

水平井+多段水力压裂技术应用于干热岩 开发获突破

干热岩发电是重要的地热能利用形式之一，因其生产过程基本全程无排放，在能源转型的当下更被视为弥补太阳能和风能发电稳定性不足的最佳解决方案。用于开发干热岩的系统被称为增强地热系统（EGS），其基本原理是通过注入井将高压水注入地下2~6 km深的人工热储内，使其通过渗透循环而吸收热能，再通过生产井将高温水、汽抽出地表用于发电，冷却后的水再次注入地下循环使用，整个过程都在一个封闭的系统内进行。

干热岩开采与油气开采有许多共同之处，如都需要钻井至目的层，都有注入和采出过程，因此将油气开采工艺技术用于干热岩开采是十分常见的思路。但二者不同之处也很明显：干热岩储层的温、压都极高，对勘探开采设备的材质和性能的要求都更高，对油气开采技术工艺的应用形成了巨大挑战。截至2020年底，全球累计建设的示范性EGS工程项目已逾60项，但多数项目的储层改造效果都不理想，储层改造方法和注采井沟通方案不成熟，面临诸如岩石强度大、起裂压力高、极可能诱发地震、难以形成缝网、裂缝延伸方向不可控及注采井沟通困难等问题。近年来，国内外都在尝试将页岩油气开采的成功经验，即水平钻井和多段压裂技术应用于干热岩开采，已取得了一定进展。近期美国Fervo能源公司的现场试验更是取得了阶段性的成功，为EGS的大规模商业应用带来了希望。

Fervo能源公司的EGS系统由注水井、生产井和监测井组成，注、采井均为水平井，监测井为直井，注、采井水平段的垂直深度约为2 347 m，水平段长度均约为991 m。3口井的钻井顺序依次为：监测井73-22井、注水井34A-22井和生产井34-22井。之所以在注水井完井后才开始钻生产井，是为了确保生产井的井眼轨迹能与注水井增产处理后的热储相交。两口水平井都采用了非常规油气开发常用的桥塞射孔水力压裂完井技术。水平井的段间距为100~300 ft，各段分别设有几个独立的射孔簇。注水井的水平井段共进行了16段压裂作业，每段长度约为150 ft。除第12段和第13段设计了9个射孔簇外，其他每段均为6个射孔簇。射孔簇为有限射孔设计，目标射孔摩擦压力约为1 500 psi。每段泵入约16 000 bbl压裂液和540 000 lbs支撑剂，注入速度为100 bpm；压裂液为含有低浓度减阻剂的滑溜水，携带由100目和40/70目硅砂混合而成的支撑剂；泵送浓度为0.25~1.50 ppg，每段压裂时间持续约3 h。压裂产生了100多个离散裂缝区，实现了两口水平井的水力连通，获得了从地层提取热能所需的传热表面积。

在37 d的长期生产性能测试中，在商业运营所需的操作条件下，将液体从注入井循环到生产井，实现了高达63 L/s的流量，相当于3.5 MW的峰值总电力输出。在错流生产测试中获得的流量和输出功率均超过了全球其他EGS项目。在稳态生产过程中沿水平段测得的流体流动数据表明，流动分布相对均匀，未见明显的局部流动通道。在整个错流测试过程中，产出液的温度不断升高，也表明压裂作业并未产生严重的热短路通道。在整个错流测试过程中，整个系统内的流体完全由地面注入泵驱动，证实该生产系统为密闭系统，无需通过人工举升来维持生产井的流量。根据安装的井内光纤传感器提供的数据可知，无论射孔簇所在井段的岩性如何，射孔簇100%都实现了裂缝起裂，且流体在所有压裂段均匀分布，表明此类控流完井工艺能有效降低地热钻完井的成本。

Fervo能源公司的试验表明，在高温、硬岩环境中通过水平井开发地热所面临的技术障碍并非高不可攀，双水平井EGS系统具备商业可行性，其经验或对我国目前正在进行的干热岩项目具有较大的借鉴意义。

（供稿 卢雪梅）

《石油与天然气地质》来稿须知

1 《石油与天然气地质》主要以记录石油地质领域的重大科研成果、反映石油地质学科最新科技动态、促进国内外学术交流、提高石油地质研究和实践水平为办刊宗旨，是一份面向国内外公开发行的综合性学术期刊，为大 16 开、双月刊，主要栏目有“专家论坛”“油气地质”“勘探开发”“技术方法”等。

