



·高电压及脉冲功率技术·

非常规储层电脉冲共振增产技术研究与应用*

康忠健¹, 王聪¹, 聂云良¹, 邵在康¹, 龚大建²

(1. 中国石油大学(华东)电气工程系, 山东 青岛 266580; 2. 铜仁中能天然气有限公司, 贵州 铜仁 554300)

摘要: 为了提高非常规油气的产量, 解决非常规油气储层改善的难题, 对储层的电脉冲共振技术进行研究, 利用电脉冲激励源作为敲击锤实现对储层固有频率的检测, 通过对电压电流环的控制实现放电频率的快速准确调节。研发了可用于现场施工作业的非常规储层共振增产装置样机, 形成了初步的施工作业流程, 完成了山西五口煤层气井的现场实验。实验结果表明电脉冲冲击波的有效作用范围可达400~500 m, 对储层裂缝改善效果明显, 应用前景十分广阔。

关键词: 非常规储层; 电脉冲; 共振; 固有频率; 工程实践; 裂缝发育

中图分类号: TE934

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210113

Research and application of electric pulse resonance stimulation technology for unconventional reservoir

Kang Zhongjian¹, Wang Cong¹, Nie Yunliang¹, Shao Zaikang¹, Gong Dajian²

(1. Department of Electrical Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Guizhou Tongrenzhongneng Co Ltd, Tongren 554300, China)

Abstract: To increase the production of unconventional oil and gas fields, the electric pulse resonance technology of reservoir was studied. The natural frequency of the reservoir was detected by electric pulse, and the discharge frequency was adjusted quickly and accurately by voltage and current loop. A prototype of the resonance stimulation device was developed for field operation, a preliminary construction process was formed, and field experiments were carried out. The results show that the impact range of the shock wave can reach 400–500 m, and the improvement effect of the reservoir fracture is obvious. The application prospect of the device is very broad.

Key words: unconventional reservoir; electrical impulse; resonance; natural frequency; engineering practice; fracture development

我国非常规油气资源潜力巨大, 近年来探明储量和产量快速增长, 在我国油气工业中的地位日益重要。非常规油气一般是指在现有经济技术条件下, 不能用传统技术开发的油气资源, 一般包括致密和超致密砂岩油气、页岩油气、超重(稠)油、煤层气、水溶气、天然气水合物等。非常规油气储层基本无自然产能, 必须通过储层改造才能获得工业开发。目前, 最成熟的非常规储层改造技术是水力压裂。但水力压裂技术不仅受到水源的制约, 还会造成环境污染, 而且随着储层埋深的增加, 深层条件下的压裂效果也会受到严重影响^[1]。国内外对于非常规油气的增产研究很多, 主要通过对储层的改善来提高采收率。近年来, 俄罗斯 NOVAS 公司研究成功了一种等离子脉冲谐振技术, 采用电爆炸方法, 获得强大的单次冲击能量以改善储层实现增产^[2]。该技术单次放电功率较大, 对储层产生很强的冲击波, 但不能连续放电。Rezaei 等人采用脉冲功率等离子体研究了三轴围压条件下脉冲功率等离子体放电对井筒周围渗透率变化的影响^[3-4]。邱爱慈团队采用水中金属丝电爆炸方法, 研究成功了煤层的电脉冲冲击波增透技术^[5]。金属丝在水中可获得沉积能量, 向外传播的冲击波很强, 单次放电功率较大, 对储层产生很强的冲击波, 但脉冲放电频率较低。

为了对非常规油气储层进行改善, 提高非常规油气的开采量, 本文对非常规储层的固有频率检测技术与可控

* 收稿日期: 2021-03-25; 修订日期: 2021-05-17

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05034004)

