

文章编号: 0253-2697(2008)01-0058-06

# 成岩作用和岩石结构对砂岩弹性速度的影响

马中高

(中国石化石油勘探开发研究院南京石油物探研究所 江苏南京 210014)

**摘要:**对济阳坳陷沙河街组  $E_{s3z}$  地层的 127 块砂、泥岩岩心样品进行了实验测试,利用速度—孔隙度关系,研究了成岩作用(胶结物)、岩石结构(分选性和黏土含量)对砂岩弹性速度的影响及其在速度—孔隙度关系中的变化形式。研究表明:速度—孔隙度关系的变化主要受成岩作用(钙胶结物)的影响,砂岩速度与胶结物含量具有明显的正相关性。岩石结构(分选性和黏土含量)控制了岩石速度和孔隙度的次一级变化。根据定性和定量分析,利用特定岩石物理参数的变化代表储层岩石沉积学特征,给出了胶结物、分选性和黏土含量对地震速度属性影响的理论岩石物理模型。

**关键词:** 成岩作用;胶结物;分选性;黏土含量;砂岩弹性速度;孔隙度;岩石物理模型

**中图分类号:** TE1.3      **文献标识码:** A

## Effects of diagenesis and rock texture on elastic velocity of sandstones

MA Zhonggao

(Geophysical Prospecting Institute, Sinopec Exploration and Production Research Institute, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** The 127 samples of sandstone and shale in the third member of Shahejie Formation in Jiyang Sag were measured to investigate the influence of sedimentation on the elastic properties of sandstone. The effects of diagenesis and rock texture on the elastic velocity of sandstones and its variation pattern in velocity-porosity plane were studied according to the velocity-porosity relationship. The result shows that variation of the elastic velocity with porosity of sandstone is mainly controlled by diagenesis. The elastic velocity of sandstone is positively correlated to cementation content in rock. The rock textures such as sorting property and clay content are the secondary factor affecting the velocity of sandstone. A theoretical model of rock physics was provided to simulate the effects of cementation, sorting property and clay content on seismic velocities based on the qualitative and quantitative analysis and using the change of special rock physical parameters representing the sedimentological properties of reservoir.

**Key words:** diagenesis; cement; sorting property; clay content; rock elastic velocity; porosity; rock physical model

岩石速度和波阻抗等弹性特征受岩石矿物组成、孔隙度、裂缝、成岩作用、孔隙流体压力、温度、流体类型及饱和度、密度等诸多因素的影响,这些因素概括起来可分为 3 类,即岩石自身特性、岩石所处的环境特性及孔隙流体特性<sup>[1]</sup>,这些因素之间常常具有一定的内在关联性。当一个因素发生变化时,其他因素也会同时发生变化,这些变化会对岩石速度产生正面或负面的影响。目前已经提出了许多有关多孔介质地震波传播的理论模式<sup>[2-4]</sup>,但仍然缺乏一种能够解释各种实验现象的理论。因此,在岩石物理信息应用于地震解释时,需要进行单一参数变化影响的研究。

Miner 认为<sup>[5]</sup>悬浮在砂岩孔隙中的黏土对岩石速度只有很小的影响,而结构和薄层黏土却可引起速

度的明显下降。Tosaya 等根据砂岩、粉砂岩和页岩岩样的实验与观测分析,提出只有黏土的总含量才对用纵波速度估计孔隙度有意义<sup>[6]</sup>。Han, Klimentos, Vernik 等讨论了黏土含量对岩石弹性属性的影响,指出黏土含量的差异是造成实验数据点弥散的主要原因<sup>[7-9]</sup>。Sams 讨论了黏土分布对砂岩弹性特征的影响<sup>[10]</sup>。Jizba 研究了岩石孔隙胶结物对砂岩弹性特征的影响<sup>[11]</sup>。Marion, Bryant 等, Vernik 和 Gutierrez 研究了岩性及岩石结构(分选性)对弹性波速度与孔隙度关系的影响<sup>[12-15]</sup>。Dvorkin 等利用实验结果归纳出岩石孔隙胶结物含量与岩石弹性波速度间的定量数学表达式<sup>[16]</sup>。赵群研究了胶结作用和黏土含量对砂岩速度的影响<sup>[17]</sup>,耿斌等分析了成岩作用对岩石结构及

