

# 水力压裂技术在豫西基岩地热井增产中的应用研究

申云飞<sup>1</sup>, 卢玮<sup>2</sup>, 陈莹<sup>1</sup>, 程存平<sup>3</sup>

(1. 河南省深部探矿工程技术研究中心, 河南 郑州 450053; 2. 河南省地矿局第二地质环境调查院, 河南 郑州 450053; 3. 河南省地热能开发利用有限公司, 河南 郑州 450053)

**摘要:** 地热资源是清洁能源, 其开发利用主要通过钻井工程来实现。地热资源量(水量)大小决定着开发利用的价值。实际中, 因地层等条件的复杂和不确定性, 导致地热井出水量和温度不能达到预期的目标。特别是在山区基岩缺水地区地热资源开发, 由于水量和温度指标偏低, 严重影响了清洁能源的开发利用。本文结合工程实例, 首次在豫西基岩严重缺水地区通过压裂车和钻井泵分段水力压裂技术, 使低产地热井出水量增加3倍, 达到了预期的目的。为今后基岩地区地热和地下水资源开发利用增产提供了借鉴。

**关键词:** 水力压裂; 基岩地区; 地热井; 出水量; 增产

**中图分类号:** P634; TE249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2016)10-0253-04

**Application Research on Hydraulic Fracturing Technology for Bedrock Geothermal Yield Increasing in Western Henan**/SHEN Yun-fei<sup>1</sup>, LU Wei<sup>2</sup>, CHEN Ying<sup>1</sup>, CHENG Cun-ping<sup>3</sup> (1. Henan Engineering Research Center of Deep Exploration, Zhengzhou Henan 450053, China; 2. No. 2 Institute of Geology and Environment Survey, Department of Geology and Mineral Resources of Henan Province, Zhengzhou Henan 450053, China; 3. Henan Geothermal Energy Development and Utilization Co., Ltd., Zhengzhou Henan 450053, China)

**Abstract:** Geothermal energy is a clean energy source; its development and utilization are mainly realized by drilling engineering, and the value of development and utilization are determined by the amount of geothermal resources (water yield). In practice, due to the complexity and uncertainty of the stratum, the water yield and water temperature can not reach the expectation, especially in water-shortage mountainous bedrock area, development and utilization of clean energy source are seriously affected by low water yield and temperature indexes. Staged hydraulic fracturing technology by using fracturing truck and drilling pump is applied in serious water shortage area of Western Henan for the first time, water output grows 3 times for low yield geothermal well and reached the expected target. It can provide reference for the future development and utilization of geothermal and groundwater resources in the bedrock area.

**Key words:** hydraulic fracturing; bedrock area; geothermal well; water yield; yield increasing

## 0 引言

地热是一种清洁能源, 具有清洁环保、分布广泛、可再生等特点, 可广泛应用于发电、供热供暖、温泉洗浴、医疗保健、种植养殖、旅游等领域<sup>[1]</sup>。长期以来, 地热资源的主要开发利用方式为钻井, 钻井结果直接决定了地热资源开发的成败。在地热钻井中, 尤其基岩地层下, 由于地层条件等的复杂和不确定性, 往往水温水量等不能达到预期目标, 给建设单位、施工单位都带来巨大损失, 对于不达标低产井如何处理成了亟待解决的问题。

水力压裂技术最早在1947年应用于美国, 之后在油气井单井增产、增注等工程中进行了广泛应用,

经过50多年的发展, 水力压裂技术从理论研究到现场实践都取得了惊人的发展<sup>[2]</sup>。我国从20世纪70年代大庆油田开始采用水力压裂技术, 至今已有30余年的历史, 是油气井开发、增产的一项重要技术措施。

将水力压裂技术引入地热增产中, 通过水力的高压作用, 打通地热井深部热力通道, 激发深层地下水补给, 可有效解决水量、水温低等问题。2016年7月, 我们首次在豫西基岩严重缺水山区地热钻井中, 采用水力压裂技术, 使地热井出水量增大为原来的3倍, 达到了预期的目的。

收稿日期: 2016-08-31

基金项目: 2015年度河南省国土资源科技项目“空气潜孔锤+井下电视技术在基岩构造水勘查中应用研究”(编号: 2015-27); 2016年度河南省国土资源科技项目“河南省干热岩钻探问题研究”(编号: 2016-地质矿产类-21)

作者简介: 申云飞, 男, 汉族, 1986年生, 工程师, 探矿工程专业, 从事深部钻探、地热资源勘查开发等技术工作, 河南省郑州市南阳路56号, 46345450@qq.com。

