

文章编号: 0253-9985(2009)03-0294-06

渤海湾盆地东营凹陷砂岩储层地震特征及对岩石结构的指示

邓继新¹, 王尚旭², 伍向阳³

(1 成都理工大学 信息工程学院, 四川 成都 610059 2 中国石油大学 CNPC 物探重点实验室, 北京 102249

3 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要: 系统选取渤海湾盆地东营凹陷古近系各层段砂岩样品 250 块 (以沙河街组为主), 并在模拟储层条件下利用脉冲穿透法测试样品的纵、横波速度, 在此基础上给出储层条件下速度-孔隙度、速度-密度等的统计岩石物理模型。样品在纵波速度-泊松比交汇图中呈现出两种主要变化趋势, 分别对应泥质与钙质胶结物的影响。在每个变化趋势中, 随泥质含量与钙质胶结物含量的增加, 岩石结构从颗粒支撑逐渐表现为基质支撑, 弹性波能量的传播也从通过颗粒接触边界转变为通过岩石基质传播。这是使砂岩样品测试结果表现出两种截然不同变化趋势的主要原因, 为利用岩石物理特性从地震资料中提取岩石结构、沉积与成岩特征的信息提供了依据。

关键词: 地震弹性属性; 岩石结构; 砂岩储层; 古近系; 东营凹陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE122.2 文献标识码: A

Seismic properties of reservoir sandstones and their implication to rock texture in the Dongying Sag, the Bohai Bay Basin

Deng Jixin¹, Wang Shangxu², Wu Xiangyang³

(1 College of Information Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2 CNPC Key Laboratory of Geophysical Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract A total of 250 sandstone samples were selected from various sections of the Paleogene (dominated by the Shahejie Formation) in the Dongying Sag of the Bohai Bay Basin to measure their compressional and shear wave velocities by pulse transmission techniques under simulated reservoir conditions. Statistic petrophysical models under reservoir conditions, such as velocity versus porosity and velocity versus density, were built based on the measured data. On the cross plot of P-wave velocity vs. Poisson's ratio, the samples show two major trends, which reflect the effects of shale content and calcareous cement content on the elastic properties of sandstone samples respectively. For each trend, the rock texture changes gradually from grain-supporting to matrix-supporting with the increase of shale content and calcareous cement content, and thus the propagation of elastic wave also changes from via grain-to-grain contacts to via rock matrix. These are the main reasons for the two entirely different trends of the sandstone samples. The results provide a basis for extracting information about rock texture, sedimentary and diagenetic features by using the petrophysical properties of reservoir sandstones.

Key words seismic elastic attributes; rock texture; sandstone reservoir; Paleogene; Dongying Sag; Bohai Bay Basin

收稿日期: 2008-11-30。

第一作者简介: 邓继新 (1974-), 男, 博士, 副教授, 地球物理。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40804025); 中国石油化工股份有限公司科技发展部重点项目 (P01062)。

东营凹陷位于渤海湾盆地东部, 属于济阳坳陷中的一个次级构造单元, 凹陷内古近系地层沉积厚度超过 5 000 m, 主要由湖相成因的砂岩和泥岩组成, 是济阳坳陷中重要的含油气凹陷之一^[1]。在经历 40 余年的油气勘探之后, 对凹陷内沉积体系、成岩历史及成岩系列的研究取得了一批重要成果^[1~5]。但陆相断陷盆地特有的复杂性决定了储层形成、分布的多样性以及储层物性变化的复杂性, 导致对储层准确的地震预测与评价具有较大的难度。从地震资料提取的各种地震弹性属性作为储层预测和评价的依据已经在油气藏勘探开发过程中得到广泛使用^[6~9]。这些由地震数据经过数学变换而导出的有关地震波传播特性的数据体具有一定的多解性, 对于沉积特征在纵向及横向上均有明显变化的陆相碎屑岩体系而言, 这种多解性就更为明显, 克服这种多解性必须对所得到的地震属性进行一定的地质约束, 建立地震属性与储层岩石的沉积学特征、孔隙流体及环境条件之间的对应关系。利用胜利油田主要目的层段的岩石物理测试结果, 并结合岩石物理相关理论, 对东营凹陷储层砂岩建立岩石成岩、沉积学特征(成岩作用、岩石结构等)与其地震弹性响应之间的关系, 从而为储层识别提供依据。

