

陆相致密砂岩及泥页岩储层纵横波波速比与 岩石物理参数的关系及表征方法

尹 帅^{1,2,3}, 丁文龙^{1,2,3*}, 王濡岳^{1,2,3}, 赵金利⁴, 刘建军⁵, 张宁洁^{1,2,3}

(1.中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083; 2.海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室,北京 100083;
3.页岩气资源战略评价国土资源部重点实验室,北京 100083; 4.中国石油华北油田分公司山西煤层气勘探开发分公司,
山西 晋城 048300; 5.中国石油华北油田分公司勘探开发研究院,河北 任丘 062552)

摘要:为研究非常规致密砂岩及泥页岩储层的地质结构特征,基于川西地区三叠系岩石物性、力学及声学测试资料对深层致密砂岩、泥页岩的纵横波波速比与岩石的岩性、物性、泊松比、应力及微裂缝之间的关系进行研究。结果表明,纵横波波速比可以有效区分不同的岩性;对于相同岩性的地层,纵横波波速比与孔隙度和渗透率均具有正相关性;在高应力条件下,随着微裂缝的产生,往往会导致纵横波波速比出现异常升高;纵横波波速比的升高及横波波速的降低均可在一定程度上反映微裂缝的发育程度。研究区三叠系的纵横波波速比对裂缝的识别较为敏感,分别利用泊松比和Gassmann方程对纵横波波速比进行表征并与实测值对比,结果表明2种方法均具有一定的适用性,但Gassmann方程计算结果的精度更高,反映出弹性波理论在致密砂岩及泥页岩等复杂地层中是适用的。

关键词:纵横波波速比 物性 力学 声学 应力 微裂缝 致密砂岩 泥页岩

中图分类号:P631.44

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)03-0022-07

Characterization method of v_p/v_s and its relationship with rock physical parameters of continental tight sandstone and shale reservoir

Yin Shuai^{1,2,3}, Ding Wenlong^{1,2,3}, Wang Ruyue^{1,2,3}, Zhao Jinli⁴, Liu Jianjun⁵, Zhang Ningjie^{1,2,3}

(1.School of Energy Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing City, 100083, China; 2.Key Laboratory of Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Accumulation Mechanism, Ministry of Education, Beijing City, 100083, China; 3.Key Laboratory of Shale Gas Exploration and Evaluation, Ministry of Land and Resources, Beijing City, 100083, China;
4.Shanxi CBM Exploration and Development Branch, PetroChina Huabei Oilfield Company, Jincheng City, Shanxi Province, 048300, China; 5.Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu City, Hebei Province, 062552, China)

Abstract: In order to study the geological structure characteristics of unconventional tight sandstone and shale reservoir, the relationship between v_p/v_s and rock lithology, physical properties, poisson ratio, stress and micro cracks of the deep tight sandstone and mud shale was studied based on the data of physical test, mechanical test and acoustic test of Triassic rocks in west Sichuan area. The results showed that v_p/v_s can distinguish lithology effectively; v_p/v_s has a positive correlation with porosity and permeability for the formations having the same lithology; abnormally high v_p/v_s can always occur with the formation of micro cracks under high stress; the rise of v_p/v_s and the decline of v_s both can indicate the development degree of

收稿日期:2015-03-13。

作者简介:尹帅(1989—),男,山东新泰人,在读博士研究生,从事石油构造分析与控油作用、非常规油气构造和裂缝及其与含气量关系等研究。联系电话:13375633766, E-mail:583018776@qq.com。

*通讯作者:丁文龙(1965—),男,河南南阳人,教授,博导。联系电话:18611715055, E-mail:dingwenlong2006@126.com。

基金项目:国家自然科学基金项目“渤海湾盆地济阳坳陷古近系陆相富有机质页岩裂缝研究”(41372139)和“中国南方下古生界海相富有机质裂缝发育程度与主控因素定量关系研究”(41072098),国家科技重大专项“渤海湾盆地页岩油气资源评价”(2011ZX05018-001-002)和“沾化凹陷罗家地区沙三下亚段泥储层裂缝形成与分布预测研究”(2011ZX05009-002-205)。

the micro cracks. In the study area, v_p/v_s is more sensitive to the cracks. v_p/v_s was characterized and calculated by using poisson ratio and Gassmann equation respectively. It shows that these two methods both have a certain applicability, but the Gassmann equation has a much higher accuracy. A conclusion can be drawn that the theory of elastic wave in the complex formations of tight sandstone and shale is applicable.

