

# 地震体曲率在采煤工作面断层重预测中的应用

Application of Seismic Volumetric Curvatures in Fault Re-prediction of Coal Faces

蒋学明<sup>1</sup>, 刘 硕<sup>2</sup>, 马国军<sup>1</sup>, 王思云<sup>1</sup>, 王柱国<sup>1</sup>, 孙吉明<sup>1</sup>

(1. 宁夏宁鲁煤电有限责任公司, 宁夏 灵武 751411; 2. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077)

**摘要:**采煤工作面形成后,巷道新揭露的断层必然与三维地震数据的解释成果存在一定差异,需在回采前对工作面内断层重新预测。三维地震数据中包含了大量未曾发现的有用信息,若能将巷道实际揭露情况与三维地震数据相结合开展断层重预测,必能有效提高重预测结果的准确性和适用性。体曲率为工作面断层重预测提供了简便方法,根据揭露断层的产状确定计算参数,由叠后地震剖面生成体曲率属性,属性体的顺煤层切片能够有效反映目标断层形态。采用任家庄110905工作面三维地震数据和回风巷、运输巷断层测量数据开展验证,结果表明:由揭露断层的实测落差获得波长参数,由此参数生成的体曲率属性能够较好的反映出DF6与DF12及伴生断层在110905工作面内的延展情况,可为断层预测和回采方案调整提供可靠依据。

**关键词:**体曲率;采煤工作面;断层预测;地震属性

**中图分类号:**TD823 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-609X(2024)05-0041-05

**Abstract:** After the formation of a coal face, there will inevitably be some differences between the exposed faults in roadways and the interpretation result of the 3D seismic data. It is necessary to re-predict faults in the face before mining. The seismic data contains much useful information that has not been discovered. If the exposure of faults can be combined with the 3D seismic data to re-predict faults. It will effectively improve the accuracy and applicability of the re-prediction results. The volumetric curvature provides a simple method for re-predicting faults in coal faces. The calculation parameters are determined based on the occurrence of the exposed faults, and the volumetric curvature attributes are generated from the stacked seismic section. The slice along the coal seam of the attribute body can effectively reflect the shape of the target fault. The validation was conducted using 3D seismic data and faults measurement data from the two roadways of the Renjiazhuang 110905 coal face. The result showed that the wavelength parameters were obtained from the measured exposed faults. The volumetric curvature attributes generated from these parameters can better show the extension of the DF6, the DF12, and other associated faults in the 110905 coal face. It will provide a reliable basis for fault prediction and adjustment of mining plans.

**Key words:** volumetric curvature; coal face; fault prediction; seismic attribute

## 1 前言

断层是煤矿开采需要面对的主要地质问题之一,是诱发煤矿安全事故的重要因素。开展采区的三维地震勘探工作是查明采区内断层分布情况的有效手段,能够为采掘方案提供重要的设计依据<sup>[1]</sup>。然而,三维地震勘探成果中断层的位置与产状等解释成果与实际情况必然存在一定的差异。在采煤工

作面的回风巷与运输巷贯通后,巷道中揭露的断层能够为三维地震勘探结果提供校正的依据<sup>[2-3]</sup>。根据实际揭露的断层产状信息在地震波中寻找波形特征,再以此波形特征为参数重新对地震数据进行处理和解释,所得到的工作面内断层等异常地质构造的解释成果将会更加准确、更接近实际地质情况<sup>[4]</sup>。

[作者简介] 蒋学明(1965—),男,银川人,硕士,高级工程师,研究方向为采煤安全。

[基金项目] 国家重点研发计划(2020YFB1314002);国家自然科学基金面上项目(41974209);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2022JM-159)。

[引用格式] 蒋学明,刘硕,马国军,等.地震体曲率在采煤工作面断层重预测中的应用[J].中国矿山工程,2024,53(5):41-45.

