

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2017.09.017

页岩气地球物理建模方法和应用实例分析^①

徐国志, 徐锦鹏

1. 河北地质大学 宝石与材料工艺学院, 石家庄 050031; 2. 河北地矿局水文工程地质勘查院, 石家庄 050031

摘要: 页岩气作为分布比较广泛、产量相对稳定及清洁的能源, 是石油资源的接替型能源. 该文以焦石坝地区龙马溪组页岩地层为研究对象, 采用地质沉积学、统计学等理论知识和方法, 通过随机建模对研究区域的层段展开分析. 结果表明: 龙马溪组下部页岩地层主要包含石英、粘土、黄铁矿和碳酸盐 4 类, 7 种岩性页岩的密度和纵横波速度会由于 TOC(总有机碳百分比)增加有所减小. 当 TOC 自 1% 增加至 2% 时, 这些参数均会从减小向较小幅度的增大, 随之再转向减小的趋势发展. 此外, 7 种岩性页岩地层的密度、纵波、横波速度都会随着孔隙度的增大呈现出单调减小的趋势.

关键词: 页岩气; 地球物理; 建模方法; 研究实例

中图分类号: P313

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2017)09-0103-06

现阶段, 由于页岩气地质和构造条件比较复杂, 加之国内页岩气与北美地区相比存在较大差异, 中国页岩气的研究依然处在探索时期, 在这种背景下想要成功进行大规模页岩气开发并非易事. 本次挑选重庆市涪陵区焦石坝镇龙马溪组为研究对象, 对页岩气物理建模方式及运用效果进行研究, 以期为我国在页岩气开发和生产方面提供一定的借鉴和指导.

1 研究概况

四川盆地重庆市涪陵区的焦石坝镇, 属于北东向到南北向构造转化的部位. 本地区三维勘探总体面积达到 594.496 km², 研究点主要表现在焦页 1 井周缘区. 其地震工区主测线和联络测线 xlne 分别为 995~1445/1385~1700, 总面积 56.1 km². 分析龙马溪组焦页 1 井下部岩心样品发现, 其脆性矿物量从上至下表现出减小的趋势, 其中下部区域 2 337~2 415 m 页岩脆性矿物量占 33.9%~80.3%. 该区域的主要矿物包含石英, 平均百分比为 37.3%, 长石、方解石平均百分比分别为 9.3%, 3.8%, 也有较少的黄铁矿等物质. 此外, 粘土矿百分比占 16.6%~62.8%, 平均百分比为 40.5%, 黏土矿物中主要为伊蒙混层, 其平均百分比占 54.44%, 伊利石平均百分比为 39.4%.

2 页岩气常用的物理建模方法

2.1 模拟方式

岩石骨架主要包括多种百分比的矿物组成相对应的弹性模量, 因此可以将为岩石骨架建立的弹性模量看作不同矿物成分混合而成的弹性模量. 依托骨架矿物等效介质模型的岩石物理方程为

(1) voigt-Reuss-Hill 方程

文献[1] 在假设各类矿物成分变量相等的条件下, 提出各种矿物组成等效介质弹性模量的上限值. 计算公式为

$$M_v = \sum_{i=1}^n V_i \cdot M_i \quad (1)$$

① 收稿日期: 2016-12-29

作者简介: 徐国志(1957-), 男, 黑龙江呼兰人, 教授, 主要从事地球化学及地球物理研究.

在上述式子中, V_i, M_i 分别表示第 i 种矿物体积百分比和弹性模量; M_v 表示 voigt 求解的混合矿物骨架弹性模量的上限值.

文献[2] 在假定不同矿物组分应力相等的状态下, 得出不同矿物组成的等效介质弹性模型量下限值. 求解方程为

$$\frac{1}{M_R} = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{M_i} \quad (2)$$

在公式(2)中, M_R 表示 Reuss 求得混合矿物骨架其弹性模量上限数值.

为缩小上述 2 种方程等效弹性模量上下限值之间的偏离, 将上述 2 个方程求出的上下界限实施平均处理, 即

$$M = \frac{M_v + M_R}{2} \quad (3)$$

其中, M 表示平均计算获得的弹性模量.

