

泥页岩岩石物理参数测试与分析

刘书会¹, 王长江¹, 罗红梅¹, 汪 贺²

(1.中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257015; 2.中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249)

摘要:泥页岩主要由粘土、碳酸盐矿物和有机质构成,其岩石物理参数主要受这三种成分的影响。由于泥页岩岩石特征的复杂性,尚未有较成熟的岩石物理模型描述其岩性与速度的关系。泥页岩岩石物理基础实验是研究其岩性、含油气性与速度关系的有效方法,济阳坳陷在这方面的研究尚处于起步阶段。通过对渤南地区罗69井泥页岩岩心样品的实验室测试,获得相关的物性参数(密度、孔隙度等)、弹性参数(纵、横波速度及泊松比等)、有机地化参数(有机碳含量)和岩石组构参数。通过对这些参数的交会分析,发现弹性参数(P型、S型、C型参数)可用于泥页岩岩性的区分,而有机碳含量和碳酸盐矿物含量是泥页岩密度和纵、横波速度的重要影响因素。不同温度和压力条件下泥页岩岩心样品纵、横波速度的变化规律表明,纵波速度对压力的变化较为敏感,而横波速度对温度的变化较为敏感。研究成果可以为开展泥页岩地球物理特征评价奠定基础。

关键词:罗69井泥页岩 纵波速度 有机碳 碳酸盐矿物

中图分类号:TE125

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2016)06-0016-06

Research on measurement and analysis of shale rock physical parameters

Liu Shuhui¹, Wang Changjiang¹, Luo Hongmei¹, Wang He²

(1. *Research Institute of Exploration and Development, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China*; 2. *College of Geosciences, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China*)

Abstract: Shale rock is mainly composed of carbonate rock, clay and organic matter, and its rock physical and elastic parameters are mainly controlled by the influence of the three kinds of material. There is no mature rock physics models describing the relationship between lithology and velocity because of the complexity of the rock characteristics of the shale. Basic rock physics experiment of shale is an effective method to study the relationship of the shale lithology, oiliness and velocity, and such research in Jiyang depression is still in its infancy. Shale relevant physical parameters (density, porosity, etc.), the elastic parameters (P-wave velocity and S-wave wave velocity and Poisson's ratio, etc.), organic geochemical parameters (organic carbon content) and rock fabric parameters were obtained through the laboratory tests on shale samples from Well Luo69. It is found that the elastic parameters (P, S, C type parameters) can be used for identification of shale lithology by analysis of the intersection of these parameters while the organic carbon content and carbonate mineral content are important factors influencing shale density and its P-wave and S-wave velocities. The variations of P-wave velocity and S-wave velocity of shale samples obtained under different conditions of temperature and pressure show that P-wave velocity is more sensitive to the change of pressure, and S-wave velocity is more sensitive to the change of temperature. The research results obtained can lay a foundation for the evaluation of the shale geophysical characteristics.

Key words: Well Luo69; shale; P-wave velocity; organic carbon; carbonate minerals

油气地质中的泥页岩常被作为生油层和盖层地化和封堵能力参数的测试为主。由于实验室泥页岩样品的缺乏,鲜见对泥页岩进行岩石弹性参数进行评价,因此与其相关的实验室测定也常以有机

收稿日期:2016-07-11。

作者简介:刘书会(1964—),女,河北栾城人,教授级高级工程师,博士,从事地震地质综合解释方面的研究。联系电话:(0546)8715350, E-mail:guaya1@sina.com。

