文章编号：1006-6616（2012）04-0418-07

基于常规测井数据计算储层岩石力学参数——以鄂尔多斯盆地上古生界为例

归 榕[1]，万永平[2]

（1. 中国地质大学（北京）地球科学与资源学院，北京 10083；
2. 陕西延长（石油）集团有限责任公司研究院，西安 710075）

摘 要：泊松比及杨氏模量等岩石力学参数是盆地构造应力场模拟、油气田钻完井及储层压裂改造设计的基础参数。在岩石力学实验研究及纵、横声波时差关系研究的基础上，针对鄂尔多斯盆地上古生界储层确定了基于常规测井资料计算横波时差关系式的待定系数 A、B、C，通过最小二乘法拟合的3个待定系数值分别为2.74、25.45、−370.16，基于待定系数计算公式求取的横波时差与实测横波时差具有较好的一致性。通过该方法计算出研究区上古生界储层杨氏模量在35593～37997 MPa之间，泊松比在0.21～0.25之间。研究区岩石力学参数计算公式的确定及岩石力学参数计算为鄂尔多斯盆地气田勘探开发提供了数据基础。

关键词：常规测井；横波时差；岩石力学参数；鄂尔多斯盆地；上古生界
中图分类号：TU452 **文献标识码**：A

油气储层岩石力学参数（泊松比、杨氏模量等）是盆地构造应力场模拟、油气田钻完井及储层压裂改造设计的基础参数[1～2]，各种岩石力学参数在生产研究过程中可以通过钻井取心岩石力学实验及地球物理测井获得[3]。受到钻井取心费用的限制及岩石力学实验参数的局限性，基于地球物理横波时差测井资料计算储层岩石力学参数的方法被广泛应用于生产研究中[4～6]。前人基于纵波时差对横波时差的计算方法做了大量探讨，提出了横波时差和纵波时差之间的经验关系式、基于含泥质砂岩模型的 Q 指数计算模型以及待定系数法关系式[7～9]，其中待定系数法计算模型是在研究区实测资料的基础上确定待定系数，进而完成横波时差及岩石力学参数计算，具有较好的适用性和推广性[10～12]。本文根据鄂尔多斯盆地陕北斜坡上古生界储层发育特征[13]，通过岩石力学实验确定了研究区纵—横波时差关系式待定系数，基于该关系式计算的横波时差与实测横波时差对应关系良好，并由此完成岩石力学参数计算。横波时差关系式的确定及岩石力学参数的计算为本区天然气勘探开发提供了较好的数据基础。

1 岩石力学参数计算方法

岩石形变主要力学参数有杨氏弹性模量 E，切变弹性模量 μ，体积弹性模量 K 和泊松比

收稿日期：2012-06-29
基金项目：陕西省科技统筹创新工程项目“陆相页岩气资源地质研究与勘探开发关键技术攻关”
作者简介：归榕（1985-），女，陕西西安人，硕士研究生，主要从事油气储层研究。E-mail：wanhunter@163.com

υ 等[14]。岩石力学理论证明，油气储层中上述各种力学参数是纵波时差 Δt、横波时差 Δt_s 和岩石密度 ρ 的函数，纵波速度 V_p、横波速度 V_s 与弹性模量 E、泊松比 υ 及密度 ρ 等参数存在以下关系：

$$V_p = \frac{1}{\Delta t} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \tag{1}$$

$$V_s = \frac{1}{\Delta t_s} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \tag{2}$$

由公式（1）及公式（2）变换可得：

$$\nu = \frac{\Delta t_s^2 - 2\Delta t^2}{2(\Delta t_s^2 - \Delta t^2)} \tag{3}$$

$$E = \frac{\rho}{\Delta t_s^2}\frac{3\Delta t_s^2 - 4\Delta t^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t^2} \tag{4}$$

上述各种岩石力学参数计算过程均需要岩石密度及横波时差参数，岩石密度在常规测井资料中均可获得，横波时差参数需要通过阵列测井或偶极子声波测井方可获得。现场生产过程中大部分测井选择常规测井，研究过程中需要通过实测声波时差数据建立纵波时差及横波时差关系式，并利用实测数据验证关系式的适用性，进而计算获得各目的层平面上各井点横波时差，完成力学参数的计算工作。

