

颗粒材料计算力学专辑序

季顺迎

(大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024)

颗粒材料是由大量形态各异的固体颗粒相互作用组成的复杂体系, 其在不同运动状态、约束条件、流体介质及工程结构的耦合作用下呈现出复杂的力学行为。作为解决颗粒材料力学问题的有力工具, 离散元方法从 20 世纪 70 年代建立并逐步应用于不同的工程领域, 同时该方法伴随着相关学科和计算机技术的发展而不断完善。为深入分析不同工程领域中颗粒材料的宏-细观力学特性, 真实颗粒形态构造及接触理论、颗粒材料与流体介质、工程结构物的耦合模型、颗粒材料破碎准则、颗粒系统多介质、多尺度分析以及高性能大规模计算成为颗粒材料计算力学中的重要研究内容。

《计算力学学报》针对当前颗粒材料计算力学及其工程应用中的关键力学问题, 邀请了 16 篇相关学术论文出版专辑。本专辑论文分别从非规则颗粒离散元方法、颗粒材料破碎模型、多介质耦合算法、颗粒材料尺寸效应等方面进行全面论述, 在一定程度上反映了我国颗粒材料计算力学的最新研究进展, 并为解决不同工程领域的颗粒材料问题提供重要的科学依据。

1 非规则颗粒材料的离散元方法

离散元方法发展初期采用二维圆盘和三维球体单元表示固体颗粒。为适应真实颗粒形态的表征, 后续又不断发展了椭球和超二次曲面等基于连续函数表征的颗粒模型、多面体和扩展多面体等基于几何拓扑的颗粒模型、组合球体和组合超二次曲面等基于凸形单元的组合颗粒模型, 同时针对不同几何特征的颗粒形态表示方法发展了相应的搜索算法及接触理论。目前, 随着离散元方法的快速发展, 采用更广泛的任意形态颗粒模型以对真实颗粒进行几何建模, 并发展离散元框架下的统一搜索算法及接触理论是当前研究的热点问题。清华大学刘广煜等基于几何对偶理论发展了基于 Gilbert-Johnson-Keerthi(GJK) 和快速凸包方法的多面体接触重叠算法。同时, 非规则离散元方法的不断完善也推动了颗粒材料宏-细观力学特性的深入研究。河海大学贾明坤等采用旋转椭球面螺旋网格构造的凸多面体颗粒模型, 研究了颗粒几何形状对多面体随机紧密堆积体系力学性能的影响规律。华南理工大学张昌辉等通过 X 射线的计算机扫描技术构造真实的颗粒模型, 并分别采用扩展超椭球模型和光滑多面体模型进行几何建模和重构。大连理工大学王嗣强等针对凹形多面体模型的多接触点特性, 发展了同时适用于凹形和凸形颗粒的水平集函数接触算法。这些研究均有力地推动了非规则离散元方法及其对颗粒材料宏-细观力学特性研究的进一步发展。

2 颗粒材料破碎特性的离散元分析

颗粒破碎行为会改变颗粒系统的粒径分布和级配, 从而导致颗粒系统宏观力学特性的改变。因此, 颗粒破碎行为的力学响应是颗粒材料力学特性分析中的关键问题。离散元法、有限元-离散元耦合算法等模拟脆性材料破碎的数值算法不断发展, 并逐步应用于相关颗粒材料破碎特性的研究分析中。中国科学院力学研究所刘新明等通过在连续-非连续单元法中引入考虑应变率效应的断裂能本构模型以及能量统计算法, 实现了球体冲击破碎过程中损伤破裂及能量演化的定量分析。北京理工大学张传山等采用有限元与离散元耦合的连续-非连续数值方法, 揭示了中心炸药起爆后颗粒环壳内爆炸波的传播衰减和在环壳外界面反射后的稀疏卸载过程。武汉理工大学程壮等通过建立考虑钙质砂真实颗粒形状和颗粒破碎的胶结钙质砂离散元方法, 研究了二维剪切条件下试样的宏-细观力学行为。西南交通大学钟寄宸等基于离散元方法研究了各向同性脆性页岩的损伤演化, 系统地分析了单轴压缩条件下页岩层理角度对细观结构的影响规律。这些研究均为颗粒破碎特性的深入分析提供了思路。