2 来稿要求

1) 欢迎作者登陆《石油与天然气地质》门户网站 (<http://ogg.pepris.com>) 进行网上投稿。文稿一律以 word 统一进行排版，页面设为 A4 幅面。

2) 来稿力求主题突出、观点明确、短小精练、简明扼要，以 10 000 字为限（包括图表所占的位置）。文稿应包含题名（限 25 字以内）、作者姓名（以 8 个为限）、作者单位（含通信地址）、中文摘要（以 300 ~ 500 字为宜）、关键词（按《汉语主题词表》和《石油化工汉语叙词表》等专业词表标引 3 ~ 8 个）、中国图书资料分类法分类号、英文摘要（含题名、作者汉语拼音名、作者单位、摘要及关键词）、第一作者简介（包括姓名、出生年份、性别、职称或学历、所从事专业或研究方向）、正文及参考文献（中、英对照）。

来稿若属省部级以上的基金资助项目，请在首页底脚处注明，并注明项目编号。

3) 文中图、表随文出现，图以 6 幅为限、彩图，要有中、英文对照的图、表名称。图中若涉及到国界，请附相应正规出版的地理底图。各图形要求符合规范（图幅尺寸为：分栏图宽度不超过 8 cm，通栏图不超过 16 cm），需提供 cdr, eps 或 ai 等格式的可编辑的图件；照片要求反差好、层次分明、彩色。文中表格一律使用三线表。

4) 文稿正文（含图表）中的物理量和计量单位应符合国家标准或国际标准。对外文字母、单位、符号的大小写、正斜体、上下角标及易混淆的字母应书写清楚。文中首次使用的符号应标明其中文含义。

5) 文稿章节编号采用三级标题。一级标题形如 1, 2, 3, ……；二级标题形如 1.1, 1.2, 1.3, ……，2.1, 2.2, 2.3, ……；三级标题形如 1.1.1, 1.1.2, 1.1.3, ……，2.1.1, 2.1.2, 2.1.3, ……。引言或前言不排序。

6) 文中引用的参考文献应一一按序标注。未公开发表的资料可用脚注标注。参考文献序号应与其在文中出现的先后顺序一致。参考文献著录的内容应符合国家标准。

参考文献著录主要格式如下。

专 著：[序号] 著者.书名[M].版本（初版不写）.出版地：出版者，出版年：起止页码。

期 刊：[序号] 著者.篇名[J].刊名，出版年，卷次（期次）：起止页码。

论 文 集：[序号] 著者.篇名[C]//编者.论文集名.出版地：出版者，出版年：起止页码。

科技报告：[序号] 著者.题名[R].出版地：出版者，出版年：起止页码。

学位论文：[序号] 著者.题名[D].保存地点：保存单位，年份。

专利文献：[序号] 专利申请者.题名：国别，专利号[P].公告日期。

电子文献：[序号] 著者.题名[DB/OL].出版地：出版者，出版年[引用日期].获取或访问路径。

著者姓名采用姓在前、名在后的写法。姓名用汉字的著者，用全姓名，不缩写。姓名用西文的著者，姓全部大写，姓与名之间空一字符；名用缩写（首字母大写），不加缩写点。如著者不多于 3 人，则全部著录；如为 3 人以上者，只著录 3 人，后面中文加“等”、英文加“et al”。著者间加“，”，最后两者之间一律不加“和”、“and”等连词。起始页码与终止页码之间用半字线“-”连接。

3 编辑部对来稿文字、形式有修改权，若不同意，可事先声明。

4 来稿一经刊用，编辑部即自动默认论文作者自愿将其拥有的对该论文的汇编权（论文的部分或全部）、翻译权、印刷版和电子版的复制权、网络传播权和发行权转让给编辑部。编辑部将按规定付酬（稿酬含电子版与网络版），并赠送样刊 2 册。

通信地址：北京市昌平区百沙路 197 号院中国石化科学技术研究中心 7 号楼 201 室《石油与天然气地质》编辑部

邮政编码：102206

电 话：010-56607717 010-56608309

网 址：<http://ogg.pepris.com>

电子信箱：ogg.syky@sinopec.com

联 系 人：张亚雄 张玉银

《石油与天然气地质》编辑部