◇ 研究报告 ◇

# 基于纵波三维层析成像技术的压裂检测方法\*

# 王文文17 孟尚志2 钱玉萍1

(1 中海油田服务股份有限公司油田技术事业部 北京 101149)(2 中联煤层气有限责任公司 北京 100011)

**摘要** 国内煤层气勘探由于煤层埋深浅,煤储层致密、压力低,均需压裂增产作业。而压裂效果与煤层气单井 增产效果密切相关,因而研究煤层压裂效果,建立评价指标,指导压裂设计至关重要。三维声波测井资料能够 获取井周轴向、径向以及环向速度变化信息,在压裂前后,利用三维层析成像处理技术,可以评价煤层气井压 裂效果。将该技术与传统声波技术和微地震监测结果相结合,能够直观判断煤层气储层压裂改造前后在纵横 向及环向的变化情况。

关键词 三维层析成像,煤层气,压裂检测,声波测井
中图法分类号: P313.1
文献标识码: A
文章编号: 1000-310X(2019)02-0179-07
DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2019.02.005

# Coalbed fracture detection based on compressional wave three-dimensional tomographic imaging technique

WANG Wenwen<sup>1</sup> MENG Shangzhi<sup>2</sup> QIAN Yuping<sup>1</sup>

Oilfield Technology Department, China Oilfield Services Limited, Beijing 101149, China)
(2 China United Coalbed Methane Co., Ltd., Beijing 100011, China)

**Abstract** Domestic coalbed methane exploration always needs fracturing operations to increase production due to its shallow buried depth, tightness and low pressure. Fracturing effect is closely related to the effect of single well increasing production, so it is extremely important to research the fracturing effect, set up evaluation index and guide design of fracturing. Three-dimensional acoustic logging data is able to obtain radial and axial velocity variation information in well, and evaluate fracturing effect in coalbed methane well by using three-dimensional tomographic imaging processing technology before and after fracturing. Combining this technology with traditional acoustic wave technology and microseismic monitoring results, it is possible to visually judge the changes in the longitudinal, lateral and circumferential directions before and after the coalbed methane reservoir fracturing.

**Key words** Three-dimensional tomographic imaging processing, Coalbed methane, Fracture detection, Acoustic logging

2018-06-28 收稿; 2018-10-15 定稿

<sup>\*</sup>中国海油石油集团公司"煤层气 /页岩气 /致密砂岩气三气共采先导性试验研究"资助项目

作者简介: 王文文 (1983-), 男, 河北衡水人, 硕士, 工程师, 研究方向: 测井解释。

<sup>†</sup>通讯作者 E-mail: 331889981@qq.com

# 0 引言

煤储层具有致密、低压、非均质性强等特征,因 此压裂增产成为了有效开发煤层气的关键环节。压 裂检测效果评价对于优化压裂至关重要。然而,现 有煤层气压裂检测主要采用微地震监测,手段相对 单一且检测精度低,造成煤层压裂认识不清,所以, 研究新型煤层压裂检测技术有着重要的意义。

近年来, 声速径向剖面层析成像技术有了重要 进展。Hornby<sup>[1]</sup>较早使用高频单极子对井壁附近的 纵波速度剖面进行层析成像。其成像理论是采用射 线追踪方法。在建模过程中, 他假设井壁附近地层 的声波慢度在轴向和径向都有变化, 基于射线追踪 方法计算声波走时, 然后再使计算和实测的走时进 行拟合, 当拟合残差最小时认为得到与数据符合最 好的慢度分布模型。

与单极子采用走时方法进行近井壁成像不同, 偶极子主要采用频散特性的变化来对近井壁的横 波慢度剖面进行成像。反演地层径向横波速度剖 面的方法主要有两种。一种是Sinha 等<sup>[2-3]</sup>提出 用B-G理论由偶极弯曲模式波频散曲线无约束反 演径向速度剖面,该方法一般只能提供一个平均模 型,且反演结果奇异性较大;另一种是赵龙<sup>[4]</sup>、Tang 等<sup>[5]</sup>的约束反演方法,该方法通过高频约束以提高 反演的稳定性和精度。

