烧过程中氮的氧化物的形成机理;研究如何减少固体燃料燃烧时的过剩空气;这些都涉及燃烧室中的二相流动、二相间的传递、燃烧反应动力学以及它们间的相互作用这样一些基础研究。

e.燃烧室的数学模型和燃烧室的放大 将燃烧反应动力学与流体力学方程联合求解,无论是解析解或近似解,毕竟是太复杂了。考虑到燃烧是一种化学反应,燃烧室实质上就是化学反应器,吸取化学工程领域中处理反应器的方法,如返混、停留时间分布、控制因素分析(指整个过程由反应还是由传质控制)等,再结合流体力学的一些方法和概念(如湍流混和)将实际过程简化,抓住主要因素,建立燃烧室的数学模型,以解决设计放大问题。这样的方法,正引起日益广泛的注意,1976年国际第16次燃烧会议上,充分反映了这一动向。

化学反应在分子尺度上发生,但计算各个分子的运动超出了我们的能力。可是任何成功的燃烧室模型必须考虑的事实是,反应能够发生之前,必须实现反应物分子混和,而且要热的产物混和,以得到足够的反应能量,所以模型必须考虑湍流混和,并将大尺度混和(导致平均浓度)与分子尺度混和(支配实际反应)区分开来。

已经提出的一些模型有二维模型、复合模型等。实际燃烧室常涉及三维循环流动,所以二维模型较难应用。复合模型是将燃烧室看成一系列充分混和(理想混和)与活塞流(理想排挤)相结合的单元组成的反应器,这种模型已在发动机燃烧室放大中有所应用。

此外,燃烧系统往往是由具有明显的压力梯度和

复杂的受限流动所组成,为了这种系统的设计、放大和有效运转,弄清流型是很重要的。例如旋风燃烧室中的二次流,还有其他一些复杂系统,都正进行着详尽的测试和理论分析。

超声速燃烧和爆震,也是研究较多的,此处不拟多述了。

2.扩散动力学 凡是化学反应发生的地方,都涉及扩散,有些反应过程还主要是由扩散控制的。因此,扩散动力学是物理化学流体力学研究的重点之一。层流情况下的扩散,反应对扩散过程的影响,在较简单的情况下,已可通过求解对流扩散方程或扩散边界层方程,得到解析解或数值解;湍流扩散,运用半经验湍流理论和统计理论,对若干情况亦已得到半定量的关联式。随着湍流理论的发展,近年来对固定界面、活动界面附近的流动结构均有新的认识,虽然还不能说是重大突破,但促进了相间物质传递理论的发展;继颗粒、滴、泡、膜和连续相间传递的基本行为大体上搞清之后,正研究多颗粒系统、鼓泡层、液滴群之间的传热、传质,并已得到一些半经验的关联式;滴泡流经非牛顿型连续相的传质亦已开始研究;多组分扩散的特点逐步认识到用统一观点研究流动传热传质,所谓动量、热量和物质传递的统一理论已经提出。上述理论或经验的关联式,有的直接用于设计,有的为过程分析提供了方便。

3.电化学流体力学 电流通过电解质溶液,电解质溶液中质点在电场作用下运动或者质点在非电力作用下运动,使溶液中产生电场,这类过程的研究通常只认为是物理化学(电化学或胶体化学)的范围,但实际上流体力学因素在其中起着十分重要的作用。例如电流通过电池的过程可以看作多相化学反应的一种特殊情况,象任何多相反应一样,过程包括三个阶段:1)离子由溶液深处传递到电极表面;2)离子或分子参与电化学反应本身;3)反应最终产物的生成,最终产物在电极表面上析出或自表面离去。电化学变化的总速度取决于最慢阶段的速度,常常第一阶段是最慢阶段,这种情况下掌握溶液的运动,离子的扩散规律等是解决问题的关键,因而成了电化学流体力学中重要的研究对象。电化学流体力学正是研究电化学过程中流体力学因素和电化学因素的相互关系。

电化学过程在工业上和科学上是经常遇见的,如电池、电解、电镀、电泳、极谱仪、海水淡化、金属腐蚀等,所以近年来电化学流体力学的研究相当活跃。

运动溶液中的离子转移是借对流向电极的扩散以及电场中的离子迁移实现的,通常的扩散方程及边界

条件都需考虑此种因素而作相应的修改。对圆盘、圆管、平板等情况发展了解析解,扩散流、电流分布、浓度极化可作定量估计。这些结果可用于电化学的各种实际问题,如计算极化曲线(反应的伏安特性曲线),进行溶液组成的分析,测定扩散系数;确定反应级数,反应机理等。电渗析海水淡化过程中,淡化室流型研究,扩散边界层方程求解,湍流促进器的使用等,对这过程中的关键问题——浓差极化发生的机理、影响及其控制,起了极为重要的作用。膜过程与溶解气体边界层,某些生物过程,化工中一些伴有反应的传递过程,有共同的理论,即所谓“载体传递理论(Carrier Mediated Transport),近年来是很引人注目的。这里还应指出,一种所谓极限扩散电流技术(limiting diffusion current technique),近年来正广泛用于传热,传质,流体动力学的基础研究,如测量湍流脉动,求涡流粘度,涡流扩散系数,观测从层流向湍流的转换,考察聚合物添加剂对传质的影响等,这是电化学流体力学在科学研究方面的一种重要应用。

