

# 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

罗红梅<sup>1,2</sup>, 罗晓容<sup>1</sup>, 刘书会<sup>2</sup>, 穆星<sup>2</sup>, 郑文召<sup>2</sup>

(1.中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

2.中国石化胜利油田分公司地质科学研究所, 山东 东营 257015)

**摘要:** 济阳坳陷东营凹陷北部陡坡带深层发育巨厚致密砂砾岩体, 其低孔低渗透储层存在地球物理响应特征存在难以识别的问题。通过对东营凹陷北部陡坡带10口取心井的104块样品的选取、测定以及实验数据的分析, 确定了研究区砂砾岩体储层的物性特征, 认为影响致密砂砾岩体纵、横波速度等弹性波速的主要因素为孔隙度和岩性, 其次为胶结物含量; 砂砾岩体储层中微裂缝的存在对地震波速度的影响不明显; 不同性质流体会引起纵波速度的变化, 而对横波速度影响较小, 因此在理想状态下可以利用纵、横波速度比来识别流体性质; 当砂砾岩体中孔隙度大于5%时, 岩石的地震波传播速度与密度的相关性相对较好, 而当孔隙度小于5%时, 岩石的地震波传播速度与密度的相关性相对较差。

**关键词:** 致密砂砾岩体 低孔低渗透 储层物性特征 弹性波速 东营凹陷

**中图分类号:** P631.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9603(2014)02-0091-04

济阳坳陷东营凹陷北部陡坡带在陈南断层下降盘发育了规模巨大的砂砾岩体<sup>[1-2]</sup>。砂砾岩体纵向上多期叠置、横向呈扇形连片分布, 最大厚度超过800 m, 是寻找岩性油藏和构造-岩性油藏的有利区带。但这类砂砾岩体的沉积相带窄、储集物性变化快, 为典型的低孔低渗透储集体<sup>[3-6]</sup>, 其物性特征的复杂性导致难以识别以纵、横波速度等弹性波速为主要内容的地球物理响应。由于砂砾岩体储层预测是建立在岩石地球物理参数存在差异的基础上<sup>[7-13]</sup>, 因此, 深入了解东营凹陷北部陡坡带砂砾岩体的弹性波速与岩石物性特征之间的关系是开展该类储层预测的基础。

目前中外学者针对砂砾岩体低孔低渗透储层进行了大量的研究, 但针对不同相带、不同岩石类型开展的岩石物理高温高压测试方面的系统研究相对较少, 相应的认识也缺少基于岩石基础测试数据的支持。笔者根据不同条件下岩石高温高压测试所获得的纵波速度、横波速度、密度、渗透率、流体饱和度等岩心测试数据以及岩石薄片、铸体薄片的镜下微观观察分析结果, 系统分析了不同岩性、物性、微裂缝、流体性质和密度等因素对岩石纵、横

波速度等弹性波速的影响, 以期预测砂砾岩体储层空间展布特征提供依据。

## 1 岩石物理参数测试

为了保证测试样品的代表性, 选择了研究区盐23、盐22-22等10口典型井的重点层段、不同相带和岩性进行取样, 采集的104块岩石样品考虑了取样点在平面分布的均匀性及纵向上的连续性。根据全岩矿物测试得到的各种矿物含量, 结合薄片分析, 将所取岩心样品划分为泥岩、白云岩、砂岩、含砾砂岩、砾状砂岩、砾岩及盐岩等7类岩性。

样品测试实验由中国石油大学(华东)岩石物理实验室完成, 实验所用仪器包括岩石声学测试系统(声源PR5800、示波器DSO6032A)、洗油仪、声波测量仪、渗透率测试仪、饱和装置、恒温箱、精密天平、离心机等装置。测试项目包括纵波速度、横波速度、密度、孔隙度、渗透率、饱和度等, 高温高压测试条件包括洗油前、洗油后, 饱和不同流体, 不同压力及不同含油饱和度等。同时利用显微镜分析岩石薄片与铸体薄片微观样品40块, 并开展了15块

