doi: 10.11720/wtyht.2019.1190

李灿,归平军.纵横波速度比在东胜气田致密低渗储层流体识别中的应用[J].物探与化探,2019,43(3):536-542.http://doi.org/10.11720/wtyht. 2019.1190

Li C, Gui P  $J.v_P/v_S$  applied to fluid identification of tight sandstone reservoir of Dongsheng gas field [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(3):536-542. http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1190

# 纵横波速度比在东胜气田致密低渗储层流体 识别中的应用

# 李灿,归平军

(中国石化 华北油气分公司 勘探开发研究院,河南 郑州 450006)

摘要:东胜气田锦72 井区盒1段储层纵向非均质性强,含气饱和度差异大,气水赋存状态多样,预测有效储层是 目前勘探开发的关键问题。笔者结合测井数据,采用统计、对比研究方法,建立盒1段致密低渗储层流体测井响应 特征及识别标准。理论证明,含气砂岩随着含气饱和度升高,纵波速度和横波速度都降低,但是纵波速度比横波速 度变化大,因此,纵横波速度比降低。在此理论基础上,通过交会图分析,定量化识别出储层流体,同时采用纵横波 速度比反演与纵波阻抗反演分析,明确了研究区盒1段气水分布规律及其空间展布特征,为研究区油气勘探提供 依据。

关键词:东胜气田;储层纵向非均质性;纵横波速度比;盒1段;气水分布
 中图分类号: P631.4
 文献标识码: A
 文章编号: 1000-8918(2019)03-0536-07

## 0 引言

东胜气田位于鄂尔多斯盆地北部,横跨伊盟隆 起、伊陕斜坡和天环坳陷3个构造单元,锦72井区 位于伊盟隆起南部泊尔江海子断裂以南,伊陕斜坡 东北部,研究区在石炭—二叠系发育一套内陆碎屑 岩沉积体系。主要目的层下石盒子组属于冲积辫状 河沉积,厚度约120m,自下而上可分为盒1段、盒2 段、盒3段,其中盒1段沉积时期为辫状河发育的幼 年—壮年期,盒1地层厚度达60m,砂岩厚度20~ 30m,平均渗透率为0.45mD,孔隙度分布区间为 5%~15%。

锦 72 井区主要目的层为盒 1 段,研究区内大部 分井钻遇效果不好,综合分析认为锦 72 井区盒 1 段 储层纵向非均质性强,含气饱和度变化大,气水赋存 状态多样,气层、气水同层与水层较难区分,预测有 效气层是目前勘探开发的关键问题。

目前,国内各大油气田在地震属性对储层预测

方面都有较广泛的应用<sup>[1-8]</sup>,常规的叠后储层预测 方法损失了与偏移距有关的信息,在解决纵波阻抗 叠置的致密低渗储层预测问题的不确定性变大<sup>[9]</sup>。 因此,针对该区含气预测难点,首先采用测井资料分 析非储层、气层、水层、气水同层的测井响应特征,通 过岩石物理建模进行横波预测,然后建立纵横波速 度比与非储层、气层、水层、气水同层之间的关系,采 用交会图分析技术,建立储层物性与纵横波速度比 的关系,利用叠前纵横波速度比反演与叠后纵波阻 抗反演,提取有利储层的平面分布,刻画优质储层的 空间展布特征。

1 测井响应特征

#### 1.1 储层测井响应特征

根据对杭锦旗地区致密砂岩气层的岩性和电性特征的研究,能够较好地反映储层物性和含气性的测井参数主要有声波时差、自然伽马、孔隙度和电阻率曲线<sup>[10-12]</sup>。因此,对锦72井区(图1)主要目的层

收稿日期: 2018-05-16;修回日期: 2019-01-16

基金项目:国家科技重大专项"低丰度致密低渗油气藏开发关键技术"(2016ZX05048)