基金项目:中国石油化工集团公司“九五”重点科技攻关项目(P01062)资助。

作者简介:马中高,男,1964年1月生,1985年毕业于成都地质学院物探系,现为中国石化南京石油物探研究所教授级高级工程师,成都理工大学博士研究生,主要从事岩石物理研究。E-mail: njmzg@163.com

速度—孔隙度的控制和影响<sup>[18]</sup>。

笔者主要对济阳拗陷下第三系沙河街组第 3 段 (E<sub>3s3</sub>) 砂、泥岩岩心样品的超声波实验结果进行分析,研究砂岩中的胶结物、颗粒分选性和黏土含量对砂岩速度的影响。

## 1 岩样测试

实验研究的岩样来自济阳拗陷下第三系地层,选择具有代表性砂岩和泥岩样品 127 块。通过微观薄片分析和粒度分析得到样品的岩石结构参数。

岩心标本加工成圆柱体,直径 25 mm,长度 30~50 mm。岩心样品的速度采用脉冲透射方法进行测量。主要通过控制围压、孔隙压力和温度来模拟不同温度和压力条件下的状态,分别测试岩样的纵波和横波速度。

## 2 成岩作用对岩石弹性速度的影响

### 2.1 机械压实与化学压实作用

#### 2.1.1 机械压实作用

在地层埋深过程中,沉积物的弹性特征会因成岩作用方式的改变而发生变化。在沉积物埋深的早期阶段,成岩作用主要表现为机械压实所引起的沉积物颗粒堆积方式改变及部分颗粒的塑性变形,软组分挤入孔隙,这个过程中成岩作用表现为沉积物的孔隙度和渗透率迅速降低。随着埋藏深度的增加,各种胶结作用的出现使岩石具有一定的抗压性。此时机械压实作用对储层物性的影响逐渐减弱,取而代之是各种胶结作用。成岩作用研究表明,该区下第三系地层已经历了早成岩期,目前主要处于晚成岩期,影响砂岩储层物性和弹性特征的主要因素是胶结作用。

#### 2.1.2 化学压实作用(胶结作用)

对地层物性尤其是岩石的弹性速度影响明显。根据岩石样品的显微照片分析,研究区砂、泥岩的胶结作用主要表现为 3 种类型。

(1) 硅质胶结:对于富石英碎屑岩地层,随地层埋藏深度进一步增加,一般伴随着黏土矿物的相转化和石英溶解,石英次生加大胶结较为普遍。硅质胶结会使地层砂、泥岩孔隙度进一步减小。从所研究岩心看,硅质胶结对砂、泥岩物性和岩石速度的改变并不占主导地位。硅质胶结作用深度与机械压实作用深度通常会有一定程度的重叠。

(2) 碳酸盐胶结:所研究样品主要表现为成岩后期的方解石、白云石胶结。碳酸盐胶结对砂泥岩物性及岩石速度的影响占主导地位,主要表现为随胶结物含量的增加孔隙度减小,弱固结岩石(无胶结物)到固

结岩石(胶结)的纵、横波速度等弹性特征发生突变(图 1)。

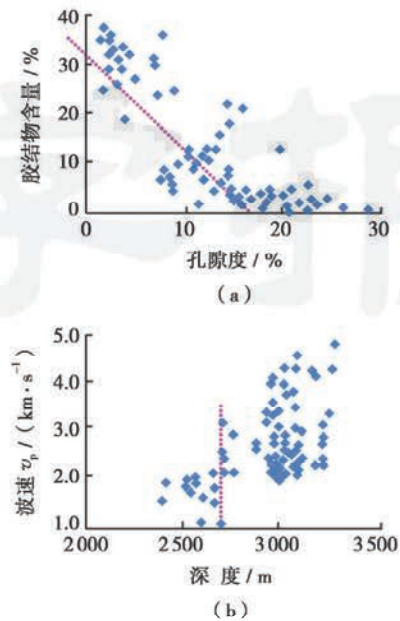


图 1 胶结物含量对 E<sub>3s3</sub> 砂岩孔隙度和波速的影响

Fig. 1 The effect of cement content on porosity and velocity of E<sub>3s3</sub> sandstone samples

