

# 干热岩暂堵转向压裂技术

## 1 背景及意义

干热岩是一种新兴的地热能源，一般指温度大于 150°C，埋深 3~10km，内部不存在流体或仅有少量地下流体的高温岩体。据中国科学院估算，中国大陆地区 3~10km 深度段的干热岩地热资源总量为  $20.9 \times 10^6 \text{ EJ}$ ，相当于  $714.9 \times 10^{12} \text{ t}$  标准煤，约为美国本土干热岩储量的 1.5 倍。因此干热岩被认为是 21 世纪最有潜力的新型能源。目前，通过水力压裂改造形成人工热储裂隙系统是经济开采深层热能的有效方法。然而，由于干热岩埋藏较深，岩石塑性特征增强，使人工裂缝复杂性程度降低，易导致注水井和生产井之间形成短路，产生“热突破”现象，即换热面积和换热时间缩小，从而导致生产井井口温度过低而丧失利用价值。因此，如何增强缝网复杂程度是提高干热岩采热效率的关键技术之一。

## 2 技术创新

如图 1 所示，基于通过暂堵提升缝内净压力，迫使人工裂缝转向的思想，率先在国内提出将暂堵转向压裂技术用于提高干热岩采热效率，联合研制了干热岩高温高压水力压裂实验系统、厚壁筒膨胀致裂系统和暂堵剂可视化运移与封堵实验系统等关键装置，实现了干热岩暂堵转向压裂技术方案的高效设计与工程参数优化。干热岩高温高压水力压裂实验系统由轴压加载系统、孔隙压力加载系统、围压加载系统和计算机控制系统组成。

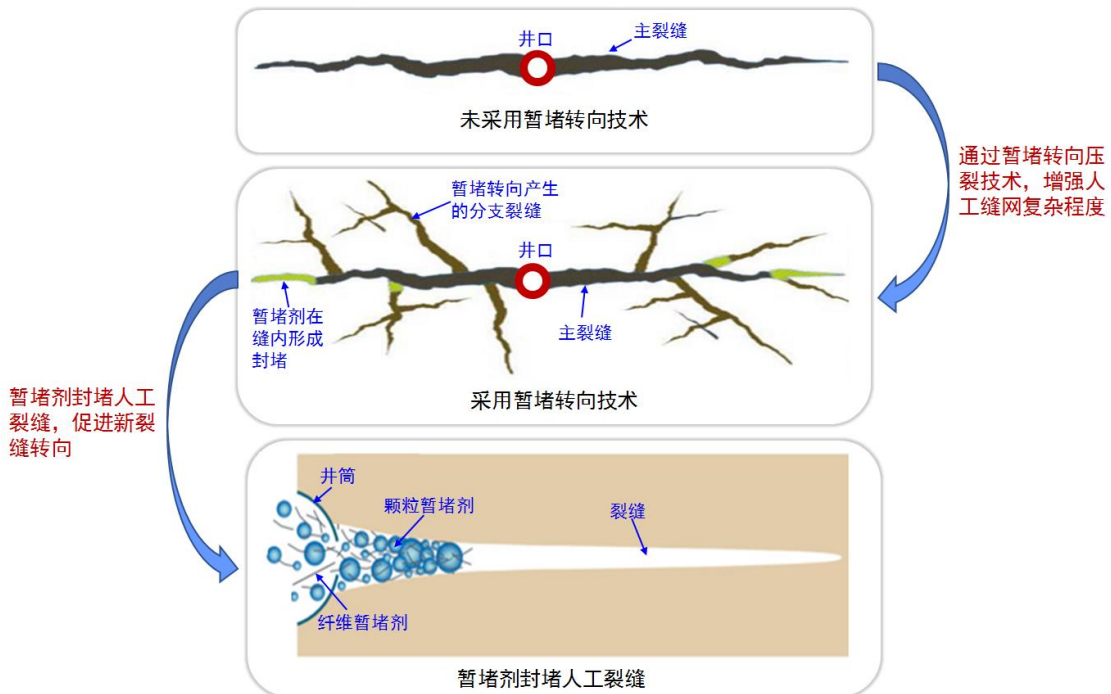


图 1 干热岩暂堵转向压裂技术示意图

轴压加载系统由固定框架和伺服液压泵组成，伺服液压系统可提供的最大轴向载荷为 2000KN。围压加载系统主要由压力室、增压泵和液压硅油组成，增压泵按照指令实行不同的应力加载模式，围压最大可加载至 100 MPa。孔压加载系统主要由高压泵组和注水管线组成，注水泵根据不同的加载方式通过管线向井筒内注入清水，孔隙压力最大可加载至 70MPa。计算机控制系统主要包括

自主开发的控制软件和各种应力应变传感器，能够实时采集应力加载过程中应力应变等数据，并且对不同的加载模式发出控制指令。



图2 干热岩高温高压水力压裂实验系统

常规暂堵剂运移与封堵效率评价未考虑温度效应，团队基于 Euler-Lagrange 方法，构建了 CFD-DEM 双向耦合算法，并搭建了高温条件下暂堵能力评价实验平台，高精度捕捉了高温干热岩复杂裂隙内暂堵剂运移与封堵过程，揭示了高温环境中暂堵剂的运移与封堵机制。

