

岩石沉积学特征与岩石弹性参数的关系

贺芙邦¹, 游俊², 高凤英², 邵龙义¹

(1.中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083; 2.北京阳光杰科科技股份有限公司,北京 100192)

摘要:岩石物理基础研究结果表明,岩石的弹性特征是由岩石内在的矿物成分及含量、孔隙和孔隙流体等物理参数所决定的,而这些物理参数又受岩石的沉积环境、沉积过程和后续成岩作用等因素控制。研究岩石的物理参数与其物性和弹性参数之间的关系,对利用地震弹性参数预测油气储层具有一定的指导意义。通过岩石物理分析技术,系统地分析某扇三角洲成因砂砾岩储层的岩性和孔隙流体等物理参数对岩石密度以及速度和模量等弹性参数的影响,结果表明,纵横波速度比、横波波阻抗、剪切模量和剪切模量与密度乘积等参数对砂砾岩与泥质岩比较敏感,可用于砂砾岩的分布预测;纵横波速度比、拉梅常数与密度乘积能够较好地区分含油和含水砂砾岩,可用于油层预测。进一步研究发现,当地层沉积序列由多沉积旋回细分至单个沉积旋回时,岩石孔隙度与纵波速度和纵波波阻抗的相关性呈现逐步变好的趋势,但它们之间并非简单的线性关系,且受泥质含量影响较明显。

关键词:沉积学特征 岩石物理分析 岩石弹性参数 储层预测 砂砾岩 沉积旋回

中图分类号:P631.44

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2016)01-0061-07

Relationship between rock sedimentary feature and its elastic parameters

He Fubang¹, You Jun², Gao Fengying², Shao Longyi¹

(1.College of Geosciences and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing),
Beijing City, 100083, China; 2.Beijing Sunshine Geo-Tech Co., Ltd., Beijing City, 100192, China)

Abstract: Fundamental research on rock physics indicates that rock elastic features are essentially determined by its physical properties like mineral contents, texture, porosity, pore fluid and so on. However, rock physical properties are closely related to and affected by its sedimentary environment, process and consequent diagenesis history. Study on the influences of rock sedimentary features on its elastic parameters will be beneficial to reservoir prediction using seismic elastic parameters. Taking a fan-delta sandy conglomerate reservoir, the impacts of the rock physical parameters like lithology and pore fluid on its elastic parameters like density, velocity and modulus were analyzed systematically through rock physics analysis technique. The results show that velocity ratio of compressional and shear wave, shear wave impedance, shear modulus and $\mu\rho$ (the product of shear modulus and density) are sensitive to sandy conglomerate and mudstone, which can be used to predict the distribution of sandy conglomerate. The velocity ratio of compressional and shear wave and $\lambda\rho$ (the product of Lamé constant and the density) can be used to discriminate oil layer from water layer and to predict oil layer. Further research demonstrates that the correlations of velocity and impedance with rock porosity are becoming better when the multiple sedimentary cycles of stratigraphic sedimentary sequences are divided finely into single cycle. But their relationships are not linear and affected apparently by shale content.

Key words: sedimentary feature; rock physics analysis; rock elastic parameter; reservoir prediction; sandy conglomerate; depositional cycle

收稿日期:2015-10-30。

作者简介:贺芙邦(1976—),女,青海西宁人,工程师,博士,从事地震岩石物理、地震反演和储层预测等方面的研究。联系电话:15911061065, E-mail:hefubang1231@126.com。

岩性、孔隙度和渗透率是表征含油气储层品质的3个关键岩石物理参数,是油气储量、产能、钻探成败、开发效率和效益的决定性因素。这些岩石物理参数及其非均质性又与岩石的沉积环境、沉积过程和后续的成岩作用过程密切相关。其中,岩性及组合、充填型式(或堆积样式)、粒度、分选、磨圆、原生孔隙和沉积旋回等由母岩、水动力条件、搬运距离、海(湖)平面升降、可容纳空间等沉积环境和沉积条件决定,而孔隙度、渗透率的发育和演化特征与压实、胶结、溶解等成岩作用过程相关。另一方面,结合测井和三维地震资料进行储层预测和油气检测是当今应用最广泛的成熟技术之一,其基本思路是利用各种地震弹性参数的空间变化预测和描述地下储集岩石某种物理参数的变化,如岩石骨架、孔隙、流体甚至温度、压力等,进而实现岩性预测和油气检测的目标。在这个反演过程中,岩石物理模拟与分析技术不可或缺,通过正演模拟,岩石物理分析旨在研究引起地震属性变化的本质因素,寻找和建立岩石物理参数与地震弹性参数之间的确定性关系,以指导地震属性的定量解释^[1]。

