

山东温石塘地热田回灌补源压裂增注试验

李炳平¹, 叶成明¹, 何计彬¹, 解伟¹, 范孔岳²

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北保定 071051; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 地热田回灌补源是实现地热能资源可持续开发的新技术, 用于解决地热能补给, 提高地热能利用率。其方法是在距开采井一定距离, 施工一眼注水井, 通过注水井向地下注入一定比例的水量与热源再交换, 提高热能资源量。介绍了对注水井实施压裂、增加对地热井注水量的新工艺。经水力压裂和抽水试验, 增注水效果明显, 为我国合理开采利用和保护地热能资源提供了一种新的技术方法。

关键词: 地热田; 压裂; 回灌补源; 注水井; 抽水试验

中图分类号: P634; TE249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2014)12-0006-05

Fracturing Test of Groundwater Recharge in Wenshitang Geothermal Field of Shandong/Li Bing-ping¹, YE Cheng-ming¹, HE Ji-bin², XIE Wei¹, FAN Kong-yue² (1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, CGS, Baoding Hebei 071051, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The groundwater recharge for geothermal field is a new technology to realize the geothermal energy resources sustainable development, solve the geothermal energy supply and improve the utilization efficiency of geothermal energy. The technical method is implemented by a water injection well constructed at a certain distance from the exploiting well, by exchange of certain proportion water injected to underground through injection well and the heat source to improve the heat resource. This paper introduces a new technology to increase the geothermal well injection by fracturing the water into injection well. By hydraulic fracturing and pumping tests, obvious effect of water injection increase is obtained, which provides a new technical method for reasonable exploitation and protection of geothermal energy resources for China.

Key words: geothermal field; fracturing; recharge source; injection well; pumping test

1 概述

传统化石能源的大量利用对全球生态环境造成的压力越来越大, 应对气候、环境变化和能源安全已成为全球共同关注的焦点。地热能作为一种清洁、可再生能源已被广泛利用, 我国地热能资源已用于国防建设和工农业生产等诸多领域。地热能资源开发主要是通过深井开采地热流体(水)来实现。由于超采导致地热田水位快速下降和水量逐年递减情况普遍存在, 如果不能实施有效管理与控制, 或将对我国的地热水型资源造成严重破坏。为此, 在获取地下热能的同时, 利用回灌技术, 保持地热资源的供需平衡、避免地下能源枯竭、保护环境安全具有重要意义。

地热田回灌补源是实现地热资源可持续开发的新技术, 用于解决地热能补给, 提高地层热能利用率。其方法是在抽取地下热水的同时, 在距开采井一定距离, 施工一眼注水井, 通过注水井向地下注入一定比例的水量与地层热源再交换, 使地下水水位保持相对稳定, 提高资源量。但是, 最佳的回灌效果

和回灌量取决于注水井的位置和岩层构造与开采井的水力联系条件。特别是在注水井施工时, 存在以下不利因素: (1) 井(孔)未钻到或偏离了主蓄水构造; (2) 井(孔)岩层的裂隙通道因存在充填或矿物胶结导致其与蓄水构造连通性差; (3) 钻井过程中的泥浆固相、岩屑等淤塞了岩层裂隙通道。上述因素会导致岩层裂隙透水能力降低, 影响回灌效果。为此, 我们在山东省蓬莱市温石塘地热田开展了水力压裂增产增注试验, 获得了良好的效果。

2 压裂增注工艺

2.1 压裂机理

地热田压裂增注, 是在井孔内下入压裂器具, 利用高压泵以超过地层吸液能力的排量向地层内注入高压流体, 压裂地层并形成裂缝, 实现注水井与开采井连通; 对已有的含水层裂隙, 因裂隙内含有充填物或已形成胶结, 渗透率低, 经高压流体强力剪切、冲刷和运移后, 使得裂隙扩展并疏通, 将原有裂隙的水流由径向流变为线性流; 同时高压流体可有效清除

