

doi: 10.11720/wtyht.2017.4.25

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.http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.4.25

Li H.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.http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.4.25

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

李 好

(中煤科工集团 重庆研究院有限公司,重庆 400039)

摘 要:文中阐述了无线电波坑道透视法评价水力压裂效果的原理、方法,提出了面积法定量评价方法。并以重庆松藻煤矿 3211S 工作面水力压裂前后的无线电波坑道透视探测资料为例,深入开展了压裂前、压裂后的无线电波衰减系数等值线成果图对比分析研究,并采用面积法定量评价了 3211S 工作面水力压裂效果,经矿方提供的巷道揭露断层地质资料验证了面积法定量评价水压裂效果方法的可靠性、准确性。该评价方法能有效指导二次补充水力压裂孔的合理布置,能优化同煤层的顺层水力压裂施工设计方案,节约大量设计、施工成本,能产生较好的经济效益和社会效益。无线电波坑道透视法具有物探方法成熟、操作简单、仪器轻便、探测结果精度高等优点,该评价方法值得在煤矿井下回采工作面水力压裂施工中大力推广应用。

关键词:水力压裂;无线电波坑道透视法;对比探测;压裂效果评价;定量评价法

中图分类号: TP631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2017)04-0741-07

0 引言

在高瓦斯或煤与瓦斯突出的煤矿井下开采过程中,不管是回采面采煤前,还是独头掘进巷道工作面掘进前,都必须对其周边一定范围内的瓦斯富集区进行瓦斯抽采工作。然而大部分瓦斯呈吸附状态或赋存于孔隙度较低的煤岩体内,不易被抽采,或抽采效率低,为了提高煤矿井下瓦斯抽采率,目前主要采用水力压裂技术,能很好地提高瓦斯抽采率,提高煤矿的年产煤量。但是在水力压裂过程中,目前基本按照《煤矿安全规程》(2009 版)、《煤矿瓦斯抽采工程设计规范》(GB50471-2008)等瓦斯抽采、防突等技术规范及相关水力压裂传统的施工经验进行煤矿井下水力压裂效果评价工作,这样煤矿井下水力压裂孔布置的非常密集、整个工程进展缓慢、开采成本大幅增加。造成这种现象,均由于没有一个全面、可靠的水力压裂效果评价方法,只能为了安全,进行保

守的瓦斯抽采设计与施工。故寻求一种全面、可靠的水力压裂效果评价方法显得极为迫切。为此,2010 年王玉海等人^[1]针对类似的煤层气井,基于降压曲线试井分析,得到裂缝长度等压后储层参数,进而对压裂效果进行了评价;2012 年康红普等人^[2]采用空心包体应变计,对水力压裂前后钻孔附近煤层的应力变化,及水力压裂后,随着工作面推进,前方煤层应力的变化进行了试验应力监测工作;2014 年朱海波等人^[3]研究了用矩张量描述震源属性,求解观测记录和矩张量的线性方程组,反演出震源机制解,并得到水力压裂所产生裂缝的方位和倾角等参数;基于矿井瞬变电磁法,2014 年张翠兰等人^[4]开展了水力压裂后且未放水的压裂影响范围的试验探测工作,2015 年张瑞林等人^[5]对新安矿 14230 工作面上巷进行了试验探测,分析了探测煤岩水力压裂过程中高压水流动方向和扩展范围可行性。

虽然如上综述的非传统的水力压裂评价法已取得了较好的试验效果,但是针对具有两侧巷道的回

收稿日期: 2016-10-31;修回日期: 2017-05-17

基金项目: 国家科技重大专项课题(2016ZX05045004-007);重庆市交通科学技术项目(2014-01)

作者简介: 李好(1983-),男,土家族,重庆酉阳人,助理研究员,工学硕士,研究方向为地球物理勘探理论及其应用。Email:303742086@qq.com

采工作面水力压裂效果评价工作完全可以采用类似于矿井瞬变电磁法的矿井物探方法,压裂前与压裂后的对比探测,进而达到评价水力压裂效果的目的。笔者正是考虑到无线电波坑道透视法的原理的优越性、探测结果的精确性,开展基于无线电波坑道透视法评价煤矿井下回采工作面内顺煤层水力压裂效果评价方法的相关研究。该文旨在能为煤矿井下水力压裂工作提供一种更好的物探评价方法,同时弥补无线电波坑道透视法在水力压裂效果评价领域中应用的空白。