随着油气勘探的不断深入,要求岩石物理分析工作须更加精细,比如细分到不同沉积序列和微相单元,因为不同沉积单元内岩石的颗粒大小、接触关系、分选、磨圆状况、韵律层理、泥质含量和成岩作用等岩石沉积学特征均不同。这种储层内部的非均质性不仅影响流体的流动性,也会体现在各种地球物理响应上。因此,利用实验室岩心分析和测井资料,深入分析岩石沉积学特征参数对岩石弹性参数的影响,进而优选油气储层岩性、物性的敏感弹性参数,建立相应的岩石物理解释图版,以期为利用地震资料预测油气储层分布、提高钻探成功率提供依据和参考。

1 岩石物性与弹性参数的沉积学影响因素

岩石的成分、结构、构造以及所处的热力学环境等都会对岩石的岩性、孔隙度、渗透率、密度和速度等物性和弹性参数产生重要影响。

1.1 岩性

不同类型的岩石具有不同的速度和密度,这主要取决于组成岩石的骨架矿物成分、含量、孔隙发育程度和孔隙流体性质。陈颢等给出了几种常见类型岩石的速度范围和对比关系^[2]。

碎屑岩中岩石的速度和孔隙度受泥质含量、成岩作用过程中形成的石英、方解石和自生粘土矿物等胶结物含量的影响较大^[3],影响程度取决于岩石中泥质或粘土与骨架颗粒的接触关系和孔隙充填情况。史谓等研究发现,岩石速度与孔隙度和泥质含量的关系比较复杂^[4]。通过分析地层条件和不同流体相态下辽东湾凹陷岩石纵、横波速度及密度等岩心测试数据和岩石矿物成分、孔隙度等岩心分析数据,李维新等发现岩石纵波速度随粘土矿物含量增加呈明显减小趋势,而纵横波速度比随粘土矿物含量微增呈明显增大趋势;相反,随着石英和长石含量的增加,岩石纵波速度呈明显增大、纵横波速度比呈明显减小的趋势^[5]。

1.2 骨架颗粒特征、分选及充填型式

组成岩石的骨架颗粒大小和分选好坏受搬运距离和水动力条件等控制,同时又直接影响着岩石的孔隙度和渗透率,进而影响岩石的密度和速度等弹性参数。Beard和Weyl通过对美国德克萨斯州墨西哥湾岸区2条中等规模河流Brazos与San Jacinto河流相砂岩样本筛分,将砂岩分成由粗到细8个粒径级别和由好到差6种分选情况共计48个沉积模型,通过物理模拟分析可知:①疏松砂岩的孔隙度与粒度无关,但受分选影响严重;②随着粒径变小和分选变差,渗透率降低;③低颗粒球度和高颗粒棱角性(即低磨圆度)砂岩具有较高的孔隙度和渗透率^[6]。这一模拟结果说明,当组成岩石的颗粒分选变差时,颗粒间排列充填得更加紧密,一方面会减小粒间孔隙空间,另一方面使得骨架变得更加坚硬,导致岩石速度增加。

1.3 岩石密度

密度是表征岩石性质的又一个重要物理参数,岩石密度通常是根据岩石体积物理模型方法,由组成岩石的矿物密度、孔隙度和孔隙流体密度计算得到的。

针对岩石密度与地震波速度关系的相关研究非常多,其中以Gardner等于1974年提出的基于各种岩石平均密度与速度指数关系式^[7]最为经典,应用最广,适用于除盐岩和硬石膏以外的大多数岩石类型。

此外,利用不同岩心的实验室测试数据,Castagna等先后研究了岩石密度与速度及纵波速度、横波速度之间的经验关系式^[8-13]。马中高等利用济阳坳陷不同岩性和不同温压条件的岩心测试结果,提出并建立了岩石密度与纵波速度、横波速度三者的广

义 Gardner 公式^[14]。这些基于实测资料统计分析得到的关系式在其研究区具有很强的实用性。

1.4 孔隙度与孔隙结构

除了组成岩石的矿物和流体外,与沉积、成岩作用密切相关的孔隙度是影响岩石密度的又一个重要参数。一般而言,随着孔隙度的增大,岩石密度减小,二者之间往往具有良好的负相关线性关系。在日常测井资料解释中,利用密度测井计算和解释地层孔隙度非常普遍。

