



文章编号:1671-251X(2020)08-0051-07

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2020030039

基于多频同步电磁波 CT 技术的 煤层水力压裂范围探测试验

袁永榜, 易洪春

(中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039)



扫码移动阅读

摘要:当前煤层水力压裂影响范围的探测方法多存在实施复杂、工程量大、成本高及准确率偏低的问题,难以满足高效指导压裂施工方案优化和质量控制的需求,且常规电磁波透视探测中单一频率数据分析可能导致探测分辨率和准确性偏低。针对上述问题,提出了一种基于多频同步电磁波层析成像(CT)技术的煤层水力压裂范围探测方法,该方法基于电磁波透视法原理,一次探测可获取多个频率的数据,从不同分辨率综合分析压裂效果,提升探测准确性和效率。以某瓦斯突出矿井的 M_6 煤层为研究对象进行了煤层水力压裂范围探测试验,研究了 0.3, 0.5, 1.5 MHz 三种不同频率电磁波对煤层水力压裂的响应特征,分析了水力压裂的影响范围和效果。结果表明:水力压裂后,压裂区主要表现为电磁波场强高衰减特征,电磁波衰减系数明显增大,衰减系数区间变宽,水力压裂导致压裂区和非压裂区对电磁波的能量吸收差距变大,据此可对煤层压裂范围进行划分;0.3, 0.5 MHz 电磁波探测的异常区基本呈现片状分布,而 1.5 MHz 电磁波对水力压裂区的响应更灵敏,呈纵向条带状分布,衰减幅度更明显,横向分辨率较好;注水量与电磁波场强衰减系数呈现正相关变化,衰减系数随注水量增加而增大;高衰减异常区分布范围有一定的对应性,试验区压裂范围主要分布在横坐标为 40~90, 100~140, 210~350 m 段,对应于 2 号, 3 号, 6 号—8 号钻孔周边围岩半径 15~25 m, 约占探测范围的 65%。

关键词:低透气煤层;煤层气抽采;水力压裂;多频电磁波透视;层析成像;电磁波衰减系数;压裂范围

中图分类号:TD713

文献标志码:A

Detection test of coal seam hydraulic fracturing range based on multi-frequency synchronous electromagnetic wave CT technology

YUAN Yongbang, YI Hongchun

(CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400039, China)

Abstract: At present, the detection methods for influence range of coal seam hydraulic fracturing mostly have some problems, such as complex implementation, large amount of engineering volume, high cost and low accuracy, which are difficult to meet requirements of effective guiding of optimization of fracturing construction scheme and construction quality control. And single frequency data analysis in conventional electromagnetic wave perspective detection may lead to low detection resolution and accuracy.

收稿日期:2020-03-11;修回日期:2020-07-22;责任编辑:张强。

基金项目:“十三五”国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045004-007)。

作者简介:袁永榜(1985—),男,河南襄城人,助理研究员,硕士,现主要从事煤矿地球物理勘探技术研究工作, E-mail: yuanyongbang@126.com。

引用格式:袁永榜,易洪春. 基于多频同步电磁波 CT 技术的煤层水力压裂范围探测试验[J]. 工矿自动化, 2020, 46(8): 51-57.

YUAN Yongbang, YI Hongchun. Detection test of coal seam hydraulic fracturing range based on multi-frequency synchronous electromagnetic wave CT technology[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(8): 51-57.

