

裂隙发育对低孔低渗含气地层声传播特征的影响

陈雪莲, 钱玉萍, 唐晓明

(中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580)

摘要:在含孔、裂隙介质弹性波动统一理论的基础上,研究裂隙发育对低孔含气地层弹性波速度的影响。针对岩心测量的纵横波速度,探讨估算岩心裂隙密度的方法。结果表明:随着裂隙密度的增加,弹性波的速度降低明显;地震、测井和实验室岩心测量频率下的波速变化明显,显示出了较强的频散特性;在孔隙度为1.1%时,裂隙发育岩石在饱气时的纵波速度与饱水相比明显降低,裂隙密度为0.15和0.35时,500 kHz下的纵波速度分别下降了7.6%和27%;井孔模式波的衰减与速度相对对含气的敏感性更高,这为利用声波测井方法识别孔隙流体性质提供了思路。

关键词:声波测井; 岩石物理; 裂隙; 气层; 频散; 衰减

中图分类号:TE 19 **文献标志码:**A

Influence of crack on acoustic propagation characteristics in low porosity and low permeability gas reservoir

CHEN Xue-lian, QIAN Yu-ping, TANG Xiao-ming

(School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: Based on the unified elastic wave theory which describes the effect of both pores and cracks, the influence of crack strength on the acoustic velocity of cracked low-porous gas reservoir was studied. According to the compressional and shear wave velocity obtained by measuring the core samples, the estimation method of formation crack density was investigated. The results of numerical calculation show that the elastic wave velocities decrease with the crack density increasing, and the velocity dispersions become obvious. When the porosity is 1.1%, the compressional velocity of gas-saturated rock is lower than that of water-saturated rock. When the crack density is 0.15 and 0.35, the compressional velocity for 500 kHz decreases by 7.6% and 27% respectively. The attenuation of borehole mode waves is more sensitive to gas saturation than the velocity, which provides a new way of identifying pore-fluid nature by acoustic logging technology.

Key words: acoustic logging; petrophysics; crack; gas reservoir; dispersion; attenuation

目前,国内大多数气田都表现为低孔低渗储层,且有些储层发育有大量的裂隙,裂隙的存在对弹性波传播特征的影响是地球物理工作者研究的一个重要课题^[1-5]。杨文采等^[5]通过对大陆科学钻探主孔地质及地震反射资料的综合研究发现,结晶岩石的孔隙度仅为1%左右,其中微裂隙含气会引起地震波速与含水相比明显降低,但对速度降低的物理机制未展开研究。唐晓明^[1]针对孔、裂隙岩石提出了孔、裂隙介质弹性波动统一理论,该理论认为岩石中

存在大量的孔隙和裂隙时,由于裂隙的纵向与横向尺度的比值(纵横比)很小,与孔隙相比,裂隙更容易被挤压,裂隙中的流体在裂隙和孔隙之间产生挤喷流,这种挤喷流动使得弹性波产生明显的频散和衰减。陈雪莲等^[6]将孔、裂隙介质弹性波动统一理论应用到井孔声场的数值计算,尤其是在低孔低渗地层,裂隙的存在使得波速分布范围变大,声波速度和孔隙度之间的线性相关性也不再成立^[6-7],但未对含气岩石弹性波的传播特征展开研究。基于此,笔

者通过数值计算研究裂隙发育对低孔低渗含气地层井孔声场响应的影响。

1 孔、裂隙地层井孔声场的理论计算

在 (r, θ, z) 柱坐标中,井孔内声场势函数 φ_n 在频率域中的表达式如下:

$$\varphi_n(r, \theta, z, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(\omega) \frac{1}{n!} \left(\frac{Fr_0}{2} \right)^n [\varepsilon_n K_n(Fr) + A_n(k_z, \omega) I_n(Fr)] \cos n(\theta) e^{i(k_z z - \omega t)} dk_z. \quad (1)$$

其中 $n = 0$ 代表单极源, $n = 1$ 代表偶极源, F 为井孔内流体的径向波数, r_0 为声源离井轴的距离, k_z 为轴向波数, $n = 0$ 时 $\varepsilon_n = 1$, $n > 0$ 时 $\varepsilon_n = 2$,第一类 n 阶变型贝塞尔函数 I_n 代表由井壁向井轴会聚的波,第二类 n 阶变型贝塞尔函数 K_n 代表由声源向外发散的波, $B(\omega)$ 为声源频谱,在全波波形计算时选择瑞克子波的谱函数,单极和偶极的声源中心频率分别是8 kHz和3 kHz。井中的声场由振幅反射系数 A_n 确定,而 A_n 由井孔与地层的边界条件决定,井壁处流体与地层的径向位移和径向应力连续,井内流体压强与地层的压强相等^[8]。

