

# 松辽盆地北部营城组火山岩 岩石弹性参数测试及特征分析

姜传金\* 戴世立 吴杰 刘永胜 周恩红

(中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院,黑龙江大庆 163712)

姜传金,戴世立,吴杰,刘永胜,周恩红. 松辽盆地北部营城组火山岩岩石弹性参数测试及特征分析. 石油地球物理勘探,2014,49(5):916-924.

**摘要** 火山岩岩性、储层的复杂性,导致火山岩岩石物理基础研究难度较大。为加强火山岩岩石物理基础研究,提高火山岩储层地震预测的精度,本文模拟实际地层温度、压力条件,测量16种岩性、105块岩样在干燥、饱和气和饱和水状态下的纵波速度、横波速度和密度等参数,研究温度、(静岩)压力、孔隙流体压力、不同流体饱和度对波速的影响,并进行不同岩性、含不同流体性质的岩石物理参数特征分析,以期直接进行火山岩岩性、储层的识别。研究结果表明:利用密度和纵波速度交会可以很好地区分基性、中性和酸性火山岩岩性;纵波速度和纵横波速度比交会可以很好地区分火山岩中的水层和气层。

**关键词** 岩性识别 火山岩 岩石物理参数 松辽盆地 营城组

**中图分类号**:P631 **文献标识码**:A

## 1 引言

火山岩气藏开发作为一个新领域,在天然气工业中占有越来越重要的地位。自21世纪初相继在松辽盆地北部(大庆探区的XS1井)及南部(吉林探区的CS1井)的营城组火山岩中获得商业气流,拉开了松辽盆地深层天然气勘探的序幕<sup>[1]</sup>。如今松辽盆地北部徐家围子断陷的下白垩统营城组火山熔岩、火山碎屑岩和凝灰质砂砾岩是重要的勘探目的层,已有近百口探井获商业气流或见气显示,显示了满凹含气的勘探前景<sup>[2,3]</sup>。

火山岩受火山喷发和成岩过程等因素的影响,岩石类型多、岩性复杂。与沉积岩储层相比,火山岩储层非均质性强,分布规律不明显。火山岩岩性、储层的复杂性,导致火山岩岩石物理基础研究难度较大。地震岩石物理研究<sup>[4~7]</sup>试图建立地球物理勘探所获得的物理量与地下岩石参数的定量对应关系,了解储层流体变化所引起的地震响应变化,以降低

流体预测解释的风险。

现今火山岩岩石物理研究主要致力于对依据测井资料反映的岩石物理参数规律进行统计分析,并对储层敏感特征参数进行优选,以指导火山岩反演参数的选择和属性提取,从而实现火山岩储层的准确预测。Yang等<sup>[8]</sup>利用剪切模量和密度交会分析识别火山岩岩性,在叠前反演中取得较好效果;Wu等<sup>[9]</sup>利用纵横波速度比和纵波阻抗交会图板有效区分了火山岩含气储层和含水储层;陈树民等<sup>[10]</sup>利用体积模量和剪切模量双参数空间有效识别储层流体。据笔者了解,在现阶段还没有大量实验室岩样测试研究,能确保岩石物理分析结果具有普遍规律和代表性。为此,本文通过模拟实际地层压力和温度条件,采用超声脉冲投射法完成了105块岩石样品的测试,在此基础上利用获得的共664组数据,分析火山岩地层纵横波速度和密度的影响因素以及了解不同岩性、含不同流体性质的岩石物理参数分布规律,进而优选对火山岩岩性、储层敏感的参数,为火山岩地震预测奠定基础。

\* 黑龙江省大庆市让胡路区中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院地震解释一室,163712。Email:jiangchj@petrochina.com.cn

本文于2013年7月29日收到,最终修改稿于2014年7月29日收到。

本研究受国家重点基础研究发展计划“973”项目(2009CB219307)资助。

## 2 火山岩岩石样品的优选

为了保证试验规律的可靠性,对松辽盆地北部徐家围子、双城、古龙及林甸等四个断陷内的 38 口

典型井的取心资料进行了分析,优选了 16 种岩性、105 块样品开展测试,共获得 664 组数据,以确保岩石物理分析结果的准确。岩石样品包含了酸性岩、中性岩和基性岩等主要火山岩类型和少量砂砾岩,每种岩性按照试气结果分为干层、差气层、气层和

表 1 火山岩岩石样品选取统计表

序号	岩性	取样块数	分区取样块数及含流体情况		
			徐家围子地区	双城地区	古龙+林甸地区
1	流纹岩	10	8(4,水层;2,差气层;2,气、水同层)	2(2,干层)	
2	流纹质凝灰熔岩	4	2(2,差气层)	2(2,差气层)	
3	英安岩	4		4(4,差气层)	
4	粗面岩	6	6(2,干层;4,气层)		
5	安山岩	12	8(4,差气层;2,含水气层;2,气层)	4(2,干层;2,差气层)	
6	安山质角砾岩	2	2(2,差气层)		
7	玄武岩	10	10(2,水层;2,气、水同层;2,差气层;4,干层)		
8	含角砾凝灰岩	4	2(2,差气层)		2(2,气层)
9	沉凝灰岩	5	5(1,含水气层;4,干层)		
10	砾岩	6		4(4,干层)	2(2,干层)
11	泥岩	3	2(2,干层)		1(1,干层)
12	凝灰岩	18	13(6,干层;4,水层;3,气层)	3(1,干层)	2(2,差气层)
13	火山角砾岩	9	7(2,水层;3,气、水同层;2,干层;)	2(1,干层;1,水层)	
14	集块岩	2	2(2,气层)		
15	安山质玄武岩	6	4(4,差气层)		2(2,干层)
16	砂岩	4	4(1,干层;2,水层;1,气、水同层)		

