

中仿 Simpleware 数字岩心建模与数值分析解决方案

一、概述

在当今世界能源格局下，石油与天然气仍然是工业消耗的主要来源，油气资源是保证国民经济发展的命脉，在当前各种新的替代能源还未发展成熟之前，人们对油气资源的需求与开采量仍然会日益增加。石油、天然气资源作为一种不可再生能源，如何对其高效合理的开采和利用，是推进石油工业技术发展的关键。测井作为一种重要的地球物理探测技术，一度被誉为“地质家的眼睛”，其在油气勘探开发中起到了决定性的作用，然而，随着目前油气勘探开发领域和规模的不断扩大，测井评价技术面临巨大挑战，特别是在岩石物理特征研究领域，常规实验方法遇到了诸多技术瓶颈，如岩心资料获取不全、岩心致密无法驱替、裂缝发育段岩心获取代表性差、页岩和油砂等非常规资源岩石物理实验工艺尚不成熟等。因此，加强对储层岩石物理特征的研究对于油气勘探开发具有至关重要的意义。

随着计算机的发展，数值模拟已经成为最经济且有效的科学研究方法。如数值模拟手段代替了核爆炸实验；蒙特卡罗粒子数值模拟代替了大多数放射性测量实验等。中仿科技技术团队在十多年的数值计算工作中，参与了众多重大项目，包括三峡大坝、某卫星系统设计、某核电站建设、某机场建设、二氧化碳封存、大型垃圾填埋场设计等等，发现越来越多领域的用户都在逐渐开展数值计算工作。在石油行业领域，数值模拟方法同样贯穿于油气田勘探与开发的始终，特别是在岩石物理研究方向，数值模拟方法与传统岩石物理实验方法相比，不仅节约成本，还可以开展微观尺度上的岩石物理属性影响因素分析，而且对于传统岩石物理实验无法直接测量的物理性质（如三相相对渗透率等），岩石物理数值模拟具有明显的优势。

岩石物理数值模拟研究必须基于一定的岩石物理模型，岩石物理模型的准确与否关系着岩石物理数值模拟结果的准确程度。岩石物理模型的发展经历了由简单到复杂的演化历程，根据模型的复杂程度，将其划分为两大类，即简单、规则的孔隙网络模型和复杂、真实的数字岩心模型。孔隙网络模型按照建模的拓扑性质来划分，可以分为规则拓扑孔隙网络模型和真实拓扑孔隙网络模型两类。孔隙网络模型都过于理想化，往往导致数值模拟结果与实际结果相差甚远，因而实用性较差，而能够真实反映岩心孔隙结构特征的三维数字岩心技术是岩石物理数值模拟研究的主要方向。

上世纪末，X 射线 CT 扫描和计算机模拟技术在医学研究领域应用广泛，这引起了岩石物理学家对该技术的广泛兴趣，数字岩心技术在此背景下应运而生。利用 CT 扫描技术构建的三维数字岩心不仅能真实、完整的反应岩石的复杂孔隙结构特征，而且还可以代替真实岩心实验，系统全面的模拟岩石的电性、弹性、渗流等宏观物理属性。此外，数字岩心的建立大大节约了岩石物理研究的成本，数字岩心一旦构建完成就可以重复进行各种数值模拟实验，还可以根据研究者的需求进行各种实验条件约束，具有重要的应用价值和理论意义

在测井解释评价工作中，面对岩性复杂、物性条件差的低渗透储层，传统岩石物理实验常常面临

全国统一客户服务热线：400 888 5100 网址：www.CnTech.com 邮箱：info@cntech.com

诸多问题和挑战。在某些复杂岩石物理问题传统实验无法解决的情况下，岩石物理数值模拟方法展现出强大的适应性。例如，利用数字岩心技术可以将错综复杂的岩石孔隙结构进行三维提取，大大简化了孔隙结构的影响因素。又如在研究岩石物理的机理性问题时，常常需要将简化的岩石物理模型与复杂的真实岩石结构进行对比分析，利用数字岩心技术模拟，可以实现不同条件下等效对比。中仿科技公司参与过众多测井项目的数值计算，例如和吉林大学的合作项目中，利用中仿数值仿真计算软件做二次开发，建立一套完整的测井系统；和中国科学院声学研究所、中国电子科技集团 22 研究所、中国石油集团长城钻探工程有限公司测井技术研究院等单位的合作中，也多次参与了数字岩心能源探测的项目，然而，数字岩心作为一种新兴的岩石物理研究方法，目前在测井和地质行业的实际应用还不够成熟，如何进一步发挥数字岩心技术在低渗透储层测井解释评价中的作用，提高测井、地质研究人员对数字岩心技术的认知度，是目前数字岩心技术发展的重点。

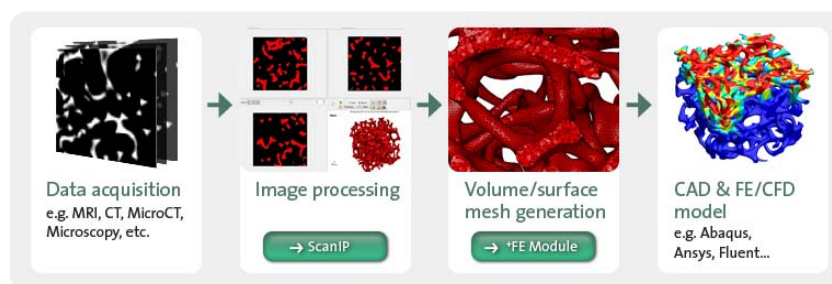
二、数字岩心重构

数字岩心的重建方法有多种，如切片组合法、X 射线扫描法和基于岩石二维图像的重建法等，但归纳起来有 2 大类：物理实验法和数值重建法。前者是借助于高精度的光学仪器获取岩心的平面图像，后者是利用各种重建算法获取三维数字岩心。由于重建算法利用较少的图像资料就可以获取反映孔隙结构的三维数字岩心，所以是当前进行数字岩心建模研究的重点。本解决方案主要围绕三维数字重构方法来阐述数字岩心的建立方法以及数字岩心的数值实验（仿真计算）。

（一）、数字岩心重构一般步骤

三维数字重构数字岩心以及后续数值实验（仿真计算），需要如下几个步骤：

即：数据获取、图像导入——降噪滤波、图像处理——体/面网格划分——模型导出、仿真计算



a. 图像导入



全国统一客户服务热线：400 888 5100 网址：www.CnTech.com 邮箱：info@cntech.com

图像获取有很多方法,例如上图中各种设备,它们可以生成各种不同格式,如 3D 图像数据 DICOM Version 3.0、ACR-NEMA Versions 1&2、Interfile、Analyze、Meta-Image、Raw image data、Blank image 等以及 2D 图像数据组 DICOM、BMP、PNG、JPEG/JPG、GIF、PCX、PNM、TIFF、IFF、XPM、RAW 等。

b.图像处理

图像处理分为预处理和正式处理两步。预处理需要对图像进行缩放、填补、剪裁(自动收缩剪裁)以及镜像、平移和旋转、倾斜校正等处理。正式处理较为复杂,简单的说,需要对图像做分割处理,即将孔隙和岩石区分开来,之后做平滑处理。

c.图像可视化

完成上述图像处理,需对图像做三维可视化处理,即图像渲染,甚至做动画处理,用于成果展示。

d.模型分析及导出、仿真计算

通过数值图像计算,可以得到数字岩心的孔隙率、孔隙介质结构描述和重构、孔隙网络模型创建、生成,甚至物性的计算(包括综合弹性模量、渗透系数、热传递系数、电导率等)。

(二)、数字岩心存在的问题

通常的数字岩心三维重构,往往需要用户自行编译程序,做图像的识别、去噪、二值化、插值合成最终模型,再通过算法实现特征统计等工作,会占用科研人员大量的时间精力,而且目前情况看,各大石油天然气研究单位,都在开发自己的软件或代码,比较保密,对于技术交流,开放性不足,相对保守,可能存在图像识别有误等问题而无法得到检查,且自行开发软件的界面相对商业软件而言会显得不人性化,功能较为单一,支持的图像格式有限,导出的模型也可能存在第三方软件导入困难的问题。