(3) 黏土矿物胶结:表现为高岭石、伊利石、绿泥石等黏土矿物胶结。

### 2.2 胶结理论模型的应用

随着岩石埋深的增加,化学压实作用使组成岩石的矿物颗粒之间被石英、方解石、黏土等矿物所胶结,胶结物起到了“焊接”颗粒的作用,因此会明显增加岩石的刚度。由胶结物所胶结的两种刚性颗粒组成的砂岩模量 ( $K, \mu$ ) 和速度 ( $v_p, v_s$ ) 可以用胶结物理论模型<sup>[16,19]</sup>进行计算,即

$$\begin{cases} K = \frac{1}{6} C (1 - \phi_0) M_c \hat{S}_n \\ \mu = \frac{3}{5} K + \frac{3}{20} C (1 - \phi_0) \mu_c \hat{S}_\tau \\ \begin{cases} v_p = \{ [K + (4/3)\mu] / \rho \}^{1/2} \\ v_s = (\mu / \rho)^{1/2} \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} v_p = \{ [K + (4/3)\mu] / \rho \}^{1/2} \\ v_s = (\mu / \rho)^{1/2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\phi_0$  为砂岩的临界孔隙度; $C$  为颗粒的平均接触数; $K$  和  $\mu$  分别为岩石体积模量和剪切模量; $M_c$  和  $\mu_c$  分别为胶结物体积模量和剪切模量<sup>[16]</sup>; $\rho$  为砂岩密度; $v_p$  和  $v_s$  为岩石  $P$  波和  $S$  波速度; $\hat{S}_n$  和  $\hat{S}_\tau$  分别为两个胶结颗粒组合的正向和切向刚度<sup>[16]</sup>。

根据镜下观察结果,岩石样品中胶结物的含量明显与深度呈正相关关系。同时研究区的储层均为陆相沉积地层,储层孔隙的横向变化主要受沉积时的水动力条件控制,即在横向上孔隙度的变化一般是由

岩石颗粒大小及分选性的差异造成的。基于上述情况,将接触-胶结模型与未固结理论模型综合使用。

### 2.3 实验结果分析

图2是干燥条件下  $E_{s3z}$  砂岩样品实验测量的孔隙度-速度交汇图,图中孔隙度-速度变化理论曲线分别是利用 Hertz-Mindlin 模型及 MHS 模型计算的未固结线、钙质及泥质胶结时的接触-胶结模型曲线。从图中可以看出,实验数据被理论曲线分成低孔隙度及较高的速度区(I区)、中等孔隙度及相对较低速度区(II区)和较高的孔隙度及相对最低速度区(III区)3个不同的区域。从各区岩石样品典型偏光显微照片看,I区样品的矿物颗粒完全被后期方解石胶结,孔隙空间几乎完全被方解石胶结物占据;II区样品的矿物颗粒仅部分被方解石所胶结;III区样品的矿物颗粒几乎未被后期方解石胶结,孔隙度也相对较高。

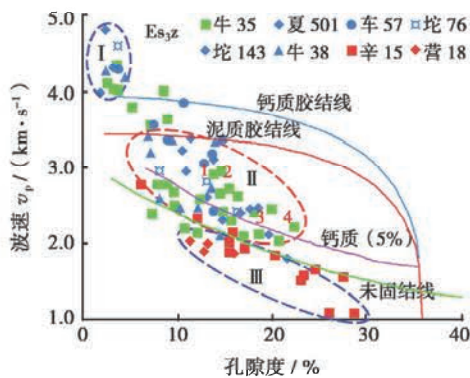


图2 干燥条件下  $E_{s3z}$  砂岩孔隙度-速度交汇图  
Fig. 2 The relation of porosity and wave velocity for  $E_{s3z}$  sandstone in dry condition