To solve the above problems, a detection method of coal seam hydraulic fracturing range based on multi-frequency synchronous electromagnetic wave computerized tomography (CT) technology was put forward. The method is based on principle of electromagnetic wave perspective, the detection data of multiple frequencies can be obtained at one time, and the comprehensive analysis of fracturing effect from different resolutions can greatly improve the detection accuracy and efficiency. Taking the M_6 coal seam of a gas outburst mine as the research object, the detection test of hydraulic fracturing range in coal seam was carried out. The response characteristics of three different frequency electromagnetic waves of 0.3, 0.5, 1.5 MHz on coal seam hydraulic fracturing were studied, and the influence range and effect of hydraulic fracturing were analyzed. The results show that after hydraulic fracturing, the fractured zone is mainly characterized by high attenuation of electromagnetic field strength. The attenuation coefficient of electromagnetic wave in the fracturing area increases obviously, and the attenuation coefficient range widens. The energy absorption gap of electromagnetic wave in fractured area and non-fractured area is widened due to hydraulic fracturing. Therefore, the fracture range of coal seam can be divided. The abnormal detection areas of 0.3 and 0.5 MHz electromagnetic wave are basically in "sheet" distribution, while the response of 1.5 MHz electromagnetic wave is more sensitive to the hydraulic fracturing area with longitudinal "strip" distribution, more obvious attenuation amplitude, and better lateral resolution. There is a positive correlation between the water injection rate and the attenuation coefficient of electromagnetic field strength, and the attenuation coefficient increases with the increase of water injection volume. The distribution range of high attenuation abnormal area has a certain correspondence. The fracturing range of the test area is mainly distributed in the abscissa of 40-90, 100-140, 210-350 m section, corresponding to the radius of surrounding rock of No.2, No.3, No.6-8 boreholes within 15-25 m, accounting for about 65% of the detection range.

Key words: low permeability coal seam; coal-bed methane extraction; hydraulic fracturing; multi-frequency electromagnetic wave perspective; computerized tomography; electromagnetic wave attenuation coefficient; fracturing range

0 引言

我国多数煤层为低透气性煤层,具有非均质、低渗透率特点,抽采难度大。煤层气抽采往往需要采用如深孔预裂爆破、密集钻孔、 CO_2 相变致裂技术、水力化技术等强化措施,以达到增强煤层透气性和渗透率来提高抽采效率的目的。水力压裂技术是利用钻孔进行高压注水使煤层压裂增透区的煤体卸压,透气系数增大,增强煤层气抽放效果,降低瓦斯含量,一定范围内起到了消除煤与瓦斯突出危险和降低开采中煤尘的作用^[1-2]。近年来,煤层气井下抽采中,水力化技术为提高煤层渗透性和抽采效率开辟了新途径,水力压裂技术得到了广泛应用^[3-4]。为优化压裂设计和控制施工质量,需对压裂效果进行评价。目前,水力压裂效果评价一般是按照瓦斯抽采、防突等技术规范和国家现行相关规定及水力化技术施工经验进行评价,现场主要采用打检验钻孔的探查方式,存在工程量大、成本高、易造成压裂孔布置密集、抽采效率低的问题^[5]。

诸多学者对压裂效果的检验方法进行了研究。骆大勇等^[6]结合影响煤层注水效果的 13 个评价指

标,运用模糊综合评价法对煤层水力压裂效果进行了评价,但评价结果受指标选取的准确性影响较大,且无法对具体的压裂范围进行划分。当前应用地球物理勘探方法来检验水力压裂效果的研究成果中,基本上都是选择矿井瞬变电磁法、微震法、矿井高密度电法、电磁波层析成像(Computerized Tomography,CT)等方法中的一种或多种方法综合探测的方式。李好^[7]初步利用矿井瞬变电磁法对工作面顺煤层水力压裂效果进行了评价,该方法施工方便,但易造成划分的压裂范围偏大。范涛等^[8]应用瞬变电磁虚拟波场成像法对井下煤层气水力压裂效果进行了数值模拟,并进行了应用试验,对提升探测精度有一定作用,但仍存在异常范围偏大和受现场金属干扰造成的“假异常”排除难度大等问题。王国义等^[9]通过微地震同步监测了古交区块煤层气开发的水力压裂施工效果,该方法监测范围大,但实施复杂,监测结果受观测方式影响大。段建华等^[10]综合利用微震和瞬变电磁法对煤层气水力压裂效果进行了监测,初步划定了异常范围,但煤层硬度、压裂压力的大小直接影响到接收的微震事件数,可能导致监测结果失准,且施工复杂,实施成本高。袁永榜^[11]