在孔、裂隙并存介质的弹性波传播过程中,除了Biot理论中孔隙流体相对于骨架的整体流动,还包含狭小裂隙和孔隙之间的挤喷流,使得介质的体积模量 K 变为复数^[1]:

$$K = K_d + \alpha^2 / [\beta + S(\omega)]. \quad (2)$$

其中挤喷流效应的贡献可表示为

$$S(\omega) = \frac{8}{3} \pi \varepsilon \frac{(1 - \nu)}{\mu_0} f(\zeta) \left[\frac{1/K_d - 1/K_s}{1/K_d - 1/K_0} - f(\zeta) \right] / \left\{ 1 + \frac{4(1 - \nu)K_{pf}}{3\mu_0\gamma} [1 - f(\zeta)] \right\},$$

$$\zeta = \sqrt{\frac{3i\omega\eta}{\gamma^2 K_{pf}}}, f(\zeta) = \frac{2J_1(\zeta)}{\zeta J_0(\zeta)}.$$

式中, ω 为角频率; ε 为裂隙密度(单位体积内裂隙的条数,无量纲); γ 为裂隙纵横比; η 为流体的黏度; K_{pf} 为孔隙流体的体积模量; K_s 为固相材料的体积模量; ν 、 μ_0 和 K_0 为没有挤喷流($S(\omega) = 0$)时背景介质的泊松比、剪切模量和体积模量。 μ_0 和式(2)中的 K_d 是裂隙密度的函数,由Thomsen的Biot自治理论得到^[1], $J_n(n = 0, 1)$ 是第一类 n 阶贝塞尔函数。裂隙在三维空间是随机取向时,孔、裂隙并存介质的剪切模量可表示为

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_0} + \frac{4}{15} \left(\frac{1}{K} - \frac{1}{K_0} \right). \quad (3)$$

引入含气饱和度后,孔隙内流体的等效黏度、密

度和体积模量可表示为

$$\eta_f = \eta_w^{1-S_g} \eta_g^{S_g}, \quad (4)$$

$$\rho_f = (1 - S_g)\rho_w + S_g\rho_g, \quad (5)$$

$$\frac{1}{K_f} = \frac{(1 - S_g)}{K_w} + \frac{S_g}{K_g}. \quad (6)$$

式中, η_f 、 η_w 和 η_g 分别为流体、水和气体的黏度; ρ_f 、 ρ_w 和 ρ_g 分别为流体、水和气体的密度; K_f 为流体体积弹性模量; K_w 为液体(油或水)的体积弹性模量; K_g 为气体弹性模量; S_g 为含气饱和度。

模式波的衰减和相速度对含气饱和度的灵敏度为

$$C_s(Q^{-1}) = \left(\frac{S_g}{Q^{-1}} \right) \frac{\partial Q^{-1}}{\partial S_g}, C_s(v) = \left(\frac{S_g}{v} \right) \frac{\partial v}{\partial S_g}. \quad (7)$$