另外,数值计算,最为重要的是材料参数的获取,很多情况需要做复杂实体实验才能获取,对于石油天然气领域的岩石,其综合弹性模量、孔隙率比较难以通过简单物理实验而获得,一般通过数字岩心来仿真计算,但若数字模型因孔隙分割不够准确,很容易引起其估算出的物理参数有更大偏差,采用这样的模型以及这样得来的参数,其仿真结果与实际情况的差异是可想而知的。

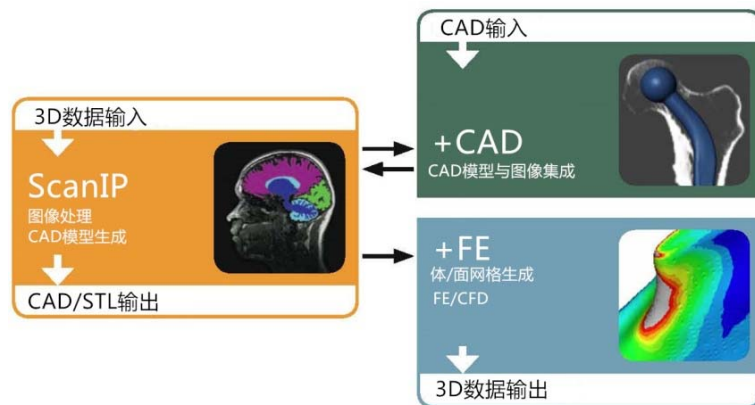
另外,表征体元 REV (Representative Elementary Volume) 分析是构建三维数字岩心的关键,主要目的是针对三维数字岩心选取合适的尺寸,使其具有代表性。在一般情况下,三维数字岩心的尺寸越大(像素点越多),其代表的岩石结构信息就越丰富,岩石物理数值模拟的准确性就越高。但三维数字岩心的尺寸对计算机的存储和运算能力要求较高,不能无限制增大数字岩心的尺寸。因此,通过 REV 分析选取一个合适的三维数字岩心尺寸至关重要。

三、数字岩心建模及数值仿真计算全球高端解决方案 Simpleware

基于上述自行开发的软件或代码存在或多或少不太方便使用、推广困难甚至可能错误的结果等问题，给大家推荐一款中仿 Simpleware 软件，它致力于为 CAD、CAE 以及 3D 打印领域提供世界领先的三维图像处理、分析以及建模和服务，已在世界范围内被业界广泛采用。2014 年 8 月中仿科技应邀参加第 35 届国际电磁学研究进展研讨会(The 35th PIERS)，会议期间中仿科技公司为参会代表展示了中仿 Simpleware 软件的功能及特点并解答了参会代表提出的技术问题，得到了与会人员一致的认可。

（一）软件相关模块简介

Simpleware 软件帮助您全面处理 3D 图像数据（MRI，CT，显微 CT，FIB-SEM.....），并导出适用于 CAD、CAE、以及 3D 印刷的模型。使用图像处理模块（ScanIP）对数据进行可视化，分析，量化和处理，并输出模型或网格。利用有限元模块（+FE）生成 CAE 网格；利用全新的物理模块：固体力学模块（+SOLID）、流体分析模块（+FLOW）以及多学科分析模块（+LAPLACE），通过均质化技术计算扫描样品的有效材料属性。



Simpleware 软件基于核心的图像处理平台——ScanIP，结合可选模块，实现 FE/CFD 网格生成、CAD 一体化以及有效材料属性的计算。

Simpleware 三维图像建模软件在数字岩心领域所涉及的主要模块如下：

- **ScanIP Module:** 核心图像处理平台
- **+FE Module:** 网格生成模块
- **+CAD Module:** CAD 模块
- **Physics Modules:** 物理模块
 - **+SOLID Module:** 结构力学模块
 - **+FLOW Module:** 流体分析模块
 - **+LAPLACE Module:** 多学科分析模块

1、核心图像处理平台 ScanIP

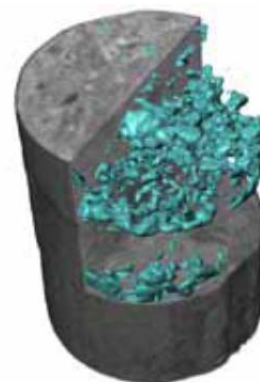
ScanIP 为 3D 图像数据的图像可视化、测量和处理工具提供了宽泛的选择。处理后的图像可导出为 STL 或点云文件，应用于 CAD 分析、求解、和 3D 打印领域。

ScanIP 为 3D 图像数据（MIR, CT, micro-CT, FIB-SEM...）的综合处理提供了软件环境。软件为用户提供了功能强大的数据可视化、分析、分割、以及量化工具。

ScanIP 易于学习和使用，内置视频录制功能，并能基于处理后的数据导出可用于 CAD 或 3D 打印的曲面模型/网格。附加模块可用于通过扫描数据导出 CAE 网格、整合图像数据、建模、导出 NURBS 曲面、计算有效材料属性的功能。

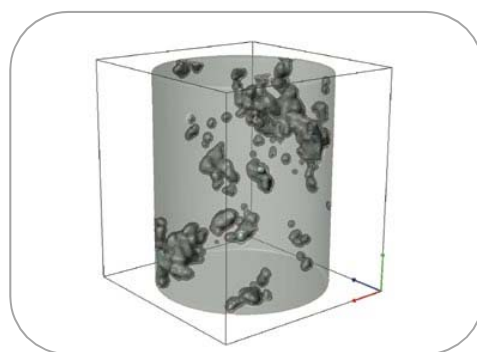
● 优势

- 直观的用户界面
 - 易学易用
- 生成高质量的多部分 STL 和曲面模型
 - 无需手动修正或重剖网格
- 脚本
 - 自动执行可重复的任务及操作
- 直接进行图像到曲面的转换，曲面输出及可视化
 - 准确、高质量地重构数据



● 重要特征

- 支持导入多种文件格式
- 提供具有多个 2D/3D 视角的可定制化工作区
- 背景图像及蒙片的立体渲染
- 动画录制和视频文件导出
- 综合测量和统计工具
- 功能强大的半自动分割工具
- 确保多部分面网格/STL 的一致性



使用 ScanIP 可视化的复合材料模型
伦敦帝国学院 英国

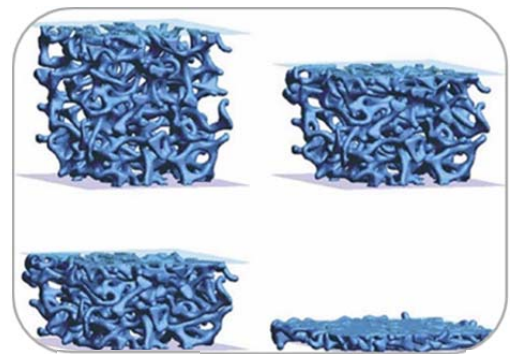
2、网格生成模块+FE

Simpleware⁺FE 模块具有强大的基于图像的网格剖分能力，提供高质量解决方案，将分割后的 3D 图像数据转换为多部分的体积网格，导出并应用于有限元（FE）或计算流体力学（CFD）软件包。

生成的网格具有一致的接口和共享节点，可指定材料属性、定义接触、节点集和壳单元，并定义 CFD 边界条件，通过减少在其他软件重划网格的步骤加快用户的工作流程。

● 优势

- 自动、高效、快速
 - 几分钟即可完成从图像分割到分析模型的生成
- “一般的个人电脑” 进行处理生成复杂的网格
 - 完成复杂模型不依赖于高性能计算机
- 仅取决于图像质量的拓扑/形态学精确度
 - 分割与平滑图像过程中保持图像精度不变
- FEA 和 CFD 网格一致，尤其适用于流固耦合分析
 - 强大的多部分模型避免间隙和重叠



使用 Ls-Dyna 模拟泡沫状材料压缩过程
(NASA, 美国; ARUP 公司和 First Numerics, 公司 英国)

● 重要特征

- 可基于任意形状的复杂几何体生成网格
 - 用户可选择基本网格或自由网格
 - 根据图像信号强度分配材料属性
 - 具有拓扑保留和体保留的光滑算法
 - 可对感兴趣的多结构/区域进行网格划分
 - 可保证接触的表面/界面的一致性
 - 生成用户自定义的自适应网格

