

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.201405014

## 区域三维空间岩石可钻性预测方法研究与应用

耿 智<sup>1</sup>, 樊洪海<sup>1</sup>, 陈 勉<sup>1</sup>, 王金钟<sup>2</sup>, 纪荣艺<sup>1</sup>, 景 宁<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249; 2. 中国石油大庆钻探工程公司钻井四公司, 吉林松原 138000; 3. 中国石油天然气勘探开发公司, 北京 100034)

**摘 要:**在已钻井资料较少的情况下,合理、高效、低成本地预测岩石可钻性在地层空间的分布对钻井工作十分重要。分析了单一测井、录井及地震资料预测方法的不足,提出了预测三维空间岩石可钻性的新方法,即利用测井约束地震反演技术对三维地震数据进行反演,生成全频带高分辨率的岩石纵波速度体,通过室内微钻头岩心可钻性试验,建立了考虑岩石声波时差与密度属性的可钻性预测模型,并据此开发了三维岩石可钻性预测软件。在吐哈盆地某区块两口井进行的实例分析表明,可钻性平均误差约 10%,研究区块牙轮钻头对应的岩石可钻性级值约 2.8~6.3, PDC 钻头对应的岩石可钻性级值约 2.0~5.0;软件三维显示结果表明,局部地层存在异常高可钻性级值带,与钻井资料显示该地层存在砾岩层结论相符。该区块 PDC 钻头的三维空间地层岩石可钻性整体优于牙轮钻头对应的可钻性。研究表明:建立的岩石可钻性预测模型同时考虑了岩石声波与密度属性,能合理预测岩石可钻性,反映不同类型钻头的可钻性差异;新方法能较真实地反映出岩石可钻性的三维空间分布情况,可为制定钻井提速方案提供参考。

**关键词:**岩石可钻性 预测 岩心试验 测井 地震数据

中图分类号:TE21 文献标识码:A 文章编号:1001-0890(2014)05-0080-05

## Application and Research on Methods for 3D Space Rock Drillability Prediction

Geng Zhi<sup>1</sup>, Fan Honghai<sup>1</sup>, Chen Mian<sup>1</sup>, Wang Jinzhong<sup>2</sup>, Ji Rongyi<sup>1</sup>, Jing Ning<sup>3</sup>

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 2. No. 4 Drilling Company, CNPC Daqing Drilling & Exploration Engineering Corp., Songyuan, Jilin, 138000; 3. China National Oil and Gas Exploration and Development Corporation, Beijing, 100034, China)

**Abstract:** In the initial stages of exploration, when drilling data is scarce, it's particularly important to predict the drillability of the target formation in a proper, efficient and low-cost manner. In this paper, common drillability prediction methods using logging, mud logging and seismic data were evaluated and determined to be inadequate. So, to meet the need for effective predicability of formation drillability, a new 3D prediction method was presented, in which a model considering both rock acoustic and density properties was constructed by combining the micro-bit drillability test and full-band and high-resolution P wave velocity cube which was generated by a well log-constrained seismic inversion technique. Prediction software was developed to create a 3D visualization of the distribution of drillability. Case studies of two wells in one block of the Tuha Basin was presented. The average error of drillability was about 10%, and drillability grade of a roller bit was 2.8~6.3 while drillability grade of a PDC bit is 2.0~5.0. The 3D visualization result indicated that an abnormally high drillability area existed in the local formation, which was in accordance with the existence of conglomerate layer shown in drilling record. The overall drillability performance of PDC bits was superior to that of the roller bits. The results showed that the model considering both rock acoustic and density properties could predict rock drillability reasonably and reveal drillability differences for different bits. The method proposed could describe the spatial distribution of rock drillability in an objective manner, providing references to speeding up drilling.