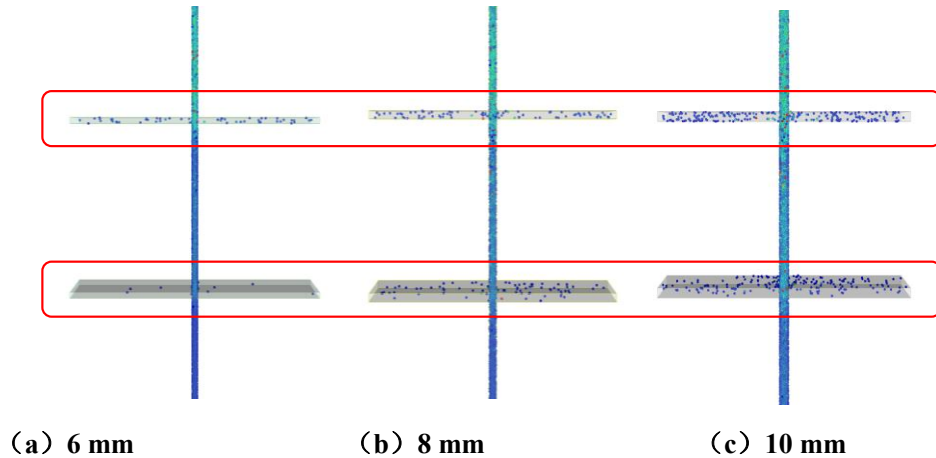
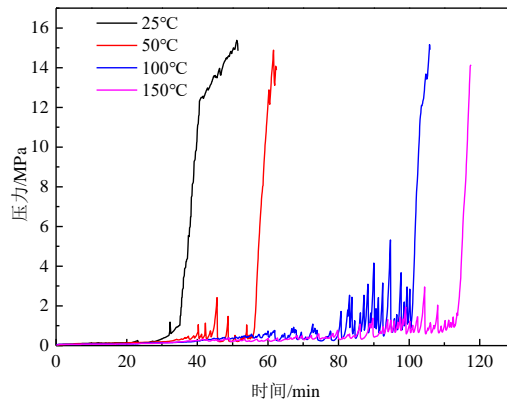
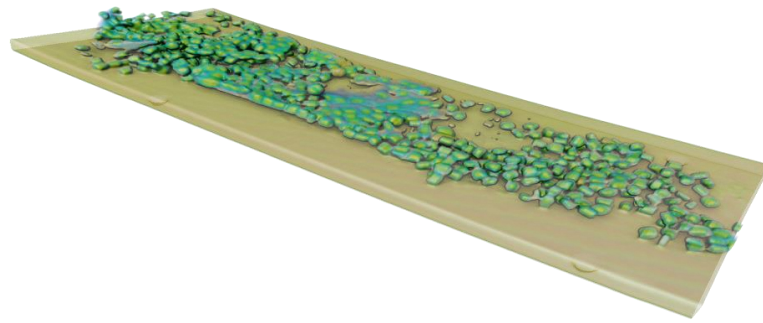


图7 不同裂缝宽度下分支裂缝内暂堵剂分布图



(a) 不同温度下暂堵压力变化曲线



(b) 暂堵剂在裂缝内形成的封堵体  
图 8 不同温度下暂堵过程中缝内压力变化图

### 3 推广应用

干热岩暂堵转向压裂技术及工艺可以应用于页岩油、致密油、深层超深层油气藏等增产作业，也可以应用于土壤修复、海洋石油工程岩屑回注等工程中。以该项目成果为基础，团队成员授权发明专利 9 项，实用新型专利 1 项，登记软件著作权 4 项，发表 SCI 论文 5 篇、中文论文 3 篇，获得两项省部级竞赛三等奖。

#### 基于该技术的发明专利

专利名称	专利号
一种模拟暂堵剂在干热岩粗糙裂隙内输运过程的数值方法	CN202110703894.0
一种干热岩复杂缝网内暂堵剂流动模拟方法	CN202110969104.3
一种纳米乳液改造干热岩储层的压裂方法	CN201910513611.9
一种增加高温地层人工缝网复杂程度的压裂方法	CN201810479800.4
一种基于应力应变曲线评价致密储层可压性的方法	CN201810450260.7
一种用于评价流体对岩石造缝能力的实验方法	CN201810448640.7
一种油气井致密储层裂缝转向能力大小的判断方法	CN201711386759.8
一种确定油气井致密储层中暂堵转向剂最优用量的方法	CN201711386760.0
一种高效快速模拟水力压裂的方法	CN201711387922.2
模拟干热岩致裂形成裂缝形态的装置	CN202021009205.3

### 4 联系方式

联系人：汪道兵博士

联系电话：15726614118

邮箱：upcwdb@bjpt.edu.cn