从图3可见,纵波速度( $v_p$ )与胶结物含量表现出明显的正相关性,速度及孔隙度按胶结物含量呈现出明显的分区性,说明胶结物的含量控制了砂岩样品速

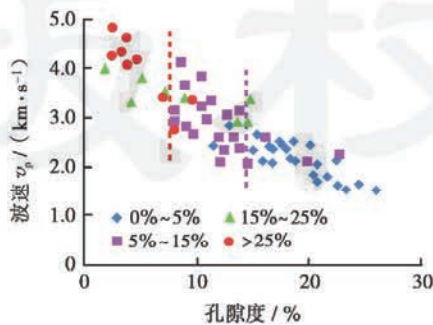


图3  $E_{s3z}$  砂岩速度与孔隙度及胶结物含量的关系  
Fig. 3 Variations of velocity with porosity and cement content for  $E_{s3z}$  sandstones

度在孔隙度-速度交汇图中的位置。如果胶结物含量的差异代表岩石化学压实作用的差异,利用孔隙度-速度交汇图可以区分岩石成岩作用的差异。但是,图3中速度或孔隙度与胶结物的含量并不是一一对应,说明胶结物含量并不是影响速度-孔隙度变化的唯一因素。

## 3 分选性对岩石速度的影响

在速度-孔隙度交汇图中,成岩压实作用(钙胶结物)引起 I区和 II区速度相对变化为 39%,是砂岩速度呈现分区性的主要原因,但不是惟一因素。II区内主要为牛 35 井样品,深度变化不大(40 m),胶结物含量约为 5%,成岩压实作用影响很小。III区为辛 15 井、营 18 井及部分牛 35 井样品,主要表现为矿物颗粒几乎未被后期方解石胶结。因此,成岩作用(胶结物)不是造成各区内速度、孔隙度发生变化的主要原因。

### 3.1 颗粒粒径分布对岩石速度的影响

图4为 II区内牛 35 井 4 块样品的显微照片,样品孔隙度从 1 号到 4 号逐渐增大。从图 4 中看出,1 号和 2 号样品中组成岩石骨架的主要矿物(石英、长石)粒径相差很大,整体分选性很差;3 号和 4 号样品显微照片表现出较为均一的矿物颗粒分布,分选性也相对较好,这被样品的颗粒粒径分析所证明。根据上述分析,组成岩石矿物颗粒粒径的差异和结构差异明显影响岩石的孔隙度和速度。总体上,在胶结物含量一定时,颗粒越均匀,孔隙度则越高,速度相应越小。

### 3.2 分选系数及其对岩石速度的影响

对于分选性,用变化系数  $S$  作为分选程度的指示因子<sup>[20]</sup>,其表达式为

$$S = \sigma / E \quad (3)$$

式中: $E$ 为颗粒粒径的平均值; $\sigma$ 为颗粒粒径的标准差。

系数  $S$  值越大,岩石的分选性越差; $S$  值越小,分选性越好。利用分选系数  $S$  可以进一步分析岩石结构(分选性)与岩石弹性速度及岩石物性之间的相互关系。图 5(a)是 II区内牛 35 井样品孔隙度与分选性关系,二者表现出明显的相关性:分选性变差,孔隙度降低。这说明在砂岩中的胶结物含量一定时,组成岩石颗粒的分选性是决定孔隙度大小的重要因素,也应该看到分选性变化对孔隙度的改变作用是有限的。牛 35 井样品的分选性变化引起的孔隙度变化小于 10%。砂岩速度与相应样品的分选性在整体上表现出一定的相关性[图 5(b)],随岩石样品分选性变差,速度逐渐增加,但实验的数据点仍较离散,这可能是由于样品胶结物含量存在一定的差异。对 III区的样品分析得到了相同的结论。