**Key words:** rock drillability; prediction; core test; well logging; seismic data

在已钻井较少的区块,很难利用已有测录井资料与岩心数据建立能够客观反映随地层变化的区域岩石可钻性数据库,从而给钻头选型和制定钻井设计方案带来了困难。此外,利用地震数据提取的层速度资料,可以在一定程度上反映地层岩石物性变

收稿日期:2013-12-09;改回日期:2014-07-23。

作者简介:耿智(1988—),男,河北保定人,2011年毕业于中国石油大学(北京)石油工程专业,油气井工程专业在读博士研究生,主要从事石油工程岩石力学、钻井地层压力预测及钻井信息工程等方面的研究工作。

联系方式:g126z@126.com。

通讯作者:陈勉, chenmian@vip.163.com。

基金项目:国家科技重大专项课题“钻井工程设计和工艺软件”(编号:2011ZX05021-006)部分研究成果。

化趋势,但受限于地震资料的频带范围,其分辨率很低,利用其预测的岩石可钻性误差大、精度低,难以满足实际工程需要。为此,笔者分析比较了常规可钻性确定或预测方法,提出了三维空间岩石可钻性预测方法(以下简称新方法)。新方法综合利用测录井与地震资料,采用地震反演技术,求取能真实反映随地层空间变化的岩石纵波速度体,结合室内岩心试验,优选并建立岩石纵波速度与可钻性模型,在试验区块进行了三维空间地层岩石可钻性预测,预测结果能满足工程精度,为该区块钻井提速方案的制定提供了重要参考。

## 1 常规区域岩石可钻性确定方法分析

### 1.1 常规方法简述

几十年以来,为表征岩石的抗钻特性,石油工程界先后提出过利用莫氏硬度表、抗压强度、断裂韧性、抗剪强度、史氏硬度、压痕指数、微钻头可钻性、地震波速、视可钻性系数、抗钻强度、工作线截距(门限钻压)、钻井指标等预测或确定岩石可钻性的方法<sup>[1]</sup>。为满足实际工程需要,同时降低利用传统岩心试验确定区域地层可钻性的成本,学者们提出了一些新的思路与方法<sup>[2-12]</sup>。总体而言,以采用的资料或技术手段来分,区域岩石可钻性可通过以下3种途径获取:

1) 利用测井资料确定岩石可钻性<sup>[3-8]</sup>。为建立区域岩石可钻性剖面,采用传统的室内岩心试验法时,往往需要测试大量不同层位和方位的岩心材料,采用统计方法建立可钻性分布规律。然而,受限于岩心数量,采用室内试验法难以建立连续地层可钻性剖面,且室内试验需要花费大量人力、物力。一些学者利用现场测井资料,研究了测井声波、密度等数据与岩石可钻性之间的关系,结合室内岩心试验,建立了连续地层岩石可钻性剖面,再通过区域内多口井的资料,统计回归出区域岩石可钻性分布情况。

2) 利用录井资料确定岩石可钻性。在缺乏测井资料或资料质量较差的情况下,一些学者利用工程录井资料,建立了机械钻速、钻压、转速、水功率等参数与岩石可钻性间的关系,从而形成连续地层可钻性剖面,通过统计分析手段描述区域岩石可钻性分布规律。例如:詹俊峰等人<sup>[9]</sup>通过对录井钻时数据进行标准化处理,并根据修正的Young 钻速模式,利用无约束优化算法计算地层

微可钻性系数,然后再通过微可钻性系数与可钻性级值的关系,求出地层可钻性级值;董振国等人<sup>[10]</sup>分析了尹宏锦提出的通用钻速方程,通过数学推导得出由钻速、钻压、转速、钻头比水功率和钻井液密度等参数表达的可钻性系数表达式,可由录井资料直接获得地层的可钻性系数。

3) 利用地震资料预测可钻性。对于新区块,已钻井较少或无已钻井资料的情况下,利用地震资料预测区域可钻性是一种可采取的方式。研究发现,岩石可钻性与岩石纵波速度存在很好的相关性。例如:E. S. Pennebaker<sup>[2]</sup>利用地震层速度资料,描述了声速与地层可钻性的关系,针对缺乏岩心可钻性试验的情况,提出了利用地震资料预测“相对可钻性”的概念,并指出,相关测录井及邻井资料匮乏时,地震数据可作为钻井工程设计的依据。又如:范翔宇等人<sup>[11]</sup>利用叠加速度谱资料,提取了地震层速度,根据生产实践优选了地层可钻性预测模型,并在现场进行了应用。

### 1.2 常规方法的不足

虽然利用测录井资料可以建立连续的地层可钻性剖面,但仅能表征所钻井眼周边一定区域内的地层岩石可钻性规律。通常利用多井结果,采用内插外推等数学方法得到井间地层的可钻性级值。然而,该类方法无法真实反映井间地层的岩石力学特性。由于插值得到的结果取决于已知井数据,无法预知井间岩石的非均质特性,更无法预知井间岩层的变化趋势和特殊结构体的存在;而且,只有存在大量已钻井测录井资料的情况下,才可能较合理地描述区域地层的可钻性,这对已钻井较少的区块并不适用。

