

CMG能源转型及地热开采模拟解决方案

北京中科合力

王建国

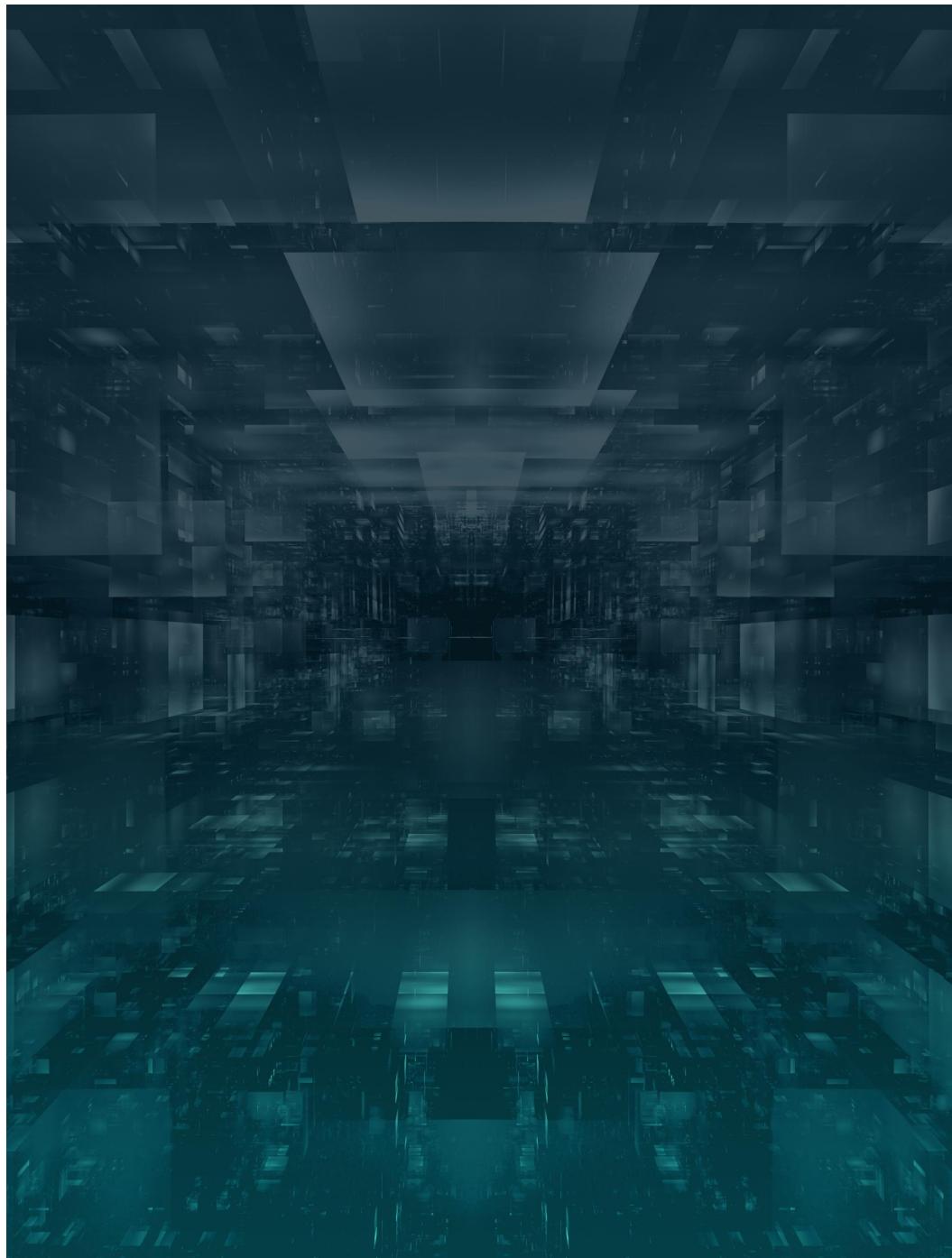
2023年9月

主要内容

1 能源转型系列解决方案

2 地热开采模拟解决方案

3 案例分享



CMG能源转型系列解决方案

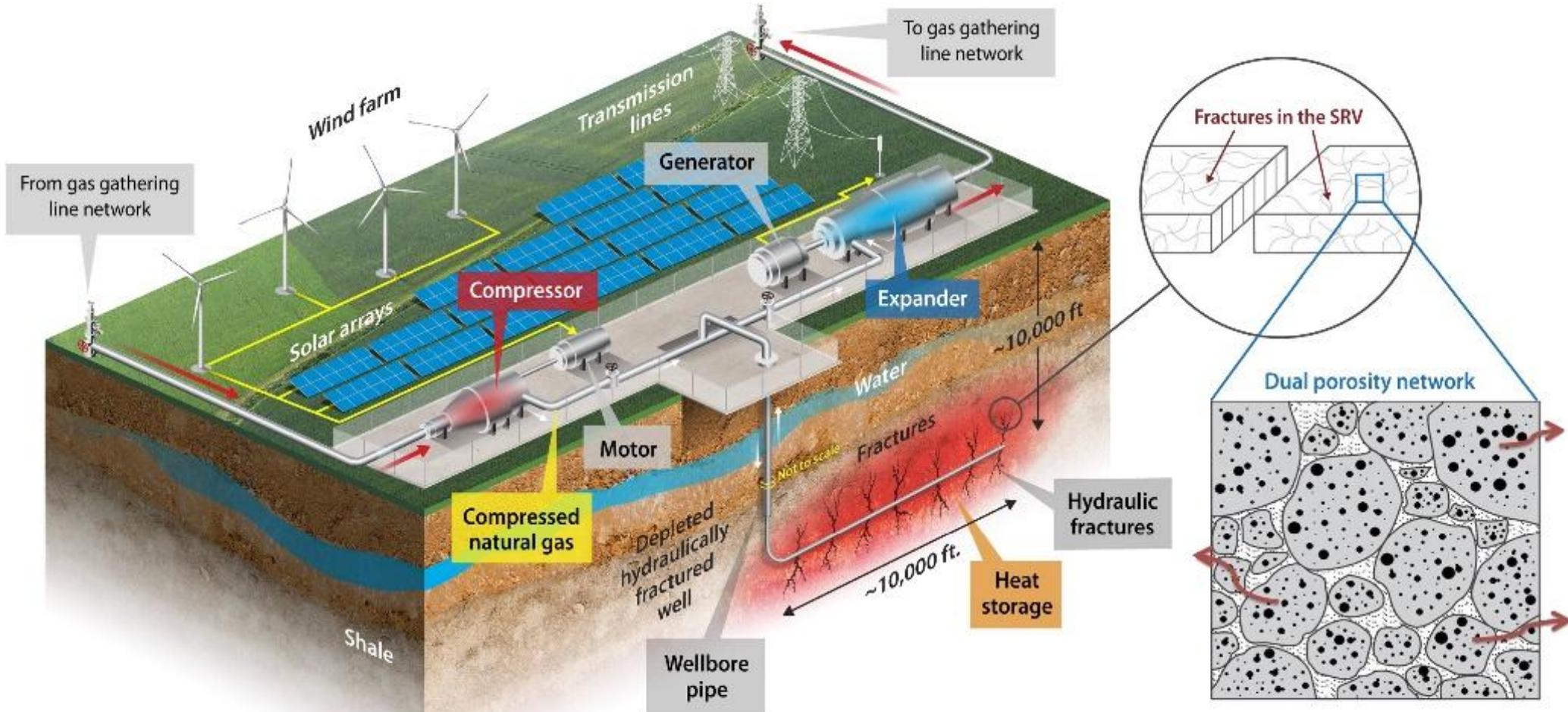
- 二氧化碳地质封存及利用 (CCUS)
- 地热
- 可燃冰
- 煤炭地下气化
- 页岩油原位改质
- 原位制氢、地下储氢
- 溶浸采铀、锂矿开采
- 天然气储库



氢气存储与开采

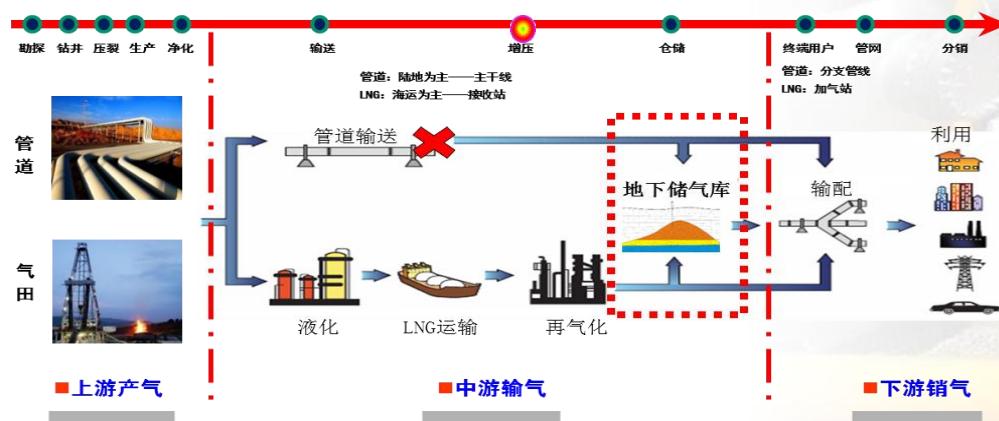
- 氢气可以周期性地按需生产、储存和提取，是一种安全可靠的低碳商业能源
- 储氢技术为氢能发展创造潜力
- CMG能够模拟并优化氢气储存与生产过程：
 - 确定储层库容，满足合同要求
 - 减少捕集造成的氢损失，降低公司风险和项目成本
 - 评估运移和安全壳完整性，减少意外的氢损失
 - 确保运营战略满足生产需求
 - 优化井身结构和要求，最大限度地降低成本和提高效率
 - 确保正确的管网设计，满足开采和注入要求
 - 评估CO₂存在情况下的矿化和潜在甲烷化效应

压缩空气储能



储气库

- 气藏建库、水层建库、盐穴建库设计
- 库容参数优化设计、断层活化、圈闭密封性评价
- 基于人工智能的高速注采参数优化
- CoFlow地面+管网（压缩机）+储层智能优化