同时,孔隙度也是影响岩石速度的一个重要参数,总体来讲孔隙的存在导致岩石速度的下降,这是因为孔隙度的变化首先会引起岩石密度的改变,岩石的有效弹性模量也会随之变化。尽管岩石速度与孔隙度之间也具有负相关性,但其关系较岩石密度与孔隙度之间的关系更为复杂。

中外很多学者先后研究了岩石速度与孔隙度的关系,并给出相应的经验公式,其中 Wyllie 等的时间平均方程^[15]最常用。但 Wyllie 公式仅适用于高有效应力下(大于 30 MPa)中等孔隙度流体饱和的固结岩石^[11]。若将该经验关系式推广到其他地区和其他地质条件下应用具有局限性,因为这些关系式中隐含着孔隙度是由成岩作用控制的观点,即孔隙度的降低是由于压实、胶结和溶解等作用的原因,而忽略了泥质含量、岩石颗粒分选等沉积因素的影响^[12]。在实际工作中,应该根据研究区实际资料统计、回归建立考虑岩石骨架、泥质含量、孔隙度和孔隙流体等在内的更加复杂的岩石速度、密度与孔隙度、泥质含量及饱和度的关系式。

除孔隙度外,孔隙形态、孔隙结构、孔喉大小和孔隙连通性等岩石微观特征参数也会对岩石弹性参数产生一定的影响。实验分析及研究认为,球形铸模孔在所有孔隙中刚性最强,不容易发生压缩形变,而裂隙性软孔具有更高的可压缩性。正是由于不同形态的孔隙存在压缩性的差异,导致弹性波经过孔隙介质时速度表现出不同的特征。当孔喉大且孔隙连通性好时,孔隙内流体压力很容易达到平衡,用 Gassmann 方程就可以分析孔隙流体对速度的影响;反之当孔隙连通性较差,孔隙压力无法及时与周边孔隙进行平衡,孔隙表现出较强的刚性特征。杨志芳等研究发现,四川盆地须家河组致密砂岩中因含有一定的粘土矿物和微裂隙而表现出低速特征^[16],且速度与孔隙度相关性较差,这可能与软孔隙(微裂隙)有关。周巍等基于 Berryman 散射理论模型,对由固体骨架和孔隙水组成的复合介质进行岩石裂隙对其弹性性质及速度—孔隙度关系

影响的研究,结果^[17]表明:①当孔隙度为 5%~30% 时,随着孔隙纵横比增大,岩石弹性模量和孔隙弹性模量均呈线性增大,泊松比呈非线性减小;②孔隙纵横比对速度—孔隙度关系影响明显,相同孔隙度的岩石,孔隙纵横比越大,速度也越大;③对于相同孔隙度的岩石,孔隙纵横比越小,流体替换时体积模量变化越明显。

1.5 孔隙流体

岩石的弹性性质还与孔隙流体性质密切相关,这是利用地震资料预测油气的理论基础和依据。理论研究和岩心测试分析结果表明:干燥砂岩岩样纵波速度较饱和水和饱和油时低,饱和水时的速度大于饱和油时的速度,饱和气时速度最低。速度随着含油饱和度增大呈变小的趋势,但不同岩性的变化趋势不同^[18]。当含水岩石刚刚被少量气体置换时,尽管此时含气饱和度很低,但岩石纵波速度会急剧下降,纵横波速度比和纵波波阻抗等参数均显著降低;随着含气饱和度的逐渐增大,岩石纵波速度、纵横波速度比和纵波波阻抗等变化幅度较小。正是因为这个原因,饱和气砂层、差气层、含水气层甚至含气水层均在地震剖面上显示出“亮点”特征,给油气勘探带来风险。

1.6 温度和压力

随着沉积过程中岩石埋深逐渐增大,上覆地层压力也随之升高,岩石纵波速度和横波速度增大。这是因为压实作用使得岩石骨架颗粒间接触更加紧密,微裂隙闭合或减少,致使骨架的弹性模量增大,从而引起速度的增大。岩石的速度变化主要取决于骨架有效应力的变化,即上覆地层压力与孔隙压力之差的变化,且几乎总是随着有效应力的增加而增大。疏松砂岩对有效应力比较敏感,随着成岩固结程度的增强,岩石的压力敏感性减弱,但是当其内部裂隙较发育时,致密砂岩也同样存在较强的压力敏感性^[16]。

沉积地层中有时因为欠压实作用形成超压带,由于其内部孔隙压力很高,减少了压实作用的影响,使得地层部分原生孔隙和次生孔隙被保存下来,因而与围岩相比,其表现出明显的低速特征。这是利用地震速度预测异常压力带的理论基础。