其中, C_s 为灵敏度系数(也称为分配系数,无量纲),灵敏度可以用来观察某参数在不同频率下对模式波的相速度(或衰减系数)的影响程度。

2 数值计算结果及其分析

2.1 裂隙发育对低孔低渗含气岩石弹性波速度的影响

在低孔低渗岩石中,裂隙的发育明显降低了岩石中的弹性波的速度^[1]。若岩石的孔、裂隙中为天然气体充溢,比如结晶岩,由于气体的活动性远大于液体,即使岩石的孔隙度仅为1%左右,裂隙发育的含气岩石的纵波速度也比饱含水时降低明显^[5]。图1为不同计算频率下孔隙度为1.1%时随着裂隙密度增加饱含水与饱含气时纵横波速度的变化曲线。计算时岩石基质的体积模量和剪切模量分别为37.9和32.6 GPa,密度为2650 kg/cm³,孔隙内水和气的体积模量分别为2.25和0.05 GPa,密度分别为1000和150 kg/cm³,黏度分别为1和0.022 mPa·s,静态渗透率为 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。在裂隙密度为0时,饱含水和饱含气岩石的纵横波速度完全一致,也即利用纵横波速度等信息识别低孔岩石的气层是不可行的。随着裂隙密度的增加,饱含气时的纵波速度明显低于饱含水的纵波速度,在裂隙密度分别为0.15和0.35时,图1(a)(相当于岩心尺度上的测量,500 kHz)中饱含气时的纵波速度比饱含水时的纵波速度分别下降了375和1164 m/s,即下降约7.6%和27%,图1(b)(声波测井使用频段,10 kHz)和图1(c)(地震频段,10 Hz)的纵波速度在裂隙密度为0.35时分别下降了25.6%和20%,也即岩石裂隙的发育在不同测量尺度上的声波响应均较明显,这很好地解释了杨文采等^[5]观测到的结晶岩中天然气

异常的地震响应。对比图1中3个频率下的纵波速度还可发现在没有裂隙发育时,3个频率下的纵横波速度几乎无差别;随着裂隙密度增加,3个频率下的速度差异越来越明显,即显示出明显的频散特

征。另外,从图1可见,在孔、裂隙统一理论中的横波速度主要受裂隙密度的影响,对孔和裂隙中的流体性质的敏感性较纵波速度弱。

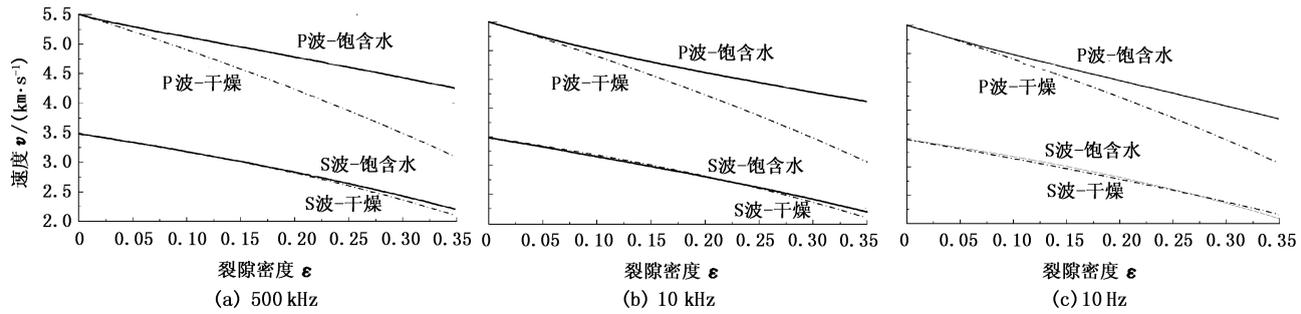


图1 饱含水 and 饱含气时的纵横波速度对比

Fig.1 Compressional and shear velocities of gas-saturation and water-saturation rock

研究孔隙流体性质及其含量的岩石物理学工具是 v_p/v_s 比与纵波慢度的交会图^[9]。这种交会图中数据交汇的趋向揭示了相应地层内碳氢化合物的影响及其含量。图2为不同裂隙密度、不同饱和度下纵横波速比和纵波慢度的交会图,孔隙度仍为1.1%,计算频率为10 kHz;图3为不含裂隙时不同孔隙度、不同饱和度下纵横波速比和纵波慢度的交会图(频率为10 kHz)。由图2可见,岩石中裂隙的发育使纵横波速比在含气岩石中明显降低,也即大大提高了对气层的识别能力。图3中孔隙度从0.01变到0.1时纵波慢度的变化量较小,且岩石中

隙中的流体性质。综合图2和图3可知,在低孔低渗地层的油气识别中孔隙度已不再是主控参数,裂隙的发育强度(也即裂隙密度)对油气的识别越来越重要,因此压裂技术在非常规油气藏,尤其是页岩气的开采中会变得很重要。

2.2 孔、裂隙含气地层的井孔声场响应

图4表示了低孔低渗地层有无裂隙时单极全波波形中的纵波随含气饱和度的变化。在裂隙发育地层(图4(a))中,含气饱和度从0变到10%时纵波速度减小明显,随着含气饱和度的继续增加速度稍有降低,幅度逐渐减弱;若地层中无裂隙存在,在含气饱和度从0变到70%时纵波的速度和幅度均基本不变(图4(b))。

