



## 第四届国际多相流会议简介

周力行

清华大学工程力学系, 北京 100084

### 1 会议概况

第四届国际多相流会议于 2001 年 5 月 27 日到 6 月 1 日在美国 New Orleans 召开. 本次会议约有 800 多名来自美国, 加拿大, 欧洲, 亚洲 (包括中, 日, 韩, 印等国) 的代表参加, 宣读论文共 565 篇, 其中邀请报告 20 篇, 分组口头报告和张贴论文 545 篇. 中国有清华大学周力行, 杨瑞昌, 西安交大陈学俊, 林宗虎, 陈听宽等, 中科院工程热物理所蔡瑞贤, 浙江大学林建忠, 华中科技大学柳朝晖和大庆石油学院的 2 位代表共 11 人参加, 宣读论文 10 余篇, 其中周力行应邀做邀请报告 1 篇, 宣读分组口头报告 2 篇, 张贴论文 1 篇. 会议期间, 大会代表还投票选举出新的一届主席团 (Governing Board), 任期 6 年 (2001 年到 2006 年), 是主管国际多相流学术界有关学术交流事宜的常设机构 (性质相当于学会理事会). 周力行当选为主席团成员.

国际多相流会议是多相流学术界最有权威性的系列性大型国际会议. 第一届, 第二届和第三届国际多相流会议曾于 1991, 1995 和 1998 年分别在日本筑波, 日本京都和法国里昂召开.

### 2 会议主要内容

会议包含了多相流基础研究, 数值模拟, 实验研究, 测量方法和应用方面的最新研究成果. 具体说来, 有颗粒动力学, 气泡动力学, 液滴动力学, 相交界面效应, 气液流型, 气粒流动, 气雾流动, 气泡 - 液体流动, 液固流动, 有反应的多相流, 多相流传热, 相变, 核反应堆热工水力学, 多相流在能源, 化工, 冶金, 环境等领域的应用等方面.

### 3 主要学术进展

由于会议涉及的问题很多, 同一时间有 7 个分会场进行报告, 下面仅报导我所参加的有关气泡动力学和气泡 - 液体流动, 颗粒动力学和气粒流动两方面的一些主要学术进展.

首先谈谈一部分邀请报告. 美国 Tryggvason 介绍了多相流, 特别是气泡 - 液体两相流动的直接模拟的最新进展. 日本 Matsumoto 提出了多相流多尺度

模拟的思路, 即直接模拟、大涡模拟和双流体模拟三者的相互结合. 美国 Dudukovic 报告了综合运用同位素技术, 工业 CT 测量和液体湍流  $k-\epsilon$  模型的统观模拟研究鼓泡床内气液两相流动的结果. 美国 Gidaspow 介绍了流化床内稠密气固两相流的动力论模型的研究结果. 日本 Tsuji 总结了稠密气固两相流的拉氏模型的研究结果. 法国 Lance 报告了气泡 - 液两相湍流的实验研究和半经验理论的研究结果. 德国 Sommerfeld 报告了光学技术, 主要是相位多普勒仪 (PDPA) 和颗粒图像仪 (PIV) 在多相流测量中的应用. 美国 Crowe 提出了他的两相流中流体湍流模型的理论. 周力行系统地总结了近年来清华大学力学系提出的各种二阶矩两相湍流模型及其实验验证和应用结果. 英国 Reeks 总结了概率密度函数理论在研究两相流双流体模型中的应用.

很有意思的是会议期间有一次关于多相流数值模拟的专题讨论. 著名气液两相流专家英国的 Hewitt 对目前的数值模拟表示怀疑, 认为双流体模型的模拟结果和实验结果相去甚远. 其他大多数人则认为数值模拟还是很有用的, 当然数学模型, 包括双流体模型有待改进.

关于分组报告, 值得注意的是, 气泡 - 液体两相湍流的基础研究是当前的热点之一. 气泡和液体的湍流脉动规律涉及到含气率分布和传热传质性能. 焦点问题是, 究竟气泡是加强还是削弱液体湍流, 气泡的湍流脉动究竟是比液体的强还是比液体的弱, 观点不一致. 早在 10 年前日本 Serizawa 最早探讨了此问题, 认为气泡湍流脉动比液体的弱, 气泡削弱液体湍流脉动. 这次会议中不同研究者报道了他们的研究结果. 看来情况比较复杂. So 等人报告了矩形截面通道内气泡 - 液体流动测量结果, 发现在较低的流动速度下 ( $Re = 5500$ ) 气泡增强液体湍流, 并且液体湍流随含气率的增大而增大, 但是在较高的流动速度下 ( $Re = 8500$ ) 则反之, 气泡削弱液体湍流, 并且液体湍流随含气率的增大而减小. Garner 等给出的气泡驱动的两相流动测量结果是, 在低含气率 (0.02) 和低速情况下液体湍流脉动速度和气体湍流脉动速度之比

0.4, 也就是气泡湍流脉动比液体的强. 而在高含气率 (0.4) 和高速情况下则该比值大于 1, 也就是气泡湍流脉动比液体的弱. 周力行报导了他和 L.S. Fan 等合作得到的液体初始静止的鼓泡床内低速气泡 - 液体两相湍流的二阶矩模型模拟结果和 PIV 测量结果, 发现气泡湍流及其各向异性都比液体的高. 美国 Hassan 等报导了用 PIV 测量气泡 - 液体两相湍流的初步结果, 给出瞬时气泡和液体流场的图像, 但是尚未给出湍流统计数据的定量结果. 显然, 不同含气率和不同流动速度下, 气泡和液体两相湍流的关系是不同的. 究竟如何尚有待进一步的系统研究.

