

砂砾岩扩展时间平均方程及应用

——以东营凹陷北部陡坡带为例

董立生^{1,2}, 罗红梅^{2,3}, 王长江², 周伟²

(1. 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074; 2. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 257015; 3. 中国石化胜利油田分公司博士后工作站, 山东东营 257015)

摘要:在陆相断陷盆地陡坡带砂砾岩中,广泛沉积的粒径不等的砾石是影响其速度变化特征的关键因素,基于均匀介质建立的岩石物理模型具有明显的不适用性。为准确计算砂砾岩的纵横波速度并分析其影响因素,通过对东营凹陷北部陡坡带10口取心井100余块超声波岩心样品的选取、测定及实验数据分析,构建包含多岩石组分参数的砂砾岩扩展时间平均方程。利用岩心砾石图像扫描技术确定砾石含量,通过岩石薄片鉴定得到砂级碎屑颗粒、杂基、胶结物以及孔隙流体等岩石组分含量,借助岩心样品的实验室超声波测试得到不同岩石组分的纵横波速度,并代入已构建的扩展时间平均方程得到砂砾岩的纵横波速度。模型检验与实际应用结果表明,利用扩展时间平均方程计算的砂砾岩纵横波速度比Wyllie时间平均方程计算结果的精度提高10%以上,也表明在砂砾岩发育的地层,利用扩展时间平均方程计算的纵横波速度比基于均匀介质建立的岩石物理模型更加准确合理。

关键词:砂砾岩 岩石组分 砾石含量 扩展时间平均方程 岩石物理测试

中图分类号:P631.445

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)06-0055-06

An extended time-average equation for matrix-supported sandy conglomerates and its application: A case study of the northern steep slope zone of Dongying sag

Dong Lisheng^{1,2}, Luo Hongmei^{2,3}, Wang Changjiang², Zhou Wei²

(1. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan City, Hubei Province, 430074, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 3. Postdoctoral Workstation of Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

Abstract: Gravels, with different granularities and compositions, are widely developed in continental faulted basin, which is the key factor that influences the velocity change of sandy conglomerate. It is not suitable to use rock physical model based on homogeneous medium. In order to accurately calculate compressional and shear wave velocities and analyze its influence factors, an extended time-average equation was established considering variable parameters through selecting 100 core samples from 10 wells in the northern steep slope of Dongying sag for ultrasonic measurement and data analysis. The contents of gravel, sand-sized clastic particle, matrix, cement and pore fluid were obtained through rock slice identification, and then compressional and shear wave velocities, obtained through ultrasonic test of core samples in the laboratory, were put into the extended time-average equation to obtain the compressional and shear wave velocities of sandy conglomerate. Model test and actual applications indicate that the calculation accuracy of compressional and shear wave velocities of sandy conglomerate derived from the extended time-average equation is 10% higher than that from Wyllie time-average equation, and the compressional and shear wave velocities derived from the extended time-average equation are more accu-

收稿日期:2015-09-11。

作者简介:董立生(1972—),男,湖北蕲春人,高级工程师,在读博士研究生,从事油气藏描述工作。联系电话:13905462737, E-mail: donglisheng278.slyt@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项“深层油气、非常规天然气成藏规律与有利勘探区评价技术”(2011ZX05008-004)。

rate than those derived from petrophysical model based on homogeneous medium.

Key words: sandy conglomerates; rock components; gravel content; extended time-average equation; petrophysical test

东营凹陷北部陡坡带快速堆积的砂砾岩与其他砂岩相比,具有岩石结构致密、岩石成分复杂、纵向单层厚度大、横向相变快的特点,其强烈的非均质性导致砂砾岩的速度变化较大^[1-5]。现有的岩石物理模型,以及前人通过系统的实验室研究并结合实钻分析构建的、能有效应用于济阳拗陷大部分地区古近系及新近系砂岩的岩石物理模型是基于均匀介质条件,不能准确地描述非均质性极强的致密砂砾岩的速度特征^[6-9]。