水层等四种储层类型(表 1)。

## 3 火山岩岩石样品参数测定

### 3.1 岩石样品的密度和孔隙度测量

首先用游标卡尺测定圆柱形样品的直径和高度,采用电子天平测定干岩样的重量  $W$ ,并用测定的几何尺寸计算岩样的体积  $V$ ,然后利用  $\rho = W/V$  计算岩样的密度  $\rho$ 。

采用水饱和方法测量岩石样品的孔隙度。先测量干岩样重量  $W_{干}$  和体积  $V_{干}$ ;接着在真空状态下用电子天平测定样品完全饱和纯净水情况下的岩样重量  $W_1$ ;然后利用  $W_2 = W_1 - W_{干}$  得到样品中含水的重量  $W_2$ ;再用  $V_1 = W_2/\rho_2$  (纯净水密度)得到孔隙体积  $V_1$ ;最后用  $\phi = V_1/V_{干}$  得到岩样的孔隙度  $\phi$ 。

对 105 块样品进行了地面干燥条件下孔隙度和密度测量,结果表明,样品的孔隙度  $\phi$  主要分布范围为 2%~15%,分布重心偏向于小孔隙度端。样品的干岩石密度  $\rho$  主要分布范围为 2.2~2.7g/cm<sup>3</sup>,分布重心偏向于高密度端。 $\phi$ - $\rho$  交会结果(图 1)显示两

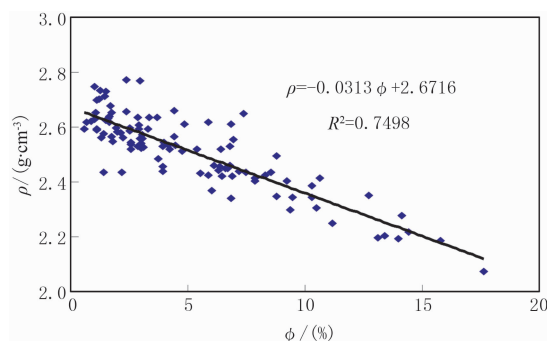


图 1  $\phi$ - $\rho$  交会图

$R$  为相关系数

者之间有良好的线性负相关性。

### 3.2 岩石样品的纵、横波速度测量

采用超声脉冲透射法进行岩石纵、横波速度测定,测试系统(图 2)具有温度、压力、孔隙流体压力、流体饱和度独立控制功能,最高温度可达 150°C。加热采用高压容器内加热方式,并尽可能使高压容器内温度场均匀,温度控制精度为 1°C。最大压力可达 150MPa,最大孔隙压力可达 40MPa(气体最大压力为 30MPa)。压力测定使用高精度压力传感器,传

感器使用前用 0.4 级的精密压力表标定,分辨率为 0.1MPa。

通过纵波传感器激发、接收纵、横波测量岩石样品的纵、横波速度,通过辨认接收波形中纵、横波的到达(波形)时间确定纵、横波走时。声波走时为声

波在样品和仪器系统中传播时间的总和,其中在仪器系统中的传播时间又称为系统基时,系统基时通过对标准材料金属铝进行标定而确定。根据样品长度和超声波通过样品的时间,可通过岩石波速=岩样长度/(声波到时-系统基时)得到样品的波速。

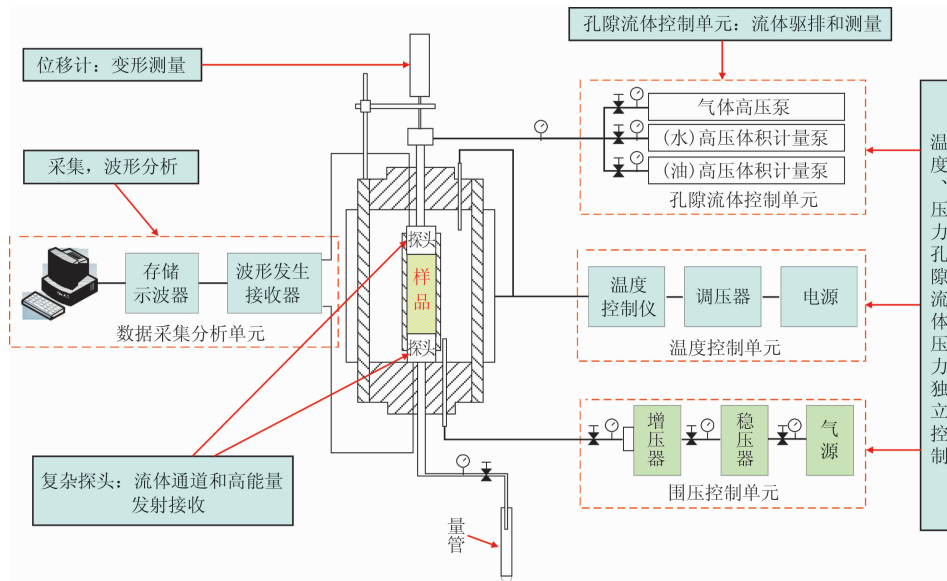


图 2 高温高压岩石物理参数测定系统示意图

## 4 火山岩岩石物理参数测量结果误差分析

### 4.1 火山岩岩石物理参数测量误差分析

本测量系统选用金属铝作为标准材料标定声波,铝的纵、横波速度标准值分别为 6350m/s、3120m/s,本系统测量铝的纵、横波速度范围分别为 6340~6365m/s、3115~3125m/s,相对误差为 ±0.23%,因此系统的基时误差较小。