Key words: v_p/v_s ; physical properties; mechanics; acoustics; stress; micro cracks; tight sandstone; mud shale

岩石物理特征研究主要包括岩石物性、力学及声学方面的研究^[1-3]。岩石物性研究是了解岩石性质及进行储层评价的基础;力学研究对确定地层应力状态、地层完整性及钻、完井施工等方面具有重要的工程应用价值^[2];声学研究主要分析弹性波等在岩石介质中的传播状态,目前在工程及地质等诸多方面均有广泛应用,可用来研究地层岩性、物性、岩石强度、声波频散、裂缝发育程度及井壁稳定性等^[4-8]。川西地区三叠系陆相碎屑岩地层地质条件复杂,对其微观认识相对欠缺,制约了非常规储层特征评价及工程地质的发展,因此综合地震、测井及测试等资料对岩石物理参数进行综合研究是十分必要的^[9]。笔者根据川西地区三叠系(埋深大于3 000 m)致密砂岩及泥页岩样品的岩石力学、声学及物性测试结果,重点对纵横波波速比与岩石物理参数中的岩性、物性、应力及裂缝等参数的关系进行综合研究,并对纵横波波速比表征方法进行对比分析,以期对致密砂岩、泥页岩及裂缝性地层等地质条件复杂地层的地质结构认识及评价提供参考。

1 纵横波波速比与岩石物理参数的关系

1.1 与岩性的关系

对于不同的岩性,可以利用纵横波波速比进行识别。主要依据为,对于同一地区,一般随着埋深及岩性的变化,其岩石的固结程度、物性及颗粒分布均会发生一定的变化^[10],相应的纵横波波速比亦会发生变化。

Pickett 最早将纵横波波速比推广到岩性识别中^[10],对灰岩、白云岩及各类砂岩的纵横波波速比关系进行了对比分析,实验测试有效围压为0~40 MPa,研究表明,随着有效围压的变化,不同岩性的纵横波时差关系呈近线性变化,且具有不同的分布区域(图1),由此表明纵横波波速比可用于识别不同的岩性。此外,Pickett 还对各类砂岩的孔隙度进行了测试^[10],发现在较低有效应力条件下,从孔隙度较低的纯石英砂岩到孔隙度较高的灰质砂岩,纵横波波速比从1.6逐渐升高至约1.75,说明纵

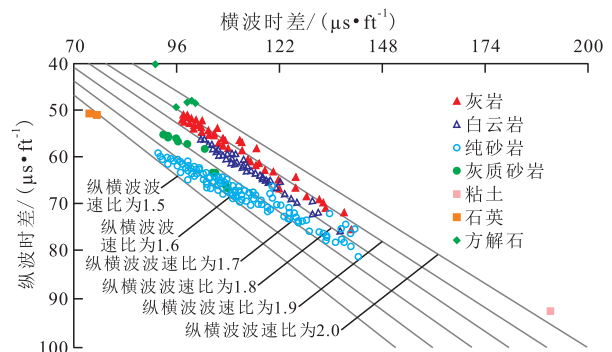


图1 不同岩性的纵横波时差关系

Fig.1 Relationship of vertical and horizontal wave time difference with different lithologies

横波波速比与岩石孔隙度具有一定的正相关性。Han等^[11]的研究成果也表明,纵横波波速比与粘土组分含量及孔隙度呈线性正相关。

沉积岩为各类单晶矿物的集合体, Castagna 等认为单晶矿物的纵横波波速大体相当于沉积岩的骨架速度^[12],因此沉积岩的实际波速应在这些单晶矿物波速的范围内。此外,将文献[13-14]中测试的石英、方解石及粘土等矿物的纵横波时差及比值标注于图1中,可以发现几乎不含孔隙的石英的纵横波波速比非常小,约为1.5;方解石和粘土的纵横波波速比较高,约为2.0;灰岩、白云岩及砂岩的纵横波波速比均分布于1.5~2.0。对于纵横波波速比大于2.0的岩石, Gardner 等认为其主要为未固结或较为松散的岩石^[15]。

对川西地区三叠系致密砂岩及泥页岩进行样品采集后加工成尺寸为25 mm×50 mm的柱体,测试样品均为干岩样。声学测试结果表明,测试样品的纵横波波速比主要为1.5~1.7;泥页岩的纵波和横波波速相对较小,其次为泥质含量较高(大于35%)的砂岩,泥质含量较低(小于10%)砂岩的纵波和横波波速则相对较大。而不同泥质含量砂岩的纵横波波速比变化范围较大,这与不同砂岩样品内部的颗粒及微观组构排列不同有关,泥质含量相对较高的砂岩及泥页岩的纵横波波速比一般大于1.6。

1.2 与物性的关系

影响岩石物性的地质因素有很多种,经历不同成岩作用的不同类型岩石的孔隙度和渗透率的变化规律相差很大^[16],因此研究纵横波波速比与岩石

物性的相关性主要针对岩性变化较小的同一套沉积地层。前人研究结果^[17]表明,岩石纵横波波速比与孔隙度具有一定的正相关性,这主要是因为对于弹性波来说,岩石的纵波和横波波速可分别表示为

$$v_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4\mu}{3}}{\rho}} \quad (1)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2)$$