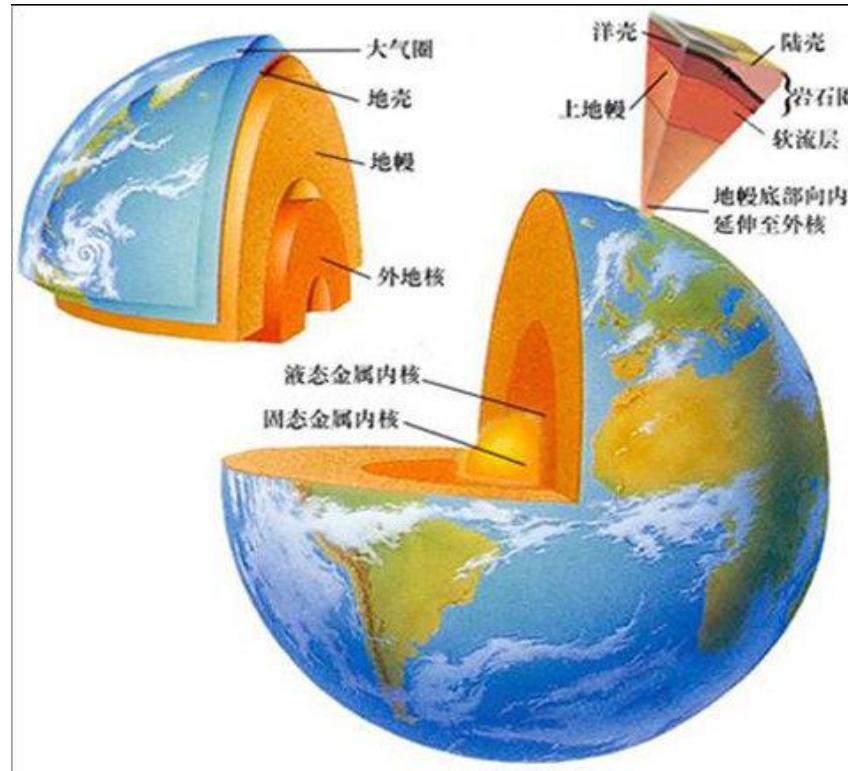
地热

- **原生性**—地壳内可供开发利用的地热能、地热流体及其有用组分，是一种清洁能源
- **用途广**—发电、供暖、农业、养殖、医疗、旅游等
- **资源大**—与煤炭、石油和天然气等传统的化石能源相比，量巨大、可再生、低碳，清洁、环保、就地取用等优势
- **稳定性强**—与太阳能、风能等可再生能源相比，不受季节天气的影响



地热资源分类

根据地热能赋存埋深和温度，地热资源可分为三类：浅层地热、水热型、干热岩。



地面

0.2 km

3.0 km

10.0 km



浅层地热资源

指蕴藏于地表一定深度（一般小于200m）范围内岩土体、地下水和地表水的热能，主要通过热泵进行利用。

水热型地热资源

指蕴藏在地下水中，通过天然通道或人工钻井进行开采利用的地热能。

干热岩地热资源

指埋深3000m、温度大于200°C，内部不存在流体或仅有少量地下流体的有较大经济开发价值的热储岩体。

地热模拟需求

- **全面的机理表征**

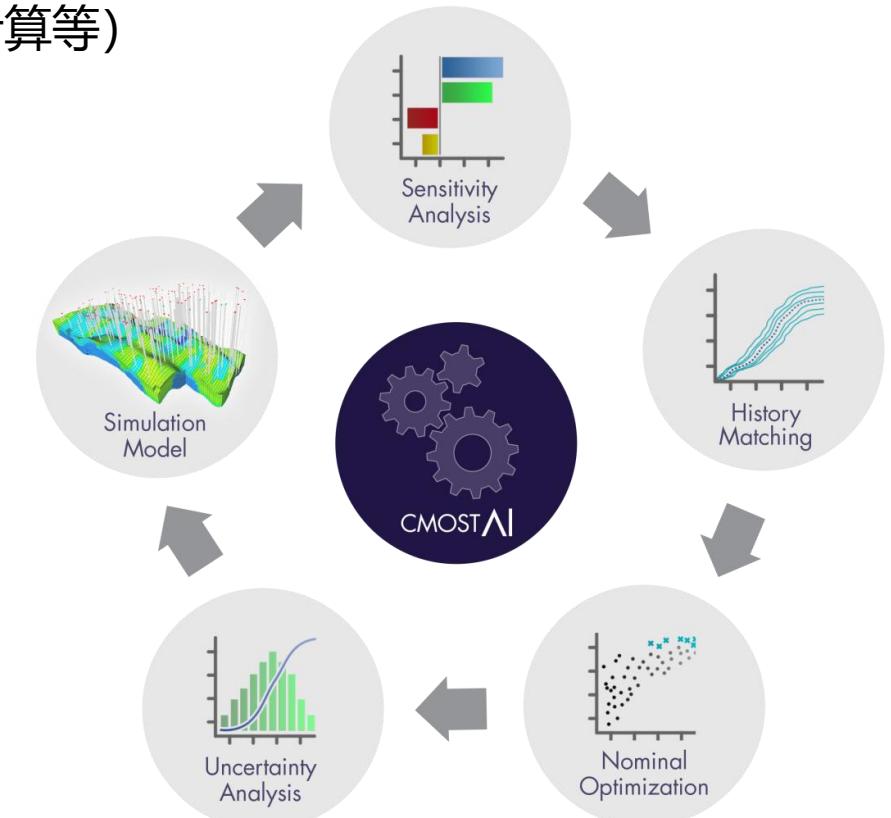
- 需要认识流体与岩石间复杂的相互作用及热传导、热对流中的能量变化过程
- CO₂作为工质时的各种物化现象表征（相态变化、热量计算等）
- 人工造储（水力压裂）的模拟
- 热流固化多场耦合