同样,随着埋深的增加,地层温度升高,地层岩石速度降低,但降幅与压力有关^[19-20]。当岩石围压较高时,岩石速度呈线性降低,但幅度不大,这可能是在较高围压条件下,岩石内的孔隙基本闭合,孔隙闭合效应减弱,导致速度下降幅度变缓;反之当岩石围压较低时,随压力增加孔隙闭合效应显著,

速度明显下降。当温度超过一定界限时,岩石速度呈非线性降低,表明微裂隙开始热扩张。

2 沉积条件约束下的岩石物理分析应用

利用中国某探区实际资料探讨其三叠系扇三角洲成因砂砾岩储层的岩石沉积学特征对其弹性参数的影响。通过岩石物理分析,识别含油性最好的灰色砂砾岩以及区分油层、水层和干层等流体的敏感弹性参数,建立相应的岩石物理解释图版,以指导研究区含油砂砾岩的地震预测。

2.1 地质概况

研究区为一平缓的单斜构造,地层倾角为 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 。目的层储层岩性主要为砂砾岩、岩屑砂岩和砂质砾岩,砾石多呈次圆状,分选差,砾石成分较复杂,主要为凝灰岩和花岗岩,其次为安山岩、流纹岩、石英岩、硅质岩和霏细岩。砂岩颗粒呈次圆状,分选中等,岩石中碎屑颗粒间接触较紧密。绿泥石化泥质杂基均匀分布于颗粒间,由泥质转化而来的高岭石杂基呈斑状不均匀分布,方解石胶结物也呈斑状不均匀分布。接触类型为线接触,胶结类型为压嵌式。

研究区多口井的岩心孔、渗分析结果表明,目的层孔隙度为 $3.5\% \sim 21.8\%$,平均为 9.54% ,主要为 $6\% \sim 14\%$,所占比例为 82.26% ;渗透率为 $0.02 \times$

$10^{-3} \sim 5\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $105.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。其中,灰色砂砾岩的物性较好,含油性最好,为研究区目的层主要产油层。

2.2 岩石物理敏感弹性参数分析

利用研究区内7口井经过环境校正的纵波速度、密度和横波速度共3条基本弹性曲线,计算得到纵横波速度比(V_p/V_s)、纵波波阻抗(AI)、横波波阻抗(SI)、体积模量(K)、剪切模量(μ)、拉梅常数与密度乘积($\lambda\rho$)、剪切模量与密度乘积($\mu\rho$)等,并绘制这些参数与岩性、流体密切相关的弹性参数曲线。然后将目的层弹性参数曲线分砂砾岩和泥质岩分别进行概率统计,以考察这些弹性参数对砂砾岩这一优势岩性的区分能力。

统计结果(图1)表明:纵横波速度比、横波波阻抗、剪切模量、剪切模量与密度乘积均能较好地区分砂砾岩与泥质岩,二者弹性参数的分布仅有小部分重叠;而纵波速度、纵波波阻抗、体积模量、拉梅常数与密度乘积区分能力差,2种岩性分布范围大部分重叠。这些弹性参数对目的层砂砾岩与泥质岩区分能力的差异是由储层岩石沉积学特征所决定的,即目的层以砂砾岩为主,颗粒接触,分选差,压嵌式胶结,泥质杂基斑状不均匀充填孔隙空间,岩石整体坚硬,可压缩性小,纵波速度较高,因此纵波速度、纵波波阻抗、体积模量、拉梅常数与密度乘积的区分能力差,而纵横波速度比、横波波阻抗、剪切模量、剪切模量与密度乘积等与岩石骨架抗剪切性相关的参数区分能力强。

