

# Petrophysical Research of Low-porosity and Ultra-low-permeability Reservoirs in the Lower Member of Silurian Kepingtage Formation in Wellblock Shun 9

Dongsheng Lin<sup>1</sup>, Xingqiang Feng<sup>1</sup>, Weiqing Huang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Petroleum Exploration and Development, SINOPEC, Beijing

<sup>2</sup>Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing

Email: linds.syky@sinopec.com

Received: Oct. 8<sup>th</sup>, 2017; accepted: Jan. 18<sup>th</sup>, 2018; published: Apr. 15<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

The reservoir of lower member of Silurian Kepingtage Formation in Wellblock Shun 9 was deeply buried and it was a low-porosity and low-permeability reservoir. Wave impedance was insensitive to the reservoir and fluid because the well logging curve was seriously affected by borehole. Therefore, the petrophysical characteristics of Silurian reservoir and the sensitive parameters of reservoir and fluid are studied by rock physics test. The influence of pressure on the longitudinal and shear wave velocities of sandstone was greater than that of mudstone. The longitudinal and shear wave velocities of sandstone and mudstone decreased with the increase of temperature. The combination of longitudinal, shear wave velocity with wave impedance could distinguish sand and mudstone well. When the incident angle was large, the sand and mudstone could be separated better by using elastic impedance, and the velocity ratio of P-S wave was better for reservoir identification. By sorting the tested and defined parameters, the optimal fluid sensitive parameters in the study area are pointed out.

## Keywords

Petrophysics, Low-porosity and Ultra-low-permeability Reservoir, Silurian Kepingtage Formation, Wellblock Shun 9

---

# 顺9井区志留系柯坪塔格组下段低孔、特低渗储层岩石物理研究

林东升<sup>1</sup>, 冯兴强<sup>1</sup>, 黄为清<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中石化石油勘探开发研究院, 北京

<sup>2</sup>中国科学院地质与地球物理研究所, 北京

作者简介: 林东升(1983-), 男, 硕士, 工程师, 现主要从事储层预测及综合地质研究工作。

Email: linds.syky@sinopec.com

收稿日期: 2017年10月8日; 录用日期: 2018年1月18日; 发布日期: 2018年4月15日

## 摘要

顺9井区志留系柯坪塔格组下段埋深大, 为低孔、特低渗储层。由于测井曲线受井眼影响大, 波阻抗对储层和流体不敏感, 为此通过岩石物理试验来研究志留系的储层岩石物理特征和储层、流体的敏感参数。压力对砂岩纵、横波速度的影响比泥岩大, 砂岩和泥岩的纵、横波速度均随着温度的变大而减小; 纵、横波速度与波阻抗结合能够较好地区分砂、泥岩; 当入射角较大时, 利用弹性阻抗可以比较好地区分砂、泥岩; 纵横波速度比对储层的识别效果较好。通过对试验参数和定义的参数排序, 指出了研究区最佳的流体敏感参数。

## 关键词

岩石物理, 低孔、特低渗储层, 志留系柯坪塔格组, 顺9井区

Copyright © 2018 by authors, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

顺9井区位于塔里木盆地顺托果勒低隆起, 南部紧邻塔中隆起与古城隆起, 北邻塔北隆起, 东毗邻满加尔凹陷, 西侧紧邻阿瓦提凹陷。2011年3月完钻的顺9井在柯坪塔格组下段加砂压裂获得了低产油流, 实现了塔中北坡古生界碎屑岩领域的勘探突破。

顺9井区志留系柯坪塔格组埋深大, 均在5000 m以下, 且储层物性差, 孔隙度主要分布在5%~6%之间, 渗透率主要分布在0.05~0.5 mD之间, 为典型的低孔、特低渗储层。在该地质背景下, 储层与非储层的波阻抗差异较小, 利用波阻抗无法识别预测储层。然而, 储层预测是研究区勘探面临的核心问题之一, 因此需要寻找波阻抗以外的其他储层敏感岩石物理参数来预测, 而开展岩石物理研究是解决该问题的有效方法。虽然储层岩石物理特征可以通过测井曲线来研究, 但研究区多数井的井眼状况不好, 导致测井曲线严重失真, 因此利用测井曲线来识别目的层岩石物理特征比较困难。同时, 在埋深大、储层