根据前人研究成果[10,12,15]，横波时差及纵波时差存在以下关系式：

$$\Delta t_s = \frac{\rho \Delta t^2}{A\Delta t + B\rho + C} \tag{5}$$

Gristensen 由实测资料得出的横波和纵波的经验关系式：

$$\Delta t_s = \frac{\Delta t}{\left[1 - 1.15\frac{(1/\rho) + (1/\rho)^3}{e^{1/\rho}}\right]^{1.5}} \tag{6}$$

另外，横波时差及纵波时差之间关系还可以通过基于泥质砂岩模型的 Q 指数计算法及泥质含量计算法获得[16]。前人研究[10,12]表明，Gristensen 得出的经验公式（6）缺乏修正关系，在新区应用时需要系统性验证，Q 指数计算法及泥质含量计算法需要岩石骨架密度及其纵波时差、孔隙流体密度及其纵波时差以及密度孔隙度和声波孔隙度等多项参数，整体上影响了计算结果的准确性。而经验公式（5）在岩石力学实验实测数据的基础上得出待定系数，具有较好的适用条件，3 个待定系数一般取值为：2.12，45.33，－167.31[15]。但该待定系数取值来源于理论计算，在实际应用过程中，为提高横波时差计算结果的可靠性，还需要基于实测数据对待定系数进行修正。本次研究过程中主要采用该方法完成研究区各目的层横波时差的计算工作。

2　岩石力学参数计算过程

2.1　待定系数确定

基于以上研究方法，对鄂尔多斯盆地陕北斜坡东部延安地区上古生界储层完成岩石力学参数计算。首先分别针对研究区石炭系本溪组、二叠系山西组、石盒子组及石千峰组共计 23 组岩石样品完成单轴压缩实验力学测试工作，采用的实验仪器主要为美国 MTS 压机和美

国 PAC 公司的 32 通道 PCI-II 声发射系统，分别获得了各层系泥岩、粉砂质泥岩、细砂岩、砂岩及砾岩的岩石密度、纵横波速、动态泊松比、动态弹性模量等力学参数，并基于上述计算公式，分别确定了各组数据对应的待定系数 A、B、C（见表 1），进而通过最小二乘法拟合确定出 3 个待定系数分别为 2.74、25.45、－370.16。

表 1　岩石力学实验及横波时差计算公式待定系数

Table 1　Rock mechanical test and the undetermined coefficients of the formula for shear wave slowness

编号	层位	岩性	岩芯密度/($g\cdot cm^{-3}$)	纵波波速/($m\cdot s^{-1}$)	横波波速/($m\cdot s^{-1}$)	动态泊松比	动态弹性模量/GPa	A	B	C
1-1	本溪组	砾岩	2.51	4458.9	2642.3	0.22	43.2	2.47	29.82	－296.30
1-2			2.49	4997.0	2672.2	0.29	46.3	2.81	15.92	－335.99
1-3			2.49	4591.7	2527.8	0.28	40.9	3.23	707.32	－2173.32
2-1	石千峰组	细砂岩	2.60	4629.6	2688.2	0.24	46.9	2.80	223.59	－861.62
2-2			2.60	4626.9	2658.0	0.25	46.2	2.88	141.11	－668.68
2-3			2.61	4760.0	2701.6	0.26	48.2	2.92	197.93	－819.67
3-1	石盒子组	中砂岩	2.70	4810.6	2565.6	0.30	46.4	2.84	64.04	－463.86
3-2			2.70	4996.0	2575.3	0.31	47.3	2.84	70.23	－480.31
3-3			2.70	4759.0	2562.6	0.29	46.1	2.74	22.35	－331.02
4-1	山西组	砂岩	2.48	5005.0	2750.0	0.28	48.3	2.70	24.01	－326.17
4-2			2.50	5004.0	2780.0	0.27	49.5	2.39	99.13	－449.52
4-3			2.49	5004.5	2765.0	0.27	48.9	2.41	110.86	－484.57
5-1	山西组	细砂岩	2.56	5004.0	2619.9	0.31	46.1	2.83	57.91	－447.57
5-2			2.54	5100.0	2450.0	0.34	41.2	2.36	191.60	－711.02
5-3			2.53	5048.5	2616.8	0.31	45.7	2.44	40.42	－327.06
6-1	石盒子组	泥岩	2.66	4316.4	2430.6	0.26	39.9	2.70	410.31	－1373.04
6-2			2.65	4674.8	2501.0	0.29	43.2	2.70	246.79	－929.92
6-3			2.66	4589.9	2526.8	0.28	43.5	2.81	15.47	－334.80
7-1	本溪组	泥岩	2.65	5445.7	2964.5	0.28	60.2	3.04	390.30	－1330.88
7-2			2.66	5220.8	2680.2	0.32	50.6	2.89	149.33	－690.52
7-3			2.66	5333.2	2822.4	0.30	55.4	2.97	273.42	－1020.26
8-1	山西组	粉砂质泥岩	2.63	4259.8	2419.4	0.26	38.9	2.7	300.80	－1076.29
9-1	山西组	泥岩	2.53	5218.8	2609.4	0.33	46.0	2.44	55.28	－364.81