基金项目:国家科技重大专项“渤海湾盆地精细勘探关键技术”(2016ZX05006-003)。

的超声波测试。对渤南地区罗69井泥页岩段的系统取心拉开了济阳拗陷非常规油气研究的序幕。郝运轻等对罗69井的岩石分类、储集空间特征进行了研究^[1-2],赵铭海等提出了泥页岩的矿物组分及含油性测井解释模型和评价方法^[3-4],张鹏等尝试利用地震技术预测渤南地区泥页岩甜点的发育特征^[5]。但是要实现泥页岩甜点的测井评价和地震预测,岩石物理分析是基础。为了研究泥页岩的地震波参数,从罗69井2 910~3 140 m井段共221 m系统取心的泥页岩岩心中,收获21块小直径(为2.54 cm)的岩心样品,进行不同温度和压力条件下的超声波、有机地化和全岩分析测试,并对测试结果进行系统地分析。研究成果不仅为建立基于泥页岩测试数据的岩石物理模型提供参考,还可以为济阳拗陷泥页岩甜点的地震预测奠定基础。

1 岩石物理参数测试实验材料及设计

1.1 实验材料

罗69井系统取心层位为沙四段下亚段—沙三段上亚段,埋深为2 910~3 140 m,岩性为灰黑色泥页岩。现场取心后放入温度为-70℃的低温冰箱中保存,将岩心剖切,三分之一留作岩心观察,三分之二为冻结状态,采用温度为-196℃的液氮作为循环液对岩心进行钻取,切割成柱塞样,获得21块岩心样品,使用锡纸包裹,并用石蜡密封,保持取心时的原始状态。

将岩心样品加工成直径为25 mm,高度为25~40 mm的圆柱体,两端磨平,为防止岩心样品崩塌破裂未作烘干处理。

1.2 实验设计

对罗69井岩心样品的岩石物理参数测试实验分为2部分。主要为:①将用石蜡密封的柱状岩心样品送至中国科学院地质与地球物理研究所物性实验室进行基本物性参数(孔隙度、密度等)和纵、横波速度的测试,并确定相应条件下岩心样品的纵

横波阻抗、泊松比等基本弹性参数;通过实验模拟不同的温度和压力条件,获得岩心样品在不同温度和压力条件下的弹性参数及其变化规律。②将测试后的岩心样品分为2部分,送至胜利油田勘探开发研究院有机地化和岩矿实验室分别进行有机碳和全岩矿物X衍射测试。对测得的岩石物性参数、弹性参数与有机地化参数、岩矿参数之间的关系进行分析。

2 岩石物理参数分析

2.1 岩石物性参数

对罗69井泥页岩岩心样品的孔隙度和密度进行测量,其岩石密度主要为2.388~2.662 g/cm³,孔隙度主要为0.21%~5.18%。所测岩心样品大部分较为致密,少部分发育明显层理、缝隙较多,会影响孔隙度的测试结果,导致实验室测试的孔隙度比岩石的实际孔隙度偏大。研究表明,密度与孔隙度具有较好的负相关关系;孔隙度较大、缝隙较多的岩心样品的密度较小,而孔隙度较小、缝隙不发育的岩心样品的密度则较大。

2.2 岩石弹性参数

在地面条件下采用超声脉冲透射法对罗69井泥页岩岩心样品进行声波测定^[6],获得纵、横波速度,并计算相应的弹性参数(表1)。

根据岩石物理学原理,影响岩石弹性参数的本质因素为固体介质及其结构、流体的耦合,不同的弹性参数对流体和变形的响应存在差异^[7]。从岩性识别和流体检测的角度,将岩石弹性参数划分为P型、S型和C型3种类型。其中,P型参数包括体积模量(K)、纵波速度(V_p)、纵波波阻抗(Z_p)、拉梅常数(λ)等,可以反映固体介质及其结构、流体的耦合,对岩石的压缩性比较敏感,又可称为体性参数。S型参数包括剪切模量(G)、横波速度(V_s)、横波波阻抗(Z_s)等,由于流体不传递剪应力,所以该类参数对岩石孔隙中的流体及其含量变化均不敏感,但对岩石切变较为敏感,又可称为剪性参数;不同岩石的S

表1 罗69井部分泥页岩岩心样品的纵、横波速度及弹性参数
Table1 Velocities of P-wave, S-wave and elastic parameters of some shale samples of Well Luo69