作者简介: 康忠健(1971—), 男, 博士, 教授, 从事脉冲功率与油气增产研究。

通信作者: 王聪(1998—), 男, 硕士研究生, 从事脉冲功率与电磁干扰研究。

高频电脉冲技术进行研究,研发了电脉冲共振增产装置,并对山西五口煤层气井进行了增产作业实验,取得了良好的效果。本文的研究为非常规油气的开采提供了一种新的方法。

1 电脉冲共振增产原理

1.1 固有频率

固有频率也称为自然频率,仅与系统的固有特性有关。当一个物体或系统受到某一频率的激励时,其振动幅度会达到最大值,这个激励频率就是它的固有频率^[6]。

影响非常规储层固有频率的因素有很多,除了通常的质量、密度、泊松比、杨氏模量等力学参数外,还有内部孔隙以及孔隙内流体^[7]。岩石形状和质量也会影响岩石的固有频率,在不同的温度、压力的影响下,岩石的固有频率也不相同^[8]。其中泊松比与固有频率正相关,而岩石的弹性模量越大,固有频率就越大;密度、弹性模量和泊松比等力学参数共同决定了岩石的固有频率。密度越大,固有频率越大;岩石中裂缝的长度和宽度越大,岩石的强度越低,固有频率也就随之减小。岩石的刚度和质量也影响岩石固有频率。刚度越大,固有频率越大;质量越大,固有频率越小^[9]。

假设岩块是理想化模型,只考虑裂缝尺寸忽略其他因素影响时,均匀介质固有频率模型公式为

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{aA}{LM}} C^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: a 是裂缝单位面积的表面能,单位为 J/m^2 ; A 为岩块横截面积,单位为 m^2 ; L 为岩块长度,单位为 m ; M 为物体的质量,单位为 kg ; C 是裂缝的尺寸参数,单位为 m 。式(1)即为裂缝性岩石固有频率的理论计算公式^[10]。当以此共振频率对储层进行冲击时,可最大程度使裂缝发育扩展,起到较好的效果。

1.2 频谱共振

页岩、煤、致密砂岩等非常规储层具有储层致密、孔渗性差、普遍发育天然裂缝等特点。要想具备工业产能,必须依赖储层压裂形成人工裂缝,达到改善储层,提高渗透率的目的。对此可以利用非常规储层的固有频率,当外加激励频率等于非常规储层的固有频率时,非常规储层与外加激励处于共振状态,此时振动的振幅达到最大,其强度急剧下降,最易产生裂隙。

频谱共振就是将脉冲功率技术^[11]与固有频率检测相结合,在得到储层固有频率后,利用井下仪器在储层位置施行强功率放电,将高功率电能转换为机械能作用于储层,以达到储层改造的目的。工作时放电电压高达几十kV,在此高压作用下,电极间油水介质被瞬间击穿进入等离子体状态^[12-14],能量迅速释放形成爆炸,产生应力波,该应力波的峰值压力高达几十MPa。由于地层介质应力特性的各向异性,在此强大的冲击应力波作用下,各层面间将产生强大的切向剪切力,发生错动生成新的渗液孔道,原有孔道也将在冲击应力波的作用下延伸。由于冲击应力波在岩石介质中的波速差产生的剪切力以及不规则的边界引发的旋流应力场将有效的剥离、清除原渗流孔道中的堵塞物,起到疏通渗流通道的作用。

1.3 实验验证

在实验室中利用电磁共振台、控制器和计算机等设备对岩心分别进行固有频率共振和200 Hz频率盲振实验^[15],对振动前后的岩心进行CT扫描,扫描结果图及得到的孔隙度的变化曲线如图1和图2所示。从图1可以看出,共振后岩心的孔隙度较共振前有了明显的增加,孔隙度增长达50%。从图2可以看出,盲振后岩心的孔隙度基本保