式中: v_p 为纵波波速, km/s; K 为体积模量, GPa; μ 为剪切模量, GPa; ρ 为岩石密度, g/cm³; v_s 为横波波速, km/s。

由于液体或气体的剪切模量为0,弹性波不能在液体或气体中传播,因此随着岩石孔隙度的增加,横波波速一般会发生显著降低,而纵波波速的变化相对较小,从而导致纵横波波速比升高。当岩石由干燥变为饱和地层水时,体积模量会略有升高,而剪切模量不变,通过式(1)和式(2)可以看出,纵波波速会略有升高,而横波波速保持不变。实验测试样品在饱和地层水和饱和气条件下的纵横波波速特征(图2)表明,其纵横波波速的变化符合上

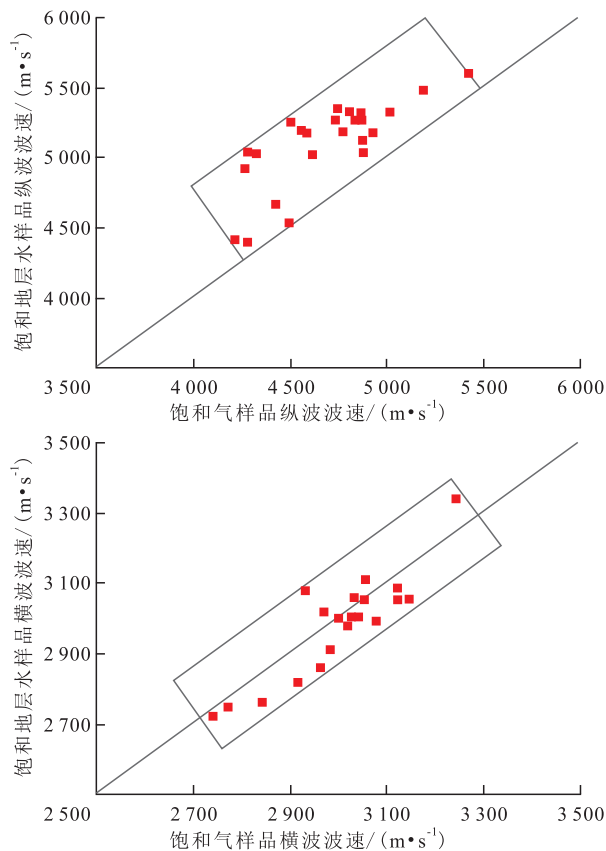


图2 实验测试样品在饱和地层水和饱和气条件下的纵横波波速特征

Fig.2 Velocity characteristics of the tested samples saturated with water and gas respectively

述规律,实验结果准确可靠。

Castagna 等利用岩石孔隙度及泥质含量分别与纵波波速和横波波速进行拟合,得到不含泥质的纯砂岩及孔隙度为0时泥质砂岩的纵横波波速比表达式^[12]分别为

$$\frac{v_p}{v_s} = 1.33 + \frac{0.63}{3.89 - 7.07\phi} \quad R^2=0.96 \quad (3)$$

$$\frac{v_p}{v_s} = 1.08 + \frac{1.63}{3.89 - 2.04V_{sh}} \quad R^2=0.96 \quad (4)$$

式中: ϕ 为岩石的孔隙度; V_{sh} 为岩石的泥质含量。

由此可见,岩石的纵横波波速比与孔隙度和泥质含量均为正相关关系,但孔隙度对纵横波波速比的敏感程度大于泥质含量。此外, Lee^[17]及 Zhang 等^[18]通过实验测试总结出的经验关系均表明纵横波波速比与岩石孔隙度具有正相关关系。

对川西地区三叠系取心样品进行物性测试,单轴条件下分别对饱和地层水和饱和气样品的纵横波波速比与孔隙度进行拟合,结果表明,研究区致密砂岩和泥页岩的孔隙度均非常低,大约为1.5%~3.5%,纵横波波速比与孔隙度之间具有较好的正相关关系。从不同学者总结的砂岩纵横波波速比与孔隙度实验测试结果的分布趋势^[18](图3)来看,当岩石孔隙度较低时,纵横波波速比的变化趋势较为平缓,当孔隙度大于40%时,纵横波波速比的上升幅度明显加快。对于川西地区三叠系样品的测试结果,由于样品的孔隙度较低,因此其纵横波波速比整体变化趋势较缓,且与干燥样品相比,饱和地层水后样品的纵横波波速比略有升高。