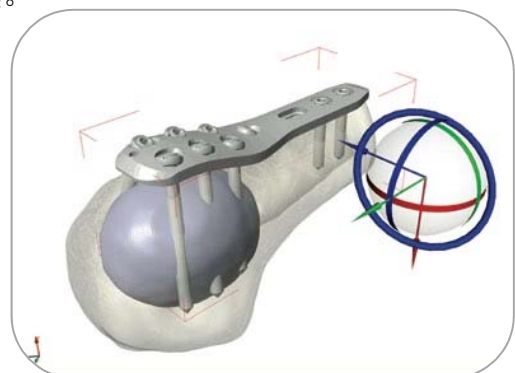


3、CAD 模块

+CAD 模块与 ScanIP 模块紧密结合，为 CAD 模型与三维图像的融合提供一系列的工具。所获得的几何模型能够输出为众多 CAD 文件格式模型，或者利用+FE 模块自动生成众多有限元网格。在 32 位或 64 位 Windows 平台支持多处理器进行 CAD 建模。

● 优势

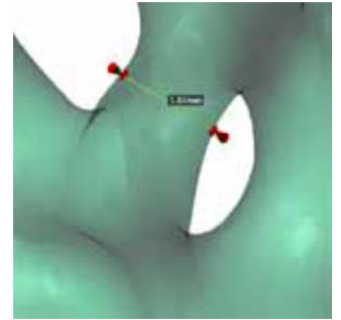
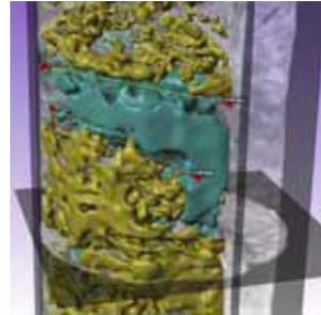
- 轻松组合图像与 CAD 数据
 - 避免在 CAD 环境中用到图像
- 为组合图像和 CAD 数据准确生成网格
 - ScanIP 和 +FE 模块强大的网格算法
- 为外科手术可变性效应简化多网格的生成
 - 快速，可重复，精确
- 设计外科手术指南和范本，阐述支架/微架构
 - 完美重现真实场景



肱骨近端固定板在骨折后的相对定位+ CAD 模块
(都柏林大学, 爱尔兰)

重要特征

- 将大部分常见 CAD 文件格式直接导入到三维图像
- 根据用户定义提供二维/三维视图
- 利用实时交互式输入和键盘输入进行定位
- 沿着用户定义的矢量进行限定性运动定位
- 重采样的几何保留
- 生成 CAD 为图元的模板
- 生成内部微小结构
 - 以 STL 形式导出组合模型或导入 ScanIP 做进一步体网格划分



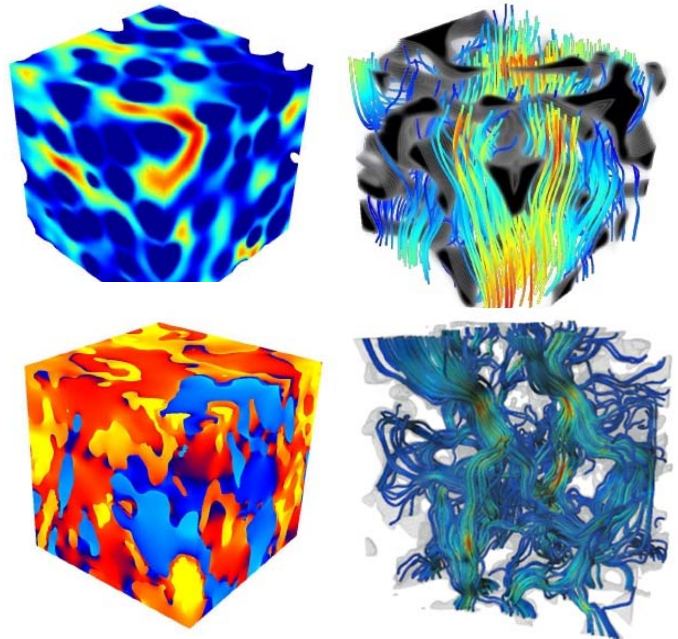
4、物理模块

物理模块包括结构力学模块（+SOLID Module）、流体分析模块（+FLOW Module）、以及多学科分析模块（+LAPLACE Module）。物理模块的主要功能如下：

模块	结构力学模块 (+SOLID Module)	流体分析模块 (+FLOW Module)	多学科分析模块 (+LAPLACE Module)
概述	计算材料有效刚度张量和弹性模量。调用软件内置的有限元求解器或采用基于分割图像的快速半解析法来执行数值均匀化计算。	计算多孔介质渗透率等参数，数值均匀化计算调用软件内置的 Stokes 求解器。	计算由 Laplace 方程控制的材料行为对应的有效材料参数,包括但不限于电导率、介电常数、热传导系数、扩散系数等。采用软件内置的有限元求解器或者基于分割图像的快速半解析法来执行数值均匀化计算。
核心功能	● 计算有效刚度张量/弹性模量 ● 内置有限元求解器 ● 多相材料模型构建 ● 快速半解析法评估 ● 可视化变形、应力应变	● 计算多孔介质渗透率 ● 内置有限元求解器 ● 可视化速度场和压力场	● 计算有效电导率和介电常数 ● 计算热传导系数 ● 计算扩散系数 ● 内置有限元求解器 ● 快速半解析法评估 ● 可视化场分布
特性	结构力学模块 (+SOLID Module)	流体分析模块 (+FLOW Module)	多学科分析模块 (+LAPLACE Module)
生成高质量的体网格 (Hex/Tet 或 Tet)	✓	✓	✓
灰度值材料映射	✓		
计算有效弹性参数	✓		
计算渗透率系数		✓	
计算电参数和热参数			✓
可视化有限元模拟结果	✓	✓	✓

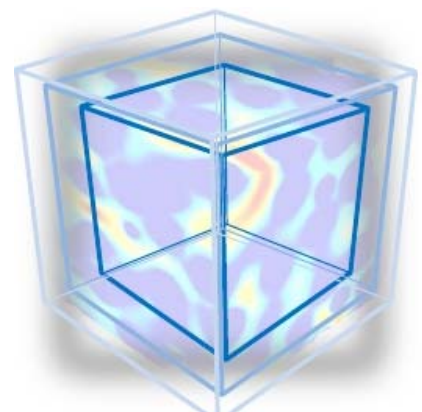
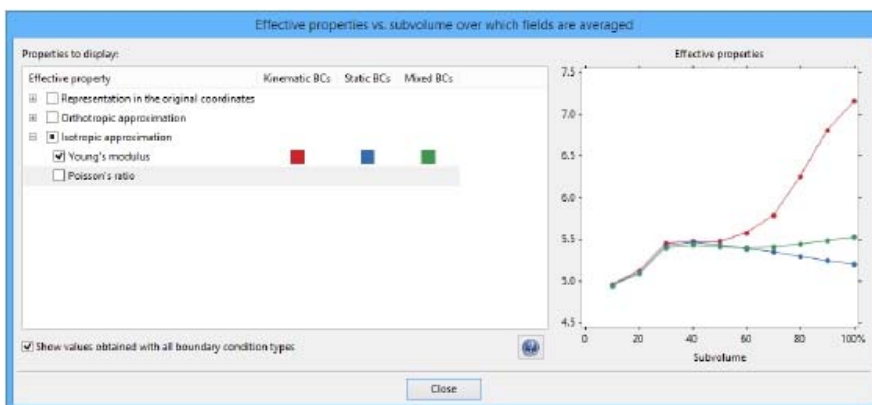
● 优势

- 稳定而有效的均质化方法
 - 复合材料的简化分析
- 基于 3D 扫描的高效仿真分析
 - 在 ScanIP 中快速计算有效属性
- 在多种预定义边界条件中进行选择
 - 基于标准设计进行分析，解约时间
- 高质量数据可视化及动画功能
 - 与同事分享和探讨仿真结果
- 脚本
 - 自动重复任务和操作



● 重要特征

- 计算有效弹塑性特性（结构模块）、绝对渗透率（流体模块）、电导率和介电常数、导热系数和分子扩散系数（拉普拉斯模块）
- 可在完整的基于有限元的均质化方法和快速半解析法之间进行选择（仅适用于结构模块和拉普拉斯模块）
- 自动计算最适合的各向同性（所有物理模块）、正交各向异性（结构模块）、以及单轴（流体模块和拉普拉斯模块）近似值，以及算有效张量
- 评估合适的等效体积单元（RVE）尺寸，最高效率选取数字岩心尺寸，优化计算规模