1 砂岩成岩作用及成岩相特征

对东营凹陷沙河街组碎屑岩储层有重要影响

的成岩作用主要有 3 种, 分别为压实、胶结和溶蚀作用^[1]。

1.1 压实作用

东营凹陷储层砂岩的压实作用以机械压实为主。表现为塑性颗粒如云母、岩屑的塑性变形, 颗粒间接触关系随压实作用的增强出现点—线—凹凸—缝合线接触的变化方式, 其终极结果是使颗粒接触点发生压溶作用(图 1a)。

1.2 胶结作用

根据胶结物成分的不同, 储层砂岩的胶结物类型可分为 3 类: 硅质胶结、碳酸盐胶结和粘土矿物胶结。

储层砂岩硅质胶结的普遍形式是石英的次生加大, 在镜下呈自形晶面或相互交错连接的镶嵌构造(图 1b)。在发生石英次生加大的同时, 因碎屑颗粒中斜长石的含量较高, 使长石伴有强烈溶蚀现象。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, 对于东营凹陷, 在 1 000 m 左右的深度就出现弱的石英次生加大现象。

碳酸盐胶结物可分为方解石、白云石和铁方解石、铁白云石。前者形成于早成岩阶段, 呈晶形较好的状态充填于颗粒之间或颗粒接触处, 有时也充填于长石的裂隙中(图 1c); 后者形成于晚成岩阶段, 铁白云石自形程度较差, 晶体较细, 主要为孔隙充填(图 1d)。

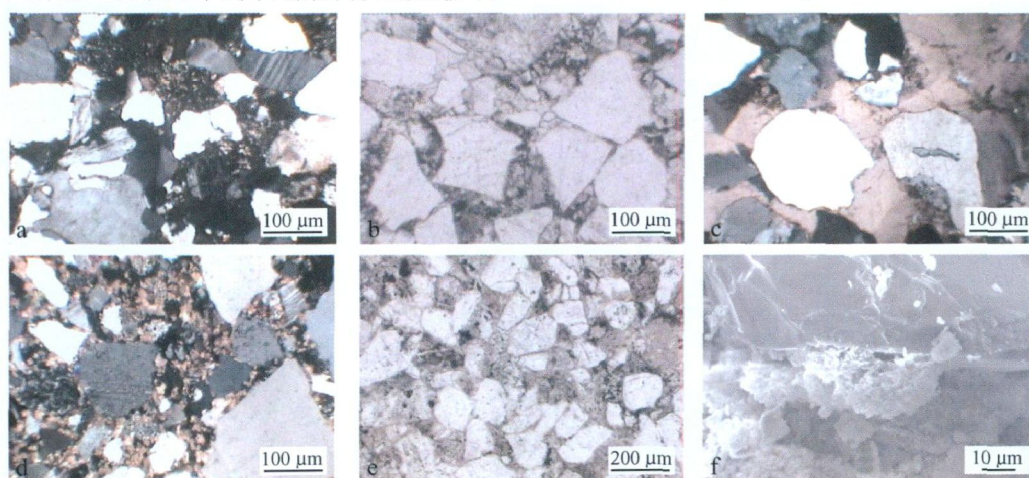


图 1 东营凹陷沙河街组碎屑砂岩显微照片

Fig. 1 Microphotos of clastic sandstones from the Paleogene Shahejie Formation in the Dongying Sag

- a. 石英压溶使颗粒表现出凹凸接触(正交偏光, 牛 35 井, 2 958 m); b. 石英次生加大(单偏光, 坨 761 井, 3 182 m); c. 早期碳酸盐胶结(正交偏光, 坨 9 井, 1 856 m); d. 后期铁白云石胶结(正交偏光, 坨 762 井, 3 442.5 m); e. 粘土充填于孔隙(单偏光, 车 274 井, 2 596 m); f. 伊利石呈绒球状充填于孔隙之间(扫描电镜, 车 274 井, 2 596 m)

对储层砂岩起胶结作用的粘土矿物主要有高岭石、伊利石、蒙脱石和绿泥石等,可分为自生和它生两种类型。它生粘土常具有沉积定向排列,而自生粘土则以分散的孔隙充填物形式出现,通常构成不规则的凝块。高岭石、绿泥石常呈分散的星点状、假六边形或蠕虫状充填于孔隙之间(图 1e、f),伊利石、蒙脱石多呈薄膜状孔隙衬垫产出。

1.3 溶蚀作用

研究区内储层砂岩的溶蚀现象较普遍,主要表现为长石、碳酸盐胶结物受到溶解淋滤以及部分岩屑的溶蚀,并为后期的方解石充填。碳酸盐胶结物的溶蚀主要形成大量的粒间溶孔,长石的溶蚀则形成粒内溶孔和铸模孔。