样品编号	层位	密度/ (g·cm ⁻³)	纵波速度/ (m·s ⁻¹)	横波速度/ (m·s ⁻¹)	纵横 波速比	杨氏弹性 模量/GPa	体积模 量/GPa	剪切模 量/GPa
482	沙三段下亚段12砂组	2.405	3 186	1 708	1.865	18.222	15.056	7.017
562	沙三段下亚段13砂组	2.388	3 164	1 665	1.900	17.330	15.076	6.623
688	沙三段下亚段13砂组	2.442	3 293	1 779	1.851	20.006	16.167	7.732
806	沙三段下亚段13砂组	2.438	3 242	1 819	1.783	20.488	14.870	8.064

型参数不同,因此S型参数有助于岩性的区分。C型参数是指剪性参数与体性参数的组合,包括纵横波速比、泊松比(本质上等同于纵横波速比)等。

根据测试数据及计算结果,以孔隙度作为约束条件,分析P型参数与S型参数的关系。从罗69井泥页岩岩心样品的纵、横波速度的关系(图1a)可以

看出,P型参数与S型参数具有较好的线性关系,可以区分不同孔隙度的岩石。同样P型参数与C型参数的关系对区分岩性也有一定效果。从以孔隙度作为约束条件的纵波波阻抗与纵横波速比的关系(图1b)可以看出,大孔隙与小孔隙岩心样品在交会数据中分区较为明显。

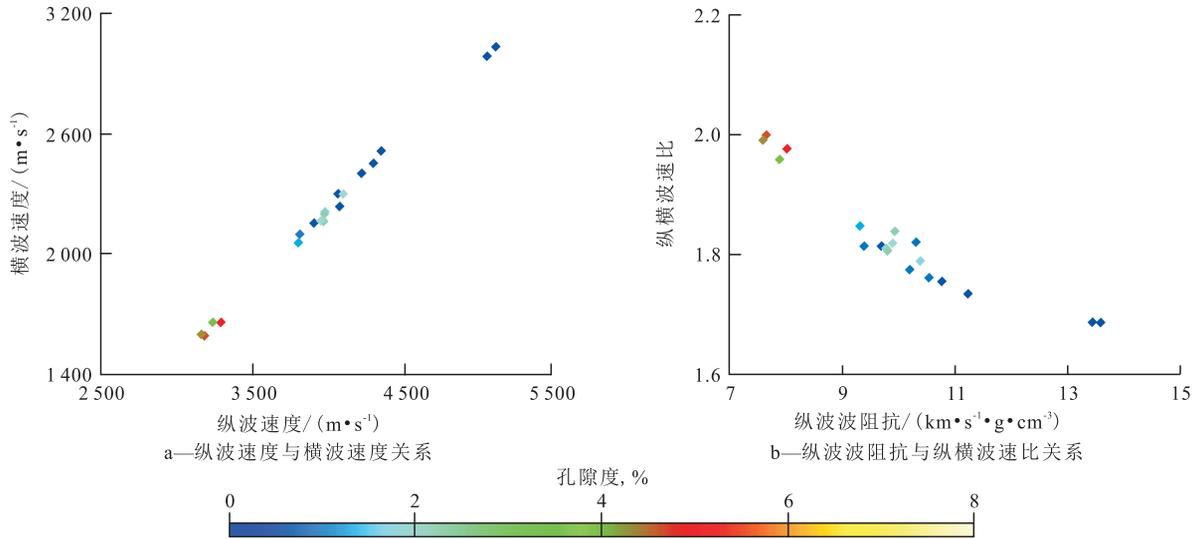


图1 罗69井泥页岩岩心样品的岩石弹性参数关系

Fig.1 Relationship between rock elastic parameters of shale samples of Well Luo69

2.3 岩石组构与有机地化参数

将岩石弹性参数测试后的样品一分为二,编号不变,分别进行X衍射和有机碳含量的测试。罗69

井部分泥页岩岩心样品的矿物组成和有机碳含量的测试结果见表2。

罗69井泥页岩岩心样品包括块状泥岩和层状

表2 罗69井部分泥页岩岩心样品的矿物组成和有机碳含量测试结果

Table2 Measurement results of mineral composition and organic carbon content for some shale samples from Well Luo69 %