收稿日期: 2014-06-11

作者简介: 李炳平(1958-), 男(汉族), 河北保定人, 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心教授级高级工程师, 探矿工程专业, 从事水文地质钻探及成完井工艺研究工作, 河北省保定市七一中路 1305 号, libingping19580310@163.com。

淤塞于裂隙中的泥浆固相、岩屑,使含水层的渗流条件得以改善,提高水井产量。

2.2 压裂工艺

压裂工艺采用清水作压裂液,在注水井的非压裂段,用上下封隔器将压裂段隔离、开启阀定压打

开、单管路顶液将地层压裂的工艺方法。

(1)地表设备与流程布局:依次为远程控制—压裂泵—高压管路—管汇—高压管路—专用水龙头—钻杆(见图1)。

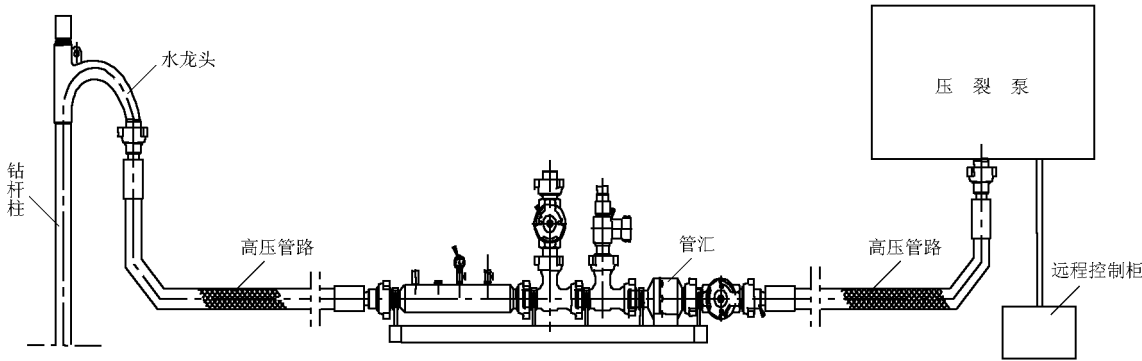


图1 地表压裂设备与系统布局示意

(2)井内压裂器具组合:依次由井内钻杆—卸荷阀—上封隔器—定压开启阀—下封隔器—钻杆—底堵组成(见图2)。

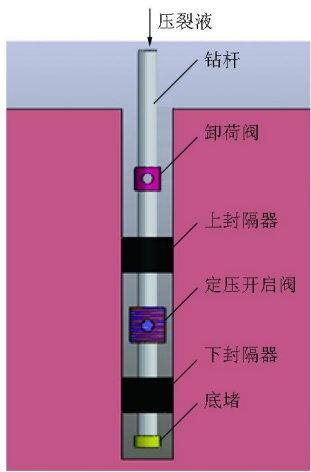


图2 双坐封定压阀开启压裂工艺示意

(3)压裂工艺:根据钻取的岩心完整性确定压裂段和坐封段,在被压裂段上顶板和下底板中,选择1~3 m井壁岩层较完整的井段作封隔段。压裂作业时,压裂液由钻杆内腔进入上、下封隔器,使其贴紧井壁实现密封,随着系统压力的升高并达到某一压力值时,开启阀打开,压裂液进入上、下封隔器之间与井壁的环腔内,当流体压力足以克服地层应力及岩石的抗张强度时,岩石起裂形成初始裂缝,随着流体的不断压入,裂缝沿地层延伸至开采井,使注水井与开采井经压裂裂缝连通,达到地热井增产增产的目的。当第一压裂段次完成后,提出井内压裂钻柱,重新组装压裂器具,根据需要依次实施第二或第

三段次压裂作业。

(4)设备与器具性能参数:压裂采用的高压泵、管汇、高压水龙头和井内压裂器具的基本性能参数见表1。

表1 压裂设备与器具性能参数			
压裂设备与器具	基本性能参数	技术指标	备注
压裂泵	最大工作压力 38 MPa	额定排量 250 mL/min	橇式组装
封隔器	最大承压 40 MPa	膨胀比 1.1~1.2	耐温 120℃
定压开启阀	最大承压 40 MPa	开启压力 1.5 MPa	
投球卸荷阀	最大承压 60 MPa	卸荷压力 2 MPa	
高压胶管	最大耐压 60 MPa	2 in	
专用水龙头	最大承压 40 MPa		
高压管汇	最大工作压力 60 MPa	安全阀压力 40 MPa	兼卸荷、压力监测
远程控制箱	控制距离 > 50 m	监测流量、压力	与压裂泵配套使用