1.4 成岩相特征

根据成岩阶段、成岩作用的类型及成岩矿物的类型、形成顺序、溶蚀作用的强弱、粘土杂基的类型和含量等,东营凹陷沙河街组可划分为早期弱压实、早期弱胶结、中期溶蚀、中期再胶结及紧密压实裂隙等 5 个成岩相^[1,3]。进一步可细分为塑性组分溶蚀、方解石胶结、铁方解石胶结、石英次生加大、高岭石充填、混层粘土充填等 8 种成岩亚相。所研究砂岩样品主要表现为后 4 种成岩相类型。

2 样品制备及速度测量

在东营凹陷不同构造位置的 50 口井中系统选取古近系各层段砂岩样品 250 块(以沙河街组为主),制成直径为 25.4 mm,高在 25~60 mm 间不等的圆柱形样品。经甲苯溶液洗油、洗盐处理,

并在 70℃ 下干燥 72 h 后,用称重法测量样品在干燥密度,通过气测法得出样品的孔隙度与渗透率。根据地层矿化度确定样品水饱和时的盐度,采用真空吸入法对样品进行饱和,饱和时间在 48 h 以上,地层水饱和时样品的密度也用称重法获得。对样品的显微薄片分析得到矿物组分、胶结物类型与含量、岩石结构特征的信息。

用超声波脉冲穿透法测定样品速度,配套纵波 PZT 换能器的主频为 500~1 000 kHz,横波主频为 250~500 kHz,纵、横波速度测量误差小于 5%。地层水饱和条件下实验围限压力与孔隙压力分别为对应样品取样深度的上覆压力与静水压力,干燥条件下实验压力取等效压力。取样深度均超过 1 500 m,对应等效压力为 15 MPa。该压力下样品中的微裂隙闭合,速度、泊松比等弹性参数随压力的变化趋于稳定(图 2),同时与流体相关的频散作用也可忽略^[10],实验超声测量结果可近似代表实际储层条件下的地震频段测量结果。

3 实验结果分析

图 3a 中给出储层条件下地层水饱和砂岩样品的速度随孔隙度变化关系。纵、横波速度均随孔隙度增大而降低,在孔隙度变化范围内(0.5%~27.5%),纵波速度降低约 53%,横波速度降低约 48%;该图中同时给出按 Wyllie 公式(时间平均公式)和 Raymer 公式所计算的纯砂岩纵波速度-孔隙度关系^[11],Wyllie 公式所给出的纵波速度明显偏低,而 Raymer 公式通常可作为速度-孔隙度变化关系的上限,但仍有较多样品纵波速度高于 Raymer 公式计算值,样品中普遍含有钙质胶结物

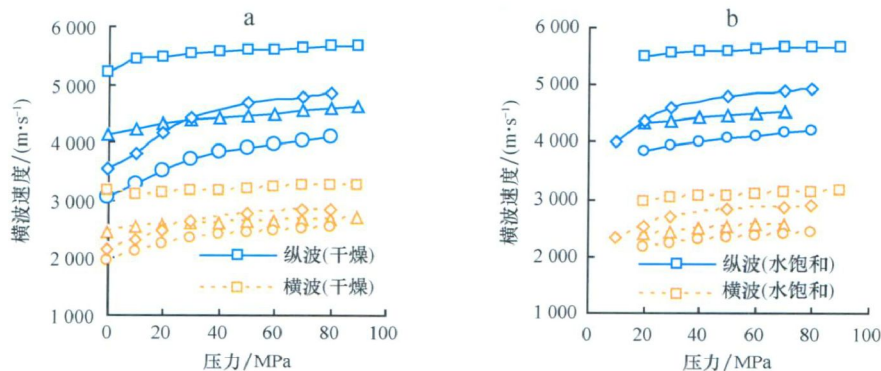


图 2 干燥及水饱和条件下砂岩样品速度的压力相关性

Fig. 2 Pressure dependence of velocity for the dry and water saturated sandstone samples