此外,利用实际的岩石材料,把波速测量系统与商业材料实验机 MTS 上的超声测量系统进行了比

较,两者波速差别在 1% 以内。这说明在高压条件下,该高压波速测量系统与商业材料实验机 MTS 上的超声测量系统具有较好的可比性。

为了考察系统测量的可靠性,对系统进行了重复测量。表 2 为两个砂岩样品的重复测量数据,表明重复测量数据间误差远小于 1%。可见,该高压波速测量系统测量重复性好,具有较好的可靠性。

### 4.2 火山岩岩石物理参数理论误差分析

按照误差传递理论,波速测量误差为长度测量误差、到时测量误差和系统基时测量误差的总和。样品长度的理论测量精度为 0.01mm,对于长度为 30mm 的样品,其长度引起的相对误差应小于 0.04%。

表 2 两个砂岩样品的重复测量数据

样品	加载	$V_p/(m \cdot s^{-1})$	$V_s/(m \cdot s^{-1})$	测量条件
砂岩样品 (230#)	第一次加压	4527	2922	围压为 50MPa
	第二次加压(5 分钟后)	4534	2923	
	第三次加压(50 分钟后)	4531	2926	
砂岩样品 (226#)	第一次加压	4498	2841	围压为 50MPa
	第二次加压(5 分钟后)	4504	2864	
	第三次加压(50 分钟后)	4511	2866	

注:  $V_p$ 、 $V_s$  分别为纵、横波速度

声波到时是通过辨认采集波形中纵、横波的到达波形确定的,而采集的波形是处理后的综合结果,其误差是设备噪声误差和声波起跳识别误差的总和,这两者的总误差为  $0.02 \sim 0.04 \mu\text{s}$ 。保守估计,25mm 长的岩样中声波通过时间至少为  $10 \mu\text{s}$ ,则走时引起的误差应小于  $0.4\%$ 。系统基时是指声波仪器系统中的传播时间总和,包括了声波在传感器缓冲块中的传播时间。通过对系统的标定确定系统基时,标定方法包括传感器的直接对接,或用标准材料标定,其误差由标定精度确定,参考上述铝样标定数据,可确定系统基时相对误差小于  $0.1\%$ 。因此,本系统测量的波速相对误差应小于  $0.54\%$ 。

密度测量误差为重量测量误差与体积测量误差之和。重量测量理论精度为  $0.001\text{g}$ ,而样品重量一般大于  $10\text{g}$ (多在  $20\text{g}$  以上),显然重量测量相对误差远小于  $0.10\%$ 。体积测量相对误差为长度测量误差的 3 倍,则体积测量相对误差小于  $0.12\%$ 。因此,密度测量相对误差应小于  $0.22\%$ 。

## 5 火山岩岩石样品弹性参数敏感因素分析

### 5.1 压力、温度对样品参数的影响

影响速度变化的压力是上覆岩层重量引起的静压力(惯称为围压)和地层的流体压力(或称为孔隙流体压力)<sup>[11,12]</sup>。随着地层深度的增加,上覆岩层的压力和地层的流体压力也增大,即深度不同波速不同。整体上,纵波速度(图 3)和横波速度(图 4)随围压增加而增大,纵波速度变化幅度大致为  $200\text{m/s}$ ,横波速度变化幅度为  $50\text{m/s}$ ;在低压段由于孔隙闭合的效应,因此岩石的波速随压力的增加较快(略有非线性增大),到高压段由于岩石的孔隙基本闭合,岩石波速随压力的变化变缓,逐步过渡到(近似)线性增大。

从变化趋势看,孔隙压力的效应与围压正好相反,即纵、横波速度随孔隙压力增加而减少(图 5、图 6),这种变化大致是线性的,纵、横波速度变化幅度分别为  $140\text{m/s}$  和  $17\text{m/s}$ 。

温度对纵、横波速度也有较大影响,即高温下纵、横波速度随压力变化趋势线明显较常温下的趋势线低(图 7、图 8),在  $25^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$  范围内,纵、横波速度变化量分别为  $103 \sim 117\text{m/s}$  和  $82 \sim 105\text{m/s}$ 。