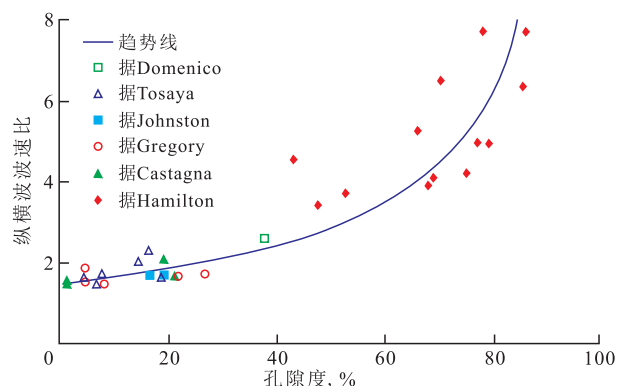


图3 实验测试砂岩纵横波波速比与孔隙度之间的关系

Fig.3 Relationship between v_p/v_s and porosity of the tested sandstone samples

研究区 X 井具有可靠的阵列声波测试资料,将该井相同埋深井段的利用中子测井解释的中子孔隙度和利用双侧向电阻率解释的裂缝孔隙度分别与纵横波波速比进行对比(图4),同时将所测试样

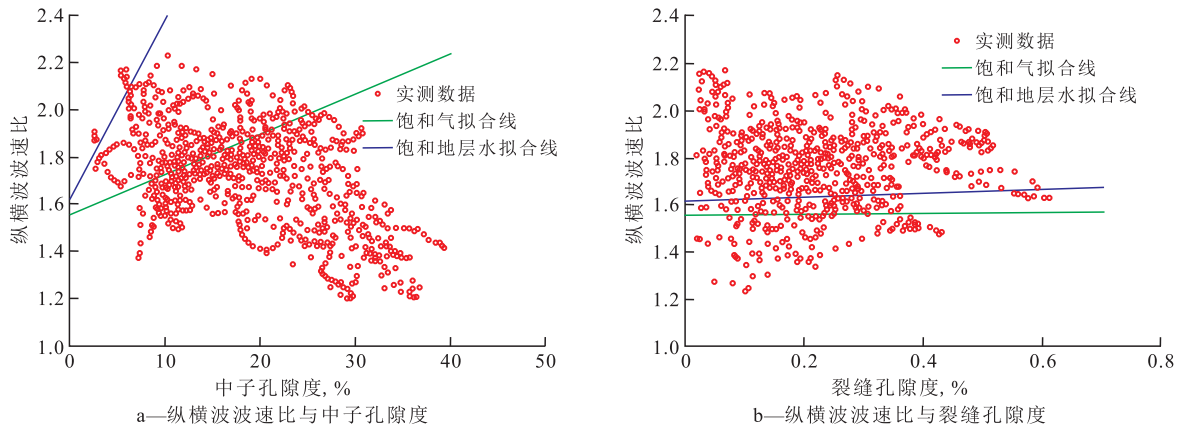


图4 川西地区X井纵横波波速比与中子孔隙度及裂缝孔隙度的关系

Fig.4 Relationship between v_p/v_s and both neutron porosity and fracture porosity of Well X in western Sichuan area

品分别在饱和地层水和饱和气(干燥)条件下的拟合线标注于图4中。由于测试样品均为完整样品,因此其拟合线代表岩石未发生破裂时正常的纵横波波速比与孔隙度的关系,并以此拟合线作为基准线,当测井解释值高于该线时,可能为裂缝发育段,低于该线时则为裂缝不发育段。

从纵横波波速比与中子孔隙度的关系(图4a)可以看出,饱和地层水拟合线与饱和气拟合线的差异较大,而纵横波波速比与裂缝孔隙度的关系(图4b)则表现为两者的差异较小。这可能与中子测井主要反映的是含氢指数,受粘土矿物晶间水的影响较大有关,一般天然气和干酪根的含氢指数明显低于粘土矿物中的结晶水,因此在纵横波波速比与中子孔隙度关系图中饱和气拟合线之上测试点代表的测试段可能为裂缝较发育段。分析纵横波波速比与裂缝孔隙度的关系可以发现,由于测井解释的裂缝孔隙度较低,因此饱和地层水拟合线和饱和气拟合线的差异较小;且在该裂缝孔隙度变化范围内,随着裂缝孔隙度的增加,纵横波波速比的变化较为平缓,符合实验得出的规律。研究区目的层的裂缝孔隙度相对于中子孔隙度受各种地质因素的干扰较小,解释量级合理,因此结果较为可靠,更适用于对地层裂缝的发育情况进行对比和表征。

对于渗透率与纵横波波速比的关系,岩石在应力加载过程中,实际孔隙度为孔隙与裂隙的孔隙度之和。在较高的地层应力环境下,假设孔隙自身的变化可以忽略,此时具有导流能力的裂隙是导致地层岩石孔隙度变化的主要因素,对流体渗流起到最重要的作用。岩石渗透率与孔隙度的关系可以表示为

$$K = K_0 \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^n \quad (5)$$

式中: K 为渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_0 为初始渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; ϕ_0 为初始孔隙度; n 为拟合系数。