受不同岩石组分的影响,深层砂砾岩的岩石物理性质存在较大差异,尤其是砾石的成分和含量直接影响所构成岩石的密度、速度等弹性参数特征^[10-12]。岩石含砾后,各种岩石物理参数之间的关系会变得较为复杂。因此,须尝试根据不同的岩石组分及含量建立有针对性的速度模型,以达到准确识别沉积相带的目的。为此,笔者在分析岩石组构特征的基础上,考虑砂砾岩中包含的不同母岩成分的砾石及含量、砂级颗粒碎屑、胶结物、杂基以及孔隙流体等影响因素,对Wyllie时间平均方程^[13]进行扩展,建立适用于东营凹陷北部陡坡带砂砾岩的时间平均方程,根据该方程可以确定不同沉积相带的地层速度,较好地解决了砂砾岩速度预测不准确及影响因素不明晰的问题。

1 砂砾岩组构特征

砾岩中粒度较大的砾石是造成砂砾岩与常规砂岩在岩石物理特征上存在较大差异的主要原因,因此构建适合于砂砾岩的岩石物理模型须从明确砂砾岩的组构特征入手。利用岩心观察、岩心扫描、铸体薄片等方法对东营凹陷北部陡坡带10口重点井进行砂砾岩组构特征分析,明确研究区沙四段上亚段砾石的成分、结构及分布等特征。结果表明,研究区砂砾岩中的砂级碎屑颗粒成分包括石英、长石和岩屑等,以岩屑为主,岩屑组分又包含不同比例的岩浆岩(主要为花岗岩)、变质岩(主要为花岗片麻岩)及沉积岩(主要为碳酸盐岩)等。

1.1 砾石成分特征

对东营凹陷北部陡坡带砾石的岩心及薄片观察结果表明,其组成主要包括片麻岩、中酸性岩浆岩、沉积岩,少量灰岩、泥岩砾等。平面上,研究区砂砾岩的砾石成分存在较大差异,西部牛227和牛

224等井的花岗岩等中酸性侵入岩砾石含量高、砾石粒径大,一般为30~50 mm,部分超过100 mm,分选极差;东部永929和永933等井钻遇的砾石以花岗片麻岩、中酸性侵入岩为主,砾石粒径稍小,一般为20~35 mm;中部永922和永930等井的岩心含有较多的灰岩砾石,如永922井沙四段上亚段砂砾岩中砾石占15%~70%,主要为石英、结晶岩、长石和鲕粒灰岩等,砾石粒径较小,一般为10~15 mm,磨圆度相对较好,砾石排列具有定向性。

1.2 砂砾岩颗粒结构特征

1.2.1 颗粒结构识别方法

对于砂砾岩中的砂级组分,可采用常规激光粒度或岩石薄片分析方法来研究其颗粒结构特征,得到砂级组分的含量。通过岩石薄片镜下观察可以识别不同粒径的砂级组分颗粒,统计其颗粒的长短轴半径,计算不同粒径砂级颗粒的体积百分比,进而得到粒度分析曲线。

但对于砂砾岩中砾石粒径大于2 mm的颗粒,应用常规粒度分析方法具有局限性,难以准确地表征砾石组分的粒径范围及其在岩心中所占的比例。针对砾石组分的特殊性,采用岩心图像砾石分析方法,首先将岩心剖切为长度为10~50 cm,抛光后扫描获得高分辨率岩心扫描图像;然后通过边缘检测技术和零水平集分割算法对图像目标进行识别,利用灰度识别和目标修正吻合等方法对砾石进行提取;进而统计砾石的个数、面积百分比、最大砾石粒径、最小砾石粒径、平均砾石粒径、分选系数、扁度及磨圆度等参数,根据这些参数可以对砾石进行定量的描述和分析,更直观地认识砂砾岩的颗粒结构特征^[14]。