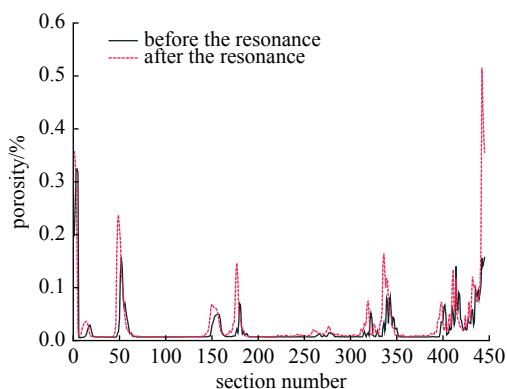


Fig. 1 Changes in porosity before and after resonance

图1 共振前后孔隙度变化图

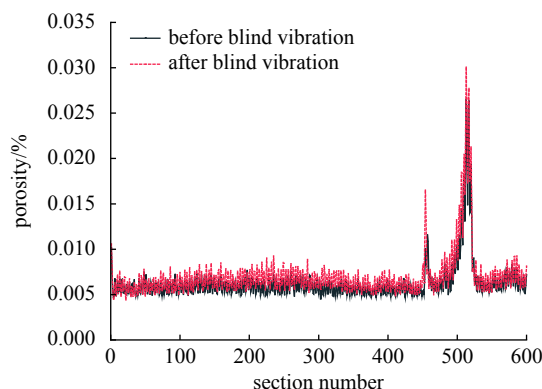


Fig. 2 Changes in porosity before and after blind vibration

图2 盲振前后孔隙度变化图

持不变, 增长效果不明显。从结果可以看出对岩心进行共振可以有效提高其孔隙度。

2 电脉冲共振增产技术与作业装置

电脉冲共振技术以脉冲功率技术与放电等离子体为基础, 以非常规储层固有频率检测为前提, 利用液电效应将电能转换为冲击波机械能, 在控制系统调控下产生与目标储层固有频率同频的冲击波, 持续作用于目标储层, 引发储层共振。电脉冲共振增产技术原理如图 3 所示。

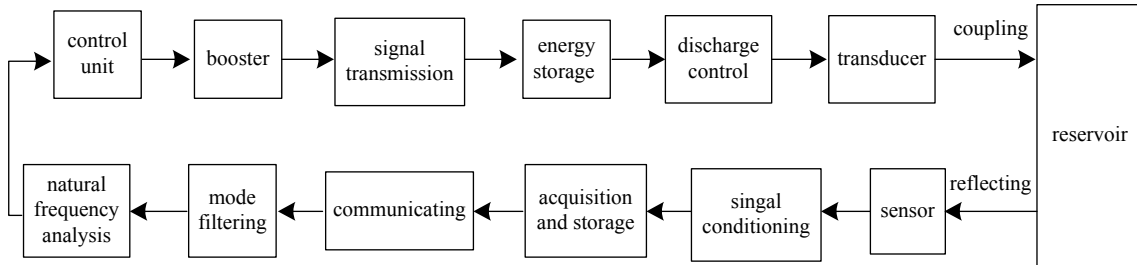


Fig. 3 Schematic diagram of the pulsed resonance technique

图 3 电脉冲共振增产技术原理图

2.1 储层固有频率检测技术

固有频率的常用检测方式有两种: 随机加振法(扫频法)和脉冲加振法(锤击法)。随机加振法通过激振扫频形式, 让岩样产生共振, 并通过拾取共振信号, 得出岩样的固有频率。脉冲加振法利用冲击力作为锤子对岩样进行激振, 通过对给予岩样的力信号和输出的响应信号进行传函分析, 可以得到岩样固有频率。随机加振法测试速度快、准确可靠、操作简便、对小体积岩样固有频率测量方便。在实验室中采用随机加振法, 利用岩石振动测试分析系统对标准岩心柱、全直径岩心、中样页岩和大样页岩进行了固有频率检测, 验证了岩石固有频率与激励源加速度和增益的关系。考虑到井筒尺寸及现场作业条件等因素, 实验室方法无法对井下储层固有频率进行检测。在井下采用可控脉冲功率源作为脉冲锤子敲打目标储层, 利用高精度三分量振动传感器对振动信号进行采集, 在经滤波处理及 HHT 分析后可以得到储层固有频率。

2.2 高频可控电脉冲技术

采用先进控制方法实现电流内环、电压外环的双闭环控制, 控制原理图如图 4 所示。利用传感器对电网侧电流和电压进行采样, 可以得到三相电气量和电网侧相位, 之后利用坐标变换可以得到 dq 两相旋转坐标系下的数据

