

地质与测量

基于楔形模型分析煤厚与地震振幅属性关系

邹冠贵 彭苏萍 郝小霞 张 健 王 磊

(中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083)

摘 要:为实现通过地震振幅属性预测煤层厚度,采用交错网格有限差分方法建立楔形模型,研究结果表明:楔形厚度小于楔形地震波波长的 $1/4$ 时,顶界面反射波波形随着楔形厚度的增大而逐渐与底界面波形分开,不仅有顶底干涉,还有楔形内部的层间多次波干涉,这是引起地震振幅属性变化的原因,振幅属性与楔形厚度主要是负相关的关系。楔形厚度大于楔形地震波波长的 $1/4$ 时,煤层顶底板界面的反射波波形完全分开。通过地震振幅属性预测寺河煤矿煤层厚度可知,矿区西采区中部向斜轴部煤层较厚,勘探区西部煤层相对较薄,煤层厚度与振幅包络为负相关,与楔形模型分析结果一致。

关键词:交错网格有限差分;楔形模型;地震振幅属性;煤层厚度预测

中图分类号: P631.4

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2014)04-0088-04

Analysis on Relationship Between Seam Thickness and Seismic Amplitude Attribute Based on Wedge Model

ZOU Guan-gui, PENG Su-ping, HAO Xiao-xia, ZHANG Jiang, WANG Lei

(National Key Lab of Coal Resources and Safety Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to predict a seam thickness with a seismic attribute, a staggered-grid finite difference method was applied to establish a wedge model. The study results showed that when a wedge thickness was $1/4$ less than the wedge seismic wavelength, the reflected wave pattern of the top interface would be steadily separated from the bottom interface wave pattern with the wedge thickness increased, there would be interferences from the roof and floor and there would be many time seismic wave interferences from the interlayer within the wedge and thus this was the reason to cause the variation of the seismic amplitude attribute. There was a negative related relationship mainly between the amplitude attribute and the wedge thickness. When a wedge thickness was $1/4$ higher than the wedge seismic wavelength, the reflected wave pattern of the seam roof and floor interfaces would be completely separated. The seam thickness could be understood with the prediction of the seismic amplitude attribute. The thickness of syncline axial seam in the middle of the west mining block in the mining area was thick and the thickness of the seam in west part in the exploration region was thin relatively. The seam thickness and the amplitude envelope were negatively related and were the same to the analysis results of the wedge model.

Key words: staggered-grid finite difference; wedge model; seismic amplitude attribute; prediction of seam thickness

0 引 言

煤厚变化对煤炭资源量、煤炭开采有重要影响,煤层厚度变化较大。例如,含煤地层受到河流冲刷作用,出现大量的无煤区^[1],或受到岩浆岩侵入影响出现大面积薄煤区。部分矿区煤层瓦斯涌出量与

煤层厚度变化关系密切^[2]。利用地震数据预测煤层厚度,由于地震数据具有横向采样密集性特征,有利于提高煤厚的预测精度。为了认识地震振幅属性与煤层厚度的关系,一般采用楔形模型的交错网格有限差分方法,该方法的实质是根据泰勒级数将偏导数转化成差分格式^[3],构建应力-速度一阶方

收稿日期: 2013-12-10;责任编辑: 杨正凯 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2014.04.023

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAB13B01, 2012BAC10B03); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013QM02); 中国地质调查局资助项目(1212011220798, 1212011220188)

作者简介: 邹冠贵(1981—),男,福建龙岩人,讲师,博士。Tel: 18600544933, E-mail: cumtzgg@foxmail.com

引用格式: 邹冠贵,彭苏萍,郝小霞,等.基于楔形模型分析煤厚与地震振幅属性关系[J].煤炭科学技术,2014,42(4):88-91,100.

ZOU Guan-gui, PENG Su-ping, HAO Xiao-xia et al. Analysis on Relationship Between Seam Thickness and Seismic Amplitude Attribute Based on Wedge Model[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(4): 88-91, 100.