物性差的条件下, 储层弹性参数如何随温度、压力、地层岩性、物性的变化还不十分清楚[1] [2] [3]。鉴于上述问题, 需要对研究区目的层开展岩石物理试验研究来寻找储层敏感弹性参数, 确定研究区目的层段岩石弹性参数(如阻抗、速度比等)与储层参数(岩性、孔隙度、流体等)之间的响应规律, 为储层预测奠定物理基础。

## 2. 岩石物理参数测试及规律分析

### 2.1. 压力、温度及流体效应

砂岩和泥岩的纵波速度( $v_p$ )、横波速度( $v_s$ )均随着压力( $p_c$ )的变大而增大, 加压初始阶段变化相对较快, 后期相对较慢(图 1)。砂岩和泥岩的  $v_p$ 、 $v_s$  均随着温度( $t$ )的变大而减小, 到 70℃ 左右变化缓慢, 而后速度变化相对加快(图 2)。

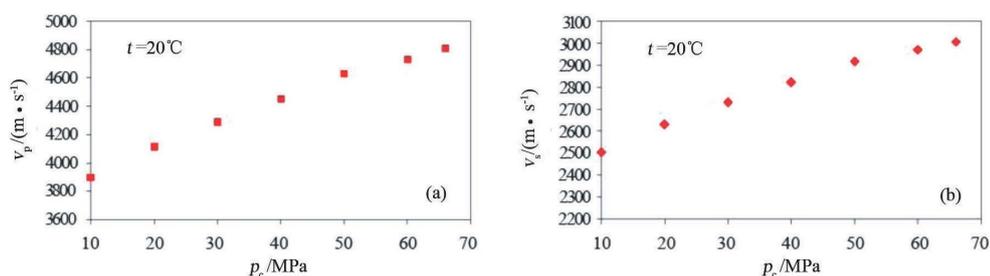


Figure 1. The sandstone P-wave velocity and S-wave velocity with the change of confining pressure  
图 1. 砂岩  $v_p$  (a)、 $v_s$  (b) 随  $p_c$  的变化规律

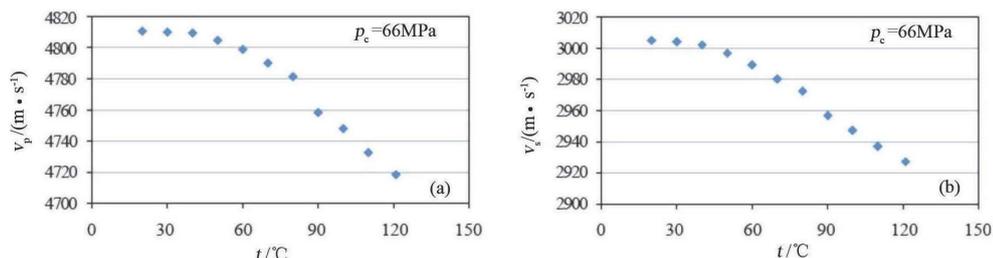


Figure 2. The sandstone P-wave velocity and S-wave velocity with the change of temperature  
图 2. 砂岩  $v_p$  (a)、 $v_s$  (b) 随  $t$  的变化规律

从图 3 中可以看出, 砂岩的  $v_p$  随含气体饱和度( $S_g$ )呈非线性变化, 岩石含有少量气体时, 能产生较大的  $v_p$  变化; 当含气量增大后, 岩石  $v_p$  对  $S_g$  的变化不敏感; 砂岩的  $v_s$  不随  $S_g$  的变化而改变, 说明横波对  $S_g$ 、含水饱和度( $S_w$ )变化不太敏感。

