

不同干燥岩石体积模量计算方法在S油田的对比分析研究

史瑞其¹, 鲍祥生², 汪 轩¹, 刘励云¹, 洗银燕²

(1. 中国海洋石油国际有限公司, 北京, 100028; 2. 广东石油化工学院, 广东 茂名, 525000)

摘要: 时移地震随着OBN等海上先进采集技术的发展而得到越来越多的重视, 相对传统采集技术, 以OBN为代表的先进采集技术提升了时移地震资料质量, 为更好地认识油气藏提供了宝贵的资料, 但现阶段S油田尚未形成相适应的时移地震解释技术, 目前还面临着定量化程度不够、双因素油藏参数变化引起时移地震差异规律认识不清等问题, 究其原因是S油田所用的时移地震岩石物理手段研究尚不够成熟, 优选出适用的干燥岩石体积模量计算方法对形成可靠的时移地震岩石物理手段非常重要, 基于S油田岩石物理测试数据和油藏数据, 从预测体积模量与实测体积模量对比、预测体积模量在纵波速度预测方面的应用两个角度开展分析, 指出在有效压力大于等于S油田目前最低有效压力时, Macbeth法是四种方法中最优的方法, 在提供两个样本的体积模量预测中, 最大预测误差绝对值也仅有5.28%, 且预测的纵波速度预测误差平均绝对值也只有3.16m/s。实际应用表明Macbeth法针对一定孔隙储层在已知三个压力测量参数情况下具有较好的计算精度。

关键词: 时移地震; OBN; 岩石物理; 体积模量; Macbeth法

中图分类号: P631 **文献标志码:** A

Comparative analysis of bulk modulus calculation methods of different dry rocks in S Oilfield

SHI Ruiqi¹, BAO Xiangsheng², WANG Xuan¹, LIU Liyun¹, XIAN Yinyan²

(1. CNOOC International Limited, Beijing, 100028, China; 2. Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming, 525000, China)

Abstract: With the development of advanced offshore acquisition technologies such as OBN, time-shifted seismic data has received more and more attention. Compared with traditional acquisition technologies, advanced acquisition technologies represented by OBN have improved the quality of time-shifted data and provided valuable data for a better understanding of oil and gas reservoirs. However, the S Oilfield still needs to form a suitable time-shifted seismic interpretation technology, which still faces problems such as insufficient quantization and unclear understanding of time-shifted seismic differences caused by the change of dual factor reservoir parameters. The reason is that the research on the time-shifted seismic rock physical means used in the S Oilfield needs to be more mature. It is essential to select a suitable method for calculating the bulk modulus of dry rock to form a reliable time-shifted seismic petrophysical methods. This paper compares the predicted bulk modulus with the measured bulk modulus. It applied the predicted bulk modulus in the longitudinal velocity prediction based on the petrophysical test data and reservoir data of the S Oilfield. It is pointed out that when the effective pressure is greater than or equal to the current minimum effective pressure of the S Oilfield, the Macbeth method is the optimal method among of the four methods. In the bulk modulus prediction with two samples, the maximum absolute value of prediction error is only 5.28%, and the average absolute value of prediction error of longitudinal wave velocity is only 3.16m/s. The practical application shows that the Macbeth method has good calculation accuracy for a specific pore reservoir with three known pressure measurement parameters.

Key words: time-shifted seismic; OBN; petrophysics; bulk modulus; Macbeth method

引用格式: 史瑞其, 鲍祥生, 汪轩, 等. 不同干燥岩石体积模量计算方法在S油田的对比分析研究[J]. 复杂油气藏, 2023, 16(4): 405-409, 426.

SHI Ruiqi, BAO Xiangsheng, WANG Xuan, et al. Comparative analysis of bulk modulus calculation methods of different dry rocks in S Oilfield [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2023, 16(4): 405-409, 426.