从图5显示的单极全波波形中还可明显看出,含裂隙地层井孔中的斯通利波和伪瑞利波随含气饱和度的增加,其幅度和速度均逐渐减小;地层中若无裂隙发育时,斯通利波和伪瑞利波的幅度稍有减小,速度基本不变。可见地层中裂隙的存在也提高了井孔模式波对地层含气饱和度的灵敏度。

从图6中的井孔偶极声源激发的全波波形可以看出,地层中裂隙的存在对弯曲波的衰减,尤其是高频成分的弯曲波衰减较大,与无裂隙发育的地层相比,衰减程度更加明显;裂隙发育地层随其含气饱和度的增加,地层的横波波至基本未变,而在无裂隙发育地层,随着含气饱和度的增加,横波波至稍有提前。可见地层中裂隙的存在,使得低孔低渗地层中的声传播对含气饱和度的灵敏度增加、模式波的衰减比速度的灵敏度高,如何有效提取模式波的衰减用于储层参数的估算值得进一步研究,这将对低孔低渗地层的裂隙参数反演计算提供帮助。

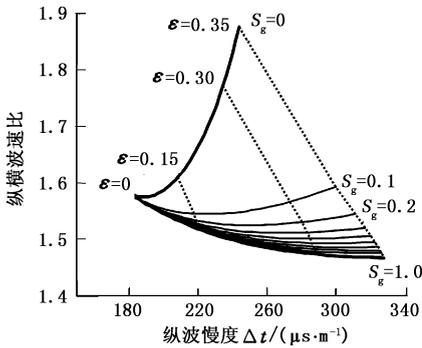


图2 不同裂隙密度下的交会图

Fig.2 Crossplot with different crack densities

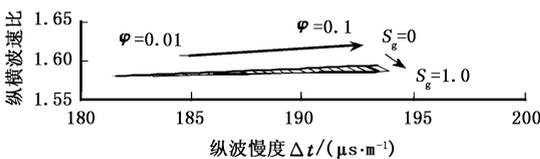


图3 不同孔隙度下的交会图

Fig.3 Crossplot with different porosities

含气饱和度的变化引起的纵横波速比的变化量也较小,因此对裂隙不发育的低孔隙地层较难识别其孔

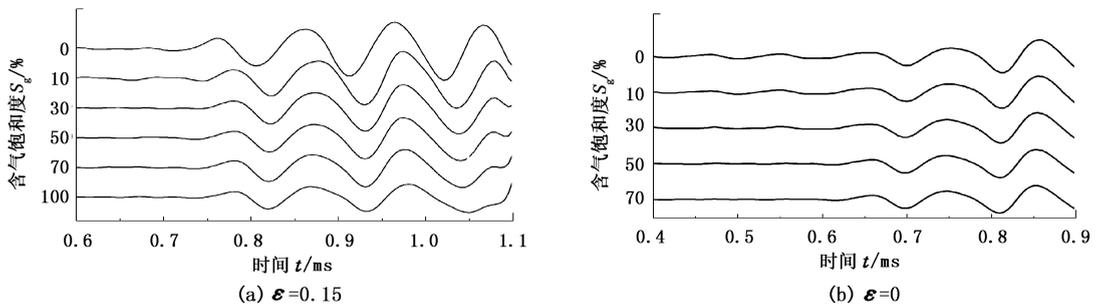


图 4 含裂隙和不含裂隙地层井孔单极激发的纵波波形

Fig. 4 Compressional wave waveforms generated by a monopole source in borehole of cracked-pore and porous formations

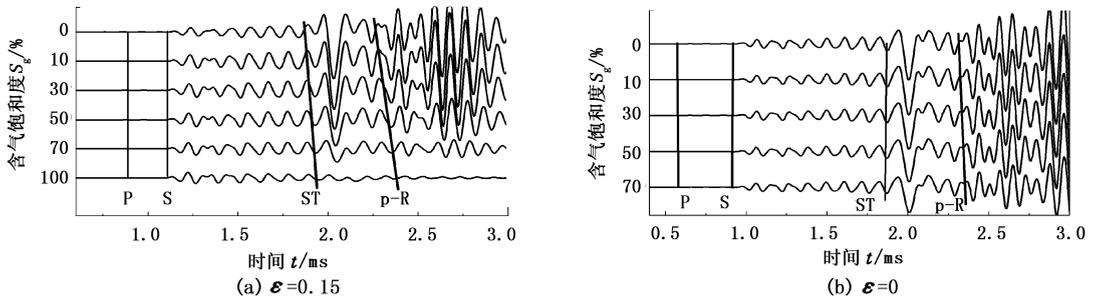


图 5 含裂隙和不含裂隙地层井孔单极激发的全波波形

Fig. 5 Full wave waveforms generated by a monopole source in borehole of cracked-pore and porous formations

