

深地科学论坛（第十九讲）：深地科学前沿 热点问题探究

时间：2021年11月17日 14:30-17:00

地点：腾讯会议直播（ID号：718 317 6634）

报告人	报告人单位	报告题目
孙树瑜	沙特阿卜杜拉国王科技大学	具有逐相守恒与保界性质的地下多相流的数值模拟技术
赵卜蒂	爱尔兰都柏林大学	能源岩土相关的微观实验研究

欢迎全校教师及同学参加！

深部岩土力学与地下工程国家重点实验室

深部地下工程学科创新基地

《深地科学（英文）》

江苏省岩土力学与工程学会

力学与土木工程学院

2021. 11. 11

报告人简介：

孙树瑜，于 2009 年作为创校教授之一加入了沙特阿卜杜拉国王科技大学（KAUST），现任该校计算传递现象实验室首席科学家，地球科学系教授，石油工程系教授，和数学系教授。孙教授主持创立了国际多孔介质学会沙特分会并当选首任主席，是 Sigma Xi, Tau Beta Pi, Gamma Beta Phi, 和 Phi Kappa Phi 等国际名誉协会的终身会员。在此之前孙树瑜曾任教于美国 Clemson 大学。在他指导下已经毕业了 10 多名博士研究生和 25 名硕士研究生。孙树瑜有两个博士学位，他于 2003 年在美国德州奥斯汀大学获得计算与应用数学博士学位，指导教师是活跃于美国数学界和石油工程界的 Mary Wheeler 院士；他于 1997 年在天津大学获得化学工程专业博士学位，指导教师是中科院院士余国琮先生。孙教授主持了 30 多个科研项目，共承担科研经费超过一千万美元，经费来源包括中国自然科学基金，加拿大 CMG 基金委员会，沙特自然科学基金，沙特阿美石油公司，跨国陶氏化学公司，以及阿卜杜拉国王科大基金委员会等资助机构。他目前是 Journal of Computational Physics (JCP) 和 Computational Geoscience 期刊的编委，曾担任 CMAME, JCP 和 Applied Energy 等国际知名期刊的执行客座编辑。孙教授迄今共发表 274 篇 SCI 文章，总引用量达到 6000 余次，H-index 为 38，近年来有三篇文章入选 ESI 高被引。

赵卜蒂，于 2020 年加入爱尔兰都柏林大学土木工程学院担任讲师/助理教授。他于 2017 年博士毕业于香港城市大学，之后在沙特阿卜杜拉国王科技大学和英国帝国理工学院进行博士后研究。他的主要研究兴趣是能源相关的微观岩土力学，研究采用多种无损检测方法，如 X 射线断层扫描 (X-ray CT)、微流体芯片、核磁共振 (NMR)，以及颗粒尺度的模拟手段，如离散元法 (DEM)。赵博士的研究主要包括砂土破碎机理，细颗粒土干缩裂隙，孔隙介质中细颗粒的迁移及堵塞、盐结晶析出等过程。他是国际土力学和岩土工程学会 (ISSMGE) 的 TC105 'Geo-Mechanics from Micro to Macro' 和 TC308 'Energy Geotechnics' 的委员会成员。

报告摘要:

Fully-Conservative and Bound-Preserving Numerical Simulation of Subsurface Multi-Phase Flow