以东营凹陷北部陡坡带中段胜坨地区坨166井沙四段埋深为3 261 m的岩心为例,其砾石提取及颗粒结构分析结果(图1)表明,岩性为砾质砂岩,砾石含量为63.91%;最大砾石粒径为34.53 mm,平均砾石粒径为6.01 mm;分选中等,分选系数为0.045 7,均匀度为4.26;大扁度砾石较多,占44.16%,以细砾级砾石扁度较大。砾石磨圆度整体较差,磨圆度为36%,为角砾岩,以细砾级砾石磨圆度最差。砾石不规则度为41.67%,砾石排列无定向性。

1.2.2 颗粒结构特征

综合砾石图像扫描及薄片鉴定分析方法可以

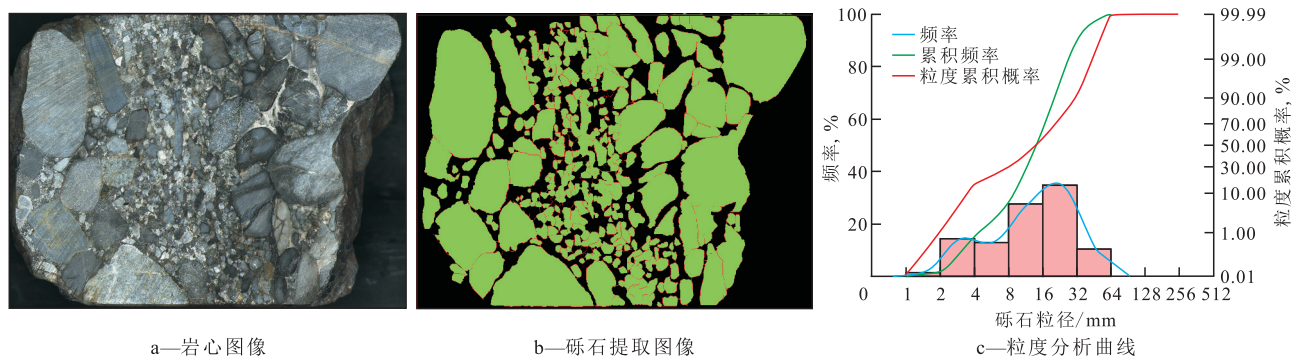


图1 东营凹陷北部陡坡带坨166井岩心图像砾石提取及颗粒结构分析结果

Fig.1 Core image ,corresponding extracted image of gravels and grain size distribution of the core from Well Tuo166 in the northern steep slope ,Dongying sag

较好地表征砂砾岩组分的颗粒结构特征。从单相序分析入手,在粒度累积概率曲线上可以获得一系列的粒度参数,如C值、粒度中值(M_d)、粒度累积概率曲线上1%、5%及16%所对应的粒径(φ_1, φ_5 和 φ_{16})以及平均粒度(M_z)、分选系数(S_o)等;并确定可以很好地反映单相序沉积变化的粒度参数,如 φ_5, M_z, S_o 及砾石含量等。由不同类型单相序的粒度参数与岩石物性的关系(图2)可以看出,随着相序特征的变化,如砾石含量增多、粒度增大, φ_5, M_z 及 S_o 等参数均明显增大,这些粒度参数不同的递增变化趋势,可以很好地反映岩石物性的变化。因此,砂砾岩的砾石含量对其物性特征的影响较大,进而对其岩石物理性质也具有较大的影响。

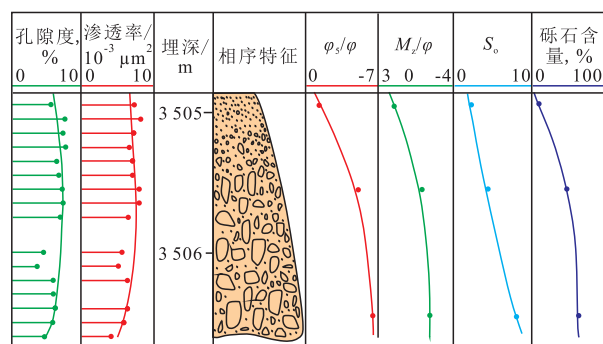


图2 东营凹陷北部陡坡带盐22-22井砂砾岩粒度参数与物性的关系

Fig.2 Relationship between granularity parameters and physical properties of sandy conglomerate of Well Yan22-22 in the northern steep slope, Dongying sag