**4.毛细流体力学** 在考虑具有活动界面的二相(气液或液液),以及相间传热传质时,经常会涉及所谓毛细现象。即相边界上的表面张力所造成的现象。例如,溶有表面活性物质时,液体中气泡或液滴运动的阻滞,各种扰动下表面波的形成,毛细管中的运动等。这类现象的发生,或是相界面有相当的弯曲,或是界面上表面张力不同,以致相界面附近出现一种力,改变各相运动的特性,或者诱发原来不存在的运动。这样表面张力影响流体运动,进而影响传热传质,而传热传质学又会使表面张力改变,即动量、热量和物质传递之间呈现强烈的相互作用。为考虑这种情况,通常流体力学中所用的边界条件必须加以改变。由于问题比较复杂,这些现象的理论分析还只限于一些较简单的情况,但和大量的实验结合,已经解决了许多重要的问题。液体中溶有表面活性物质时,对液滴运动所造成的影响,不仅可作定性的机理解释,而且就各种不同的控制因素,给出了定量的计算结果,基本上与实验相符;对活动界面稳定性的研究表明:深液层和气流接触时,界面的稳定性基本取决于马赫数,重力,表面张力等因素;其他如Marangoni效应所造成的流体力学上的不稳定性;薄液膜的运动特性(包括稳定性),热致毛细运动,非线性扰动理论等均已作过分析研究,并已有结果。

**5.化学反应器中的物理化学流体力学** 化学反应器是化工厂的“心脏”。反应器的放大是当前工业部门急需解决的重要课题。为了有效地实现反应器的放大,理论和实践都已证明,靠相似方法难以奏效,必须掌

握反应器尺寸由小而大时各因素变化的规律才行。为此,进行流体力学的研究,往往是最基本的。流化床放大是应用流体力学于化学反应器而取得较大成功的例子之一。

实验表明,当气速大于临界流化速度时,就有气泡出现;两倍临界速度时,已激烈鼓泡。早在60年代初期就有人应用势流理论、渗流达西关系式等许多流体力学的重要概念和方法,研究床中的气泡现象。经过不断发展和改进,现已初步确定了单气泡及其周围的流体流动现象。这就是,气泡是床中颗粒激烈混和的主要原因。气泡上升时有尾流。尾流中夹带着一定量的颗粒,随气泡一起运动。气泡周围也有夹带着颗粒的下降气流(称为气晕),该气流对气泡作绕流;气泡内有环流,环流造成气泡和气晕间的气体交换。60年中期以后,更有人在连续介质的基础上,导出一组方程(包括物质守恒、动量守恒和能量方程)进行求解。发现流化系统对内部小扰动是不稳定的,表面波可在系统中传播,并得知对高密度比(颗粒密度/流体密度)的床层,这些波动是稳定的。在密度比大于10时,床中必定形成气泡,和小于10时截然不同。正是在对床层内流动现象不断认识的基础上,提出了一些流化床数学模型,和一定的反应动力学相结合,并由于长期以来生产经验的积累,从而可以进行流化床的放大和设计,促成大型流化床在工业上实现。

对气液鼓泡层的流动情况的研究发现,深液层中有环流存在,这些现象的揭示,对于放大是有启发作用的。

用于生产高聚物的聚合釜是一种非常重要的反应器。已经知道,流型、混合程度等流动因素以及传热等对反应产物(聚合物)的质量(如分子量分布)有重大影响。这方面虽已有一定研究,但从物理化学流体力学方面进行工作,还很不够。目前聚合釜的放大,还带有很大的经验成分。

还应指出的是,目前研究反应器中的流动及其对反应的影响是主要的,至于反应对流动有什么影响,研究还很少,几乎没有多少成功的分析。

**6.反应边界层** 在空气中的超声速飞行,在预混气流中用金属板使火焰稳定,用烧蚀热屏蔽法对再入导弹进行热防护,催化剂表面上的催化现象等,都涉及流体流经固体表面时,在边界层中发生化学反应。这类问题在50年代中期就已着手进行理论研究,建立了边界层中有化学反应时的基本方程组,并针对一些具体情况求得了准确解或近似解。为求解半无限平板在氧化剂气流中燃烧时的解,得出了燃烧速率的计算式,阐明了物质交换减少作用于平板阻力的原因。