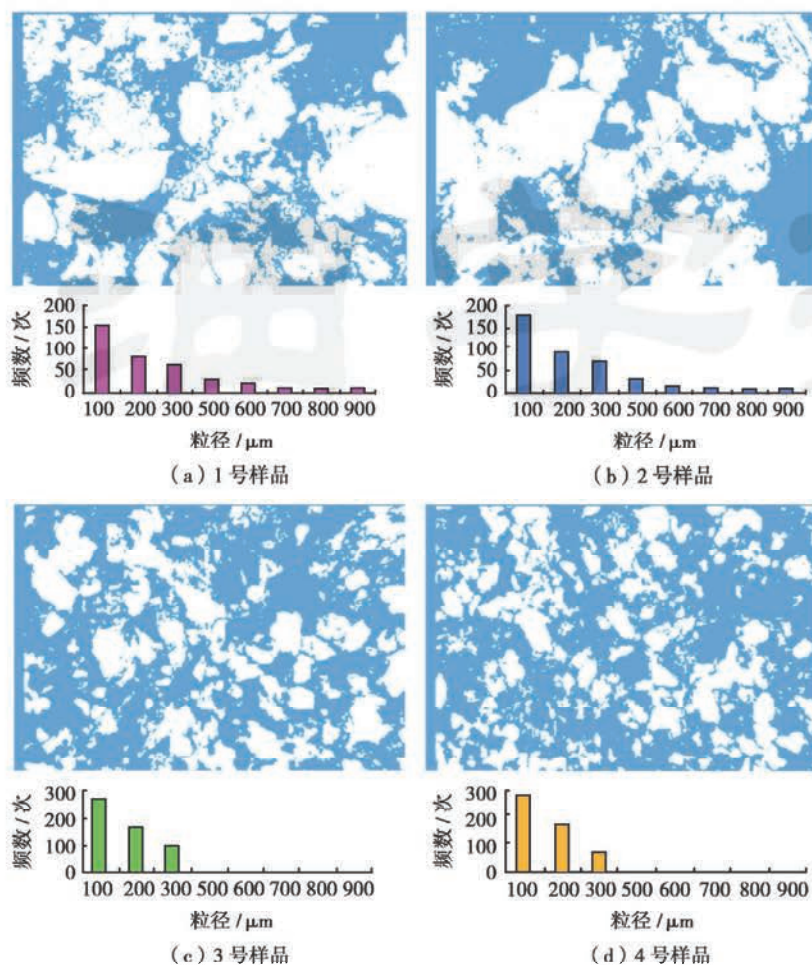


图 4 牛 35 井 4 种不同孔隙度样品显微照片及粒度分布

Fig. 4 Photomicrograph of sandstones and histogram of particle sizes for sandstones with different porosities from Well Niu 35

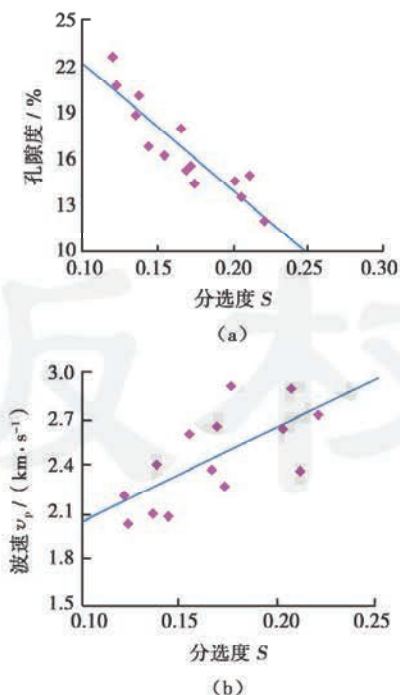


图 5 牛 35 井样品分选性与孔隙度和速度相关关系  
Fig. 5 The relation of sorting coefficient with porosity and velocity in Well Niu 35