3 压裂施工

3.1 钻井施工

开采井与灌注井均采用 SPC-300 型钻机、Ø89 mm 钻杆钻进,上部第四系地层以 Ø425 mm 孔径开孔,钻穿覆盖层和花岗岩强风化层带,下入 Ø325 mm 钢制井壁管 22.50 m,水泥固井。再以 Ø273 mm 钢粒钻具全孔取心钻进至终孔。为了抽灌配合,在工作区内共施工地热压裂回灌井和开采井各 1 眼,观测井 2 眼。其中,开采井成井深度 157 m,回灌井成井深度 115.80 m,观测井成井深度 50 m。

3.2 压裂施工

压裂施工前将压裂设备、管路和孔内器具配置组装,试机检查压裂设备与器具、管路是否正常,确

定压裂段与坐封段位置,水源准备等。

(1)压裂与坐封段确定方法:根据钻探获取的岩心结合地质情况,确定在 60 m 以下作为本次试验的压裂井段。选择岩心较完整、外表光滑的井段作

为压裂坐封段,岩心不完整或较破碎井(孔)段作为压裂段。确定第一段次压裂井段为 68.76 ~ 88.83 m;第二段次压裂井段为 88.10 ~ 108.18 m(参见图 3)。

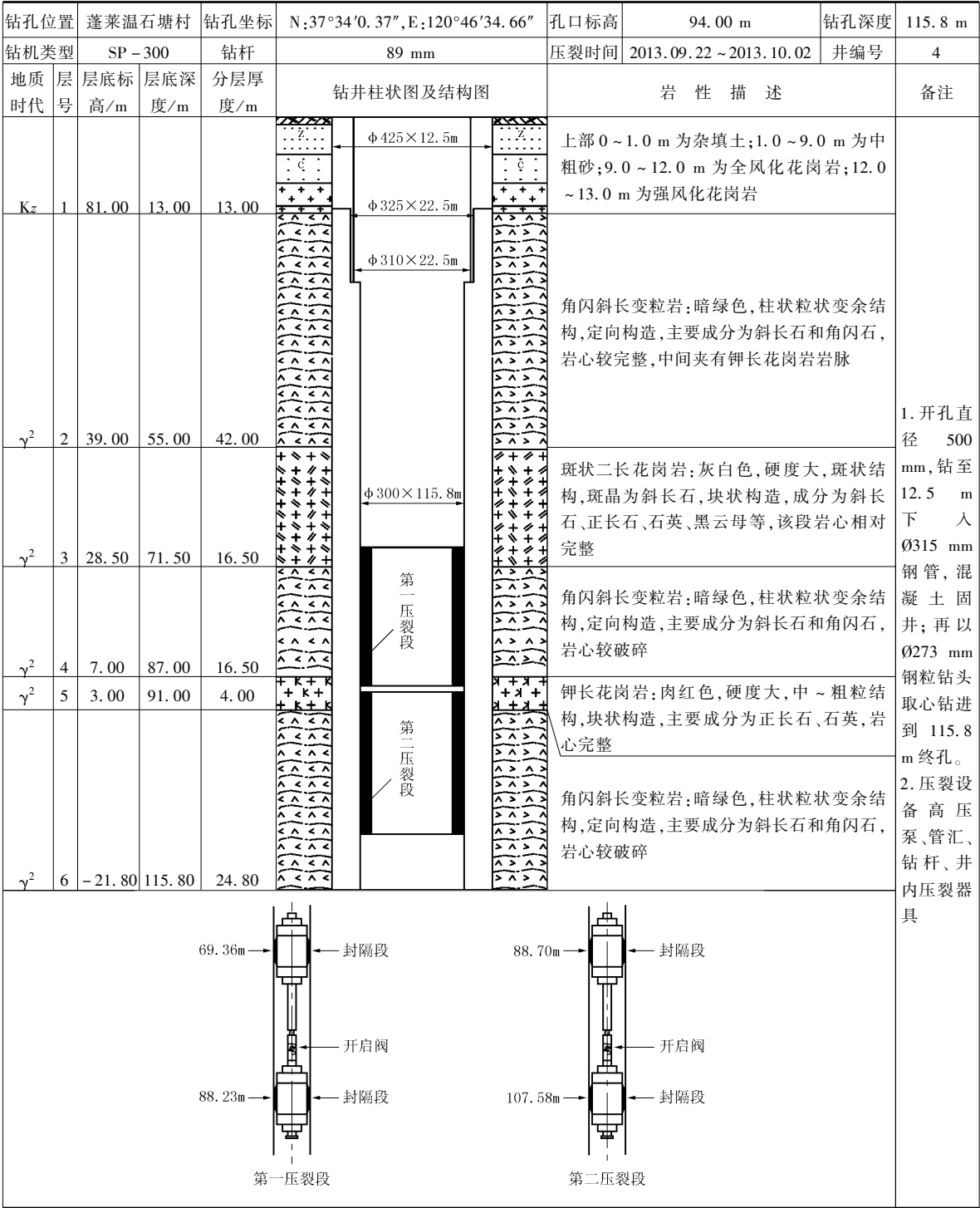