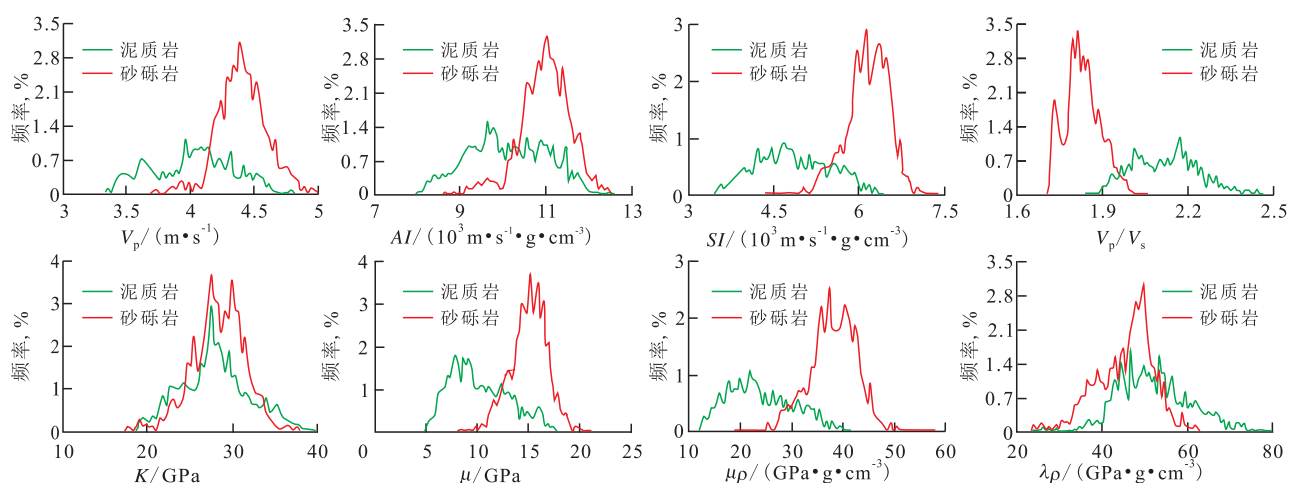


图1 研究区目的层砂砾岩和泥质岩弹性参数频率统计结果

Fig.1 Histograms of elastic parameters of conglomerate and argillaceous rocks in the intended interval in the study area

由研究区目的层含油气砂砾岩、含水砂砾岩与干层的弹性参数分布范围(图2)可以看出,纵横波速度比及拉梅常数与密度乘积能够较好地区分含油和含水砂砾岩,含油砂砾岩的纵横波速度比和拉

梅常数与密度乘积主值分布范围明显低于含水砂砾岩;纵波速度、纵波波阻抗和体积模量可较好地识别干层,干层这3个弹性参数的主值大于含水砂砾岩。含水、含油砂砾岩及干层的横波波阻抗、剪

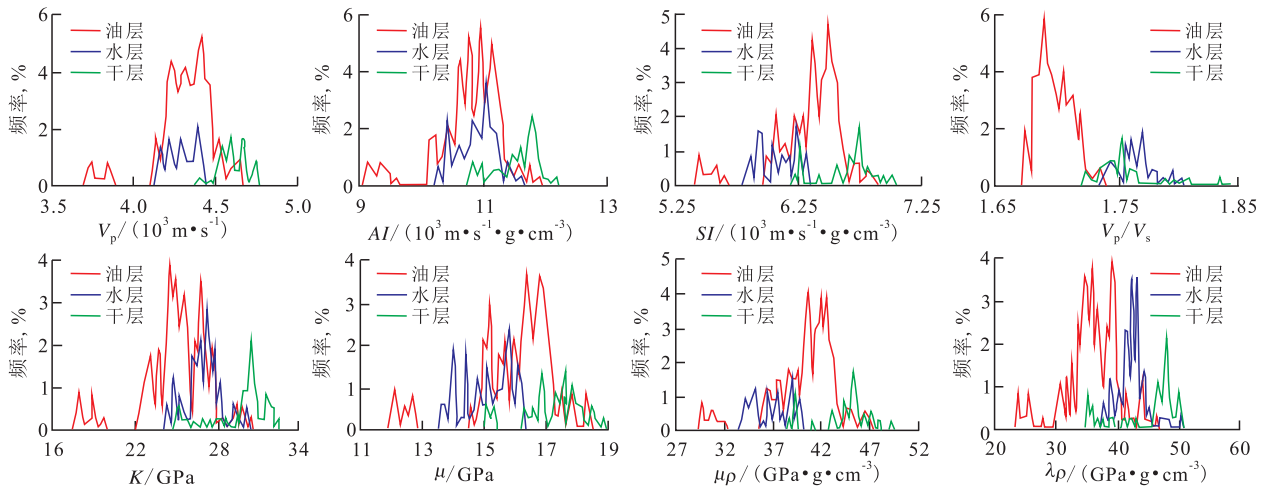


图2 研究区目的层油层、水层及干层各弹性参数频率统计结果

Fig.2 Histograms of elastic parameters of the oil layer, water layer and dry layer in the intended interval in the study area

切模量与密度乘积及剪切模量的分布范围部分或大部分重叠。

2.3 岩石物理解释图版的建立

在研究区目的层储层岩石沉积学特征分析的基础上,利用岩石物理正演模拟方法,通过分析含油气储层的岩性、孔隙度、流体性质及饱和度等参数的变化在各弹性参数或双参数交会图的不同响应特征,研究目的层储层岩石物理参数变化与弹性参数变化之间的对应关系,并建立二者之间的定量解释图版。