## 4 黏土含量对岩石速度的影响

从纯砂岩、泥质砂岩、砂质泥岩到纯页岩(泥岩),其黏土含量逐渐增加,而石英质矿物逐渐减少,同时它们也是构成陆相碎屑岩沉积盆地最主要的一组岩石类型。一些研究结果已经证明黏土是造成砂岩实验结果在速度—孔隙度交汇图中出现离散的重要原因,并利用实验结果给出了地震波速度与孔隙度及黏土含量之间的经验关系<sup>[7-9,18]</sup>。黏土对碎屑岩类岩石物性及岩石弹性特征的影响不仅与黏土的含量还与黏土在岩石中的位置有关,因此根据黏土在岩石中富存的具体形式建立了相应的理论计算模型。

### 4.1 泥质含量对岩石速度的影响

#### 4.1.1 孔隙充填黏土模型

理想的砂-泥岩演化模型<sup>[16]</sup>分别用粒径相差很大的球体代表石英颗粒和黏土矿物颗粒,一端为组分,即纯砂岩的临界孔隙度为  $\phi_c$ ;另一端为组分,即页岩的临界孔隙度为  $\phi_m$ 。在砂岩-泥质砂岩变化过程中,黏土严格充填在由石英颗粒所构成的骨架孔隙中,所加载

外力完全由石英颗粒所承载。此时岩石的孔隙度  $\phi$  依赖于纯砂岩(石英)的孔隙度  $\phi_s$ 、黏土的体积含量  $C$  和黏土的微孔隙  $\phi_m$ 。

当  $C$  小于  $\phi_s$  时,黏土作为孔隙的组成部分,可以用 Gassmann 公式<sup>[2]</sup>计算出岩石速度,即

$$\begin{cases} \frac{K}{K_s - K} = \frac{K_b}{K_s \cdot K_b} + \frac{K_f}{\phi_s (K_s - K_f)} \\ \mu = \mu_b \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $K_b$ 、 $K_f$  和  $K_s$  分别是骨架、孔隙流体和组成骨架的矿物的体积模量,  $\mu_b$  是骨架的剪切模量。

当  $C$  大于  $\phi_s$  时,砂(石英)颗粒被黏土包围而不接触,这时可用 Reuss 平均模型计算模量,即

$$\begin{aligned} \frac{1}{K} &= \frac{C}{K_c} + \frac{1-C}{K_s} \\ \frac{1}{\mu} &= \frac{C}{\mu_c} + \frac{1-C}{\mu_s} \end{aligned} \quad (5)$$

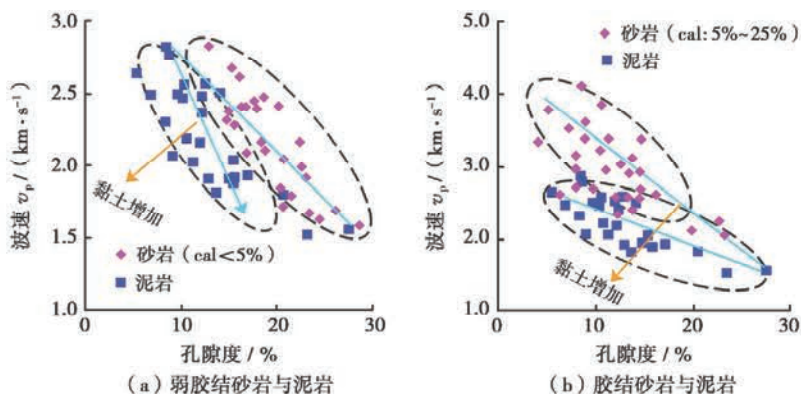


图6 济阳坳陷  $E_{s3z}$  地层砂、泥岩速度—孔隙度关系

Fig. 6 The relation of velocity with porosity for sands and shales of  $E_{s3z}$  formation in Jiyang Sag