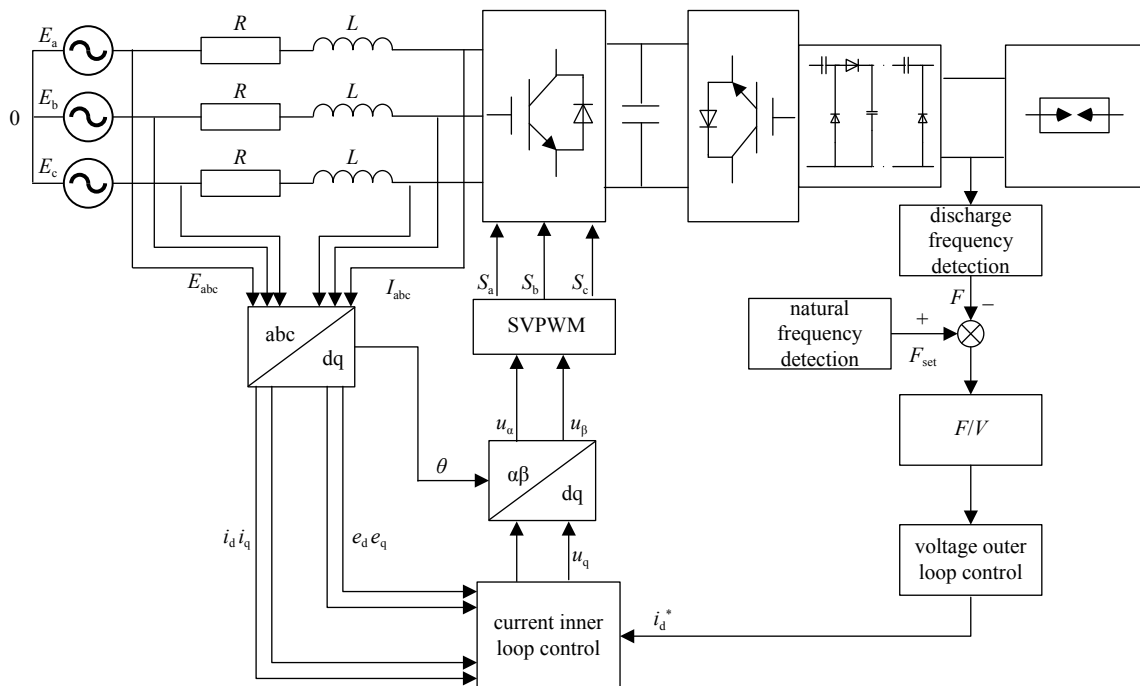


Fig. 4 Structure diagram of control system

图 4 装置控制原理图

量。负载侧进行放电频率检测并进行放电频率和施加电压的转换,根据电路拓扑进行电压等效,最后得到稳压电容上直流侧电压,与设定值相比较进行电压外环控制,然后与dq两相旋转坐标系下的网侧数据量共同输入到电流内环解耦控制中,最后经过SVPWM模块生成开关控制信号。

2.3 电脉冲共振增产装置

为了适应现场施工作业的条件,将井下部分设计为棒状,主要由控制监测短节、储能电容、高压硅堆、脉冲开关和换能器组成,井下部分结构示意图如图5所示。井上部分包括控制箱和高压升压变压器,井上井下部分的通讯通过特制高压电缆完成。

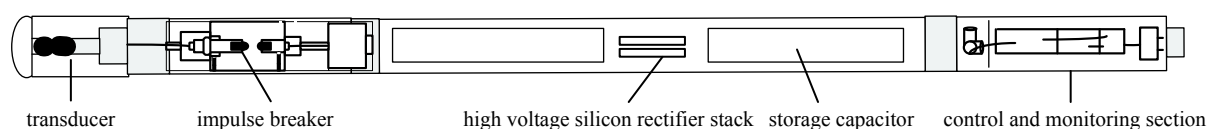


Fig. 5 Structure schematic of downhole part of the device

图5 装置井下部分结构示意图

装置工作时通过控制监测短节对目标储层固有频率进行检测,将检测到的信号通过电缆传到控制箱。控制箱对整流与逆变电路进行调节并作为装置的初级电源,控制箱的输出经高频变压器升压后经过电缆传输到井下倍压整流部分进一步升压,当电压达到脉冲开关的设定阈值时,脉冲开关迅速导通,储存在电容中的能量通过换能器转换为冲击波,基本工作原理如图6所示。装置采用三相交流供电,输入频率为50 Hz,输入相电压范围为210~230 V,放电电压等级为7~25 kV,工作频率范围为0~60 Hz。