此外,利用地震资料(如叠加速度谱等)提取层速度预测可钻性的方法,虽然能大致反映区域可钻性的变化趋势,但受限于地震资料的频带范围,提取的层速度数据分辨率极低,据此计算出的岩石可钻性仅能反映大套地层的变化趋势,无法满足实际工程设计的需要。

## 2 三维空间岩石可钻性预测方法

为解决常规区域岩石可钻性确定方法存在的问题,笔者利用测井约束地震反演技术对三维地震数据进行反演,并结合室内岩心可钻性试验,形成了三维空间可钻性预测方法。该方法以可钻性级值表征

区域三维空间的地层可钻性,既能达到测录井资料纵向高分辨率的水准,又能真实反映地层可钻性的空间横向变化规律。

## 2.1 测井约束地震反演

测井约束地震反演是目前广泛采用的基于模型的地震反演技术。将地震资料与测井资料有机结合,突破地震分辨率的限制,理论上可以得到与测井资料分辨率相近的结果。采用测井约束稀疏脉冲反演算法,以测井资料为主要约束条件,利用地震反演软件反演出地层纵波阻抗,并最终转化为岩石纵波速度。稀疏脉冲反演算法的主要优点是,能获得宽频带的反射系数,能较好地解决地震记录的欠定问题,从而使反演得到的波阻抗数据更趋于真实<sup>[13]</sup>。反演基本流程如图1所示。

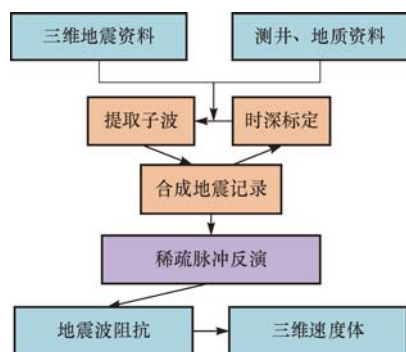


图1 三维岩石纵波速度反演流程

Fig.1 The inversion process of 3D rock P-wave velocity

大量实践表明,用于岩石可钻性预测的反演项目,一般要求地震工区内较均匀分布的已钻井不少于3口。否则,就很难精细地反演出区域岩石纵波速度资料、提高区域岩石可钻性的预测精度。

为确保工程应用层面的可钻性预测精度,需严格控制反演中各常规参数的质量,对反演质量进行量化评估。根据钻井工程需要,并考虑反演的特点,一般要求主要地层层组地震合成记录与原始地震记录的平均相关系数达70%以上,反演出的岩石纵波时差与对应的测井声波时差趋势吻合度达80%以上。

## 2.2 岩石可钻性模型的建立

岩石声波时差取决于岩石的弹性模量、泊松比和密度等参数,其值大小反映了岩石的强度、弹性及硬度。有学者<sup>[8,14-15]</sup>针对岩石声波时差与可钻性的关系进行了大量试验与应用研究,他们通常采用的是对数函数关系。笔者结合室内岩心试验,综合利

用地震反演的声速与密度资料,建立了岩石可钻性预测模型,见式(1)。该预测模型同时考虑了声波时差、密度属性与可钻性之间的关系。

$$K_d = A \ln \left( \frac{\Delta t}{\rho} \right) + B \quad (1)$$

式中: $K_d$ 为岩石可钻性级值; $\Delta t$ 为声波时差,ms/m; $\rho$ 为体密度,g/cm<sup>3</sup>;A,B为回归系数。

试验研究和工程实践表明,在岩心数据有限的情况下,便可求取同时考虑声波、密度属性的较为合理的模型参数。一般而言,岩石的声波时差随地层深度的增加减小,密度随之增大,但不同地质沉积等条件下岩石的声波与密度属性存在明显差异。式(1)可反映相关差异的相对变化,能较合理地描述三维空间地层岩石可钻性的分布情况。与常规声速模型相比,该模型在一定程度上可以解释不同岩性(砂岩、泥岩和碳酸盐岩)地层间声波时差(或声波速度)可能相同而可钻性级值不同的现象。不过,该模型仍不能仅通过声波时差与体密度2个参数充分描述不同岩性地层的可钻性级值。