作者简介: 李灿(1987-), 女, 河南商丘人, 从事地震解释及储层预测工作。Email: lican921@163.com



图 1 东胜气田锦 72 井区构造位置





## Fig. 2 Natural gamma and sonic time difference intersection diagram of He 1 reservoir in wellblock Jin 72

二叠系下石盒子组盒1段32口井测井资料的岩性、 物性及电性特征的对比、分析和验证,对可以识别盒 1段储层与非储层关系的敏感参数自然伽马—声波 时差进行交会分析,如图2所示,建立了锦72井区 储层的测井识别标准:当声波时差大于227μs/m, 自然伽马小于78 API时为储层,否则为非储层。

## 1.2 储层流体测井响应特征

图 3 为锦 72 井区一口水平井导眼段测井与气 测综合图,图中盒 1-3 层底部自然伽马值低,平均 46API,且曲线呈箱型分布,深侧向电阻率平均值为 31 Ω·m,表明储层的物性较好,含气饱和度较高; 盒 1-2、盒 1-1 层底部,自然伽马值较低,平均 55 API,曲线呈箱型分布,深侧向电阻率平均 19 Ω·m, 深侧向测井值相比盒 1-3 层底部变小,储层的物性 变差,含气饱和度降低,解释为水层。储层气水赋存 状态较为复杂,气层、气水同层、水层的声波时差数 值出现大量重叠,气层与水层的测井响应区别主要 是在深测向测井中,水层表现为相对低阻。

基于以上测井特征分析,选取锦 72 井区 32 口 井盒1段测井解释结果进行气层、水层、气水同层识 别。图4是声波时差与深侧向测井交会分析图,分 别为气层、水层、气水同层的声波和深侧向的响应特 征,分析表明,锦 72 井区水层测井最敏感参数是深 侧向测井值变小,而气水同层与气层、气水同层与水 层测井响应区分度不大,对气层和水层的测井响应 区分较好,认为气层的深侧向测井电阻率(LLD)值 一般大于 40 Ω · m,而水层的深侧向测井电阻率 (LLD)值小于 20 Ω · m。







Fig. 3 A well logging and gas measurement integrated map of in wellblock Jin 72



Fig. 4 The feature of logging identification of He 1 reservoir fluid in wellblock Jin 72

通过对图 3 和图 4 的锦 72 井区 32 口的井测井 数据的交会图分析,建立了锦 72 井区盒 1 段储层流 体识别标准(表 1):当自然伽马>78 API 或声波时 差≤227 μs/m 时为非储层;当自然伽马≤78 API、声 波时差>227 μs/m 时为储层;在储层中,深侧向测井 电阻率(LLD) ≤20 Ω・m 时为水层,20 Ω・m<LLD ≤40 Ω・m 时为气水同层,40 Ω・m<LLD ≤100 Ω・ m 时为气水同层。

Table 1         Logging identification standards of He 1 member in wellblock Jin 72					
参数	泥岩	砂岩			
		干层	水层	气水同层	气层
自然伽马/API	>78	≤78	≤78	≤78	≤78
声波时差/(μs・m <sup>-1</sup> )		<227	≥227	≥227	≥227
深侧向电阻率/(Ω・m)			≤20	20 <lld≤40< td=""><td>40<lld≤100< td=""></lld≤100<></td></lld≤40<>	40 <lld≤100< td=""></lld≤100<>

#### 表1 锦72井区盒1段测井识别标准

纵横波速度比分析 2

## 2.1 横波预测

前人理论研究已经证明含气砂岩随饱和度的降 低,纵波速度明显升高而横波速度升高程度较小,纵 横波速度比增大,对储层含气性比较敏感[13-17]。因 工区内只有两口井有实测横波曲线,通过岩石物理 建模的方法,采用 xu-white 模型,预测横波速度。图 5为研究区锦91井预测横波预测曲线, V<sub>P</sub>、V<sub>s</sub>、PIMP 分别表示经过环境校正后的实测纵波速度、横波速 度和纵波阻抗; VPM、VSM、PIMPM 分别表示预测纵 波速度、横波速度、纵波阻抗。图中锦 91 井段预测 曲线与实测曲线具有很高的相关性,因此横波预测 可信度较高。



图 5 锦 91 井预测曲线与实测曲线对比 Fig. 5 Comparison of predicted curve and measured curve of Jin 91