程, 提高地震模拟的精度和稳定性, 并消除了部分假频现象^[4-6]。通过数值模型, Widess^[7]认为顶底板反射分辨极限为 $1/8$ 波长(波长为煤层顶底板反射层内的地震波波长)。Kallweit 等^[8]提出地震波在煤层顶底板反射的分辨率极限为 $1/4$ 波长。唐文榜^[9]认为煤层顶底板界面的反射系数较大, 可以分辨薄层的极限厚度为 $1/12$ 波长。刘天放等^[10]认为煤层厚度正比于煤层反射波振幅谱积分与地震子波振幅谱一阶距的比值。戚敬华^[11]采用振幅谱法反演煤层厚度, 在安徽淮南潘集煤矿对煤层厚度进行了计算。程增庆等^[12]在淮南潘三煤矿对比子波主频微分谱算法和稳健波形反演法计算煤层厚度的效果, 认为后者有利于推广。董守华等^[13]分析了煤层厚度与地震振幅、频率属性的关系, 认为煤层厚度在 $0 \sim 8$ m 时, 地震振幅和频率属性与煤层厚度之间为一个单调非线性关系。上述文献主要从模拟或者理论角度分析了煤层厚度的可分辨范围, 认为通过地震波可以分辨煤层厚度变化, 地震振幅、频率属性与煤层厚度关系密切, 尤其是地震振幅属性关系稳定, 对于煤层厚度的预测工作具有重要指导意义, 但目前缺乏大量实际数据的验证。基于此, 笔者通过交错网格有限差分方法建立楔形模型, 分析了楔形顶界反射波的 7 种地震振幅属性与楔形厚度的关系, 并利用寺河煤矿 56 个见煤点数据进行验证, 验证了地震振幅属性与煤层厚度关系密切。

1 交错网格有限差分方法建立楔形模型

1) 消除边界反射。消除边界反射是地震波数值模拟中的重要内容, 完全匹配层(PML)吸收边界条件是目前比较成熟的方法之一^[14]。构造各向同性介质的 PML 吸收边界条件, 首先需要根据算子分解的思想, 把应力-速度弹性波方程进行分解, 并在 x 方向和 z 方向引入阻尼因子, 然后将方程转化成频率域, 并引入一个复数因子将直角坐标扩展为复数坐标, 再做反傅里叶变换, 得到时间域的介质 PML 吸收边界条件。笔者设置了 20 个 PML 层, 数值模拟结果显示边界反射已被消除, 效果良好。

2) 震源设置。震源是弹性波场数值模拟中非常重要的一部分内容, 常用的子波函数如下: ① Ricker 子波的算法为 $(1 - 2\pi^2 f_0^2 t^2) e^{-\pi^2 f_0^2 t^2}$, 其中: f_0 为地震子波的中心频率; t 为时间。② 零相位带通子波算法为 $2\sin(2\pi\Delta f t) \cos(2\pi f_0 t) / \pi t$, 其中: Δf 为高低截频之差的 $1/2$ 。③ 余弦子波的算法为 $\cos(2\pi f_0 t)$

e^{-at} , 其中 a 为衰减系数。④ 有限带宽脉冲点震源的算法为 $e^{-a(t-t_0)^2}$ 。

在各向同性介质中, 震源的加载, 既可以加载在速度分量上, 也可以加载在应力分量上。把震源放置在应力分量上, 称为应力源; 也可以加载到固体和流体质点的速度分量上, 称为速度源。根据介质地震波传播理论, 地震波在介质中传播, 主要是受到了力的作用, 因此, 这里使用 Ricker 子波, 并设置为应力源。需要注意的是, 震源的主频是一个与模型的网格、频散密切的联系在一起的参数。当模型中介质参数一定时, 随着震源主频提高, 空间网格和时间步长都要变小, 才能取得较好的模拟结果。

