

文章编号: 0253-9985(2006)03-0399-06

## 塔河油田碳酸盐岩储层声学参数特征及变化规律

刘树根<sup>1</sup>, 单钰铭<sup>1</sup>, 黄思静<sup>1</sup>, 刘维国<sup>1</sup>, 曹 均<sup>1</sup>, 贺振华<sup>1</sup>, 韩革华<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 中国石油化工股份有限公司西北分公司勘探开发规划设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 以塔里木盆地塔河地区碳酸盐岩复杂介质为例, 依据地层条件岩石声学参数的实验测试结果, 获得下述认识:

1) 纵横波速度随围压的增大而增大, 随温度的升高而降低; 2) 岩石的动弹模量随着围压的增加而增加, 随着温度的增加而减小; 3) 纵横波的衰减随着围压的增加而减弱, 随着温度的增加而增强。

关键词: 纵横波速度; 动弹模量; 衰减; 地层条件; 碳酸盐岩; 塔河油田

中图分类号: TE112.2 文献标识码: A

## Characteristics and variation pattern of acoustic parameters of carbonate reservoir rocks in Tahe oilfield, Tarim basin

Liu Shugen<sup>1</sup>, Shan Yuming<sup>1</sup>, Huang Sijing<sup>1</sup>, Liu Weiguo<sup>1</sup>, Cao Jun<sup>1</sup>, He Zhenhua<sup>1</sup>, Han Gehua<sup>2</sup>

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059;

Exploration and Development Research Institute of Northwest Company, SINOPEC, Urumqi Xinjiang 830011)

**Abstract** Taking the complex media of carbonates in Tahe area, Tarim basin, as an example, and based on the experimental test results of rocks' acoustic parameters under formation conditions, the following understandings are obtained: 1) P-wave and S-wave velocities increase with increasing confining pressure but decrease with increasing temperature; 2) the dynamic elastic modulus increases with increasing confining pressure but decreases with increasing temperature; 3) the attenuations of P- and S-waves decrease with increasing confining pressure and increase with increasing temperature.

**Key words** P-wave and S-wave velocities; dynamic elastic modulus; attenuations; formation conditions; carbonates; Tahe oilfield; Tarim basin

塔河油田是我国第一个超深层(深度超过 5 000 m)海相碳酸盐岩整装大油田<sup>[1]</sup>, 油藏类型以大型岩溶缝洞型隐蔽油藏为主<sup>[2]</sup>, 奥陶系碳酸盐岩岩溶洞穴的分布深度变化较大, 大部分集中在奥陶系风化面以下 250 m 范围内。塔河油田下奥陶统致密灰岩基质的孔隙度为 0.10%~1.30%, 92.9% 的样品基质孔隙度小于 1.00%, 孔隙度平均值为 0.62%<sup>[3]</sup>。塔河油田储集体呈不规则网状<sup>[4]</sup>。

由于碳酸盐岩中裂缝和孔洞系统在空间分布上的非规律性, 在形态、大小上的不规则性与多尺度性, 使得探查其空间分布变得十分困难<sup>[5]</sup>。尤

其当这种类型的岩溶缝洞型储层埋深超过 5 000 m 时, 在地震剖面上更难以分辨和识别<sup>[6]</sup>。油层岩石物理学是利用地球物理方法和技术识别、分辨和预测深层油层储层特征的基础<sup>[7~9]</sup>。其中, 基于岩石中波传播性质的地震方法是目前油气地球物理勘探中最主要的方法<sup>[8]</sup>。地震波的运动学参数和动力学参数的准确确定是预测碳酸盐岩储层, 尤其是岩溶缝洞型储层的前提。本文利用成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室“MTS 岩石物理参数测试系统”<sup>[10]</sup>对塔河油田深层碳酸盐岩储层岩石在地层条件下的声学参

收稿日期: 2006-04-24

第一作者简介: 刘树根(1964—), 男, 教授, 石油地质学和构造地质学

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2005CB422106)

数进行了系统测试和研究,为该区岩溶缝洞型储层的预测提供基础数据。为比较,也测试和研究了塔河油田碎屑岩的声学参数特征及其变化规律。

## 1 实验方法和岩石基本特征

岩石样品声波速度是在“MTS岩石物理参数测试系统”上采用透射方法进行测量,测量传感器中心频率为 0.5 和 1 MHz<sup>[10]</sup>。岩样饱和流体分别为气、水、油,声学参数测量从常温常压开始,然后逐级变温变压至地层条件。测量的地层条件(温度、压力)主要依据岩心原位地层条件(温度、围压等)确定。实际温压试验条件计算时,平均地温梯度为每百米 2.18 °C,平均地层压力系数取 1.1,上覆地层岩石平均密度取 2.443 g/cm<sup>3</sup>。然后,根据岩心取样深度计算实验有效围压和温度。