### 2.2 储层预测

通过单井测井曲线的岩石物理响应特征分析和 自然伽马、声波时差、电阻率测井曲线的定量化判识 以及对研究区内 32 口井目的层盒 1 段的综合解释, 分别划分出泥岩层、干砂层、水层、气水同层、气层, 再由纵波阻抗与纵横波速度比交会分析(图 6)可 知,盒1段泥岩的纵横波速度比大于1.67,泥岩层与 砂岩层的纵波阻抗分不开;干砂层的纵波阻抗大于 11 400 g · cm<sup>-3</sup> · μs · m<sup>-1</sup>; 水层、气水同层、气层的 纵横波速度比(v<sub>p</sub>/v<sub>s</sub>)小于 1.67, 纵波阻抗小于 11 400g·cm<sup>-3</sup>·µs·m<sup>-1</sup>。纵横波速度比为储层敏感 参数。

如何获取储层敏感参数,本文采用纵横波速度 比叠前反演方法,利用了叠前道集的偏移距信息。 图 7 为研究区盒 1 段纵横波速度比的反演平面,图 中黄色和红色区域为储层相对发育区域,其纵横波 速度比在 1.67 以下,表明研究区目的层盒 1 段储层 比较发育。为了验证和实际钻井的符合率,在对研 究区包括新钻的4口井共36口井验证中,储层钻遇 砂岩符合 32 口,符合率为 89%;而验证气层钻遇符 合19口,符合率仅为53%。这说明纵横波速度比反 演的结果能较好地区分岩性,但很难区分气层、水

43卷



图 6 锦 72 井区 32 口井盒 1 段纵横波速度比与纵波阻抗交会

Fig. 6 The crossplot of  $v_{\rm P}/v_{\rm S}$  and impedance of 32 wells in He 1 member of wellblock Jin 72







层、气水同层。从地质沉积方面分析,认为研究区目的层盒1段距离物源较近,沉积条件复杂,砂岩粒度 横向变化快;烃源岩成熟度低,充注动力不足,储层 含气性普遍较差,气水赋存状态复杂多样,没有统一 的气水界面。

## 2.3 储层流体识别

上述表明纵横波速度比能较好地区分岩性,区 分不了流体。为此,对锦72井区的盒1段水层、气 水同层、气层进行纵横波速度与纵波阻抗交会分析。 图8a为锦72井区盒1段水层、气水同层、气层的纵 横波速度比和纵波阻抗的交会图,可以看出,在同一 纵波阻抗时,纵横波速度越小则储层的含气饱和度 越高;但是水层与气水同层数据点在交会图上重叠 较多,气水同层与气层亦是,纵横波速度比与纵波阻 抗对水层、气水同层两者与气水同层、水层两者的区 分度不好。图 8b 为锦 72 井区盒1 段水层与气层的 纵横波速度比与纵波阻抗交会图,可以看出,水层与 气层在纵横波速度比与纵波阻抗交会图上重叠较 少,因此,通过对能够区分气层与水层分界线的散点 进行线性方程拟合,获得式(1):

 v<sub>P</sub>/v<sub>s</sub> = 6.544 × PIMP/10<sup>5</sup> + 0.887 。 (1) 在纵横波速度比小于 1.67,纵波阻抗小于 11 400 g · cm<sup>-3</sup> · μs · m<sup>-1</sup>条件下,当 v<sub>P</sub>/v<sub>s</sub><6.544×</li>
 PIMP/10<sup>5</sup>+0.887 时为气层,其含气层平面分布如图
 9 所示,黄色区域表示气层相对发育。对此结果和
 36 口实钻井进行符合率验证,其中 6 口不符合,30 口符合,验证结果符合率达到 83%。

万方数据



### a—采样点为水层、气水同层与气层;b—采样点为水层与气层

a-The sampling point is water layer, gas-water layer, gas layer; b-The sampling points are water and gas layers