曲率属性能够有效反映地层的局部弯曲程度,因此常用于刻画断层、裂缝、褶曲和河道等具有明显横向变化的地质构造<sup>[5-6]</sup>。曲率属性的计算最初由层位数据直接计算<sup>[7]</sup>。由于没有有效利用地震资料的振幅属性,曲率计算结果的准确性依赖于层位解释的质量<sup>[8]</sup>。在噪声和采集脚印的影响下,识别层位的工作较为困难,这将严重影响曲率属性的计算和解释的准确性<sup>[9]</sup>。Al-Dossary 和 Marfurt 等提出了体曲率的计算方法<sup>[10]</sup>,不使用层位信息,而是利用地震数据体的振幅信息,通过计算窗口内同相轴倾角的导数获得曲率属性。因此,由地震数据获得的体曲率具有更高的准确性和客观性。

计算体曲率时需选取合适的波长,不同的波长可用于描绘不同尺度的地质特征<sup>[11]</sup>。波长越小对裂隙和小断层的刻画能量越强,但却容易遗漏较大断层。反正,则会遗漏小断层。因此根据合适的波长参数计算体曲率,对提高断层解释的准确性具有重要作用<sup>[12]</sup>。在煤矿的采区勘探阶段,由于地层内的断层尺度未知,难以准确选取计算曲率的波长<sup>[13]</sup>。而在采煤工作面形成后,两条巷道已揭露部分断层,且断层的位置和产状信息可由测量获得,此时再根据测量值设置合适的波长参数,以此参数在地震数据中重新生成体曲率,则新的体曲率属性将更准确的反映工作面内的断层发育情况,从而为工作面的安全高效回采提供有力保障。

## 2 体曲率的原理

曲线的曲率是表征曲线上某一点变形弯曲程度的二维参数。在数学上,曲线的曲率可表示为某点的角度与弧长变化率的比值。曲线弯曲越严重则曲率就越大<sup>[14]</sup>。如图1所示,当地层为背斜或隆起时,法向量为发散状态,此时曲率为正;当地层为向斜或凹陷时,法向量为收敛状态,此时曲率为负;当地层为水平或以单一角度倾斜时,曲率为0。通过对曲率属性的研究,可以指示断层及构造的是否存在并描述其大致的几何形态<sup>[15]</sup>。

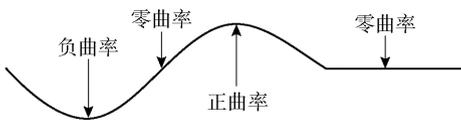


图1 曲率属性示意图

三维曲面的曲率有多种定义,其中平均曲率、主曲率和高斯曲率是曲率的三个基本要素<sup>[16]</sup>。实际

工程中经常使用的是最大正曲率  $k_{pos}$  和最小负曲率  $k_{neg}$ ,能够有效反映地层的弯曲和断裂情况<sup>[17]</sup>。

对于一个二维曲面,可以用最小二乘拟合或其他方法拟合得到一个二次方程

$$S(x, y) = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f \quad (1)$$

其中,  $x$ 、 $y$  和  $z$  分别表示曲面的三个坐标方向。设  $p$  为  $x$  轴方向上视倾角,  $q$  为  $y$  轴方向上的视倾角, 则:

$$p = \frac{\partial z}{\partial x}, \quad q = \frac{\partial z}{\partial y} \quad (2)$$

公式(1)参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$  和  $f$  可以由视倾角  $p$  和  $q$  按以下公式求得:

$$\begin{aligned} a &= \frac{\partial p}{2 \partial x} \\ b &= \frac{\partial q}{2 \partial y} \\ c &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} \right) \\ d &= p \\ e &= q \end{aligned} \quad (3)$$