a. 干燥条件下; b. 水饱和条件下

是造成这种差异得主要原应, 使用上述公式在研究区内进行孔隙度或速度预测时需要进行校正。图 3b 中给出纵、横波速度关系, 不同胶结物类型、矿物组成及固结程度的砂岩样品其纵、横波关系表现出明显的线性关系, Castagna 的泥岩线公式^[11]所给出的计算结果与测量结果有明显差异, 主要因为该泥岩线公式所针对的碎屑岩地层是不含钙质胶结物的, 也说明泥岩线是一个区域性统计关系, 而李庆忠根据国内东部碎屑岩地层所给出的纵、横波速度关系在整个孔隙度范围内与实验测试结果符合程度较高。图 3c 给出速度-密度变化关系, 在密度一定时, Gardner 公式给出的纵波速度偏小, 与研究区砂岩样品中普遍被钙质胶结有关, 因为相对于石英颗粒, 方解石具有相对较高的颗粒纵波速度, 而密度差异不大。储层条件下砂岩样品的速度-孔隙度关系、纵横波速度关系、密度-速度统计关系见表 1 (表中 V_p 和 V_s 分别代表纵、横波速度, Φ 为孔隙度, ρ 代表密度)。

图 4a 中给出储层条件下干燥砂岩样品泊松比随纵波速度变化关系, 同时给出一组由不同粒度石英颗粒所构成的集合体在不同压力下的测量结果, 并将一组干燥纯砂岩和灰岩样品在 40 MPa 下的泊松比与纵波速度测量结果作为对比值投在图中^[12]。随纵波速度的增加干燥砂岩的泊松比表现出两种主要变化趋势: ①泊松比呈单调增加趋势, 其变化值在纯砂岩与灰岩测量结果所控制的

范围内, 即相同纵波速度下, 样品的泊松比大于纯砂岩的泊松比而小于灰岩样品的泊松比; ②先随纵波速度增加而增加, 在泊松比大于 0.17 后随纵波速度的降低而增加, 整体呈现为一个开口向左的“V”字型。对于非胶结石英颗粒集合体, 纵波速度随围限压力的增大而增大, 而泊松比会随之降低, 即泊松比随纵波速度增大呈单调降低的趋势, 代表机械压实作用的影响。从图 4b 中可见, 对于趋势①泊松比是随样品的孔隙度增加而降低的, 而趋势②孔隙度先随泊松比的增加而降低, 在样品泊松比大于 0.17 后表现出相反的趋势, 即泊松比随孔隙度的增大而增大。图 4c 中给出了砂岩样品中钙质含量的影响 (包括呈胶结物形式的方解石、白云石和存在于石英颗粒粒间的方解石团块), 对于趋势①泊松比和纵波速度均随钙质含量的增加而增加, 而钙质含量对于趋势②的变化则无明显影响。图 4d 中给出泥质含量的影响, 泥质含量主要表现在对趋势②的影响上, 泊松比随泥质含量的增加而增大, 纵波速度则随泥质含量的增加表现出先增加后减小的趋势, 转换点在泊松比为 0.17 处。

图 5 中给出两类纵波速度-泊松比变化趋势所对应的岩石样品微观结构特征 (每个趋势中显微照片从左至右按泊松比增大方向排列)。从显微照片中可以看出, 趋势①表现出钙质胶结物含量是逐渐增高的, 胶结物的赋存位置也由主要存

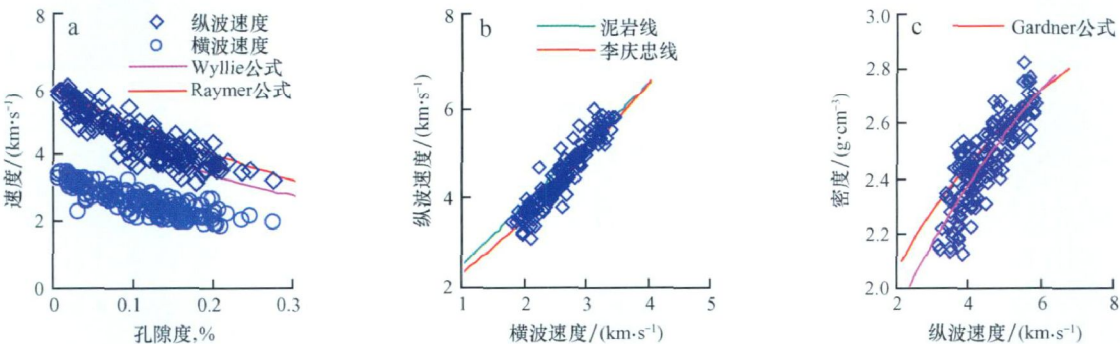


图 3 碎屑砂岩样品岩石物理特征

Fig. 3 Petrophysical properties of the clastic sandstone samples
a. 速度与孔隙度关系; b. 纵、横波速度关系; c. 纵波速度与密度关系