采用综合物探技术实现了井下穿层压裂钻孔的水力压裂区域划分,使多个物探方法优势互补,但综合物探存在测量参数多、施工工作量大等问题,且其中电法勘探要达到某一深度需巷道具有足够长度,巷道金属支护对探测效果影响大。电磁波 CT 技术是在工作面双巷间透视探测,对煤层的地质构造发育区、破碎带等具有一定规模的地质异常体的探测效果较好,对水力压裂造成的场强衰减响应较为强烈,但多采用单频探测方式,难以兼顾透视距离和高分辨率,还可能因频率选择不当导致探测失败。上述多种地球物理手段在水力压裂效果评价中的应用或尝试取得了一些效果,也说明利用物探方法进行压裂范围探测具有一定可行性,但大多数物探方法也存在分辨率偏低、实施复杂、成本偏高等问题,而电磁波 CT 法具有方法成熟、无损、施工简便、准确性相对较高的优势。为满足水力压裂效果检验的准确、高效、便捷要求,本文依据不同频率电磁波具有分辨率不同、穿透介质能力不同的特点,提出了基于多频同步电磁波 CT 技术的煤层水力压裂范围探测方法,利用多频电磁波 CT 法对水力压裂范围进行探测,一次探测可获取多个频率的数据,从不同分辨率综合分析压裂效果,大幅提升了探测准确性和效率,为水力压裂范围的检验提供了一种无损、施工便捷和准确性更高的物探手段。

1 电磁波 CT 探测水力压裂范围的物性基础

井下水力压裂技术是指采用高压、大流量的矿用乳化液泵组把水快速压入到煤层中,使煤层在外力作用下使其内部的各种弱面发生张开、延伸和扩展,形成内部分割,增加裂隙的空间体积和增强裂隙之间的连通,最终形成一种互相交织的多裂隙连通网络,从而使煤层的透气性增大,提高煤层气抽采效果,降低煤与瓦斯突出危险性^[12-13]。电磁波 CT 探测技术建立在煤岩体的电性差异基础上,自然状态下的煤层属多孔隙、多微裂隙结构,含水率很低,一般呈现高电阻率特征。水力压裂在短时间内使煤岩裂隙、孔隙扩张,煤层压裂区的含水性增加,煤岩电阻率明显降低,这与压裂前具有明显的差异性,电磁波的衰减系数也会因水力压裂使煤层破裂、充水而增大,这是应用电磁波 CT 技术探测水力压裂范围的物性基础。

2 煤层水力压裂范围探测方法

2.1 电磁波透视法基本原理

电磁波在煤层中传播时,遇到断裂构造的界面、破碎带、软分层破坏带及富含水带等地质异常体将

产生折射、反射和吸收,造成电磁波能量损耗,这就会形成透视阴影(异常区)。电磁波透视探测的场强为

$$H = H_0 \frac{\exp(-\beta r)}{r} \sin \theta \quad (1)$$

式中: H 为与发射点距离为 r 处的实测场强值, A/m; H_0 为初始场强值, A/m; β 为介质吸收系数, Np/m; r 为发射点和接收点之间的距离, m; $\sin \theta$ 为方向因子, θ 为偶极子天线轴与观测点方向的夹角,一般取 90° , 即 $\sin \theta = 1$ 。

由式(1)可知,除了与距离 r 有关, H 还取决于介质吸收系数 β , 而 β 值与介质的电阻率、介电常数、磁导率和角频率有关^[14]。

$$\beta = \omega \sqrt{\epsilon \mu} \sqrt{\frac{1}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega \rho \epsilon}\right)^2} - 1} \quad (2)$$

式中: ω 为角频率, rad/s; ϵ 为介电常数, F/m; μ 为磁导率, H/m; ρ 为电阻率, $\Omega \cdot m$ 。

在辐射条件不随时间变化时, H_0 为常数, 介质吸收系数 β 是影响场强幅值的主要参数, 它的值越大, 场强变化就越大。

当前电磁波透视仪实测场强都以分贝值显示, 根据电压值与分贝值的关系, 转换后探测仪器实测的透视场强为^[15]