公式(3)中的  $\partial p / \partial x$ 、 $\partial q / \partial y$  分别表示视倾角  $p$  和  $q$  的一阶偏导数。过曲面上某点存在无数条曲线,对应无数个曲率值。选取其中的最大正值和最小负值分别为最大正曲率  $k_{pos}$  和最小负曲率  $k_{neg}$ ,代表了曲面上某点在所有方向上倾角变化最剧烈的值。最大正曲率  $k_{pos}$  和最小负曲率  $k_{neg}$  可按下式计算:

$$\begin{aligned} k_{pos} &= (a + b) + \sqrt{(a - b)^2 + c^2} \\ k_{neg} &= (a + b) - \sqrt{(a - b)^2 + c^2} \end{aligned} \quad (4)$$

传统的求取曲率值的过程是在层位数据上进行的<sup>[18]</sup>。Al-Dossary 和 Marfurt 等将这个过程放在叠后地震剖面上进行,其中  $p$  和  $q$  分别表示在 Inline 和 Xline 剖面上同相轴的倾角。另一方面,将公式(3)中同相轴倾角的一阶导数替换为“分数导数”:

$$F_{\alpha} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) = -i(k_x)^{\alpha} F(p) \quad (5)$$

算子  $F$  表示傅里叶变换,  $k_x$  表示沿  $x$  轴的波数,  $i$  是虚数单位。参数  $\alpha$  控制了波长特性,减少的  $\alpha$  值能够更加突出长波长的地质特征。

曲率是三维地震解释中重要的属性,常与相干体、方差体、蚂蚁体等多种体属性技术相结合用于目标地层内不同序级的构造的精确解释。与其他属性

体相比,曲率计算结果稳定,且对小断层预测精度较高,对地震数据中隐含的几何特征、振幅或相似性的空间变化有较强的敏感性,因此曲率在小断层、微断裂的识别方面具有独特优势,且受噪声及采集脚印的影响较小。另外,曲率具有在二维平面图上显示三维地貌的效果,在油气勘探中具有重要意义,能够应用于海上含油气盆地海底扇水道等构造特征的精细刻画<sup>[19]</sup>。

### 3 采煤工作面断层的重预测

对煤层而言,由于煤层相对于顶底围岩具有更小的厚度,通常表现为一个薄层,更适于采用曲率描述煤层的弯曲程度和其中的构造特征<sup>[20]</sup>。煤层在 seismic 剖面上一般表现为较强的同相轴。煤层内的较大断层表现为同相轴的明显错开,而较小断层表现为同相轴的微小错开、扭曲等特征<sup>[21]</sup>。杜文凤等使用煤层的层曲率预测煤层内的小断层<sup>[22]</sup>,能够获得较好的预测结果。

煤层的断层预测一般在采区开拓前开展,用以作为采煤工作面布置提供设计依据。而在工作面的掘进阶段,随着巷道的掘进,不断揭露的断层将对根据三维地震数据预测的断层结果进行验证。地测人员一般会根据验证情况对断层预测的结果加以校正,重新预测采煤工作面内的断层分布情况<sup>[23]</sup>。由于对地震数据重新进行处理解释的成本过高,此过程一般由地测人员根据经验完成,不再重新翻看原地震剖面,因此预测的准确性难以保证,这将为工作面的安全回采带来隐患。

体曲率属性为采煤工作面内断层的重新预测提供了方便。由于体曲率属性的计算效率较高,且计算参数可由实际揭露的地质情况估计出,因此当掘进中的巷道揭露新的断层后,可根据巷道实际揭露的断层产状选择适合的处理参数,对工作面涉及到的叠后数据体进行处理。重新生成工作面所在煤层的曲率值,在已有解释成果的基础上,对掘进巷道前方及回采工作面内断层等异常构造进一步开展进行解释,实现构造的重预测,从而提高采煤工作面内断层预测的准确性,保障回采工作的高效和安全。

### 4 任家庄 110905 工作面的体曲率属性

宁夏煤业任家庄矿的首采区三维地震勘探工作于 2004 年开展,采用了  $10\text{ m} \times 5\text{ m}$  的 CDP 网格。受

当时软硬件条件与处理手段的限制,叠后数据体中包含了较为严重的噪声和采集脚印,提取的常规属性体中有较强的相干噪声。如图 2 所示的首采区 9 号煤相干体属性切片,可以看见明显的采集脚印,对断层预测具有较大影响。