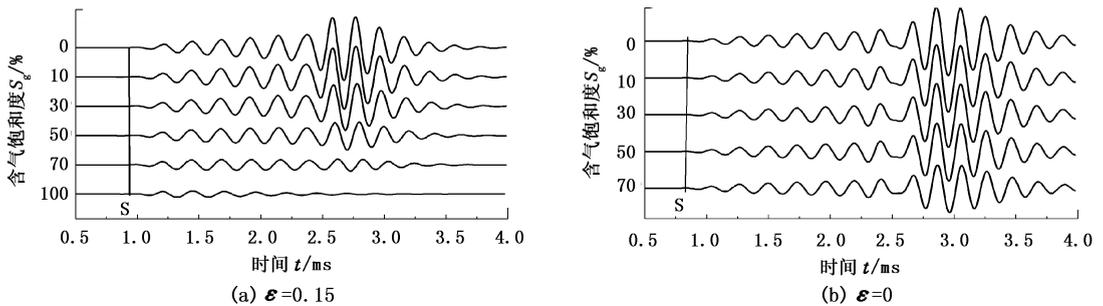


图 6 含裂隙和不含裂隙地层井孔偶极激发的全波波形

Fig. 6 Full wave waveforms generated by a dipole source in borehole of cracked-pore and porous formations

图 7(a) ~ (d) 表示了 3 种不同含气饱和度情况下,斯通利波和弯曲波的衰减和相速度对含气饱和度的灵敏度。由图可见模式波的衰减对低孔低渗气层的响应比较敏感,且地层中裂隙的发育明显增强了模式波对气层的灵敏度;斯通利波和弯曲波的相速度对气层的敏感性较衰弱,在裂隙发育地层,弯曲波的相速度在艾里相附近对含气饱和度的灵敏度明显较大。

3 利用岩心测得的纵横波速度估算裂隙密度

通过数值计算可知地层裂隙的存在使得声波测井对孔隙流体的敏感性增加,因此如何识别和估算地层中的裂隙显得尤为重要。现已知一组实际砾岩

干岩样岩心的孔隙度、纵波速度和横波速度,图 8 中砾岩的岩心照片及铸体薄片^[10]显示该组岩样裂隙发育丰富。从图 9 中岩样的纵横波速度与孔隙度的交会图可知,这组岩心的孔隙度较低,声速和孔隙度的相关性较差,声速的分布范围大,且有些岩心的声速很低。造成砾石这类致密岩石声速低的重要原因就是裂隙的存在。裂隙与孔隙的最大不同点是其纵横比很小,相对于孔隙而言,裂隙的空间十分狭扁,在外力作用下容易涨缩,将其中的流体挤压到与之相连的孔隙中,从而产生挤喷流。孔、裂隙之间的流体交换使得介质成为耗散系统,也使得驱动这一交换的波场产生较强的频散和衰减^[1]。Xu、Michael 也指出在碳酸盐岩地层里不同的孔隙类型(这里指纵横比不同)对速度的影响是不一样的,纵横比小