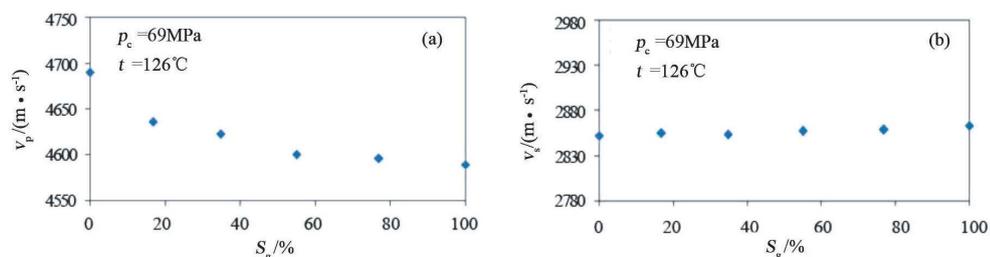


Figure 3. The sandstone P-wave velocity and S-wave velocity with the change of gas saturation  
图 3. 砂岩  $v_p$  (a)、 $v_s$  (b) 随  $S_g$  的变化规律

## 2.2. 岩石物理参数与孔隙度关系

通过统计岩心样品的密度( $\rho$ )与孔隙度( $\phi$ )的关系(图4)可以看出,砂岩和泥岩的 $\rho$ 都随 $\phi$ 的增大而减小,且泥岩平均 $\rho$ 比砂岩大。从图5中可以看出,砂岩和泥岩的 $v_p$ 、 $v_s$ 均随 $\phi$ 的增大而减小,泥岩平均 $\phi$ 比砂岩小。

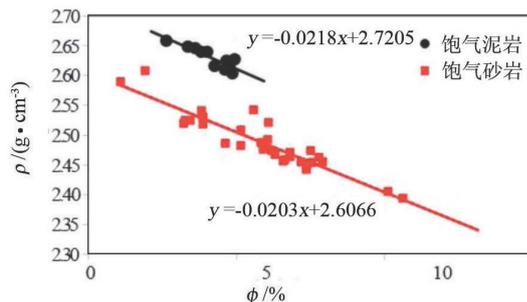


Figure 4. The density of sandstone and mudstone with the change of porosity  
图4. 砂岩和泥岩的 $\rho$ 随 $\phi$ 变化

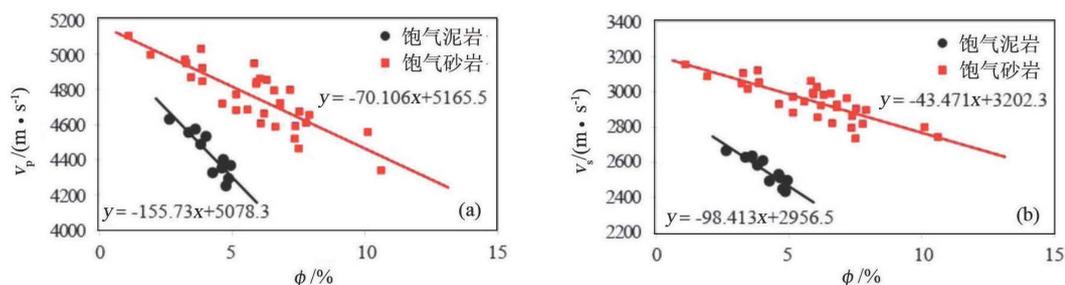


Figure 5. P-wave and S-wave velocity of sandstone and mudstone with the change of porosity  
图5. 砂岩和泥岩的 $v_p$  (a)、 $v_s$  (b)随 $\phi$ 的变化

## 3. 储层敏感岩石物理参数分析

由于研究区目的层储层与非储层的波阻抗差异小,储层的敏感岩石物理弹性参数不明确,为此开展了储层敏感岩石物理参数分析。图6和图7表明,砂、泥岩的 $v_p$ 与纵波阻抗( $Z_p$ )差异不大, $v_s$ 与横波阻抗( $Z_s$ )虽然有差异,但仅使用 $v_s$ 和波阻抗( $Z$ )也无法区分砂、泥岩,只有将 $v_p$ 、 $v_s$ 与 $Z$ 结合起来才能较好地地区分砂、泥岩。