(2) Hashin-shtrikman 方程

文献[3] 假定不同矿物及组成演示具有各项弹性和同性, 得到双相等效介质弹性模量的上下限值. 求解公式为

$$K^{HS\pm} = K_1 + \frac{V_2}{\frac{1}{K_2 - K_1} + \frac{V_1}{K_1 + \frac{4}{3}\mu_1}} \quad (4)$$

$$\mu^{HS\pm} = \mu_1 + \frac{V_2}{\frac{1}{\mu_2 - \mu_1} + \frac{2V_1(K_1 + 2\mu_1)}{5\mu_1(K_1 + \frac{4}{3}\mu_1)}} \quad (5)$$

在(4), (5) 这 2 个公式中, $\mu^{HS\pm}, K^{HS\pm}$ 依次代表 H-S 模型计算求出的体积、剪切模量上下限; K_1, K_2 表示两相矿物的体积模量, μ_1, μ_2 则为剪切模量; V_1, V_2 依次代表两相矿物体积的百分比. 在这个求解公式中, 上下限数值可通过调换公式百分比序号进一步确定, 若其需求为 1, 代表求出的弹性模量的下限, 反之求得上限^[4]. 在实际运用过程中, 由于骨架矿物之间的弹性模量存在的差异比较小, 导致等效介质模量上下限相近, 此时可采用上下限平均数进行替代.

2.2 饱和流体岩石模拟

该模拟方程主要包括运用孔隙流体、固体代替模拟, 其中流体替代就是依托改变的孔隙内混合流体组分, 以此模拟岩石物理参数变化状况^[5]. 固体替代则是以泥质或有机碳为岩体总孔隙不可缺少的一部分, 通过更改这部分的百分比、组成成分进一步模拟岩石物理参数响应状况^[6]. 现实中的地层岩石骨架矿物由于排列方式、受粒度等多种因素的影响, 展现出各向异性. 由固体代替角度分析, 固体组分改变不单单影响岩石物理响应变化状况, 也会影响岩石不同向异性性质改变.

由于体积模量会受到孔隙度、流体饱和度因素的影响, 对于流体饱和岩石波传播情况提出了 Gassman 方程^[7]. 同时, 需要充分考虑以下情况: ① 若岩石孔隙度为常数, 体积模量会随着流体饱和度改变而变化, 但剪切模量并未随着流体饱和度变化有所改变^[8-9].

$$K_{sat} = K_{dry} + \frac{\left(1 - \frac{K_{dry}}{K_m}\right)}{\frac{\Phi}{K_{fl}} + \frac{1 - \Phi}{K_m} - \frac{K_{dry}}{K_m^2}} \quad (6)$$

$$\mu_{sat} = \mu_{dry} \quad (7)$$

其中

$$K_{dry} = \rho_{dry} \cdot \left(V_{pdry}^2 - \frac{4}{3}V_{sdry}^2\right) \quad (8)$$

$$\frac{1}{K_{fl}} = \frac{S_w}{K_w} + \frac{1 - S_w}{K_{hc}} \quad (9)$$

$$\mu_{dry} = \rho_{dry} \cdot V_{sdry}^2 \quad (10)$$

在上述式子中, K_{sat}, μ_{sat} 分别代表流体饱和岩石的体积、剪切模量; K_{dry} 表示干岩石的体积模量、 μ_{dry}

为干岩石剪切模量; V_{Pdry}, V_{Sdry} 依次表示干岩石纵波、横波速度, S_w 代表岩石含水饱和度; K_{fl} 表示混合流体的体积模量; K_w, K_{hc} 分别表示地层水、油气的体积模量. ② 若含气饱和度为常数, 岩石孔隙度改变会影响干岩石的体积模量变化^[10]. 其表达公式修改为

$$K_{sat} = K_{dry} + \frac{\left(1 - \frac{K_{dry}}{K_m}\right)^2}{\frac{\Phi}{K_p} + \frac{1 - \Phi}{K_m} - \frac{K_{dry}}{K_M^2}} \quad (11)$$

$$\frac{\Phi}{K_p} = \frac{1}{K_{dry}} + \frac{1}{K_m} \quad (12)$$

其中, K_p 表示孔隙的体积模量.