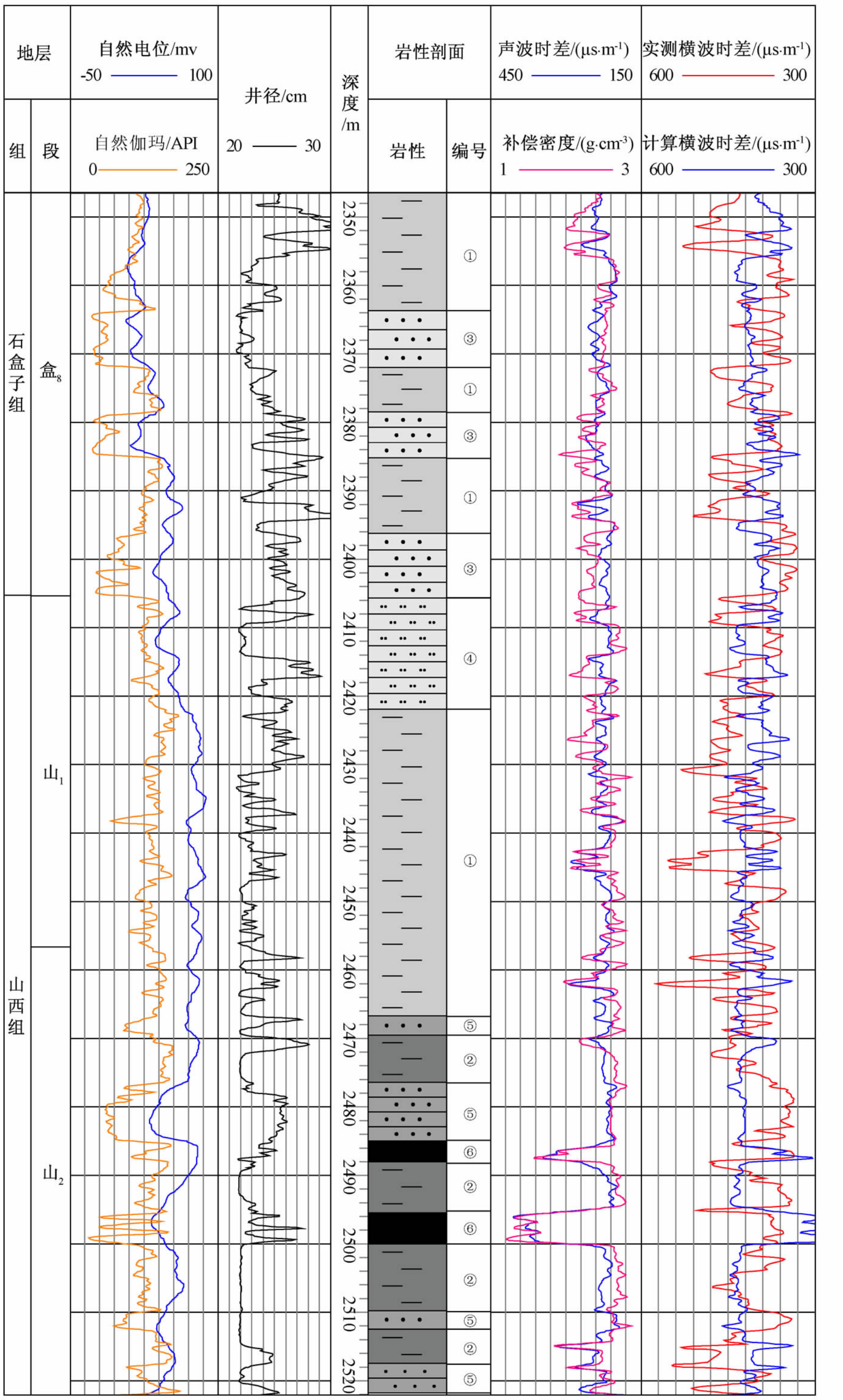
注：实验在中国地震局地球物理研究所完成，测试仪器为美国 MTS 压机和美国 PAC 公司的 32 通道 PCI-II 声发射系统，测试在室温条件下进行