无论是钻井诱导的裂缝还是压裂形成的裂缝, 一般在近井壁处岩石会产生破裂,而离井壁较远处 岩石保持原状或破裂较小,从而在井壁附近形成一 个径向速度变化剖面,离井壁近的地层速度偏低,而 离井壁较远的地层速度偏高,速度变化一方面可以 体现出岩石的脆性,同时,对比压裂前后速度径向剖 面的变化,可以指示压裂的效果<sup>[6]</sup>。

原有偶极子阵列声波测井仪通常具备2个单极 发射器和2个偶极发射器,其轴向布置8个接收器, 具备井眼周围地层声速的轴向、径向探测能力。近 年来发展的三维声波测井仪在其接收器环向间隔 45°分布8个换能器,具有13个轴向接收器站,增加 了井眼周向探测能力,如表1所示。本文以三维声 波测井仪数据为基础,通过纵波速度径向层析成像 技术求取井周不同方位的纵波波速变化,进而反映 岩石轴向及周向的压裂破损情况。

#### 表1 三维声波仪器技术指标

Table 1Technical index of three-dimensional acoustic logging

指标名称	指标			
隔声指标	声衰减 ≥ 60 dB			
耐温	175 °C			
耐压	137 MPa			
	单极 T01:3.6576 m; T02:2.4384 m			
源距	偶极:3.048~3.3528 m			
	远单极:3.81 m			
最大测速	$10 \mathrm{~m/min}$			
垂直分辨率	152.4 mm			
测量精度	纵波:±2 μs/ft,横波:±5 μs/ft			
测量模式	单极时差+远单极全波+交叉偶极全波			

## 1 径向速度变化地层正演模拟

为简化计算,假定地层在径向上的变化用阶梯 状同心圆柱层来近似,由此,数值模拟时可用传播矩 阵方法进行解析求解。表2为径向速度台阶变化模 型的参数,由表2可以看出:径向模型设置了浅部、 中部和深部三种不同地层弹性性质的变化带,距离 井筒最远处为原状地层。考虑到压裂导致近井壁岩 石破坏时,除纵波速度降低外,横波速度和密度也要 相应降低,但后两种的变化不会影响纵波走时,因 此,在模拟参数设定时尽量保持最快的横波速度小 于最慢的纵波速度以保证横波都在纵波之后到达。 图1为不同源距声波传播路径示意图。

表 2 径向剖面的参数 Table 2 Parameters of elastic profile

	纵波速度/ (m·s <sup>-1</sup> )	横波速度/ (m·s <sup>-1</sup> )	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	外径/ m
井眼流体	1500		1.00	0.20
浅部	2400	1200	1.80	0.40
中部	2700	1400	2.00	0.80
深部	3000	1800	2.20	1.60
外部	3500	2100	2.40	$\infty$



图1 径向速度变化地层模型及声波射线路径 示意图

Fig. 1 First-arrival ray paths for the case of velocity variation zone extending some radial distance from the borehole

图 2(a) 给出了对应上述模型下井孔中不同源 距处接收到的全波波形,黑线是在均匀浅部地层条 件下井孔全波波形,绿色直线标出了对应的均匀介 质首波到时,红线为速度变化模型条件下,井孔中 所接收到的全波波形,源距范围为1.0~5.05 m。可 以看出:整个源距范围内存在三个不同斜率的首波 到时,随着源距增加,斜率逐渐增加,即速度逐渐增 大;均匀地层的波形到时滞后径向速度变化地层的 到时。据此,可以初步认识到:全波中包含了地层径 向速度变化的信息,径向速度变化会影响接收阵列 的走时。

为了进一步认识径向变化地层条件下,不同 源距时对应的地层速度变化情况,绘制了不同源 距下的纵波速度变化关系图,如图2(b)所示。图 中绿色线条为均匀地层条件下的地层纵波速度为 2400 m/s,绿色点线为计算模型预设的地层纵波速 度值(表2),红点蓝线为通过波形计算得到的地层 纵波速度。可以看出,从全波波形中得到的纵波速 度和正演计算中设置的纵波速度基本一致,提取的 纵波速度很好地反映出地层的径向变化,进一步证 明全波中记录了地层径向速度扰动变化的信息。





Fig. 2 Simulation of P wave velocity radial profile

上述模拟结果表明,不同接收器接收的声波的 径向穿透深度有所不同,因而可以探测到地层速度 的径向剖面变化,从而利用不同源距的速度测量结 果或者首波到时进行地层纵波速度径向成像。