图 3 地热井压裂钻孔柱状图

(2)地表设备与井内压裂器具安装:将远程控制箱与压裂泵连接后再与管路—管汇—管路和高压水龙头连接(图 4)。按设计深度测量各压裂管柱并

排序,依次下入底堵钻杆—下封隔器—钻杆—一定压开启阀—钻杆—上封隔器—钻杆。下入钻柱时要检查钻杆、各压裂器具的丝扣是否完好,封隔器的胶筒

表面有无破损,各管柱丝扣要采取密封措施,见现场压裂器具图 5。

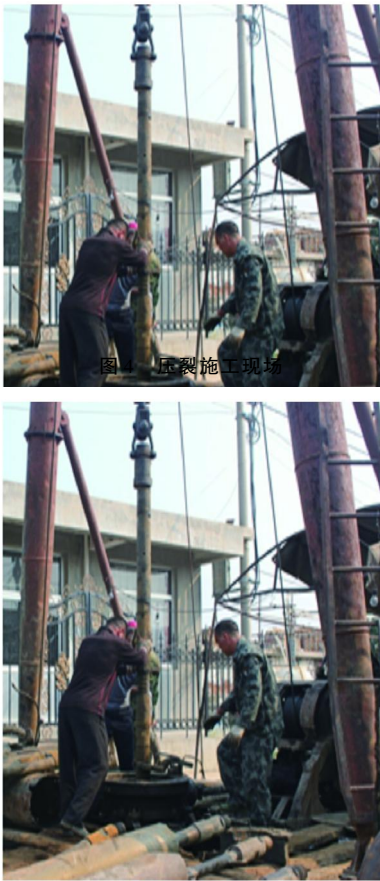


图 5 现场井内压裂器具

(3)压裂施工:当地表系统与井内钻柱全部安装完毕后,开泵供水试压,检验地表设备与管路是否正常,压裂器具的工作性能和泵的上水情况是否良好,管汇是否畅通。所有工作就绪后,开泵供水,观察系统压力的变化及地层起裂压力和裂缝延伸的压力值,并作相应记录。按设计要求将一定量的清水压入井内,在压裂过程中,当系统压力会由高逐渐降低,当压力无变化时,停止供水,等待 8~10 min,再供水压裂,依次进行多个时间段压裂,当泵压力基本稳定在一定值时,结束压裂,提出钻柱,重新组装压裂器具,进行下一个段次压裂。