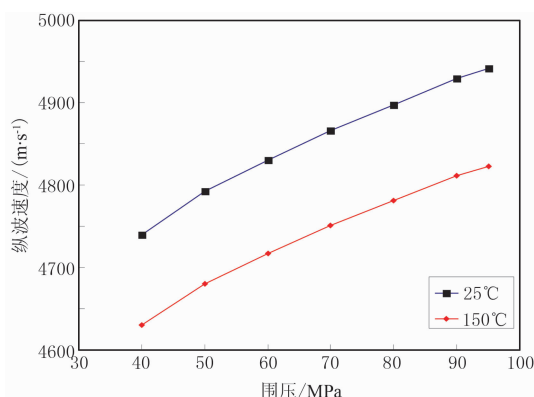


图 3 安山岩样品(31#)纵波速度随围压变化规律

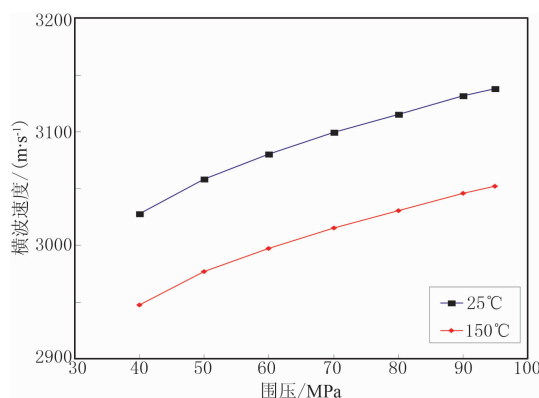


图 4 安山岩样品(31#)横波速度随围压变化规律

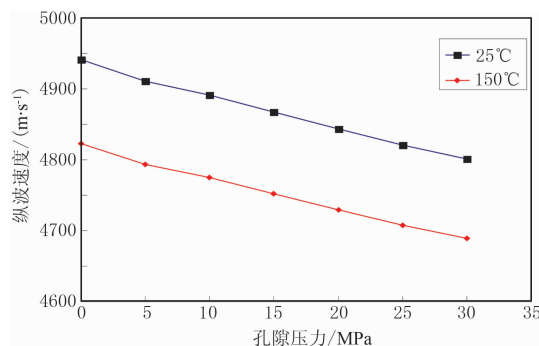


图 5 安山岩样品(31#)纵波速度随孔隙压力变化规律

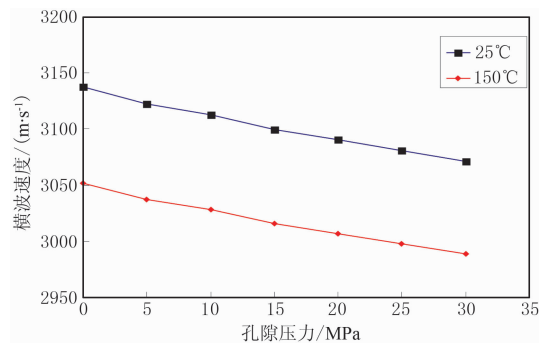


图 6 安山岩样品(31#)横波速度随孔隙压力变化规律

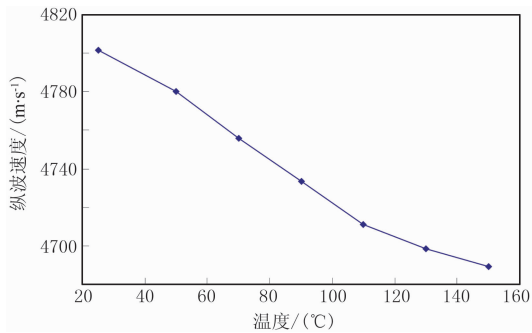


图7 安山岩样品(31#)纵波速度随温度变化规律

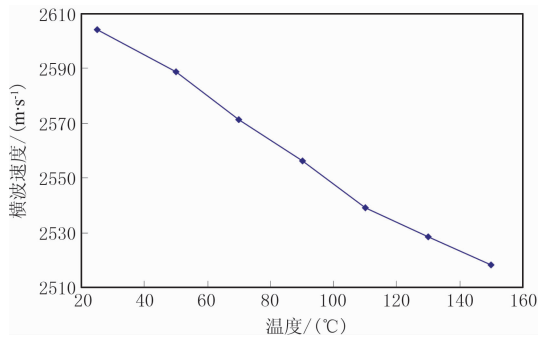


图8 安山岩样品(31#)横波速度随温度变化规律

## 5.2 孔隙度对样品参数的影响

明确孔隙度与火山岩弹性参数的关系对提高储层预测精度至关重要。本文利用火山岩样品测量数据,分析了纵、横波速度与孔隙度的关系。纵波速度随孔隙度增加而变小(图9),且对流体变化较敏感,孔隙度越大饱和水和饱和气纵波速度数据差异越大,敏感度依赖于孔隙度的大小。横波速度随孔隙度增加而变小,对应不同的孔隙度样品,含不同流体的横波速度值差别不大(图10),对流体的变化不敏感。

## 5.3 气体饱和度对样品参数的影响

为了从理论上分析流体饱和度对岩石波速的影响,本文对不同岩性、不同含气饱和度进行实验室测试。研究表明:随着含气饱和度增加,岩石的纵波速度非线性减小(图11);在接近饱和气段,速度的变化相对缓慢;在接近饱和水段,速度的变化相对较快;沉凝灰岩从饱和水到饱和气纵波速度变化幅度大致为279m/s,安山岩变化幅度大致为182m/s,变化幅度随样品不同而有所差别,可能受样品孔隙度控制。岩石的横波速度随着含气饱和度增加略有增加(图12),沉凝灰岩和凝灰岩变化幅度分别为36m/s和28m/s。