- **快速方便的前后处理工具，方便建模和分析结果**

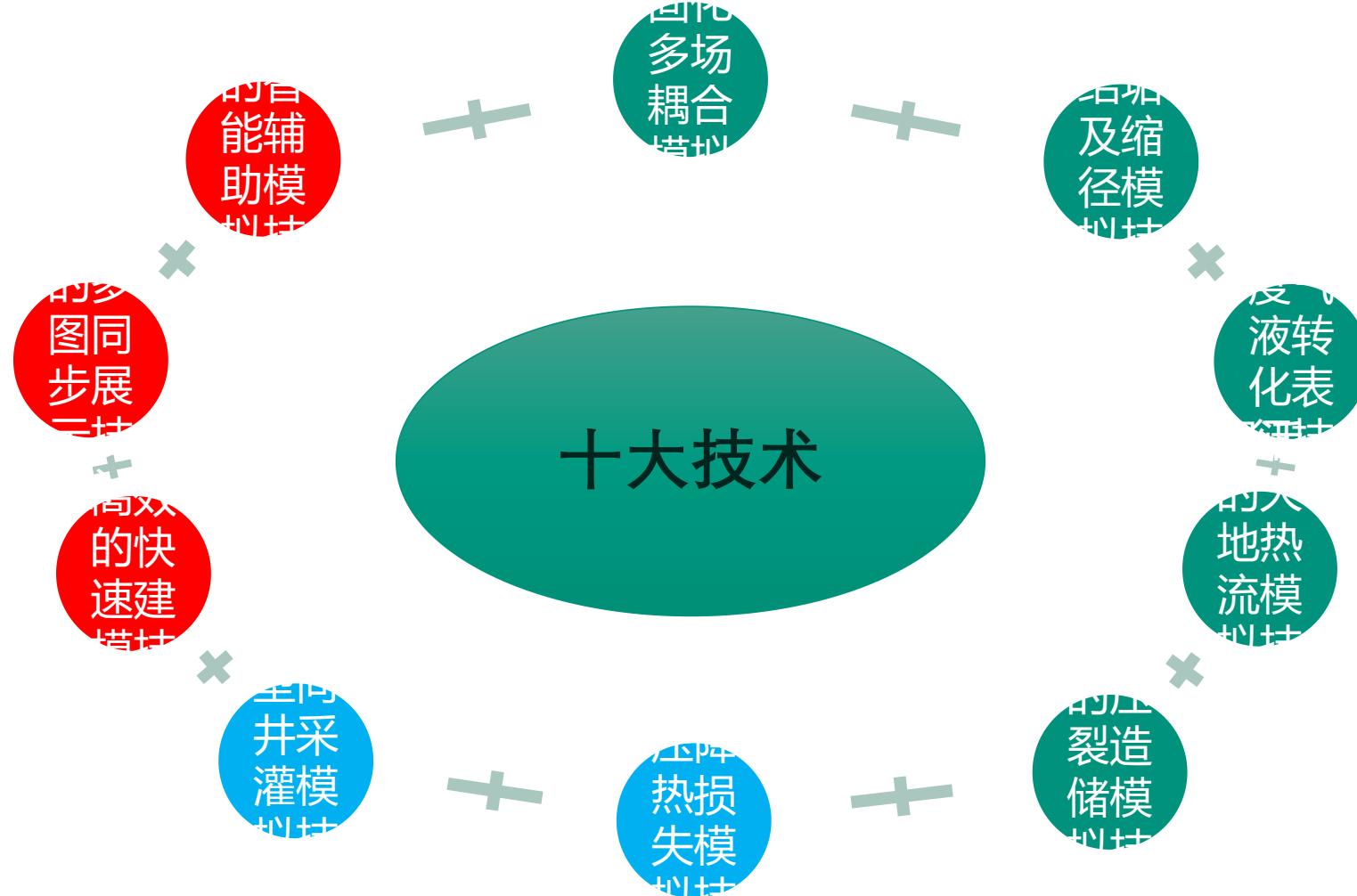
- **智能化的工作流程，提高工作效率**

- **稳定性及大规模计算能力**

- 网格节点可能达百万以上
- 强大的数值计算能力，确保计算的稳定性
- 并行算法，确保计算的速度



地热模拟解决方案



基于人工智能流程的商业化模拟器

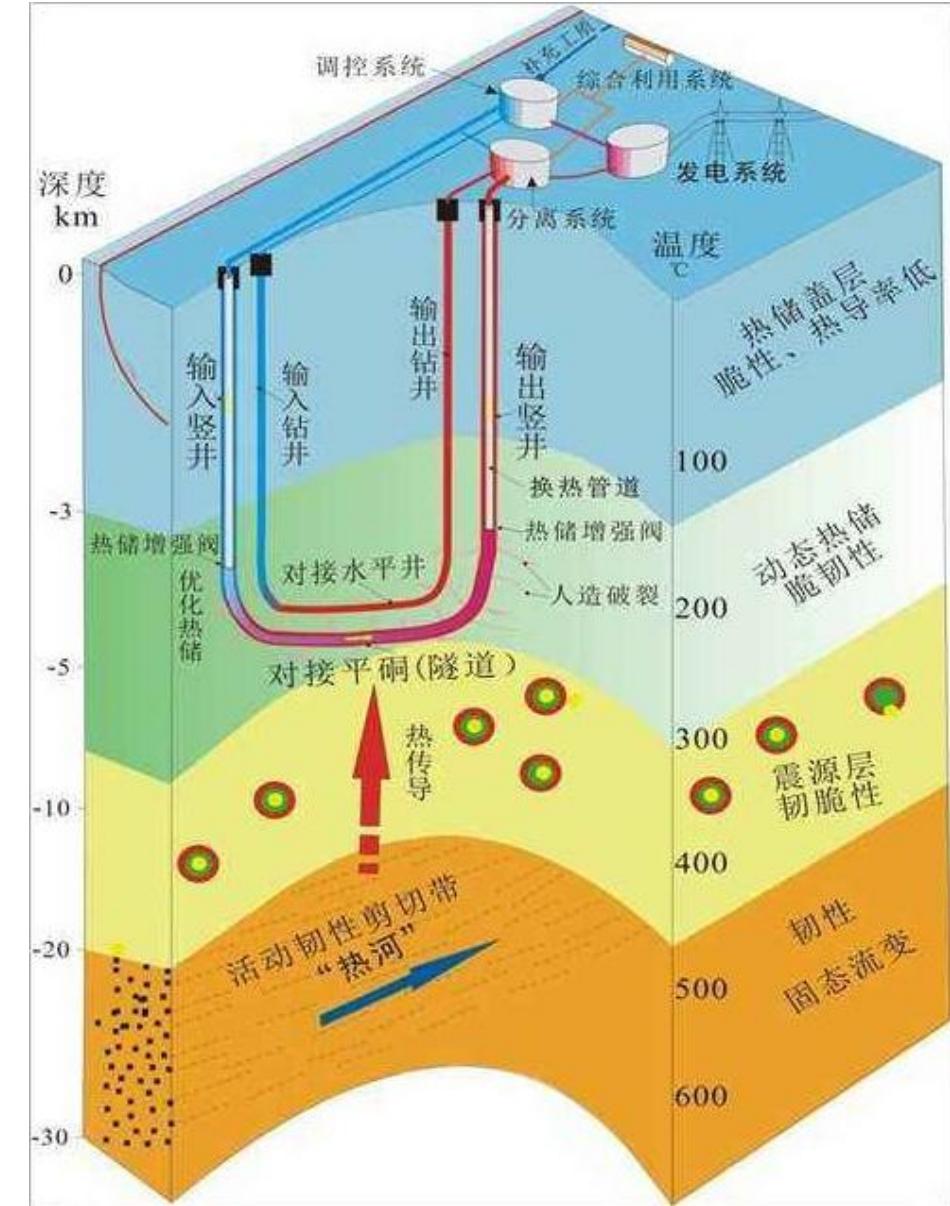
关键技术：热流固化多场耦合模拟技术

- 地热模拟的难点

- 温度场、渗流场、应力场和化学场同步耦合计算
- 评估热储的岩体变形特征及其对采热效果的影响
- 评估结垢对采热效果的影响

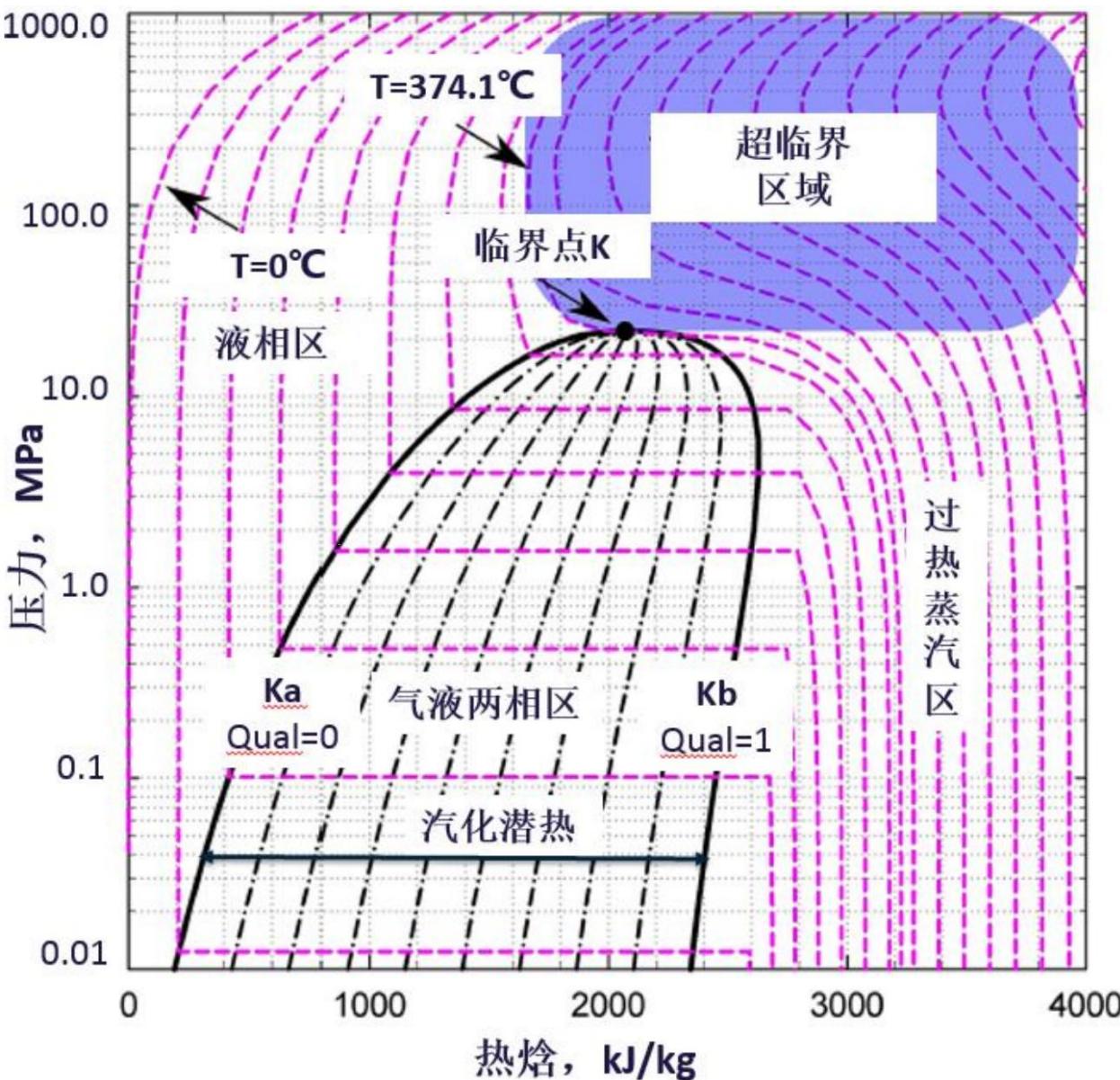
- STARS的优势

- 在热采模拟领域有40多年的积累
- 在一个软件中即可实现热流固化多场真耦合模拟
- 支持大规模矿场模型的计算
- 灵活的组分定义、强大的化学反应
-