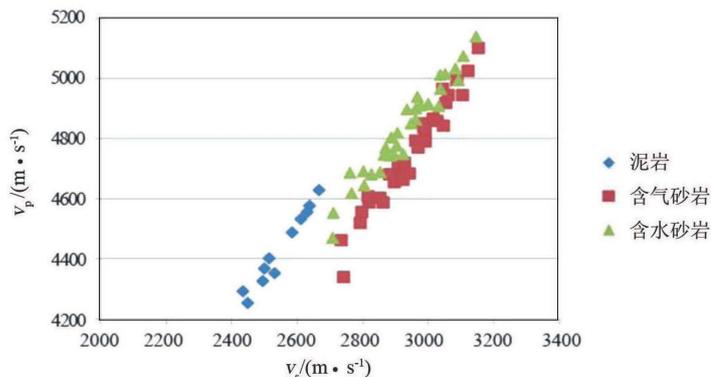
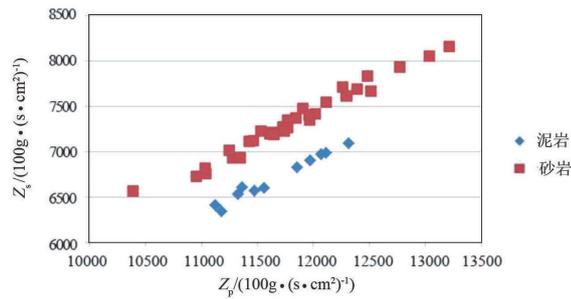
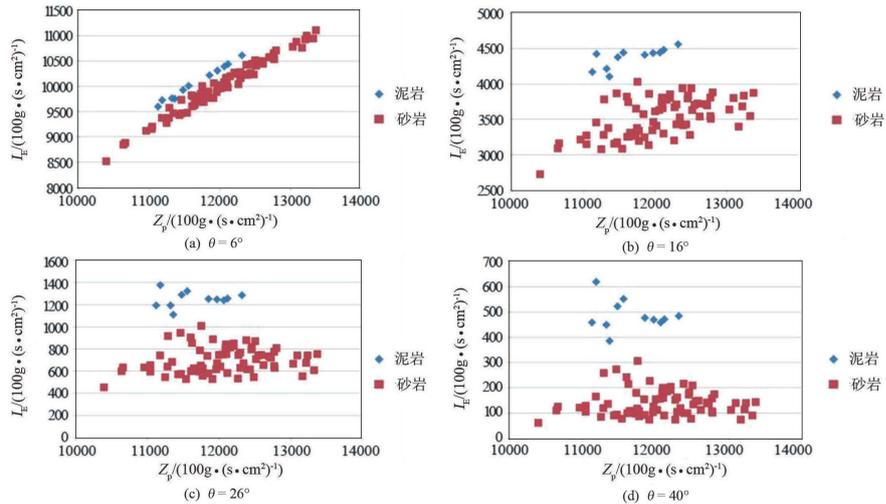


Figure 6. The intersection diagram of P-wave velocity and S-wave velocity  
图6.  $v_p$ - $v_s$  交会图



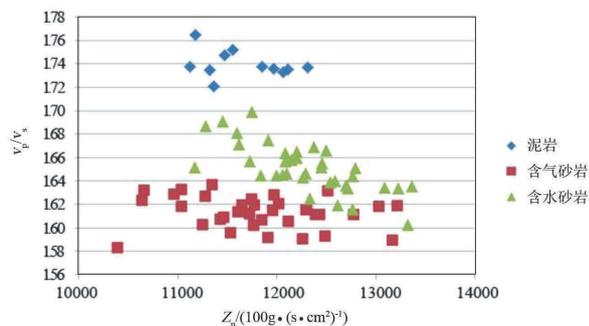
**Figure 7.** The intersection diagram of S-wave impedance with P-wave impedance  
**图 7.**  $Z_s$ - $Z_p$  交会图

Connolly 提出的弹性阻抗( $I_E$ )公式中同时包含了纵、横波参数, 因此可以试验  $I_E$  的储层敏感性。从图 8 可以看出, 当入射角( $\theta$ )较小时, 单纯利用  $I_E$  无法将砂、泥岩区分开;  $\theta$  增加到  $16^\circ$ ,  $I_E$  可以比较好地区分砂、泥岩; 当  $\theta$  进一步增大为  $26^\circ$  时,  $I_E$  区分砂、泥岩的能力也进一步增强; 当  $\theta$  达到  $40^\circ$  时,  $I_E$  可以清晰地把砂、泥岩区分开。