2.3 构建页岩气岩石体积模型

该模型主要用来表示岩石的体积空间、骨架、孔隙占体积空间的比例, 依托确定某一种岩性地层岩石体积模型, 可清晰、直观地预测表征不同的岩石体积组分所占比例^[11]. 必须注意, 由于骨架与孔隙部之间的成分存在显著差异, 不同岩性地层建立起来的岩石体积模型也存在明显的差异^[12]. 由纯砂岩地层角度分析可知, 岩石主要组成为骨架基质矿物、孔隙流体等, 因此必须建立相应的介质体积模型. 从页岩地层视角研究出发, 因页岩骨架基质矿物具有多种类型, 包含大量的有机质干酪根、孔隙流体等, 页岩层的体积组分比砂岩层更复杂^[13]. 此时, 构建的体积模型主要包含骨架基质矿物、孔隙流体和有机质干酪根 3 个部分. 从含泥质砂岩地层角度分析可知, 岩石除了有骨架基质矿物等部分以外, 也包括一些泥质部分, 这些泥质存储在基质矿物间隙内, 主要由骨架基质矿物、孔隙流体、泥质介质体积模型组成^[14].

目前, 多数研究者通过建立页岩体积模型对页岩气展开进一步的评价和分析, 它所建立的页岩体积模型由骨架基质矿物、孔隙流体、有机质干酪根组成. 其中, 有机质干酪根分布在岩石物理模型中的状况见图 1. 一些学者将其进行简化处理并归纳至孔隙部分(图 1a). 也有一部分人认为, 干酪根分散在骨架基质部分中, 将有机质干酪根简化到骨架部分(图 1b). 在焦石坝地区展开研究时, 选定第二种情况对有机质干酪根模型进行简化处理, 并将其归纳至骨架部分, 加之这个地区的基质矿物类型多种多样, 主要由石英、粘土、黄铁矿和碳酸盐几种类型组成, 以此建立基质矿物体积模型(图 1c).

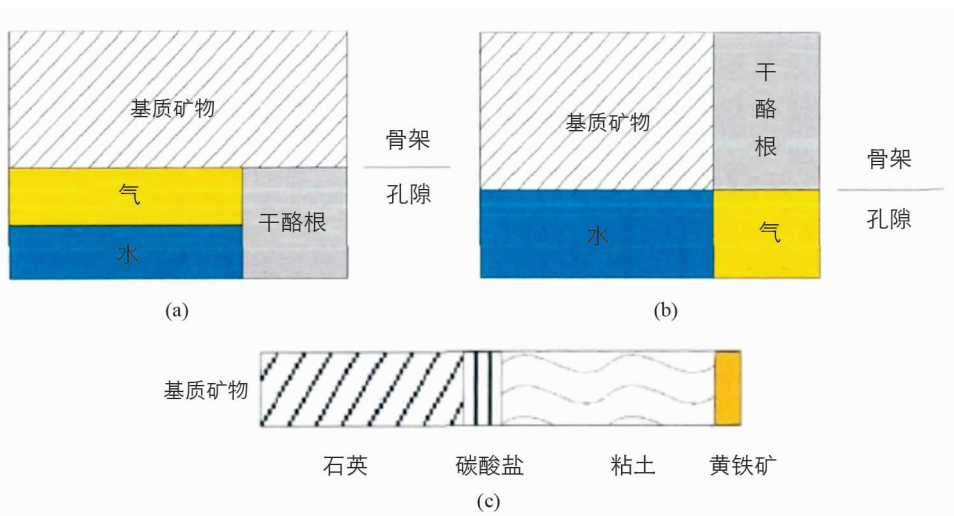


图 1 页岩岩石体积模型

3 页岩气物流模拟分析

统计岩石物流和地址参数的关系发现, 龙马溪组下部纵横波速度与总有机碳百分比、密度与孔隙度存在显著关系, 其中页岩层纵、横波速度均会根据 TOC、孔隙度改变有不同程度的变化. 但上述分析难以准确描述岩石物理与主要地质参数之间的关系, 还需采用岩石物理方法进行模拟分析, 并获取相应的数据.