表 1 储层条件下东营凹陷沙河街组砂岩统计岩石物理模型

拟合关系	$V_p - \Phi$	$V_s - \Phi$	$V_p - V_s$	$\rho - V_p$
地层水饱和	$V_p = 32.0\Phi^2 - 17.5\Phi + 5.8$	$V_s = 19.6\Phi^2 - 10.2\Phi + 3.5$	$V_p = 1.61V_s + 0.35$	$\rho = 1.52V_p^{0.33}$
干燥	$V_p = 35.7\Phi^2 - 18.5\Phi + 5.7$	$V_s = 16.3\Phi^2 - 8.9\Phi + 3.3$	$V_p = 1.66V_s$	$\rho = 1.40V_p^{0.37}$

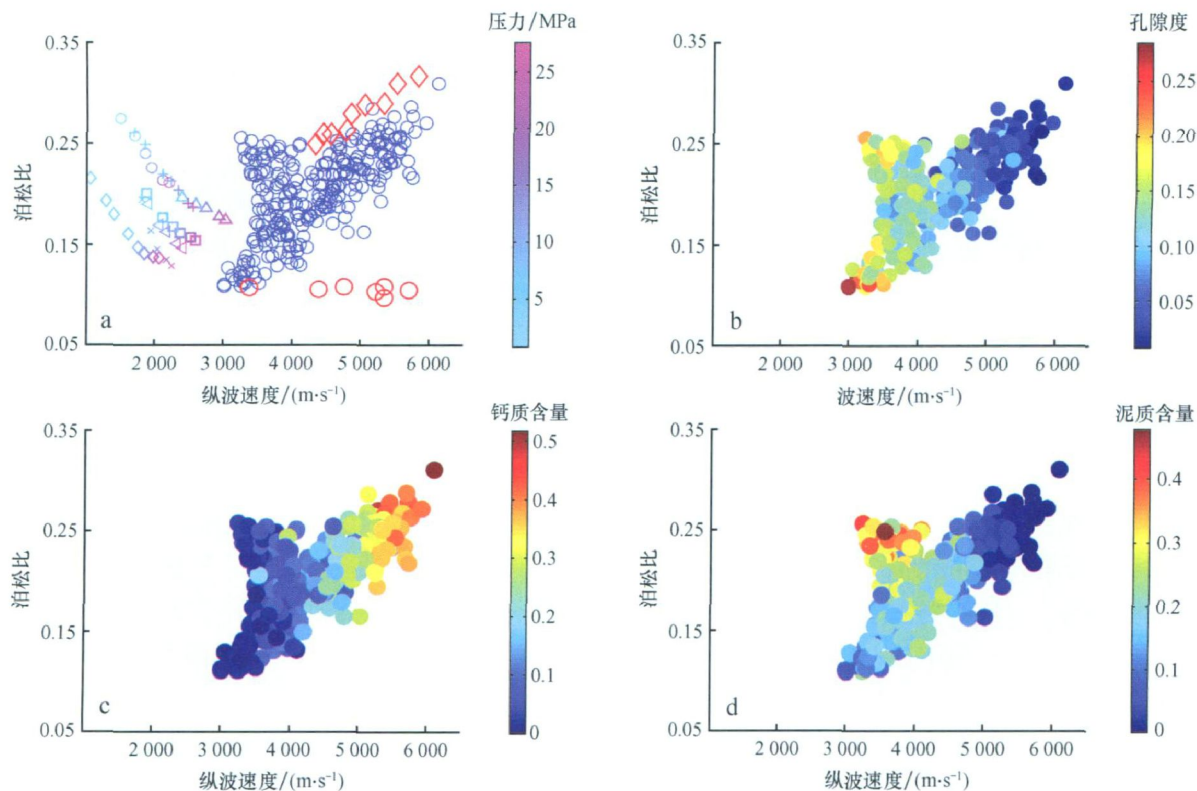


图 4 干燥条件下砂岩样品纵波速度与泊松比交汇图

Fig. 4 P-wave velocity versus Poisson's ratio of the dry sandstone samples

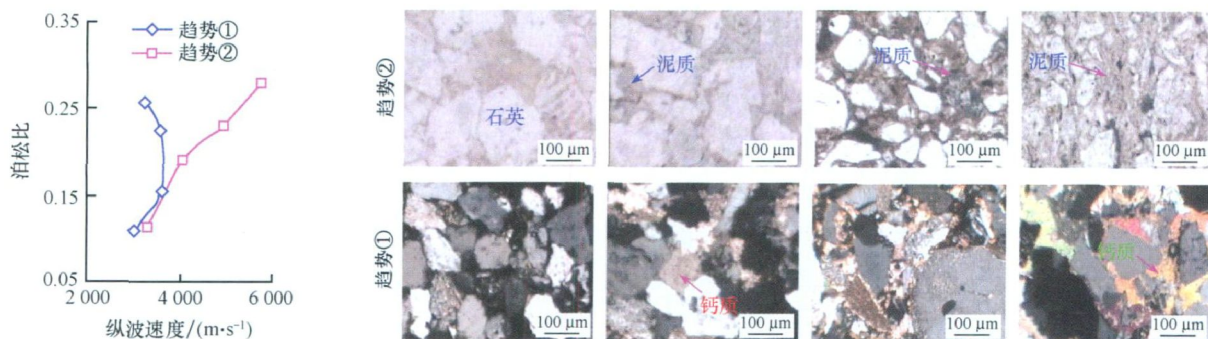


图 5 砂岩样品结构特征

Fig. 5 Texture features of the sandstone samples

在于粒间孔隙空间转变为同时存在于粒间孔隙以及颗粒接触边界的间隙中,并最终使石英、长石等大的颗粒不再相互接触而“漂浮”于钙质胶结中,砂岩结构也从颗粒支撑逐步演变为由钙质胶结所形成的基质支撑,这个过程中纵波速度与泊松比是逐渐增大的。趋势②体现了泥质含量对介质弹性特征的影响,随泊松比的增高泥质含量逐渐增加,泥质含量的逐渐增加也使的石英、长石等大的颗粒不再相互接触而“漂浮”于泥质基质中,砂岩结构从颗粒支撑逐步演变为由泥质所形成的基质支撑,但在这个过程中砂岩样品的纵波速度是先增加后减小,而泊松比是逐渐增大。