岩石类型主要为碳酸盐岩,少部分为砂(砾)岩和泥岩。碳酸盐岩孔隙度为 0.06% ~ 9.11%,平均值 1.05%;密度为 2.52 ~ 2.95 g/cm<sup>3</sup>,平均值 2.69 g/cm<sup>3</sup>。砂(砾)岩孔隙度为 1.62% ~ 12.53%,平均值 4.58%;密度为 2.35 ~ 2.77 g/cm<sup>3</sup>,平均值 2.59 g/cm<sup>3</sup>。泥岩孔隙度为 0.01% ~ 5.81%,平均值 2.46%;密度为 2.56 ~ 2.76 g/cm<sup>3</sup>,平均值 2.67 g/cm<sup>3</sup>。

## 2 岩石纵横波速度和地层条件的关系

### 2.1 岩石纵横波速度和围压的关系

实验结果表明,在温度恒定时,不同饱和介质(气、水、油)条件岩样的纵横波速度均随围压的增大而增加(图 1)。纵横波速度随围压的变化符合多项式关系,相关系数的平方值都在 0.9 以上,但

饱和介质和岩石类型不同时,对压力的敏感程度存在显著的差别。例如,饱和气条件下,有效压力改变 40 MPa 时,泥岩和砂岩纵波速度变化范围为 795 ~ 1 257 m/s 相对变化为 22% ~ 47%,横波速度变化为 542 ~ 716 m/s 相对变化为 22% ~ 36%。压力增加所造成的速度增加幅度较大,表明泥岩和砂岩对压力十分敏感。而大多数碳酸盐岩的速度随压力的改变值较小,同样条件下,纵波速度变化为 66 ~ 678 m/s 相对变化为 1% ~ 14%,横波速度变化为 24 ~ 317 m/s 相对变化为 1% ~ 11%,白云岩以及白云岩向砂、泥岩过渡的碳酸盐岩类型速度的改变值稍大一些。饱和气时,P 波的增加幅度大于 S 波,波速比( $V_p/V_s$ )随围压的增大而增大,因而泊松比也随围压的增大而增大。

岩样在完全饱和水以后,其速度对压力的敏感程度显著降低。在典型样品中,当围压变化 40 MPa 时,纵横波速度一般变化值都在 10% 以下,而且大多数样品的变化值都在 5% 以下。完全饱和油的样品的实验结果与完全饱和水的样品在总体特征上是类似的。但一些孔隙度较高的样品对压力的敏感程度明显大于饱和水的样品。如中砂岩纵波速度相对变化为 16.07%,横波速度相对变化为 22.79%;溶积砂岩纵波速度相对变化为 12.09%,横波速度相对变化为 19.43%。与饱和气时实验结果不同的是,饱和水或者饱和油时,波速比( $V_p/V_s$ )随围压的增大而减小,故泊松比是随围压的增大而降低的。

### 2.2 岩石纵横波速度和温度的关系

在围压不变的情况下,各种饱和条件下岩石的纵横波速度均随温度的升高而降低(图 2)。所有岩样的纵横波速度和温度之间都具有良好的线性关

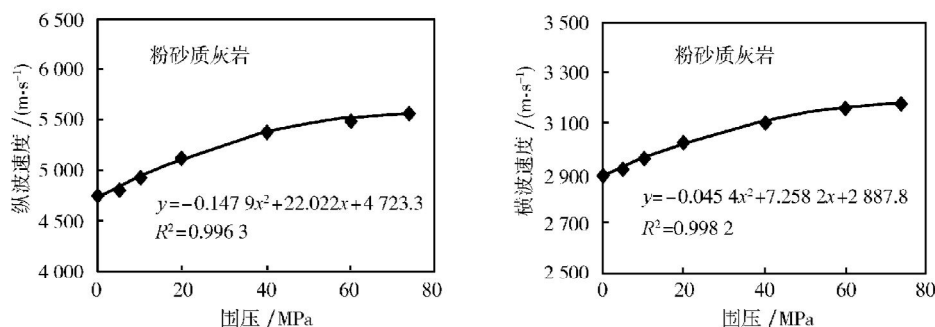


图 1 塔河油田粉砂质灰岩纵波和横波速度与围压关系(饱和气)