3.1 模拟变总有机碳百分比

这个模拟结果会由改变原始 TOC 大小模拟相对应状态下的密度及纵横波速度. 本次研究挑选有机质

干酪根简化至骨架部分, TOC 变化中岩石物理模拟用 voigt-Reuss-Hill 和 Hashin-shtrikman 这 2 个方程实现, 具体步骤如下。

① 使用单井评价页岩矿物质的体积百分比, 采用 voigt-Reuss-Hill 方程求得骨架基质混合矿物质的体积、剪切模量; ② 依据页岩体积模型, 把骨架基质混合矿物和 TOC 当作两相骨架组成部分, 利用 Hashin-shtrikman 求出页岩骨架剪切和体积模量^[15]。依据不断调整有机碳百分比 TOC 大小, 进一步求得不同 TOC 变化值相应的骨架体积、剪切模量。③ 利用 Gassmarn 方程反推求出干岩石剪切、体积模量, 干岩石——骨架体积模量求解公式为

$$K_{dry} = \frac{\mu_{dry}}{\mu_m} \cdot K_m \quad (13)$$

上式中, K_{dry} , μ_{dry} 分别表示干岩石体积和剪切模量; K_m , μ_m 依次表示骨架体积及剪切模量。此外, 运用 Gassmarn 方程可以推导出干岩石的体积模量, 进一步了解原始状态下骨架体积百分比、孔隙度等情况。④ 如果孔隙度、含气饱和度处于不变的条件下, 依托 Gassmarn 方程将干岩石剪切模量、体积模量等带入公式(9)中, 求得 TOC 状态下整个页岩体积和剪切模量。⑤ 使用纵横波速度公式求得 TOC 状态下纵波和横波速度, 求解公式为

$$V_{pb} = \sqrt{\frac{K_b + \frac{4}{3}\mu_b}{\rho_b}}, V_{sb} = \sqrt{\frac{\mu_b}{\rho_b}} \quad (14)$$

上式中, V_{pb} 表示纵波速度; V_{sb} 代表横波速度; ρ_b 表示页岩等效体积密度; K_b , μ_b 分别表示页岩的体积和剪切模量。

下文针对龙马溪组下部整层段进行模拟, 该段各岩性组合层 TOC 变化数值较大, 本次研究中使用具体的 TOC 值实现。图 2 为不同岩性地层岩石物理参数随 TOC 变化趋势图。该图依次展现密度、纵波、横波速度、泊松比随着 TOC 变化的特征。由图 2 可知, 7 种岩性组织页岩底层的密度、纵横波都随 TOC 的增大而减小。当 TOC 变化量由 1% 增加至 2% 时, 上述 3 个参数均随减小趋势呈现出小幅度的增大, 随之再转向减小趋势。