碎屑砂岩通常具有较典型的粒状结构特征,由粒度较大的石英、长石颗粒通过不同的接触方式构成岩石骨架,弹性波能量也正是通过颗粒的接触面进行传播,使得介质所表现出来的等效弹性特征也在很大程度上依赖于颗粒间接触面的边界条件。在干燥条件下,具有随机堆积特征的弹性球状颗粒的等效模量可由 Hertz-Mindlin 接触模型计算^[11]:

$$K_{HM} = \frac{n(1-\Phi)}{12\pi R} S_n \quad (1)$$

$$G_{HM} = \frac{n(1-\Phi)}{20\pi R} (S_n + 1.5S_t) \quad (2)$$

式中: K_{HM} 和 G_{HM} 分别为介质的等效体积和剪切模量; n 为单个颗粒接触面的个数; Φ 为介质孔隙度; R 为颗粒半径; S_n 和 S_t 分别为颗粒接触面的正向与切向刚度, 决定于颗粒接触面的物理条件。

假定颗粒接触面为半径 a 的圆形, 但由于接触面并非完全无相对滑动, 存在一部分区域相对光滑而对切向刚度 S_t 不起作用, 可将对 S_t 起作用的部分等效为半径为 b 的圆, 其值在 $0 \sim a$ 的范围内变化, 这样 S_n 和 S_t 可由以下公式计算^[11]:

$$S_n = \frac{4aG}{1 - \nu} \quad (3)$$

$$S_t = \frac{8bG}{2 - \nu} \quad (4)$$

式中: G 和 ν 分别为组成颗粒的剪切模量与泊松比。

利用公式 (1) 和公式 (2), 弹性介质等效泊松比 (ν_{dy}) 可表示为:

$$\nu_{dy} = \frac{S_n - S_t}{4S_n + S_t} \quad (5)$$

成岩过程中的机械压实作用、胶结作用以及溶蚀作用均可造成颗粒接触边界条件的变化。随埋深的增加, 机械压实作用增强, 最初沉积的碎屑颗粒集合所受的等效压力也逐渐增大, 使得由颗粒边界由点接触逐步变为线接触或面接触, 其实是颗粒接触面的半径 a 增加, 造成介质的体积模量和纵波速度增加 [公式 (1)]; 压力增加也使得的颗粒间的摩擦力增大, 等效半径 b 逐渐接近接触面半径 a , 这个过程中剪切刚度 S_t 增加更快, 由公式 (2) 可知泊松比会逐渐降低。胶结物的出现代表机械压实的结束, 其对砂岩泊松比的影响比较复杂, 需要区分胶结物所赋存的位置及其本身的弹性性质。就胶结物而言, 可以充填于颗粒的接触边界, 也可充填于孔隙中, 这两种情况对介质弹性性质的影响是有差异的。按成岩顺序, 硅质胶结最先出现 (暂不考虑早期方解石胶结), 并充填于颗粒的接触边界, 岩石从疏松状态变为弱固结或固结状态。硅质胶结可使相接触的颗粒相互“焊接”在一起, 此时对剪切刚度 S_t 起作用的等效半径 b 与接触面半径 a 近于相等, 泊松比达到稳定值 0.1, 实验样品泊松比的最小值也在 0.1 左右, 对应于高孔隙弱固结砂岩 (图 4)。在这种条件下, 粘土或后期呈孤岛状的钙质胶结物仅充填于孔隙中而起到降低孔隙度、增加孔隙刚度的作用, 但体积模量相对于剪切模量增加更快, 造成泊

松比、纵波速度均随泥质与钙质含量的增加而增加, 表现为图 4 中左下方数据的变化规律。随着泥质与钙质含量的持续增加, 岩石颗粒结构特征会发生转变, 石英、长石颗粒不再紧密接触而“漂浮”于由泥质或钙质胶结物形成的基质中, 砂岩原有的粒状结构会被改变, 此时弹性波的能量是通过基质传播而非颗粒接触边界。在为基质支撑的情况下, 如果基质为泥质, 石英等大的碎屑颗粒不再形成粒间孔隙, 孔隙主要由粘土的微孔隙提供, 致使孔隙度会随泥质含量的增加而增加, 而岩石介质在弹性性质上逐渐接近泥质基质的性质 (高泊松比, 低速度), 趋势 ② 的左上部分正是反映了颗粒支撑逐渐减少而基质支持逐渐增加的过程 (图 4 图 5); 当基质主要为钙质时, 钙质胶结如方解石与白云石并不存在微孔隙, 这样随钙质含量的增加, 最初由石英、长石颗粒形成的孔隙会逐渐减小, 而在弹性性质上则逐渐接近钙质基质的性质, 即接近方解石或白云石晶体的弹性性质 (图 4 图 5)。对钙质胶结的溶蚀作用又会使砂岩向颗粒结构转化, 纵波速度及泊松比降低, 如一些样品所表现出的高钙质含量, 而泊松比、纵波速度却相对较低 (图 4d)。

4 结论

1) 速度-孔隙度、速度-密度关系等统计岩石物理模型具有明显的区域性, 与特定储层岩石的成岩历史有关。

2) 机械压实作用增强会使非固结疏松砂岩的纵波速度增加、泊松比降低, 0.1 可作为研究区内机械压实作用泊松比变化的下限, 也可作为干燥条件下硅质胶结纯砂岩的泊松比。

3) 研究区内固结砂岩纵波速度-泊松比的变化表现出两种主要趋势: 趋势 ① 反映了钙质胶结物含量的影响, 随钙质胶结物含量的增加, 泊松比与纵波速度均呈单调增加趋势, 在这个过程中岩石结构从颗粒支撑逐步转变为钙质基质支撑, 砂岩也逐渐表现出方解石或白云石晶体的弹性性质; 趋势 ② 反映了泥质含量的影响, 随泥质含量的增加, 泊松比呈单调增加趋势, 但纵波速度先增加后减小, 转变位置出现在泊松比约为 0.17 处, 砂岩结构从颗粒支撑逐步演变为由泥质所形成的基

(下转第 309 页)

要分布在于奇西地区、托甫台地区和盐上地区。其中,盐上地区岩性上倾尖灭式圈闭在沉积时期是岩性向南下倾尖灭,喜马拉雅期因地层北倾而形成岩性向北上倾尖灭,是晚期油气运聚指向区域。塔河地区西北部随着喜马拉雅运动造成地层区域性北倾而处于高位能区,不是油气运聚指向,晚期难以成藏。