收稿日期: 2013-12-31。

作者简介: 罗红梅, 女, 高级工程师, 在读博士研究生, 从事地球物理技术的研究与应用。联系电话: (0546)8716453, E-mail: lhmei2001@163.com。

基金项目: 国家科技重大攻关项目“深层油气成藏规律、关键技术及目标预测”(2008ZX05008)。

样品的压汞法毛管压力测试实验,对储层孔隙类型、孔隙结构开展定量分析<sup>[14-19]</sup>。

## 2 储层物性特征

### 2.1 孔隙类型

岩石薄片和铸体薄片分析结果表明,研究区砂砾岩体储层孔隙类型主要有残余粒间孔、填隙物内孔隙、长石溶孔、岩屑溶孔、碳酸盐溶孔和杂基溶孔等。其中残余粒间孔等原生孔隙所占比例小于15%,次生溶孔所占比例大于80%,深层砂砾岩体储层因早期成岩作用的改造导致原生粒间孔大大减小,而在中、晚成岩阶段生成的各种有机酸对储层的溶蚀作用产生的次生孔隙使储集性能得到很大改善。

### 2.2 孔隙结构

利用研究区6口井压汞实验测得的17条毛管压力曲线对孔隙结构进行分析,结果表明,其门限压力为0.01~1.51 MPa,平均值为0.25 MPa;饱和度中值压力为0.09~3.37 MPa,平均值为2.44 MPa。最大孔喉半径为0.48~18.28  $\mu\text{m}$ ,平均值为7.44  $\mu\text{m}$ ,中值半径为0.04~8.32  $\mu\text{m}$ ,平均值为1.89  $\mu\text{m}$ ,表明研究区砂砾岩喉道的大小、分布及其几何形态是影响储集能力和渗透特征的主要因素,储层总体上以发育微细喉道为主,孔喉分选相对较好,排驱压力较低。

### 2.3 孔渗特征

104块样品物性分析的统计结果表明,砂砾岩体孔隙度最小值为0.58%,最大值为23.39%,一般为0.58%~10%;渗透率变化较大,最小值为 $0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,最大值为 $18\ 875 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,主要为 $0.2 \times 10^{-3} \sim 59 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。研究区储层的孔隙度与渗透率总体上虽然具有正相关关系,但相关性较差。当埋深大于3 000 m时,储层孔隙度一般小于8%,渗透率一般小于 $19.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。且在埋深条件相同时,孔隙度最大的是砂岩,其次为砾岩、白云岩,泥岩最差。同时,砂砾岩体中发育裂缝的部分样品孔隙度大于20%,渗透率大于 $987 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。测试分析结果表明,研究区砂砾岩储集类型属典型的低孔低渗透储层。

## 3 弹性波速影响因素

### 3.1 岩性

砂砾岩体纵、横波速度均随埋深增加而变大,

在相同埋深条件下,不同岩性的波速具有明显差异,其中砾岩的纵、横波速度最大,砂岩次之,泥岩最小,各类岩性速度特性均符合常规地震波速度变化规律。对研究区砂砾岩体不同岩性的纵、横波速度关系进行统计分析(图1),表明二者具有很好的线性关系,因此,可以利用纵、横波速度的这种相关性,建立岩性识别和表征岩性变化的判别标准。但当埋深大于3 000 m时,二者相关性变差,分析时会存在多解性,要进一步明确各类岩性的特征,对影响波速的其他因素进行深入分析。

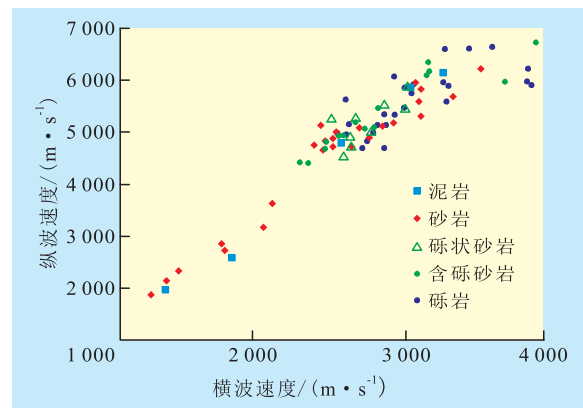


图1 不同岩性纵、横波速度关系

### 3.2 孔隙度

样品测试分析结果表明,孔隙度与纵、横波速度具有较好的负相关关系(图2)。孔隙度与其对应的纵波速度之间相关系数为0.76,具有较好的相关性;而与其对应的横波速度之间的相关系数约为0.71,相关性相对略差。