3) 稳定性条件分析。虽然在进行交错网格有限差分时, 采用高阶精度差分, 计算表明截断误差是很小的, 然而, 由于计算是按照时间层、空间层从小到大逐层推进, 误差存在累积效应, 比如, 以时间层为例, 计算到第 $n+1$ 层上的值要用到第 n 层、第 $n+0.5$ 层上计算出来的结果, 而第 n 层、第 $n+0.5$ 层的舍入误差, 必然会影响到第 $n+1$ 层的值, 随着 n 的增大, 误差逐渐累积。这是分析这种误差传播情况的必要性, 即稳定性条件分析。根据交错网格高阶差分解法的稳定性分析, 可以得到稳定性条件^[14]为 $\Delta t \sqrt{\nu_p^2 + \nu_s^2} \leq \min(\Delta x, \Delta z)$, 其中: Δt 为时间步长; ν_p 是介质的纵波速度; ν_s 是横波速度; Δx 、 Δz 分别为 x 和 z 方向的空间步长。稳定型条件对于内部计算区域是可靠的, 然而, 对于 PML 吸收边界理论上需要不同的稳定型准则, 在实际的数值模拟中只要条件满足, 可以保证 PML 边界条件方程的稳定性^[14-15]: $\Delta t \sqrt{2\nu_p} \leq \min(\Delta x, \Delta z)$ 。

4) 频散分析。地震波的频散是指地震波的不同频率分量以不同的速度传播, 随着传播时间的推移地震波扩散成为更长波列的现象。在数值模拟中, 遇到低速体时, 可以通过在横向上采用大网格, 在纵向上采用小网格, 达到压制数值频散的效果^[16]。地震波在煤层的内传播速度约为 2 000 m/s, 在煤层顶底板的传播速度约为 3 500 m/s, 差异较大, 构成一个低速体, 容易产生频散现象。此时, 采用在横向上加大网格密度的方法, 也能取得较好 y 的效果。需要注意的是由于空间网格的大小、时间步长改变能影响数值模拟的稳定性, 因此还需要综合考虑这些参数对数值模拟稳定性的影响。

2 楔形模型模拟结果分析

基于交错网格有限差分建立楔形模型,进行了消除边界条件、震源设置、稳定性条件、频散等分析,设计楔形各向同性模型。楔形顶界面为800 m,楔形的最大厚度达40 m。模型网格划分为 $1\ 100 \times 4\ 000$,网格大小为1 m,震源为纵波震源,震源主频为80 Hz,时间采样为2 ms,空间和时间精度分别为10阶和2阶,匹配层厚度为20个网格,背景介质纵波速度为3 000 m/s,密度为 2.2 g/cm^3 ,楔形的纵波速度为2 000 m/s,密度为 1.94 g/cm^3 。

地震波经过楔形模型的顶底界面时,随着楔形模型的厚度增大,能很好地分辨出顶底界面的地震

反射波;同时,在楔形模型厚度达到楔形地震波波长的 $1/4$ 之前,顶界面的反射波波形随着楔形厚度的增大而逐渐与底界面波形分开,在 $1/4$ 波长以后的楔形位置,顶底界面的反射波波形与底界面反射波波形完全分开。

同一空间位置不同时刻 t 的波形快照如图1所示,通过波场快照可以看到由于楔形顶底界面的波阻抗差异较大,形成了楔形内部的层间多次波,该多次波的能量随着楔形厚度的增大而逐渐增大。这些现象表明,对于煤层的地震勘探而言,求取煤层厚度的变化,必须考虑煤层顶底板的干涉作用,在楔形模型厚度较小的区域,煤层顶底板层间多次波对反射波存在影响,有必要进一步研究。