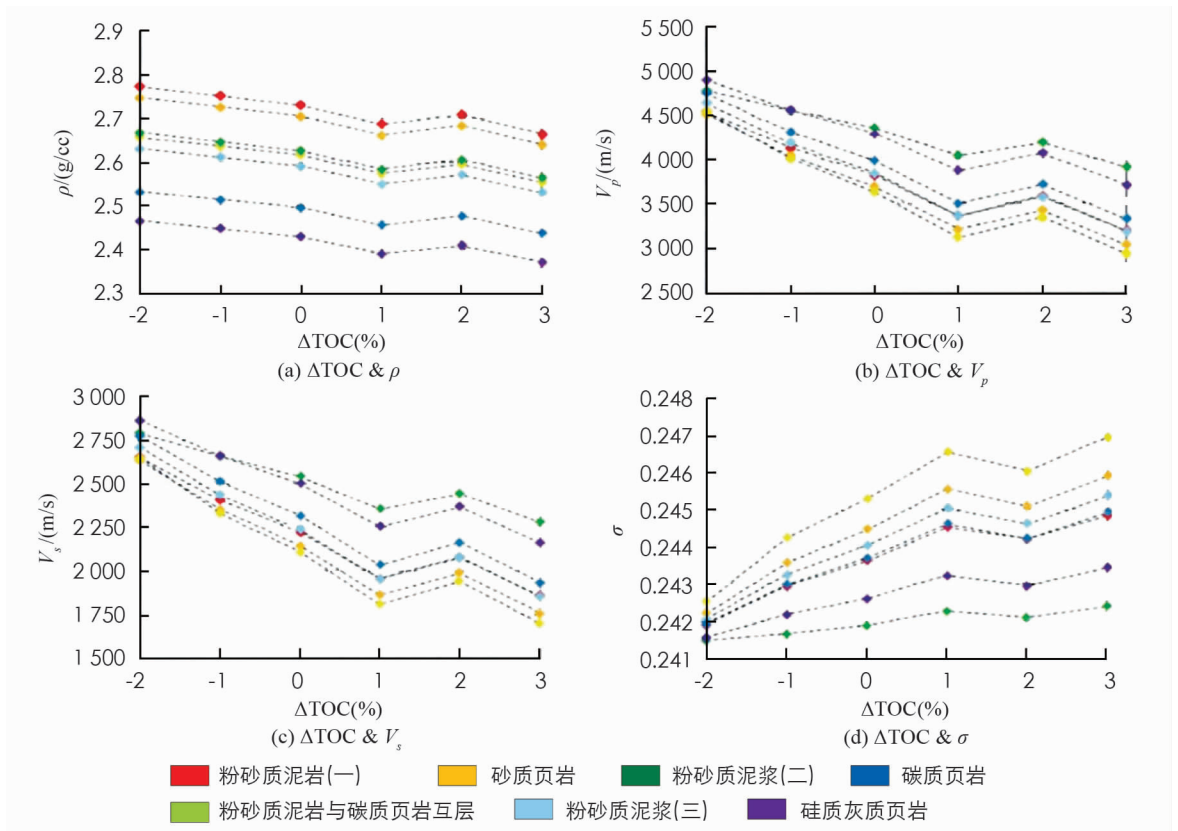


图 2 岩性物理参数随 TOC 变化情况

3.2 模拟岩石的变孔隙度

变孔隙度模拟是采用改变目的层孔系数对相对应状态下的密度、纵波、横波速度进行模拟^[16]。一般情况下,岩石孔隙度模拟利用 Gassmann 方程实现,具体操作如下:

①利用 Gassmann 方程反推求得岩石体积和剪切模型,这部分与变有机碳百分比模型相似,唯一的差别是变孔隙度模拟过程中 TOC 百分比选用原始恒定值。②当骨架部分、含气饱和度处在不变的状态,借助 Gassmann 方程将页岩骨架部分、干岩石剪切模量带入公式(4)、公式(5)中,求出孔隙度条件下页岩体积及剪切模量。同时,利用纵横波公式求得孔隙度状态下纵横波速度。当然,孔隙度模拟是对龙马溪组下部各层展开的,在实际研究时孔隙度变化也要通过明确具体的孔隙度变量来实现。下文主要表现在 6 个孔隙度(Φ)变量相对应的密度、纵横波速度上,主要变化量为 Φ 减少 2%、减少 1%、原始状态自 1% 增加至 2%。

图 3 代表 1 井龙马溪组下部各类岩性层岩石物理参数随着 Φ 变化的效果图,图中分别呈现出 ρ 、 V_p 、 V_s 、 σ 与 Φ 的变化特征,其中 $\Delta\Phi$ 表示孔隙度的变化量。由图 3(a),(b),(c)可知,7 种岩性页岩地层的 ρ 、 V_p 和 V_s 均随着 Φ 增大呈现出单调减小的发展趋势。在图 3(a)中,从第 3 小层至第 1 小段,各岩性组合页岩地层密度范围明显减小,并随着孔隙度增大有不同程度的减小。仅有 2 小段粉砂质泥岩目的范围超过第 3 段。在图 3(b),(c)中,不同岩性组合页岩层的纵横波速度会随孔隙变化幅度有所改变。第 3 小段从粉砂质泥岩、砂质页岩到达粉砂质泥岩与炭质页岩互层纵横波速度范围数值有所减小,变化幅度逐步减小。由图 3(d)可知,不同岩性组合页岩底层泊松比均随孔隙度增大而呈现出增大的发展趋势。从第 3 小段来看,粉砂质泥岩(红色位置)泊松比总体范围较大,并随着孔隙度增大其变化幅度更大。第 2 小段粉砂质泥岩泊松比范围处于最小状态。