关键技术：高精度的相态变化表征技术

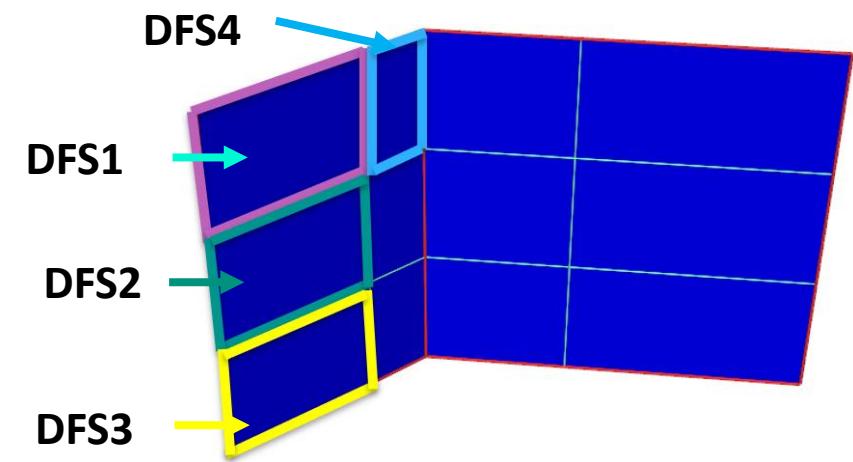
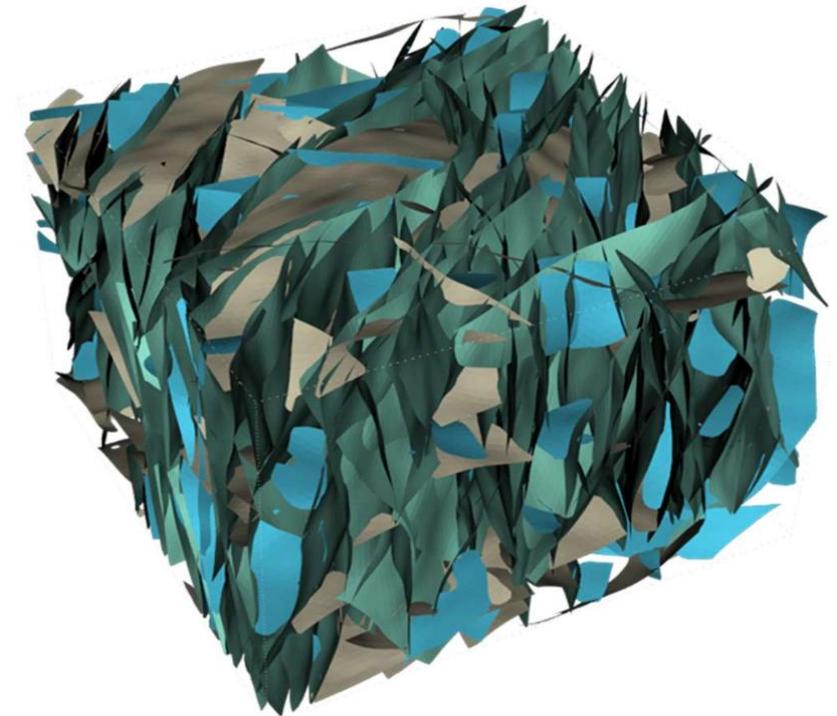
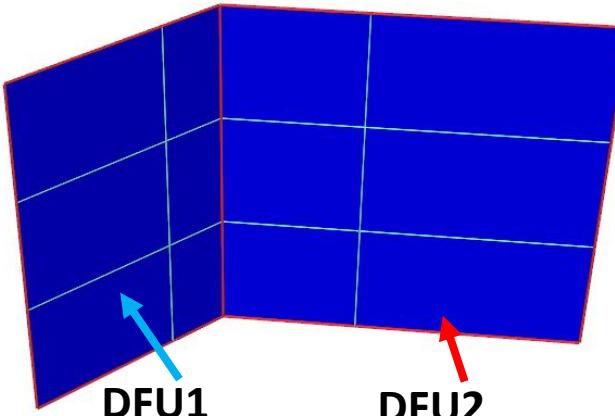
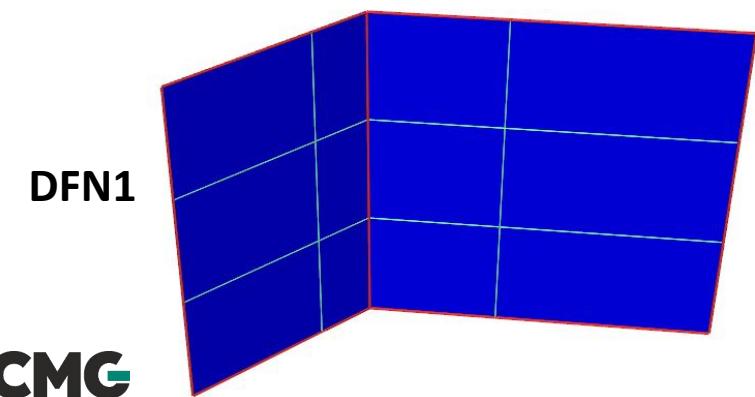
- 地热开发中面临的相态变化问题
 - 地下-井筒-地面全过程压力温度变化范围大，相态变化幅度大
 - 水的蒸发、冷凝或超临界态
 - CO₂作为工质的相态变化
 - 热焓的计算受相态变化影响大



关键技术：天然裂缝及热储改造模拟技术

- 业内首个真实的离散裂缝 (DFN)

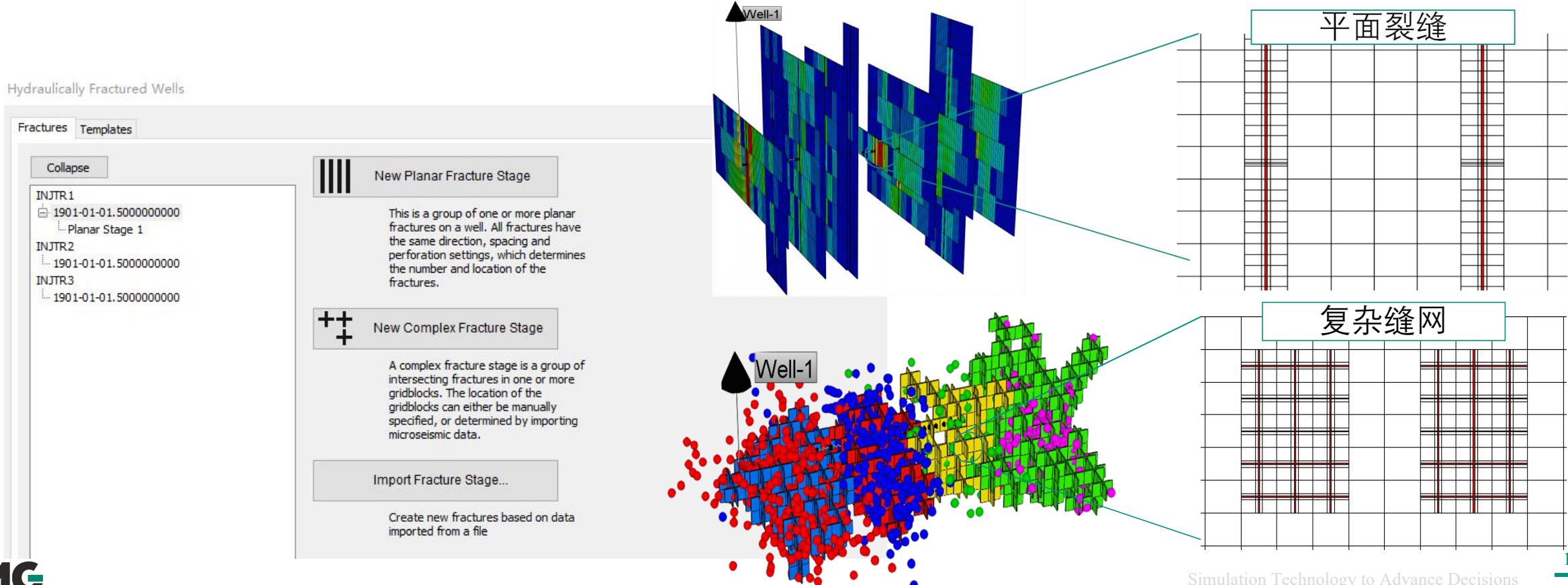
- 可用于模拟天然裂缝、人工裂缝、窜流通道等
- 可通过DFN平面连通多个储层
- 可设置任意方向的裂缝
- 每个网格可以有多条裂缝
- 裂缝面大小没有限制
- 使用实际的裂缝开度和渗透率