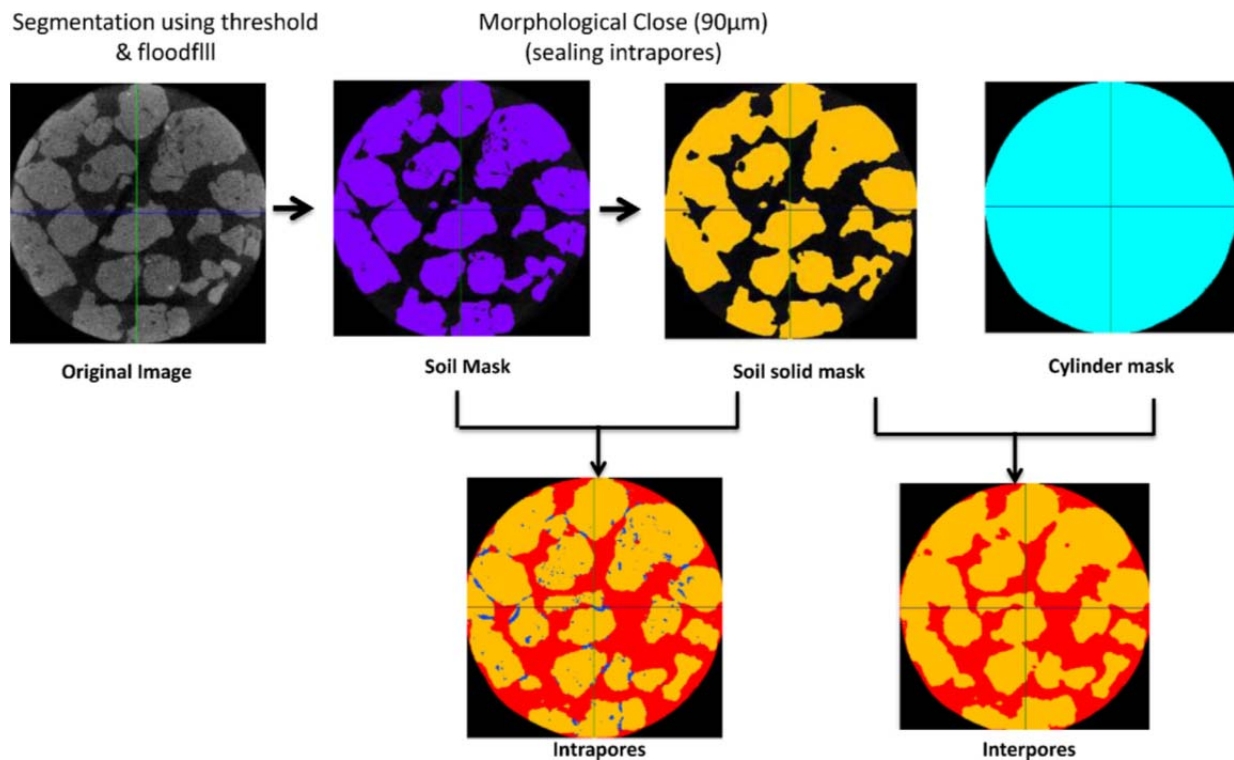


- 自动测定模型主轴方向
- 计算结果可导出为 text 或 VTK 格式文件

（二）案例展示

1、利用 X 射线分析土壤团聚体的层析和水的流动模拟

土壤团聚体是土壤的结构单元，它产生复杂的孔隙系统控制土壤水汽储存和通量。在膨胀和收缩或外力作用下，可以与机械压实一样破坏聚集体，物理冲击如何改变骨料结构的认知仍然有限。本研究的目的是量化压实对团聚体的影响，主要对孔径分布及流动。三维模型建模采用Simpleware软件完成。本案例来自M. Menon ^{a,*}, X. Jia等发表在Soil & Tillage Research上的Analysing the impact of compaction of soil aggregates using X-ray microtomography and water flow simulations.

