基于 TPPD 实验数字孪生模型与参数反演的不规则岩样渗透率测定方法

李东昱[1], 刘清泉[1*]

[1]中国矿业大学安全工程学院，徐州，江苏，中国

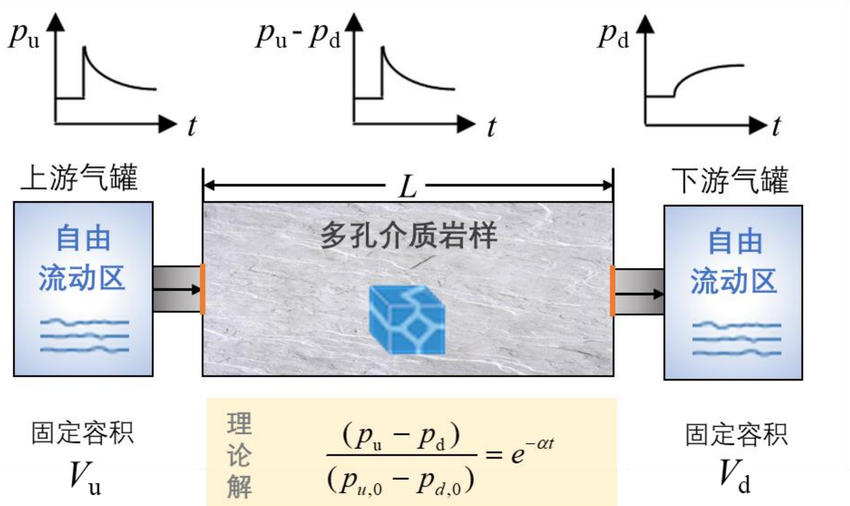
通讯作者：刘清泉　Email: cumtsafe@cumt.edu.cn

01 研究背景

- **渗透率**表征岩石允许流体通过的能力，是**非常规油气、CO_2地质封存、地下储能**等领域的关键参数。
- **瞬态压力脉冲衰减法（TPPD）**是低渗岩石渗透率测定的主流手段：上游施加压力脉冲，压差随时间指数衰减，求取渗透率。
- 然而，理论解要求样品为**规则圆柱 / 长方体**；深部取心常获破碎岩样，流动边界无法解析表达，理论解失效。

02 数字孪生与反演模型

我们**基于COMSOL，**构建了 **TPPD 试验的数字孪生模型，**同时利用**优化模块**实现了**渗透率反演求解**。使得样品形状不局限于理论解的限制。物理场基于 PDE 实现。



PDE模块

自由流动区（气罐）：蠕动流

$$\rho\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu(\nabla\vec{v} + (\nabla\vec{v})^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla\cdot\vec{v})\mathbf{I}\right] + \vec{F}$$

多孔介质（岩样）：达西定律

$$\vec{v} = -\frac{k}{\mu}\nabla p \qquad \varphi\frac{\partial p}{\partial t} = \nabla\cdot\left(\frac{k}{\mu}p\nabla p\right)$$

流体-多孔介质界面耦合条件

$$\vec{n}\cdot(\rho_c\vec{v}_c) = \vec{n}\cdot(\rho_s\vec{v}_s), \quad p_c = p_s, \quad (1-\vec{n}\otimes\vec{n})\vec{v}_c = 0$$