岩性识别图版 根据研究区目的层储层岩性与弹性参数之间关系,绘制岩性识别图版(图3)。从图版中可以看出:目的层砂砾岩具有中纵波波阻抗(9 000~13 000 $m \cdot s^{-1} \cdot g \cdot cm^{-3}$)、低纵横波速度比(小于1.9)特征,而随着泥质含量的增加,则呈现中低纵波波阻抗、高纵横波速度比的特征。

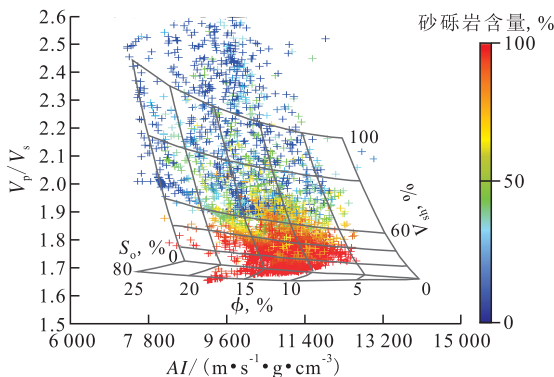


图3 研究区目的层岩性识别图版

Fig.3 Rock physics template for lithology discrimination of the intended interval in the study area

流体识别图版 利用类似的方法建立研究区目的层储层流体识别的图版(图4),分析图版发现,在纵波波阻抗与纵横波速度比交会图上,目的层含

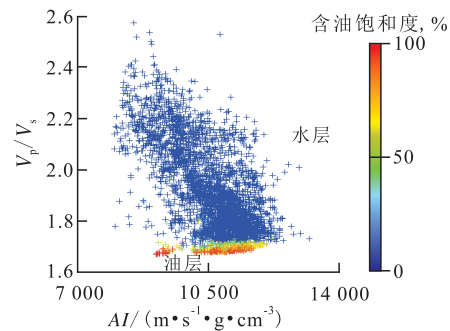


图4 研究区目的层储层流体识别图版

Fig.4 Rock physics template for fluid identification of the intended interval in the study area

油饱和度大于40%的砂砾岩的纵波波阻抗为9 000~12 000 $m \cdot s^{-1} \cdot g \cdot cm^{-3}$,纵横波速度比约为1.7。

孔隙度解释图版 研究区多口井的测井和岩心分析化验资料表明,目的层岩石孔隙度与密度相关性较好,可利用密度曲线求取孔隙度,在此基础上进一步分析不同沉积序列的岩石孔隙度与纵波速度、纵波波阻抗之间的关系。

分析研究区A井纵波速度与孔隙度的交会图发现,其目的层3 177~3 249 m井段砂砾岩与泥质岩混杂堆积,分选较差,交会图上数据点比较分散(图5a),说明孔隙度与纵波速度的相关性较差;当剔除泥质岩隔夹层,仅利用目的层中下部3 200~3 249 m砂砾岩比较发育层段的数据进行交会时,孔隙度与纵波速度的相关性明显变好(图5b)。

根据研究区目的层沉积相研究成果可知,A井3 203~3 208和3 213.6~3 218.5 m井段分别为单向上变细的分流河道和单向上变粗的河口坝沉积(图6a),因此利用这2个沉积旋回的数据来研究岩石孔隙度与纵波速度和纵波波阻抗的关系。单向上变细的分流河道砂砾岩的孔隙度与纵波速

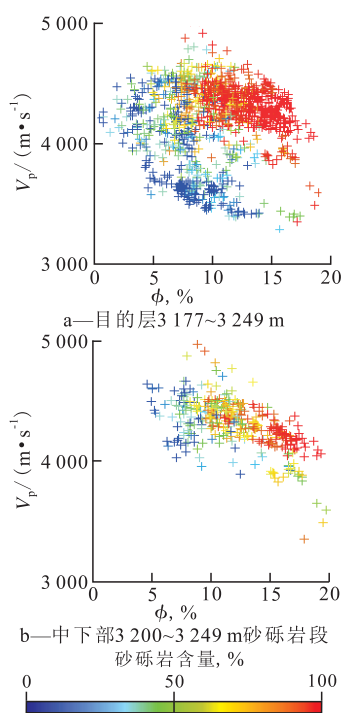
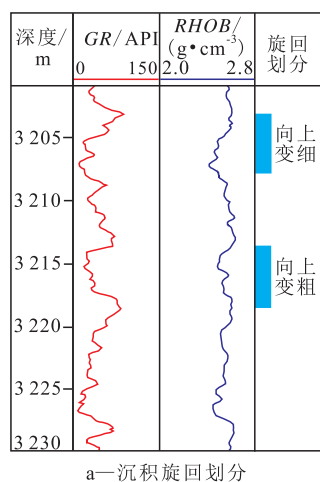