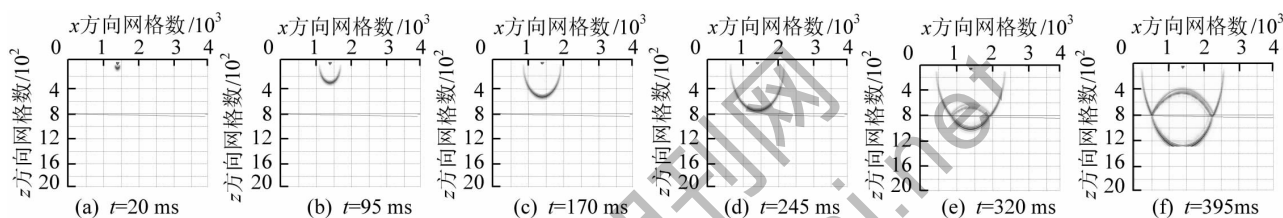


图1 同一空间位置不同时刻 t 的波场快照

3 煤层厚度与地震振幅属性关系分析

根据模型的参数设置可知,煤层中的波长为25 m,因此在模型中取前250道代表楔形2 500 m的长度,道间距为10 m,TRC63对应 $1/4$ 楔形厚度,也是 $1/4$ 波长(6.250 m)的位置。从记录上可以看出,在楔形厚度小于 $1/8$ 波长(3.125 m)时,楔形的顶底板难以区分,在 $1/8$ 波长到 $1/4$ 波长间,楔形的顶底板主要是为复合波,在大于 $1/4$ 波长的厚度时,楔形的顶底板能够明显的区分。

追踪楔形的顶界面反射波,分别提取7个振幅地震属性,每种属性的提取时窗分别以层位为中心,时窗长度分别为2、6、10、20 ms,提取的地震属性存在一个异常值,主要是由于该点处的楔形厚度为零,不存在反射波,因此表现为一个异常点。通过地震振幅属性随着楔形厚度的变化可以看出,除能量属性外,其余地震属性与楔形厚度的关系明显,尤其是楔形厚度在 $1/4$ 波长时,受楔形顶底反射波干涉,引起地震振幅发生变化,体现为明显的线性关系,超过 $1/4$ 波长后的楔形反射波,振幅未见明显的变化,主要是由于楔形顶底的反射波已经逐步分离,彼此影响较小。其中,在楔形厚度小于 $1/4$ 波长时,振幅属性随着楔形厚度增大而增大,称为正相关,振幅属性

随着楔形厚度增大而减小,称为负相关。

均方根振幅与楔形厚度表现为负相关,平均振幅在时窗为6、10 ms时,其属性与楔形厚度是负相关,时窗为2、20 ms时,其属性与楔形厚度为负相关;振幅绝对值的平均与楔形厚度表现为负相关;最大振幅属性与楔形厚度表现为负相关,由于楔形顶部反射波的振幅强,最大振幅属性的提取与时窗无关;振幅绝对值的最大值属性与楔形厚度为负相关;时窗为2、6 ms时2个属性一样,随着时窗的增大,属性值增大,其原因可能是负相位的振幅值较大,因此振幅绝对值也增大;最小振幅属性的值与时窗关系密切,主要是时窗大小,可能出现不同相位,从而产生不同的属性值,其与楔形厚度可能为正相关,也可能为负相关。总体上,振幅属性与楔形厚度的关系主要是负相关。

4 寺河煤矿煤层厚度与地震属性关系

通过整理西采区一块段的钻孔资料可知,主采3号煤层厚度的钻孔共为56个(表1)。沿3号煤层顶板追踪反射波,开20 ms时窗提取地震属性,共计算西采区内的地震属性31个,根据统计分析,煤层厚度与振幅包络、振幅平均、正交道、波形长度、余弦相位、瞬时相位、频率属性所具有的相关系数分别为

-0.637 0、-0.579 6、-0.484 4、0.369 3、-0.318 2、-0.306 9、0.203 9,可以看出实际煤层厚度与振幅平均的相关系数为 -0.579 6,与地震振幅包络的相关性为 -0.637 0,同时,也出现了与地震属性之间具有相关的正交道等其他属性。煤层厚度与地震属性的负相关结果,与数值模拟分析结果一致。其中,通过振幅求取煤层厚度,选择具有较好相关系数的地震属性,采用克里金内插(Kriging)法,获得勘探区内的煤层厚度分布。