## 2.3 岩石可钻性预测软件的研发

为高效计算并显示三维空间地层的可钻性数据体,采用C#语言和OpenGL三维图形标准,开发了三维岩石可钻性预测软件SeisDrilla 1.0。该软件直接读取反演生成的标准SEG Y格式(IBM 4字节浮点型)地震数据,并生成相同格式的数据体结果,便于各类地震解释软件进一步开展相关工作。

当利用该软件完成三维空间可钻性预测工作后,可根据地震解释的三维空间地层层位数据,按需提取对应地层的可钻性级值,并进行三维空间显示(如图2所示)。该功能可较为真实地预测不规则地层层组的岩石可钻性空间分布规律,为新井钻头选型与钻井提速方案设计等提供参考依据。

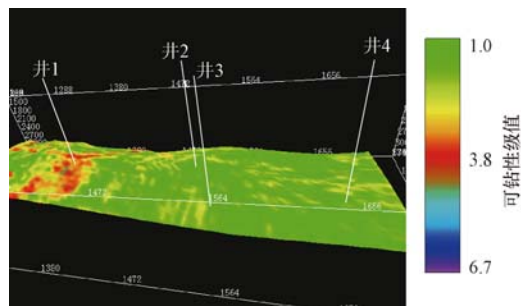


图2 根据地震解释层位显示对应地层三维空间可钻性级值

Fig.2 3D-drillability display of a specific seismic interpretation horizon



3 实例分析

采用所提出的方法,对吐哈盆地某区块进行了三维空间地层可钻性预测分析。为便于分析预测结果,选取该区块中面积约 30 km<sup>2</sup> 的数据体进行展示与分析。所选数据体区域内已钻井 4 口,其中 U6 井(完钻井深 3 210 m)、U7 井(完钻井深 3 705 m)有岩心资料。U6 井和 U7 井的岩心试验数据不参与建立所在区块的可钻性模型,仅用于与预测结果进行对比,以验证该方法的有效性。

首先,利用该区块内 10 口井的测井资料,对三维地震数据进行测井约束地震反演,生成纵波阻抗,并转换为深度域岩石纵波时差。图 3 为所选对比区域的地震合成记录与原始地震记录的相关系数分布,颜色对应相关系数大小,平均统计相关性约 93%。图 4 为 U6 和 U7 井反演出的岩石纵波时差与其测井声波时差曲线,二者趋势吻合度达 84% 以上。

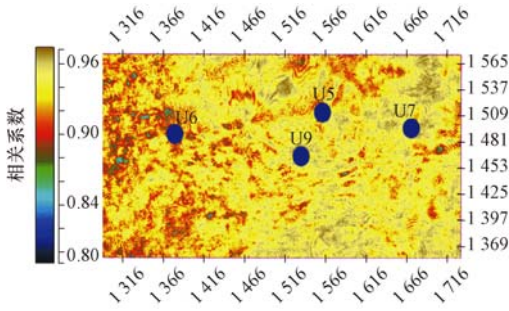


图 3 对比区域地震记录与合成记录相关系数平面分布  
Fig. 3 Planar distribution of the correlation coefficient between the regional seismic record and the synthetic record

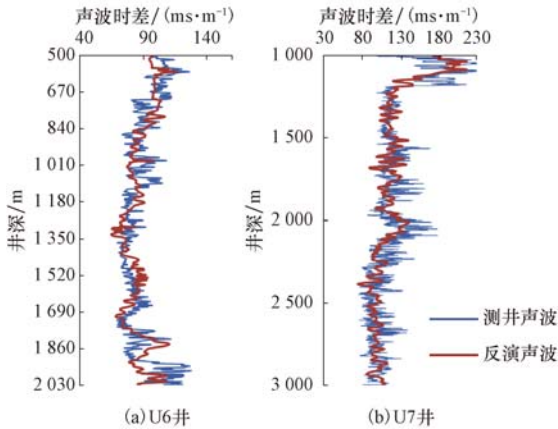


图 4 测井声波时差与反演结果对比  
Fig. 4 Comparison of acoustic travel time logging and seismic inversion