由岩石渗透率与孔隙度的关系可知,岩石渗透率与纵横波波速比也为正相关关系。

1.3 与应力及裂缝的关系

对川西地区三叠系取心样品进行三轴应力测试及声学测试,共分为4组样品;其中A、C和D组为砂岩样品,B组为泥页岩样品;测试围压为32 MPa,样品饱和地层水,且各组样品测试点均终止于破裂点。实验结果(图5)表明,当轴向应力小于30 MPa时,各组砂岩样品的纵横波波速的变化均较小,其中C组和D组砂岩样品纵波波速起始段的增幅较大,这可能与压密有关;而泥页岩样品(B组样品)往往在发生宏观破裂前,其纵横波波速的变化均较小。随着应力的不断加载,可以发现各组样品的纵波波速略为升高,而横波波速的变化则相对较小,且从横波波速升高至一定程度后逐渐开始下降,横波波速降低主要是由于裂隙的产生造成的,但这些裂隙对纵波波速的影响较小,这可能与裂隙产生的方向具有一定的关系。对于A组砂岩样品,横波波速在轴向应力约为140 MPa时出现较明显的降低,对应的纵横波波速比急剧升高,二者具有较好的对应关系。对于B组泥页岩样品,其横波波速与纵横波波速比也具有一定的对应关系,且泥页岩的纵横波波速明显小于其他各组砂岩。观察C和D组砂岩样品破裂前的测试点可以发现,横波波速的变化幅度较小,但纵横波波速比具有较明显升高的趋势,表明样品在破裂前一段时间内,其内部已开始发育微裂缝,也反映出对于识别岩石内部微裂缝纵横波波速比比横波波速更加灵敏。对于破裂点,纵横波波速比往往呈现异常高值,地史时期异常高的古应力是造成宏观断裂及微裂缝产生的重要原因,裂缝