表 1 寺河矿西采区 3 号煤层厚度统计

序号	钻孔	煤层厚度	序号	钻孔	煤层厚度	序号	钻孔	煤层厚度
1	YH-015	5.73	20	SHX-179	6.35	39	SHX-163	6.85
2	YH-009	5.69	21	SHX-175	6.42	40	SHX-158	6.57
3	YH-010	5.69	22	SHX-180	5.40	41	SHX-164	6.72
4	YH-006	5.65	23	SHX-181	6.55	42	SHX-152	6.42
5	YH-007	5.60	24	SHX-170	6.95	43	904	5.87
6	YH-003	5.65	25	SHX-174	6.35	44	905	6.10
7	YH-002	5.65	26	SHX-171	6.35	45	906	5.95
8	YH-012	6.10	27	SHX-172	6.32	46	907	6.23
9	YH-004	5.86	28	SHX-176	6.35	47	110	5.85
10	YH-005	5.86	29	SHX-173	6.53	48	115	7.22
11	YH-008	5.85	30	SHX-177	6.62	49	126	6.00
12	YH-011	5.85	31	SHX-168	6.75	50	1001	5.60
13	YH-016	5.83	32	SHX-167	6.18	51	1002	6.19
14	YH-017	6.14	33	SHX-162	5.83	52	1003	6.29
15	SHX-184	6.35	34	SHX-166	6.72	53	1004	6.10
16	SHX-183	6.13	35	SHX-161	6.63	54	1005	5.40
17	SHX-187	6.10	36	SHX-165	6.70	55	1101	6.00
18	SHX-182	6.38	37	SHX-156	6.70	56	1102	6.40
19	SHX-178	6.58	38	SHX-157	6.48	—	—	—

根据优选地震属性,通过 Kriging 法内插获得西采区一块段煤层厚度分布如图 2 所示。总体上看勘探区中部向斜轴部煤层较厚,勘探区西部,也就是煤层背斜的西翼相对较薄。中部 SHX-165 孔、SHX-170 孔、115 孔、SHX-168 孔附近煤层厚度皆在 6.7 m 以上,最大达到 7.22 m,西部 YH-006 孔、YH-007 孔、1001 孔附近的煤层厚度皆在 5.7 m 以下,最小为 5.59

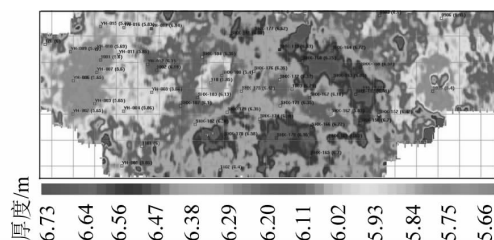


图 2 寺河矿西采区 3 号煤层厚度趋势

m,其余孔附近煤层厚度在 5.6~7.0 m。

5 结 论

1) 以煤层为楔形,各向同性模型的数值模拟分析表明:在楔形模型厚度达到楔形地震波波长的 1/4 之前,顶界面的反射波波形随着楔形厚度的增大而逐渐与底界面波形分开,在 1/4 波长以后的楔形位置,顶底界面的反射波波形与底界面反射波波形完全分开。楔形顶底板反射波干涉,以及楔形内的多次波,是引起地震波振幅变化的原因,为提供煤层厚度的振幅信息提供了物理基础。

2) 楔形模型的振幅属性分析表明,楔形厚度小于 1/4 波长时,除半能量属性外,其余地震振幅属性与楔形厚度的关系明显,超过 1/4 波长后的楔形反射波,振幅未见明显的变化。总体上,地震振幅属性与楔形厚度的关系主要是负相关的关系。

3) 通过分析寺河矿区实际地震属性与煤层厚度之间关系可知,在寺河矿区煤层厚度与振幅包络为负相关,最大相关系数为 -0.637 0,以此进行厚度预测,煤层厚度结果从总体上看勘探区中部向斜轴部煤层较厚,勘探区西部煤层背斜的西翼相对较薄。