1 无线电波坑道透视法评价方法

1.1 水力压裂无线电波透视评价物理基础

无线电波透视法可分为无线电波坑道透视法、无线电波跨孔透视法、井—地无线电波透视法等几种具体探测方法,其最早由前苏联科学院院士 A. A. 彼得罗夫斯基 1928 年在苏联外高加索某一硫化矿床上进行试验,发现由硫化矿体引起的无线电波“阴影”而提出,20 世纪 40、50 年代,欧美一些地球物理学家^[6-8]对无线电波在地下传播的衰减进行了相关试验,直至 20 世纪 70 年代中期,美国测井专家 R J Lytle 等人率先把层析技术应用于钻孔无线电波法的数据处理中,推动了全球范围内电磁波透视探测技术的发展。在国内,无线电波透视方法研究及仪器研制工作^[9-13]也正是 20 世纪 70 年代开始发展壮大,并得到了推广应用^[14-15]。虽然该方法仅能适用于具有两侧巷道或跨孔的情况,但是因其方法探测准确度高,在煤矿井下、地质找矿及其他工程物探领域得到了广泛的应用^[16-18]。

水力压裂短时间内使煤体原生裂隙扩张,空隙增大,裂隙、缝隙处于充水状态。水力压裂前,煤层属于自然状态下的一种具有多分层结构的地质体。从微观上讲,煤层的煤分层具有多微裂隙、多孔隙结构,且其含水量较低。无线电波坑道透视法评价水力压裂效果的物理基础也正是基于其水力压裂后裂隙、缝隙空隙充水后呈低电阻异常特性或者其水力压裂后原生裂隙扩张、空隙增大、裂隙增多呈高阻异常特性。假设辐射源(天线轴)中点 O 为原点(图 1),在近似均匀、各向同性煤层中,观测点 P 到 O 点的距离为 r , P 点的无线电波场强度 H_p 可表示为:

$$H_p = H_0 \frac{e^{-\beta r}}{r} f(\theta), \quad (1)$$

式中: H_0 为天线周围煤层初始场强,单位 A/m; β 为煤层对无线电波的吸收系数,单位 dB/m; r 为 P 点

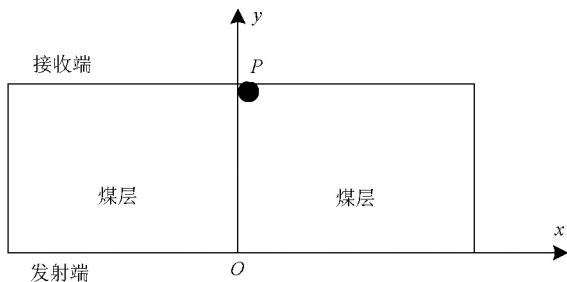


图 1 衰减系数计算公式坐标系建立

到 O 点的直线距离,单位 m; $f(\theta)$ 为方向性因子, θ 为偶极子轴与观测点方向的夹角,一般用 $f(\theta) = \sin(\theta)$ 来计算。

为了准确评价水力压裂效果,水力压裂前进行第 1 次探测,水力压裂后进行第 2 次探测,但第 2 次探测有两种方式,第 1 种方式是水力压裂完后立即进行第 2 次探测,一般用于单孔水力压裂或多孔同时水力压裂后立即进行第 2 次对比探测;第 2 种方式是水力压裂后处于失水状态时进行第 2 次对比探测,一般用于多孔未同时水力压裂或单孔压裂后未立即做第 2 次对比探测情况。并利用前后两次探测成果的低阻或高阻异常对比定量分析来评价水力压裂效果。

该评价方法技术关键是保证:两次探测时,仪器参数设置、现场探测位置、探测方式必须完全一致;数据处理时,相关处理参数设置等也务必完全一致。力求各环节充分具有一致性,凸显水力压裂前后差异性。关于无线电波坑道透视法的探测方式选择、测点和测线布置、参数设置等见参考文献[19][20],此处不再赘述。