该井共进行了 2 个压裂段次,3 次压裂。第一压裂段次完成后,由于该井初始井深为 100 m,在 90 m 以下没有较完整压裂坐封段,继续取心钻进至 115.80 m,确定第二压裂段为 88.10~108.18 m。在第二段次压裂前,经抽水试验,水井出水量由第一次压裂后的 11.21 m³/h 降至 7.9 m³/h,证明钻进过程中岩粉严重淤塞了压裂裂隙通道,随后又安排在第一压裂段实施了第二次压裂。整个压裂作业共压

入清水 89 m³,其中第一压裂段两次分别压入清水 17 m³ 和 38 m³;第二次压裂压入清水 34 m³。

将压裂过程中的泵量、压力作纵坐标,时间作横坐标,每个压裂段次的泵排量、压力随时间的变化关系见曲线图 6、图 7。由曲线图得知,压裂初始的泵压力最高,然后逐渐降低至稳定,当地层被压裂疏通后,即使增大泵排量,压力也不会增大,达到了好的注水效果。

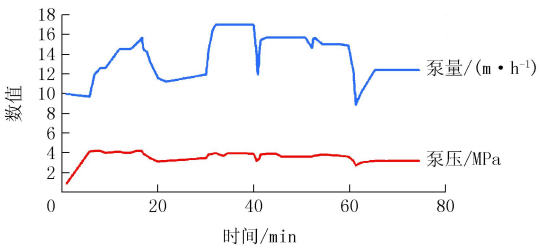


图 6 泵量、压力与时间的关系曲线(68.76~88.83 m 压裂井段)

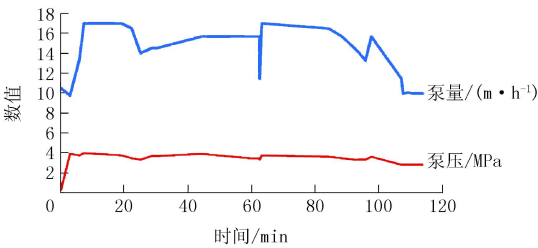


图 7 泵量、压力与时间的关系曲线(88.10~108.18 m 压裂井段)

4 抽水试验

4.1 抽水试验机具与方法

为评价压裂效果,按有关规程规范,在压裂前后采用 200QJ-108 型潜水电泵作抽水机具,降深为 50 m 的 136 型液位变送器测定井内动水位,三角堰箱测流量,为获取不同降深的流量,用三通管路将抽出的部分水流回灌到井内,抽水试验结果见压裂前后水位降深与流量的关系曲线图(图 8、图 9)。

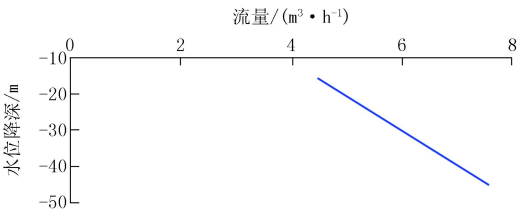


图 8 压裂前水位降深与流量的关系曲线

4.2 压裂试验结果分析

山东蓬莱温石塘地热田压裂回灌试验,压裂段岩性为角闪斜长变质花岗岩,柱状、粒状结构,定向构造,主要成分为斜长角闪石,地层破碎,岩心不完整且取心率低,该井钻在主断层下盘,没有与主断层

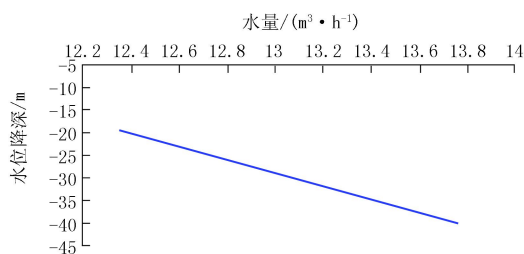


图9 压裂后水位降深与流量的关系曲线

连通,存在弱透水性次生构造,压裂前水井出水量仅有 $7.561 \text{ m}^3/\text{h}$ 。经两个段次的压裂后,水井出水量增至 $13.751 \text{ m}^3/\text{h}$,增水 81.9%,取得了良好的压裂增水效果,达到了项目试验的目的。