$$H' = H'_0 - 8.68 \ln r - \beta' r \quad (3)$$

式中: H' 、 H'_0 为仪器实测场强值, dB; β' 为转换单位后的介质吸收系数, 单位为 dB 时, $\beta' = 8.68\beta$ 。

2.2 多频煤层水力压裂范围探测方法原理

电磁波 CT 技术中, 低频电磁波具有穿透介质能力强, 但对异常分辨率偏低的特点, 高频电磁波具有分辨能力强的优势, 但穿透能力弱。多个频率的电磁波 CT 结果互为参考解释, 可有效提高探测结果的可靠性和精度, 在钻孔布置相对密集的情况下, 更有利于考察各孔的压裂效果。电磁波透视探测中, 需切断工作面供电系统, 以降低电磁干扰。常规电磁波透视法在一次探测施工中, 往往仅选择某一种频率进行探测, 可能导致频率选择不当而达不到所需探测效果, 若要获取多频探测数据, 则需要多次施工, 费时费力, 且较难保证探测环境的一致性。为此, 笔者采用一种串行发射接收技术实现多个频率电磁波的同步探测, 一次探测施工中获取多个频率的数据, 可提高探测效率和准确性。探测采用 WKT-0.03 型无线电波透视仪, 支持 0.3、0.5、1.5 MHz 三种频率或任意 2 种频率组合串行同步收发, 接收灵敏度小于 $0.03 \mu V/m$, 其工作原理如图 1 所示。通过发射机主动授时, 使得发射机与接收机的时序保持精准同步。在一个发射周期内, 发

射机按时序串行发射 0.3、0.5、1.5 MHz 三个频率电磁波,单个频率发射 10 s 后自动切换频率,接收机在对应时刻接收相应频率的场强值,在设定的时间段内完成测点的 3 个频率数据接收,再移动至下个发射点进行探测,实现一次施工获取 3 个频率的探测数据。

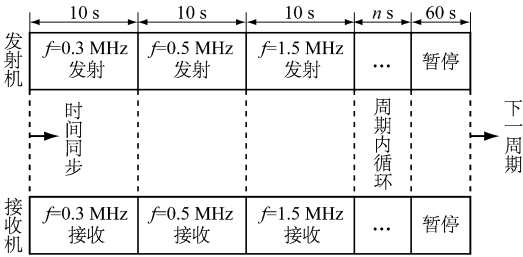


图 1 多频电磁波同步探测工作原理

Fig. 1 Working principle of multi-frequency electromagnetic wave synchronous detection

3 探测试验

3.1 试验概况

重庆某煤矿 S1641 对拉工作面开采 M₆ 煤层,平均煤层厚度为 0.85 m,平均煤(岩)层倾角为 12°。煤层瓦斯含量为 18.54 m³/t,煤层具有煤与瓦斯突出危险,瓦斯突出现象与地质构造相关性较强,瓦斯突出现象多发生在羊叉滩背斜轴部。为提高抽采效率和保障回采安全,该矿采用顺煤层中压注水压裂技术治理瓦斯。本次试验的北工作面宽度为 136.3 m,回采总长度为 1 000~1 017 m,目标区为靠近 S1641 北工作面开切眼的 A 区。压裂钻孔布置如图 2 所示,其中 h 表示断层的断距。在北回风巷朝向工作面煤层共布置 8 个压裂钻孔(编号为 1 号—8 号),1 号钻孔距离 S1641 北工作面开切眼 40.6 m,钻孔间距为 39 m,施工方位为 180°,施工倾角为 +3°,注水层位均为 M₆ 煤层,注水参数见表 1,钻孔在煤层中开孔并沿煤层水平钻进。高压泵采用 3ZSB-158/18 型,额定压力为 35 MPa,额定流量为 80 L/min。

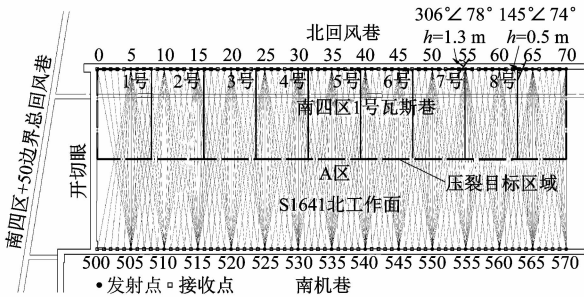


图 2 压裂钻孔及测点布置

Fig. 2 Layout of fracturing drillings and measuring points

表 1 水力压裂钻孔参数

Table 1 Hydraulic fracturing drilling parameters

钻孔 编号	注水时 间/min	终孔深 度/m	注水主要参数		
			主泵压 力/MPa	流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	注水量/m ³
1 号	110	66	10~12	3.8	7
2 号	114	67	6~18	4.2	8
3 号	130	67	12~18	4.2	9
4 号	50	67	21~24	6.0	5
5 号	30	66	7~22	9.0	4.5
6 号	160	73	18	5.3	14
7 号	230	68	6	3.4	13
8 号	60	57	17	7.0	7