#### 图 8 锦 72 井区 32 口井 H1 段储层段纵横波速度比与纵波阻抗交会

Fig. 8 The crossplot of  $v_{\rm p}/v_{\rm s}$  and impedance of 32 wells in He 1 member of wellblock Jin 72





## 3 结论

1) 通过测井资料定量化划分泥岩、干砂、水层、 气水同层、气层测井标准,结合岩石物理建模对无横 波曲线的井进行横波预测,优选出研究区的储层预 测敏感参数为纵横波速度比和纵波阻抗。

2)针对研究区目的层盒1段岩石物理分析认为,水层、气水同层、气层的敏感参数为纵横波速度比小于1.67,纵波阻抗小于11400g・cm<sup>-3</sup>・μs・m<sup>-1</sup>。

3)针对研究区流体识别的难点,通过对水层与 气层的纵横波速度比与纵波阻抗交会分析认为当  $v_{\rm P}/v_{\rm s}$ <6.544×*PIMP*/10<sup>5</sup>+0.887时认为是气层;当  $v_{\rm P}/v_{\rm s}$ >6.544×*PIMP*/10<sup>5</sup>+0.887时认为是水层,通过 纵横波速度比与纵波阻抗反演结果计算气层的平面 分布,验证符合率达83%。

#### 参考文献(References):

[1] 李红梅.弹性参数直接反演技术在储层流体识别中的应用[J]. 物探与化探,2014,38(5):970-975.

Li H M. The application of elastic parameters direct inversion to reservoir fluid identification [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(5):970-975.

- [2] 石亚兰,贾曙光,郑求根,等.叠前同时反演在浅层疏松砂岩储 层预测中的应用[J].物探与化探,2017,41(1):9-15.
   Shi Y L,Jia S G,Zheng Q G, et al. The application of prestack simultaneous inversion to shallow unconsolidated sandstone reservoir prediction[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2017,41 (1):9-15.
- [3] 程志国,胡婷婷,瞿建华,等.准噶尔盆地玛西地区致密砂砾岩 优质薄储层预测[J].物探与化探,2015,39(5):891-896.
   Cheng Z G,Hu T T,Qu J H, et al.High-quality and thin reservoir of tight conglomerate prediction in Maxi area of Junggar Basin[J].
   Geophysical and Geochemical Exploration,2015,39(5):891-896.
- [4] 陈军,陈岩.地震属性分析在储层预测中的应用[J].石油物探, 2001,40(3):94-99.

Chen J, Chen Y. Application of seismic attribute analysis in reservoir prediction [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2001, 40(3):94-99.

- [5] 王利田,苏小军,管仁顺,等.地震属性分析在彩 16 井区储层预 测中的应用[J].地球物理学进展,2006,21(3):922-925.
   Wang L T,Su X J,Guan R S, et al. The appliation of seismic attribute analyscs in predicating reservoir of cai 16 area[J].Progress in Geophysics,2006,21(3):922-925.
- [6] 王永刚,谢东,乐友喜,等.地震属性分析技术在储层预测中的应用[J].石油大学学报:自然科学版,2003,27(3):30-32.
  Wang Y G,Xie D,Yue Y X, et al. Application of seismic attribute analysis technology in reservir prediction[J]. Journal of the University of Petroleum: Science Edition, 2003,27(3):30-32.
- [7] 孙建孟,王永刚.地球物理资料综合应用[M].东营:中国石油 大学出版社,2000.
   Sun J M, Wang Y G.Comprehensive application of geophysical data [M].Dongying: China University of Petroleum Press,2000.
- [8] 王兴建,曹俊兴.纵横波联合反演在苏里格含气性检测中的应用[J].天然气工业,2008,28(10):44-45.
   Wang X J, Cao J X. Application of p and S wave inversion to detecting gas potential in the Sulige gas field[J]. Natural Gas Industry, 2008,28(10):44-45.
- [9] 曹绍贺,陈叙安.AVO 技术在杭锦旗锦 58 井区致密碎屑岩储 层预测中的应用[J].石油地质与工程,2017,31(2):54-60. Cao S H, Chen X A.Application of AVO technique for dense clastic rock reservoir prediction in Hangjingqijing 58 wellblock [J]. Petroleum Geology and Engineering,2017,31(2):54-60.
- [10] 李永杰,赵荣华.鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界储层自然 伽马测井相研究[J].石油地质与工程,2014,28(2):61-66.
  Li Y J,Zhao R H.The research of natural gamma ray logging for upper Palaeozoic reservoir in Hangjingqi area of Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Engineering,2014,28(2):61-66.
- [11] 赵俊峰,魏昭冰,范瑞虹.苏里格气层测井识别与评价研究[J].