倒塌“V”型。

#### 4.2 泥质砂岩速度、孔隙度和泥质含量的关系

Han 对不同模型的泥质砂岩速度与孔隙度、黏土含量关系的拟合情况的对比结果表明<sup>[8]</sup>,对中等孔隙度和泥质含量的泥质砂岩,最佳拟合是线性模型。对济阳坳陷下第三系地层泥质砂岩在储层条件下的实验数据采用线性模型进行拟合,得出以下关系式:

$$v_p = 5.85 - 9.5\phi - 2.5C \quad (R^2 = 0.892) \quad (6)$$

$$v_s = 3.55 - 6.18\phi - 1.8C \quad (R^2 = 0.875) \quad (7)$$

### 5 胶结作用、分选性和黏土作用的速度—孔隙度变化趋势

通过对胶结物、分选性和泥质含量的定量和定性分析,得到岩石特性(胶结物、结构变化、泥质含量)对岩石速度与孔隙度关系的变化趋势(图7),称之为广义砂岩模型,即胶结、分选性和黏土作用的速度—孔隙度变化趋势。

式中:  $K_c$ 、 $\mu_c$  和  $K_s$ 、 $\mu_s$  分别是黏土和砂(石英)颗粒的体积模量与剪切模量。

#### 4.1.2 层状黏土模型

层状黏土模型表示为石英颗粒和黏土矿物颗粒分别单独充填在不同的区域,此时用 Reuss 平均模型计算模量,即公式(4)。

利用体积模量、剪切模量和密度就可以计算出速度  $v_p$  和  $v_s$ 。

图6中箭头方向代表黏土含量增加方向,在胶结物含量较小时,砂岩和泥岩并无明显的速度差异。随胶结物含量的增加,速度差异明显增大。在胶结物含量较小时,纯砂岩—泥质砂岩—砂质泥岩—纯页岩的速度—孔隙度变化趋势呈一个开角较小的倒“V”型,与理论分析结果一致。在砂岩含有一定量的胶结物后,砂岩系列和泥岩系列会表现出明显的速度差异,呈

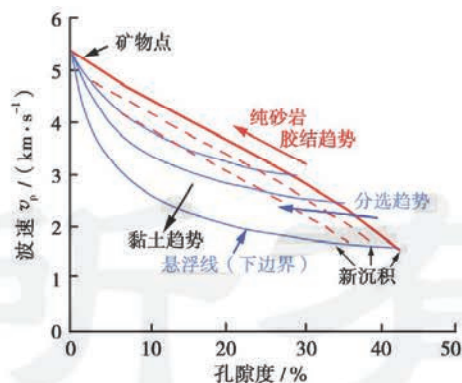


图7 胶结作用、分选性和黏土作用的速度—孔隙度变化趋势

Fig. 7 The effects of cementation, sorting and clay content on velocity and porosity

## 6 结论

(1) 速度—孔隙度关系的变化主要受成岩作用(胶结物含量)控制,岩石速度与胶结物含量表现出明

显的正相关性,胶结物含量控制了砂岩样品速度在孔隙度—速度交汇图中的位置。

(2) 岩石胶结物一定时,岩石结构是影响岩石速度的主要因素。组成岩石矿物颗粒的分选性变差,岩石速度增加。

(3) 在胶结物含量较小时,砂岩、泥岩速度差异很小,其速度—孔隙度变化趋势呈一个开角较小的倒“V”型;在砂岩含有一定量的胶结物后,砂岩系列和泥岩系列会表现出明显的速度差异,呈倒塌的“V”型。