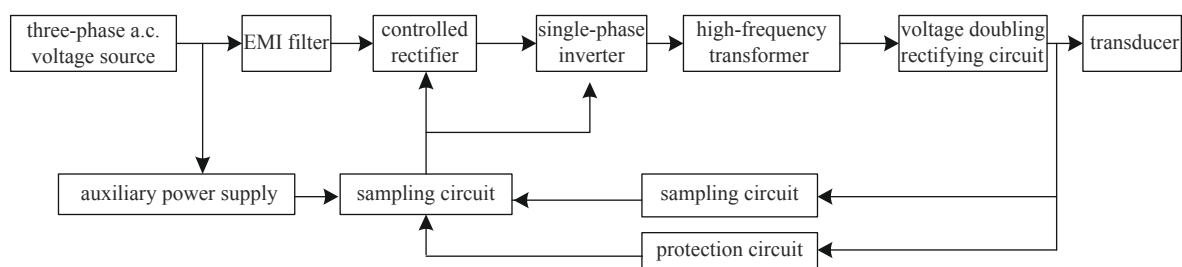


Fig. 6 Operating principle diagram of the device

图6 装置工作原理图

通过调节脉冲开关控制单次放电电压 ~ 7.5 kV,装置在水中单次放电的典型脉冲电压与放电电流如图7所示。从图7中可以看出:在先导与预击穿阶段,电压、电流无明显变化,只有少量泄漏电流;在剧烈放电阶段,水间隙电流激增,90 μ s时电流达到峰值6 kA;在剧烈放电之后进入欠阻尼震荡衰减阶段,在几个震荡周期后,电压趋于稳定,电流趋于零。

3 电脉冲共振储层改善

3.1 电脉冲共振增产工艺

现场工作示意图如图8所示。三相电源从井场配电箱中引出,考虑到井场电网的三相不平衡度高,井场其它设备工作时产生的电磁干扰通过电网传入装置中,对装置控制电路与通讯模块产生不良影响,设置EMI滤波器。同时也减少装置在正常工作时高频开关器件动作产生的电磁干扰对电网造成的污染。

将装置控制箱置于测井车操作室当中,高频变压器置于测井车绞车室中,将电缆缠绕在绞车室滚筒上。在施工前,通过磁定位与井下电视来确定目标储层的位置及井筒内液面的高度,以此来完成深度的校正以及判断是否需要向井筒中注水。施工时通过滚筒与吊车天地滑轮的配合,将井下脉冲源下放到目标储层位置,对于大斜度井需要爬行器等辅助设备的配合。