## 2 纵波三维层析成像方法原理

文献[6]给出了基于单极子纵波首波进行层析 成像的方法,并开发形成了相应的软件,本文的实例 就是在该软件上处理的。为节省篇幅和保持论文的 完整性,这里简要给出该方法的原理及成果图说明。 在进行层析成像之前,先采用简易的方法判断地层 在径向上是否存在不均匀,其方法为对阵列曲线,用 阵列相关的方法提取的视速度即视为波在阵列中 传播的平均速度,用此速度来计算波到第一接收器 上的走时,并将其定义为参考走时*TT*ref,即有<sup>[6]</sup>

$$TT_{\rm ref} = \int_{s}^{r_1} \frac{\mathrm{d}z}{v(z)} + TT_{\rm f},\tag{1}$$

式(1)中,v(z)为声源到第一个接收器间不同点提 取的纵波速度,积分上下限分别是源s和第一接收 器r<sub>1</sub>的深度位置,TT<sub>f</sub>为波在井中流体的传播时间。 将式(1)的参考走时与实测走时比较,可以判断径 向速度是否一致:对于v(z)无径向变化的地层,参 考走时与实测一致。当声速沿径向增加时,射线由 浅到深进入地层后再折射回来。由于式(1)中的v 为最大穿透深度的速度,即波所能达到的最高速度, 由该公式计算出的参考走时比实测走时要小,此时 就会出现实测走时相对于参考走时的滞后,然后采 用射线追踪的方法进行纵向和轴向成像<sup>[1]</sup>。

通过Hornby的走时层析成像技术获得井壁附 近地层的径向速度分布模型,该技术用于选择*u*(*x*) 慢度函数,该函数用于表征径向速度模型中随机点 的轴向和径向方位。射线追踪方法能够计算沿任何 射线路径的声波的传播时间,其由下面的慢度积分 表示:

$$t_k = \int_{T_k(u)} u(x) \mathrm{d}s. \tag{2}$$

当计算的和测量的行进时间差异最小时,获得 测量的数据最佳的速度分布模型。速度分布模型是 绝对速度分布剖面,它描述了波速沿井的径向和轴 向的变化。

图3为利用上述方法判断地层声速有无径向变 化的实例<sup>[6]</sup>。图中第2道给出了由公式(1)计算出 的第1个接收器上的参考走时曲线以及13个接收 器上实测的走时曲线。对比第1个接收器上的参考 走时和测量走时可以发现,后者明显滞后于前者,特 别是在X450 ~ X525 m、X580 ~ X620 m深度段。 由此可以判定这些深度段的地层发生了明显的径 向速度变化。图3第3道给出了用层析成像技术反 演得到的纵波速度变化的层析成像图, $\Delta v'_p$ 为径向 深度上纵波速度 $v_{pw}$ 与原状地层纵波速度 $v_{pi}$ 的相 对差别的百分比:

$$\Delta v'_p = (v_{pi} - v_{pw})/v_{pi} \times 100\%.$$
 (3)

速度变化剖面的正确与否可由图3第2道曲线 验证:(1)根据反演得到的速度剖面模型计算出的理 论走时曲线与实测走时曲线是否吻合,吻合时,理论 走时与实测走时的拟合误差曲线小,反之,误差大; (2)实测走时相对于参考走时滞后的深度段与速度 变化剖面变化的深度段是否相对应。由图3可以看 出,理论走时曲线与实测走时曲线吻合度较好,误差 较小,且走时滞后明显的深度段,对应深度上速度剖 面的变化也大,所以反演获取的纵波径向速度剖面 (图3第3道)是正确的。