2.2　计算横波时差与实测横波时差对比

研究区及邻区共有横波测井资料 3 口，本次研究过程中利用上述计算方法及待定系数分别计算了横波时差并与实测数据进行对比，发现在主要目的层二叠系山西组山$_2$段—石盒子组盒$_8$段，由经验公式计算得出的横波时差值与实测值具有较好的一致性（见图 1），特别是在泥岩层段及砂泥岩互层段，两条曲线几乎相互叠合；在煤层段等扩径井段，受井径的影响，计算横波时差值比实测值小 65～75 μs/m；在纯砂岩段，计算横波时差值比实测值高出 50～65 μs/m。

3　岩石力学参数计算结果

在相同研究区域，沉积岩层经历了相同的成岩作用，岩石力学参数直接与岩性相关，即不同层位岩石力学性质与其岩性组成直接相关。研究区上古生界主要为三角洲前缘沉积形成



①—浅灰色泥岩；②—灰黑色泥岩；③—灰白色中砂岩；④—灰白色细砂岩；⑤—灰黑色中砂岩；⑥—煤层

图 1　研究区上古生界储层计算横波时差与实测横波时差对比

Fig. 1　Comparison diagram of calculated and measured shear wave slowness in the Upper Paleozoic of study area

的碎屑岩储层，岩性主要为砂泥岩互层，夹少量煤层。本次岩石力学参数计算过程中基于研究区各目的储层沉积微相展布特征研究，采用储层砂地比的方法将各目的层段在平面上划分成若干区域，其中盒$_8$段划分为砂地比 <0.20、0.20~0.40、 >0.40 等 3 个区间；山$_1$段及山$_2$段划分为砂地比 <0.15、0.15~0.30、 >0.30 等 3 个区间（见图 2）。

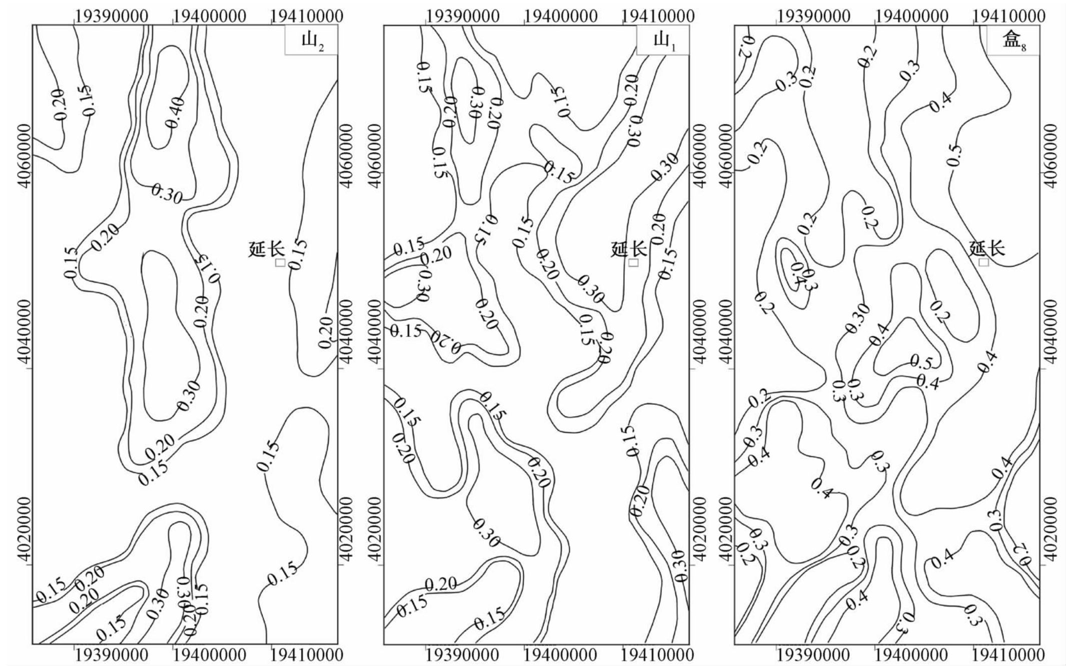


图 2　研究区上古生界二叠系山西组—石盒子组砂地比平面图

Fig. 2　Sand content distributions of Permian Shanxi-Shihezi Formation of Upper Paleozoic in the study area