图 2 首采区 9 煤相干体属性切片

任家庄矿 110905 工作面走向长度  $1\ 110\text{ m}$ ,倾向长度  $288\text{ m}$ ,工作面标高  $+800 \sim +935\text{ m}$ ,地面标高  $+1\ 328 \sim +1\ 338\text{ m}$ 。110905 工作面主采 9 号煤层,煤层平均厚度为  $5.74\text{ m}$ ,其中含两层小于  $0.5\text{ m}$  的夹矸。工作面整体处于简单的单斜构造中,煤层倾向为  $58^\circ \sim 118^\circ$ ,倾角为  $17^\circ \sim 21^\circ$ 。煤层顶部为石灰岩和泥岩,底板为泥岩和粉砂岩。

任家庄矿 110905 工作面风巷和机巷在掘进过程中揭露了多条断层,其中将会对回采工作造成较大影响的是风巷揭露的 DF6 断层与 DF12 断层。DF6 断层在风巷的素描图如图 3(a)所示,为正断层,揭露点断层落差  $14\text{ m}$ ,倾角  $62^\circ$ 。附近区域伴生有大量的的小断层。煤层在 DF6 断层处呈现向斜特征,应具有较小的负曲率。

DF12 断层在风巷的素描图如图 3(b)所示,为逆断层,揭露点断层落差  $18\text{ m}$ ,倾角  $72^\circ$ 。DF12 在机巷的素描图如图 3(c)所示,揭露点断层落差  $12\text{ m}$ ,倾角  $60^\circ$ 。可以看出,两条巷道在 DF12 断层附近均伴生有大量的的小断层,尤其是在风巷内煤层较为破碎,表现为多条倾角接近,落差  $1\text{ m}$  左右的小断层。风巷和机巷煤层在 DF12 断层处均呈现出向斜特征,应具有较小的负曲率。

总体而言,110905 工作面巷道揭露了断层附近煤层的断裂与起伏形态,对回采构成较大影响的断层均呈现向斜特征,具有较小的负曲率,断层落差均在  $10\text{ m}$  以上。

为了更好的掌握 DF6 与 DF12 在两巷之间的采煤工作面内的延伸情况,可根据巷道揭露的特征选取参数并求取体曲率,将最小负曲率属性作为断层

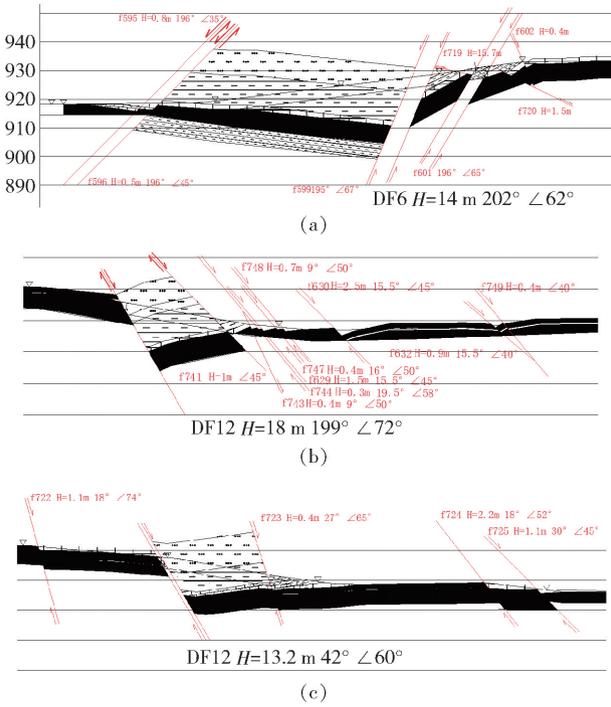


图3 9煤在DF6与DF12断层附近的巷道素描图

预测的依据。

由DF6与DF12断层的落差均在10~20m,则能较好刻画断层的波长范围应为20~40m。由观测系统知此方向网格为5m,则可以计算出对应的波数应为0.125~0.25(周/单位网格)。在0.125~0.25的波数区间,选取 $\alpha=0.5$ 或 $\alpha=0.25$ 较为合适,能够使曲率计算的结果更贴合于此落差范围内的断层。