3 颗粒材料的流-固耦合分析

颗粒系统周围的流体介质影响颗粒材料之间的相互作用形式。目前根据含液量的不同已经发展了基于离散元方法的液桥力模型和基于CFD-DEM耦合方法的流-固耦合模型。两种方法可分别描述湿颗粒的接触行为和固-液两相流的动力行为，并成功应用于化学工程、岩土工程、极地船舶等不同工程领域。中国科学院过程工程研究所王利民和付少童综合介绍了Euler-Lagrange框架下的格子Boltzmann(LBM)方法，发展了两种不同尺度和精度的颗粒-流体耦合模拟方法，并系统总结了Euler框架下格子Boltzmann双流体模型(LBM-based TFM)方面的研究工作。兰州大学吴怡淞和王等明基于建立的湿颗粒离散动力学模型，系统研究了钟摆状态下湿颗粒柱的坍塌流动过程，发现无量纲Bond数是决定钟摆状态下湿颗粒材料流动行为的本质因素。浙江大学周连勇和赵永志采用7个曳力模型分别对锥底喷动床内气-固两相运动进行了数值模拟，探究了不同曳力模型对喷动床CFD-DEM模拟结果的影响规律。中国人民解放军92942部队刘昕和于海龙考虑水动力学的影响建立了船舶6自由度操纵运动模型，并基于扩展多面体海冰离散元方法开展了冰厚及舵角影响下极地船舶操纵性能及冰载荷的计算分析。以上工作均对颗粒材料与流体介质耦合作用的研究及工程应用提供重要的参考价值。

4 颗粒材料的粗粒化方法及尺寸效应

在真实的颗粒系统中，颗粒材料的数量可达万亿级别，这对工程尺度下的离散元数值计算是一个重大挑战。因此，一种有效的方式是将大尺寸颗粒单元作为代表体积元来近似替代小颗粒团簇。然而，该方法由于不同颗粒尺度下颗粒间的主要相互作用形式具有差异性，并且颗粒系统的宏观力学行为也具有尺寸效应。因此，在使用代表体积元即粗粒化方法时仍存在许多物理力学问题需要进一步分析。太原理工大学赵婷婷和冯云田采用量纲分析方法建立了在精确缩尺系统中各物理量需要满足的缩放定律，并通过多尺度的描述方法得到了粗粒化系统与原始系统间的双尺度粗粒化模型。荷兰特文特大学程宏旸和Thomas Weinhart通过弹性立方体冲击颗粒床和离散-连续介质间波传播的两个数值算例，体现了使用粗粒化方法在提高耦合系统能量守恒上的优势，并结合多种耦合参数讨论了粗粒化参数对数值稳定性和计算效率的影响规律。西湖大学满腾等利用扩展多面体离散元方法研究了颗粒柱的塌落现象，并探讨了颗粒倒塌中的尺寸效应和瞬态流变性。华侨大学包涛等采用斐波那契数列对非等径颗粒表面进行离散以计算视角系数，从而提高颗粒热辐射数值模拟的计算效率。以上工作均为大规模颗粒材料的数值计算及尺寸效应分析提供了重要的数值模型和计算方法。

上述文章聚焦于非规则离散元方法、颗粒材料破碎特性、多介质耦合模型、多尺度计算方法等研究工作，对当前颗粒材料计算力学中存在的关键性问题进行深入分析，以期促进颗粒材料计算力学在基础理论、数值方法及工程应用方面的进一步发展和完善。

颗粒材料计算力学专辑出版之际，衷心感谢论文作者、审稿人和《计算力学学报》编辑部的大力支持！



【客座主编简介】季顺迎，博士，教授，博士生导师，大连理工大学工程力学系，工业装备结构分析国家重点实验室。研究方向为颗粒材料计算力学及工程应用。现任美国ASCE工程力学专业委员会颗粒材料分委员会委员、中国力学学会环境力学专业委员会委员、计算力学专业委员会颗粒材料计算力学专业组组长等学术职务。近年来系统开展了颗粒材料的类固液转化特性、非规则离散元方法、离散元-有限元-计算流体动力学耦合模型、离散元高性能并行算法及计算分析软件等方面的研究工作，并成功地用于极地船舶与海洋工程、有砟铁路道床、航空航天着陆器等工程领域。主持国家自然科学基金、国家海洋领域公益性项目课题、国家重点研发项目课题和工信部极地船舶课题等30多项，出版学术著作3部，发表期刊学术论文200余篇，获批国家发明专利10余项和计算机软件著作权30余项，并获得省部级学术奖励7项。