工作过程中将目标作业井段进行分层,从作业井段底部开始每隔30~50 cm作为一个作业点,每个作业点先进行5 min

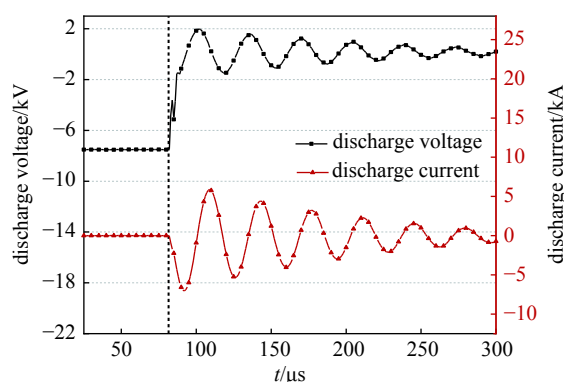


Fig. 7 Typical waveform of voltage and current of pulse discharge in water

图7 水中单次脉冲放电电压、电流波形图

低频电脉冲作业解堵, 再进行 20 min 电脉冲共振作业诱发储层裂缝发育, 最后再进行 5 min 低频电脉冲作业, 每个作业点平均放电 10000 次。

3.2 工程实践

目前已经完成了山西五口煤层气井的现场实验, 取得了一定的效果, 五口井的储层裂缝均有了明显的发育, 三口井在作业完成后液面有了明显的上升。

以山西一典型煤层气井为例, 该井位于单斜构造, 煤层埋深 663 m, 厚度 6 m, 煤体结构以原生结构为主, 解吸压力 2.1 MPa, 折算含气量 23 m³/t, 地质条件较好。2020 年 12 月 27 日开始对此井进行电脉冲共振增产作业, 作业深度 663.2~669.2 m, 每 0.3 m 一个作业点, 共 10 个作业点, 每个作业点 10000 次, 累计 100000 次。

利用微地震监测对井下脉冲源产生的冲击波作用范围进行监测, 能量扫描成果图如图 9 所示。从图中可以看出电脉冲共振施工产生的储层破裂区域主要集中在井口东侧及东北方向, 整体有沿北偏东方向延展的趋势, 影响范围可达 400~500 m。

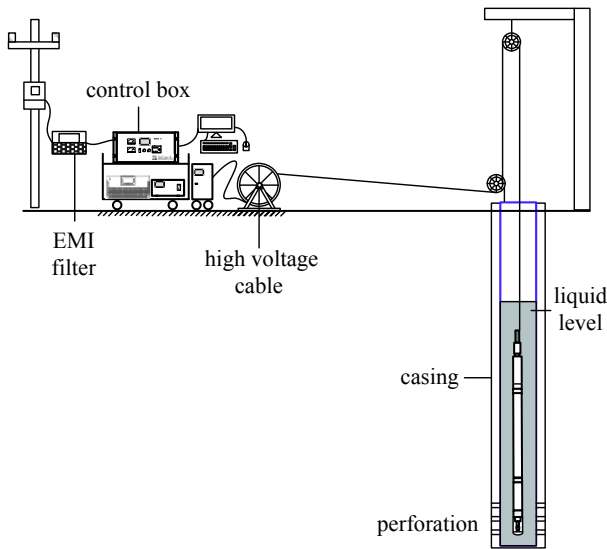


Fig. 8 Schematic diagram of field operation

图 8 现场作业示意图

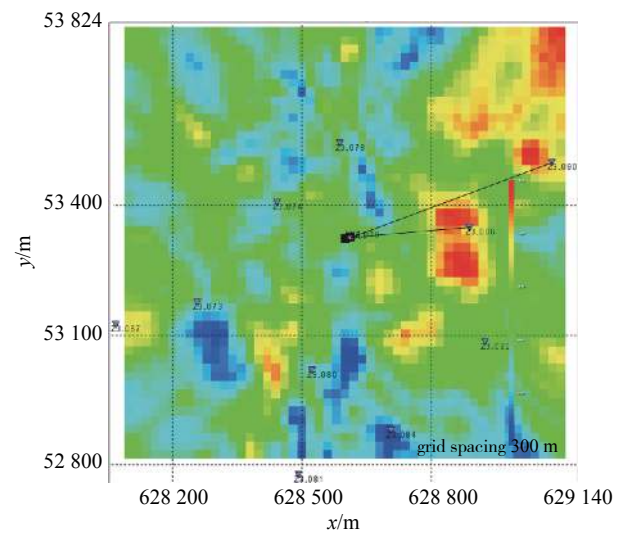


Fig. 9 Result of energy scanning

图 9 能量扫描成果图

在该井完成施工作业中, 利用阵列声波测井技术, 对改造层段井壁岩体各向异性进行检测, 检测结果如图 10 所示, 图 10(a) 为作业前各向异性成果图, 图 10(b) 为作业后各向异性成果图。施工作业前测井显示: 南北向及

