

第四次国际散体介质细观力学会议简介

徐 泳

中国农业大学工程基础科学部, 北京 100083

1 会议概况

第四次国际散体介质细观力学会议(简称 Powders & Grains 2001)于 2001 年 5 月 21 日到 5 月 25 日在日本仙台召开。来自法、日、美、英、德、中等 17 个国家的 140 多人参加了会议,共收到论文 140 篇,其中 71 篇在大会报告交流。口头报告和墙展均已收入会议论文集《Powders and Grains 2001》,论文数量是历次会议中最多的。前 3 次会议分别在法国(1989)、英国(1993)和美国(1997)召开,下次会议已决定 2005 年在德国召开。

这是大陆(3 人)和香港(1 人)学者首次参加这个 4 年一度的会议,台湾学者发表文章 1 篇但未参会。与会的中国学者和在外留学人员共有 10 余人之多,也是空前的。

2 从本次会议看散体细观力学研究近况

2.1 涉及的应用领域和相关问题

从 4 次会议发表的文章来看,国际上散体力学研究大体来自如下技术领域:

- (1) 土木工程,其介质多为沙、土和石料;
- (2) 化工、制药等领域中的原料处理和生产工艺过程(如成型、混合和造粒);
- (3) 农业、食品等领域,如谷物储运和食品、饲料的加工;
- (4) 冶金、矿业、交通运输等领域,如散体的破碎、筛选分离等。

所讨论和研究的问题均属于粉体技术或颗粒技术的范畴,学术上应属跨领域的边缘学科。国际散体介质细观力学会议和世界颗粒技术大会都是散体领域的重要会议,但前者侧重于理论性的细观力学分析,后者则涵盖了颗粒技术整体,包括力学分析和各种应用。与会者大多数来自力学、土力学、物理学、化学、数学等学科的大学或研究机构,由此可见,散体力学属于力学范畴,同时也与物理、数学和工程科学中的岩土力学、化工学、物料学关系十分密切。

2.2 本研究领域的主要进展

从 1989 年在法国召开的第一次会议到本次会议,可以看出西方发达国家(美、英、法、日等)初步建立了对散体细观力学研究的基本理论、方法手段的框架。这是直接配合在各工业和农业、食品领域有重要意义的散体即颗粒-粉体技术的发展而确定的。

从研究方法来看,可以分为实验研究、理论研究和数值模拟三种方法。实验研究包括用各种物理和

数学手段研究散体的细观力学与物理性质并进行现象分析;理论研究包括数学方法分析宏观或细观下的行为,其中的一个重点是用统计平均的观点进行处理,把散体细观的接触力分析和宏观的拟连续体的应力应变理论结合起来;数值模拟中的显著特点是越来越多的研究者采用颗粒离散元法进行分析。

研究的介质仍以沙石和土居多。介质的物理组成也相当分散,有干散体和湿散体、两相悬浮体等。

本次会议的突出特点是先进实验手段和离散元法在散体细观力学研究中被广泛采用。

实验研究中现代实验测试手段广泛使用。用内窥镜、穿透探头、X 光、光弹性、微重力场、机械振动与旋转、剪切、声学、电场、热湿场、流态化和分形统计等手段观察分析干、湿散体的细观力学与物理性质,如黏性流动、波动、裂纹扩展等。

本次会议上采用离散元法(Distinct Element Method, DEM)模拟的文章数目多于历次会议,尽管有的研究者仍采用二维圆盘模型,但占主导地位的是采用三维圆球单元求解各种有实用意义的问题。长期以来散体力学问题采用连续体力学的方法进行研究,对空间分散性大的场合遇到无法逾越的障碍,滞后于应用的需要,随着计算技术的进步,连续体力学采用有限元法和 CFD 技术后,才出现离散元法。模拟研究的问题包括细观本构关系、剪切、料仓流动、堆积问题、单轴和三轴实验、循环荷载、挤压、流化床、结构-散体交互作用和沙粒的风蚀跃移等。但是由于散体自身的复杂性与分散性,DEM 模拟研究多数基本处于典型问题的数值试验和定性分析阶段。在 DEM 建模方面,存在液相的离散元接触模型研究也有了新的进展。

近两次会议上一些学者偏重于从物理理论研究的角度进行对散体行为的宏观现象分析,例如美国等国的学者对于崩塌(avalanches 或直译为雪崩)的研究(临界自组织行为)和斑图形成、物理量起伏波动(fluctuations)的研究,以及各种波如声波在散体中的传播研究。

按照会议组织者的分类,发表的文章按专题分布为:堆积体几何学(9 篇),黏性与破裂(7 篇),测量系统(8 篇),波的传播(7 篇),拟静态模型(9 篇),拟静态散体行为分析(10 篇),浸没行为(9 篇),局部变形(9 篇),外部强加行为(8 篇),剪切流(20 篇),表面流(18 篇),震动流(8 篇),混合流(9 篇),黏性流动与破

裂 (9 篇). 所涉及的问题比前 3 次会议略有扩展. 大会特邀的报告有 7 篇, 见表 1.