样品编号	埋深/m	岩性	伊利石含量	高岭石含量	绿泥石含量	粘土矿物含量	石英含量	斜长石含量	方解石含量	白云石含量	黄铁矿含量	菱铁矿含量	有机碳含量
80	2 939.60	深灰色油泥岩	28	9	4	30	30	3	30	4	3		6.76
112	2 947.65	深灰色灰质油泥岩	20	12	7	18	21	1	50	6	4		3.75
148	2 956.57	深灰色油泥岩	22	13	5	18	19	1	51	6	4	1	3.70

页岩,是由泥级颗粒组成的碎屑沉积岩^[1]。页岩油气中的“页岩”泛指聚集油气的烃源岩,包括泥岩、页岩和灰质泥岩、泥质灰岩、粉砂质泥岩等过渡岩性。依据郝运轻等建立的泥页岩命名和分类标准^[1],可以将罗69井泥页岩岩心样品的岩性分为泥岩类(泥质含量大于50%、灰质含量为25%~50%)和灰岩类(泥质含量为25%~50%,灰质含量为50%~75%)。分析罗69井泥页岩岩心样品的碳酸盐矿物含量和有机碳含量测试结果(图2)发现,沙四段上亚段—沙三段下亚段的泥页岩含有较高的灰质成分,且灰质含量低于50%的泥页岩较少,其有机碳含量与碳酸盐矿物含量总体呈线性负相关关系,碳酸盐矿物含量低的油泥岩和油页岩的有机碳含量

高;沙四段上亚段以灰质成分为主的泥灰岩有机碳

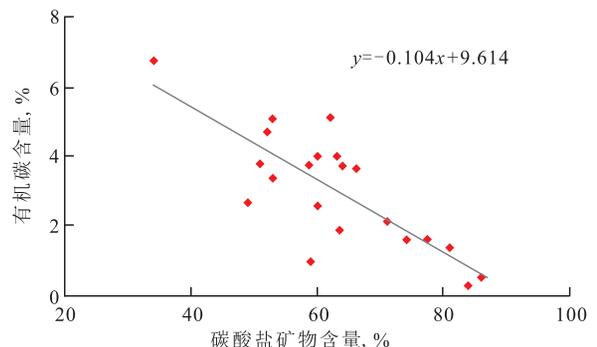


图2 罗69井泥页岩岩心样品碳酸盐矿物含量与有机碳含量的关系

Fig.2 Crossplot of carbonate mineral content and organic carbon content of shale samples of Well Luo69

含量低;对于灰质含量为50%~70%的过渡岩性,其碳酸盐矿物含量与有机碳含量的相关性较差。

3 岩石物理参数与岩石速度的关系

3.1 岩石密度与纵波速度的关系

岩石的纵波速度随密度的增加而增大^[8]。Gardner等通过大量数据拟合出泥岩纵波速度与密度的经验公式^[9],将实验测试的罗69井泥页岩岩心样品的纵波速度与密度进行交会分析,并叠加Gardner经验公式计算结果(图3)发现,罗69井泥页岩岩心样品的纵波速度与密度的交会结果与Gardner经验公式的计算结果较为吻合。孔隙度小的岩心样品的数据点基本位于Gardner经验公式计算结果的上方,孔隙度大的岩心样品的数据点基本位于Gardner经验公式计算结果的下方;即对于孔隙度较小的岩心样品,利用Gardner经验公式计算的密度值比实验测试值稍大,反之,对于大孔隙岩心样品,利用Gardner经验公式计算的密度值比实验测试值略小。