## 1 水力压裂技术基本原理

水力压裂技术是利用高压泵向井内泵入高压流体,以超过地层吸液能力的排量向地层内注入高压流体,其达到或超过地层应力和地层的抗张强度时,岩层起裂形成裂缝并向四周延伸<sup>[3]</sup>,使地层内的裂隙构造贯通,提高目的层的汇流与导流能力,达到增产的目的。水力压裂原理参见图1。

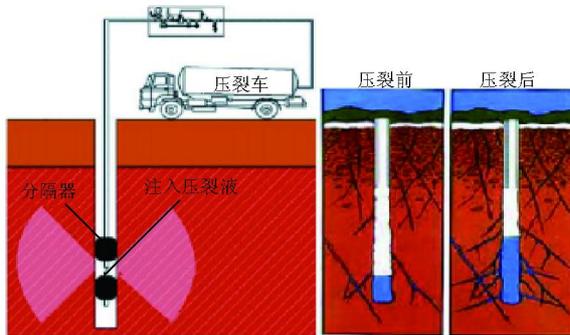


图1 水力压裂技术原理图

## 2 基岩地热储层特点及压裂思路

在基岩地层,地质构造控制着地下水的形成和展布及活动规律。主要表现在2个方面:一是控制着地下水的赋存空间;二是控制着地下水的补、径、排关系,从而控制和影响着地下水的循环和演化。

基岩地层钻探因找水需要,往往选择在受地质构造影响的区域进行,其地层一般经过多次复杂的构造运动,断层、节理和破碎带发育,多为不稳定地层,既有松散、破碎、裂隙、岩溶等力学不稳定地层,

也有页岩、泥岩等遇水不稳定地层,还有各种漏失地层和坚硬、弱研磨性地层<sup>[4-5]</sup>。

而此类地层中,或多或少存在着有利的天然裂缝系统<sup>[6]</sup>,对一些产量低的地热井,可以充分利用这些天然裂缝系统进行水力压裂,在高压流体作用下,这些裂缝会扩张延伸,热力通道相互贯通。

在压裂过程中,这些天然裂缝面本身较为粗糙不平,钻井时附着在孔壁的岩屑及天然裂隙中的破碎充填物等,会充填到新开裂延伸的裂缝中,形成自我支撑作用。尤其脆、塑性岩石压裂后形成的裂缝通常不会完全闭合,最后形成具有足够的导流能力的通道,达到增产的目的。

## 3 地热井水力压裂试验

### 3.1 地层及钻井情况

工作区位于河南省西部牛山北麓,该区属于火成岩严重缺水地区,地层岩性主要为中元古界长城系熊耳群灰绿色安山岩、杏仁状安山岩及少量玄武安山岩、英安岩。岩石可钻性达8~9级,属坚硬岩。

该地热井完钻深度1200m,全孔均为基岩地层,采用ZJ-2600型钻机、英格索兰RHP825E型空压机等设备,采用空气潜孔锤+气举反循环“二合一”工艺钻进<sup>[7-8]</sup>,钻孔结构及钻进方法详见图2。试抽水时出水量 $10\text{ m}^3/\text{h}$ ,温度 $44\text{ }^\circ\text{C}$ ,未达到预期的目标。

### 3.2 水力压裂方案

钻孔及套管结构	钻进方法	钻具组合	钻遇地层	机械钻速/( $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ )
	空气潜孔锤	$\phi 350\text{mm}$ 锤头+ $\phi 277\text{mm}$ 冲击器+ $\phi 325\text{mm}$ 取粉管+ $\phi 159\text{mm}$ 钻铤+ $\phi 89\text{mm}$ 钻杆+立轴	紫红色、灰黑色泥岩,灰色、灰绿色安山岩	1.42
	气举反循环	$\phi 346\text{mm}$ 牙轮钻头+ $\phi 159\text{mm}$ 钻铤+ $\phi 89\text{mm}$ 钻杆+ $\phi 127\text{mm}$ 双壁钻杆+双 壁立轴+气水混合器	绿色、青绿色安山岩,块状构造,矿物 主要成分为斜长石中间夹杂有角闪 石和黑云母等黑色 矿物,偶见石英颗粒 和浅黄色凝灰岩	0.59
	气举反循环	$\phi 216\text{mm}$ 牙轮钻头+ $\phi 159\text{mm}$ 钻铤+ $\phi 121\text{mm}$ 钻铤+ $\phi 89\text{mm}$ 钻杆+ $\phi 127\text{mm}$ 双壁钻杆+双壁立轴+气水混合器		0.74
	气举反循环	$\phi 152\text{mm}$ 牙轮钻头+ $\phi 121\text{mm}$ 钻铤+ $\phi 89\text{mm}$ 钻杆+ $\phi 127\text{mm}$ 双壁钻杆+ 双壁立轴+气水混合器	青灰色安山岩,灰色、灰绿色英安岩, 斑状结构,斑晶主 要为长石和石英, 多处可见石英呈团 块状出现	0.56