参考文献:

- [1] 鲁 静,邵龙义,孙 斌,等.鄂尔多斯盆地东缘石炭-二叠纪煤系层序-古地理与聚煤作用[J].煤炭学报,2012,37(5):747-754.
- [2] 王 亮,程远平,翟清伟,等.厚硬火成岩下突出煤层动力灾害成因研究[J].煤炭学报,2013,38(8):1368-1375.
- [3] Alterman Z, Karal J F C. Propagation of Elastic Waves in Layered Media by Finite-Difference Methods[J]. Bull Seism Soc Am, 1968, 58:367-398.
- [4] Virieux J. P-SV Wave Propagation in Heterogeneous Media: Velocity-Stress Finite-Difference Method[J]. Geophysics, 1985, 51(4):889-901.
- [5] Francis Collino, Chrysoula Tsogka. Application of the Perfectly Matched Absorbing Layer Model to the Linear Elastodynamic Problem in Anisotropic Heterogeneous Media[J]. Geophysics, 2001, 66(1):294-307.
- [6] 刘 璐,刘 洪,刘红伟.优化 15 点频率-空间域有限差分正演模拟[J].地球物理学报,2013,56(1):644-652.
- [7] Anon. Widess. How Thin is a Thin Bed? [J]. Geophysics, 1973, 38:1176-1180.
- [8] Kallweit R S, Wood L C. The Limits of Resolution of Zero-Phase-wavelet[J]. Geophysics, 1982, 47:1035-1046.
- [9] 唐文榜.地震反射法中薄煤层分辨能力的研究[J].地球物理学报,1987,30(6):641-652.

(下转第 100 页)

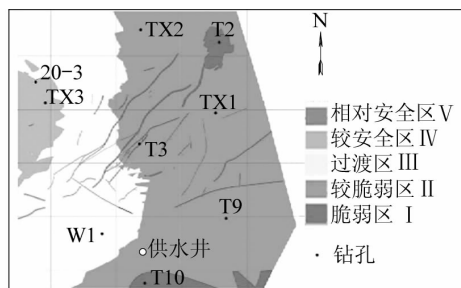


图4 10+11号合并煤层突水脆弱性评价

效隔水层等效厚度相对较厚(5.80~6.10 m),隔水层承受奥灰水压较小(0.42~0.70 MPa);矿压破坏带发育深度相对较小(16.93~17.20 m),古风化壳、富水性影响不甚显著,总体导致奥灰水突水的可能性不大,属较安全区。②在矿区中西部的浅白色区域内,奥灰水压力几乎没有发生变化(1.0~1.4 MPa),但古风化壳从西向东逐渐变薄(0.9~1.9 m),底板有效隔水层厚度逐步减小(4.8~5.8 m),富水性影响不甚显著,综合分析将此区域划分为较安全区到较脆弱区的过渡区。③在矿区东部较深色区域内,隔水层承受水压较大(1.00~2.02 MPa),尤其是在矿区的东南和东北两区域隔水层承受水压较大,有效隔水层等效厚度也相对较薄(4.5~5.1 m),脆弱性岩厚度也相应减小为0.05~0.45 m,古风化壳有效厚度也相应减小为0.9~1.5 m,导致此区域处于有发生突水可能性的较脆弱区。④在矿区东南部和钻孔、断层和褶皱等构造的深色区域内,由于这些构造的存在破坏了隔水地层的连续性,它们可能会作为导水通道直接或间接把奥灰水引入工作面造成严重后果,故确定为脆弱区。

3 结 论

1) 通过对地质条件和水文地质条件等资料的分析,确定出影响下组煤层底板奥灰突水的主要控制因素:奥陶系峰峰组含水层水压、奥陶系峰峰组含水层富水性、有效隔水层等效厚度、矿压破坏带以下脆性岩的厚度、含水层顶部的古风化壳厚度、断层褶皱的分布、断层褶皱交点和端点的分布、断层规模指数、矿压破坏带深度。利用层次分析法确定出对应各主控因素的权重。