的孔隙使纵波速度减小得更快,而纵横比大的孔隙使纵波速度减小得要慢^[7],实际上,碳酸盐岩地层

中纵横比很小的孔隙就是裂隙。

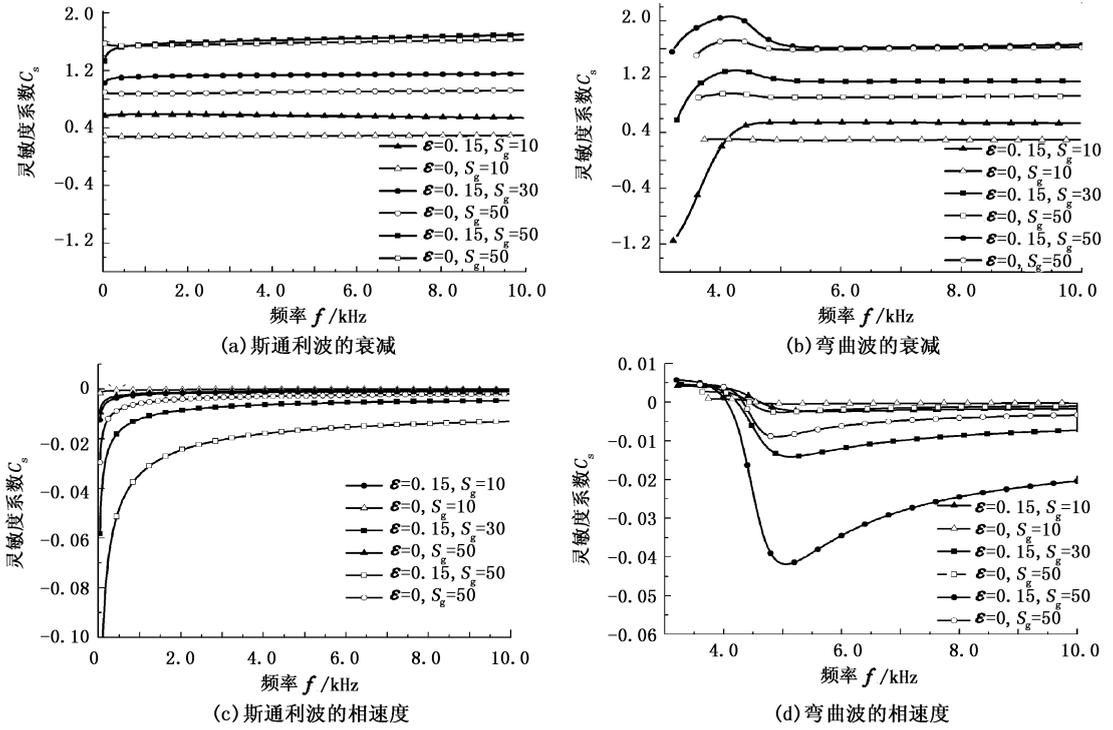


图7 斯通利波和弯曲波的相速度和衰减在不同含气饱和度基数下对含气饱和度的灵敏度

Fig.7 Sensitivity coefficients of phase velocity and attenuation of Stoneley and flexural wave with respect to different gas saturation

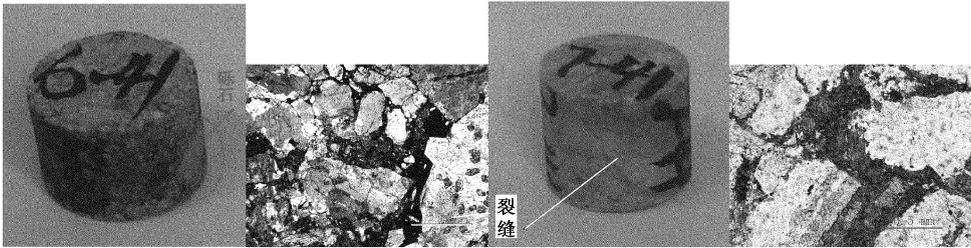


图8 岩心照片

Fig.8 Photos of core samples

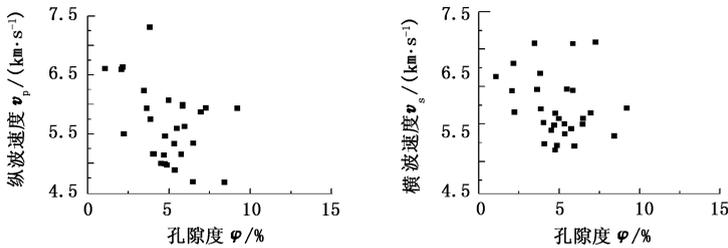


图9 实际干岩样岩心纵横波速度与孔隙度的关系

Fig.9 Relationship between porosity and P-wave, S-wave velocity data from actual dry rock core sample

采用含孔、裂隙介质弹性波动的统一理论^[1],在低孔低渗地层中引入挤喷流机制造成的声速的频散,计算得到某井段11块岩心的纵横波速比与纵波

速度的交会图(图10,3个孔隙度下的裂隙密度 ϵ 从0变化到0.3),固相的弹性参数和密度根据砾岩的组成设置(k_s, μ_s 和密度分别为78.6 GPa,32.5 GPa