关键技术：天然裂缝及热储改造模拟技术

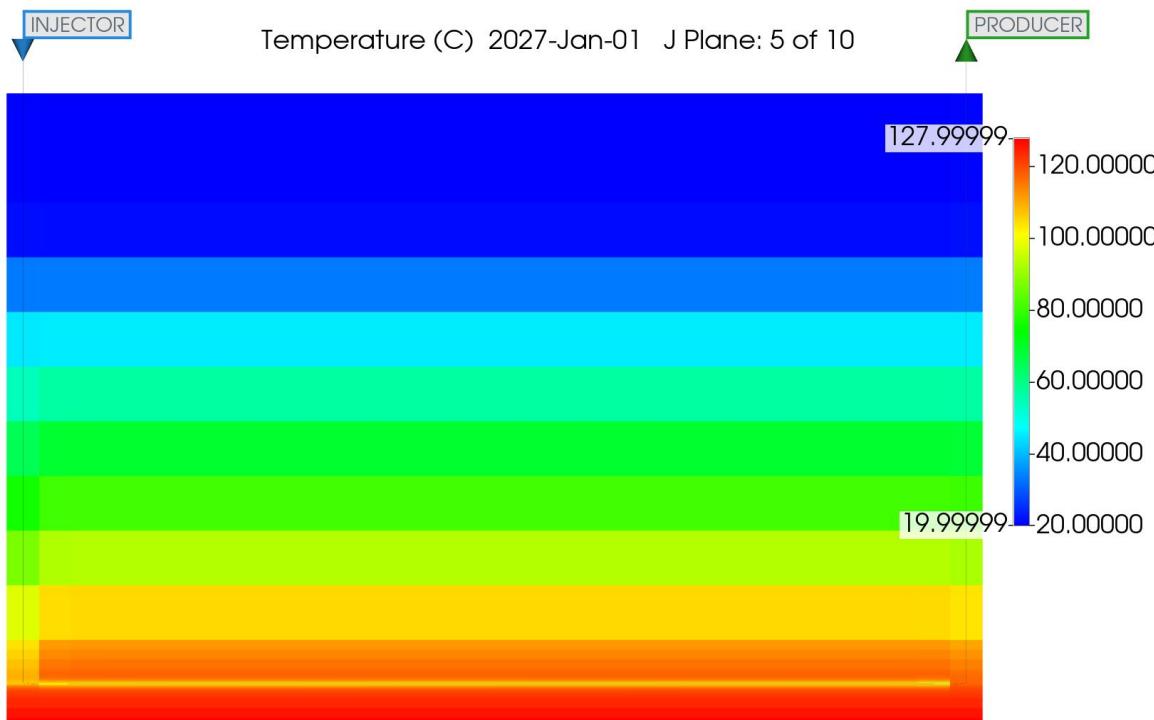
• 人工裂缝——平面裂缝和复杂缝网

- 导入GOHFER、StimPlan、FracProPT、FracPredictor & FieldPro等压裂软件数据
- 微地震数据，快捷的水力压裂向导

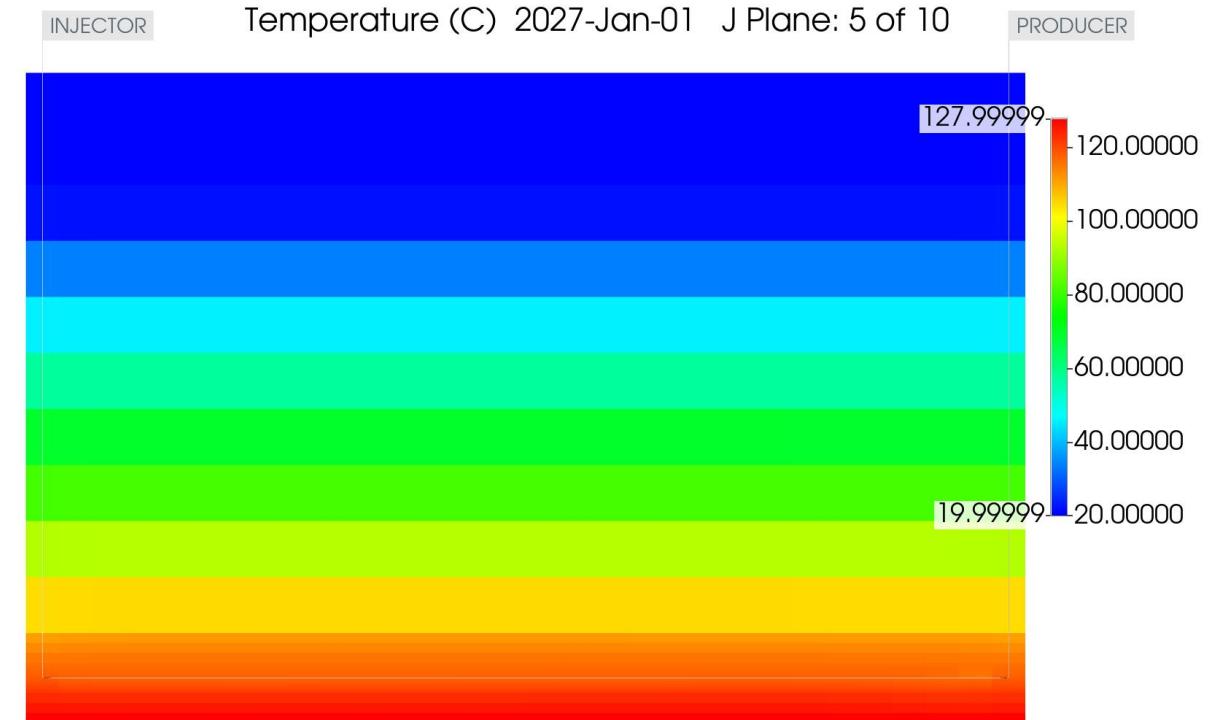


关键技术：灵活的大地热流模拟技术

- 大地热流是地热开采中的一个重要概念
 - 为单位时间内以传导或对流方式由地球内部、经地球的固体表面向外传送的热能
 - 大地热流可为热储持续补充热量，恢复热储温度
 - CMG提供了多种模拟方法，方便用户根据需要选择



不考慮大地熱流

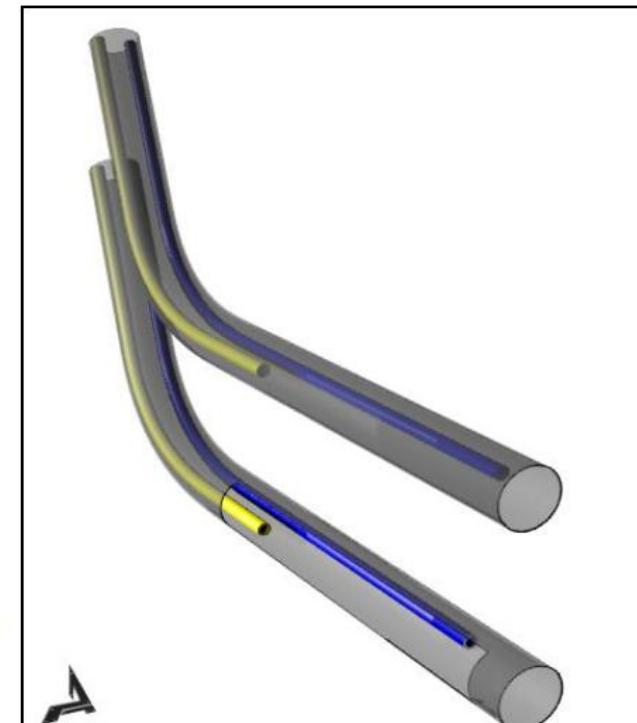
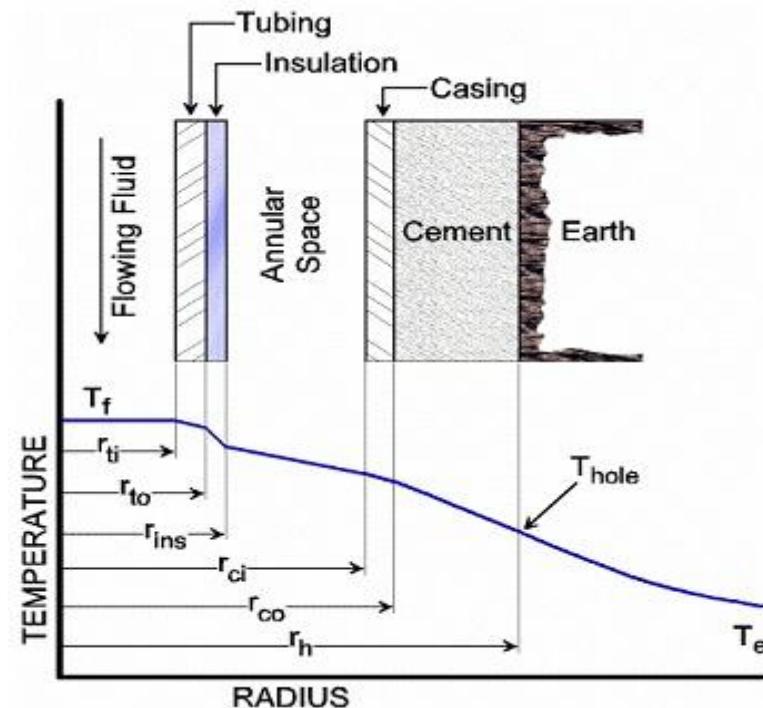


考慮大地熱流

关键技术：井筒压降热损失模拟技术

- 先进的灵活井井筒压降热损失计算模型：
 - 计算井筒内热水或蒸汽流动过程中压力、温度、干度、流态的变化
 - 计算井筒与地层之间的传热

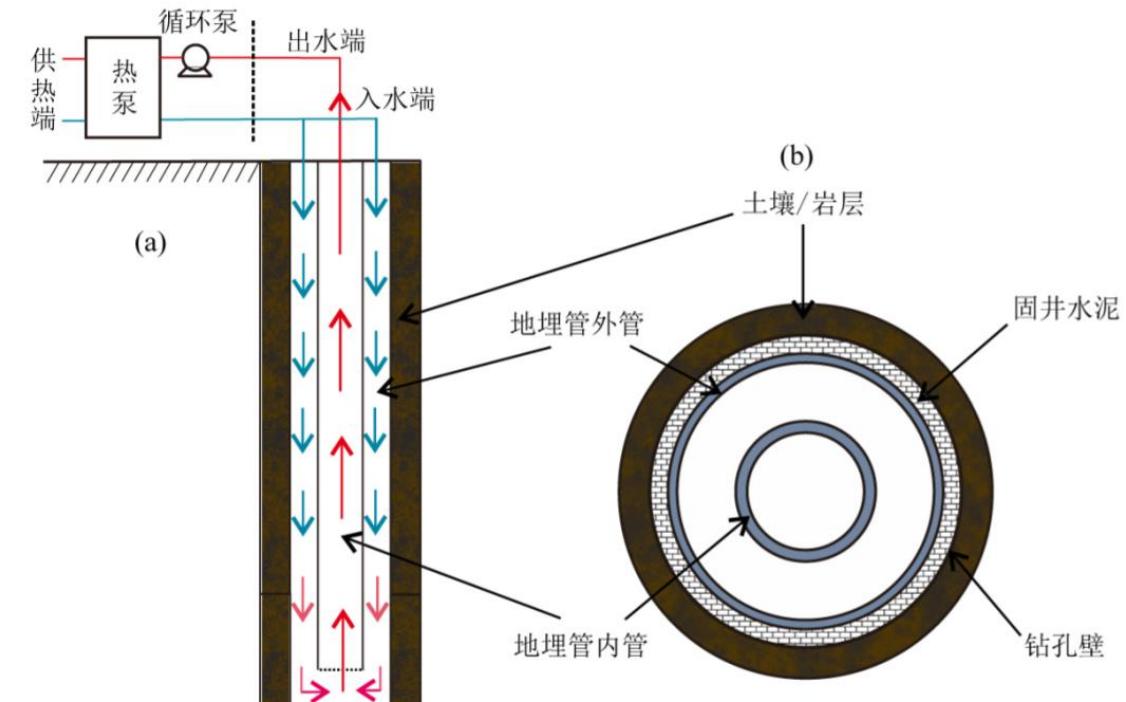
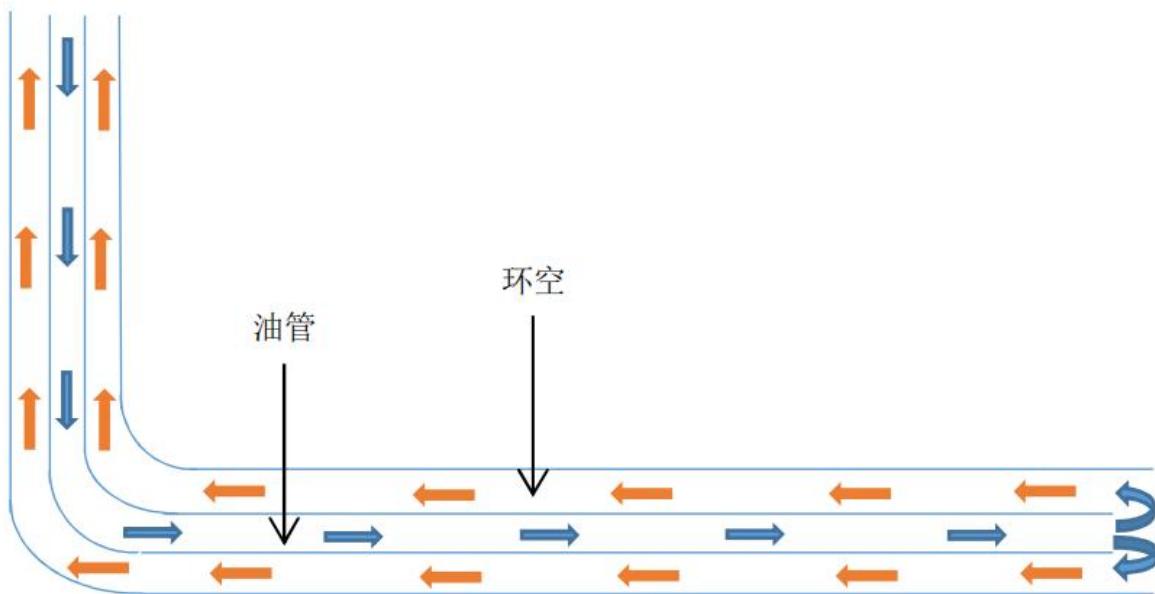
- 用于：
 - 计算井口产出液温度
 - 优选注入速度
 - 优选油管隔热材料
 - 优化隔热管长度、位置等
 - 优化套管换热相关技术参数
 -