**Figure 8.** The intersection diagram of elastic impedance and P-wave impedance at different incidence angles  
**图 8.** 不同入射角  $I_E$ - $Z_p$  的交会图

如图 9 所示, 泥岩的纵横波速度比( $v_p/v_s$ )整体上大于砂岩, 其对砂、泥岩的区分效果也比较好的。



**Figure 9.** The intersection diagram of velocity ratio of P-wave and S-wave with P-wave impedance  
**图 9.**  $v_p/v_s$ - $Z_p$  交会图

## 4. 岩石物理参数流体敏感性分析

### 4.1. 岩石物理参数分类

饱水砂岩和饱气砂岩的  $v_p$ 、 $v_s$  均随  $\phi$  的变大而减小(图 10)，从趋势线可以看出，饱水砂岩  $v_p$  比饱气砂岩大， $v_s$  比饱气砂岩小，但总体数据很难区分，说明在  $v_p$ 、 $v_s$  与  $\phi$  交会图上很难识别流体。因此需要利用新的参数进行流体识别。

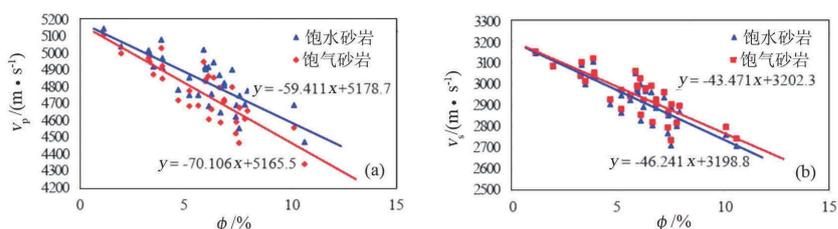


Figure 10. The P-wave velocity and S-wave velocity of sandstone with the change of porosity  
图 10. 砂岩  $v_p$  (a)、 $v_s$  (b) 随  $\phi$  的变化

根据岩石物理原理，影响岩石弹性参数的本质因素是固体介质及其结构、流体的耦合，不同的弹性参数对流体和变形的响应不同[4] [5]。从进行流体检测和岩性识别的角度，特别提出了 3 类参数的概念。

1) S 型参数：该类参数对流体不敏感。由于流体不传递剪应力，岩石的剪切模量( $G$ )对孔隙中流体不敏感，与  $G$  有关的一类弹性参数，如  $v_s$ 、参数  $\mu$ 、 $Z_s$  等对岩石孔隙中流体的存在以及含量变化都不敏感。从变形的角度看，上述参数主要响应于畸变。不同岩石的剪性参数是不同的，因此 S 型参数有助于区分岩性。

2) P 型参数：如体积模量( $K$ )， $v_p$ 、 $Z_p$ ，拉梅系数( $\lambda$ )。在物理本质上，它们同时反映了固体介质及其结构、流体的耦合。从变形的角度，对岩石的压缩性比较敏感，该类参数称为体性参数。

3) C 型组合参数：用上述弹性参数组合构造出的参数。组合参数应该是多种多样，该次研究特别指由剪性参数与体性参数构造的组合，如  $v_p/v_s$ ，泊松比( $\nu$ )， $Z_p^2 - c \cdot Z_s^2$ ， $\lambda - c \cdot \mu$  ( $c$  为常数)。

不同岩石物理参数对孔隙流体的敏感程度是不同的，为了量化指标，引进了岩石物理参数流体敏感性的概念。对于两种流体组成的系统，以含水样品为标尺，定义其流体敏感性参数( $F_s$ )：