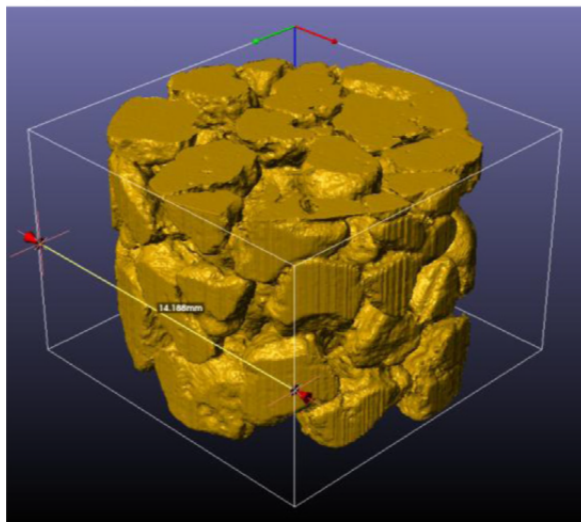


X 射线下 2 维成像

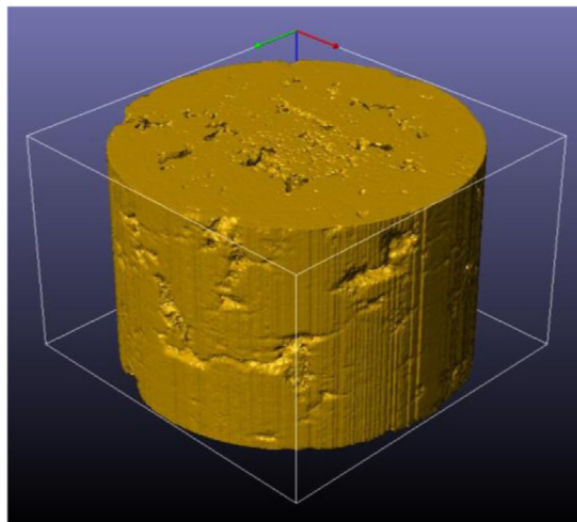
Before compaction

After compaction

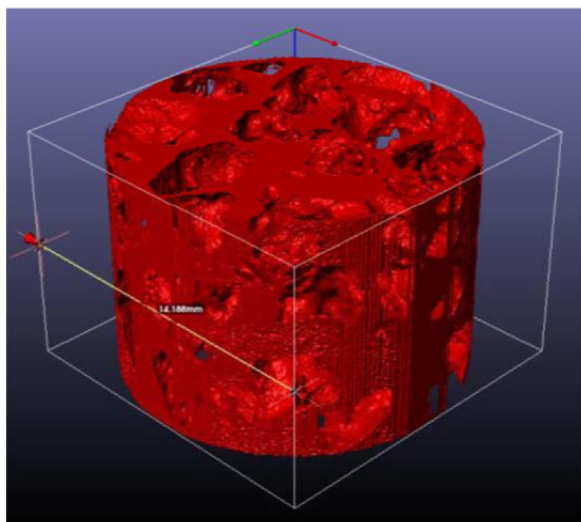
a) Solid phase



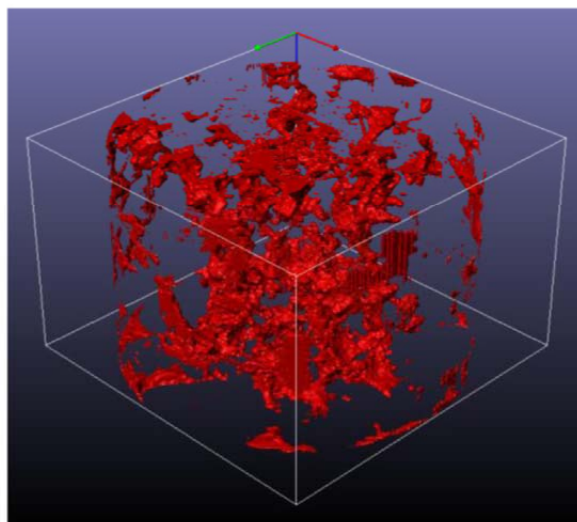
b) Solid phase



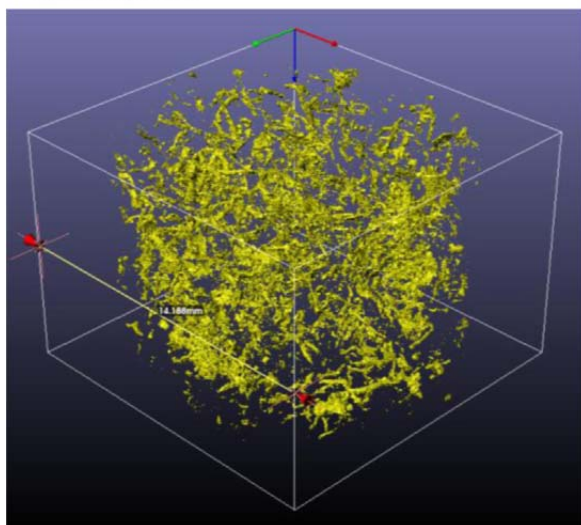
c) Interpores



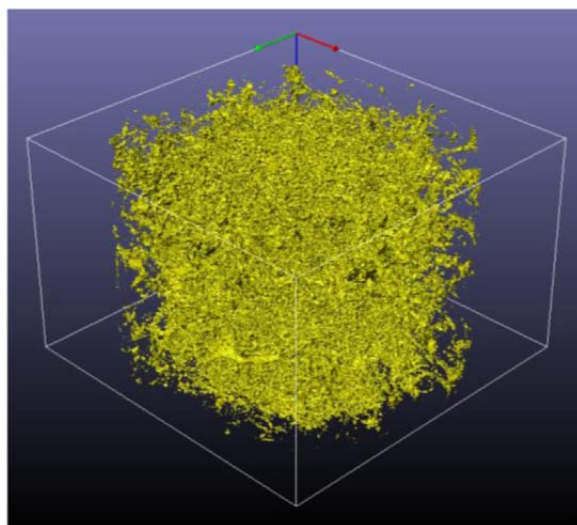
d) Interpores



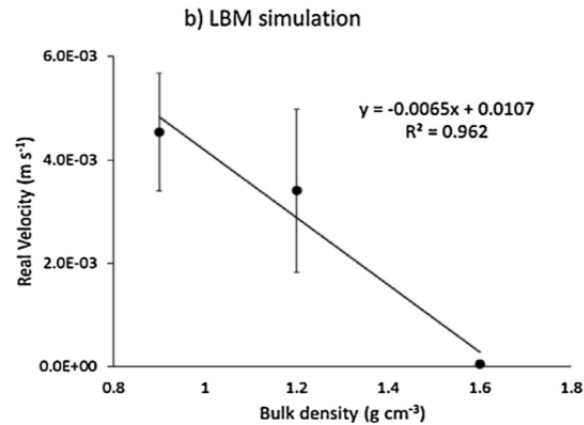
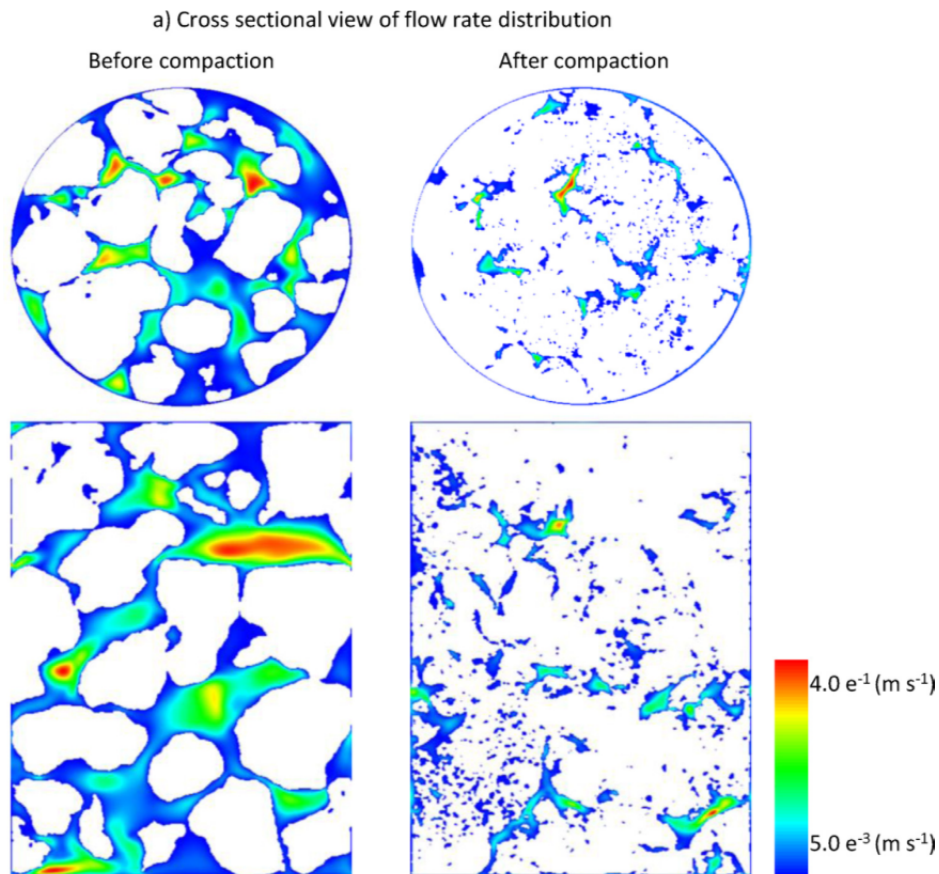
e) Intrapores



f) Intrapores

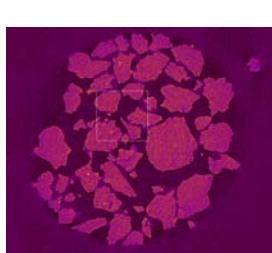


压实前后的三维模型对比

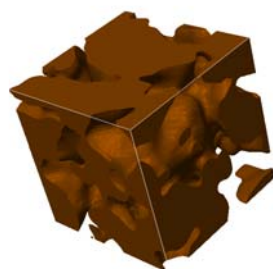


压实前后流速的仿真分析

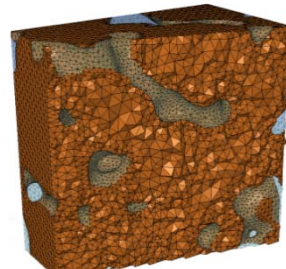
2、多孔介质流动的孔隙尺度模拟



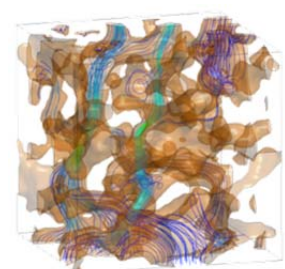
Micro-CT 岩土样本图像



多孔结构几何模型



孔隙介质网格剖分

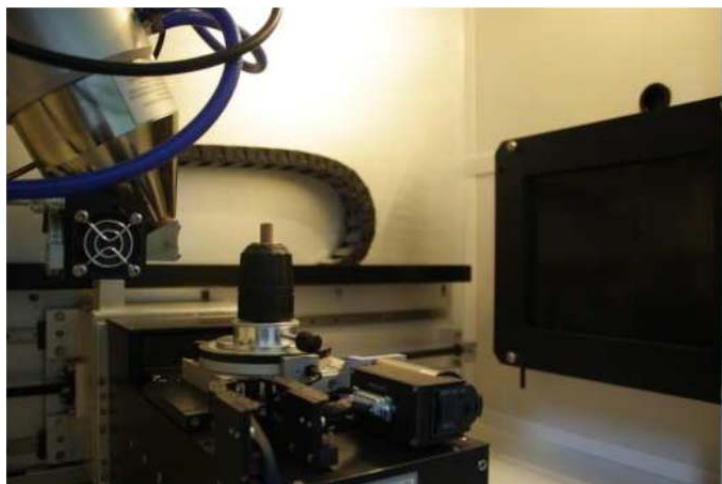


孔隙流动仿真结果

案例来自于 University of Alaska Fairbanks

3、基于碳酸盐岩图像的三维孔隙尺度流动模拟

通过 CMT 技术对三种岩石做 X 射线扫描后成像，利用 Simpleware 软件的 ScanIP 模块对其做数字图像处理，得到三个不同的岩石三维模型，之后利用有限元软件分别做氮气、丙烷、汽油、水以及发动机机油做三维孔隙流动模拟，得到其不同的流动特性。