1.2 “面积”法定量评价方法

目前,不管是水力压裂后检验孔测试抽采瓦斯浓度等传统评价方法,还是微地震监测、应力监测等其他新兴方法都很难达到精确定量评价,目前的各种评价方法共性:评价可靠度低、全面性差。瓦斯抽采工作只能按相关技术规范保守设计与施工。

无线电波坑道透视法是基于无线电波传播的射线追踪理论计算出衰减系数值,采用相关层析成像(CT)软件处理数据,可获得无线电波透射面的二维衰减系数分布图。其基本原理是水力压裂后短时间内煤层含水量增大,呈低阻异常,或是水力压裂后煤层原生裂隙扩张、空隙增大、裂隙增多,呈高阻异常,其无线电波在该区域的衰减系数变大或变小,形成所谓“阴影区”。

假设待评价的水力压裂区域面积为 S , 见图 2, 水力压裂前的第 1 次探测时间为 t_1 , 其无线电波衰减系数 $\beta_1 \in [\beta_{1\min}, \beta_{1\max}]$; 水力压裂后的第 2 次探测时间为 t_2 , 其无线电波 $\beta_2 \in [\beta_{2\min}, \beta_{2\max}]$ 。

下一步确定影响压裂效果的衰减系数阈值 β_{tz} (图 3), 理论上, 把 $\beta_{1\min}$ 视为 β_{tz} 当然是可行, 但是当 β_{tz} 圈定面积不符合现场抽采验证资料时, 应设置一个修正系数予以调整 β_{tz} 值; 实际评价工作中, 可以通过同步法对回采工作面测试确定其值。试验确定

阈值的具体方法: 先对待测回采工作面顺煤层钻施水力压裂试验孔, 且孔深为回采工作面宽度的 $2/3 \sim 3/4$; 在水力压裂至另一侧相对位置附近有水渗出为止; 然后采用同步法实测 β_{tz} 。当第 2 次探测为第 1 种方式时, 小于 β_{tz} 值的区域视为未完全压裂区域, 需要补孔再压裂, 大于 β_{tz} 的区域视为完全压裂区域; 当第 2 次探测为第 2 种方式时, 大于 β_{tz} 值的区域视为未完全压裂区域, 需要补孔再压裂, 小于 β_{tz} 的区域视为完全压裂区域。

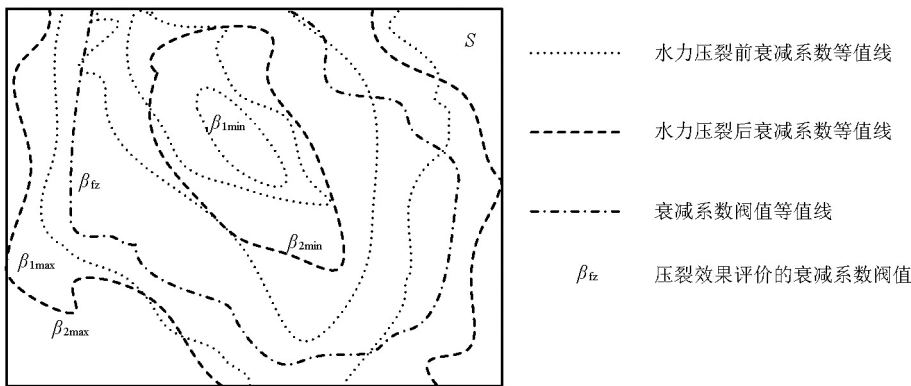


图 2 面积法定量评价原理示意

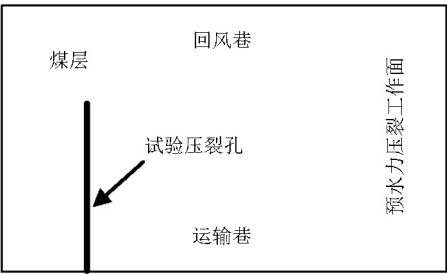


图 3 试验确定完全压裂衰减系数 β_{tz} 阈值示意

2 现场试验实例分析

以作者 2014 年在重庆松藻煤电集团下属的松藻煤矿试验探测资料为例, 并结合文中研究的评价方法开展相关应用实例分析。第 1 次探测时间为 2014 年 5 月 7 日, 第 2 次探测时间为 2014 年 5 月 26 日, 仪器采用中煤科工集团重庆研究院有限公司研发的 WKT-E 无线电波坑道透视仪, 发射为正弦波, 其频率为 0.5 MHz, 接收为选频, 其选频频率为 0.5 MHz。探测方式为定点法 (一发射点对应多接收点), 即发射机相对固定, 接收机在一定测点范围内逐点测量透视场强值, 发射点点距 50 m, 接收点点距 10 m, 先 3211S 回风巷发射、3211S 运输巷接收, 再 3211S 运输巷发射、3211S 回风巷接收, 每个发射