关键技术：各类型同井采灌模拟技术

- 同井采灌是地热开采的常用方式之一：

- 通过同轴套管进行单井内部流体循环，基于热传导的方式与地层换热
- 以“取热不取水”形式开发地热能
- 依托强大的灵活井筒模拟功能，实现在同一井眼中进行双管或多管模拟



关键技术：方便高效的快速建模技术

- 地热向导：快速智能建模技术
 - 快速创建地热模型，包括自动创建网格、流体、相渗、热物性和源汇井/灵活井等
 - 直接更改现有模型，将模拟网格延伸到地表，计算从井口到储层的沿程热损失
 - 将源汇井模型方便地转为灵活井模型，或添加具有指定曲率、方向和长度的水平井

Step 2 - Input Specific Data For Geothermal Models

Choose Geothermal Options			
Choose from one of the following geothermal models:	Closed loop geothermal with a U shaped well		
Enter the number of layers to add for the over burden	20 输入代表上覆岩层的层数		
Enter an elevation for the top of the grid (negative above sea level) (m)	0 输入网格顶深海拔（海平面以上为负）(m)		
Enter a distance (m) between the two U shaped well legs at bottom hole	1000 输入两个U型井直井段之间的距离 (m)		
Enter a grid boundary distance (m) away from the well	520 输入网格边界距井的距离 (m)		
Enter grid size (m) used for both I and J grid sizes	40 输入I和J方向的网格尺寸 (m)		
Geothermal reservoir thickness (m)	400 地热储层厚度 (m)		
Grid size (m) for K direction in the geothermal reservoir	20 地热储层K方向的网格尺寸 (m)		
Geothermal reservoir permeability, md	0.1 地热储层渗透率, md		
Geothermal reservoir porosity, fraction	0.2 地热储层孔隙度, 小数		
Depth (m) for grid bottom and for reference pressure	2000 网格底部和参考压力的深度 (m)		
Pressure (kPa) at reference depth	20000 参考深度处的压力 (kPa)		
Radius of curvature (m) for drilling the transition of vertical to horizontal	100 从直井段到水平段过渡的曲率半径 (m)		
Use a horizontal injector and vertical producer (unchecked means both are horizontal)	<input type="checkbox"/> 使用水平井注，直井采 (未选中表示两口井都是水平井)		
Number of grid refinements where the 2 wells join (to get same temperature at the last perf)	3 两井连接的网格局部加密级数 (为了确保最后一个射孔处的温度相同)		
Show thermal controls	<input checked="" type="checkbox"/> 显示热物性参数 (未选中时是隐藏的)		
Thermal conductivity for reservoir zone ($J/(m^2 \cdot day \cdot ^\circ C)$)	274000 储层导热系数($J/(m^2 \cdot day \cdot ^\circ C)$)		
Thermal conductivity for overburden zone ($J/(m^2 \cdot day \cdot ^\circ C)$)	210000 上覆岩层导热系数($J/(m^2 \cdot day \cdot ^\circ C)$)		
Heat Capacity for reservoir zone ($J/(m^3 \cdot ^\circ C)$)	2.6e+06 储层热容($J/(m^3 \cdot ^\circ C)$)		
Heat Capacity for overburden zone ($J/(m^3 \cdot ^\circ C)$)	2e+06 上覆岩层热容($J/(m^3 \cdot ^\circ C)$)		
Cold water injection rate (m^3/day)	500 冷水注入速度 (m^3/day)		
Choose from one of the following standard API tubing/casing/hole sizes to autofill the values	从以下标准API油管/套管/井眼尺寸中选择一种来自动填写数值		
Tubing inner diameter (inches)	3.958 油管内直径 (英寸)		
Tubing outer diameter (inches)	4.5 油管外直径 (英寸)		
Casing inner diameter (inches)	8.681 套管内直径 (英寸)		
Casing outer diameter (inches)	9.625 套管外直径 (英寸)		
Hole diameter size (inches)	12.25 井眼直径 (英寸)		
Number of depth and temperature values in the table below	2 下表中的深度和温度值数量		
Depth SS (m)	海拔深度(m)	Temperature (C)	温度 (C)
0		15	
2500		300	

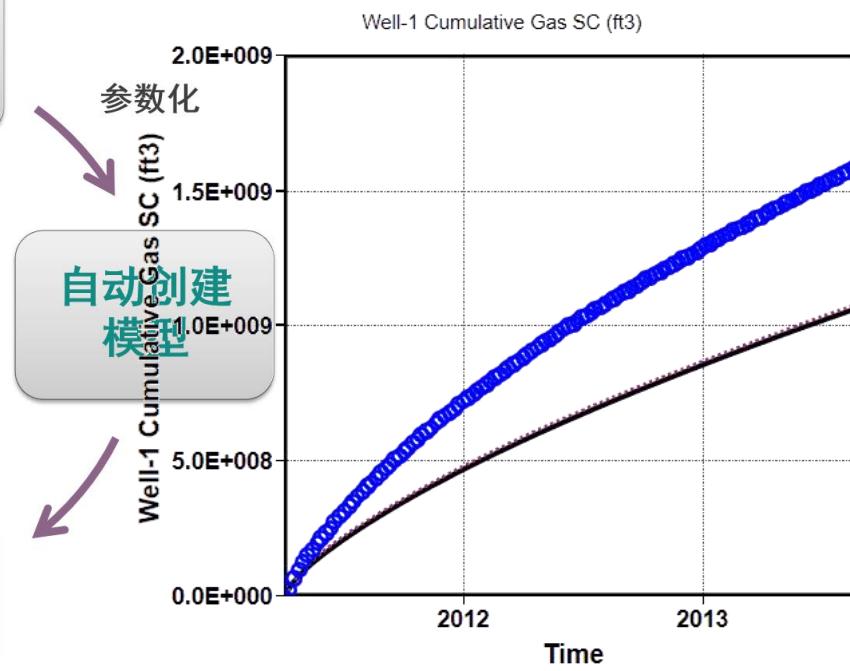
< Back Finish Cancel

关键技术：人工智能地热模拟流程



- CMOST AI是基于模拟器和各类优化、统计及不确定性分析算法，实现数值模拟自动化的软件，可以用来执行以下四个任务：

- 敏感性分析
 - 评价不同热储参数的重要程度
- 辅助历史拟合
 - 以生产历史数据为依据，调整模型
- 方案优化（采灌量大小）
 - 提高采收率，增加净现值
- 不确定性分析
 - 降低风险



CMG地热模拟的优势

- **全面模拟各种机理**

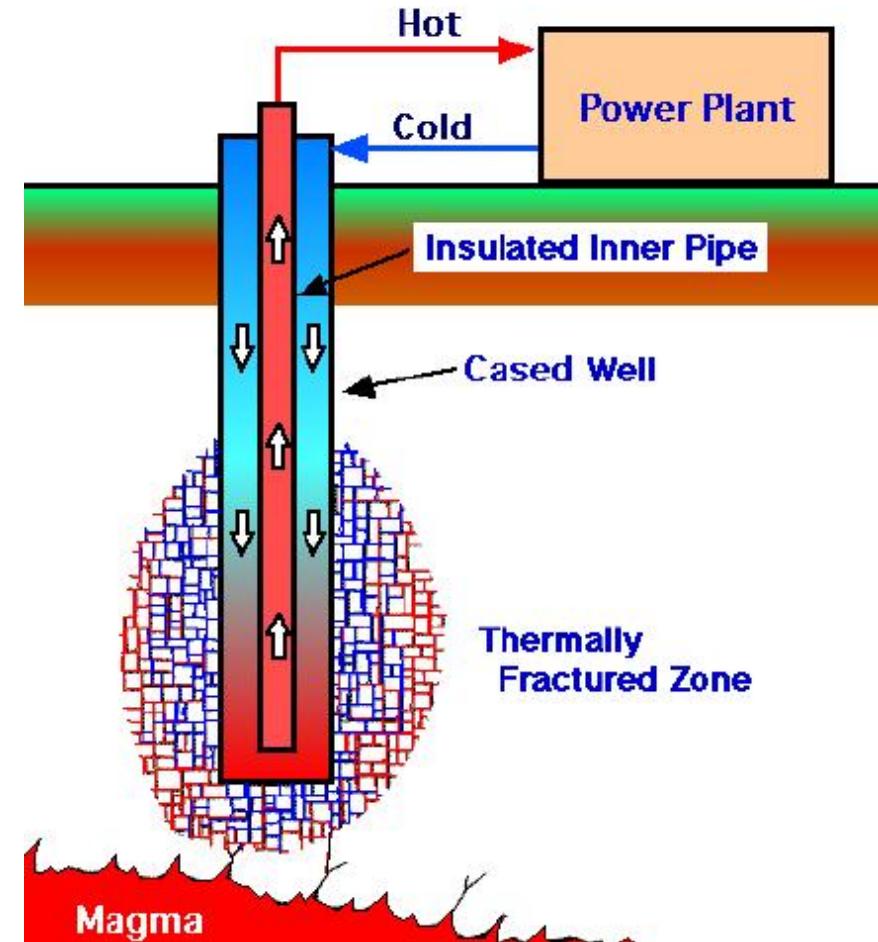
- 热流固多场耦合模拟
- 井筒压降热损失模拟
- 灵活的大地热流模拟
- 天然和人工裂缝模拟
- 高精度相态变化模拟
- 各类型同井采灌模拟
-