2) 建立了下组煤层底板奥灰突水的脆弱性评价模型,统一确定了底板奥灰突水脆弱性分区阈值;通过拟合验证,得出10+11号煤层底板奥灰突水脆弱性评价分区图,并确立了矿井突水威胁的相对安全区、较安全区、过渡区、较脆弱区和脆弱区等区域。

3) 通过评价结果分析,建议采掘施工前必须做好水害预测预报工作,坚持“预测预报、有掘必探、先探后掘、先治后采”的原则,做好水害排查制度,加强日常管理工作,完善矿井现有排水系统;利用物探、钻探等手段查明构造具体富水性,进一步完善地下水动态观测网等,特别是在接近构造等区域时,要引起高度重视和采取必要措施。

参考文献:

- [1] 武强,张志龙,马积福.煤层底板突水评价的新型实用方法I:主控指标体系的建设[J].煤炭学报,2007,32(1):42-47.
- [2] 武强,张志龙,张生元.等.煤层底板突水评价的新型实用方法II:脆弱性指数法[J].煤炭学报,2007,32(11):1121-1126.
- [3] 武强,解淑寒,裴振江.等.煤层底板突水评价的新型实用方法III:基于GIS的ANN型脆弱性指数法应用[J].煤炭学报,2007,32(12):1301-1306.
- [4] 武强,王金华,刘东海.等.煤层底板突水评价的新型实用方法IV:基于GIS的AHP型脆弱性指数法应用[J].煤炭学报,2009,34(2):233-238.
- [5] 武强,庞炜,戴迎春.等.煤层底板突水脆弱性评价的GIS与ANN耦合技术[J].煤炭学报,2006,31(3):314-319.
- [6] 李沛涛,武强,崔芳朋.等.煤层底板突水定量预测评价研究[J].煤炭科学技术,2011,39(10):121-124.
- [7] 武强,杨柳,朱斌.等.“脆弱性指数法”在赵各庄矿底板突水评价中的应用[J].中国煤炭地质,2009,21(6):40-44.
- [8] 武强,刘守强,贾国凯.脆弱性指数法在煤层底板突水评价中的应用[J].中国煤炭,2010,36(6):16-22.
- [9] 武强,王志强,赵增敏.等.油气田区承压含水层地下水污染机理及其脆弱性评价[J].水利学报,2006,37(7):851-857.
- [10] 王凌鹤,李进朋,王建忠.脆弱性指数法在沙曲矿上组煤突水性预测评价中的应用[J].中国煤炭,2011,37(8):42-45.

(上接第91页)

- [10] 刘天放,陈斌,付金生.地震反射煤厚的谱距法及其应用[C]//煤田地球物理岩性勘探技术文集.北京:煤炭工业出版社,1996:147-151.
- [11] 戚敬华.由地震剖面直接反演煤层厚度的方法[C]//煤田地球物理岩性勘探技术文集.北京:煤炭工业出版社,1996:126-134.
- [12] 程增庆,吴奕峰,赵忠清.等.地震反射波定量解释煤层厚度的方法[J].地球物理学报,1991,34(5):657-663.
- [13] 董守华,马彦良,周明.煤层厚度与振幅、频率地震属性的正演模拟[J].中国矿业大学学报,2004,33(1):32-35.
- [14] 赵海波,王秀明,王东.等.完全匹配层吸收边界在孔隙介质弹性波模拟中的应用[J].地球物理学报,2007,50(1):581-591.
- [15] 戴国强,余震虹,高磊.等.时域有限差分方法的研究[J].现代电子技术,2013(1):140-143.
- [16] 孙成禹,宫同举,张玉亮.等.波动方程有限差分法中的频散与假频分析[J].石油地球物理勘探,2009,44(1):43-48.