3.2 测点布置

采用 3 种频率的电磁波进行同步透视探测,在南机巷、北回风巷内各布置 71 个测点,测点间距为 5 m,考察北回风巷走向长度 350 m 范围内工作面施工的 8 个钻孔的水力压裂效果,测点布置如图 2 所示,图中浅灰色射线表示电磁波 CT 观测系统范围。采用定点法测量,即在 1 个发射点时,另一巷道内接收 11 个测点数据。为准确探查煤层水力压裂的影响范围,在水力压裂施工前进行第 1 次探测,压裂后立即开展第 2 次探测,此时水力压裂区域暂未处于失水状态,电磁波响应较强。利用压裂前后 2 次探测的电磁波衰减系数等值线图进行对比分析,划分出煤层压裂范围。

4 探测结果分析

为确保压裂前后的探测结果不受探测环境和人为因素影响,2 次探测的试验条件力求保持一致,选取了相同参数进行数据处理,以便进行分析对比。将接收到的 3 个频率电磁波场强数据利用层析成像软件处理成像,将计算所得电磁波衰减系数绘制成等值线图,如图 3—图 5 所示。水力压裂前后的衰减系数等值线填充采用统一色标,以方便对比分析。

4.1 不同频率探测结果分析

根据计算结果分析得到压裂前后不同频率电磁波衰减系数值,见表 2。

从图 3—图 5 的 3 个频率探测结果及表 2 可看出,煤层被压裂、裂隙充水后主要表现为衰减系数增大,据此可对煤层压裂范围进行划分。这里的衰减系数为相对值,随探测频率增高,衰减系数有一定程度增大。压裂范围的电磁波衰减系数普遍分布在该频率衰减系数的平均值附近,异常阈值和平均值的波动小于 0.02 dB/m。压裂前定义异常划分阈值,压裂后用同一阈值进行判断,将衰减系数高于该阈值的区域划为异常区,再进行对比分析。

