增强型地热系统井筒-储层耦合数字孪生模型构建与分布式光纤实测约束下的验证

刘清泉[1*]，李东昱[1]

[1]中国矿业大学安全工程学院，徐州，江苏，中国

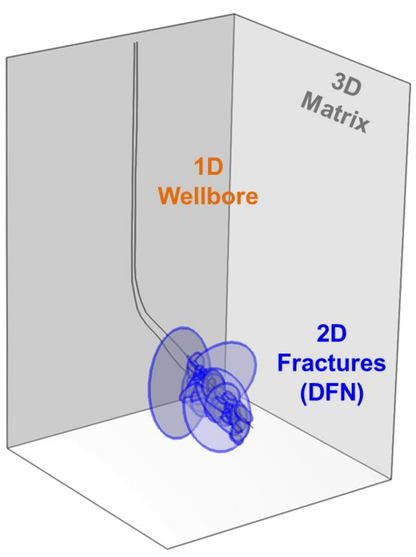
通讯作者：刘清泉　Email: cumtsafe@cumt.edu.cn

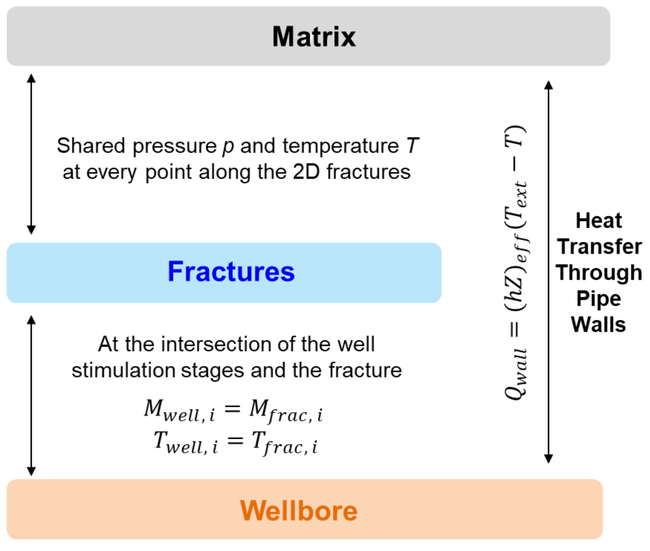
01 研究背景

- **EGS 商业化的关键瓶颈在于热产出难以预先量化**：激励裂缝的几何、开度与流量分配在井外不可直接观测，缺乏观测约束的预测只能“在假设之上精确”。
- **分布式光纤测温(DTS)**沿井筒全剖面连续测温，裂缝入流在剖面上表现为**台阶与拐点**，为热流模型提供空间分辨的观测锚点。
- **模拟+DTS**能够更精确的预测热产出。

02 FORGE场地采热数字孪生模型构建

- 对象为 **Utah FORGE 2025-08-18–25 注采循环**：16A(78)-32 以 10 bpm 注入约 100,800 bbl；16B(78)-32 由仪器化连续油管(ICT)携带 DTS 全程监测，产率占比 25%→65%，末期井口 385 °F。
- 模型几何取自 FORGE 官方数据集：44 条微震约束 DFN 裂缝(位置/半径/走向/倾角实测)与两口井实测轨迹。





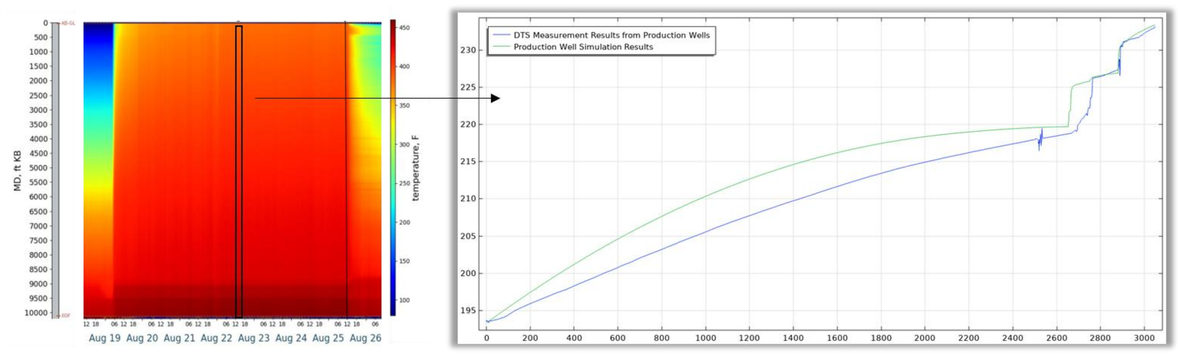
COMSOL Multiphysics® 模型构建

- **网格**：非结构四面体 · 裂缝面/井-裂缝交点加密
- **达西定律**：基质 3D + 裂缝 2D 降维流形 · 切向渗流
- **管道流**：井筒 1D 非等温流 · Churchill/Gnielinski
- **多孔介质传热**：基质 LTE · 裂缝 LTE/LTNE 双工况
- **多物理场耦合**：非等温流动(裂缝+井筒+基质三向)
- **研究: 瞬态**：全耦合求解 · 30 d / 30 a
- **参数化扫描**：Morris 36 工况批处理 · 探针输出