图2 钻孔结构及钻井方法示意图

试抽水后,进行了测井工作。经分析核算,0~300m井段裂隙破碎层厚度约124m,300~700m井段裂隙破碎层厚度约72m,700~1200m井段破

碎层厚度约为36m。因300m以浅段孔径为350mm,且当时未下入套管,封隔器无法安装。故设计压裂分3个步骤进行:

第一步采用压裂车对 330 ~ 680 m 段进行清水压裂,并抽水观测效果;

第二步采用压裂车对 680 ~ 1200 m 段进行清水压裂,并抽水观测效果;

第三步对 0 ~ 300 m 孔段下入套管,采用工地现有的钻井泵,并自制封隔设置,对上部地层进行清水压裂。

其中压裂段与设置封隔段根据钻探出水情况与物探测井资料确定。选择地层不完整或有出水的井段作为压裂井段;地层较完整、井壁光滑、井径变化较小的井段作为坐封段。

### 3.3 压裂车水力压裂

SZA5220TYL700 - 265 型压裂泵车,3ZB - 265 型柱塞泵,最大工作压力 70 MPa,最大排量 1014 L/min(如图 3 所示)。



图 3 SZA5220TYL700 - 265 型压裂车

采用 K344(D)型水力扩张式封隔器,悬挂式固定,液压坐封与解封,靠胶筒向外扩张来封隔环形空间(如图 4 所示)。



图 4 K344(D)型水力扩张式封隔器

地表设备安装时,将压裂泵与远程控制箱连接,管路-管汇-管路与高压水龙头连接。各阀门、接头的连接要可靠,压裂前进行循环试压,确保系统安全、无泄漏。压裂管路连接井内压裂器具安装时,按下入深度测量管柱并排序,依次下入。压裂器具下井前要检查钻杆、各种压裂器具是否正常,丝扣是否完好,封隔器的胶筒表面有无破损,下入的管柱丝扣要采取密封措施<sup>[9-12]</sup>。

#### (1)第一次压裂(330 ~ 680 m 段)

压裂器具组合从下到上依次为:导向丝堵→Ø89 mm 钻杆→K344(D)型下封隔器→Ø89 mm 钻杆→定压开启阀→卸荷阀→Ø89 mm 钻杆→K344(D)型上封隔器→Ø89 mm 钻杆→地面泄压三通→压裂车。

压裂起始泵量 15.2 m<sup>3</sup>/h,压力为 4.8 MPa,之后逐渐加大泵量与压力,加至 65.79 m<sup>3</sup>/h, 10.5 MPa。稳定 20 min 后,地层出现开裂,流量不变情况下压力降至 9.0 MPa; 60 min 后,压力回升至 10.5 MPa,此时流量为 65.7 m<sup>3</sup>/h。

通过图 5 可看出,在流量基本保持不变的情况下,压力在达到 10.5 MPa 并稳定一段时间后,有个突然降低至 9.0 MPa 过程。可见达到了地层起裂压力。

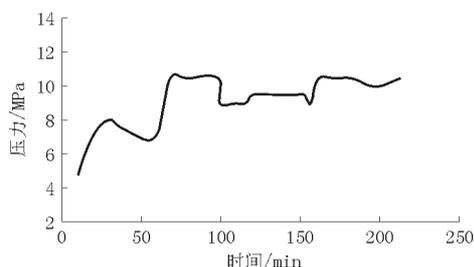


图 5 第一次压裂压力变化图

#### (2)第二次压裂(650 ~ 1200 m 段)

因 680 m 以下钻孔口径为 152 mm,现场封隔器外径 180 mm 无法下入,现场研究分析后决定采用去掉下封隔器,将上封隔器设置在 Ø216 mm 孔段的方法进行压裂。

压裂器具组合从下至上依次为:底堵→Ø89 mm 钻杆→定压开启阀→卸荷阀→上封隔器→Ø89 mm 钻杆→地面泄压三通→压裂车。

根据图 6 显示,压力前期基本保持 9.5 MPa,后增大流量加压至 10.5 MPa,整个过程压力无明显下降,结合测井资料,此段井壁地层较为完整,裂隙破碎带不多,故分析此井段未能压裂地层,效果不太理想。

### 3.4 钻井泵压裂

压裂车完成压裂作业后,立刻组织下管以进行第三次压裂工作。下入 Ø245 mm 石油套管,井壁管滤水管间隔设置。压裂设备采用现场的 3NB - 500 型钻井泵(如图 7 所示)。