参 考 文 献

- 1 张希明,王恕一.塔里木盆地北部三叠系辫状三角洲砂体储层非均质性研究[J].石油实验地质,1997,19(3):201~207
- 2 吕雪雁,朱筱敏,申银民,等.塔里木盆地台盆区三叠系层序地层研究和有利勘探区预测[J].石油勘探与开发,2002,29(1):32~35
- 3 刘辰生,田永强,郭建华.阿克库勒地区三叠系储集层成岩作用[J].新疆石油地质,2005,26(1):62~64
- 4 丁勇,邱芳强,高玄.塔河油田三叠系油气藏特征及成藏规律[J].西部油气地质,2006,2(3):257~260
- 5 Burruss R C. Practical aspects of fluorescence microscopy of petroleum fluid inclusions [J]. SEPM Short Course, 1991, 25(1): 1~7
- 6 Eadington P J Lisk M, Krieger F W. Identify oil well sites [Z]. Australia United States Patent Application 1996 543-616
- 7 Goldstein R H, Reynolds T J Systematics of fluid inclusions in di-

- genetic minerals [Z]. USA: SEPM, 1994
- 8 Goldstein R H. Fluid inclusions in sedimentary diagenetic systems [J]. Lithos, 2001, 55: 159~193
- 9 Lisk M, Eadington P J O'Brien G W. Timing of oil migration using new methods for mapping hydrocarbon charge [Z]. Geofluids II '97 Extended Abstract 2003 26~29
- 10 Munz I A. Petroleum inclusions in sedimentary basins: systematic analytical methods and applications [J]. Lithos, 2001, 55: 195~212
- 11 刘德汉,肖贤明,田辉,等.含油气盆地中流体包裹体类型及其地质意义[J].石油与天然气地质,2008,29(4):491~501
- 12 陈红汉.油气成藏年代学研究进展[J].石油与天然气地质,2007,28(2):143~150
- 13 徐良,杨光,夏淑华.流体包裹体技术在油气成藏期次研究中的应用——以黑地庙地区为例[J].吉林大学学报(自然科学版),2006,36(增刊):29~33
- 14 李坤,赵锡奎,张小兵,等.塔里木盆地阿克库勒凸起油气输导体系类型与演化[J].地质科学,2007,42(4):766~778
- 15 牟泽辉,熊海河,朱宏权,等.塔里木盆地阿克库勒凸起油气成藏演化[J].石油与天然气地质,1997,18(3):228~230
- 16 王晓东,王玲,张星海.塔河 1 号三叠系油气藏特征及成藏机理[J].新疆地质,2003,21(2):240~242
- 17 周永昌,杨国龙.塔里木盆地阿克库勒地区油气地质特征及勘探前景[J].石油学报,2001,22(3):1~5

(编辑 李 军)

(上接第 299 页)

质支撑是造成这种变化的主要原因。通过测量结果在纵波速度-泊松比交汇图中的位置可定性确定储层砂岩的孔隙类型及岩石结构特征。

致谢:在工作过程中,中石化科技发展部张永刚、许卫平两位教授级高级工程师高工给出较多建议,在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 李丕龙,庞雄奇.陆相断陷盆地隐蔽油气藏形成——以济阳坳陷为例[M].北京:石油工业出版社,2004 85~113
- 2 蔡进功,谢忠怀,刘宝军,等.胜利油区深部砂岩储集层类型及特征[J].石油学报,2001,22(5):34~37
- 3 邱桂强.东营凹陷古近系成岩层序特征与储集差异性分析[J].沉积学报,2007,25(6):915~922
- 4 陈冬霞,庞雄奇,翁庆萍,等.岩性油气藏三元成因模式及初步应用[J].石油与天然气地质,2003,24(3):228~232
- 5 张晶,王伟峰,荣启宏,等.东营凹陷民丰洼陷沙河街组三段岩性油藏控制因素[J].石油与天然气地质,2007,28(2):235~

- 249
- 6 邓继新,王尚旭,李生杰,等.砂岩储层地震属性参数对孔隙流体的敏感性评价[J].石油学报,2006,27(6):58~62
- 7 李生杰.岩性、孔隙及其流体变化对岩石弹性性质的影响[J].石油与天然气地质,2005,26(6):760~764
- 8 王尚旭.含气地层弹性性质及其波场响应[J].石油与天然气地质,2006,26(6):730~735
- 9 袁红军.东营凹陷博兴洼陷滨浅湖相滩坝砂岩储层预测[J].石油与天然气地质,2007,26(4):497~503
- 10 邓继新,史调,俞军.流体饱和岩石速度频散研究[J].北京大学学报,2003,39(6):835~843
- 11 Mavko G, Mukerji T, Dvorkin J The rock physics handbook: tools for seismic analysis in porous media [M]. New York, USA: Cambridge University Press, 1998 106~160
- 12 Han Dehua Effects of porosity and clay contents on wave velocities in sandstone and unconsolidated sediments [D]. Stanford University, 1987

(编辑 董 立)