图5 A井不同沉积序列孔隙度与纵波速度的关系
Fig.5 Comparison of the relationships between porosity and compressional velocity of different depositional sequences of Well A



a—沉积旋回划分

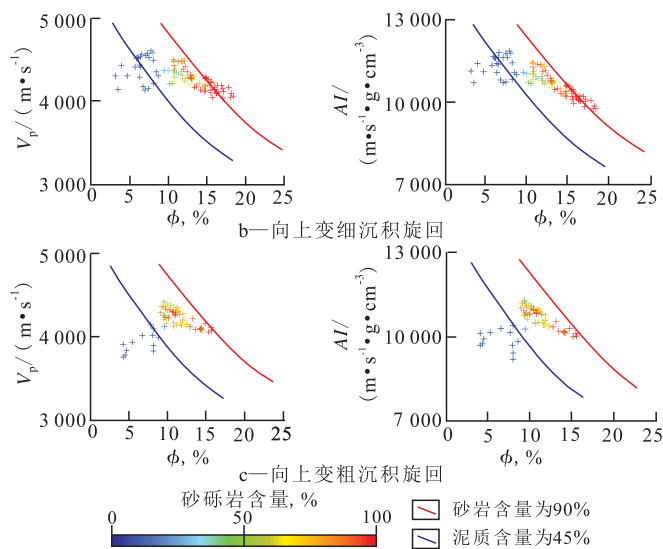


图6 A井向上变细和向上变粗单一沉积旋回孔隙度与纵波速度和纵波波阻抗的关系

Fig.6 Relationships of compressional wave velocity and acoustic impedance with porosity in single fining-upward cycle and in single coarsening-upward cycle of Well A

充填情况复杂、分选差,而较小或单一沉积旋回中岩石充填结构相对简单、岩石分选性较好的客观地球物理响应。

3 结束语

通过系统分析岩石沉积学特征参数与其弹性参数的关系可知,地层岩石的矿物组成、粒径、分

度、纵波波阻抗之间并非简单的线性关系,而是随着泥质含量增加,孔隙度减小,数据点由净砂岩模型线(砂岩含量为90%)逐渐向泥质砂岩模型线(泥质岩含量为45%)移动,二者间的关系受泥质含量影响明显(图6b)。对于向上变粗的河口坝沉积,其孔隙度与纵波速度、纵波波阻抗之间也不是简单的线性关系,受泥质含量的影响更加明显(图6c)。对于孔隙度大于10%的砂砾岩段,孔隙度与纵波速度具有一定的回归关系,二者的相关系数约为0.8, A井分流河道和河口坝沉积旋回中孔隙度与纵波速度的多项式拟合关系式分别为

$$\phi = 29.94v_p^2 - 271.1v_p + 624.6 \quad R^2 = 0.803 \quad (1)$$

$$\phi = 78.35v_p^2 - 677.1v_p + 1473 \quad R^2 = 0.785 \quad (2)$$

因此,利用岩石孔隙度与岩石纵波速度之间的多项式拟合关系式,就可以通过地震反演得到的纵波速度数据体,进一步换算得到孔隙度数据体,从而实现孔隙度的地震定量预测。

综上所述,随着地层沉积旋回的精细划分,岩石的孔隙度与纵波速度的相关性呈现逐步变好的趋势,这是由于较厚或多沉积旋回地层中岩石骨架

选、磨圆、孔隙度、孔隙结构、流体性质、饱和度、温度、压力等微观和宏观物理特征的差异,引起岩石密度、体积模量、速度等弹性参数的变化,使得地震资料表现出不同的弹性响应特征。利用这些地震弹性特征参数进行含油气储层岩性预测和流体检测时,须赋予各种地震属性及其变化确切的地质和地球物理涵义,可以通过基于测井、岩心试验、测试资料的岩石物理建模和正演分析完成。在岩石物

理分析、利用地震资料进行岩性、孔隙度和含油气性预测和解释时,应该紧密结合沉积岩石学分析进行。实际资料应用结果也表明,针对不同沉积相带或沉积序列进行岩石物理分析和地震弹性参数与油藏属性参数关系分析时,随着沉积旋回级别变小、沉积相单元趋向单一,二者间的关系更加明确,基于这样的解释图版得到的岩性预测和油气层解释才会更加准确,从而提高钻探成功率。研究区后续的钻探结果也进一步证实了岩石沉积学指导下建立的岩石物理解释图版应用效果良好。