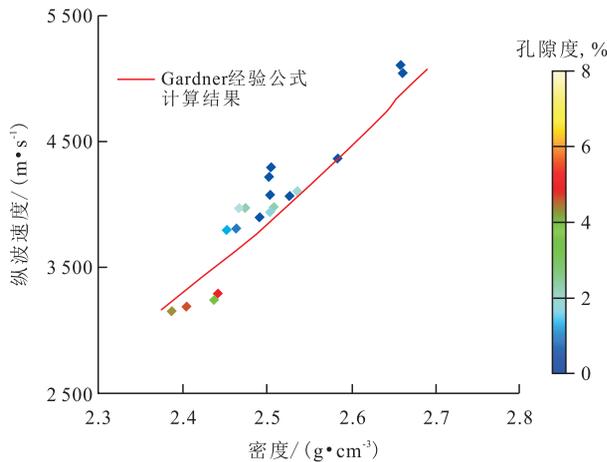


图3 罗69井泥页岩岩心样品密度与纵波速度的关系

Fig.3 Crossplot of density and P-wave velocity of shale samples of Well Luo69

3.2 岩石孔隙度与纵波速度的关系

孔隙度是影响孔隙介质中地震波传播速度的主要岩石物性参数^[10]。罗69井泥页岩岩心样品的实验测试数据表明,对于不发育层状缝隙的岩心样品,孔隙度小于3%的泥页岩的纵波速度在3600 m/s以上;发育层状缝隙的4块岩心样品的孔隙度为4%~5%,纵波速度为3000~3500 m/s。根据怀利方程^[9],孔隙度的微弱变化对纵波速度的影响较小,而纵波速度的变化可能与层状缝隙导致的各向异性有关。

3.3 岩石组构与速度的关系

泥页岩主要由粘土、碳酸盐矿物和有机质构

成^[11-13],其岩石物性参数和弹性参数主要受这3种成分影响。研究岩石纵波速度与岩石组构的对应关系,可以为利用地震波参数预测泥页岩岩性或有机碳含量提供参考。

3.3.1 有机碳含量与密度和速度的关系

有机碳含量与密度的关系 分析罗69井泥页岩岩心样品的有机碳含量与密度的关系(图4)发现,二者呈对数负相关关系,是低密度的固体有机碳替换非有机质岩石基质所导致。此外,有机质转换为烃类物质,取代岩石中的水^[14],也会导致岩石密度的降低。

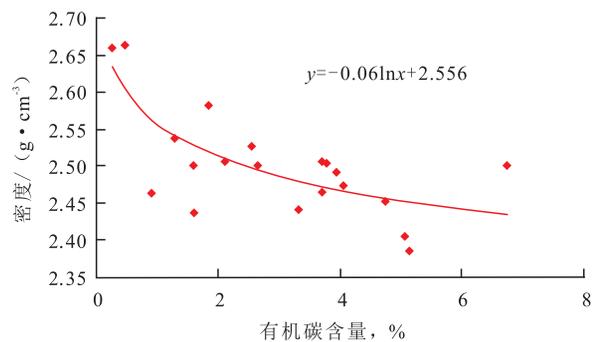


图4 罗69井泥页岩岩心样品有机碳含量与密度的关系

Fig.4 Crossplot of organic carbon content and density of shale samples of Well Luo69

有机碳含量与速度的关系 对实验室测得的罗69井泥页岩岩心样品的有机碳含量与纵波速度以及声波测井的纵波速度进行相关性分析,发现实验室测得的纵波速度(地面条件下)与有机碳含量没有明显的相关性,其原因为泥页岩速度受粘土、碳酸盐矿物含量和有机质含量的共同影响。为消除埋深和岩性对岩石速度的影响,对比分析同为褐色油页岩的相邻埋深的4块岩心样品的有机碳含量、实验室测得的纵波速度以及声波测井的纵波速度(表3),发现其有机碳含量与实验室测得的纵波速度呈较好的负相关关系,即有机碳含量高,纵波速度低。声波测井的纵波速度与有机碳含量也呈较好的负相关关系,但其纵波速度的绝对值比实验室测得的纵波速度整体高约500~800 m/s,这是因

表3 油页岩样品的有机碳含量与实验室及声波测井的纵波速度的关系

Table3 Relationship among organic carbon content, sonic logging and laboratory measured P-wave velocity for oil shale samples