1.2.3 胶结物分布特征

采用相同的研究方法,对东营凹陷北部陡坡带沙四段上亚段近岸水下扇砂砾岩储层的胶结物含量进行分析,结果表明,其胶结物以方解石和白云石等碳酸盐胶结物为主。不同沉积相带砂砾岩碳酸盐胶结物含量统计结果显示,扇中辫状水道微相

砂砾岩的胶结物含量分布范围较广,扇中水道间微相的胶结物含量多大于10%,胶结作用强烈;扇缘微相砂岩的胶结物含量多大于10%,胶结作用亦非常强烈。砂砾岩中的胶结物含量与其至泥岩层的距离有关,扇中辫状水道微相的砂体与泥岩层距离在0.35 m以内为胶结致密带,胶结物含量大于10%;与泥岩层距离为0.35~1.2 m的砂砾岩胶结程度中等,胶结物含量为5%~10%;与泥岩层距离较远的砂砾岩的胶结程度较弱,胶结物含量小于5%,多为油层。对于扇根亚相,浅部的砂砾岩胶结作用较弱,当埋深大于2 500 m时,常见杂基重结晶或碳酸盐的强烈胶结。分析岩石物性随距断层距离的变化可以发现,在相同埋深条件下,随着砂砾岩距主断裂距离的增大,其孔隙度和渗透率均具有增大的特征,表明除了受埋深影响外,横向上扇根亚相的胶结作用还与距主断裂的距离有关。

通过对砂砾岩组构特征的分析发现,东营凹陷北部陡坡带沙四段上亚段砂砾岩的砾石含量较高,且砾石粒径大小不等,表现出强烈的非均质性。而用于实验室超声波速度测试的岩心样品的直径仅为2.54 cm,测试的可能仅为砂砾岩的砂级组分,或大砾石的一部分,亦或是部分砾石、部分砂级碎屑及填隙物,因此获得的超声波速度测量结果均不能准确地代表砂砾岩本身的速度,须针对每种岩石组分分别进行超声波速度测量来重新构建合理的岩石速度。

2 扩展时间平均方程的构建

2.1 理论模型分析

Wyllie时间平均方程(怀里方程)是指在沉积岩中孔隙度与速度之间存在一种简单的单调关系^[13],

即地震波通过岩石的时间可以等效为通过岩石骨架和孔隙的时间之和。其表达式为

$$\frac{1}{V_p} = \frac{\phi}{V_f} + \frac{1-\phi}{V_m} \quad (1)$$

对于多种矿物组成或多岩性类型的岩石来说, Castagna等将怀里方程进一步表示为多种矿物传播时间的总和即为通过岩石骨架的传播时间^[15]。其中,岩石的纵波速度可以表示为

$$\frac{1}{V_{p_{\text{rock}}}} = \sum_{i=1}^N \frac{X_i}{V_{p_{\text{matrix}_i}}} + \frac{\phi}{V_f} \quad (2)$$

由于在流体中横波是不能传播的,因此岩石横波速度的计算式为

$$\frac{1}{V_{s_{\text{rock}}}} = \sum_{i=1}^N \frac{1-\phi}{V_{s_{\text{matrix}_i}}} \quad (3)$$

2.2 扩展速度模型构建

岩心测试结果表明,砾岩和含砾砂岩的实验室测试速度低于测井数据计算的速度,而砂岩的实验室测试速度与测井数据计算的速度相接近,其因为实验室测试所用的岩心样品未考虑砾石的影响,不能代表整个砂砾岩。因此,对于砂砾岩这种组分复杂、非均质性较强的岩石类型,特别是扇根及扇中亚相的砾石含量较高,仅应用Wyllie时间平均方程进行速度预测不够准确,须综合考虑多种岩石组分才能获得准确合理的砂砾岩纵横波速度。