点对应的接收点为发射点正对的接收点及其前后 5 个测点, 即每个发射点对应 11 个接收点, 测点布置情况见图 4。现场探测时, 井下所有电路停电, 尽量减少人为电磁干扰, 现场背景无线电波噪音只考虑大地天然电磁波噪声, 首先通过接收机测试大地天然电磁波噪声水平, 然后在 CT 处理环节进行背景噪声压制处理。

3211S 工作面为单倾斜地质构造, 为 K_2^b 煤层, 煤层倾向 273° , 其倾角 $36^\circ \sim 38^\circ$ 、平均倾角 37° , 煤层厚度 0.40 ~ 0.72 m、平均厚度 0.57 m。 K_2^b 煤层的 3211S 工作面平均长 611 m, 平均宽 112 m。经鉴定 K_2^b 煤层为煤与瓦斯突出煤层。位于三水平一采区 +5 至 +80 阶段的主石门至南二号石门之间, 3211S 工作面东为矿井边界隔离煤柱, 南为 3211S 工作面 (S2#石门 ~ S4#石门段), 西为 3212S 工作面, 北为 3211N 工作面。该水力压裂孔共布置了顺层煤层孔 20 个, 孔深为 61 m, 孔间距约 30 m, 钻孔布置情况见表 1、图 5。采用了 1 套水力压裂系统从南二号石门端的 6#依次向主石门端的 101#压裂施工了 7 天时间, 详细情况见表 1, 最后一个压裂孔 (101#) 压裂完时间是 2014 年 5 月 19 日, 故第 2 次探测时间为最后一个压裂孔 (101#) 压裂完 8 天后才进行第 2 次探测, 故第 2 次探测方式属于第 2 种方式, 即为水力压裂后处于完全失水状态时进行第 2 次对比探测。