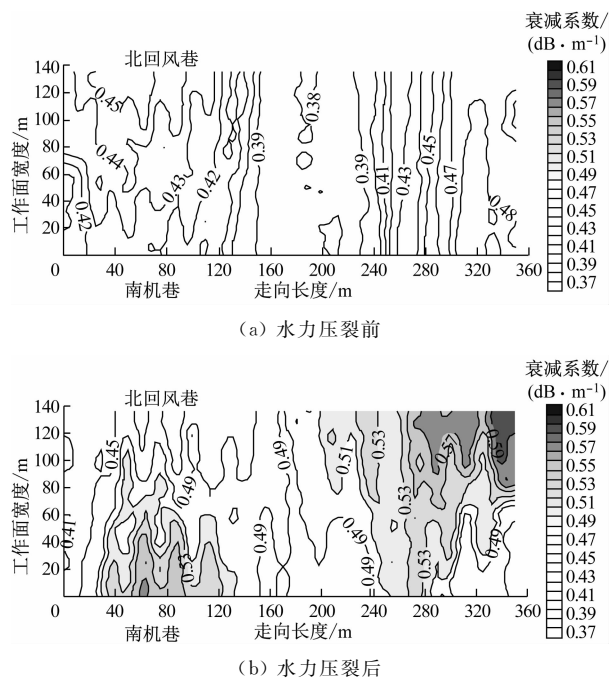


图 3 0.3 MHz 电磁波衰减系数等值线

Fig. 3 Contour map of attenuation coefficient of 0.3 MHz electromagnetic wave

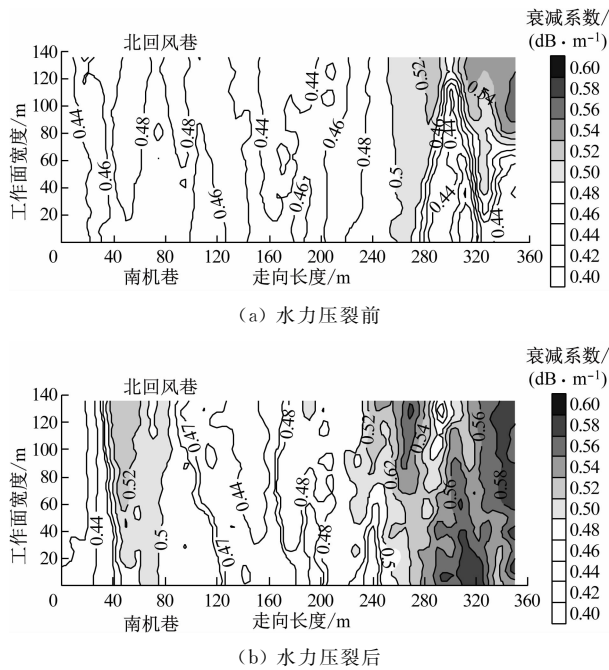


图 4 0.5 MHz 电磁波衰减系数等值线

Fig. 4 Contour map of attenuation coefficient of 0.5 MHz electromagnetic wave

从图 3 及表 2 可看出,压裂后,0.3 MHz 电磁波衰减系数最大值增大 0.11 dB/m,最小值增大 0.03 dB/m,平均值增大 0.08 dB/m,整体衰减系数增大,衰减系数大于 0.50 dB/m 的高衰减异常区域分布于南机巷 30~120 m 段、北回风巷 230~350 m 段,呈现片状分布,分析为压裂影响范围。

从图 4 及表 2 可看出,压裂后,0.5 MHz 电磁波衰减系数最大值增大 0.04 dB/m,最小值增大

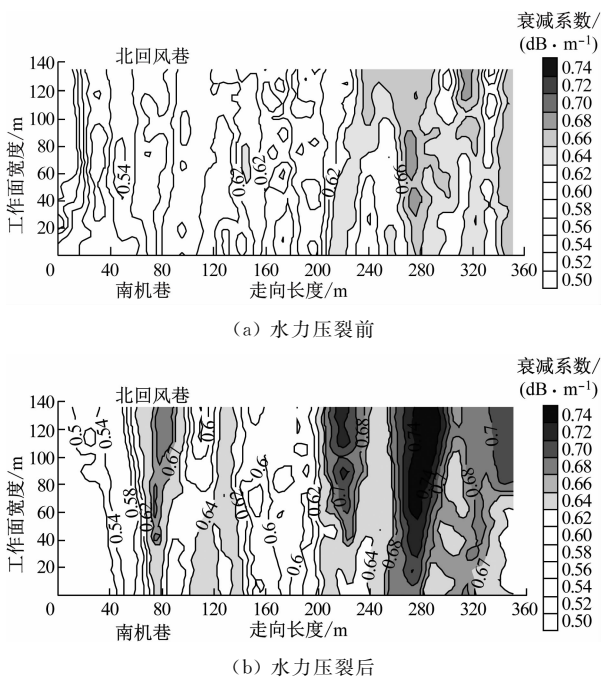


图 5 1.5 MHz 电磁波衰减系数等值线

Fig. 5 Contour map of attenuation coefficient of 1.5 MHz electromagnetic wave

表 2 压裂前后不同频率衰减系数值对比

Table 2 Comparison of attenuation coefficient values of different frequencies before and after fracturing

频率/ MHz	压裂状态	衰减系数		
		最大值/ (dB·m ⁻¹)	最小值/ (dB·m ⁻¹)	平均值/ (dB·m ⁻¹)
0.3	压裂前	0.48	0.38	0.42
	压裂后	0.59	0.41	0.50
0.5	压裂前	0.54	0.42	0.46
	压裂后	0.58	0.44	0.49
1.5	压裂前	0.68	0.50	0.61
	压裂后	0.74	0.50	0.63

0.02 dB/m,平均值增大 0.03 dB/m。北回风巷 40~80,240~340 m 段显示为相对高衰减区域,分析为压裂影响范围。衰减系数整体增大,分布范围也有所增大,说明因水力压裂导致区域的电性差异增大,场强衰减更强。压裂前,北回风巷 275,320 m 巷道已揭露的 2 条小断层有一定程度的相对高衰减响应。