#### 3 压裂效果评价应用实例

图4给出了一个利用纵波三维径向层析成像评 价煤层压裂效果的实例。其中,第1道给出了地层 自然伽马曲线和井径,第2道和第3道分别给出了 压裂前后径向速度变化剖面,第4道给出了岩性剖 面。在第2道和第3道中,色谱从蓝色变为红色,指 示径向速度变化量逐渐增大。从图4中可以看出,径 向声波速度变化量不同,指示了压裂破裂程度的差 异,利用径向速度剖面技术可实现分级评价压裂效 果,进而实现有效优化压裂参数的目的。按速度变 化量大小可将本井压裂段分为压裂集中区、压裂受 力区和压裂波及区,各区速度变化量逐渐减小,反 映压裂破裂程度逐渐减弱。本井1931.6~1935.4 m 井段,压裂前后色谱由黄色变为红色,表示径向速 度变化量最大,为压裂集中区;1928.8~1940.5 m井 段,色谱主要为黄色,表示径向速度变化量较大, 为压裂受力区;1914.4~1953.6 m井段,色谱主要 为青色,压裂后青色面积增大,表示该深度段径向 速度变化量较小,但该深度段内均已受到压裂的 影响,为压裂波及区。对比图5可知,速度剖面成 果指示的压裂波及区与近井壁声波压后各向异性 变化一致。

图6为煤层段压裂后纵波三维径向层析成像 图,第1道至第8道分别给出了不同方向上的纵 波速度变化剖面。从压裂前后速度变化剖面图 对比中可以得出,压裂后8个方向上均有较明显 的径向速度变化,在北偏东45°方向速度变化最 强。不同方位声波速度剖面成果,可直接对应不 同方位压裂破裂程度,为井网部署提供可供选择 的依据。

为验证处理成果的有效性,该井辅助进行了微 地震监测,利用微地震资料全面对裂缝的空间形态 及展布进行描述,提供缝长、缝高、裂缝方位角和倾 角、压裂体积等参数,在远井端裂缝长度弥补了三 维声波的不足,高度和延伸方向方面在近井端和三 维声波进行相互的验证。图7为XX1井微地震检测 成果图,显示出XX1井裂缝长度、高度和延伸方向, 从高度和裂缝展布方向上来看与三维声波速度剖 面成果一致。此外,由于三维声波速度剖面划分了 不同方位压裂破裂程度,因此可利用该资料对微地 震事件进行分级标定,进一步提升微地震事件解释 精度。



图 4 实例 1 Fig. 4 Example 1

在用声学



图 5 XX1 井煤层压裂前后声波各项异性处理成果 Fig. 5 Acoustic anisotropy of coalbed before and after fracturing in Well XX1



图 6 XX1 井煤层压裂后八方位纵波三维径向层析成像成果 Fig. 6 Eight-azimuth radial tomography results of coalbed after fracturing in Well XX1



Fig. 7 Micro-seismic results of XX1 coalbed

### 4 结论

三维声波测井采用不同源距的组合可以实现 单极子纵波径向层析成像并用于压裂效果评价,进 一步地通过三维声波测井仪对井壁附近地层进行 三维层析成像处理,能够较直观确定岩石压裂受力 的破损范围,进而可以评价井周不同方位压裂情况。 利用速度径向变化程度判断标准,能够划分出了压 裂波及区、压裂受力区、压裂集中区。三维声波测井 有望同微地震技术结合,实时进行裂缝监测,分析裂 缝形态,对压裂参数(如压力、砂量等)实施调整,指 导压裂施工,优化压裂方案。



- Hornby B E. Tomographic reconstruction of near-borehole slowness using refracted borehole sonic arrivals[J]. Geophysics, 1993, 58(12): 1726–1738.
- [2] Sinha B K. Near-wellbore characterization using radial profiles of shear slownesses[J]. Seg Technical Program Expanded Abstracts, 2004, 23(1): 2586.
- [3] Sinha B K, Kostek S. Stress-induced azimuthal anisotropy in borehole flexural waves[J]. Geophysics, 1996, 61(6): 1899–1907.
- [4] 赵龙.利用偶极子弯曲波反演地层横波速度径向剖面 [D].东营:中国石油大学 (华东), 2014: 16–17.
- [5] Tang X M, Patterson D J. Mapping formation radial shear-wave velocity variation by a constrained inversion of borehole flexural-wave dispersion data[J]. Geophysics, 2010, 75(6): 183–190.
- [6] 唐晓明, 许松, 庄春喜, 等. 基于弹性波速径向变化的岩石脆裂性定量评价 [J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3): 417-424. Tang Xiaoming, Xu Song, Zhuang Chunxi, et al. Quantitative evaluation of rock brittleness and fracability based on elastic-wave velocity variation around borehole[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3): 417-424.