具有逐相守恒与保界性质的地下多相流的数值模拟技术

地下多相流过程除了与石油、天然气、煤层气等传统能源和干热岩地热利用、地层储氢等新型能源有密切关系以外，也与地下水污染治理和控制、二氧化碳地下封存、核废物地下封存等环境课题有密切关系。由于在研究效率、可行性和灵活性方面的显著优势，数值模拟已成为地下多相流过程的重要研究手段。地下多相流数值模拟中的模型和算法需要通过与分析结果的对比以验证其准确性，并不断调整模型结构和关键参数以更好地反应实际地质结构和多相流过程中的物理和化学规律。这种经过不断改进优化的数值方法可以可靠地用于解决大时间尺度和大空间规模下的实际工程问题，为工程实践提供有效的建议和指导。一个长期困扰地下多相流数值模拟的技术难题是数值保界问题；流体每一相的饱和度（即体积分率）必须是小于一大于零的实数，但是工业界广泛应用的各种算法却不能保证每个时间步计算后的饱和度是保界的。同样组分多相流也需要每个组分的摩尔分率必须是小于一大于零的实数，对应的商用软件也不时有越界的技术障碍。另外一个困扰地下多相流数值模拟的技术难题是对每一相都要求局部守恒的需求虽然存在，但是工业界广泛使用的两相流算法只对其中一相能局部守恒，对另外一相局部守恒和全局守恒都不能满足。在本报告中，我们综述近年来地下多相流数值模拟技术的发展，特别是阿卜杜拉国王科技大学计算传递现象研究实验室及其研究伙伴开发的新型模拟算法。这些新型模拟算法分为半显半隐格式和全隐格式两大类，但是都是逐相局部守恒和逐相数值保界的。半显半隐格式算法设计的关键点在于定义物理合理的中间变量，使得算法具有易解耦性、高稳定性、高效性、无偏见性、逐相可迎风等算法优势。全隐格式算法设计侧重于开发保界高效的非线性预条件子和并行友善的线性预条件子，从而实现全隐算法的高效性和保界性。报告中的半显半隐格式算法研究工作是和陈黄鑫老师、寇继生老师、范晓林老师和章涛博士等人共同完成的；报告中的全隐格式算法研究工作是和杨海建老师、杨超老师和李伊腾博士等人共同完成的。

Micro-scale Experimental Study on Energy Geotechnics

能源岩土相关的微观实验研究

能源需求和气候变化将在未来几十年给人类带来重大挑战。岩土材料中的多场耦合问题在应对能源岩土中的高地应力、高/低温、高水压、强化学作用等复杂环境条件非常重要。本报告将重点介绍能源岩土相关的三个微观实验研究，结合室内试验装置，先进无损检测方法（X射线微米计算机断层扫描、微流体芯片、核磁共振等）和图像处理技术，来探究能源岩土相关的岩土材料微观机理：（1）**海洋桩基础相关的颗粒破碎问题**。钙质砂、石英砂、粗砾石等颗粒材料在高应力下可能承受超过自身强度的高接触力，导致颗粒破碎。颗粒破碎产生塑性变形，造成颗粒材料一维固结中的屈服点，以及剪切过程中剪胀性弱化。颗粒破碎与许多岩土工程问题相关，例如近海桩基承载力弱化、土石坝沉降、以及铁路道碴损坏。该研究设计了单颗粒加载仪和高压一维固结仪，并利用X射线计算机断层扫描技术，对石英砂和风化花岗岩颗粒在加载中的破碎过程进行了动态跟踪，以研究砂土颗粒破碎规律及主要影

响因素。(2) **核废料深地处置相关的细颗粒土干缩裂隙**。细颗粒土具有较低的渗透性，常被用作垃圾填埋场衬里、核废料深地处置工程屏障及土石坝粘土心墙等。但细颗粒土具有高压缩性和高吸力而易产生干缩裂隙，并影响土体的力学和防渗性能。该研究采用在约束应力下的土体干缩仪器，结合 X 射线微米计算机断层扫描，以研究在约束应力下含气泡土细颗粒土垫层中的干缩裂隙形成机理。(3) **可燃冰开采相关的细颗粒在多孔介质中的迁移和堵塞**。多孔介质中细颗粒的迁移和堵塞是许多地下工程中面临的关键问题，包括土壤侵蚀、地下水污染物迁移及可燃冰开采。细颗粒的迁移受到颗粒尺度作用力（浮力、惯性力和拖拽力）、流场及多孔介质和细颗粒的几何特征控制。该研究设计多孔介质微流体芯片，利用显微镜观测微米级玻璃珠及乳胶颗粒在多孔介质中的迁移和堵塞过程，利用图像处理技术获得孔隙堵塞的时空信息，并采用无量纲分析方法阐述细颗粒迁移的物理机理。