$$F_s = \frac{A_w - A_i}{A_w}$$

式中： $A$  为某岩石物理参数；下标  $w$  表示水；下标  $i$  表示一种流体状态。

$F_s$  一般在 0~1 之间。 $F_s$  越大，则表明参数  $A$  对流体就越敏感。

根据样品试验数据，对上述参数的流体敏感性进行计算，统计出流体敏感性序列(图 11)。研究区岩石物理参数的  $F_s$  按大小依次排序为：

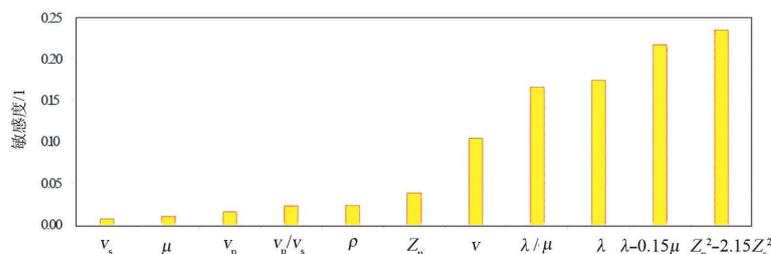


Figure 11. The fluid sensitivity sequence diagram of main parameters in the study area  
图 11. 研究区主要参数流体敏感性序列图

$$(Z_p^2 - 2.15Z_s^2) > (\lambda - 0.15\mu) > \lambda > \lambda/\mu > \nu > Z_p > \rho > v_p/v_s > v_p > \mu > v_s$$

上述 3 类岩石物理参数的特征对流体响应说明了组合参数在流体检测上有特别的意义。下面针对 3 类岩石物理参数交会图对砂岩样品流体识别进行分析。

### 4.2. P 型参数与 P 型参数关系分析

对研究区  $v_p$ 、 $\rho$ 、 $Z_p$ 、 $K$ 、 $\lambda$  等 P 型参数进行交会分析，发现饱水砂岩和饱气砂岩数据重叠多(图 12)，因此砂岩在  $\rho$ - $v_p$  交会图及  $Z_p$ - $v_p$  交会图上均不能进行流体识别。饱水砂岩  $K$  和饱气砂岩  $K$  在  $v_p$  小的区域可以区分，在  $v_p$  大的区域重叠多，不能区分；饱水砂岩  $\lambda$  比饱气砂岩  $\lambda$  大，数据重叠少，基本可以区分开(图 13)。

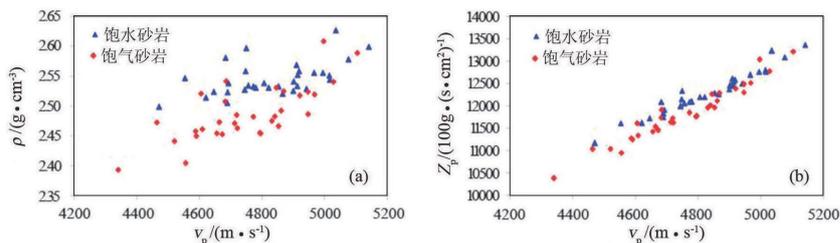


Figure 12. The intersection diagram of sandstone density and P-wave impedance with P-wave velocity  
图 12. 砂岩  $\rho$ (a)、 $Z_p$  (b)与  $v_p$  交会图

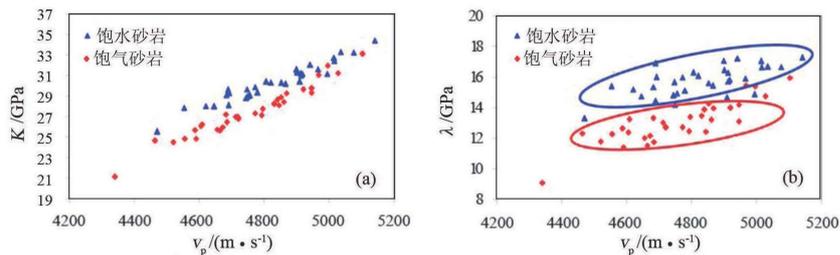


Figure 13. The intersection diagram of sandstone bulk modulus and lame constant with P-wave velocity  
图 13. 砂岩  $K$  (a)、 $\lambda$ (b)与  $v_p$  交会图