收稿日期: 2023-09-06; 改回日期: 2023-10-29。

第一作者简介: 史瑞其(1986—), 工程师, 硕士, 主要从事地震储层预测、波动方程正反演工作。E-mail: shirq@cnoocinternational.com。

基金项目: 中国海洋石油集团有限公司“十四五”重大科技项目“‘两岸一带’重点区勘探开发地球物理关键技术(KJGG2022-0903)”。

时移地震技术是一种油藏管理技术,一般利用不同时间采集的地震资料、动态资料等进行油藏研究,源于20世纪70年代中期^[1],经过几十年的发展,已被国内外公认为是较好认识剩余油分布、识别死油区、提高油田采收率等方面的一项重要技术^[1-4]。时移地震技术目前在海上越来越受到重视,这主要得益于海上采集技术的进步,目前抗干扰能力强的OBN采集技术已在国内外一些油田得到实施,大大降低因采集因素不同引起的非一致性对时移地震资料的影响,极大地促进时移地震数据质量^[5-6]。由于S油田使用OBN采集技术,基于OBN采集获得高质量的时移地震资料较好地促进了S油田的开发,但目前S油田时移地震差异解释还面临着定量化程度不够、双因素油藏参数变化引起时移地震差异规律认识不清等问题,究其原因S油田所用的时移地震岩石物理手段研究尚不够成熟,这一问题的存在制约了时移地震差异解释技术在S油田的发展。目前已认识到基于Gassmann方程是比较适合于碎屑岩沉积研究的一种时移地震岩石物理方法^[2,7],但要使得Gassmann方程在研究靶区发挥较好的作用,最重要的是选择适合靶区的干燥岩石体积模量计算方法。

本文以S油田实测的岩石物理测试数据和油藏数据为基础,对比目前四种典型干燥岩石体积模量计算方法应用效果,从中选择合理的方法。目前用来计算干燥岩石体积模量的方法有很多,按用途来分,可分为两类,一类可称之为基质型干燥岩石体积模量计算方法,比如Voigt法,主要用来计算只包含基质的干燥岩石体积模量上限,Reuss法,主要用来计算只包含基质的干燥岩石体积模量下限;另一类可称之为孔隙型干燥岩石体积模量计算方法,这一类涉及方法有很多,不同方法考虑的因素不同,有些只考虑储层方面,相关参数有孔隙度、压力、温度、泥质含量等,有些还考虑沉积因素,相关参数有临界孔隙度、每个颗粒接触点的平均数等,这里列出有代表性的四种方法,比如Dvorkin-Nur法,是在考虑沉积时临界孔隙度、每个颗粒接触点的平均数、压力等参数形成的计算方法;Kriedt法,是一种基于储层孔隙度和基质体积模量的计算方法;YMH法,是一种基于孔隙度、泥质含量、储层温度和压力的计算方法;Macbeth法,是一种基于孔隙度和压力有关的计算方法。由于研究对象是针对孔隙储层,所以这里对四种代表性孔隙型干燥岩石体积模量

计算方法进行对比分析。

1 理论方法

1.1 Gassmann理论方程

1951年,Gassmann^[7]通过研究形成了流体饱和岩石的体积模量和剪切模量计算方程,两个方程可用公式(1)和(2)表示。

$$K^G = K_{\text{dry}} + \frac{(1 - \frac{K_{\text{dry}}}{K_{\text{ma}}})^2}{\frac{\phi}{K_f} + \frac{1 - \phi}{K_{\text{ma}}} - \frac{K_{\text{dry}}}{K_{\text{ma}}}} \quad (1)$$

$$\mu^G = \mu_{\text{dry}} \quad (2)$$

式中, K^G 、 μ^G 分别是流体饱和岩石的体积模量和剪切模量; K_{dry} 、 μ_{dry} 分别是干燥岩石的体积模量和剪切模量; K_{ma} 是基质的体积模量; ϕ 是孔隙度; K_f 是流体的体积模量。

综合Gassmann理论方程获得流体饱和岩石的体积模量、剪切模量以及流体饱和岩石密度,利用公式(3)和(4)可用来计算流体饱和岩石的纵波速度和横波速度。

$$v_p = \sqrt{\frac{K^G + \frac{4}{3}\mu_{\text{dry}}}{\rho}} \quad (3)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu_{\text{dry}}}{\rho}} \quad (4)$$

1.2 不同干燥岩石体积模量计算方法

1.2.1 Dvorkin-Nur法

Dvorkin-Nur法,是Dvorkin等^[8]在Mindlin等岩石物理研究基础上提出的一种干燥岩石体积模量计算方法。

1949年,Mindlin等^[9]给出了临界孔隙度情况下的体积模量和剪切模量计算公式,如公式(5)和(6)所示。

$$K_{\text{HM}} = \left[\frac{C^2(1 - \phi_c)^2 \mu^2}{18\pi^2(1 - \nu)^2} P \right]^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

$$\mu_{\text{HM}} = \frac{5 - 4\nu}{5(2 - \nu)} \left[\frac{3C^2(1 - \phi_c)^2 \mu^2}{18\pi^2(1 - \nu)^2} P \right]^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