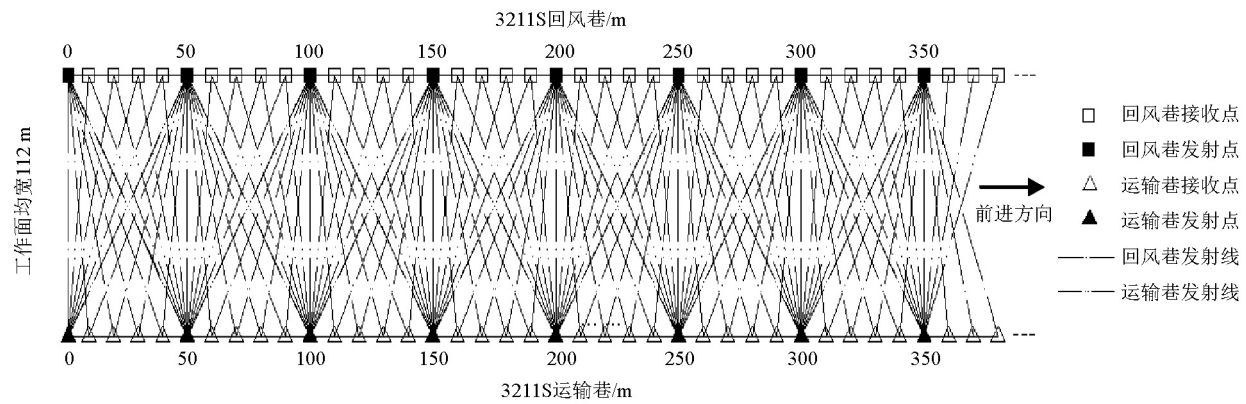


图 4 无线电波坑道透视法测点布置示意

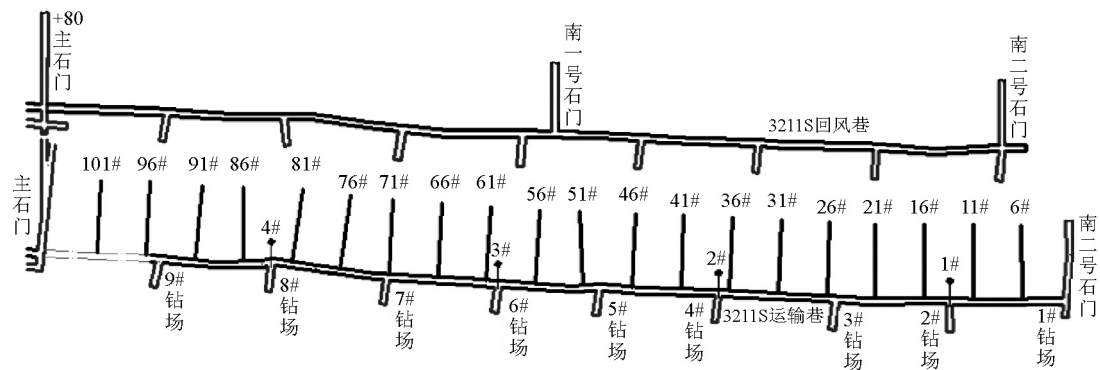


图 5 3211S 回采工作面顺层及穿层水力压裂孔布置示意

表 1 水力压裂各孔压裂主要技术参数

压裂施工 时间	压裂时间 /min	孔号	方位/(°)	倾角/(°)	深度/m	水力压裂主要参数		
						泵压力/MPa	流量/(m³/h)	注水量/m³
2014.5.13	74.35	6#	0	37	61	21~22	24	29.74
2014.5.13	75	11#	0	37	61	21~22	24	30
2014.5.14	75	16#	0	37.5	61	20	24	30
2014.5.14	75	21#	0	38	61	20~22	24	30
2014.5.15	75	26#	0	37	61	25.7	24	30
2014.5.15	75	31#	0	38	61	22	24	30
2014.5.15	75	36#	0	38	61	21	24	30
2014.5.15	75	41#	0	39	61	20~22	24	30
2014.5.16	75	46#	0	38	61	21~22	24	30
2014.5.16	75	51#	0	38	61	21~22	24	30
2014.5.16	75	56#	0	38	61	20~21	24	30
2014.5.16	75	61#	0	38	61	20~21	24	30
2014.5.16	75	66#	0	38	61	20~21	24	30
2014.5.16	75	71#	0	38	61	20~21	24	30
2014.5.17	75	76#	0	37	61	20~21	24	30
2014.5.17	75	81#	0	37	61	20~21	24	30
2014.5.18	95	86#	0	38	61	21~22	24	38
2014.5.18	85	91#	0	37	61	13~14	24	34
2014.5.19	75	96#	0	38	61	13~14	24	30
2014.5.19	75	101#	0	37	61	20~21	24	30

按照 CT 层析成像算法^[7]和文中的定量评价面积法可得图 6 的水力压裂前后的无线电波衰减系数等值线图,其采用 Sufer 软件绘制时,必须采用同一填充色标文件绘制,等值线间隔也相同。由图 6a 可

知,水力压裂前第 1 次探测的无线电波衰减系数的最大值为 0.7375 dB/m,最小值为 0.6083 dB/m,平均值 0.6594 dB/m;水力压裂后探测的无线电波衰减系数的最大值 0.7390 dB/m,最小值为 0.5776 dB/m,