### 4.3. P 型参数与 S 型参数关系分析

从图 14、图 15、图 16 上可以看出，饱气砂岩的  $v_s$  比饱水砂岩  $v_s$  大，数据有重叠，但大部分可以分开；饱气砂岩的  $Z_s$  比饱水砂岩  $Z_s$  大，数据有部分重叠，但总体上可以分开；饱气砂岩的  $G$  主要分布在饱水砂岩  $G$  的左边，数据很少重叠，大致可以区分开。

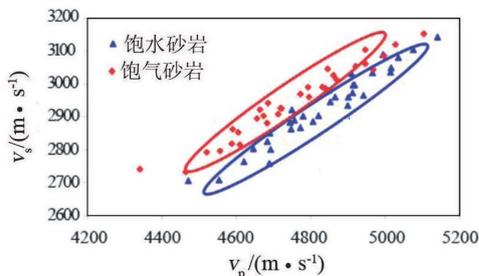


Figure 14. The intersection diagram of sandstone S-wave velocity with P-wave velocity  
图 14. 砂岩  $v_s$ - $v_p$  交会图

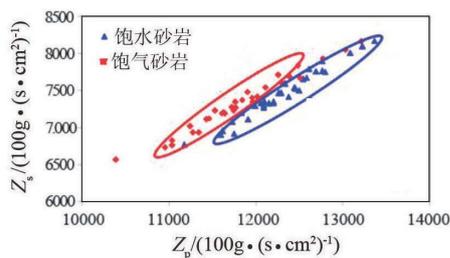


Figure 15. The intersection diagram of sandstone S-wave impedance with P-wave impedance  
图 15. 砂岩  $Z_s$ - $Z_p$  交会图

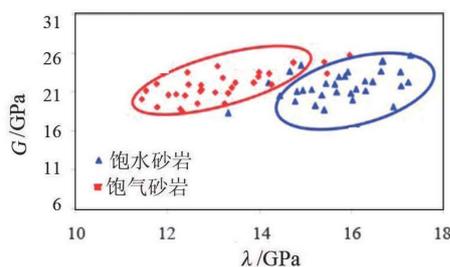


Figure 16. The intersection diagram of sandstone shear modulus and lame constant  
图 16. 砂岩  $G$ - $\lambda$  交会图

#### 4.4. P 型参数与 C 型组合参数关系分析

饱水砂岩的  $v_p/v_s$  比饱气砂岩大，数据重叠少，说明研究区砂岩在饱含水、气时，利用  $v_p/v_s$ - $v_p$  交会图及  $v_p/v_s$ - $Z_p$  交会图可以大致将两者区分开(图 17)。v 本质上与  $v_p/v_s$  相同，从图 18 上可以看出，饱水砂岩 v 比饱气砂岩 v 大，数据重叠少，利用  $v$ - $v_p$  交会图及  $v$ - $Z_p$  交会图可以将饱气砂岩与饱水砂岩区分开。构建的组合参数  $\lambda-0.15\mu$  和  $Z_p^2-2.15Z_s^2$ ，饱水砂岩比饱气砂岩大，数据重叠少，可以将饱气砂岩和饱水砂岩区分开(图 19)。

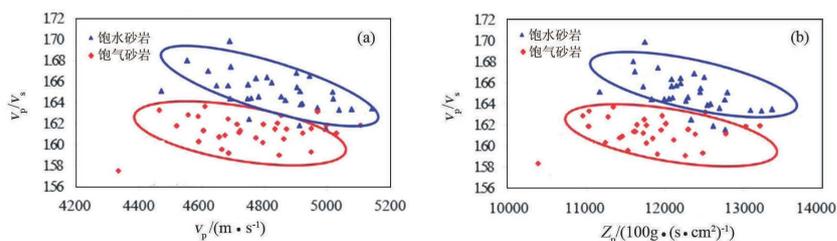


Figure 17. The intersection diagram of P-wave velocity and impedance with velocity ratio of P-wave and S-wave  
图 17. 砂岩  $v_p$  (a)、 $Z_p$  (b)与  $v_p/v_s$  交会图