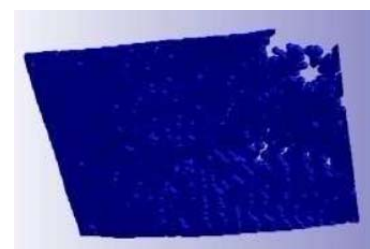
X Tek 台式 CT160Xi 实验系统;从左至右: X 射线枪与钨反射靶, 岩心, 平板探测器的机械手



原始图像



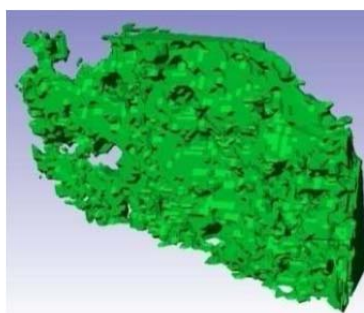
表面缩减像素采样



缩减像素采样表面后的形态



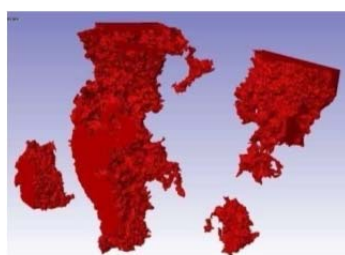
原始图像



表面缩减像素采样



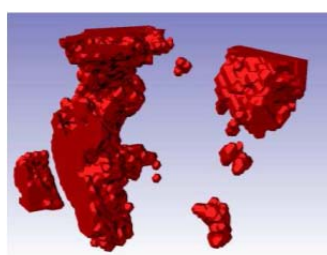
缩减像素采样表面后滤波



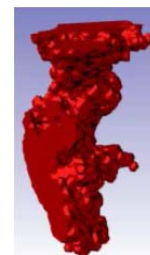
原始图像



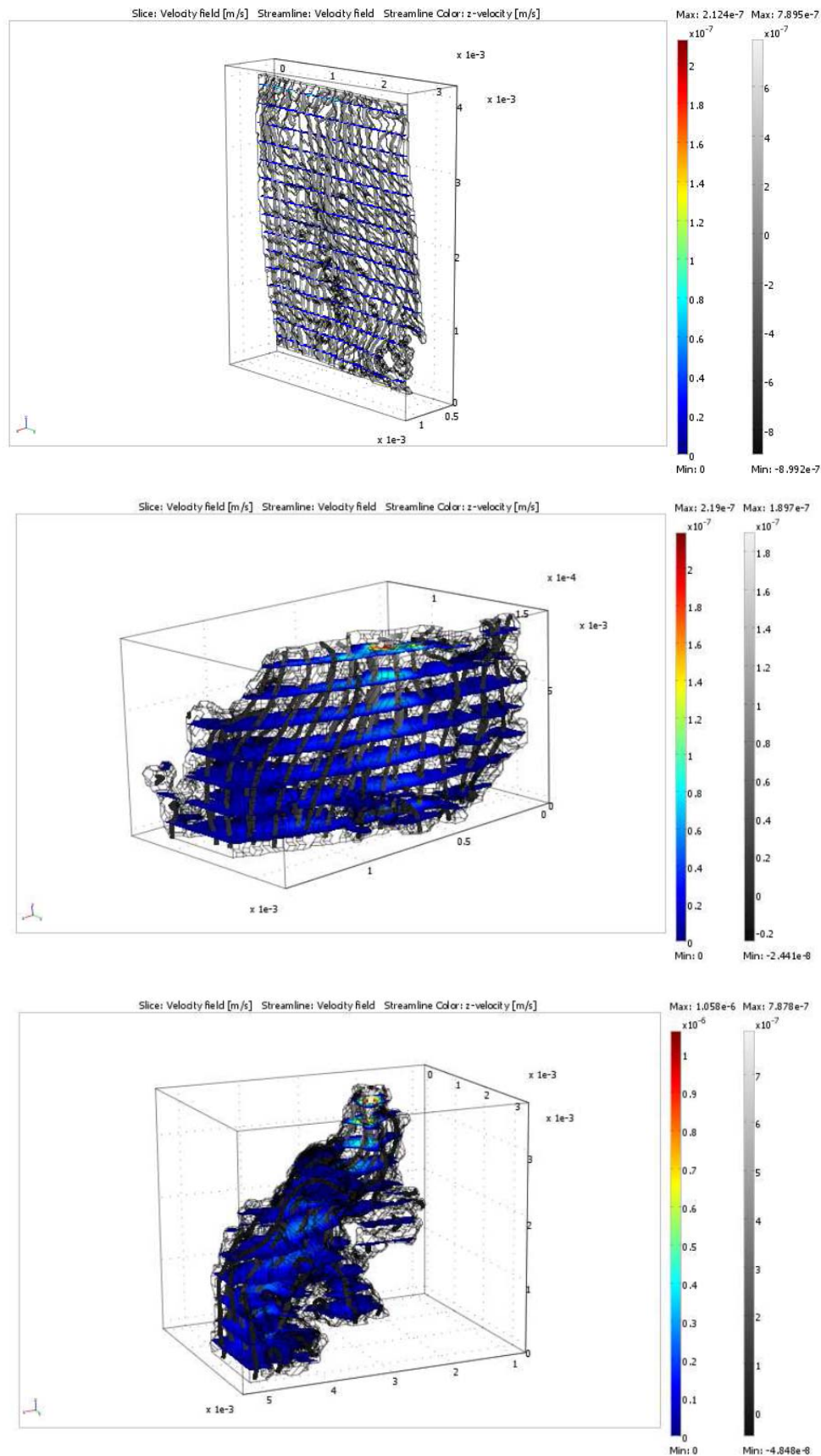
表面缩减像素采样



缩减像素采样表面后滤波



孔隙提取



模拟丙烷在孔隙中的流动模拟

线为速度场示意，彩色代表 Z 方向速度分量，切片为速度场大小

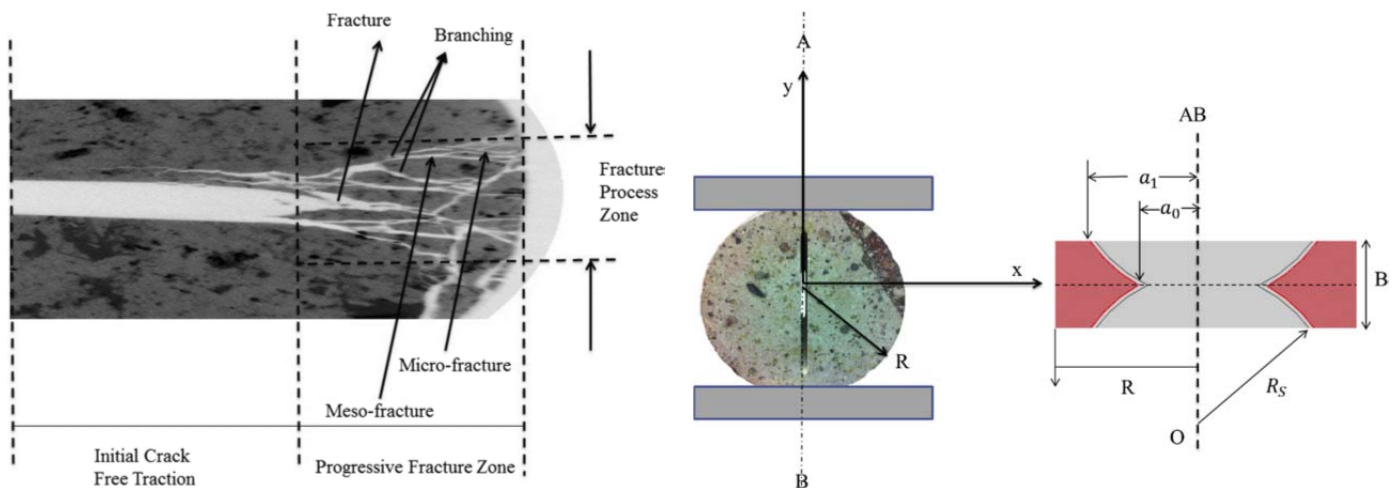
案例来自于波兰石油天然气研究院

4、循环和静态载荷作用下岩石断裂损伤过程区（FPZ）的实验与数值模拟研究

目前，很多国家的地下资源开采都已经或即将进入了深部开采阶段，并且，地下采矿逐渐走向深部开采是趋势。未来 10 多年的时间内，我国有 1/3 的有色金属矿山的开采深度将达到或超过 1000m。