式中, K_{HM} 、 μ_{HM} 分别是临界孔隙度 ϕ_c (即沉积孔隙度)的干燥岩石体积模量和剪切模量; P 是有效压力(即上覆压力与储层压力之差); μ 和 ν 是基质的剪切模量和泊松比; C 是配位数(每个颗粒接触点的平均数)。

孔隙度 ϕ 介于0和 ϕ_c 之间的干燥岩石体积模量

K_{dry} 采用 Hashin–Strikman^[10] 的下边界来进行计算, 具体计算如公式(7)所示。

$$K_{\text{dry}} = \left[\frac{\phi/\phi_c}{K_{\text{HM}} + \frac{4}{3}\mu_{\text{HM}}} + \frac{1 - \phi/\phi_c}{K_{\text{ma}} + \frac{4}{3}\mu_{\text{HM}}} \right]^{-1} \frac{4}{3}\mu_{\text{HM}}$$

(7)

1.2.2 Kriedf 法

1990 年, Kriedf 等^[11] 在前人研究基础上提出一种计算干燥岩石体积模量 K_{dry} 的计算方法, 该方法

$$K_{\text{dry}} = (a_0 + a_1\phi + a_2V_{\text{sh}} + a_3\phi^2 + a_4V_{\text{sh}}^2) \left[c \left(\frac{P}{0.1} \right)^b + d \left(\frac{T}{20} - 1 \right) \right]$$

(10)

式中, K_{dry} 为干燥岩石的体积模量, GPa; P 为有效压力, MPa; T 为温度, ℃; V_{sh} 为泥质的体积百分

可用公式(8)来表示。

$$K_{\text{dry}} = (1 - B)K_{\text{ma}}$$

(8)

其中, B 的计算如公式(9)所示。

$$B = 1 - [1 - \phi]^{[3/(1 - \phi)]}$$

(9)

1.2.3 YMH 法

YMH 法是云美厚^[12] 在 Phillips 等人的岩石物理实验结果和大庆油田部分测井资料基础上提出的一种干燥岩石体积模量计算方法, 该方法如公式(10)所示。

数; a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 b 、 c 、 d 为拟合系数, 具体大小见表 1。

表 1 干燥岩石体积模量的拟合系数

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	b	c	d
37.399 5	-98.768 9	-21.053 2	35.970 6	-9.272 5	0.094 381	0.607 99	-0.028 376

1.2.4 Macbeth 法

Macbeth 法是 2004 年 Macbeth 在开展实验岩石骨架压力敏感特性分类研究基础上提出的一种干燥岩石体积模量 K_{dry} 的计算方法, 该方法可用公式(11)表示。

$$K_{\text{dry}} = \frac{K_{\infty}}{1 + E_{\text{K}} e^{-\frac{P}{P_{\text{K}}}}}$$

(11)

其中, K_{∞} 可用公式(12)来计算。

$$K_{\infty} = -17.8 \ln \phi - 12.847$$

(12)

式中, K_{∞} 为岩石样品在高压渐近线下的一个特征取值; P_{K} 是一个特征压力常数, 表示岩石达到相对不敏感状态时一个翻转点的特征取值; E_{K} 是利用在外力作用下硬砂岩基质出现微裂缝或软基质出现较高裂缝浓度时获得的一个特征值; P 是有效压力。

2 不同方法应用对比

干燥岩石体积模量受多因素影响, 不同地区往往受影响的程度不同, 而目前形成的方法往往是基于某一地区或多个地区的情况在一定的理想假设条件下得到的, 这就造成了不同方法在一个地区的适应程度不同。下面以 S 油田实际岩石物理测试数据和油藏数据为基础来选择适用的干燥岩石体积

模量计算方法。

2.1 S 油田的岩石物理测试数据

S 油田开展了不同样品的体积模量测试, 表 2 展示了其中 A、B 两块样品在不同压力下的体积模量测试结果, A 样品属于 S 油田 M 油藏, 其密度为 1.85 g/cm³, 孔隙度为 30%; B 样品属于 S 油田 N 油藏, 其密度为 1.86 g/cm³, 孔隙度为 28%。