将砂砾岩岩石组分及含量的影响引入岩石速度计算公式,对Wyllie时间平均方程进行扩展。将砂砾岩骨架进行拆分,分为砾石颗粒以及砾石间的砂级颗粒碎屑、胶结物、泥质杂基等,扩展后的岩石纵横波速度的表达式分别为

$$\sum_{i=1}^N \frac{X_i}{V_{p_{\text{matrix}_i}}} = \frac{A_G}{V_{p_G}} + \frac{A_M}{V_{p_M}} + \frac{A_C}{V_{p_C}} + \frac{A_S}{V_{p_S}} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{X_i}{V_{s_{\text{matrix}_i}}} = \frac{A_G}{V_{s_G}} + \frac{A_M}{V_{s_M}} + \frac{A_C}{V_{s_C}} + \frac{A_S}{V_{s_S}} \quad (5)$$

考虑砂砾岩多组分的岩石骨架及孔隙度等5个组成部分,重新构建一个改进的砂砾岩时间平均方程。其纵横波速度的表达式分别为

$$\frac{1}{V_{p_{\text{com}}}} = \frac{A_G}{V_{p_G}} + \frac{A_M}{V_{p_M}} + \frac{A_C}{V_{p_C}} + \frac{A_S}{V_{p_S}} + \frac{\phi}{V_f} \quad (6)$$

$$\frac{1}{V_{s_{\text{com}}}} = \frac{\left(\frac{A_G}{V_{s_G}} + \frac{A_M}{V_{s_M}} + \frac{A_C}{V_{s_C}} + \frac{A_S}{V_{s_S}} \right)}{1-\phi} \quad (7)$$

其中

$$A_G + A_S + A_C + A_M + \phi = 100\% \quad (8)$$

此外,由于组成砾石的岩石成分不是单一的,

因此依据不同的砾石母岩成分对砾石的纵横波速度进行计算。研究区砂砾岩岩心的统计结果表明,其砾石组分以岩屑为主,岩浆岩、变质岩和沉积岩岩屑均有发现,且沉积岩砾石主要以碳酸盐岩为主,因此,计算砾石的纵横波速度须考虑岩屑中不同岩性岩屑的含量。其表达式分别为

$$\frac{1}{V_{p_G}} = \frac{C_g}{V_{p_g}} + \frac{C_m}{V_{p_m}} + \frac{C_c}{V_{p_c}} \quad (9)$$

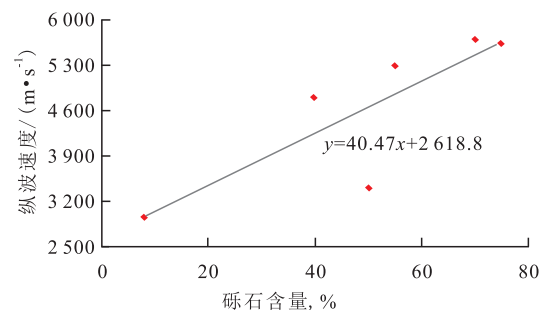
$$\frac{1}{V_{s_G}} = \frac{C_g}{V_{s_g}} + \frac{C_m}{V_{s_m}} + \frac{C_c}{V_{s_c}} \quad (10)$$