优化模块

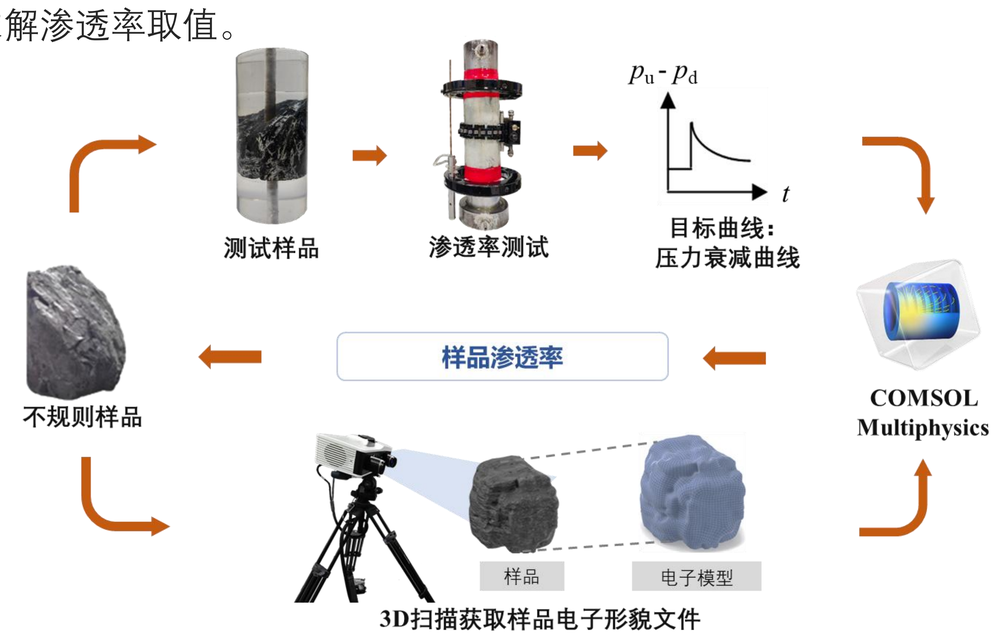
参数估计（Levenberg-Marquardt）

最小二乘目标 $\min \Sigma[\Delta p_sim - \Delta p_exp]^2$ → 更新渗透率 k（初值 + 上下界约束） → 瞬态正演（新 k → 新压差曲线）

TPPD 数学原理与渗透率反演求解

03 实验

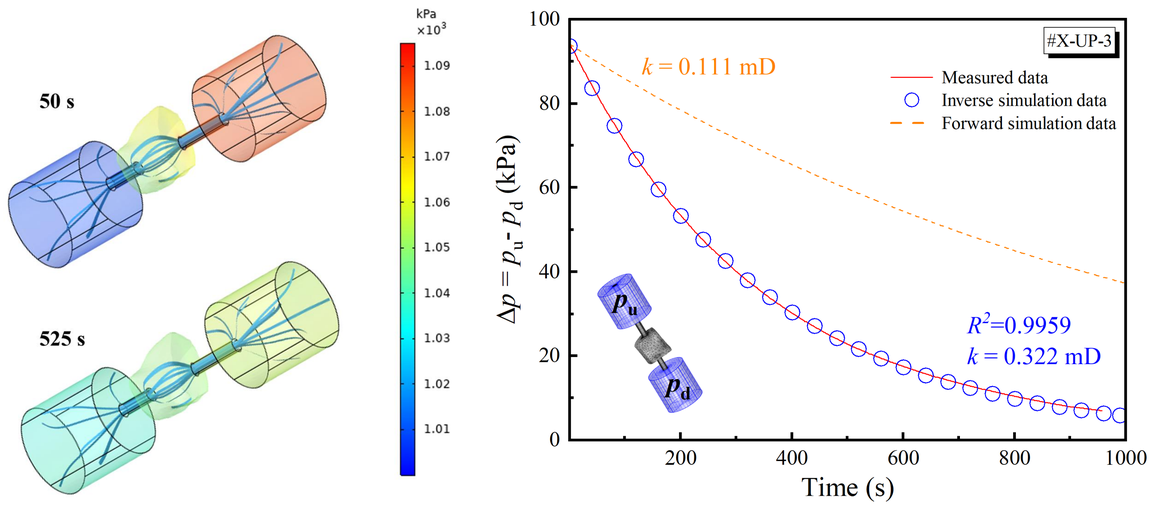
- **不规则形状样品**的渗透率可以通过 **3D 扫描**来构建样品的数字模型，制备样品并进行 TPPD 测试得到**压力衰减曲线**作为目标函数，导入COMSOL求解渗透率取值。



基于不规则样品改进的渗透率求解实验

04 结果

- 不规则样品反演压差数据与实际测量数据之间高度一致（R^2>0.9659）。这证明**不规则样品 TPPD 实验的物理过程可以被准确描述**。
- 由不规则形状的硬煤样品测得的渗透率范围为0.00319至0.0172 mD；对于不规则形状的软煤，渗透率结果在0.322至0.566 mD之间。所得渗透率与通过理论解法得出的结果存在显著差异，这是因为**加工导致样品被过度破坏**，而非方法误差。



不规则样品模拟的压力云图、求解曲线（#X-UP-1为例）