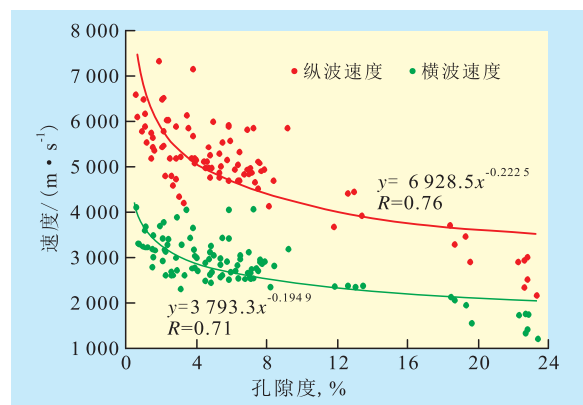


图2 纵、横波速度与孔隙度的关系

分别拟合了3种主要岩性的纵、横波速度与孔隙度的关系(图3)。从分析结果可以看出,相同孔隙度条件下,砾岩纵波速度高于含砾砂岩和砂岩(图3a),三者基本可以区分。同一孔隙度条件下,部分砾岩样品的横波速度略小于砂岩(图3b),三者区分难度相对较大。据此,主要利用纵波速度信息

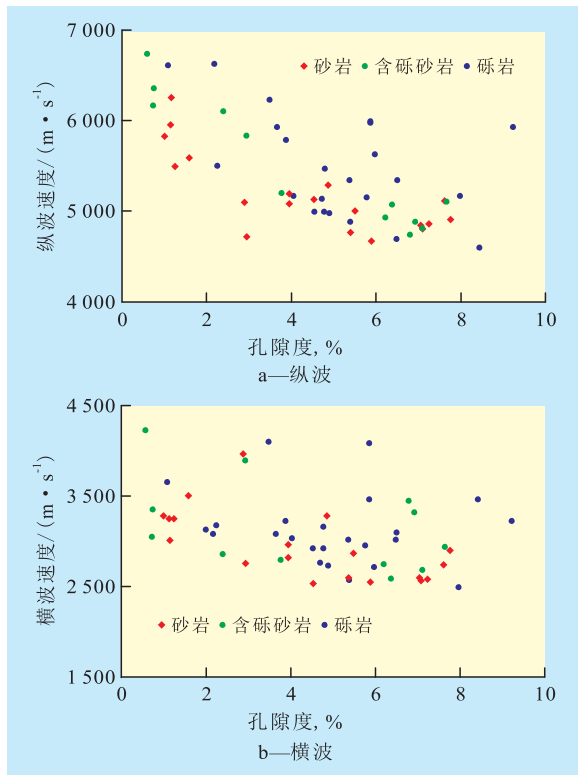


图3 不同岩性纵、横波速度与孔隙度关系

区分砂砾岩体中的不同岩性。

### 3.3 胶结物含量

研究区胶结物主要以泥质和碳酸岩为主。在分析纵、横波速度随胶结物含量的变化关系时,为了消除孔隙度的影响,胶结物含量定义为其与孔隙度的比值,研究结果显示,纵、横波速度总体上随胶结物含量增加而变大(图4),因此,胶结物的含量是影响岩石地球物理参数的重要因素之一。