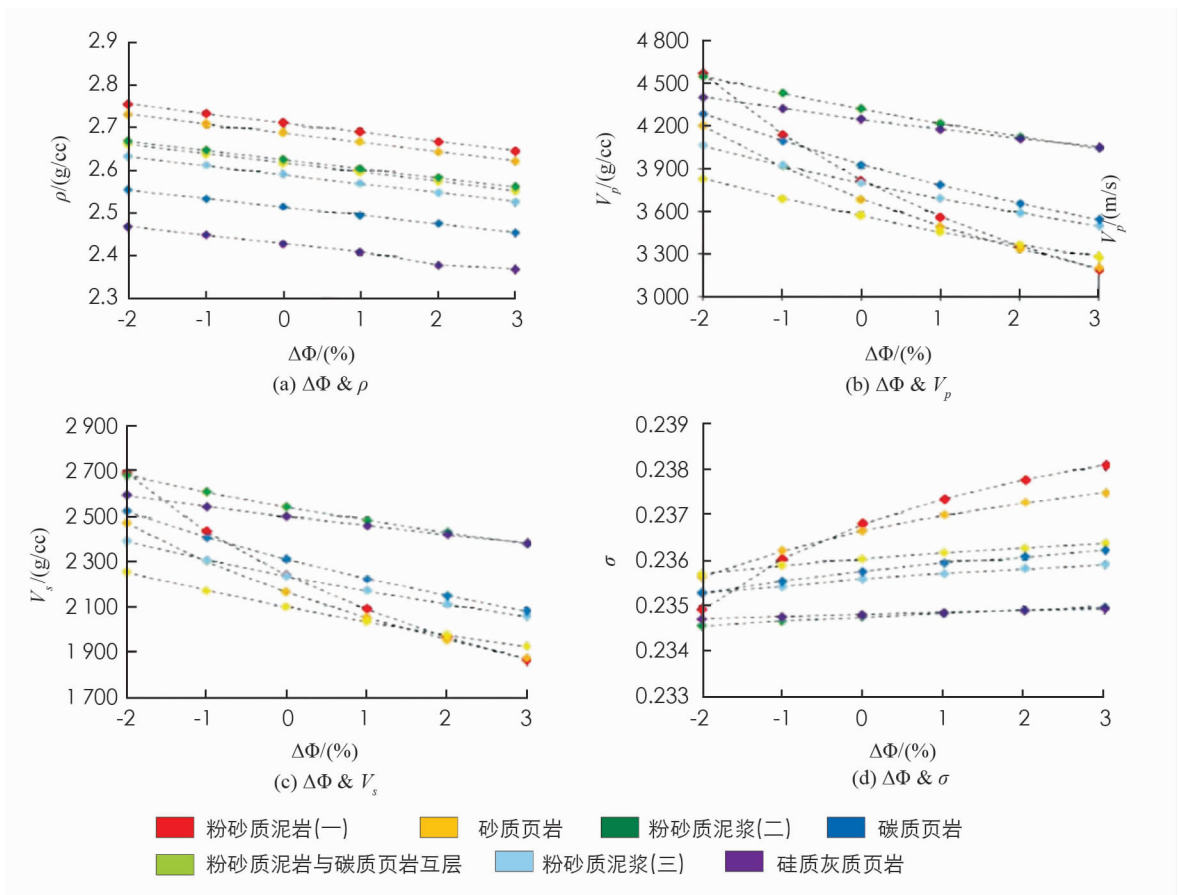


图 3 岩石物理参数随着孔隙度变化特征

4 结 论

重庆市涪陵区焦石坝镇的主要地层是志留纪页岩,组成页岩的主要矿物是石英、黄铁矿、碳酸盐、粘土 4 种类型。研究发现纵横波速度会随着孔隙的变化而改变,这与不同的岩性组合有关,不同地层岩性组

合、不同岩石彼此之间堆积密度不同,可以形成不同的空隙度,从而影响纵横波速度。此外,纵横波传播速度还与岩石中 TOC(有机碳总百分比)有关,纵横波速度会因其增大而减小,当 TOC 变化量自 1% 增加到 2% 时,上述参数均由逐渐减小变为较小幅度地增大,然后再呈现出减小的趋势。