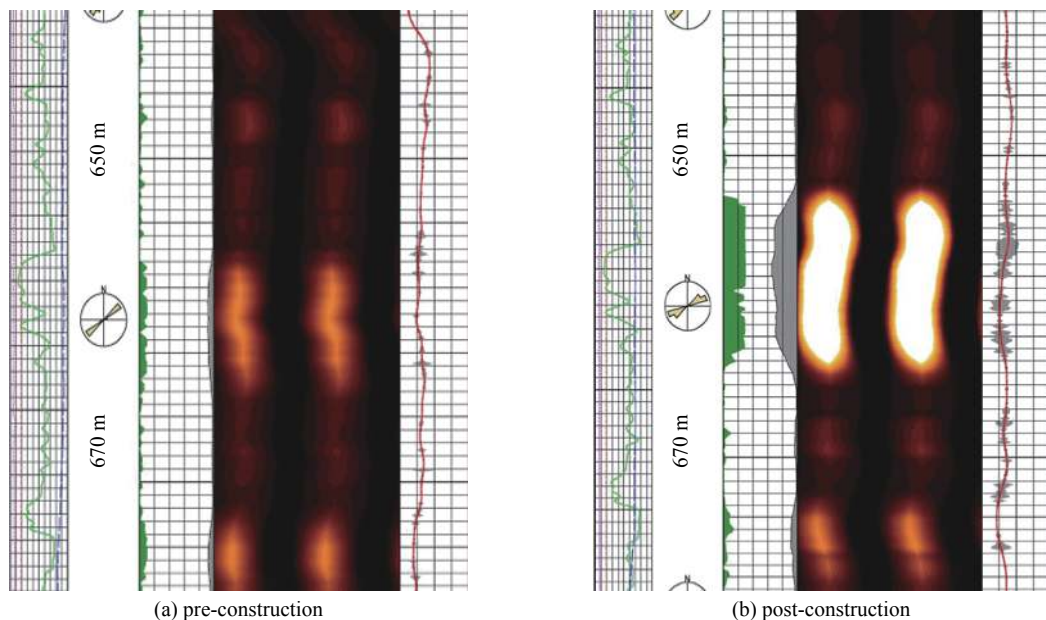


Fig. 10 Diagram of anisotropic results

图 10 各向异性成果图

45°方向切面见缝洞发育。缝洞向上延伸 4.0 m 左右, 向下延伸 3.5 m, 且 677~702 m 见缝洞发育。施工作业后测井显示: 四个方向均见缝洞发育, 南北向及 45°方向切面缝洞发育程度高。缝洞向上延伸 3.0 m, 向下延伸 14.0 m 的位置。结果表明: 在施工作业前 661.0~669.3 m 深度位置有各向异性相对较弱, 煤层段有裂缝发育, 但是裂缝发育相对较差。深度段 661.0~663.0 m 各向异性较强, 煤层顶板受到外力一定程度的影响, 有裂隙发育。施工作业后, 深度 661.0~669.3 m 各向异性有了显著变化, 深度段 662.0~669.3 m (包含煤层段 663.0~669.3 m) 明显变强, 反映煤层裂缝非常发育, 煤层改造效果较好。

4 结 论

本文对非常规储层固有频率的检测方法进行了研究, 提出了可用于现场作业的非常规储层固有频率的检测方法, 同时对高频电脉冲技术以及控制方法进行了研究, 实现了放电频率的快速准确控制, 并完成了非常规储层共振增产装置样机的搭建。通过对五口煤层气井进行现场实验发现, 该技术使储层原有的裂缝有了明显的发育, 电脉冲冲击波的作用范围广, 可以有效改造或疏通煤层。非常规储层共振增产技术将在全国各地不同的非常规油气井中进行现场实验并不断完善, 应用前景十分广阔。

致 谢 感谢胜利测井公司给予的指导和帮助。

参考文献:

- [1] 薛海飞, 朱光辉, 张健, 等. 深部煤层气水力波及压裂工艺研究及应用[J]. 煤炭技术, 2019, 38(5): 81-84. (Xue Haifei, Zhu Guanghui, Zhang Jian, et al. Research and application of hydraulic networks fracturing technology in deep coalbed methane[J]. Coal Technology, 2019, 38(5): 81-84)
- [2] 崔晓杰. 等离子脉冲谐振压裂技术[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(4): 82. (Cui Xiaojie. Plasma pulse resonant fracturing technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(4): 82)
- [3] Rezaei A, Siddiqui F, Callen N, et al. Pulsed power plasma to enhance near wellbore permeability and improve well performance[C]//SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition. The Woodlands, Texas, USA: SPE, 2020.
- [4] Rezaei A, Siddiqui F, Awad M M, et al. Pulse plasma stimulation: effect of discharge energy on rock damage under various confining stresses[C]//Proceedings of the 54th U. S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association, 2020.
- [5] 张永民, 邱爱慈, 秦勇. 电脉冲可控冲击波煤储层增透原理与工程实践[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(9): 79-85. (Zhang Yongmin, Qiu Aici, Qin Yong. Principle and engineering practices on coal reservoir permeability improved with electric pulse controllable shock waves[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(9): 79-85)
- [6] 杨鸿凯, 车爱兰, 李跃明. 集中静荷载初始效应对固支梁固有频率的影响[J]. 应用力学学报, 2017, 34(6): 1055-1060. (Yang Hongkai, Che Ailan, Li Yueming. Influence of the initial effect of concentrated static load on natural frequencies of fixed beam[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2017, 34(6): 1055-1060)
- [7] 李思琪, 闫铁, 李玮. 高频谐波振动冲击破岩机制及试验分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(4): 85-91. (Li Siqi, Yan Tie, Li Wei, et al. Mechanism experimental study of rock breaking assisted with high frequency harmonic vibration and impactation[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(4): 85-91)
- [8] 宋恒宇, 李根生, 史怀忠, 等. 井底岩石的共振响应分析及数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(5): 13-20. (Song Hengyu, Li Gensheng, Shi Huaizhong, et al. Analysis and numerical simulation for resonant response of bottom hole rock[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(5): 13-20)
- [9] 康忠健, 王增宏, 龚大建, 等. 基于页岩频谱共振的储层改善装置研制[J]. 电气应用, 2019, 38(12): 4-9. (Kang Zhongjian, Wang Zenghong, Gong Dajian, et al. Development of reservoir improvement device based on shale spectral resonance[J]. Electrotechnical Application, 2019, 38(12): 4-9)
- [10] 闫立鹏. 裂缝性岩石振动特性研究及有限元分析[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2019, 16(7): 104-108. (Yan Lipeng. Study on vibration characteristics of fractured rock and finite element analysis[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2019, 16(7): 104-108)
- [11] 丛培天. 中国脉冲功率科技进展综述[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 025002. (Cong Peitian. Review of Chinese pulsed power science and technology[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32: 025002)
- [12] 吴敏干, 刘毅, 林福昌, 等. 液电脉冲激波特性分析[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 045002. (Wu Mingan, Liu Yi, Lin Fuchang, et al. Characteristics analysis of electrohydraulic shockwave[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32: 045002)
- [13] 聂云良, 康忠健, 王聪, 等. 水中脉冲放电电极的烧蚀特性[J/OL]. 高电压技术: 1-10[2021-04-12]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20200682>. (Nie Yunliang, Kang Zhongjian, Wang Cong, et al. Electrodes erosion characters of pulse discharge in water[J/OL]. High Voltage Engineering: 1-10[2021-04-12]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20200682>.)
- [14] 仇聪颖, 管显涛, 刘振, 等. 纳秒脉冲放电处理有机染料废水的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 025010. (Qiu Congying, Guan Xiantao, Liu Zhen, et al. Degradation of organic dyes by nanosecond pulsed discharge plasma[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32: 025010)
- [15] Zheng Shichao, Kang Zhongjian, Cui Minghui, et al. Improvement of shale gas reservoir based on plasma pulse shock and frequency resonance technology[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 80: 103403.