从图 5 及表 2 可看出,压裂后,1.5 MHz 电磁波衰减系数最大值增大 0.06 dB/m,最小值不变,平均值增大 0.02 dB/m。压裂后,整体衰减系数增大,衰减系数大于 0.64 dB/m 的高衰减区域分布于 60~80,100~140,200~340 m 段,高衰减区呈现条状分布,分析为压裂影响范围。压裂前,北回风巷 275,320 m 巷道已揭露的 2 条小断层有相对更强的

衰减响应。

综合分析 3 个探测结果可看出:水力压裂后,3 个频率探测结果均表现为电磁波场强值的高衰减特性。压裂区的电磁波衰减系数明显增大,衰减系数区间变宽,分析为水力压裂导致压裂区和非压裂区对电磁波的能量吸收差距变大;高衰减异常区分布范围有一定的对应性,主要分布在横坐标为 40~90,100~140,210~350 m 段,约占探测范围的 65%;0.3,0.5 MHz 的探测结果异常区基本呈现片状分布,而 1.5 MHz 电磁波对水力压裂区的响应更灵敏,呈纵向条带状分布,衰减也更强,相对其他 2 个频率的探测结果分辨率更高。对于落差较小断层,也具有较明显的衰减响应。多种频率探测结果可互相印证,得出较为可靠的解释。

4.2 响应特征及压裂范围分析

对比不同频率电磁波 CT 探测结果可知,不同频率电磁波对水力压裂施工均有不同程度异常响应,3 个探测结果中的相对高衰减异常区域基本对应,但频率低的电磁波成像结果分辨率相对较差,能大致区分压裂区;频率越高的电磁波对各钻孔的压裂范围成像越精细。

采用多频同步电磁波 CT 技术探查工作面顺煤层水力压裂范围,以衰减系数阈值划分压裂有效范围。其中,2 号,3 号,6 号—8 号孔压裂效果较为显著,影响范围在钻孔周边 15~25 m 围岩范围内,本次压裂有效面积占预压裂区域的 65% 以上。考虑部分钻孔因漏水或裂隙发育压裂效果较差,建议对 0~40,140~200 m 补充二次压裂,并加密压裂孔距。单孔注水量分析结果及后期验证资料显示,探测结果和实际压裂范围较吻合,2 号,3 号,6 号,7 号钻孔压裂范围均在 23 m 以上。

5 结论

(1) 从试验工作面的 8 个压裂钻孔的电磁波 CT 结果来看,3 个频率电磁波均能有效穿透 S1641 北工作面,根据电磁波场强的衰减系数阈值可划分出压裂有效范围。其中 2 号,3 号,6 号—8 号钻孔的压裂效果较为显著,压裂范围为压裂钻孔周边围岩半径 15~25 m,经验证较符合实际。

(2) 水力压裂后导致电磁波场强值发生高衰减现象,频率高的电磁波在水力压裂区的衰减幅度更明显,横向分辨率较好。注水量与电磁波场强衰减系数呈正相关变化,衰减系数随注水量增加而增大。

(3) 3 个频率电磁波 CT 结果对压裂范围的异常响应基本对应。应用多频同步电磁波 CT 技术对

比分析多个频率探测结果,并进行综合解释,更有利于提升探测的可靠性和精度。

参考文献(References):