和 2500 kg/m^3 (孔隙中饱含气体),随着裂隙密度增加,纵横波速比逐渐减小。通过实验室测量的岩心的纵横波速比和纵波慢度在交会图中的分布位置可以估算裂隙密度,由于图 10 中的纵横波速度是实验室测量的岩心速度,测量频率为 1 MHz ,超过了大部分裂隙挤喷流效应的响应频率^[1,6,11],因此图 10 未考虑裂隙纵横比的影响,固定为 0.01。

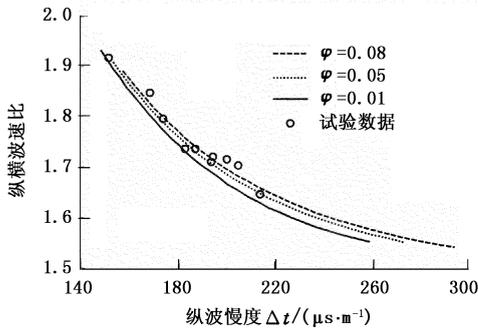


图 10 纵横波速比与纵波慢度交会图

Fig. 10 Crossplot of v_p/v_s versus compressional slowness

4 结 论

(1) 由于裂隙较孔隙相比更容易涨缩,产生挤喷流效应,因此低孔低渗地层中裂隙的发育使得纵横波速度明显降低。

(2) 裂隙发育致密岩石中,在孔隙度仅为 1.1% 时饱含气的纵波速度比饱含水时的纵波速度降低明显,使得纵横波速比较小,这一现象在地震、测井和实验室岩心测量上均已明显地观测到。

(3) 岩石中裂隙的存在使充液井孔中的斯通利波和弯曲波的衰减和速度对含气饱和度的灵敏度大大增加。

(4) 在岩心测量的纵横波速度与孔隙度的交会图中,根据速度的分布可初步判断岩石中是否有裂隙发育,通过测量的纵横波速度值还可以初步估算岩心的裂隙密度。

参考文献:

[1] 唐晓明. 含孔、裂隙介质弹性波动的统一理论-Biot 理论的推广[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2011, 41(6): 784-795.
TANG Xiao-ming. A unified theory for elastic wave propagation through porous media containing cracks: an exten-

sion of Biot's poroelastic wave theory [J]. Sci China Earth Sci, 2011, 41(6): 784-795.

- [2] DVORKIN J, NUR A. Dynamic poroelasticity: a unified model with the squirt and the Biot Mechanisms[J]. Geophysics, 1993, 58(4): 524-533.
- [3] ESHELBY J D. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems [J]. Proc Roy Soc of London, 1957, A241(1226): 376-396.
- [4] O'Connell R J, BUDIANSKY B. Seismic velocities in dry and saturated cracked solids[J]. J Geophys Res, 1974, 79(1): 4626-4627.
- [5] 杨文采, 金振民, 于常青. 结晶岩中天然气异常的地震响应[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(9): 1057-1067.
YANG Wen-cai, JIN Zhen-min, YU Chang-qing. Seismic response of gas abnormality in crystalline rock [J]. Sci China Earth Sci, 2008, 38(9): 1057-1067.
- [6] 陈雪莲, 唐晓明. 孔、裂隙并存地层中的声波测井理论及多极子声场特征[J]. 地球物理学报, 2012, 55(6): 2129-2140.
CHEN Xue-lian, TANG Xiao-ming. Numerical study on the characteristics of acoustic logging response in the fluid-filled borehole embedded in crack-porous medium [J]. Acta Geophys Sinica, 2012, 55(6): 2129-2140.
- [7] XU Shi-yu, MICHAEL A P. Modeling elastic properties in carbonate rocks [J]. The Leading Edge, 2009(1): 66-74.
- [8] 张海澜, 王秀明, 张碧星. 井孔中的声场和波[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [9] 唐晓明, 郑传汉. 定量测井声学[M]. 赵晓敏, 译. 北京: 石油工业出版社, 2004: 20-39.
- [10] 杨少春, 王惠娟, 罗海宁, 等. 胜利油区碎屑岩纳米尺度孔隙结构特征[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2012, 36(1): 8-12.
YANG Shao-chun, WANG Hui-juan, LUO Hai-ning, et al. Nanoscale pore structure characteristics of elastic rock in Shengli Oilfield [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(1): 8-12.
- [11] TANG Xiao-ming, CHEN Xue-lian, XU Xiao-kai. A cracked porous medium elastic wave theory and its application to interpreting acoustic data from tight formations [J]. Geophysics, 2012, 77(6): D245-D252.

(编辑 修荣荣)