对边界层中有化学反应时的传热问题,研究得更

# 流化床气泡的统计测量原理

浙江大学 范西俊

鼓泡现象是气-固流化床的特征, 床内气泡相的流动分布对反应器性能有重大影响。由于床内气、固两相流动的复杂性, 至今不但在理论上难以确切描述, 而且对鼓泡现象本身也还有待于进一步认识, 因此寻求一种有效的测量方法有极为重要的意义。

十多年来, 不少科学工作者致力于流化床内气泡运动的实验研究, 所用的测量方法有几种。一种是用电影摄影机拍摄流化床表面影片, 根据气泡喷发时的直径来推算床内气泡的直径。此法很不精确, 而且只适用于低的流化速度。因为只有低流化速度时才能清楚识别单个气泡的喷发。另一种方法是在二维流化床中拍摄气泡照片, 但二维床中壁效应很大, 与实用的三维床情况大不相同, 其结果能否推广到三维床尚待解决。一种比较巧妙的方法是用X射线摄影法摄制三维床中气泡的照片。此法不但对床完全没有干扰, 而且能得到气泡运动的细节, 但是由于受到X射线强度的限制, 床的宽度不能大于30cm。同时, 气泡密度高时照片上气泡重叠, 无法分辨出单个气泡。所以此法也只适用于低流化速度情形。要在任意尺度三维流化床内的任意一点作局部测量, 又不受流化速度的限制, 只有用局部测量探头才有可能。这种测量方法的效用以前曾受到怀疑, 因为当时探头体积大, 影响局部流化状态, 同时没有适当方法处理和翻译探头信号, 无法提取有用的信息。近几年来, 小型化探头的研制成功,

探头信号的统计处理方法和计算机实时处理方法的应用, 使得探头测量方法成为测量床内统计分布的有效方法。

在实际的自由鼓泡床内, 大量气泡在分布板附近随机地发生, 在上升过程中又随机地聚并或分裂。因此在床内任一点, 气泡的频率、尺寸和上升速度都是随机的。所以仅仅研究单个气泡的细节是不够的, 必须从大量气泡的随机运动中求得其统计规律。统计测量方法就是运用统计信息处理方法, 从探头信号中提取出气泡运动的统计特征参数。由于它抓住了床内气泡运动的基本特征——随机性, 因而它比其他测量方法更为合理。

本文介绍J. Werther (西德Erlangen大学) 研制的测量方法<sup>[1,2]</sup>。其测量系统如图1所示。统计测量系统包括: 1. 小型电容探头, 指针长3mm, 直径0.4mm, 外套管直径1.1mm, 测量体积 $2.5\text{mm}^3$ , 它把床内局部空隙度变化转化为电脉冲信号。2. 处理探头信号的系统。3. 适用于探头信号处理的气泡统计模型和数据处理方法。Werther用此测量系统测量了气体流化床内气泡的直径分布<sup>[3]</sup>和形状<sup>[4]</sup>, 详细研究了直径对流化床内二相流动分布的影响<sup>[5]</sup>、大直径床内气泡的聚并<sup>[6]</sup>、气泡串<sup>[7]</sup>以及对流固体运输<sup>[8]</sup>等。本文着重介绍探头信号的统计处理方法。

多些。在下列两种极限情况下较易进行数学处理: a. 反应速率足够快, 使边界层中处处保持化学平衡; b. 边界层中反应速率小到可以忽略。得到了相应的解答, 从而阐明了化学反应的存在对传热所起的影响。

还应该提到, 具有催化作用的平板上层流边界层, 解析结果表明, 这时边界层中的流动特征和绝热活塞式反应器的流动特征相同, 这是很有兴味的。

7. 物理化学流体力学基础研究 物理化学流体力学在近20年中逐渐发展起来, 在各技术部门中解决了一些问题, 但还缺乏统一的基础。有大量的基础研究工

作要做, 如多组分可反应混合物运动的基本关系式, 边界条件, 各种近似处理的有效性, 多相传递的基本规律, 湍流与化学反应的相互影响, 高温气体反应动力学数据的测定等。把这些工作做好, 就可能为这门学科进一步奠定坚实的基础。

附注: 本文完全没有提到有化学反应的高速流动, 有兴趣的同志可参阅有关文献, 例如Beckel, E., *Chemically Reacting Flows, Annual Review of Fluid Mechanics*, 4 (1972), 155. 涉及冶金工业的物理化学流体力学问题, 本文也几乎没有提到。