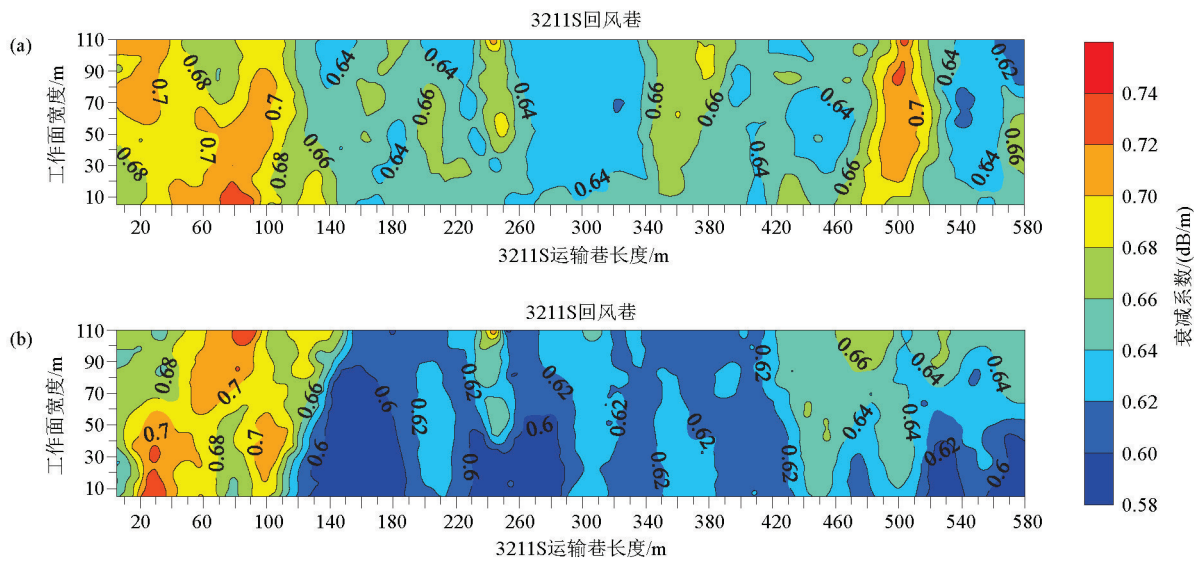


图 6 3211S 回采工作面顺层水力压裂前(a)后(b)无线电波衰减系数等值线成果

平均值 0.634 7 dB/m,第 1 次减去第 2 次的衰减系数最大值差值为-0.001 53 dB/m、衰减系数最小值差值为 0.030 42 dB/m、衰减系数平均值差值为 0.024 75 dB/m。结合图 6a、b 分析可知,水力压裂前,整体衰减系数值均较大,相对高阻阴影区面积很小,水力压裂后,衰减系数均值减小了 0.024 75 dB/m,衰减系数最小值减小 0.030 42 dB/m,图 6a 中衰减系数等值线分布密集,衰减系数为 0.62 dB/m 以下的区域主要集中在图 6a 右上角 2 个小区域,面积为 558.95 m²,占总面积的 0.9%。与此同时,由图 6b 可知,水力压裂后衰减系数为 0.62 dB/m 以下的区域分布广泛,面积为 24 509.785 7 m²,是压裂前面积的约 44 倍,占总面积的 41%,最终的水力压裂定量评价成果图见图 7。具体而言,运输巷的测线上的 120~190 m、220~290 m、318~350 m、385~435 m、510~580 m 段压裂效果较好,其中 0~120 m(对应水力压裂孔为 101#、96#、91#,后同上)、190~220 m(76#、71#)、290~318 m(56#)、350~385 m(46#)、435~510 m(31#、26#、21#)段压裂效果不明显,但是通过表 1 可知,除 6#孔注入水量 29.74 t 外,其他各水力压裂

孔注入水量均在 30 t 及以上,分析其压入的水量通过其他裂隙通道漏掉了,未压入煤层内。在 K₂ 煤层 3211S 工作面两侧巷道掘进过程中,矿方实际揭露了 3211S 回风巷、运输巷共揭露 12 条断层(见图 8),落差在 0.30~1.30 m 之间,在断层影响范围内煤层顶板破碎,煤层厚度不稳定,瓦斯应力集中、瓦斯浓度变化异常。于是可知,压裂效果差的 0~120 m 段是由于 f₁₀、f₁₁ 及 f₁、f₂ 断层所致,190~220 m 段是由于 f₃、f₄ 断层所致,350~385 m 段是由于 f₅ 断层所致。另外 500~580 m 段由于断层 f₅ 所致,压裂范围仅限孔口附近区域,靠回风巷一侧未压裂。

综上分析可知,以 0.62 dB/m 的衰减系数为完全压裂阈值较为科学,本次水力完全压裂面积占总面积 41%,由于多条断层裂隙或破碎带漏水所致,59%面积压裂效果较差,需要补充压裂,并建议对 0~120 m、190~220 m、290~318 m、350~385 m、435~580 m 段二次水力压裂,并要求孔深 65 m、孔间距 20 m,且孔不能布置在断层上下盘之间,应布置在距断口上下盘两侧 15~20 m 之外。