- **矿场规模的模拟能力**

- 网格节点可达千万以上
- 强大的数值计算能力，确保计算稳定性
- 并行算法，确保计算速度

- **快速方便的前后处理工具**

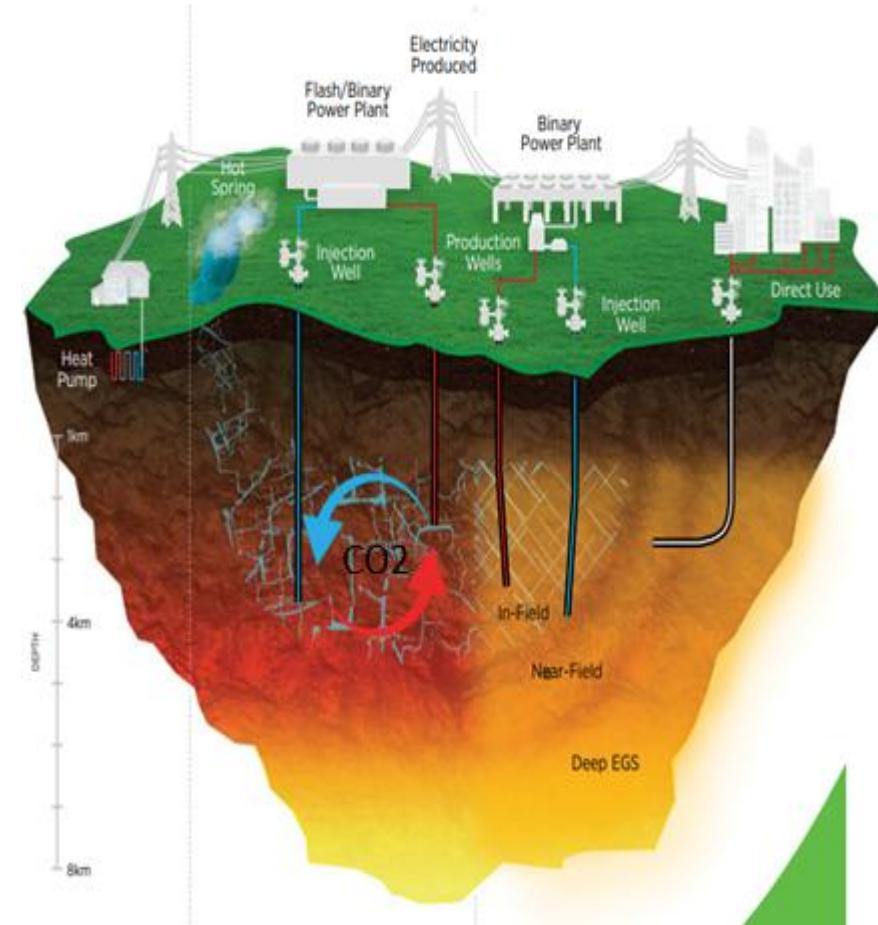
- Builder帮助快速建立数模模型
- CMOST AI帮助用户提高工作效率，节约大量时间
- Results强大的曲线、图片、动画及多图同步展示功能



应用案例：STAR Energy地热井结垢模拟

• 案例介绍

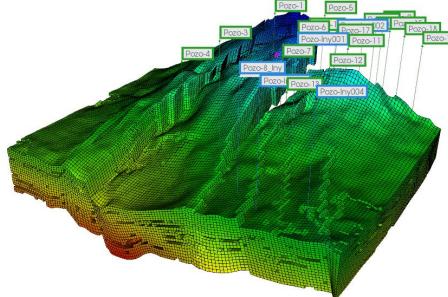
- 地热流体中存在CO₂
- 随着压力下降，化学平衡发生变化，部分CO₂进入气相
- 该过程会产生方解石，随着井筒或多孔介质中压力的进一步下降，方解石开始沉积
- 该项研究中，使用CMG STARS和FlexWell模拟地热井筒中方解石的沉积



Source: GeoVision Analysis 2019, US DOE

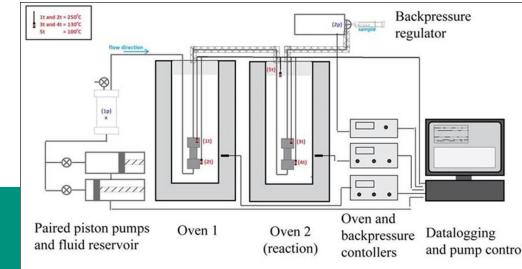
STAR Energy地热井结垢模拟

工作流程

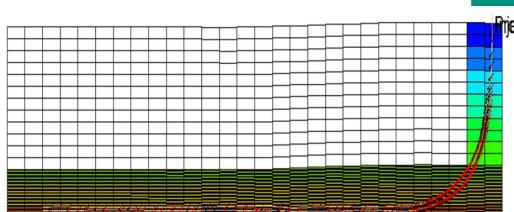
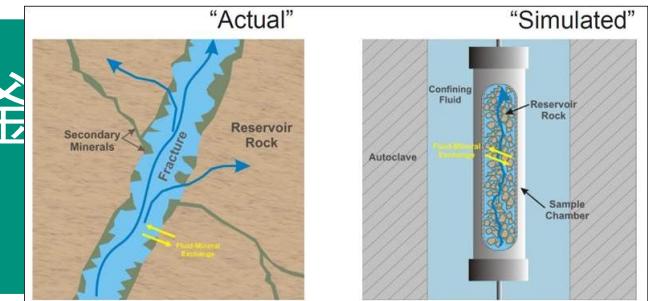


矿场模型

加压釜实验



STARS加压釜
实验模拟



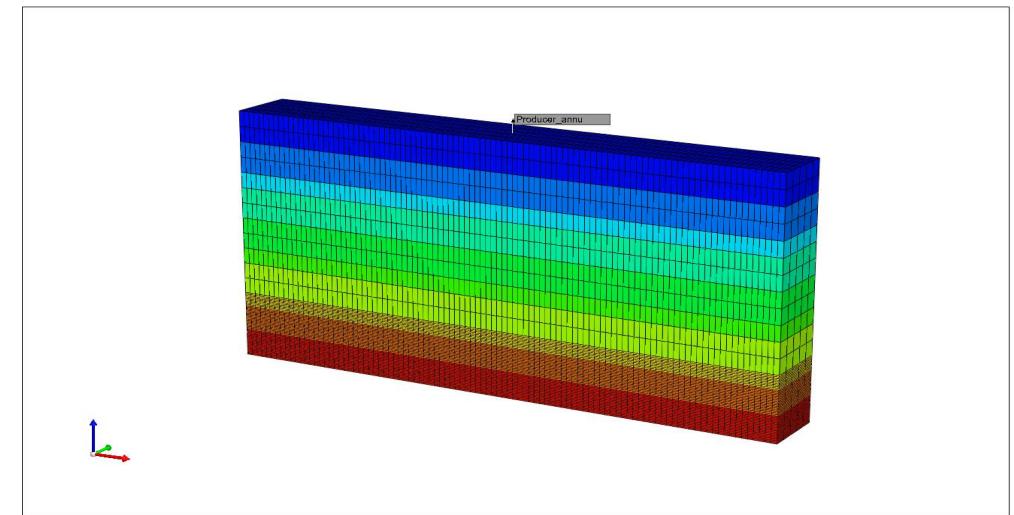
单井筒模型
STARS/FLEX Well

STAR Energy地热井结垢模拟

Grid Top (m) 2018-09-01

- 概念模型参数

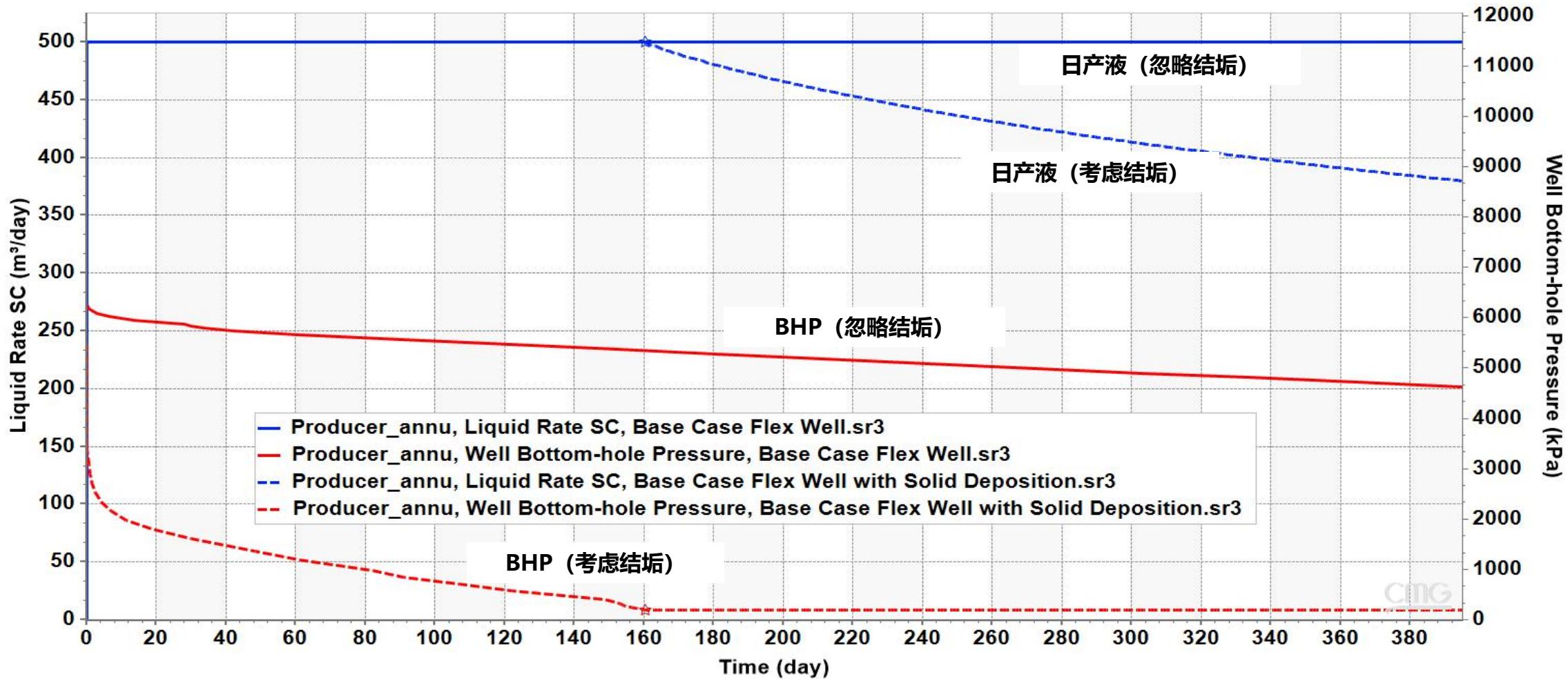
- 2000m x 250m x 85m
- 网格数 $100 \times 5 \times 54$
- 孔隙度 20 %
- 渗透率 10 mD
- 上覆岩层有 12 层，热储从 13 到 54 层
- 工作制度：
 - MIN BHP 200 kPa
 - MAX STL 500 m³/day
 - ‘CaCO₃’ 溶于水
 - ‘CAL_CARB’ 为固相
 - $1 \text{ CaCO}_3 \rightarrow 1 \text{ CAL_CARB}$