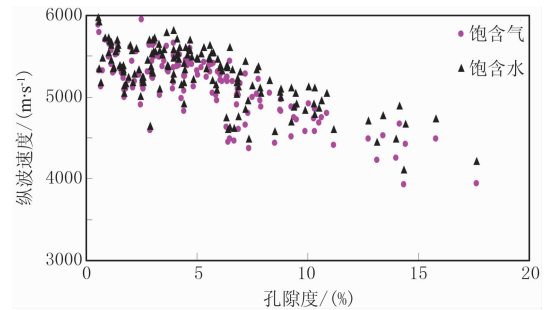


图9 实验样品纵波速度与孔隙度关系

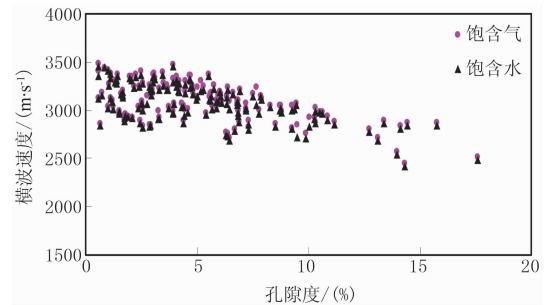


图10 实验样品横波速度与孔隙度关系

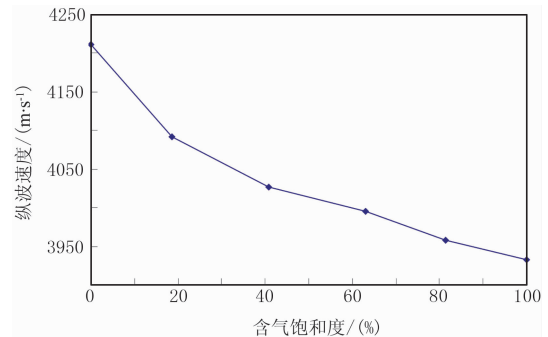


图11 沉凝灰岩样品(51#)含气饱和度与纵波速度关系

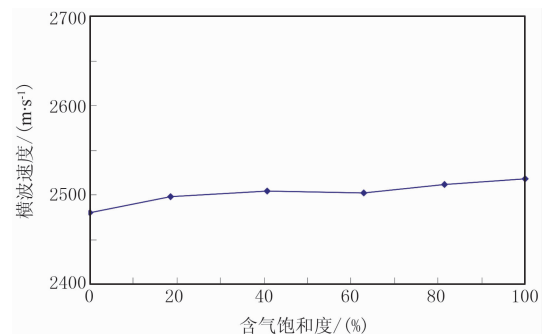


图12 沉凝灰岩样品(52#)含气饱和度与横波速度关系

## 5.4 流体置换对岩石物理参数变化分析

为了从理论上分析流体饱和度对岩石波速的影响,本文采用基于Gassmann的流体替换方法研究含不同流体时岩石物理参数的变化规律和特征。随

着孔隙度增大,气、水置换时纵波速度的变化量也近似线性增大。在样品孔隙度为 20% 的条件下,气、水置换时纵波速度的可变化量约为 280m/s(图 13),且孔隙度和变化量具有很好的正相关关系。气、水置换时横波速度的变化量是很小的负数,变化量为 0~50m/s,这是由于饱和气的横波速度略大于饱和水的横波速度,且横波速度变化量与孔隙度没有相关性。随着孔隙度增大,气、水置换时横波速度变化量也略微变大(负),这是由于流体的密度效应引起的(图 14)。总之,纵波速度对流体较敏感,而横波速度对流体不敏感。

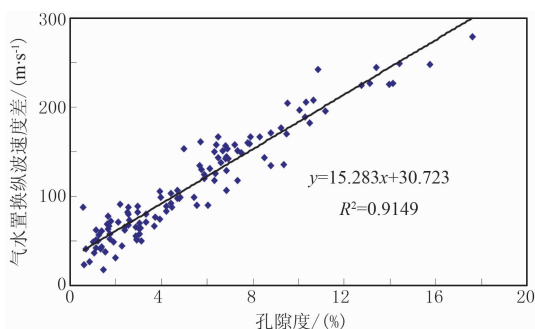


图 13 气、水置换后纵波速度差异

$y$  为气水置换纵波速度差,  $x$  为孔隙度,  $R$  为相关系数

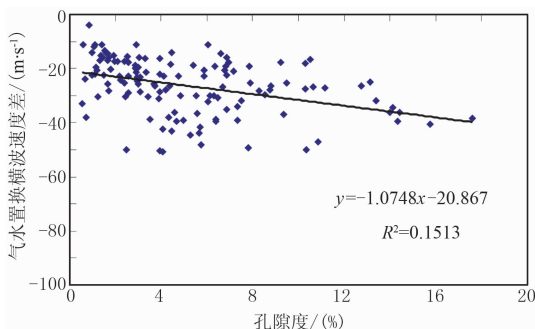


图 14 气、水置换后横波速度差异

$y$  为气水置换横波速度差,  $x$  为孔隙度,  $R$  为相关系数

## 6 火山岩岩石样品敏感弹性参数分析

### 6.1 火山岩岩性敏感参数关系分析

影响火山岩岩性的因素很多,如矿物成分、孔隙度、埋藏深度、含流体情况及所处相带等,都会严重影响不同岩性的岩石物理弹性参数,因此利用弹性参数对不同岩性进行识别是现阶段制约火山岩油气勘探的一大难题<sup>[13]</sup>。火山岩岩性种类较多,从应用角度出发,文中将火山岩分为基性火山岩、中性火山岩和酸性火山岩三大类进行分析。基性岩主要包括

玄武岩,中性岩主要包括英安岩、安山岩,酸性岩主要包括流纹岩、粗面岩、火山角砾岩和凝灰岩。

通常利用常规测井资料从速度、放射性、导电性等方面对火山岩岩性进行判别<sup>[14]</sup>。一般认为,火山岩的岩性变化趋势具有一定规律性,岩性由基性过渡到酸性,放射性逐渐增强,自然伽马值逐渐增高<sup>[15~17]</sup>。王玲等<sup>[18]</sup>认为,从基性火山岩到酸性火山岩,自然伽马值逐渐增大且电阻率值逐渐减小,利用自然伽马与电阻率测井曲线交会,可定性识别基性、中酸性和酸性火山岩。杨明合等<sup>[19]</sup>选取自然伽马、声波和密度三种测井参数基于模糊概率理论识别火山岩岩性。本文在岩石波速和密度等物性参数测定基础上,计算其他各主要的物理参数,分析不同类型的岩石在不同岩石物理参数的空间分布以及各岩石物理参数对岩性的敏感性。通过对比多种参数交会结果可知,密度与纵波速度的交会,可区分火山岩岩性(图 15)。为了进一步分析其规律性,去掉火山碎屑岩进行分析,分区的规律性更明显(图 16)。