其中

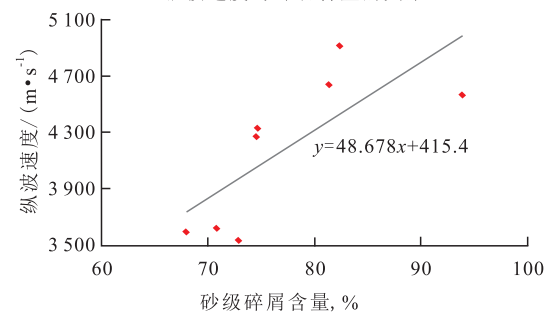
$$C_g + C_m + C_c = 100\% \quad (11)$$

2.3 岩石组分速度确定

针对砂砾岩强烈的非均质性,采用实验室岩心样品测试与趋势拟合相结合的方法对扩展速度模型中各岩石组分的纵横波速度进行计算。以砾石为例,首先选取典型砾石取心井段并钻取砾石样品进行测试,共获取2块完整的砾石岩心样品,其母岩成分分别为石英岩和灰岩,通过对岩心样品进行实验室岩石物理测试,发现砾石本身较常规砂岩的纵横波速度大;然后根据砾石岩心样品的实验室测试速度,进一步利用趋势拟合的方法,得到砾石纵横波速度随砾石含量变化的关系式;进而利用同样的方法得到砂级组分纵横波速度随砂级碎屑含量变化的关系式(图3),以及胶结物、杂基等实验室测试



a—纵波速度与砾石含量的关系



b—纵波速度与砂级碎屑含量的关系

图3 不同岩石组分纵波速度与砾石、砂级碎屑含量的关系

Fig.3 P-wave velocities of gravels and sand-sized clastic particles and their relationship with the percentage

of the corresponding rock component

速度与趋势拟合相结合的纵横波速度随其含量变化的关系式。

通过砂砾岩组构特征分析及各岩石组分纵横波速度的确定,即可利用已建立的扩展时间平均方程对砂砾岩的纵横波速度进行计算,进而得到研究区砂砾岩的纵横波速度的关系式为

$$V_{s_{con}} = 0.5919V_{p_{con}} + 171.68 \quad (12)$$

3 扩展时间平均方程的应用

利用构建的扩展时间平均方程可以计算得到东营凹陷北部陡坡带关键井的砂砾岩纵横波速度,将其与实验室测试和测井数据计算的纵横波速度进行对比(图4)。结果表明,利用构建的扩展时间平均方程计算的纵横波速度与测井数据计算的纵横波速度具有近似的线性关系。而根据实验室测试的纵横波速度拟合的关系式则由于测试的砾岩的纵波速度偏低,导致纵横波速度关系式的斜率减小,因此,利用构建的扩展时间平均方程得到的纵横波速度之间的关系与测井数据得到的结果较为一致。

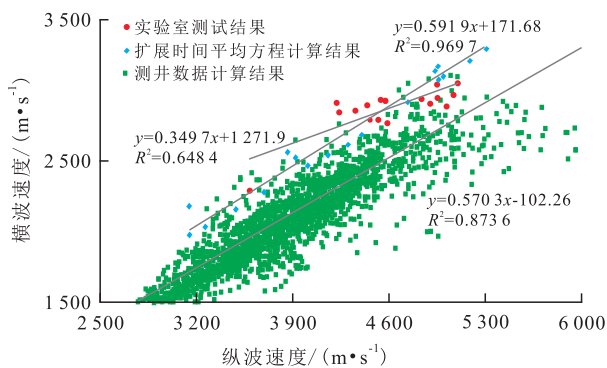


图4 扩展时间平均方程计算的纵横波速度与实验室测试、测井数据计算的纵横波速度对比

Fig.4 Contrast of P-and S-wave velocities obtained respectively from lab test, logging data and the extended time-average equation

对扩展时间平均方程计算结果的误差进行分析,结果表明,利用扩展时间平均方程计算的纵横波速度的相对误差均小于10%,而利用Wyllie时间平均方程计算砂砾岩的纵横波速度时,未将砾石作为岩石骨架的组成部分进行计算。对比利用Wyllie时间平均方程计算的砂砾岩纵横波速度与实验室测试的砂砾岩纵横波速度,发现利用Wyllie时间平均方程计算的纵波速度的误差多超过20%,甚至超过30%,且随着砾石含量的增大,计算结果的误差

也增大;而利用Wyllie时间平均方程计算的横波速度的误差则一般约为20%,且随砾石含量的变化计算结果未发生明显变化。由此可见,重新构建的扩展时间平均方程的计算结果精度更高,特别是纵波速度的预测结果比基于均匀介质的理论模型预测结果的精度显著提高,与未考虑砾石含量等影响、直接利用Wyllie时间平均方程计算结果相比,误差大幅减小。