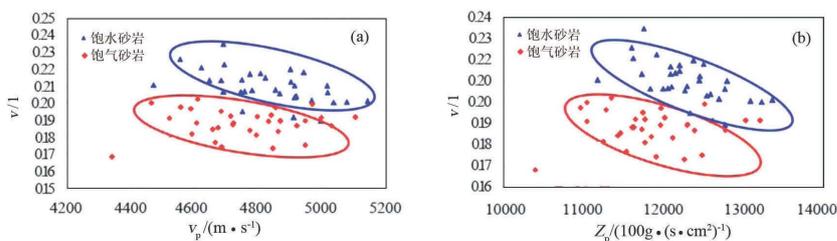


Figure 18. The intersection diagram of P-wave velocity and impedance with poisson ratio  
图 18. 砂岩  $v_p$  (a)、 $Z_p$  (b)与  $\nu$  交会图

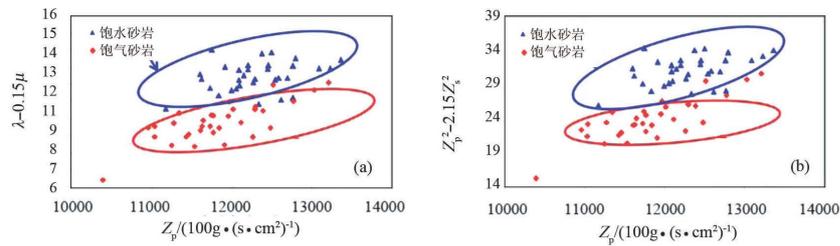


Figure 19. The intersection diagram of sandstone parameters with poisson ratio  
 图 19. 砂岩  $\lambda-0.15\mu$  (a)、 $Z_p^2-2.15Z_s^2$  (b) 与  $Z_p$  交会图

## 5. 结论

1) 压力对砂岩的  $v_p$ 、 $v_s$  影响大，并且与砂岩的  $\phi$  成正比；压力对泥岩的  $v_p$ 、 $v_s$  影响小，与泥岩  $\rho$  高、压实程度大有关；砂岩和泥岩的  $v_p$ 、 $v_s$  均随  $t$  的变大而减小；砂岩  $v_p$  随  $S_g$  呈非线性变化，饱水岩石含有少量气体时就能产生较大的  $v_p$  变化。

2) 研究区目的层砂、泥岩的  $v_p$  和  $Z_p$  差异不大，将  $v_p$ 、 $v_s$  和  $Z$  结合起来才能较好地区分砂、泥岩；随着  $\theta$  从  $6^\circ$  增大到  $40^\circ$ ， $I_E$  区分储层的能力也越来越强，当  $\theta$  较大时，利用  $I_E$  可以比较好地区分砂泥岩； $v_p/v_s$  区分储层的效果也比较明显。

3) P 型参数基本上不能识别流体，S 型参数和 P 型参数结合起来可以在一定程度上区分饱气砂岩和饱水砂岩，C 型组合参数识别流体的效果比较好。利用定义的  $F_S$ ，计算出研究区岩石物理参数的  $F_S$  按大小依次排序为： $(Z_p^2-2.15Z_s^2) > (\lambda-0.15\mu) > \lambda > \lambda/\mu > \nu > Z_p > \rho > v_p/v_s > v_p > \mu > v_s$ 。

## 参考文献

- [1] Dehua, H., Nur, A. and Morgan, D. (1986) Effects of Porosity and Clay Content on Wave Velocities in Sandstones. *Geophysics*, **51**, 2093-2107. <https://doi.org/10.1190/1.1442062>
- [2] Jizba, D. (1991) Mechanical and Acoustical Properties of Sandstones and Shales. Ph.D. Thesis, Stanford University, Stanford, California.
- [3] Mavko, G., Mukerji, T. and Dvorkin, J. (1998) *The Rock Physics Handbook*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [4] 施行觉, 夏从俊, 吴永刚. 储层条件下波速的变化规律及其影响因素的实验研究[J]. *地球物理学报*, 1998, 41(2): 234~240.
- [5] 马中高, 解吉高. 岩石的纵、横波速度与密度的规律研究[J]. *地球物理学进展*, 2005, 20(4): 905-910.

[编辑] 龚丹

**Hans** 汉斯

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2471-7185, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [jogt@hanspub.org](mailto:jogt@hanspub.org)