参考文献:

- [1] 李 澈. 环境地球物理在页岩气开发中的应用前景展望 [J]. 地球, 2013(3): 36—37.
- [2] 徐文豪, 虎恩鹏, 林 华, 等. 页岩气地球物理勘探技术发展现状 [J]. 地球, 2014(8): 175.
- [3] 刘 伟, 贺振华, 李可恩, 等. 地球物理技术在页岩气勘探开发中的应用和前景 [J]. 煤田地质与勘探, 2013, 17(6): 68—73.
- [4] 向 葵, 胡文宝, 严良俊, 等. 页岩气储层特征及地球物理预测技术 [J]. 特种油气藏, 2016, 23(2): 5—8.
- [5] 袁桂琴, 孙 跃, 高卫东, 等. 页岩气地球物理勘探技术发展现状 [J]. 地质与勘探, 2013, 49(5): 945—950.
- [6] 周 涛. 地球物理技术在页岩气勘探开发中的应用 [J]. 中小企业管理与科技, 2015(27): 290—291.
- [7] 石文睿, 张超谟, 张占松, 等. 涪陵页岩气田焦石坝页岩气储层含气量测井评价 [J]. 测井技术, 2015, 39(3): 357—362.
- [8] 高琼瑶, 张明升, 周新锋, 等. 地球物理技术在页岩气勘探开发中的应用 [J]. 地下水, 2013, 35(5): 89—91.
- [9] 滕吉文, 刘有山. 中国页岩气成藏和潜在产能与对环境的污染分析 [J]. 中国地质, 2013, 40(1): 1—30.
- [10] 郝 进, 姜振学, 邢金艳, 等. 一种改进的页岩气损失气含量估算方法 [J]. 现代地质, 2015, 29(6): 1475—1482.
- [11] 粟 娥, 许 勤, 罗 颖, 等. 试论地球物理技术在页岩气勘探开发中的应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2014(11): 118.
- [12] 李曙光, 徐天吉. 页岩气地球物理预测与评价方法技术探讨 [C]. 北京: 第五届中国石油地质年会论文集, 2014.
- [13] 夏一军, 胡向阳, 魏水健. 页岩气勘探开发中地球物理技术的应用 [J]. 地球物理学进展, 2015, 30(4): 1798—1803.
- [14] 李雨澈, 李 澈. 环境地球物理监测技术在页岩气开发中的应用 [J]. 油气田环境保护, 2014, 24(2): 43—47.
- [15] 雷裕红, 王 晖, 罗晓容, 等. 鄂尔多斯盆地张家滩页岩液态烃特征及对页岩气量估算的影响 [J]. 石油学报, 2016, 37(8): 952—961.
- [16] 王明飞, 陈 超, 屈大鹏, 等. 涪陵页岩气田焦石坝区块五峰组—龙马溪组一段页岩气储层地球物理特征分析 [J]. 石油物探, 2015, 54(5): 613—620, 626.

On Shale Gas Geophysical Modeling and Its Application

XU Guo-zhi, XU Jin-peng

1. Institute of Gem and Material Technology, Hebei University of Geosciences, Shijiazhuang 050031, China;
2. Hebei Hydrology and Engineering Geology Investigation Institute, Shijiazhuang 050031, China

Abstract: Shale gas as a relatively wide distribution, relatively stable production, clean energy, is also the replacement energy of oil resources. Based on the focal region of rockfill creek, the dragon group shale formations as the research object, using geological theory and methods of sedimentology, statistics, by analyzing the interval of the stochastic modeling of the study area. The results show that the lower shale formations in dragon formation consist of four types: Shi ying, clay, pyrite and carbonate, and the density and vertical and horizontal velocity of seven lithologic shale will decrease due to the increase of TOC. When the TOC is increased from 1% to 2%, these parameters will be reduced to a smaller extent and then to a smaller trend. In addition, seven shale formation lithology density, longitudinal wave, shear wave velocity will present monotone decreasing trend with the increase of porosity.

Key words: shale gas; Geophysics; modeling method; the research instance