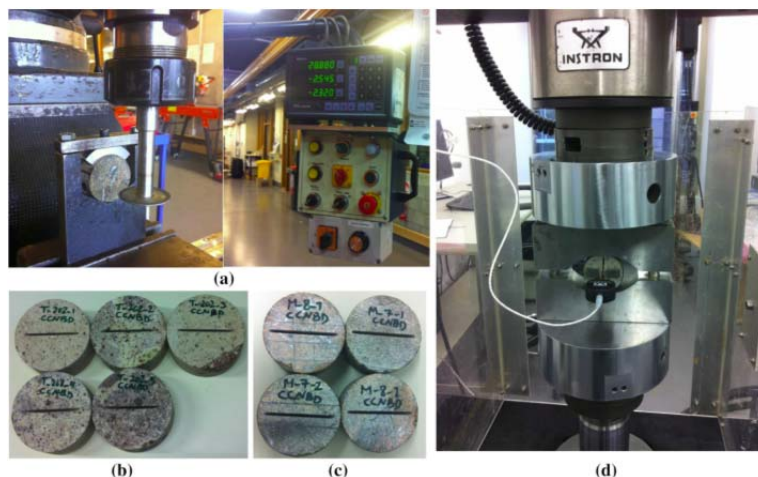
在深部，矿岩处于高原岩应力、高地温、高岩溶水压的复杂环境下，表现出与浅部截然不同的力学特性，典型的如岩爆和深部分区破坏裂化现象等。因此，为解决深部开采中出现的问题，多国矿山企业和政府以及相应的国际组织都对深部高应力岩体的力学问题开展了研究，中仿科技的岩土重要合作院校如中科院武汉岩土所、东北大学、中国矿业大学、中南大学、重庆大学、北京科技大学等开展了大量关于深部工程的研究和实践，这些工作对深部岩石力学的发展起到了非常重要的作用。

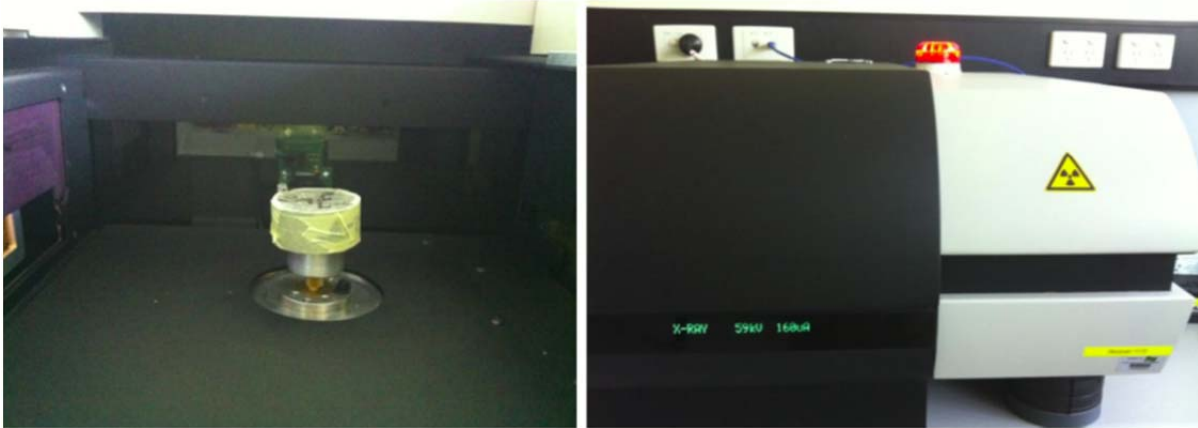
昆士兰大学土木工程学院的 M. Ghamgosar 等人用巴西试验(CCNBD)对布里斯班凝灰岩标本的断裂损伤过程区的发展（FPZ）进行了研究，探讨各种静态和循环荷载作用下脆性岩石的力学行为。本案例采用扩展有限元法（XFEM）计算裂纹尖端断裂过程区对的位移、拉伸应力分布和塑性耗能等。其中一个最重要的步骤就是采用 Simpleware 软件重构数字岩石模型，还原裂纹尖端断裂过程区延伸的形状，之后采用数值模拟，结果与实验非常吻合。



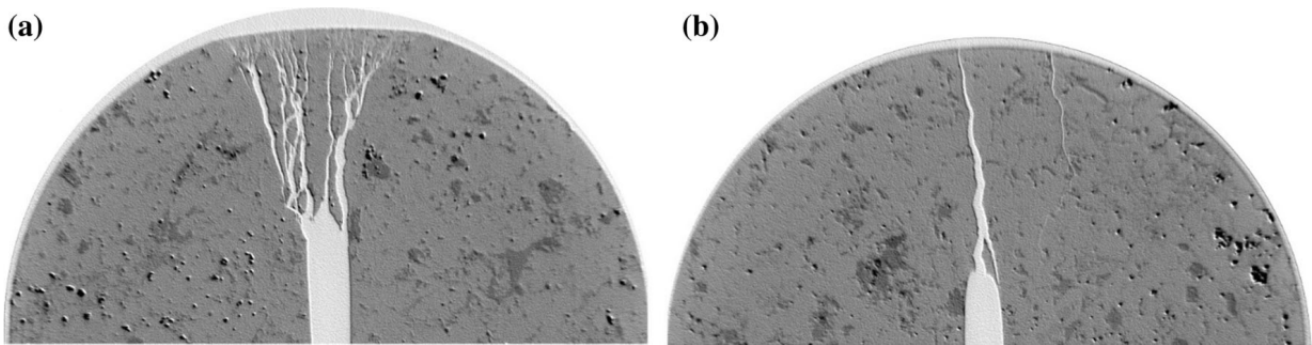
巴西圆盘试验样本

根据国际岩石力学学会（ISRM）建议配置巴试验样本



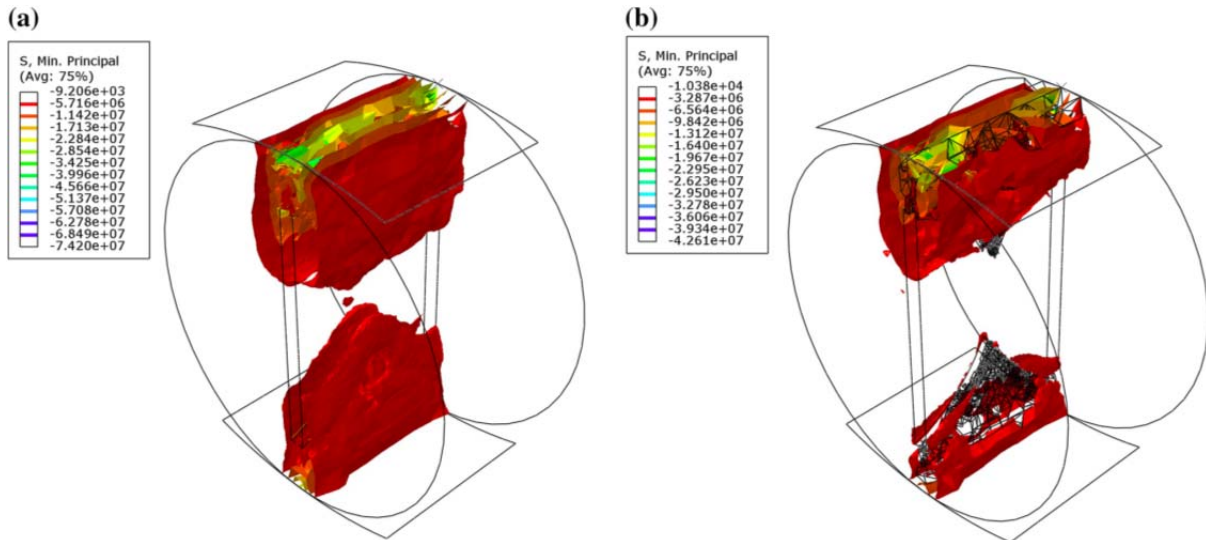


CT 准备及扫描



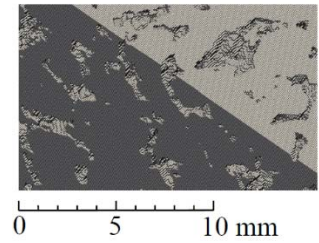
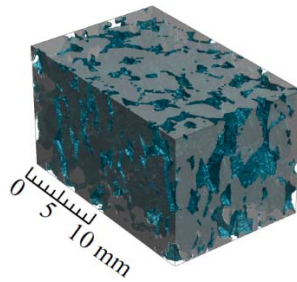
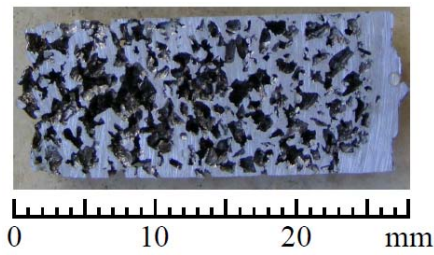
循环载荷下的 FPZ