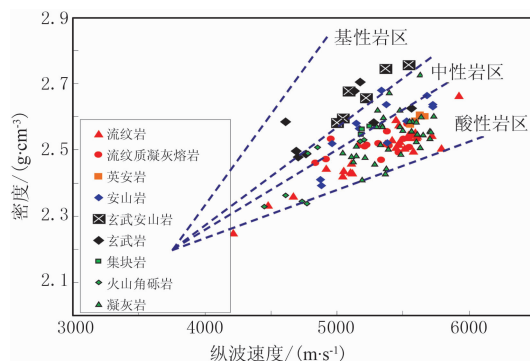


图 15 火山岩不同岩性的密度—纵波速度关系

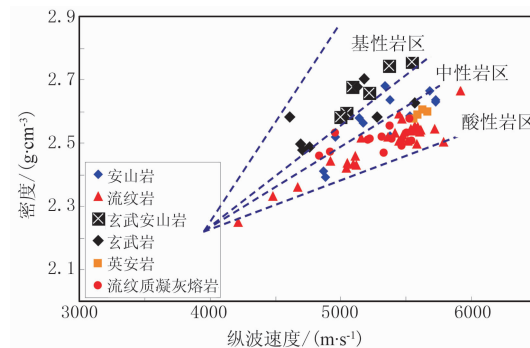


图 16 火山熔岩不同岩性的密度—纵波速度关系

### 6.2 火山岩流体敏感参数关系分析

不同岩石物理参数对孔隙流体的敏感程度不同。通过分析岩石物理参数的本质,在理论上可构

造出可能对流体相对敏感的参数<sup>[20]</sup>。张丽华等<sup>[21]</sup>首先利用中子与密度交会区分干层和储层,然后利用自然伽马与深侧向电阻率交会区分气层和水层;徐颖新等<sup>[22]</sup>利用声波阻抗(AI)与弹性波阻抗(EI)交会识别火山岩储层。本文通过对比各种弹性参数对流体的敏感程度,优选纵横波速度比与纵波速度交会可以很好地区分气、水层;在孔隙度大于5%的流纹岩中可以区分气、水层(图17);在孔隙度大于2.5%的安山岩中可以区分气、水层(图18);在孔隙度大于4%的玄武岩中可以有效区分气、水层(图19);在孔隙度大于4%的流纹质凝灰熔岩中可以很好地区分气、水层(图20)。

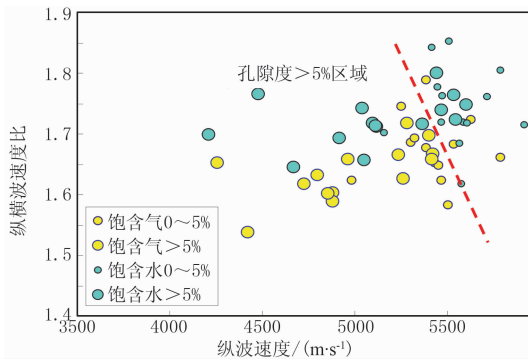


图17 流纹岩储层流体分布规律

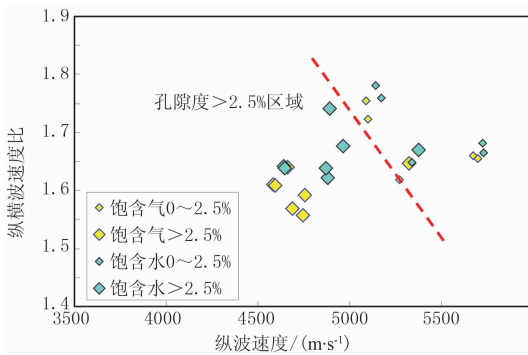


图18 安山岩储层流体分布规律

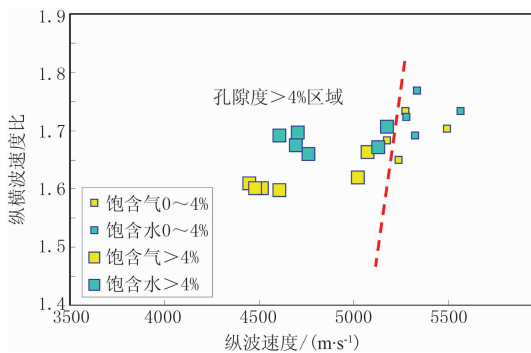


图19 玄武岩储层流体分布规律

在单一岩性流体性质识别基础上,研究不同孔隙度、多种岩性的流体性质的判别。研究表明,物性较好的储层,流体性质判别更为精确(图21),不同火山岩气—水门槛值有所差别,总体上纵横波速度比与纵波速度交会也能较好地地区分气、水层,即气层的纵横波速度比(均小于1.65)较水层的小(图22)。