(1)在第一压裂段的压裂过程中,初始泵排量为 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,最大起裂压力为 4.2 MPa,随着清水的不断压入系统压力逐渐减低(图6),当泵排量提高到 $17 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,系统压力仅为 4 MPa;泵排量恢复到 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,泵压力降到了 2.7 MPa。停泵再开泵供水,系统压力只随泵量的大小变化,而与地层的裂隙性质无关,证明原地层的裂隙被压裂疏通。第二段次压裂维持泵量恒定时,泵压力的变化过程为起裂压力值最高(4 MPa),然后压裂时间延长,泵压力逐渐降至 2.8 MPa(图7),证明在相同压力下,注水量增大。

(2)在第二段次压裂前又进行了取心钻进,钻进工作结束后,经抽水试验,水井出水量由第一次压裂后的 $11.21 \text{ m}^3/\text{h}$ 降至 $7.9 \text{ m}^3/\text{h}$,证明在钻进过程中岩粉对地层裂隙通道存在严重堵塞作用。后经再次压裂,堵塞的裂隙被高压流体冲蚀、运移后又得以疏通,水井出水量增大,表明水力压裂兼具有洗井的作用。

5 结语

(1)本项目首次将水力压裂技术引入到了地热井增产领域,应用该技术,可有效提高地热井的回灌量,为我国今后合理开发地热资源及可持续发展提供了一种新的技术方法。

(2)采用双坐封、开启阀定压开启、单管路顶液的压裂工艺满足地热井的压裂增产技术要求。应用该压裂工艺,可以实现局部井段或多井段裸孔水力压裂。该压裂工艺方法具有压裂设备小、系统流程简单、施工成本低、操作方便、安全可靠等特点。

(3)通过压裂增产增注试验,单井出水量由压裂前的 $7.561 \text{ m}^3/\text{h}$ 增至 $13.751 \text{ m}^3/\text{h}$,增加 81.9%,取得了良好压裂增产增水效果,达到了项目试验的目的。

(4)本次压裂试验,由于回灌井钻在了主断层的下盘中,在 70 m 以下偏离了主断层,影响了压裂效果。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李炳平,叶成明,解伟,等. 基岩水井水力压裂技术研究报告[R]. 2013.
- [3] 李炳平,李小杰,叶成明,等. 止水栓塞封隔-阀式压水器组合检测技术的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(3):69-71.
- [4] 王鸿勋. 水力压裂原理[M]. 北京:石油工业出版社,1987.
- [5] J. L. Gidley. 水力压裂技术新发展[M]. 北京:石油工业出版社,1995.

湖北省页岩气勘查取得新进展

国土资源部网站消息(2014-12-15) 记者从日前召开的湖北省页岩气勘查开发工作第三次推进会上了解到,该省境内页岩气勘查已取得新进展。

早在 2011 年,中石化江汉油田分公司就在恩施建南地区施工建成了 111 井、建页 HF-1 井,并见到了工业气流。近两年来,湖北省国土资源厅和中国地调局武汉中心相继在鄂西地区部署了 6 个页岩气资源调查评价项目;国土资源部于 2012 年在恩施地区投放了两个页岩气勘探区块,华电集团成功中标并已全面展开勘查工作,在宣恩实施的一个探井见到了良好的页岩气显示;中石化江汉油田分公司于去年申请在湘鄂西 I、II 两个常规油气区块中增列矿种,开展页岩

气勘查,在与壳牌公司合作的区域内完成了 2 口探井;中石油浙江油田公司在荆门常规油气区块中实施页岩气探井,也有良好的页岩气显示。

根据会议规划,到 2016 年,该省将基本完成页岩气资源潜力调查与评价,加快恩施、宜昌地区勘探开发步伐,初步实现规模化生产;到 2020 年,将鄂西建成与渝东同步发展的页岩气勘探开发区,在江汉盆地周边地区取得页岩气勘探开发重大突破。

据预测,湖北省页岩气资源储量为 9.48 万亿立方米,可采资源储量为 1.5 万亿立方米,居全国第五位。