(4) 根据定性和定量分析,利用特定岩石物理参数的变化代表储层岩石沉积学特征,给出了成岩作用、岩石结构对地震属性影响的理论岩石物理模型。

### 参 考 文 献

- [1] Wang Z. Fundamental of seismic rock physics[J]. *Geophysics*, 2001, 66(2): 398-412.
- [2] Gassmann F. Elastic waves through a packing of spheres[J]. *Geophysics*, 1951, 16(4): 673-685.
- [3] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, 28(2): 168-191.
- [4] Kuster G T, Toksoz M N. Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media[J]. *Geophysics*, 1974, 39(5): 587-618.
- [5] Minear J W. Clay models and acoustic velocities[R]. SPE 11031, 1982: 85-92.
- [6] Tosaya C, Nur A. Effects of diagenesis and clays on compressional velocities in rocks[J]. *Geophysical Research Letter*, 1982, 9(1): 5-8.
- [7] Han D H, Nur A, Morgan D. Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones[J]. *Geophysics*, 1986, 51(11): 2093-2107.
- [8] Klimentos T. The effects of porosity-permeability-clay content on the velocity of compressional waves[J]. *Geophysics*, 1991, 56(12): 1930-1939.
- [9] Vernik L, Nur A. Petrophysical classification of siliciclastics for lithology and porosity prediction from seismic velocities[J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76(9): 1295-1309.
- [10] Sams M S, Andrea M. The effect of clay distribution on the elastic properties of sandstones[J]. *Geophysical prospecting*, 2001, 49(1): 128-150.
- [11] Jizba D. Mechanical and acoustical properties of sandstones and shales[D]. California: Stanford University, 1991.
- [12] Marion D, Nur A, Yin H, et al. Compressional velocity and porosity in sand-clay mixtures[J]. *Geophysics*, 1992, 57(4): 554-563.
- [13] Bryant S, Raikes S. Prediction of elastic-wave velocities in sandstones using structural models[J]. *Geophysics*, 1995, 60(2): 437-446.
- [14] Vernik L. Predicting lithology and transport properties from acoustic velocities based on petrophysical classification of siliciclastics[J]. *Geophysics*, 1994, 59(3): 420-427.
- [15] Gutierrez M A, Dvorkin J, Nur A. Textural sorting effect on elastic velocities, Part I: Laboratory observation, rock physics models and application to field data[C]. Expanded Abstracts of 71<sup>th</sup> Annual Internat, SEG, San Antonio, 2001: 1764-1767.
- [16] Dvorkin J, Nur A. Elasticity of high-porosity sandstones: Theory for two North Sea data sets[J]. *Geophysics*, 1996, 61(5): 1363-1370.
- [17] 赵群. 疏松砂岩储层物性参数敏感性物理模拟实验[J]. *石油学报*, 2006, 27(4): 93-96.  
Zhao Qun. Physical modeling experiment on sensitivity of physical parameters of loose sandstone reservoir[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(4): 93-96.
- [18] 耿斌, 才巨宏. 一种考虑成岩作用的砂岩孔隙度解释方法[J]. *石油学报*, 2004, 25(5): 44-47.  
Geng Bin, Cai Juhong. An interpretation method for sandstone porosity based on diagenesis effect[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(5): 44-47.
- [19] Dvorkin J, Nur A, Yin H. Effective properties of cemented granular materials[J]. *Mechanics of Materials*, 1994, 18(5): 351-366.
- [20] Sohn H Y, Moreland C. The effect of particle size distribution on packing density[J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1968, 46(3): 162-167.

(收稿日期 2007-01-08 改回日期 2007-08-03 编辑 张 怡)

## “全国第五届油气层序地层学大会”成功召开

2007年11月13日~19日,在广州隆重召开了“全国第五次油气层序地层学大会”。本次会议旨在总结层序地层学的最新进展,交流各自研究成果,展望和研讨今后我国层序地层学的前景与发展对策。

本次会议由中国石油学会石油地质专业委员会沉积储层学组主办,中海油深圳分公司和海洋石油学会承办,并得到中国石油勘探开发研究院、中国石油天然气集团公司油气储层重点实验室、国土资源部青岛海洋地质研究所、中国石油大学(北京)、西安石油大学、长安大学、长江大学等单位的支持和帮助。

会议筹备期间,共收到来自科研单位、高等院校和三大石油公司油田一线的会议论文摘要60篇,内容包括层序地层学研究的理论、方法和实用技术,层序地层学在油气勘探开发中的应用实例,油气勘探开发的沉积储层研究等方面,多数论文有较强的理论性和实践性,为这次会议的成功召开打下了基础。

本次会议进行了大会报告,并邀请专家发言。会议期间对科技论文进行了评审,选出优秀论文20篇,并授予优秀论文证书,以鼓励科技人员发奋努力、钻研技术,在层序地层学领域有所创新。

(吴因业 供稿)