参考文献:

- [1] He F B, You J, Chen K Y. Gas sand distribution prediction by prestack elastic inversion based on rock physics modeling and analysis[J]. *Applied Geophysics*, 2011, 8(3): 197-205.
- [2] 陈颢, 黄庭芳, 刘恩儒. 岩石物理学[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 2009.
Chen Yong, Huang Tingfang, Liu Enru. *Rock physics*[M]. Beijing: Press of University of Science and Technology of China, 2009.
- [3] Per A, Jack D, Gary M, et al. Rock physics diagnostic of north sea sands: link between microstructure and seismic properties [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(17): 2 761-2 764.
- [4] 史譔, 杨东全. 岩石波速和孔隙度、泥质含量之间的关系研究[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2001, 37(3): 379-384.
Shi Ge, Yang Dongquan. The regression analysis study on velocity and porosity, and clay content of rocks[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2001, 37(3): 379-384.
- [5] 李维新, 史譔, 王红, 等. 岩石物理弹性参数规律研究[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(5): 1 380-1 385.
Li Weixin, Shi Ge, Wang Hong, et al. The study on relationships of elastic properties of rock physics [J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(5): 1 380-1 385.
- [6] Beard D C, Weyl P K. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand [J]. *AAPG Bulletin*, 1973, 57(2): 349-369.
- [7] Gardner G H F, Gardner L W, Gregory A R. Formation velocity and density—the diagnostic basics for stratigraphic traps [J]. *Geophysics*, 1974, 39(6): 770-780.
- [8] 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.
- [9] Han D H, Nur A, Morgan D. Effects of porosity and clay content on wave velocity in sandstones [J]. *Geophysics*, 1986, 51(11): 2 093-2 107.
- [10] Smith G C, Gidlow P M. Weighted stacking for rock property estimation and detection of gas [J]. *Geophysical Prospecting*, 1987, 35(9): 993-1 014.
- [11] Mavko G, Mukerji T, Dvorkin J. *The rock physics handbook: tools for seismic analysis in porous media* [M]. New York: Cambridge University Press, 1998.
- [12] 韩文功, 李红梅, 杨云岭, 等. 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.
Han Wengong, Li Hongmei, Yang Yunling, et al. The laboratorial measurement and analysis for the elastic and physical parameters of drilling cores in Jiyang Depression [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 1997, 36(1): 21-27.
- [13] 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.
- [14] 马中高, 解吉高. 岩石的纵、横波速度与密度的规律研究[J]. *地球物理学进展*, 2005, 20(4): 905-910.
Ma Zhonggao, Xie Jigao. Relationship among compressional wave, shear wave velocities and density of rocks [J]. *Progress in Geophysics*, 2005, 20(4): 905-910.
- [15] Wyllie M R J, Gregory A R, Gardner L W. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media [J]. *Geophysics*, 1956, 21: 41-70.
- [16] 杨志芳, 曹宏, 姚逢昌, 等. 复杂孔隙结构储层地震岩石物理分析及应用[J]. *中国石油勘探*, 2014, 19(3): 50-56.
Yang Zhifang, Cao Hong, Yao Fengchang, et al. Seismic rock physical analysis of complex porous reservoir and its application [J]. *China Petroleum Exploration*, 2014, 19(3): 50-56.
- [17] 周巍, 杨红霞. 岩石裂隙对岩石的弹性性质及速度-孔隙度关系的影响[J]. *石油地球物理勘探*, 2005, 40(3): 334-338.
Zhou Wei, Yang Hongxia. Effects of fractures of rock on elastic property of rock and velocity-porosity relation [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2005, 40(3): 334-338.
- [18] 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.
Qiao Yulei. Influence on petrophysics elastic parameter by pore fluid and optimization of sensitive attribute parameter—case of Jiyang depression [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2011, 18(3): 39-43.
- [19] 马中高, 伍向阳, 王中海. 有效压力对岩石纵横波速度的影响[J]. *勘探地球物理学进展*, 2006, 29(3): 183-186.
Ma Zhonggao, Wu Xiangyang, Wang Zhonghai. Effect of effective pressure on compressional and shear wave velocities [J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2006, 29(3): 183-186.
- [20] 左建平, 谢和平, 周宏伟, 等. 不同温度作用下砂岩热开裂的实验研究[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(4): 1 150-1 155.
Zuo Jianping, Xie Heping, Zhou Hongwei, et al. Experimental research on thermal cracking of sandstone under different temperature [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(4): 1 150-1 155.