静力载荷下的 FPZ

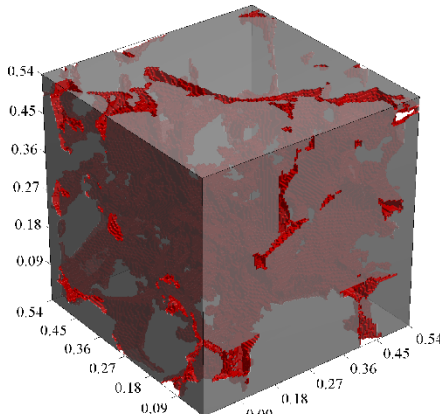


巴西试验试样顶端 FPZ 的张拉应力分布, a 静态加载, b 循环加载

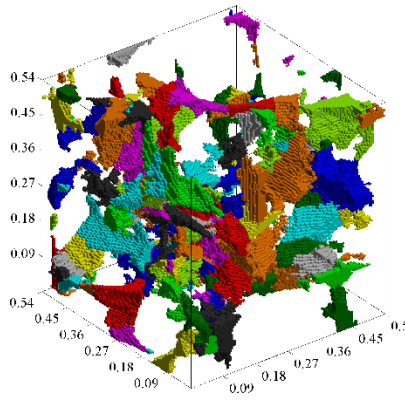
5、类似案例



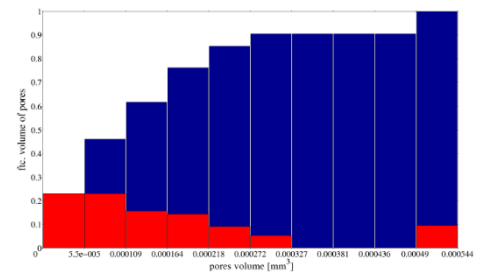
原始样照



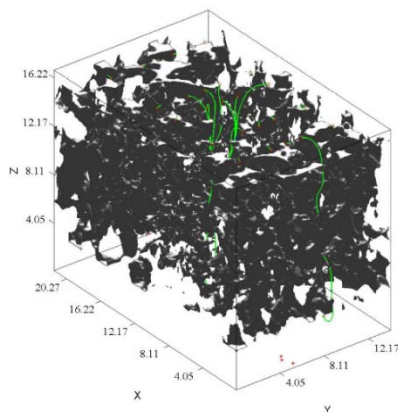
储层样本



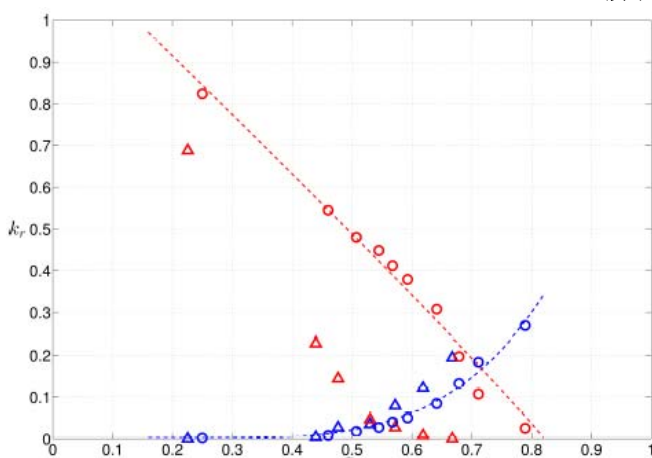
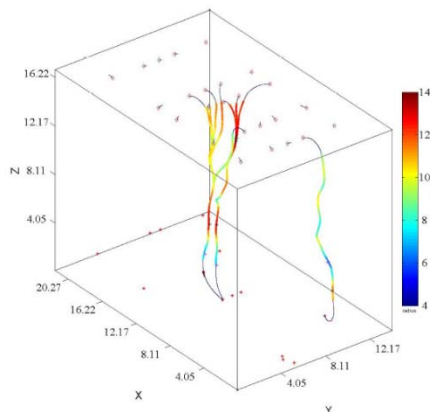
封分割后的孔隙



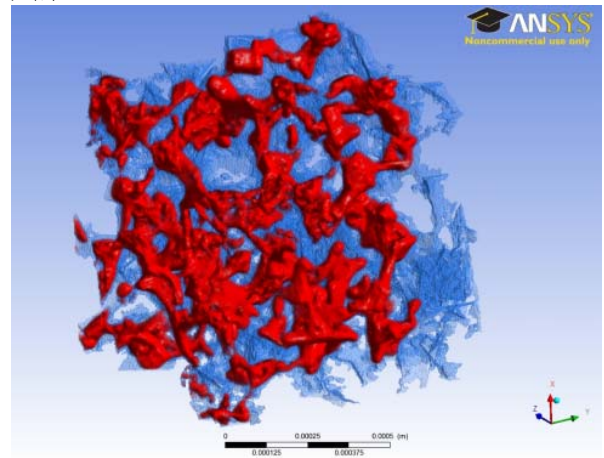
孔径分布（红）和累积孔径分布（蓝）



试算粒子，追踪路径



两组数据关于油（红色）和水（蓝色）
圆圈代表相对渗透率的数值计算结果
虚线为拟合曲线，三角形的是实验数据



油相（红）分布在孔隙内的瞬时可视化视图
（最初充满水（透明蓝））

关于 Simpleware 软件

借助其 image-to-mesh 技术，Simpleware 三维数字图像重构软件已成为图像到数值模型的图像处理先驱者，获得了包括 Queen's Award for Enterprise in Innovation 2012、Institute of Physics' (IOP) Innovation Award 2013 在内的多个国际奖项，为数字图像三维建模的发展做出了重要贡献。目前 Simpleware 在世界范围内广泛应用于生物医学、材料科学、石油天然气科学、3D 打印等众多领域。

关于中仿科技

中仿科技(CnTech)公司成立于 2003 年，是中国领先的仿真分析软件和系统解决方案的提供者，2014 年 1 月成为 Simpleware 全球合作伙伴之一，负责 Simpleware 三维数字图像重构软件在中国地区的市场推广、销售服务及技术支持等工作。

中仿科技依靠自主创新研发拥有自主知识产权的中仿 CAE 系列产品，同时与国际上领先的数值仿真技术公司有长期而紧密的合作关系，具备较强的自主研发能力和创新能力，能够为中国企业和科研机构提供世界一流的仿真技术解决方案。公司总部设在上海，目前在北京、武汉设有分公司。

过去的十多年来，中仿科技一直致力于仿真技术领域最专业的系统实施和项目咨询。目前在中国已有超过 1500 家用户，其中包括中国航天、中国商飞、中石化、中海油、交通部、地震局、国家电网、中广核以及各大高校和中科院所。服务领域涉及高端制造、国防军工、石油化工、水利水电、汽车交通、能源采矿、生物医学、教学科研等。

“仿真智领创新”是中仿企业的核心理念，也是中仿坚持的产品核心价值观。中仿始终遵循“客户满意为止”的服务宗旨，坚持不懈地为国内外客户提供全球最前沿最顶端的科技服务，力争成为仿真技术行业的典范。（了解更多详细信息，请访问：<http://www.CnTech.com>）