样品编号	埋深/m	有机碳含量,%	纵波速度/(m·s ⁻¹)	
			实验室测量	声波测井
482	3 037.95 ~ 3 046.20	5.07	3 186	3 488
562	3 054.20 ~ 3 062.50	5.13	3 164	3 448
646	3 079.05 ~ 3 087.35	2.12	3 968	4 543
688	3 087.35 ~ 3 095.55	3.32	3 293	4 264

为声波测井测量的是原始地层条件下的纵波速度，而实验室测得的是常温常压条件下的纵波速度。

Manika 等利用声波显微镜下波阻抗的微观结构变化对纵波速度随有机碳含量的升高而降低的现象进行了解释。在低成熟度的泥页岩中,有机质(干酪根)连接形成骨架网络,其纵波速度低;在高成熟度泥页岩中,有机质分散于基质中^[14],泥级颗粒作为岩石骨架,其纵波速度高。因此,泥页岩的纵波速度随有机质成熟度的增加而增大,随有机碳含量的增加而减小,这一特征对利用地震波速度预测泥页岩的有机碳含量是非常重要的。

3.3.2 碳酸盐矿物含量与速度的关系

从实验室测得的罗69井泥页岩岩心样品的碳酸盐矿物含量与纵波速度的关系(图5a)可以看出,其纵波速度随碳酸盐矿物含量的增加而呈现增大的趋势。但其中的80号岩心样品的碳酸盐矿物含量较低,有机碳含量高达6.76%,孔隙度为0.65%,但其纵波速度较大;观察发现该岩心样品的层理发育,因此推测是由于各向异性导致其碳酸盐矿物含量较低,纵波速度却较大。为此,以有机碳含量为约束条件,对声波测井的纵波速度与碳酸盐矿物含量进行交会分析(图5b),发现有机碳含量高,碳酸

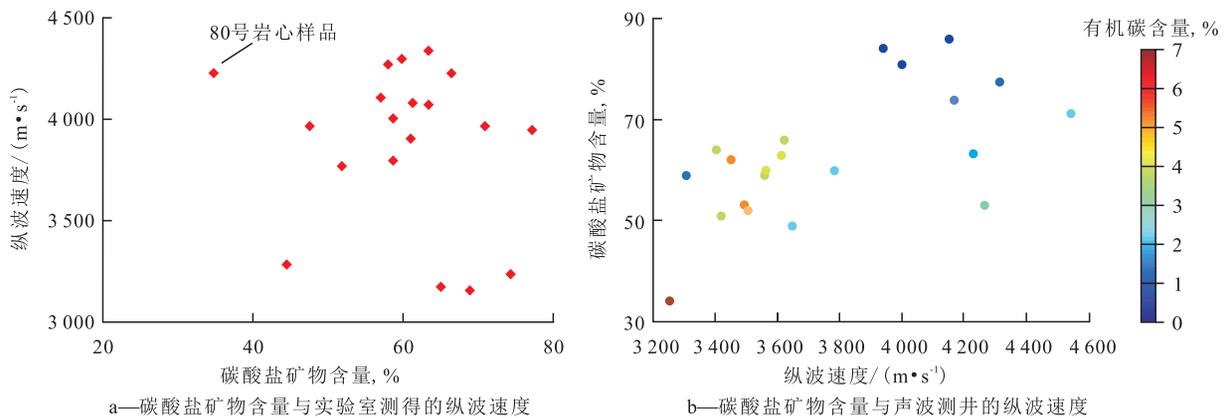


图5 罗69井泥页岩岩心样品碳酸盐矿物含量与纵波速度的关系

Fig.5 Relationship between carbonate mineral content and P-wave velocity of shale samples of Well Luo69