从图 4 可以看出,U6 井反演结果的吻合度较之 U7 井要差,其原因是 U6 井处于山前构造带,地震反射信号复杂,质量较差,该现象在图 3 中也有所反映。

为建立整个区块的岩石可钻性模型,收集了区块内 10 口井(含 U6 和 U7 井)的共 11 块岩心,分别采用牙轮钻头和 PDC 钻头进行可钻性试验。利用除 U6 和 U7 井以外 8 口井的岩心可钻性级值数据回归出可钻性模型。其中,牙轮钻头预测模型:

$$K_d = -4.1904 \ln \left( \frac{\Delta t}{\rho} \right) + 19.107 \quad (2)$$

PDC 钻头预测模型:

$$K_d = -4.1155 \ln \left( \frac{\Delta t}{\rho} \right) + 18.106 \quad (3)$$

最后,利用研发的三维空间可钻性预测软件,分别计算了牙轮钻头和 PDC 钻头的三维空间地层岩石可钻性级值。图 5 为所选区域相应钻头类型的三维空间地层岩石可钻性级值(水平切片井深 2 745 m),表 1 为岩石可钻性级值预测结果与试验结果的对比情况。

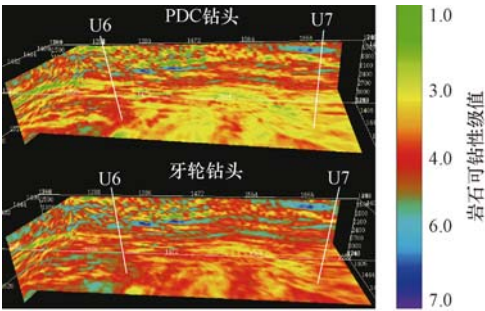


图 5 PDC 钻头与牙轮钻头的三维空间岩石可钻性级值分布  
Fig. 5 Distribution of 3D-drillability grades of PDC bit and roller bit

表 1 岩石可钻性级值试验结果与预测结果对比  
Table 1 Comparison of the results of rock drillability grade between test and prediction

井号	PDC 钻头对应可钻性级值			牙轮钻头对应可钻性级值		
	试验	预测	相对误差, %	试验	预测	相对误差, %
U6	2.7	3.1	14.80	3.5	3.9	11.40
U7	2.7	2.9	7.40	3.3	3.6	9.10

从图 5 可以看出,PDC 钻头的地层岩石可钻性总体比牙轮钻头要好。统计表明,该区块地层岩石的硬度为中软至中硬,牙轮钻头的三维空间地层岩石平均可钻性级值 2.8~6.3,PDC 钻头对应的可钻性级值 2.0~5.0。由表 1 可知,U6 井的预测误差

比U7井大,其原因与上文分析结果吻合,即U6井处于山前构造带、地震资料质量较差所致,但相对误差在工程允许范围之内,预测结果与岩心试验数据吻合较好。这验证了三维空间预测方法的可靠性。

从图5还可以看出,U6井在井深约2 300 m处出现异常高可钻性级值地带,牙轮钻头对应的可钻性级值约6.0,明显大于附近地层。分析已钻井资料发现,该地层夹杂砾岩层,因而可钻性级值较大。这凸显了三维空间预测方法的优势,即可表征地层空间特殊结构体的可钻性,能为制定钻井提速方案提供参考。

## 4 结论及认识

1) 利用测井约束地震反演技术,能较为真实地反映岩石物性参数的空间分布特征、较准确地预测岩石可钻性,可为制定钻井提速方案提供参考。

2) 地震资料的质量影响最终预测结果,因此在预测所选区块的岩石可钻性时,需对区域地理构造有所了解,并明确地震资料质量与影响因素。

3) 室内岩心试验要在统一标准条件下进行。虽然室内试验无法模拟岩心所在的地下条件,但统一条件下的结果能反映出岩石可钻性的相对大小与特征,对钻井工程设计与施工具有指导意义。

4) 与常规声速模型相比,新模型在一定程度上可以解释不同岩性地层间声波时差(或声波速度)可能相同而可钻性级值不同的现象。不过,该模型仍不能仅通过声波时差与体密度2个参数充分描述不同岩性地层的可钻性级值。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 尹宏锦. 地层宏观可钻性与实用原理[J]. 石油大学学报:自然科学版, 1988, 12(3): 277-286.  
Yin Hongjin. Formation macro-drillability and the principle of its application[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1988, 12(3): 277-286.
- [2] Pennebaker E S. An engineering interpretation of seismic data[R]. SPE 2165, 1968.
- [3] 刘明轶. 利用声波测井数据分析地层可钻性[J]. 内蒙古石油化工, 2012, 38(24): 56-57.  
Liu Mingyi. Analysis of formation drillability using acoustic data[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2012, 38(24): 56-57.
- [4] 张亚旭, 高小燕. 基于测井资料的岩石可钻性研究[J]. 信息系统工程, 2011(9): 97-98.  
Zhang Yaxu, Gao Xiaoyan. Study of rock drillability based on well logging data[J]. China CIO News, 2011(9): 97-98.
- [5] 田军, 陈德光, 王志忠, 等. 利用测井资料预测地层岩石可钻性