COMSOL 模型构建树与多物理场耦合结构

03 DTS 观测约束与对比验证

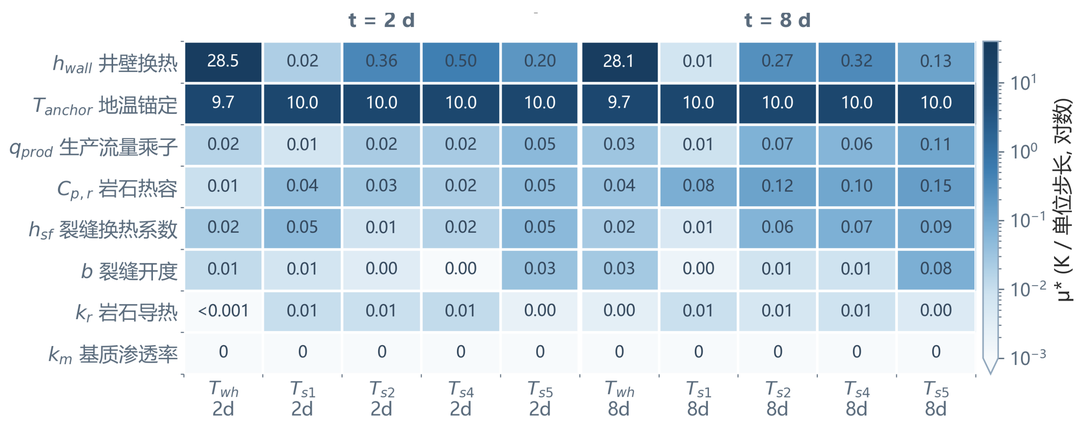
- 我们选择了代表一天模拟的数据，以比较生产井中沿流动路径的流体温度与测量的DTS数据。结果如下：



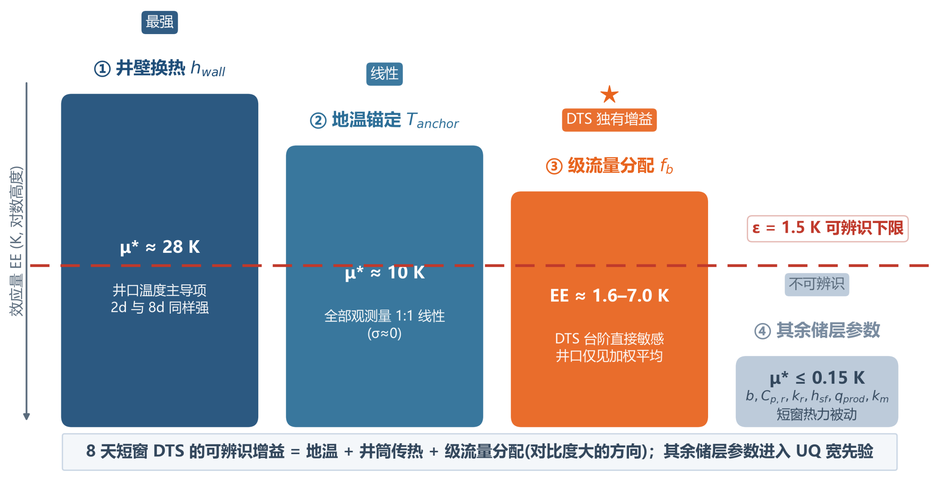
DTS 实测数据与模拟对比

04 Morris 敏感性分析——短窗 DTS 约束

- 对 8 个参数作 Morris OAT 全局筛选：4 轨迹 × 9 步 = 36 工况，同一几何与网格下由 COMSOL 参数化扫描批处理完成，输出 2 d / 8 d 两时刻、10 个探针 QoI。



筛选结果：代表性 QoI 的 μ* 条形图(对数)与 8 参数 × 10 QoI 全矩阵



短窗 DTS 可辨识性的四级阶梯：

地温锚定 → 井壁换热 → 级流量分配 → 其余储层参数