盐矿物含量低,岩石纵波速度低;有机碳含量低,碳酸盐矿物含量高,岩石纵波速度较高。

3.4 温度和压力与岩石速度的关系

分别选取罗69井不同泥页岩岩心样品进行测试,研究压力对不同岩性岩石速度的影响。上覆岩层重量引起静压力(围压)和地层流体压力(孔隙流体压力)发生变化^[15],进而可以导致岩石速度发生变化。由于实验选用的是干样品,因此仅研究围压对速度的影响。研究结果(图6)表明,在低温(温度为15℃)和高温(温度为124℃)条件下,纵波速度随压力的增加而增大,二者的变化趋势一致,且变

化幅度也基本一致:在低压段,由于孔隙发生闭合,岩石的纵波速度随压力的增加而快速增大;而在高压段,由于岩石的孔隙已基本闭合,导致岩石纵波速度随压力的变化趋势变缓^[16]。不同岩性的岩石速度随压力的变化特征不同,罗69井482号油页岩岩心样品的纵波速度随压力的变化梯度大于870号泥灰岩岩心样品的;且压力每增加1 MPa,岩石的纵波速度平均增加4.5~9.5 m/s,横波速度平均增加2.7~4.2 m/s,即纵波速度对压力的变化更为敏感。

同样测试常压状态下速度随温度的变化情况,发现纵、横波速度均随温度的升高而降低,且变化

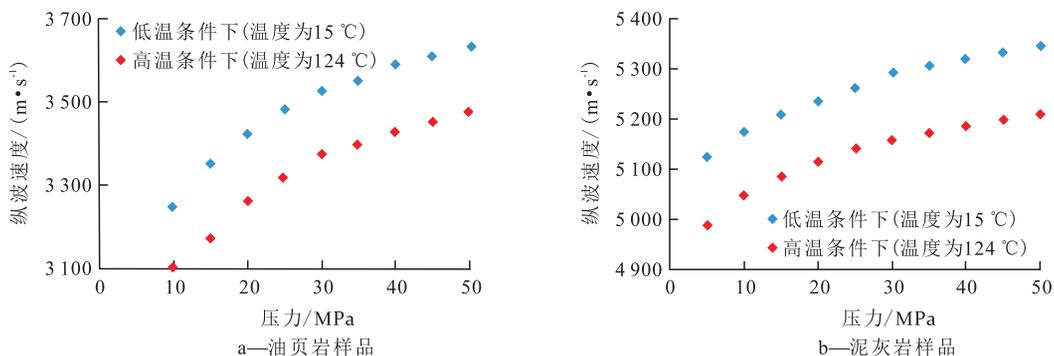


图6 罗69井不同岩性岩心样品压力对纵波速度的影响

Fig.6 Effect of pressure on P-wave velocity of different lithologic samples of Well Luo69

趋势基本呈线性关系。从罗69井6块泥页岩岩心样品的测试结果(图7)可以看出,当压力不变时,温度每上升1℃,纵波速度降低1.0~1.5 m/s,横波速

度降低1.4~1.7 m/s,即横波速度对温度的变化更为敏感。因此,研究不同温度和压力条件下岩石速度的变化特征,对评价泥页岩的脆性,确定压裂过程

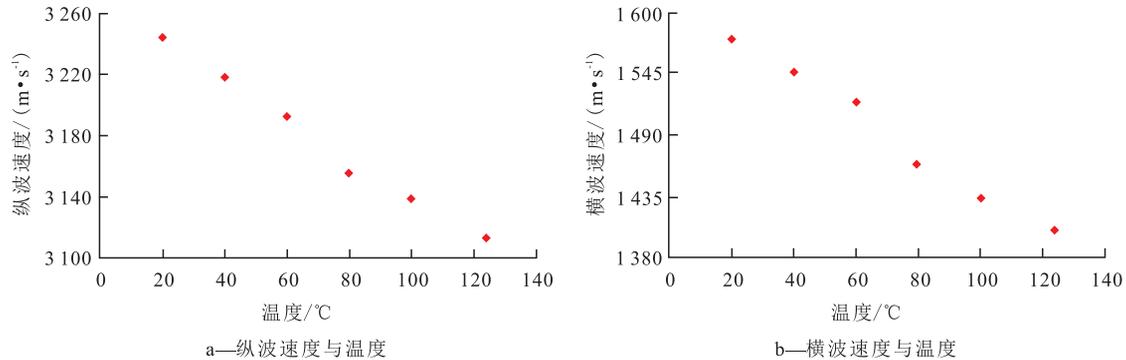


图7 罗69井泥页岩岩心样品温度与速度的关系

Fig.7 Relationship between temperature and velocities of shale samples of Well Luo69