另一个前沿性研究是气泡 - 液体两相流动的直接模拟 (DNS). 目前 DNS 已经在单相湍流流动和气粒湍流两相流动中进行了比较广泛的研究, 但是对后者大多数人把颗粒作为点源来处理. 这里所说的气泡 - 液体两相流动的 DNS 指的是考虑气泡有限体积和变形的模拟, 是不久前进行的. Goz 等报导了一个较小的计算域内含 216 个气泡的气泡周围液体流场的直接模拟结果, 发现小气泡的湍流脉动比大气泡的强, 两种尺寸的气泡的平均脉动比单一尺寸的气泡的强. 当然 DNS 耗时巨大, 无法直接用于工程中大尺寸装置内复杂流动的预报, 但是 DNS 的统计结果在定量上给出了气泡和液体的湍流动能, 将有助于建立大涡模拟 (LES) 的亚网格尺度 (SGS) 模型, 而 LES 模拟结果又可以用来改善统观的两相湍流模型, 如双流体二阶矩模型, 目前在国际上被称为 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) 模拟. Elghobashi 提出一种双流体模型的气泡 - 液体混合层的 DNS, 只给出初步的涡量模拟结果.

关于大涡模拟 (LES), 在单相和气粒两相流动中已经展开了比较普遍的研究. 对于气泡 - 液体两相流动, 本次会议中 Mitran 用 RNG 理论提出一中亚网格尺度模型, 其中用分子动力学推导了颗粒 - 颗粒碰撞产生的“气泡黏性”, 但是研究结果只给出了时均液体速度场预报值和测量值的对照, 不足以验证模型是否合理. Smirnov 等宣布用 LES 模拟了气泡 - 液体流动, 然而事实上他们采用的是液体流场的统观 RANS 模拟加上气泡随机轨道, 不是 LES. Sugiyama 等根据一个周期性方箱内球形气泡运动直接模拟的结果提出一种亚网格尺度模型, 但是他们没有把这个模型用于 LES 中, 而是直接用来封闭双流体模型. 因此到目前为止尚缺乏气泡 - 液体两相流动的 LES 研究结果的系统报导.

在气粒两相流动方面, Simonin 等报导了充分发展管流内颗粒对流体湍流响应的测量结果, 显示出颗粒朝周边聚集的现象. Triesch 等用 PDPA 研究了管道内和扩散器内颗粒对气体湍流的影响, 分别测量了单相气体和气粒两相流中气体湍流, 发现随着颗粒尺寸的增大, 颗粒由削弱气体湍流变成增强气体湍流. Zhu 等研究了有蒸发的气体液雾两相射流喷入气固稠密流动中的三相流动. 关于气固两相流中气体湍流问题, Crowe 在其邀请报告中提出一种基于纯粹体积平均的脉动量的概念, 解释了小颗粒削弱气体湍流和大颗粒增强气体湍流的实验现象, 但是这如何和单相流动时平均概念统一起来, 尚不清楚, 因此一些研究者提出不同看法. 与此不同, Crespo 等提出另外一种气粒流动的气体湍流耗散率的简单模型, 假设颗粒引起的附加的气体湍流耗散率方程的耗散项正比于  $\varepsilon^2/k$  以及颗粒浓度. 但是此模型的实验验证还很不充分, 而从理论上讲, 该附加项应当和颗粒弛豫时间有关. 在大涡模拟方面, Eaton 等探讨了气粒两相流动条件下的亚网格尺度内颗粒弥散模型, 其中作为第一步首先研究了不同的颗粒边界条件的影响. 华中科技大学柳朝晖报导了他和清华大学周力行合作研究的用气体雷诺应力方程加颗粒 PDF 方程的 Monte-Carlo 求解模拟旋流气粒两相流动的结果. Sakiz 和 Simonin 对比了竖直通道内有颗粒 - 颗粒碰撞的气粒两相流动的双流体模型和欧拉 - 拉氏模型的模拟结果. Simonin 等用直接模拟和大涡模拟研究了各向同性均匀湍流场内颗粒的弥散, 发现尺寸大于 Kolmogorov 尺度的颗粒有向周边聚集的现象.

周力行报导了用非线性  $k-\varepsilon-k_p$  模型模拟旋流气粒两相流动的结果, 发现该模型具有和二阶矩模型相接近的模拟能力, 但是其计算量比二阶矩模型的小得多. 在张贴论文中周力行公布了用双流体 - 轨道模型模拟大尺寸四角喷燃炉内三维两相流动和煤粉燃烧的结果和冷态两相流动模拟结果和 PDPA 测量结果的对照, 并且和随机轨道模型的模拟结果也进行了对比. 结果表明双流体模型能更合理地模拟颗粒的弥散, 因此优于轨道模型.

#### 4 收获与体会

参加了本次会议后, 感到我们目前在国家 973 重点基础研究项目和国家自然科学基金项目课题中的研究方向是正确的, 处于国际的研究前沿, 因此得到国际同行的重视和好评. 不过在数值模拟和测量研究上还有不少差距, 需要努力追上去.