- [J]. 石油钻采工艺, 1994, 16(3): 1-4, 20.  
Tian Jun, Chen Deguang, Wang Zhizhong, et al. Predicting rock drillability by logging data[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1994, 16(3): 1-4, 20.
- [6] 梁启明, 邹德永, 张华卫, 等. 利用测井资料综合预测岩石可钻性的试验研究[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(1): 17-19.  
Liang Qiming, Zou Deyong, Zhang Huawei, et al. Predicting rock drillability by well logging: an experimental research[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 34(1): 17-19.
- [7] 路保平, 张传进, 鲍洪志. 利用多测井参数求取岩石可钻性[J]. 石油钻探技术, 1998, 26(3): 4-6.  
Lu Baoping, Zhang Chuanjin, Bao Hongzhi. Achieving rock drillability with multi-logging parameters[J]. Petroleum Drilling Techniques, 1998, 26(3): 4-6.
- [8] 李祖奎, 李春城, 袁永嵩, 等. 利用声波测井资料预测地层可钻性及钻速的试验研究[J]. 焦作工学院学报, 1999, 18(3): 178-181.  
Li Zukui, Li Chuncheng, Yuan Yongsong, et al. An experimental study on the prediction of formation drillability and rate of penetration by sonic log data[J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology, 1999, 18(3): 178-181.
- [9] 詹俊峰, 高德利, 刘希圣. 地层抗钻强度与钻头磨损实用评估方法[J]. 石油钻采工艺, 1997, 19(6): 16-23.  
Zhan Junfeng, Gao Deli, Liu Xisheng. An applicable method for estimation of formation drilling strength and bit wear[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1997, 19(6): 16-23.
- [10] 董振国, 刘玉华, 张伯文. 新疆麦盖提地区岩石可钻性分析及应用[J]. 石油钻探技术, 1997, 25(4): 1-2.  
Dong Zhengguo, Liu Yuhua, Zhang Bowen. Rock drillability analysis and applications at Maigaiti Area in Xinjiang[J]. Petroleum Drilling Techniques, 1997, 25(4): 1-2.
- [11] 范翔宇, 夏宏泉, 郑雷清, 等. 利用地震层速度预测地层可钻性和钻速的新方法[J]. 钻采工艺, 2007, 30(1): 4-6.  
Fan Xiangyu, Xia Hongquan, Zheng Leiqing, et al. New method of using seismic velocity to predict layer drillability and drilling rate[J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(1): 4-6.
- [12] 张志杰, 单清林, 周雪, 等. 砾岩层可钻性研究[J]. 断块油气田, 2013, 20(4): 502-504.  
Zhang Zhijie, Shan Qinglin, Zhou Xue, et al. Research on drillability in conglomerate formation[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013, 20(4): 502-504.
- [13] 安鸿伟, 李正文, 李仁甫, 等. 稀疏脉冲波阻抗反演在 YX 油田开发中的应用[J]. 石油物探, 2002, 41(1): 56-60.  
An Hongwei, Li Zhengwen, Li Renfu, et al. Application of sparse impulse impedance inversion in YX Oilfield[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2002, 41(1): 56-60.
- [14] 赵军, 蔡亚西, 林元华. 声波测井资料在岩石可钻性及钻头选型中的应用[J]. 测井技术, 2001, 25(4): 305-307.  
Zhao Jun, Cai Yaxi, Lin Yuanhua. Application of sonic logs to rock drillability and bit selection[J]. Well Logging Technology, 2001, 25(4): 305-307.
- [15] 王忠福, 孟金城, 张志邦. 声波时差测井在岩石可钻性预测中的应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(3): 94-96.  
Wang Zhongfu, Meng Jincheng, Zhang Zhibang. Application of acoustic travel time logging in rock drillability prediction[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006, 25(3): 94-96.

[编辑 令文学]