利用针对砂砾岩构建的扩展时间平均方程,计算研究区坨193和坨764井的横波速度。结果表明,与直接利用Castagna模型^[15]计算的横波速度相比,当砂砾岩不发育时,二者的计算结果较为接近,如坨193井埋深为1500~2400m井段及坨764井;但在砂砾岩发育段(坨193井埋深为2725~2880m井段),利用扩展时间平均方程计算的横波速度与测井数据计算的横波速度更为接近;表明构建的扩展时间平均方程更适用于砂砾岩储集体,并可用于东营凹陷北部陡坡带砂砾岩横波速度的计算。

4 结论

综合考虑砾石、砂级颗粒碎屑、胶结物、杂基以及孔隙流体等参数构建的砂砾岩扩展时间平均方程,可以客观准确地计算砂砾岩,特别是砾石含量较高的扇根及扇中亚相的纵横波速度。从利用扩展时间平均方程计算的砂砾岩纵横波速度与实验室测试及测井数据计算的砂砾岩纵横波速度的误差分析发现,扩展时间平均方程计算的砂砾岩纵横波速度的准确率较高,误差均小于10%;且与未考虑砾石含量等影响,利用Wyllie时间平均方程计算的砂砾岩纵横波速度的对比结果表明,扩展时间平均方程计算的砂砾岩纵横波速度的误差明显减小,表明新构建的砂砾岩扩展时间平均方程更为准确。此外,以构建的扩展时间平均方程为基础,可进一步建立适合于东营凹陷北部陡坡带砂砾岩物性特征及其变化的初始速度模型,通过地震反演等方法得到砂砾岩的纵横波速度,进而实现对砂砾岩中砾石和砂级颗粒碎屑含量的预测,可以更为准确地进行地震资料的反演处理及岩性解释。

符号解释:

V_p ——饱和流体岩石的纵波速度, m/s; ϕ ——岩石的孔隙度; V_f ——孔隙流体的纵波速度, m/s; V_m ——岩石骨架的纵波速度, m/s; $V_{p_{con}}$ ——岩石的纵波速度, m/s; i ——岩石矿

物种类编号; N ——岩石矿物种类总数; X_i ——第 i 种矿物所占的比例, %; $V_{p_{matrix}_i}$ ——第 i 种矿物的纵波速度, m/s; $V_{S_{rock}}$ ——岩石的横波速度, m/s; $V_{S_{matrix}_i}$ ——第 i 种矿物的横波速度, m/s; A_c ——砾石含量, %; V_{p_c} ——砾石的纵波速度, m/s; A_m ——泥质杂基含量, %; V_{p_m} ——泥质杂基的纵波速度, m/s; A_c ——胶结物含量, %; V_{p_c} ——胶结物的纵波速度, m/s; A_s ——砂级颗粒碎屑含量, %; V_{p_s} ——砂级颗粒碎屑的纵波速度, m/s; V_{S_c} ——砾石的横波速度, m/s; V_{S_m} ——泥质杂基的横波速度, m/s; V_{S_c} ——胶结物的横波速度, m/s; V_{S_s} ——砂级颗粒碎屑的横波速度, m/s; $V_{p_{con}}$ ——砂砾岩的纵波速度, m/s; $V_{S_{con}}$ ——砂砾岩的横波速度, m/s; C_g ——岩浆岩砾石的含量, %; V_{p_g} ——岩浆岩砾石的纵波速度, m/s; C_m ——变质岩砾石的含量, %; V_{p_m} ——变质岩砾石的纵波速度, m/s; C_c ——沉积岩砾石的含量, %; V_{p_c} ——沉积岩砾石的纵波速度, m/s; V_{S_g} ——岩浆岩砾石的横波速度, m/s; V_{S_m} ——变质岩砾石的横波速度, m/s; V_{S_c} ——沉积岩砾石的横波速度, m/s。