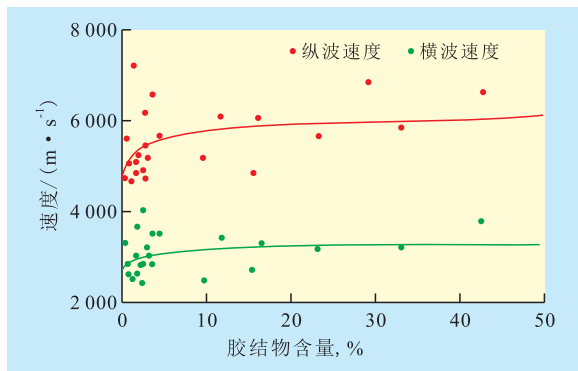


图4 纵、横波速度与胶结物含量的关系

### 3.4 微裂缝

样品测试结果中有3个样品点的渗透率大于 $987 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,远高于 $0.2 \times 10^{-3} \sim 59 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的平均值,分析结果表明是由于样品中发育微裂缝。但这3个样品与其他样品的纵、横波速度却相差不大,由此推测裂缝基本不影响波速的变化,利用纵、横波

速度检测裂缝难度相对较大。

### 3.5 流体性质

分析结果表明,岩石饱和水时纵波速度最大,饱和油次之,饱和空气时的纵波速度最小。岩石饱和油时的纵波速度一般较饱和水时低2.63%,此差异可导致反射系数的变化率约为0.026,而岩石饱和气时的纵波速度较饱和水时低7.43%,可导致反射系数的变化率约为0.069。而相对于纵波速度而言,流体性质变化时横波速度基本不变(图5),这表明岩石流体饱和度变化对横波影响较小,相应地会造成纵、横波速度比和泊松比等参数的变化。

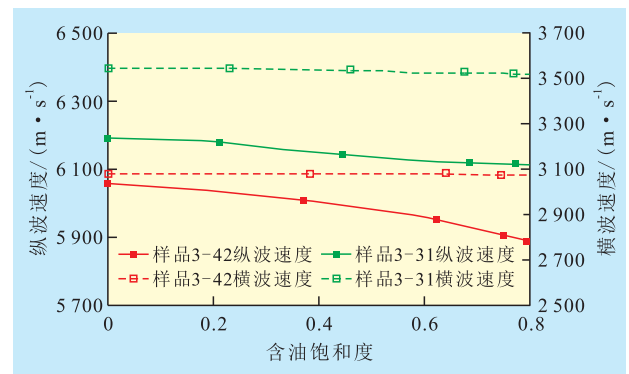


图5 纵、横波速度与含油饱和度的关系

### 3.6 岩石密度

由岩石密度与纵波速度的相关性分析可知,速度总体随密度变大而增加。当纵波速度小于5800 m/s时,速度与密度的相关关系与Gardner经验公式所揭示的速度随密度的变化趋势基本类似<sup>[20]</sup>,但当波速大于5800 m/s后,岩石样品密度与波速的拟合趋势逐渐偏离Gardner公式所揭示的关系。由于研究区的有效储层孔隙度的下限为5.3%,为了进一步分析纵波速度大于5800 m/s后波速随密度变化趋势偏离经验关系的原因,以5%为标准,将岩石样品分成孔隙度小于5%和大于5%的2类,并与Gardner经验公式所揭示的变化趋势进行了对比。结果表明,孔隙度大于5%时,波速与密度的相关性相对较好;而孔隙度小于5%时,波速与密度的相关性相对较差。当波速大于5800 m/s后,尽管孔隙度大于5%的样品的波速随密度的变化趋势也逐渐偏离经验关系,但与孔隙度小于5%的样品相比,偏离程度较小。进一步对偏离趋势样品的孔隙度进行分析,结果表明,这些样品的孔隙度都接近5%。因此,对于陡坡带深层砂砾岩体低孔低渗透储层而言,岩石压缩到一定程度后,速度、密度趋于恒定,密度与速度之间相关性较差,此时无法根据密度的变化来分辨储层的岩性变化特征。