基于上述计算方法，以岩石力学测井数据为约束条件，利用研究区内 117 口井的常规测井资料，分区计算了 3 个目的层的杨氏模量 E 和泊松比 v，其中杨氏模量在 35593 ~ 37997 MPa 之间，泊松比在 0.21 ~0.25 之间（见表 2）。

表 2　研究区上古生界储层泊松比及杨氏模量计算结果

Table　The calculated results of Young modulus and Poisson ration of Upper Paleozoic in the study area

地层	S	v	E/MPa
盒$_8$段	<0.20	0.20	37409
	0.20 < S < 0.40	0.24	37650
	>0.40	0.22	37723
山$_1$段	<0.15	0.20	37119
	0.15 < S < 0.30	0.21	37013
	>0.30	0.25	37997
山$_2$段	<0.15	0.21	35593
	0.15 < S < 0.30	0.22	36455
	>0.30	0.22	36730

注：S——砂地比，盒$_8$段 S < 0.20 为分流间湾，S > 0.20 为分流河道；山$_1$及山$_2$段 S < 0.15 为分流间湾，S > 0.15 为分流河道；v——泊松比；E——杨氏模量

4　结论

在岩石力学实验研究的基础上，建立了鄂尔多斯盆地上古生界储层基于常规测井资料计算横波时差的关系式，通过最小二乘法拟合确定 3 个待定系数 A、B、C 的值分别为 2.74、25.45、-370.16。

利用基于常规测井资料建立的横波时差关系式计算的横波时差值与实测值在泥岩层段及砂泥岩互层段具有较好的一致性；在煤层段等扩径井段，受井径的影响，计算横波时差值比实测值小 65 ~ 75 μs/m；在纯砂岩段，计算横波时差值比实测值大 50 ~ 65 μs/m。在后续研究中应重点关注纯砂岩段计算横波时差值与实测值的误差分析问题。

在储层展布特征研究的基础上，基于常规测井资料计算了研究区上古生界储层杨氏模量及泊松比，杨氏模量在 35593 ~ 37997 MPa 之间，泊松比在 0.21 ~ 0.25 之间。

参　考　文　献

[1]　Brown E T. Rock mechanics in Australia [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2002, 39 (5): 529 ~ 538.

[2]　金衍，陈勉，柳贡慧，等. 大位移井的井壁稳定力学分析 [J]. 地质力学学报，1999，5 (1)：4 ~ 11.
JIN Yan, CHEN Mian, LIU Gong-hui, et al. Well bore stability analysis of extended reach wells [J]. Journal of Geomechanics, 1999, 5 (1): 4 ~ 11.

[3]　李金柱，李双林. 岩石力学参数的计算及应用 [J]. 测井技术，2003，27 (增刊)：15 ~ 18.
LI Jin-zhu, LI Shuang-lin. Calculation of rock mechanics parameters using compressional and shear waves data and its application [J]. Well Logging Techonology, 2003, 27 (Supp.): 15 ~ 18.

[4]　孙东生，王红才，侯默，等. 影响水力压裂效果的因素及人工神经网络评价 [J]. 地质力学学报，2006，12 (4)：485 ~ 491.
SUN Dong-sheng, WANG Hong-cai, HOU Mo, et al. Factors influencing the effects of hydrofracturing in a low-permeability oilfield and potential evaluation using artificial neural network [J]. Journal of Geomechanics, 2006, 12 (4): 485 ~ 491.

[5]　蒋廷学，汪永利，丁云宏，等. 由地面压裂施工压力资料反求储层岩石力学参数 [J]. 岩石力学与工程学报，2004，23 (14)：2424 ~ 2429.
JIANG Ting-xue, WANG Yong-li, DING Yun-hong, et al. Determination of rock mechanics parameters by pressure of surface fracturing treatment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (14): 2424 ~ 2429.

[6]　王建强，张丽君. 利用横波时差计算孔隙度的方法研究 [J]. 石油天然气学报，2007，29 (6)：92 ~ 94.
WANG Jian-qiang, ZHANG Li-jun. Method for computing porosity by using shear moveout [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29 (6): 92 ~ 94.