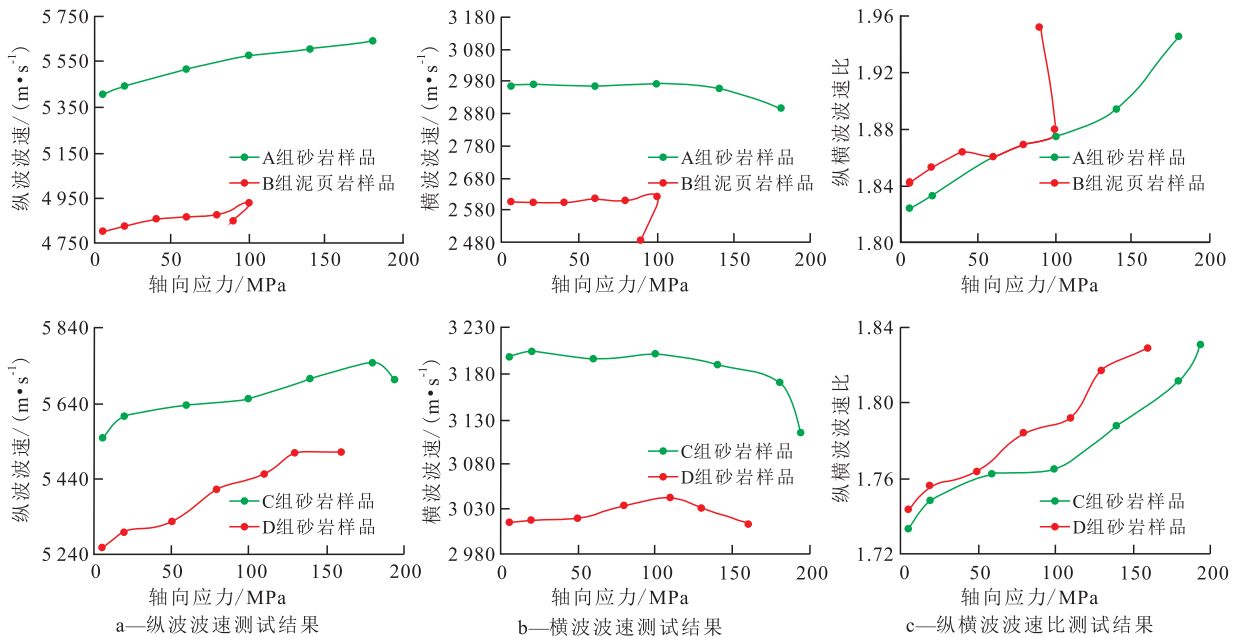


图5 三轴应力加载条件下实验样品的纵波波速、横波波速及纵横波波速比测试结果

Fig.5 Test results of v_p , v_s and v_p/v_s under triaxial stress

发育段往往会导致异常高的纵横波波速比;因此在测井解释过程中,可结合井径、录井及成像测井等资料对裂缝发育段进行综合识别。此外,钻井液密度过低导致的井壁失稳破裂也会使纵横波波速比出现异常偏高,应与前述情况加以区分。实验结果显示,对于识别岩石内部微裂缝纵横波波速比比横波波速更加敏感,但 Aktan 等在研究微裂缝对砂岩的影响时,采用热循环及应力加载的方法使干燥砂岩产生一些微裂缝,同时在砂岩产生微裂缝之前和之后分别测试纵横波波速,发现微裂缝的产生会使纵横波波速降低,但2种情况下纵横波波速比为定值^[19],此时纵横波波速比识别微裂缝的能力降低。

对研究区 X 井目的层进行测井解释,并与岩性归位后的取心观察结果进行对比,结果(图6)表明,测井解释的岩石纵横波波速比主要为 1.4~2.2。对于有效裂缝发育段,其横波波速一般会出现较明显的降低,对应的横波时差升高。X 井 3 285~3 305, 3 332~3 337 和 3 355~3 368 m 井段的纵横波波速比与横波波速之间具有较好的对应关系,横波波速高值对应纵横波波速比高值;但对于其他井段,例如 3 320~3 322, 3 325~3 328 和 3 370~3 373 m 井段,其纵横波波速比高值则对应横波波速低值。对于判别裂缝发育情况,将纵横波波速比分别与赫斯特法^[6]计算的分形维数以及取心观察的岩石破碎段(岩心归位后)进行对比;赫斯特法认为裂缝的存在会增加测井数据的复杂性^[6],针对研究区目的层采

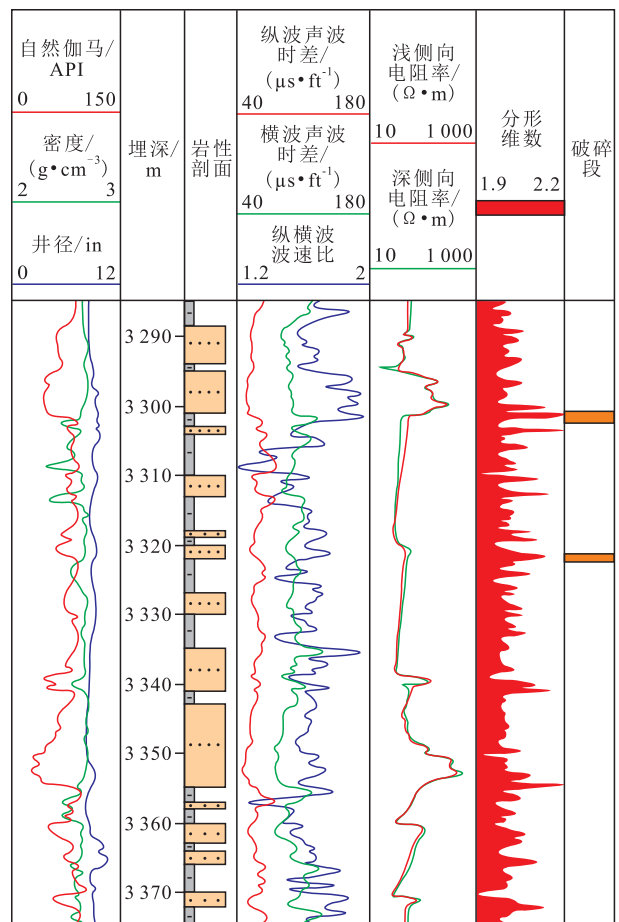


图6 川西地区 X 井取心井段测井解释剖面

Fig.6 Logging interpretation profile of the coring interval of Well X in western Sichuan area

用浅侧向电阻率数据与测井样本数的对数关系计算分形维数,其表达式为

$$D = 2 - \frac{\partial \lg \frac{R(m)}{S(m)}}{\partial m} \quad (6)$$

式中: D 为分形维数; $R(m)$ 和 $S(m)$ 分别为过程序列全层段级差及标准差; m 为测井资料的采样点数。

分形维数越大代表裂缝存在的概率越大, 同时与取心观察的岩石破碎段进行对比(图6)发现, 岩石破碎段往往就是裂缝发育段, 由于岩心收获率可能较低, 因此裂缝发育段的长度可能更大。X井发育的2个岩石破碎段(3 301~3 302.5和3 321.5~3 322.5 m井段)的井径测井曲线均为正常, 表明井壁未发生破裂, 对应的分形维数较高, 且其纵横波波速比均为峰值, 应为天然裂缝。但对于埋深3 321 m附近的岩石破碎段的横波波速却相对较低, 表明纵横波波速比比横波波速在识别有效裂缝方面更为敏感, 与实验结果一致。