表 1 大会特邀报告

第一作者	国家	报告及论文名称	数值方法
X. Jia (贾)	法国	密集散体材料中声波的传播	实验分析
Shinchi Yuu	日本	气固两相的数值模拟与粉体流动	CFD+DEM 模拟与实验
Stefan Luding	德国	从 DEM 模拟到散体材料的连续体理论	细观的 DEM 模拟和宏观的连续体理论统计平均分析
David J. Benson	美国	欧拉有限元法模拟粉体工艺过程	多材料有限元法
C. Thornton	英国	不同剪切试验 DEM 设计的比较	DEM 细观力学模拟分析
I. Vardoulakis	希腊	断层快速变形的热 - 孔隙力学分析	连续介质理论分析
R.P. Behringer	美国	散体材料的起伏变化	聚合材料光弹性实验分析

3 对散体细观力学研究动向的观察

尽管目前离散元模拟还只能定性分析和反映趋势, 但在研究散体细观力学时仍然是最有效的数值模拟方法. 目前离散元还远未达到有限元法解决固体力学问题的程度, 可以看出, 不同研究者采用离散元模型的合理性和结果可靠性都需要一个的准则去衡量. 据本人体会, 有 2 个主要问题: (1) 用圆球单元来模拟球形颗粒尚可, 模拟实际中千差万别的非球形颗粒就有问题了, 用非球单元将更加复杂, 未必适用; (2) 离散元的存储和耗时需求都很大, 对于重大问题则需要采用巨型机和并行技术. 目前能模拟数以十万计的球已很可观, 用有限数量的圆球颗粒模拟实际问题还有很多问题要解决.

散体实验研究十分重要. 由于散体在粒度、几何形态和物性等方面的高度分散性和工程应用的多样性, 数值模拟的进展尚不足以取代实验, 二者的相互补充和比较是必要的.

重点的研究方向是建立适当的颗粒相互作用接触模型. 目前干颗粒模型使用已经较普遍, 而涉及流体特别是非牛顿流体的多相颗粒材料的建模和模拟将是新的研究方向和生长点. 另外常规尺度的模型还不能满足超细颗粒甚至纳米级的作用模型.

对散体细观的颗粒间接触力与颗粒运动位移和宏观的拟连续体的应力与应变的关系的研究长期以来是一些研究者关心的一个热点问题. 日、英等国研究者已经用统计平均方法建立了一套理论, 看来这方面研究仍在继续.

4 我国与国际水平的差距及对策刍议

中国学者在大会上口头交流论文 3 篇, 在外留学人员与人合作口头交流论文多篇.

中国农业大学徐泳在大会宣读了“互相碰撞的两球体间存在隙隙流体时的法向黏性力”的论文, 受到关注. 两球体间存流体时挤压流动的法向和切向

力分析是 DEM 模拟密相湿散体群的基础, 除两相流问题外, 目前大多数人只进行干散体模拟, 只有 Aston 大学做过基于挤压流动的牛顿流体湿散体模拟. 而作者的研究室现已基本完成了幂律流体的模型, 填补了这方面的空白, 有望在湿散体模拟上领先.

中科院物理所厚美英副研究员宣读了“电场诱导下管中散体流动的迟滞”的论文, 引起与会学者的兴趣, 有人希望利用电场诱导原理控制航天器摄取外星球表层物质, 以克服管壁的吸附障碍.

清华大学孙其成博士在大会宣读了“风蚀跃移中碰撞过程的离散元模拟”的论文. 作者利用二维沙粒碰撞 DEM 模型, 模拟了单沙粒高速撞击沙床后沙粒起跃的全过程, 有助于认识风沙运动的机理, 与观测结果较符合, 引起研究沙漠改造的学者的兴趣.

在国外的中国学者的研究也很突出, 如来自澳大利亚的余艾冰博士 (A.B. Yu)、来自法国的贾博士 (X. Jia)、来自日本名古屋工业大学的徐永福博士 (Y.F. Xu) 等的论文都获好评. 中国学者第一次在这一边缘学科展示了自己的能力.

但是上述只是个别的“点”的局部进展, 总的看我国还处于起步阶段, 与国际水平差距较大, 不少方面是空白. 既没有一个学刊集中反映颗粒技术的进展, 也未见有几个研究组进行方向较为固定的连续的研究. 最大的薄弱环节是缺乏知识和经验的积累, 在实验设施和测试观察方面积累太少.

王泳嘉把离散元法引入中国和其他国家的时间相差不多, 不少研究者在离散元模拟 (块体上) 也有一定发展, 但由于种种原因在颗粒系统方面没有进展. 要赶上散体力学领域的世界先进水平, 需要国家基金和相关行业的资金重点扶植, 逐步形成几个学科方向相对固定的研究队伍群体, 建立高性能的数值模拟实验室, 开展模拟和实验结合的综合研究, 密切跟踪国际研究趋向, 加强国际合作, 有望经过两三个国际散体细观力学会议的时间达到本领域先进国家水平.