表 2 测试样品在不同压力下的体积模量

压力/MPa	体积模量/GPa		剪切模量/GPa	
	A 样品	B 样品	A 样品	B 样品
42.76	8.57	10.03	6.28	6.63
38.62	8.34	9.7	6.2	6.45
34.48	8.11	9.39	6.13	6.28
30.34	7.9	9.28	6.06	6.17
26.21	7.79	8.64	5.92	5.91
6.90	6.18	5.4	4.36	3.95

2.2 不同方法的应用对比

2.2.1 Dvorkin–Nur 法

在利用 Dvorkin–Nur 法求取干燥岩石体积模量时, 还需要提供一些必要的参数才能获得, 对于临界孔隙度 ϕ_c , 这里参照文献[13]取 40%; 对于配位数, 这里依据 1982 年 Murphy^[13] 研究的配位数计算方法, 该方法如公式(13)所示:

$$C=20-34\phi+14\phi^2 \quad (13)$$

依据公式(13)可取临界孔隙度情况下对应的配位数为8.64。

前人对S油田的研究认为M、N油藏的基质主要由石英和黏土矿物组成,因此这里假设基质是由石英和黏土两种矿物组成。两种矿物的体积模量、剪切模量及密度如表3所示。

表3 石英和黏土的弹性参数^[14]

矿物	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	密度/(g·cm ⁻³)
石英	37	44	2.65
黏土	25	9	2.55

依据A、B样品的密度和孔隙度,可以算出A样品基质中的石英和黏土含量分别是93%和7%;B样品基质中的石英和黏土含量分别是93.3%和6.7%;

对于基质的体积模量和剪切模量,可以利用Hill法^[15]来求取,该方法是一种基质混合矿物有效模型求取的一种方法,其计算公式如式(14)和式(15)。

$$k_H = (k_V + k_R)/2 \quad (14)$$

$$\mu_H = (\mu_V + \mu_R)/2 \quad (15)$$

式中, k_H 、 k_V 、 k_R 分别为利用Hill法、Voigt法^[16]、Reuss法^[16-17]获得的混合矿物体积模量; μ_H 为利用Hill法、Voigt法、Reuss法获得的混合矿物体积模量。

基于基质矿物组成比例和表3,先用Voigt法、Reuss法求各自方法下基质的体积模量和剪切模

量,然后进一步利用Hill法可求得最终的基质A、B样品的体积模量分别近似为35.98 GPa、36.02 GPa, A、B样品的剪切模量分别近似为38.07 GPa、38.28 GPa。A、B样品的泊松比都近似为0.108。在已知相关数据基础上,利用公式(7)可获得Dvorkin-Nur法对A、B两个样品的干燥岩石体积模量预测结果,具体见表4。

2.2.2 Kriedf法

在Kriedf法中,要得到体积模量,需要知道参数B和基质的体积模量。对于这里样品的基质体积模量直接利用上面计算样品的基层体积模量数据。对于两个样品的参数B,基于公式(9)可得到A、B两个样品的参数B分别近似为0.78、0.75。基于公式(8)可得到Kriedf法对A、B两个样品的干燥岩石体积模量预测结果,分别为7.80 GPa、9.16 GPa。

2.2.3 YMH法

S油田M、N油藏温度比较接近,都大致在75.5℃,因此这里取75.5℃作为两个油藏的近似温度。基于公式(10)可得到利用YMH法对A、B两个样品的干燥岩石体积模量预测结果,具体见表4。

2.2.4 Macbeth法

通过实验室测试得到A样品的 K_∞ 、 E_K 、 P_K 可近似取9、0.6、2 610,B样品的 K_∞ 、 E_K 、 P_K 可近似取10、0.877、2 200。基于公式(11)可得到利用Macbeth法对A、B两个样品的干燥岩石体积模量预测结果,具体见表4。