2 纵横波波速比表征方法对比

2.1 泊松比表征法

地层岩体的泊松比是诱导产生水平主应力的重要原因^[20], 因此泊松比与纵横波波速比也具有重要关系, 由式(1)和式(2)推导出二者的关系式为

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{4}{3} + \frac{2(1+\gamma)}{3(1-2\gamma)}} \quad (7)$$

式中: γ 为泊松比。

将式(7)计算求得的纵横波波速比与实测值对比发现, 2组纵横波波速比基本分布于中线附近, 表明对于研究区三叠系致密砂岩和泥页岩, 纵横波波速比与岩石泊松比具有较好的相关性, 弹性波理论在该类复杂地层中是适用的, 但整体还具有一定的离散度。

2.2 Gassmann 方程法

Gassmann 方程^[19]可用以构建饱和地层水及地层围压条件下岩石纵横波波速比的解释模型。其公式为^[12]

$$K_{rw} = K_{rs} \frac{K_{rd} + Q}{K_{rs} + Q} \quad (8)$$

$$Q = \frac{K_{rf}(K_{rs} - K_{rd})}{\phi(K_{rs} - K_{rf})} \quad (9)$$

$$\mu_w = \mu_d \quad (10)$$

$$\rho_w = \phi\rho_f + (1 - \phi)\rho_s \quad (11)$$

式中: K_{rw} 为饱和地层水条件下的岩石体积模量, GPa; K_{rs} 为颗粒的体积模量, GPa; K_{rd} 为干岩石

骨架的体积模量, GPa; K_{rf} 为流体的体积模量, GPa; μ_w 为饱和地层水岩样的剪切模量, GPa; μ_d 为干岩样的剪切模量, GPa; ρ_w 为饱和地层水岩样的密度, g/cm³; ρ_f 为液体密度, g/cm³; ρ_s 为岩石颗粒密度, g/cm³。

根据 Gassmann 方程求取 K_{rw} 和 μ_w , 其中 K_{rs} , K_{rf} 及 ρ_s 可通过文献[19]查值获取, 进而可以对纵横波波速比进行求取

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{4}{3} + \frac{K_{rw}}{\mu_w}} \quad (12)$$

将模拟地层条件下利用 Gassmann 方程求取的纵横波波速比结果与实测值进行对比(图7)可以看出, 纵横波波速比计算值与实测值的符合程度较好, 且优于利用泊松比预测的结果。Gassmann 方程的适用性表明可以利用颗粒及骨架等微观结构参数对岩石纵横波波速比进行表征, 该方法对研究区致密砂岩及泥页岩储层是适用的。

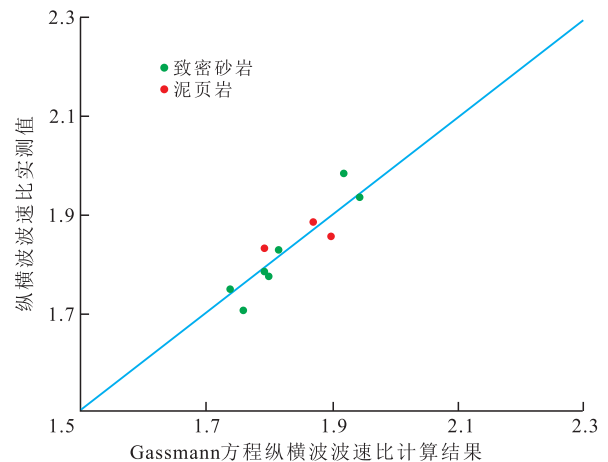


图7 川西地区三叠系岩石样品纵横波波速比实测值与 Gassmann 方程计算结果对比

Fig.7 Comparison of the measured v_p/v_s and the calculated result using the Gassmann equation under the formation condition of Triassic strata in western Sichuan area

3 结论

纵横波波速比可以对不同岩性进行有效区分。对于相同岩性地层, 纵横波波速比与孔隙度和渗透率均具有正相关关系。在高应力条件下, 随着微裂缝的产生, 往往会导致纵横波波速比出现异常升高; 纵横波波速比升高及横波波速降低均可对微裂缝的发育起到一定的指示作用, 且在川西地区三叠系纵横波波速比更为敏感。利用泊松比和 Gassmann 方程对纵横波波速比进行计算并与实测值进行对比, 结果表明2种方法均具有一定的适用

性,但 Gassmann 方程计算结果精度更高,也表明弹性波理论在致密砂岩及泥页岩等复杂地层中是适用的。

参考文献:

- [1] 刘玉珍.纵横波联合反演在储层预测中的应用——以沾化凹陷罗家地区沙一段生物灰岩为例[J].油气地质与采收率,2014,21(3):45-47,51.
Liu Yuzhen.Application of compressional and shear wave joint-inversion in prediction of reservoir—an example of biological limestone in Es₁ of the Shahejie formation in Luoia area of Zhanhua sag[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2014,21(3):45-47,51.
- [2] 罗红梅,罗晓容,刘书会,等.东营凹陷北部陡坡带致密砂砾岩体物性特征及弹性波速影响因素[J].油气地质与采收率,2014,21(2):91-94.
Luo Hongmei, Luo Xiaorong, Liu Shuhui, et al.Physical features and influencing factors of elastic velocity of compacted sandy-conglomerates in northern steep slope, Dongying sag [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(2):91-94.
- [3] 尹帅,丁文龙,刘建军,等.基于微孔充填模型的页岩储层吸附动力学特征分析[J].高校地质学报,2014,20(4):635-641.
Yin Shuai, Ding Wenlong, Liu Jianjun, et al.Adsorption dynamics analysis of shale reservoir based on micro-pore filling model [J]. Geological Journal of China Universities, 2014, 20(4):635-641.
- [4] 尹帅,单钰铭,周文,等.Hoek-Brown 准则在致密砂岩弹性参数测井解释中的应用[J].石油钻探技术,2015,43(1):88-95.
Yin Shuai, Shan Yuming, Zhou Wen, et al.Application of Hoek-Brown criterion for tight sandstone elastic parameters in log interpretation [J].Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(1):88-95.
- [5] Bonner B P. v_p/v_s in saturated granodiorite loaded to failure [J]. Pure and Applied Geophysics, 1975, 113(4):25-28.
- [6] Sheorey P R.Empirical rock failure criteria [M].Rotterdam:Taylor & Francis Group, 1997.
- [7] Kate Hadley. v_p/v_s anomalies in dilatants rock samples [J].Pure and Applied Geophysics, 1975, 113(3):1-21.
- [8] 尹帅,单钰铭,周文,等.破裂准则方程在深层岩石力学强度响应中的应用[J].地球物理学进展,2014,29(6):2 942-2 949.
Yin Shuai, Shan Yuming, Zhou Wen, et al.Application of failure criterion equation in deep rock's mechanical strength response [J].Progress in Geophysics, 2014, 29(6):2 942-2 949.
- [9] 尹帅,单钰铭,王哲,等.Hoek-Brown 准则在岩石抗压强度测井解释中的应用[J].桂林理工大学学报,2014,34(4):659-664.
Yin Shuai, Shan Yuming, Wang Zhe, et al.Application of Hoek-Brown criterion in rock compressive strength logging interpretation [J].Journal of Guilin University of Technology, 2014, 34(4):659-664.
- [10] Pickett G R.Acoustic character logs and their applications in formation evaluation [C].SPE 452, 1963.
- [11] Han D H, Nur A, Morgan D.Effects of porosity and clay content on wave velocities [J].Geophysics, 1986, 51(4):2 093-2 107.
- [12] Castagna J P, Batzle M L, Eastwood R L.Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks [J].Geophysics, 1985, 50(4):571-581.
- [13] Birch F.Compressibility elastic constants in handbook of physical constants [M].New York:Geological Society of America, 1966.
- [14] Christensen.Seismic velocities, in Carmichael, Handbook of physical properties of rocks, II [M].Boca Raton: Chemical Rubber Company Press, 1982.
- [15] Gardner G H F, Harris M H.Velocity and attenuation of elastic waves in sands [C]//Society of professional well log analysis, transactions.London:9th Annual Log Symposium, 1968:1-19.
- [16] 苗永康.叠前地震反演技术的应用条件及难点分析[J].油气地质与采收率,2014,21(6):61-64.
Miao Yongkang.Analysis on application conditions and difficulties in pre-stack seismic inversion [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(6):61-64.
- [17] Lee M W.Velocity ratio and its application to predicting velocities [R].US Geological Survey Bulletin 2197, 2003:1-15.
- [18] Zhang Jincai, James Lang, William Standifird.Stress, porosity, and failure-dependent compressional and shear velocity ratio and its application to wellbore stability [J].Journal of Petroleum Science and Engineering, 2009, 69(4):193-202.
- [19] Aktan T, Farouq Ali C M.Effect of cyclic and in situ heating on the absolute permeabilities, elastic constants, and electrical resistivities of rocks [M].New York:New York Press, 1975.
- [20] 苗文培,姜汉桥,葛洪魁,等.页岩气储层蠕变特性及其对页岩气开发的影响[J].油气地质与采收率,2014,21(4):97-100.
Miao Wenpei, Jiang Hanqiao, Ge Hongkui, et al.Gas shale creep and its influence on the shale gas development [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(4):97-100.

编辑 邹澍滢