## 4 结束语

通过对东营凹陷北部陡坡带致密砂砾岩体岩石物理参数的实验测试结果分析,系统总结了岩性、孔隙度、胶结物含量、微裂缝、流体性质以及密度等因素对纵、横波速度等岩石弹性波速的影响规律。地震波速主要影响因素是孔隙度与岩性,其次是胶结物含量;微裂缝的存在对波速变化规律相关性不明显;不同性质流体会引起纵波速度的变化而对横波速度没有影响,因此在理想状态下可以利用纵、横波波速比来识别流体性质;砂砾岩体中孔隙度大于5%的岩石的波速与密度的相关性相对较好,而孔隙度小于5%的波速与密度的相关性相对较差。由此确定的弹性波速影响因素为深层致密砂砾岩体储层预测方法的优化奠定了理论基础。

### 参考文献:

- [1] 鲜本忠,王永诗,周廷全,等.断陷湖盆陡坡带砂砾岩体分布规律及控制因素——以渤海湾盆地济阳拗陷车镇凹陷为例[J].石油勘探与开发,2007,34(4):429-436.
- [2] 孔凡仙.东营凹陷北部陡坡带砂砾岩体的勘探[J].石油地球物理勘探,2000,35(5):769-770.
- [3] 宋国奇,刘鑫金,刘惠民.东营凹陷北部陡坡带砂砾岩体成岩圈闭成因及主控因素[J].油气地质与采收率,2012,19(6):37-41.
- [4] 王艳忠,操应长,李永新.东营凹陷北带沙四段上亚段近岸水下扇砂砾岩储集物性对比[J].油气地质与采收率,2010,17(4):9-12.
- [5] 刘鑫金,宋国奇,刘惠民,等.东营凹陷北部陡坡带砂砾岩油藏类型及序列模式[J].油气地质与采收率,2012,19(5):20-23.
- [6] 田美荣.盐家地区沙四段上亚段砂砾岩体储层特征及成岩演化[J].油气地质与采收率,2011,18(2):30-33,48.
- [7] 刘雅利,程付启,庄嘉翠,等.渤南洼陷北部陡坡带砂砾岩扇体油气成藏规律[J].油气地质与采收率,2010,17(6):23-26.
- [8] 万欢,黄文辉,王华军.东营凹陷北部陡坡带沙河街组四段砂砾岩成岩作用[J].特种油气藏,2012,19(2):39-42.
- [9] 武刚.埕东凸起西南坡沙三段砂砾岩体坡积相沉积模式[J].特种油气藏,2012,19(2):22-25.
- [10] 季敏,王尚旭,李生杰,等.物理模型的地震属性预测效果分析[J].石油勘探与开发,2007,34(3):339-341.
- [11] Han D H, Batzle M. Velocities of deepwater reservoir sands [J]. The Leading Edge, 2006, 25(4): 460-466.
- [12] 邓继新,王尚旭,李生杰.储层砂岩沉积特征变化对地震弹性属性的影响[J].石油天然气学报,2008,30(1):75-79.
- [13] 韩文功,程远方.济阳拗陷岩芯弹性和物性参数的实验室测量及分析[J].石油物探,1997,36(1):21-27.
- [14] 乔玉雷.孔隙流体对岩石物理弹性参数的影响及敏感属性参数优选——以济阳拗陷为例[J].油气地质与采收率,2011,18(3):39-43.
- [15] 单俊峰,刘兴周,李理.古近系致密砂岩“优质储层”预测方法初探[J].特种油气藏,2012,19(5):11-14.
- [16] 于建国.砂砾岩体的内部结构研究与含油性预测[J].石油地球物理勘探,1997,32(S1):15-19.
- [17] 孙建国.岩石物理学基础[M].北京:地质出版社,2006.
- [18] 史譔,杨东全,杨慧珠.岩石的孔隙弹性研究[J].北京大学学报:自然科学版,2000,36(2):214-219.
- [19] 张厚福.石油地质学[M].北京:石油工业出版社,1999.
- [20] Gardner G H, Gardner L W, Gregory A R. Formation velocity and density: the diagnostic basics for stratigraphic traps [J]. Geophysics, 1974, 39(6): 770-780.

编辑 裴磊

欢迎投稿 欢迎订阅