参考文献:

- [1] 王永诗,李友强.胜利油田东部探区“十二五”中后期勘探形势与对策[J].油气地质与采收率,2014,21(4):5-9.
Wang Yongshi, Li Youqiang. The exploration situation and countermeasures in the late 12th Five-Year Plan in the eastern area of Shengli oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(4): 5-9.
- [2] 王蓬,王艳忠,操应长,等.东营凹陷盐家地区沙四段上亚段砂砾岩体岩石结构特征[J].油气地质与采收率,2015,22(3):34-41.
Wang Peng, Wang Yanzhong, Cao Yingchang, et al. Rock texture characteristics of sandy conglomerate in the upper fourth member of Shahejie Formation in Yanjia area, Dongying sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(3): 34-41.
- [3] 朱筱敏,吴冬,张昕,等.东营凹陷沙河街组近岸水下扇低渗透层成因[J].石油与天然气地质,2014,35(5):646-653.
Zhu Xiaomin, Wu Dong, Zhang Xin, et al. Genesis of low permeability reservoirs of nearshore subaqueous fan in Shahejie Formation in Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5): 646-653.
- [4] 郭智,贾爱林,薄亚杰,等.致密砂岩气藏有效砂体分布及主控因素:苏里格气田南区为例[J].石油实验地质,2014,36(6):684-691.
Guo Zhi, Jia Ailin, Bo Yajie, et al. Effective sand body distribution and its main controlling factors in tight sandstone gas reservoirs: A case study of southern Sulige Gas Field [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(6): 684-691.
- [5] 李春华,毛俊莉,杨一鸣,等.辽河坳陷东部凹陷致密砂岩气藏特征[J].特种油气藏,2014,21(6):15-18.
Li Chunhua, Mao Junli, Yang Yiming, et al. Accumulation features of tight sandstone gas in east sag of Liaohe depression [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(6): 15-18.
- [6] 史譔,黄联捷,沈联蒂.声波时差与岩石岩性参数关系的统计分析研究[J].北京大学学报:自然科学版,1990,26(4):506-512.
Shi Ge, Huang Lianjie, Shen Liandi. Study of the relationships among acoustic travel-time differences and related parameters of a medium using statistical analysis method [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1990, 26(4): 506-512.
- [7] 尹帅,丁文龙,王濡岳,等.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[J].油气地质与采收率,2015,22(3):22-28.
Yin Shuai, Ding Wenlong, Wang Ruyue, et al. Characterization method of v_p/v_s and its relationship with rock physical parameters of continental tight sandstone and shale reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(3): 22-28.
- [8] 马中高.碎屑岩地震岩石物理学特征研究——以济阳坳陷下第三系地层为例[D].成都:成都理工大学,2008.
Ma Zhonggao. Study on the rock physics properties of clastic formation [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008.
- [9] 伍向阳,方华,陈祖安,等.储层砂岩声波速度预测[J].地球物理学进展,1999,14(1):56-63.
Wu Xiangyang, Fang Hua, Chen Zuan, et al. Estimation of wave velocities of sandstones [J]. Progress in Geophysics, 1999, 14(1): 56-63.
- [10] 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.
- [11] Xu S, White R E. A new velocity model for clay-sand mixtures [J]. Geophysical Prospecting, 1995, 43(1): 91-118.
- [12] Gassmann F. Elastic waves through a packing of spheres [J]. Geophysics, 1951, 16(4): 673-685.
- [13] Wyllie M R J, Gregory A R, Gardner L W. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media [J]. Geophysics, 1956, 21(1): 41-70.
- [14] 杨光.岩心图像砾石分析技术在砂砾岩扇体中的应用——以东营凹陷北部陡坡带砂砾岩扇体为例[J].油气地质与采收率,2010,17(5):20-24.
Yang Guang. Analytical technique of gravels in core image and its application in research of conglomerate fan—taking the conglomerate fan, northern steep slope, Dongying Sag as an example [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(5): 20-24.
- [15] 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(5): 571-581.