中的工程参数具有参考价值。

4 结论

通过对罗69井沙四段上亚段—沙三段下亚段泥页岩岩心样品的测试与分析可知:泥页岩的密度与孔隙度呈负相关关系,与纵、横波速度呈良好的线性关系,纵波速度与密度的关系基本符合Gardner经验公式。泥页岩的有机碳含量与碳酸盐矿物含量呈负相关关系,与密度呈对数负相关关系,与纵波速度呈线性负相关关系。有机碳含量高、灰质含量低的岩石的纵、横波速度低。泥页岩的纵、横波速度对压力变化的敏感性高于泥灰岩,且纵波速度对压力的变化更为敏感,横波速度对温度的变化更为敏感。研究成果为利用地震波速度及其他弹性属性预测泥页岩有机碳含量等提供了依据。

参考文献:

- [1] 郝运轻,谢忠怀,周自立,等.非常规油气勘探领域泥页岩综合分类命名方案探讨[J].油气地质与采收率,2012,19(6):16-19,24.
Hao Yunqing, Xie Zhonghuai, Zhou Zili, et al. Discussion on multi-factors identification of mudstone and shale [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(6): 16-19, 24.
- [2] 邓美寅,梁超.渤海洼陷沙三下亚段泥页岩储集空间研究:以罗69井为例[J].地学前缘,2012,19(1):172-181.
Deng Meiyin, Liang Chao. Studies on reservoir space of mud stone and shale of the lower section of Es₃ in Bonan Sub sag: An example from Well Luo69 [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(1): 172-181.
- [3] 赵铭海,付爱兵,关丽,等.罗家地区页岩油气测井评价方法[J].油气地质与采收率,2012,19(6):20-24.

Zhao Minghai, Fu Aibing, Guan Li, et al. Logging evaluation method of shale oil and gas reservoir in LuoJia area [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(6): 20-24.

- [4] 耿生臣.罗家地区泥页岩矿物组分含量解释模型构建方法[J].油气地质与采收率,2013,20(1):24-27.
Geng Shengchen. Study on shale mineral component content model in LuoJia area [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(1): 24-27.
- [5] 张鹏,张营革,张云银,等.渤海洼陷泥页岩分布规律及甜点地震预测[C].昆明:中国地质学会学术年会,2013:310-315.
Zhang Peng, Zhang Yingge, Zhang Yunyin, et al. Distribution rule of the shale and desert seismic prediction in Bonan subsag [C]. Kunming: Academic Annual Meeting of Geological Society of China, 2013: 310-315.
- [6] Mavko G, Mukerji T, Dvorkin J. The rock physics handbook: Tools for seismic analysis in porous media [M]. New York: Cambridge University Press, 1998: 106-192.
- [7] 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.
Ma Zhonggao, Xie Jigao. Relationship among compressional wave, shear wave velocities and density in rocks [J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(4): 905-910.
- [8] 马中高. Biot系数和岩石弹性模量的实验研究[J].石油与天然气地质,2008,29(1):135-140.
Ma Zhonggao. Experimental investigation into Biot's coefficient and rock elastic moduli [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(1): 135-140.
- [9] Gardner G H F, Gardner L W, Gregory A R. Formation velocity and density—The diagnostic basics for stratigraphic traps [J]. Geophysics, 1974, 39(6): 770-780.
- [10] 董宁,霍志周,孙赞东,等.泥页岩岩石物理建模研究[J].地球物理学报,2014,57(6):1990-1998.
Dong Ning, Huo Zhizhou, Sun Zandong, et al. An investigation of a new rock physics model for shale [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(6): 1990-1998.

(下转第33页)