- [1] 马小敏. 液态 CO₂ 相变致裂影响有效抽采半径试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(2): 88-93.
MA Xiaomin. Effect of liquid CO₂ phase change fracturing on effective gas extraction radius-an experimental study[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(2): 88-93.
- [2] 王耀锋, 何学秋, 王恩元, 等. 水力化煤层增透技术研究进展及发展趋势[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10): 1945-1955.
WANG Yaofeng, HE Xueqiu, WANG Enyuan, et al. Research progress and development tendency of the hydraulic technology for increasing the permeability of coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10): 1945-1955.
- [3] 胡智芳. 区域瓦斯治理方案及效果分析[J]. 工矿自动化, 2018, 44(8): 19-23.
HU Zhifang. Regional gas control scheme and effect analysis [J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(8): 19-23.
- [4] 许昭勇, 宋大钊, 邱黎明, 等. 煤层水力压裂过程“三场”演化规律特征[J]. 工矿自动化, 2016, 42(3): 39-43.
XU Zhaoyong, SONG Dazhao, QIU Liming, et al. Regularity of three fields evolution of hydraulic fracturing process in coal seam[J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(3): 39-43.
- [5] 李好. 无线电波坑道透视法在煤矿井下水力压裂效果评价中的应用[J]. 物探与化探, 2017, 41(4): 741-747.
LI Hao. The application of radio wave tunnel penetration method to evaluating fracturing effect in underground coal mine [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(4): 741-747.
- [6] 骆大勇, 张国枢. 模糊综合评价在煤层注水效果分析中的应用[J]. 矿业安全与环保, 2007, 34(3): 47-49.
LUO Dayong, ZHANG Guoshu. Application of fuzzy comprehensive evaluation in coal seam water injection effect analysis [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2007, 34(3): 47-49.
- [7] 李好. 基于矿井瞬变电磁法的煤矿井下水力压裂效果评价初探[J]. 煤炭技术, 2016, 35(12): 132-134.
LI Hao. Preliminary discussion of using mine transient electromagnetic method to evaluate fracturing evaluation in underground coal mine[J].

Coal Technology,2016,35(12):132-134.

[8] 范涛,程建远,王保利,等.应用瞬变电磁虚拟波场成像方法检测井下煤层气水力压裂效果的试验研究[J].煤炭学报,2016,41(7):1762-1768.

FAN Tao, CHENG Jianyuan, WANG Baoli, et al. Experimental study on imaging method of TEM pseudo wave-field to detect the effect of underground coal-bed gas hydraulic fracturing[J]. Journal of China Coal Society,2016,41(7):1762-1768.

[9] 王国义,卫强强,宋晓夏,等.太原西山古交区块煤层气井水力压裂效果评价[J].煤炭科学技术,2018,46(6):155-159.

WANG Guoyi, WEI Qiangqiang, SONG Xiaoxia, et al. Evaluation of hydraulic fracturing effect of CBM well in Gujiao Area of Taiyuan Xishan Coalfield[J]. Coal Science and Technology,2018,46(6):155-159.

[10] 段建华,汤红伟,王云宏.基于微震和瞬变电磁法的煤层气井水力压裂监测技术[J].煤炭科学技术,2018,46(6):160-166.

DUAN Jianhua, TANG Hongwei, WANG Yunhong. Detection technology of hydraulic fracturing in coalbed methane well based on microseismic and transient electromagnetic method[J]. Coal Science and Technology,2018,46(6):160-166.

[11] 袁永榜.水力压裂增透效果综合物探检验技术研究[J].矿业安全与环保,2019,46(2):20-24.

YUAN Yongbang. Research on comprehensive geophysical exploration technique experimental for permeability enhanced effect of hydraulic fracturing [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2019,46(2):20-24.

[12] 林柏泉.矿井瓦斯防治理论与技术[M].2版.徐州:中国矿业大学出版社,2010.

LIN Baiquan. Theory and technology of mine gas control [M]. 2nd ed. Xuzhou: China University of mining and Technology Press,2010.

[13] 杨湘涛.水力压裂技术在低透气性煤层瓦斯抽采中的应用[J].能源与环保,2018,40(11):66-70.

YANG Xiangtao. Application of hydraulic fracturing technology in gas drainage of low permeability coal seam [J]. China Energy and Environmental Protection,2018,40(11):66-70.

[14] 岳蕾.电磁波在煤层中的传播规律与全波形概率反演方法研究[D].徐州:中国矿业大学,2016.

YUE Lei. Study on the propagation law of electromagnetic wave in coal seam and its full waveform probabilistic inversion method [D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology, 2016.

[15] 肖玉林,吴荣新,严家平,等.回采工作面多频率无线电波透视探测研究[J].煤田地质与勘探,2016,44(5):146-148.

XIAO Yulin, WU Rongxin, YAN Jiaping, et al. Detection of multi-frequency radio wave penetration in stope face[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(5):146-148.