公式5中的参数 $\alpha$ 设定为0.5后,由公式(3)和公式(4)计算体曲率并生成最小负曲率属性。图4为计算得到的11905工作面最小负曲率图,图中颜色由冷色至暖色对应为最小负曲率逐渐减小。

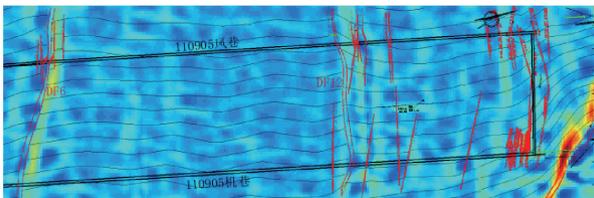


图4 11905工作面最小负曲率属性图

图4中的线条是任家庄矿地测人员根据巷道揭露推断出断层线。对比最小负曲率图可以看出,推断的断层与异常条带基本一致。其中DF6断层下盘线与异常条带边缘一致。DF12断层附近存在大量伴生断层,曲率属性图中存在多条走向基本一致

的异常条带,反映出可能存在多条伴生断层贯通风巷与机巷,这与地质推断有一定差异。曲率属性图中能够反映出多条伴生断层在工作面内的延伸情况,DF12断层较为弯曲,DF12断层附近切眼侧的2条伴生断层则较为平直。另外,曲率属性图在切眼附近同样存在贯通两巷的条带,反映出此处也有可能

### 5 结论

由于煤层的薄层特性,曲率属性能够更好的预测煤层内的断层、陷落柱等具有不连续性的地质构造。体曲率属性在叠后地震剖面上计算产生,与层曲率相比更能够有效地利用地震资料的振幅属性,从而更准确揭示地层内的构造特征。

在采煤工作面形成后,部分断层被工作面巷道与切眼揭露,能够直观的测量出其产状。这些对断层的新认识,可通过设置更为适合的参数重新生成地震属性,进行断层的重预测。对于体曲率,由观测到的断层落差和煤层形态计算目标波长,求出波长参数。根据新的波长参数重新在叠后地震剖面中计算体曲率,由断层表现出来的正负曲率特征提取新的曲率属性,所得到的属性体的顺煤层切片上,能够准确反映出目标断层在工作面内的延展情况,为进一步预测断层和调整回采方案提供依据。

#### [参考文献]

- [1] 董守华,黄亚平,金学良,等. 煤田高密度三维地震勘探技术的发展现状及趋势[J]. 煤田地质与勘探, 2023,51(2):273-282.
- [2] 程裕斌. 潞安矿区地震勘探资料精细解释分析[J]. 中国煤炭地质, 2021,33(1):75-79.
- [3] 吴永辉,虞永征,吴访. 煤矿三维地震小断层精细解释方法与技术[J]. 工程地球物理学报, 2020, 17(2): 177-183.
- [4] 程建远,张宪旭,蒋必辞,等. 从1D到4D:煤田地震勘探的技术进步及启示[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1):247-258.
- [5] 孔选林,李军,徐天吉,等. 三维曲率体地震属性提取技术研究及应用[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(5): 71-75+336.
- [6] 柏冠军,赵汝敏,杨松岭,等. 地震曲率技术在地震资料解释中的应用[J]. 中国工程科学, 2011, 13(5): 23-27.
- [7] Roberts, Andy. Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons [J]. First Break, 2001,