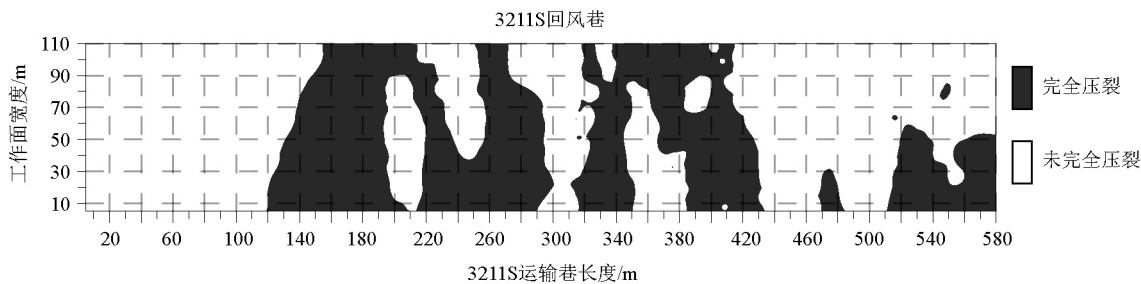


图 7 3211S 回采工作面水力压裂效果评价成果

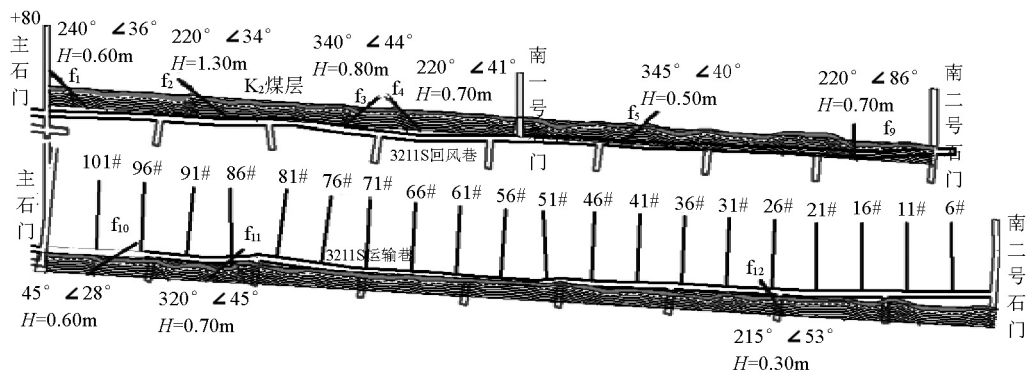


图8 3211S回采工作面两侧巷道揭露断层情况

3 结论

1) 提出了通过选择适合的无线电波衰减系数评价阈值定量评价水力压裂效果的面积法。

2) 通过试验实例的水力压裂前后的无线电波透视成果图、及工作面巷道揭露地质情况,对比分析验证了无线电波坑道透视法评价水力压裂效果方法的可靠性、准确性。

3) 面积法定量评价方法不但可定量给出完全压裂的面积大小,还可有效地指导水力压裂孔合理布置,优化同地质条件的煤层的水力压裂施工方案,同时给高瓦斯或突出煤矿带来了可观的经济效益,并更加有效地保障煤矿安全生产。

4) 无线电波坑道透视法在煤矿井下回采工作面水力压裂效果评价中,具有物探方法成熟、现场操作简单、仪器轻便、定量评价结果准确可靠、降低抽采成本、提高瓦斯抽采施工安全性等优点,值得在相关领域中大力推广应用。

5) 该方法只能对回采工作面顺煤层进行水力压裂效果评价,对穿层、掘进工作面前方和独头巷道周围的水力压裂效果无法开展评价工作,故建议拓展研究电磁波反射法对水力压裂效果评价的方式、方法。

参考文献:

- [1] 王玉海,王庆红,闫桂芳,等.煤层气井压裂效果评价方法[J].油气井测试,2010,19(5):44-47.
- [2] 康红普,冯彦军.定向水力压裂工作面煤体应力监测及其演化规律[J].煤炭学报,2012,37(12):1953-1959.
- [3] 朱海波,杨心超,王瑜,等.水力压裂微地震监测的震源机制反演方法应用研究[J].石油物探,2014,53(5):556-561.