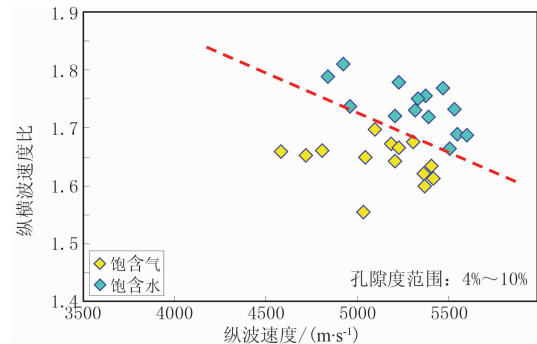


图20 流纹质凝灰熔岩储层流体分布规律

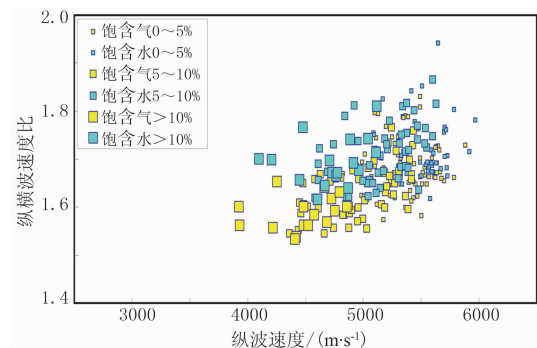


图21 不同孔隙度储层流体分布规律

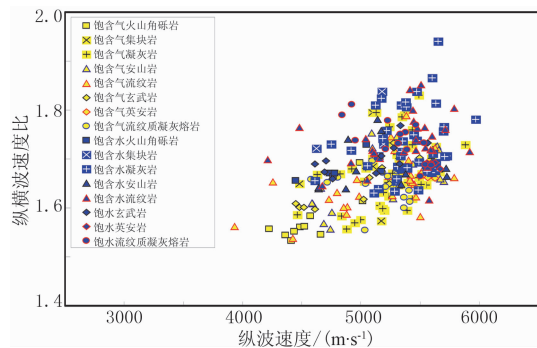


图22 不同火山岩岩性储层流体分布规律

## 7 结论

(1)本文采用超声脉冲透射测量系统,模拟地层温度和压力条件,对松辽盆地北部四个断陷中105块岩性样品开展测试,共获得664组数据。通

过误差分析表明,波速测量相对误差小于 0.54%,密度测量相对误差小于 0.22%,确保了岩石物理分析结果的准确性和普遍规律性。

(2)研究温度、(静岩)压力、孔隙流体压力对纵波速度的影响,纵波速度、横波速度等弹性参数随围压增加而增加,随孔隙压力增加而大致呈线性减小趋势;在研究温度范围内( $<150^{\circ}\text{C}$ ),岩石物理弹性参数随温度增加呈线性减小趋势。

(3)不同含气饱和度实验说明,随着含气饱和度增加,岩石的纵波速度非线性减小,横波速度变化较小;对比饱含气和饱含水的纵、横波速度变化规律发现,纵波速度差别较大,且孔隙度越大纵波速度差异越大,横波速度差异较小;气、水置换实验表明,饱含气时纵波速度变化幅度随孔隙度增加而增加,横波速度对流体变化则不敏感。

(4)综合多种岩石物理参数分析认为,密度与纵波速度的交会,可对基性、中性和酸性火山岩进行分类,纵横波速度比与纵波速度交会能较好地区分含气和含水,从而实现火山岩岩性和流体的直接判别,为火山岩气藏的地震识别奠定了物理和地质基础,同时为火山岩储层岩石物理建模提供基本参数,有利于火山岩气藏定量解释。

(5)孔隙度对岩石物理参数控制作用明显,并且影响岩石物理参数(关系)对流体和岩性识别的能力。不同弹性参数在饱含不同流体时的差异随孔隙度增大而明显增加,在孔隙度大于 5%时,储层含气性的识别可以达到较高精度。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] 冯志强. 松辽盆地庆深大型气田的勘探前景. 天然气工业, 2006, 26(6): 1-5.  
Feng Zhiqiang. Exploration potential of large Qingshen gas field in the Songliao basin. Natural Gas Industry, 2006, 26(6): 1-5.
- [ 2 ] 姜传金, 陈树民, 初丽兰等. 徐家围子断陷营城组火山岩分布特征及火山喷发机制的新认识. 岩石学报, 2010, 26(1): 63-72.  
Jiang Chuanjin, Chen Shumin, Chu Lilan et al. A new understanding about the volcanic distribution characteristics and eruption mechanism of Yingchen formation in Xujiaweizi fault depression. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1): 63-72.
- [ 3 ] 姜传金, 冯肖宇, 詹怡捷等. 松辽盆地北部徐家围子断陷火山岩气藏勘探新技术. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(4): 133-137.  
Jiang Chuanjin, Feng Xiaoyu Y, Zhan Yijie et al. New methodology to explore gas-bearing volcanic reservoir in Xujiaweizi fault depression of the northern Songliao basin. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(4): 133-137.
- [ 4 ] Mavko G, Mukerji T and Dvorkin J. The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis in Porous Media. Cambridge University, 1998.
- [ 5 ] Wang Zhijing. Fundamentals of seismic rock physics. Geophysics, 2001, 66(2): 398-412.
- [ 6 ] King M S. Rock-physics developments in seismic exploration: a personal 50-year perspective. Geophysics, 2005, 70(6): 3ND-8ND.
- [ 7 ] 刘浩杰. 地震岩石物理研究综述. 油气地球物理, 2009, 7(3): 1-8.  
Liu Haojie. The seismic petrophysical study summary. Petroleum Geophysics, 2009, 7(3): 1-8.
- [ 8 ] Yang J L and Mao H B et al. Mu-rho direct inversion for volcanic rock reservoir prediction: a case study of the Dinan field Junggar basin. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2008, 27: 252-255.
- [ 9 ] Wu Q L, Zhao H B, Li L L et al. Analysis of rock physics response of gas-bearing volcanic reservoir based on three-phase poroelastic theory. Applied Geophysics, 2008, 5(4): 277-283.
- [ 10 ] 陈树民, 李来林, 赵海波. 松辽盆地白垩系火山岩储层岩石物理声学特性分析. 岩石学报, 2010, 26(1): 14-20.  
Chen Shumin, Li Lailin, Zhao Haibo. Physical analysis of acoustic characteristics of Cretaceous volcanic rocks in the Songliao basin. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1): 14-20.
- [ 11 ] 殷志强, 李夕兵, 金解放. 围压卸载速度对岩石动力强度与破碎特性的影响. 岩土工程学报, 2011, 33(8): 1296-1301.  
Yin Zhiqiang, Li Xibing, Jin Jiefang. The affect of dynamic strength of rock crushing characteristics for confining pressure unloading speed. Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(8): 1296-1301.
- [ 12 ] 付旭, 张德会, 印贤波. 岩石变形、流体压力与热液成矿关系的研究现状. 地质通报, 2011, 30(4): 595-604.  
Fu Xu, Zhang Dehui, Yin Xianbo. Deformation of rock, fluid pressures and hydrothermal deposits. Geological Bulletin of China, 2011, 30(4): 595-604.
- [ 13 ] 王英南, 郝玉清. 松辽盆地兴城地区营一段火山岩岩性、岩相及孔隙结构特征研究. 中国石油勘探, 2009, (1): 24-29.  
Wang Yingnan, Xi Yuqing. Volcanic rock lithology, lithofacies and pore structure characteristics in Xingcheng area of Songliao basin. China Petroleum Exploration, 2009, (1): 24-29.
- [ 14 ] 戴世立, 姜传金, 张元高等. 徐家围子断陷安达地区火山岩有效储层预测方法研究. 地质科技情报, 2012, 31(2): 67-71.  
Dai Shili, Jiang Chuanjin, Zhang Yuangao et al. Methodologies for predicting effective reservoir of volcanic in Anda area of Xujiaweizi depression. Geolog-