[7]　Murphy W, Reischer A, Hsu K. Modulus decomposition of compressional and shear velocities in sand bodies [J]. Geophysics, 1993, 58 (2): 227 ~ 239.

[8]　路保平，鲍洪志. 岩石力学参数求取方法进展 [J]. 石油钻探技术，2005，33 (5)：44 ~ 47.
LU Bao-ping, BAO Hong-zhi. Advances in calculation methods for rock mechanics parameters [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 33 (5): 44 ~ 47.

[9]　Wang Qian, Ji Shaocheng, Sun Shengsi, et al. Correlations between compressional and shear wave velocities and corresponding Poisson's ratios for some common rocks and sulfide ores [J]. Tectonophysics, 2009, 469 (1): 61 ~ 72.

[10]　杨秀娟，张敏，闫相祯. 基于声波测井信息的岩石弹性力学参数研究 [J]. 石油地质与工程，2008，22 (4)：39 ~ 42.
YANG Xiu-juan, ZHANG Min, YAN Xiang-zhen. Study on acoustic logging-based rock elasticity parameters [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2008, 22 (4): 39 ~ 42.

[11]　朱留方，沈建国. 从阵列声波测井波形处理地层纵、横波时差的新方法 [J]. 地球物理学进展，2006，21 (2)：

483 ~488.

ZHU Liu-fang, SHEN Jian-guo. The new method of processing the slowness of P- and S-wave from waveforms of array sonic logging [J]. Progress in Geophysics, 2006, 21 (2): 483 ~488.

[12] Oyler D C, Mark C, Molinda G M. In situ estimation of roof rock strength using sonic logging [J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 83 (4): 484 ~490.

[13] 万永平, 李园园, 梁晓. 基于流体包裹体的储层微裂缝研究——以陕北斜坡上古生界为例 [J]. 地质与勘探, 2010, 46 (4): 711 ~715.

WAN Yong-ping, LI Yuan-yuan, LIANG Xiao. Fractures of reservoirs inferred from fluid inclusions: A case study of the Upper Paleozoic of northern Shaanxi Slope [J]. Geology and Exploration, 2010, 46 (4): 711 ~715.

[14] 尤明庆. 岩样三轴压缩的破坏形式和Coulomb强度准则 [J]. 地质力学学报, 2002, 8 (2): 179 ~185.

YOU Ming-qing. Destroy character and coulomb criterion of rock specimen in pseudo-triaxial compression [J]. Journal of Geomechanics, 2002, 8 (2): 179 ~185.

[15] 王冠贵. 声波测井理论基础及其应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1988: 47 ~49.

WANG Guan-gui. Acoustic logging theory and its applicaton [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1988: 47 ~49.

[16] 王玉梅, 苗永康, 孟宪军, 等. 岩石物理横波速度曲线计算技术 [J]. 油气地质与采收率, 2006, 13 (4): 94 ~96.

WANG Yu-mei, MIAO Yong-kang, MEN Xian-jun, et al. Calculation procedure of shear velocity curve on petrophysics [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2006, 13 (4): 94 ~96.

ROCK MECHANICS PARAMETER CALCULATION BASED ON CONVENTIONAL LOGGING DATA: A CASE STUDY OF UPPER PALEOZOIC IN ORDOS BASIN

GUI Rong[1], WAN Yong-ping[2]

(1. *School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*;
2. *Research Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co. Ltd.*, *Xi'an* 710075, *China*)

Abstract: As the rock mechanics parameters such as Young modulus and Poisson ration are the basic data for drilling and completion as well as design for reservoir fracturing in oil field, and for simulation of tectonic stress field in sedimentary basin, it is the key contents that obtain rock mechanic parameters during petroleum exploration and development. Based on rock mechanic test and relations study between compressional wave slowness and shear wave slowness, this paper established the undetermined coefficients of the formula for shear wave slowness based on conventional logging data. The values obtained through the least square method for the three undetermined coefficients A, B and C are 2.74, 25.45, −370.16 respectively. The calculated shear wave slowness is consistent to the tested ones. Based on the calculated method, the results of Young modulus and Poisson ration of the Upper Paleozoic of Ordos Basin are range from 35593 MPa to 37997 MPa and from 0.21 to 0.25 respectively. The establishment of the formula for the rock mechanics and the study on the rock mechanical parameters laid a theoretical foundation on the research work of gas field exploration and development.

Key words: conventional logging; shear wave slowness; rock mechanics parameter; Ordos Basin; the Upper Paleozoic