断块油气田,2004,11(1):77-80.

Zhao J F, Wei Z B, Fan R H. The Research of identification and evaluation Sulige's gas-layers in well logging [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2004, 11(1):77 - 80.

- [12] 范玲玲.杭锦旗地区十里加汗区带致密砂岩高产气层特征研究
   [J].石油化工应用,2017,36(3):80-84.
   Fan L L.Study on characteristics of high productivity gas layers in tight sandstone in Shilijiahan zone of Hangjingqi area[J].Petro-chemical Industry Application,2017,36(3):80-84.
- [13] 谭廷栋.纵横波速比直观指示气层的解释方法[J].石油学报, 1990,1(3):41-45.
  Tan Y D. An interpretation technique for visually identifying gas formation by means of velocity ratio of compressional and shear waves[J].Acta Petroler Sinica, 1990,1(3):41-45.
- [14] 宗兆云,印兴耀,吴国忱.基于叠前地震纵横波模量直接反演的 流体检测方法[J].地球物理学报,2012,55(1):284-292.
   Zong Z Y, Yin X Y, Wu G C.Fluid identification method based on compressional and shear modulus direct inversion[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese),2012,55(1):284-292.
- [15] 张颖,许庆英,龚爱华,等.中子-密度重叠识别气层法在长庆 气田的应用[J].测井技术,2007,31(3):278-281,294.
  Zhang Y,Xu Q Y,Gong A H, et al. Application of neutron-density overlapping to identify gas reservoir in Changqing gas field[J].
  Well Logging Technology,2007,31(3):278-281,294.
- [16] 谭廷栋.应用纵横波速度比勘探天然气[J].石油地球物理勘 探,1987,22(1):86-93.
   Tan T D.Detecting a gas reservoir using the ratio of P-wave-velocity to S-wave-velocity[J].OGP,1987,22(1):86-93.
- [17] 印兴耀,周静毅.地震属性优化方法综述[J].石油地球物理勘探,2005,40(4):482-489.
   Yin X Y,Zhou J Y.Summary of optimum methods of seismic attributes[J].OGP,2005,40(4):482-489.

## $v_{\rm P}/v_{\rm S}$ applied to fluid identification of tight sandstone reservoir of Dongsheng gas field

## LI Can, GUI Ping-Jun

#### (Research Institute of Exploration and Development, North China Branch, SINOPEC, Zhengzhou 450006, China)

Abstract: The longitudinal heterogeneity of reservoir and gas saturation in He 1 member of well block Jin 72 of Dongsheng gas field is quite large, and gas and water distribution is diverse. Predicting effective reservoir is a key issue in exploration and development. Combined with well logging data, a statistical and comparative study method was used to establish the logging response characteristics and the criteria of fluid identification in the tight sandstone reservoir of He 1 member. The theory proves that the gas-bearing sandstone decreases with the increase of gas saturation, and the longitudinal wave velocity and the shear wave velocity decrease, but the longitudinal wave velocity changes more than the shear wave velocity. Therefore, the longitudinal and transverse wave velocity ratio decreases. Based on this theory, the reservoir fluid is quantitatively identified through cross-section analysis. At the same time, based on the longitudinal and transverse wave velocity ratio inversion and longitudinal wave impedance inversion analysis, the regularity of gas-water distribution and its spatial distribution characteristics in He 1 member of the study area are clarified, which provides the basis for oil and gas exploration in the study area.

Key words: Dongsheng gas field; longitudinal heterogeneity of reservoir; rock physics; He 1 member; gas and water distribution