- 19(2): 85 - 100.
- [8] 王世星. 高精度地震曲率体计算技术与应用[J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(6): 965 - 972.
- [9] 李海山, 杨午阳. 基于平面波解构的三维体曲率计算方法[J]. 石油物探, 2018, 57(6): 884 - 891.
- [10] Al-Dossary, Marfurt. 3D volumetric multispectral estimates of reflector curvature and rotation [J]. Geophysics, 2006, 71(5): P41 - P51.
- [11] 张文, 伍新明, 漆杰. 地震几何属性的快速算法实现[J]. 地球物理学报, 2023, 66(8): 3374 - 3390.
- [12] 吕建波. 断层影响下的工作面矿压显现规律[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(4): 62 - 68.
- [13] 盛新丽. 基于三维地震曲率的小断裂识别方法[J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(S1): 109 - 112 + 117.
- [14] 马珊珊. 基于地震数据曲率几何属性的裂缝预测[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [15] 李培培, 赵汝敏, 杨松岭, 等. 构造曲率与振幅曲率在地震资料解释中的应用[J]. 物探与化探, 2013, 37(5): 916 - 920.
- [16] 伍鹏. 地震相干和曲率属性识别断层技术研究与应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- [17] 杨威. 曲率属性分析及其应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- [18] Sigismondi, Soldo. Curvature attributes and seismic interpretation: Case studies from Argentina basins [J]. Leading Edge, 2003, 22(11): 1122 - 1126.
- [19] 钟家良, 张贺举, 高弘毅, 等. 测线倾角曲率在构造精细刻画中的应用[J]. 石油化工应用, 2023, 42(3): 108 - 111.
- [20] 单蕊. 倾角曲率属性在煤层巷道识别中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(5): 197 - 203.
- [21] 刘增平. 基于高密度三维地震勘探技术的断层识别[J]. 能源与环境, 2022(3): 28 - 29 + 43.
- [22] 杜文凤, 彭苏萍. 利用地震层曲率进行煤层小断层预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(S1): 2901 - 2906.
- [23] 付雪峰, 严浩铭. 缓斜厚煤层掘进工作面断层预测技术研究与应用[J]. 煤炭工程, 2023, 55(1): 37 - 40.

(上接第36页)

- [10] 鞠杨, 左建平, 宋振铎, 等. 煤矿开采中的岩层应力分布与变形移动的 DDA 模拟[J]. 岩土工程学报, 2007(2): 268 - 273.
- [11] 杨建华, 汪东. 近距离煤层群上位煤层开采底板破坏特征分析[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(7): 7 - 11.
- [12] 程志恒, 齐庆新, 孔维一, 等. 近距离煤层群下位煤层沿空留巷合理布置研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(3): 453 - 458.
- [13] 马振乾, 陶春梅, 左宇军, 等. 基于能量平衡的厚层软弱顶板巷道支护技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(3): 496 - 502.
- [14] 郝嘉伟, 宁建国. 高家梁煤矿 2-2 中煤层巷道围岩破坏因素敏感性分析研究[J]. 煤炭工程, 2020, 52(12): 113 - 117.
- [15] 戴文祥, 潘卫东, 李猛, 等. 近距离煤层强扰动巷道布置与支护技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(12): 61 - 67.
- [16] 何富连, 康庆涛, 殷帅峰, 等. 近距离煤层顶板煤柱集中应力影响机制[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(6): 1077 - 1083.
- [17] 彭高友, 高明忠, 吕有厂, 等. 深部近距离煤层群采动力学行为探索[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1971 - 1980.
- [18] 黄兴. 近距离煤层群保护层开采底板卸压及效果考察[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(4): 45 - 50.
- [19] 张国江. 近距离煤层群下位煤层开采顶板来压规律与稳定性控制[J]. 中国矿山工程, 2023, 52(2): 59 - 63.
- [20] 梁华杰, 顾天州, 赵忠义. 近距离煤层开采巷道布置合理性分析[J]. 煤矿安全, 2019, 50(7): 249 - 253.
- [21] 孟祥瑞, 徐铨辉, 高召宁, 等. 采场底板应力分布及破坏机理[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1832 - 1836.