参数	取值
岩石压缩系数	1.4E-5 Kpa ⁻¹
岩石导热系数	6.60E+05 J/m-day-C
水相导热系数	5.35E+04 J/m-day-C
气相导热系数	3.20E+03 J/m-day-C
油藏温度	260.0 °C

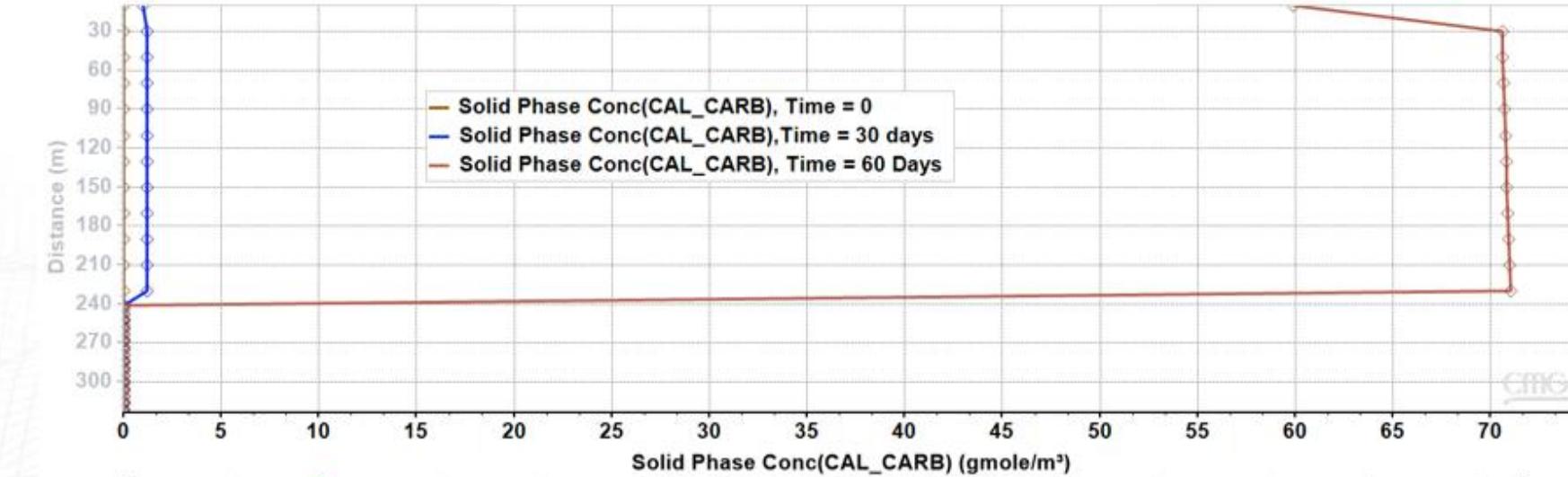
日产液和BHP

日产液与BHP对比

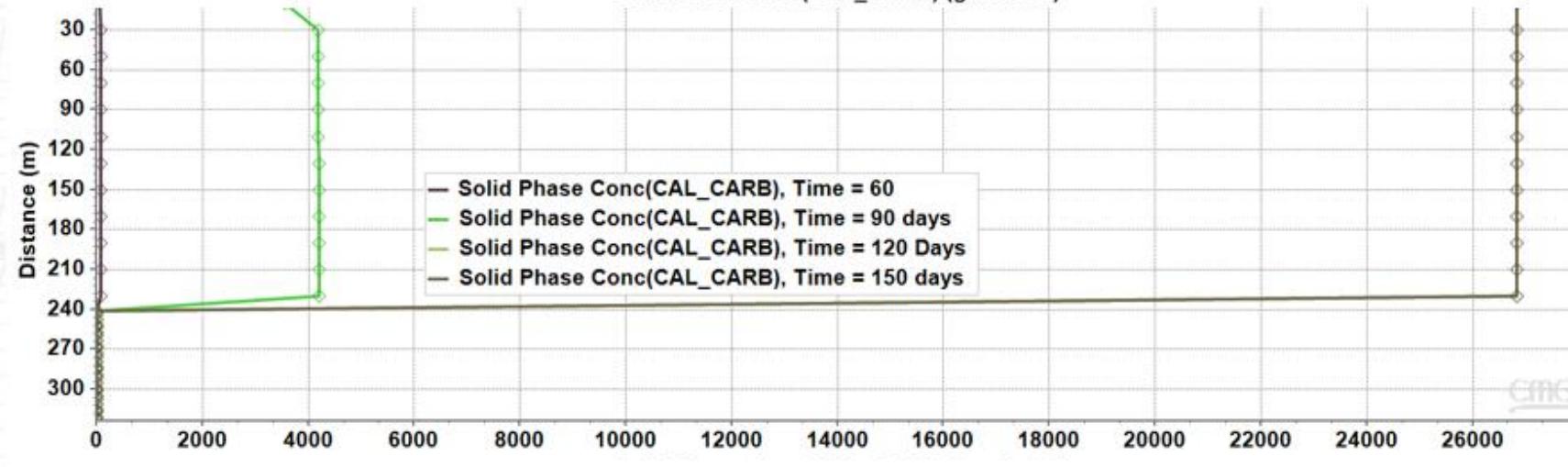


结垢模拟 (灵活井 + 固相沉积反应)

固相浓度



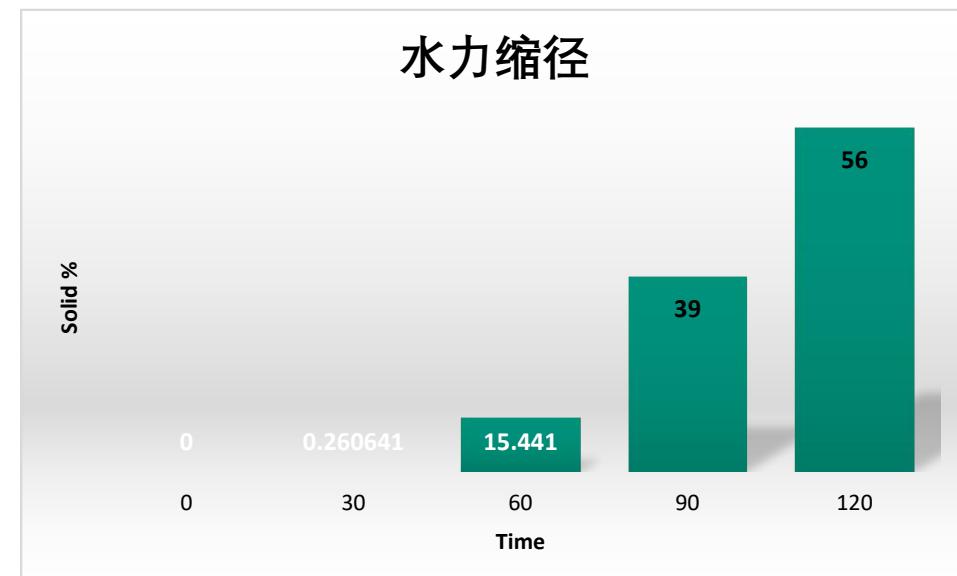
固相浓度



水力缩径程度量化输出

***** FRICTION & HEAT FOR FLEXIBLE WELLBORE - 'Producer' *****								
delP (kPa)	Wall(Ins,Cem)_Res (day-C/J)	Fluid_Res (day-C/J)	Slip	% Solid	Flow_Regime	Reynolds	Perforation	
0.115482E-02	0.264198E-07	0.295707E-09	0.769312	13.0964	STRATIFIED	30019.3	50,3,1 ZP 'Producer_annu'	
194.062	0.264198E-07	0.141204E-09	1.02757	15.4319	LIQUID	28817.2	50,3,2 ZP 'Producer_annu'	
194.204	0.264198E-07	0.141023E-09	1.03319	15.4410	LIQUID	28392.2	50,3,3 ZP 'Producer_annu'	
194.323	0.264198E-07	0.140524E-09	1.04398	15.4501	LIQUID	27983.3	50,3,4 ZP 'Producer_annu'	
194.443	0.264198E-07	0.139905E-09	1.05631	15.4593	LIQUID	27609.6	50,3,5 ZP 'Producer_annu'	
194.564	0.264198E-07	0.139195E-09	1.07078	15.4684	LIQUID	27254.4	50,3,6 ZP 'Producer_annu'	
194.685	0.264198E-07	0.138293E-09	1.08812	15.4775	LIQUID	26911.6	50,3,7 ZP 'Producer_annu'	
194.807	0.264198E-07	0.137329E-09	1.10952	15.4866	LIQUID	26575.0	50,3,8 ZP 'Producer_annu'	
194.930	0.264198E-07	0.136168E-09	1.13685	15.4957	LIQUID	26239.1	50,3,9 ZP 'Producer_annu'	
195.054	0.264198E-07	0.134583E-09	1.17347	15.5049	LIQUID	25895.6	50,3,10 ZP 'Producer_annu'	
195.181	0.264198E-07	0.132488E-09	1.22604	15.5140	TRANSITION	25559.0	50,3,11 ZP 'Producer_annu'	

- 固相含量 (Solid %) 代表被固相占据的面积百分数
- 可通过数值模拟优化出避免井筒堵塞的最佳操作条件
- 其他矿物 (如二氧化硅等) 沉积，可参考该案例的化学反应方法进行模拟



其他案例

- 案例1——大庆废弃井改造+地热井采灌现场试验
- 案例2——大庆利用干热岩U型井地热开发实现低碳供暖方案研究
- 案例3——胜利废弃油井采热井筒温度计算
- 案例4——印尼地热软件测试对比研究
- 案例5——印尼Rantau Dedap地热形成机理研究
- 案例6——贝克休斯ARE高温高压超临界地热模拟