下坐封设置:在下入套管之前,制作外径为 210 mm 的锥形木塞,依靠钻杆压入下部 Ø216 mm 地层

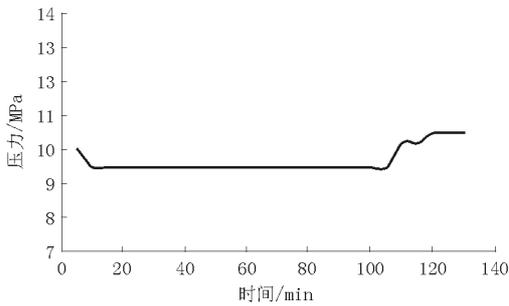


图6 第二次压裂压力变化图



图7 3NB-500型钻井泵水力压裂

完整井壁段,再注入水泥5~10 m进行密封。

上坐封设置:在 $\varnothing 245$  mm套管距地面30 m处,焊接钢箍,并缠绕橡胶等,缠绕外径以稍小于孔径且不影响下套管为准。下完套管后,从井口捣入布条等,再灌入水泥至井口。

压裂过程:由于0~300 m段破碎带较多,且与周围裂隙层联通性能较好。钻井泵泵入水量达 $80 \text{ m}^3/\text{h}$ ,压力仅上升为2 MPa,泵入的清水基本顺裂隙带流走。30 min后,压力下降为1 MPa,地层中裂隙、通道被压开,达到了开裂压力,此后压力稳定在1 MPa左右,整个压裂过程持续约8 h(参见图8)。压裂达到了预期目标。压裂完成后经过抽水测量,出水量 $31 \text{ m}^3/\text{h}$ ,温度 $44 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

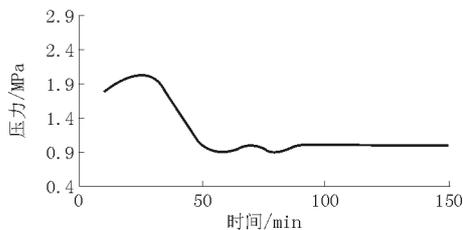


图8 第三次压裂压力变化图

#### 4 结论

通过水力压裂试验和应用可以得出以下结论。

(1)在豫西火成岩严重缺水地区通过水力压裂试验,使地热井出水量增产达原来的3倍。经水质化验,4项指标达到天然饮用矿泉水标准;3项指标具有医疗价值,其中2项可达到命名热矿水标准;其它污染物或有害指标均低于国家标准。

(2)通过试验表明,在基岩裂隙不发育地层,通过水力压裂技术可以使地层裂隙扩张和疏通,具有一定的技术可行性。可以做为一项处理低产资源量的方法措施。

(3)清水压裂具有成本低、无污染、易操作等优点,且有利于水井/地热井压裂技术的推广与应用。

#### 参考文献:

- [1] 卢予北,陈莹.河南省地热资源开发利用现状与问题研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(10):35-39.
- [2] 姜瑞忠,蒋廷学,汪永利.水力压裂技术的近期及展望[J].石油钻采工艺,2004,26(4):52-56.
- [3] 李炳平,何计彬,康志鸿.基岩水井压裂增水机理分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,43(1):61-65.
- [4] 吴书亮.谈深部探矿钻探特点及技术[J].山西建筑,2015,41(1):88-89.
- [5] 卢予北,李艺,陈莹,等.国家地下水监测井建设关键问题研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(6):1-6.
- [6] 卢予北,陈莹,申云飞.河南中牟页岩气区块地层特征及钻探问题研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(7):62-67.
- [7] 卢予北,邢向渠,等.多工艺钻井技术在地热资源勘查中应用研究[R].河南郑州:河南省地矿局第二地质环境调查院,2014.
- [8] 卢予北,王建华,陈莹,等.空气潜孔锤在松散地层中的钻进试验[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(7):9-11,27.
- [9] 李小杰,叶成明,李炳平,等.基岩水井水力分段压裂增水技术研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(S1):56-61.
- [10] 李小杰,叶成明,李炳平,等.水力压裂增水技术在青海卤盐矿开采中的试验[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(11):12-14.
- [11] 王素兵.清水压裂工艺技术综述[J].天然气勘探与开发,2005,28(4):38-42.
- [12] 陈远林,郭建春,等.清水压裂技术增注机理及现场应用[J].断块油气田,2008,(2):116-117.

致谢:本次压裂试验和应用中得到了河南省深部探矿工程技术研究中心主任卢予北、中国地质调查局水文地质环境地质调查中心叶成明和李炳平3位教授级高级工程师的大力支持和指导,在此表示感谢!