表4 几种方法预测的干燥岩石体积模量

压力/MPa	Dvorkin-Nur法预测体积模量/GPa		YMH法预测体积模量/GPa		Macbeth法预测体积模量/GPa	
	A样品	B样品	A样品	B样品	A样品	B样品
42.76	9.05	10.34	9.58	7.44	8.52	9.50
38.62	8.89	10.18	9.48	7.37	8.41	9.36
34.48	8.72	9.99	9.37	7.28	8.27	9.17
30.34	8.53	9.79	9.25	7.19	8.10	8.94
26.21	8.31	9.57	9.11	7.08	7.90	8.65
6.90	6.50	7.61	7.95	6.17	6.39	6.42

S油田M、N油藏在开采过程中有效压力一般大于15 MPa,下面讨论时分两种情况,一种是有效压力大于等于15 MPa的预测误差对比,另一种是有效压力小于15 MPa的预测误差对比。表5、表6列出了四种方法应用于A样品和B样品的干燥岩石体积模量相对误差绝对值对比。当有效压力大于等于15 MPa时,从表5可以看出,对于A样品,Macbeth法

总体相对误差绝对值在3%以下,其次是Kriedf法,再其次是Dvorkin-Nur法,最后是YMH法;从表6可以看出,对于B样品,Macbeth法总体好于其它方法,最大相对误差绝对值达到5.28%,其次是Kriedf法,再其次是Dvorkin-Nur法,最后是YMH法。当有效压力小于15 MPa时,从表5可以看出,对于A样品,Macbeth法最好,相对误差绝对值为3.4%,其次是

Dvorkin-Nur 法,再其次是 Kriedf 法,最后是 YMH 法;从表6可以看出,对于B样品,YMH法最好,其次是 Macbeth 法,再其次是 Dvorkin-Nur 法,最后是 Kriedf法。

下面结合 Gassmann 理论方程等来计算纵波速度,从纵波速度的预测效果来进一步对不同方法进行评价。S 油田 M 储层、N 储层的储层压力分别为 22.3 MPa、22 MPa。取有效压力为 26.21 MPa 来进一步判断利用不同方法预测纵波速度的效果。表 7 为

不同方法预测纵波速度与理论纵波速度对比,基于表 7 可计算 Dvorkin-Nur 法、Kriedf 法、YMH 法、Macbeth 法四种方法的纵波速度误差绝对值平均值分别为 27 m/s、13.575 m/s、74.84 m/s、3.16 m/s,从纵波速度绝对值平均值来看 Macbeth 法是四种干燥岩石体积模量计算方法中最好的一种,建议 S 油田针对一定孔隙度储层在已知 K_{∞} 、 E_K 、 P_K 三个测量参数的情况下利用 Macbeth 法来计算干燥岩石体积模量,以促进 S 油田时移地震解释水平提升。

表5 四种方法应用于A样品的干燥岩石体积模量相对误差绝对值

压力/MPa	有效压力是否大于等于 15 MPa	Dvorkin-Nur 法	Kriedf 法	YMH 法	Macbeth 法
42.76	是	5.60	8.98	11.79	0.58
38.62		6.59	6.47	13.67	0.84
34.48		7.52	3.82	15.54	1.97
30.34		7.97	1.27	17.09	2.53
26.21		6.68	0.13	16.94	1.41
6.90	否	5.18	26.21	28.64	3.40

表6 四种方法应用于B样品的干燥岩石体积模量相对误差绝对值

压力/MPa	有效压力是否大于等于 15 MPa	Dvorkin-Nur 法	Kriedf 法	YMH 法	Macbeth 法
42.76	是	3.09	8.67	25.82	5.28
38.62		4.95	5.57	24.02	3.51
34.48		6.39	2.45	22.47	2.34
30.34		5.50	1.29	22.52	3.66
26.21		10.76	6.02	18.06	0.12
6.90	否	40.93	69.63	14.26	18.89

表7 不同方法预测纵波速度与理论纵波速度

有效压力/MPa	样品	理论纵波速度/(m•s ⁻¹)	预测的纵波速度/(m•s ⁻¹)			
			Dvorkin-Nur 法	Kriedf 法	YMH 法	Macbeth 法
26.21	A	3 073.90	3 101.34	3 074.43	3 143.40	3 079.71
	B	3 144.73	3 192.30	3 171.35	3 064.55	3 145.24

3 结论

通过将 Dvorkin-Nur 法等四种干燥岩石体积模量方法在 S 油田进行应用对比分析,得出如下三点结论:

当有效压力大于等于 15 MPa 时,在预测不同样品时,Macbeth 法预测效果是最好的,最大预测绝对误差为 5.28%,其次是 Dvorkin-Nur 法或 Kriedf 法,YMH 法效果最差。

当有效压力小于 15 MPa 时,在预测不同样品时,四种方法在预测体积模量时,都有可能出现预测误差绝对值较大的情况,因此这四种方法在小于 15 MPa 时适应性都比较差。

通过比较基于四种体积模量计算方法在有效压力为 26.21 MPa 的纵波速度预测,指出 Macbeth 法的纵波速度预测误差平均值时仅为 3.16 m/s,在四种方法中预测误差是最小的。

(下转第 426 页)

- systems [J]. *Computers&Geosciences*, 2002, 28 (4): 525-535.
- [7] 吴胜和,岳大力,刘建民,等.地下古河道储层构型的层次建模研究[J]. *中国科学D辑(地球科学)*, 2008, 38 (z1): 111-121.
- [8] 邓猛,舒晓,金宝强,等.渤海W油田复杂低阻油藏含油分布模式及应用[J]. *地质找矿论丛*, 2022, 37(3): 336-343.
- [9] 舒晓,赵永军,王兵杰.一种新的曲流河点坝砂体内部构型模拟方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2013, 48(S1): 151-156.
- [10] 赵永军,舒晓,胡勇,等.一种复杂曲流带储层三维构型建模新方法[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(1): 1-7.
- [11] 舒晓,金宝强,缪飞飞,等.基于曲流河演化模拟的海上大井距油田点坝内部构型建模方法[J]. *复杂油气藏*, 2019, 12(1): 38-43, 56.

(编辑 卞 炜)

(上接第409页)

参考文献:

- [1] 朱振宇,王小六,何洋洋,等.海上时移地震关键技术研究与应用[J]. *中国海上油气*, 2018, 30(4): 76-85.
- [2] 鲍祥生,尹成,符志国,等.油田注水过程中油藏物性变化规律研究[J]. *西南石油学院学报*, 2004, 26(2): 18-21.
- [3] 李延.时移地震油藏参数的差异性反演研究及应用[D].北京:中国地质大学, 2016.
- [4] 胡宇霆.时移岩石物理图版在时移地震定量解释中的应用[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2022, 44 (6): 21-28.
- [5] 张兴.OBN采集技术在渤海X油田中的应用[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2022, 42(18): 150-153.
- [6] 薛东川,王小六,朱振宇.G油田OBN采集位置误差影响分析[C]//中国石油学会2021年物探技术研讨会论文集.成都:《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司, 2021: 4.
- [7] GASSMANN F. Elastic waves through a packing of spheres [J]. *Geophysics*, 1951, 16(4): 673-685.
- [8] DVORKIN J P, NUR A M. Elasticity of high-porosity sandstones: theory for two North Sea data sets [J]. *Geophysics*, 1996, 61(5): 1363-1370.
- [9] MINDLIN R D. Compliance of elastic bodies in contact [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1949, 16 (3): 259-268.
- [10] HASHIN Z, SHTRIKMAN S. A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1963, 11(2): 127-140.
- [11] KRIEF M, GARAT J, STELLINGWERFF J, et al. A petrophysical interpretation using the velocities of P and S waves (full-waveform sonic) [J]. *The Log Analyst*, 1990, 31(6): SPWLA-1990-v31n6a2.
- [12] 云美厚,易维启,庄红艳.砂岩的弹性模量与孔隙率、泥质含量、有效压力和温度的经验关系[J]. *石油地球物理勘探*, 2001, 36(3): 308-314.
- [13] AVSETH P, MUKERJI T, MAVKO G. Quantitative seismic interpretation [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [14] MAVKO G, MUKERJI T, DVORKIN J. The rock physics handbook: tools for seismic analysis of Porous media [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [15] HILL R. The elastic behaviour of a crystalline aggregate [J]. *Proceedings of the Physical Society*, 1952, 65 (5): 349-354.
- [16] HILTERMAN F J, 孙夕平, 赵良武. 地震振幅解释[M]. 北京:石油工业出版社, 2006.
- [17] REUSS A. Berechnung der fleissgrenze von misch-kristallen auf grund der plastizitätsbedingung für einkristalle [J]. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 1929, 9(1): 49-58.

(编辑 刘义梅)