- ical Science and Technology Information, 2012, 31(2):67-71.
- [15] 黄薇, 印长海, 刘晓等. 徐深气田芳深9区块火山岩储层预测方法. 天然气工业, 2006, 26(6):14-17.  
Huang Wei, Yin Changhai, Liu Xiao et al. The reservoir prediction method of volcanic rock in Fangshen 9 blocks of Xushen gas field. Natural Gas Industry, 2006, 26(6):14-17.
- [16] 李明, 邹才能, 刘晓等. 松辽盆地北部深层火山岩气藏识别与预测技术. 石油地球物理勘探, 2002, 37(5):477-484.  
Li Ming, Zou Caineng, Liu Xiao et al. Volcanic gas reservoir identification and forecasting techniques of Northern Songliao basin. OGP, 2002, 37(5):477-484.
- [17] 綦敦科, 吴海波, 陈立英等. 徐家围子火山岩气藏储层测井响应特征. 测井技术, 2002, 26(1):52-63.  
Ji Dunke, Wu Haiibo, Chen Liying et al. Volcanic gas reservoirs logging response characteristics of Xujiaweizi depression. Well Logging Technology, 2002, 26(1):52-63.
- [18] 王玲, 张研, 戴晓峰等. 徐深气田徐深9井区火山岩气藏有效储层识别方法. 石油地球物理勘探, 2010, 45(5):741-767.  
Wang Ling, Zhang Yan, Dai Xiaofeng et al. Reservoir identification method of volcanic gas reservoirs in Fangshen 9 blocks of Xushen gas field. OGP, 2010, 45(5):741-767.
- [19] 杨明合, 翟应虎, 韩福彬. 模糊概率理论在徐家围子深层火山岩岩性识别中的应用. 石油地球物理勘探, 2007, 42(2):190-193.  
Yang Minghe, Zhai Yinghu, Han Fubin. Application of fuzzy probability theory to identify Xujiaweizi deep volcanic lithology. OGP, 2007, 42(2):190-193.
- [20] 邓继新, 王尚旭, 俞军. 孔隙流体分布对部分饱和储层砂岩速度实验结果的影响及理论分析. 石油物探, 2005, 44(5):495-498.  
Deng Jixin, Wang Shangxu, Yu Jun. The impact of the experimental results and theoretical analysis of partially saturated reservoir sandstone speed for distribution of pore fluid. GPP, 2005, 44(5):495-498.
- [21] 张丽华, 潘保芝, 单刚义等. 火山岩储层流体性质识别. 石油地球物理勘探, 2008, 43(6):728-730.  
Zhang Lihua, Pan Baozhi, Shan Gangyi et al. Method for identifying fluid property in volcanite reservoir. OGP, 2008, 43(6):728-730.
- [22] 徐颖新, 尚华, 李秀珍等. 火山岩地震解释技术在松辽盆地长岭断陷深层天然气勘探中的应用. 石油地球物理勘探, 2008, 43(增刊1):63-68.  
Xu Yingxin, Shang Hua, Li Xiuzhen et al. Application of volcanic rock seismic interpretation technique to deep natural gas exploration in Changling fault depression of Songliao basin. OGP, 2008, 43(S1):63-68.

(本文编辑:刘勇)

### 作者简介



姜传金 教授级高级工程师, 1963年生; 1987年本科毕业于大庆石油学院石油地质勘查专业, 获工学学士学位; 2012年毕业于东北石油大学资源勘查专业, 获博士学位。长期从事油气地震勘探研究, 目前在中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院从事油气地质、地震勘探科研工作。

(上接第915页)

- [15] Cerveny V and Soares J E P. Fresnel volume ray tracing. Geophysics, 1992, 57(7):902-915.
- [16] Watanabe T, Matsuoka T and Ashida Y. Seismic traveltome tomography using Fresnel volume approach. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1999, 18:1402-1405.
- [17] 杜增利, 施泽进, 尹成等. 折射初至波射线追踪方法研究. 石油地球物理勘探, 2008, 43(4):401-404.  
Du Zengli, Shi Zejin, Yin Cheng et al. Refraction first arrival ray tracing. OGP, 2008, 43(4):401-404.

(本文编辑:宜明理)

### 作者简介



杨雪霖 硕士, 1989年生; 2011年毕业于中国石油大学(华东)勘查技术与工程专业, 获学士学位; 2014年毕业于中国石油大学(华东)地球探测与信息技术专业, 获硕士学位; 现就职于东方地球物理公司物探技术研究中心, 主要从事地震速度建模与层析反演成像方法研究。