- [4] 张翠兰,郭臣业,许洋铖,等.盐井—矿煤层水力压裂范围监测技术研究[J].西安科技大学学报,2014,34(4):462-466.
- [5] 张瑞林,谷志鹏.基于TEM探测煤岩水力压裂有效影响范围的实验研究[J].煤炭技术,2015,34(3):95-98.
- [6] Pritchett W C. Attenuation of radio frequency waves through the earth; with discussions [J]. Geophysics, 1952, 17(2): 193-217.
- [7] Barret W M. Note on the radio-transmission demonstration at grand saline, Texas [J]. Geophysics, 1952, 17(3): 544-549.
- [8] McGehee F M. Propagation of radio frequency energy through the earth [J]. Geophysics, 1954, 19(3): 459-477.
- [9] 坑道透视仪三结合研制小组. WKT-J1型无线电波坑道透视仪简介[J]. 川煤科技, 1977(1): 17-22.
- [10] 付淑玲,安里千,李真西.无线电波透视仪输入输出阻抗检测分析理论方法[J].物探与化探,2012,36(3):496-498,506.
- [11] 雷凯丽,王素锋.周期矩形波作为无线电波透视波源的数字模拟与实验[J].自动化与仪器仪表,2016,26(5):211-213.
- [12] 刘鑫明,刘树才,姜志海,等.基于改进振幅衰减常数的无线电波透视层析成像研究[J].地球物理学进展,2013,28(2):980-987.
- [13] 焦险峰,姜志海,刘树才.煤层变薄区坑道无线电电磁波透视异常响应特征[J].采矿与安全工程学报,2014,31(6):1001-1004.
- [14] 易永森.利用地下物探方法在深部层状介质中探测水源通道[J].物探与化探,1988,12(1):10-15.
- [15] 李张明,王志祥.物探在水文地质调查中的应用[J].物探与化探,1991,15(1):31-38.
- [16] 吴有林,陈盼祥,聂士诚.跨孔电磁波透视法在荷叶塘高架桥岩溶探测中的应用[J].物探与化探,2009,33(1):102-104.
- [17] 甘伏平,李金铭,黎华清,等.跨孔电磁波透视法在岩溶探测中的应用[J].物探与化探,2006,30(4):303-307.
- [18] 肖玉林,吴荣新,张平松,等.无线电波透视场强增量法在煤层工作面坑透探测中的应用[J].矿业安全与环保,2016,43(5):36-40,44.
- [19] 梁庆华,马晓莉,宋劲,等.复杂地质构造煤层坑道透视探测研究[J].矿业安全与环保,2010,37(1):15-17.
- [20] 梁庆华,吴燕清,宋劲.无线电波坑道透视探测的定性分析及其应用[J].重庆大学学报,2010,33(11):113-118.

The application of radio wave tunnel penetration method
to evaluating fracturing effect in underground coal mine

LI Hao

(Methane & Fire Branch,Chongqing Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp.,Chongqing 400039,China)

Abstract: This paper describes the principle and method about using radio wave tunnel penetration method to evaluate fracturing effect, and presents area method for quantitative evaluation.In the case of sounding data of 3211S working surface of the Songzao coal mine,the author developed comparative research on radio wave attenuation coefficient contour maps before and after fracture.Area quantitative evaluation method put forward in this paper was used for quantitative evaluation of fracturing effect of 3211S working surface.In addition, fault geological data exposed by tunnel verified the reliability and accuracy of using area quantitative evaluation method.This evaluation method can effectively guide reasonable layout of two supplementary hydraulic fracturing holes,and optimize construction design scheme of coal seams hydraulic fracturing.Moreover,it can save a lot of design and construction cost,and produce good economic and social benefits.Radio wave tunnel penetration method has many advantages,such as maturity of geophysical method, simplicity of operator, portable instrument,and high accuracy of detection results.This method has been used to evaluate fracturing effect of mining faces of the same coal seam in underground coal mine and obtained good results.Hence it is worthy of popularization and application.

Key words: hydraulic fracturing;radio wave tunnel penetration method;comparative exploration;fracturing effect evaluation;quantitative evaluation method

(本文编辑:叶佩)