Fig. 1  $V_p$  and  $V_s$  versus confining pressure of silty limestone saturated with gas in Tahe oilfield

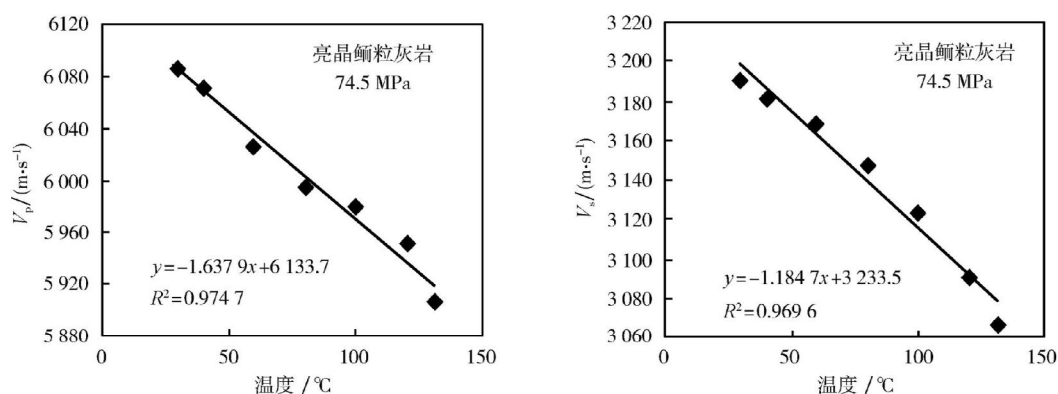


图 2 塔河油田亮晶鲕粒灰岩纵波和横波速度与温度关系 (固定围压和饱和气)

Fig. 2  $V_p$  and  $V_s$  versus temperature of sparry oolitic limestone with fixed confining pressure and saturated with gas in Tahe oilfield

系,绝大多数样品相关系数平方值都在 0.9 以上。

尽管岩石的纵横波速度均随温度的升高而降低,但降低幅度并不大。饱和气时,无论是砂岩、泥岩,还是具有不同结构的碳酸盐岩,温度变化 100℃所引起的纵波速度降低平均值为 140 m/s,变化幅度为 1.60% ~ 4.50%,平均值为 2.49%,横波速度降低平均值为 110 m/s,变化幅度为 2.00% ~ 5.20%,平均值为 3.44%。温度对饱和水样品的影响稍大于饱和气样品,这可能与液体和气体对热的传递能力差异有关。饱和水时不同岩石类型在温度变化 100℃所引起纵波速度降低平均值为 155 m/s,变化幅度为 1.80% ~ 4.10%,平均值为 2.91%,横波速度降低平均值为 119 m/s,变化幅度为 2.10% ~ 7.00%,平均值为 4.05%。

饱和油时,温度变化 100℃所引起的纵波速度降低平均值为 138 m/s,变化幅度为 1.49% ~ 3.56%,平均值 2.49%;横波速度降低平均值为 101 m/s,变化幅度为 1.71% ~ 5.49%,平均值 3.42%。

综合地层压力和温度对岩石纵横波速度的影响,可以说明,对于具有正常压力和温度梯度的含油气盆地来说,压力对岩石纵横波速度的影响大于温度的影响,所以岩石纵横波速度随深度的增加一般是增大的<sup>[11]</sup>。其增大幅度与岩石类型密切相关,砂泥岩增加幅度大,而碳酸盐岩增幅较小。

然而,对于一些具异常高温、高地层压力条件的含油气盆地,由于温度梯度和地层压力梯度都较高,岩石(尤其是深部地层中的岩石)可能处于较高的温度和较低的有效压力条件,此时温度对岩石纵横波速度和泊松比的影响甚至可以大于压力的影响,使速度随深度的变化趋势出现和正常含油气盆地相反的趋势。这种特殊条件下,温度

对速度的影响不可忽略,在建立有关地球物理模型时应进行必要的温度校正。

### 3 地层条件下岩石动弹模量的变化规律

根据实验测定的岩石纵横波速度和密度可以计算各种测试条件下岩石的动弹模量,包括杨氏模量、体积模量、剪切模量等。

#### 3.1 围压对动弹模量的影响

在温度保持不变的情况下,随着围压的增加,各类岩样(饱和气)的动弹模量都有明显的增加,模量随围压的变化符合二项式关系,相关系数大于 0.8。图 3 表示灰色块状鲕粒砂屑灰岩的动弹模量与围压的相关关系。从围压对岩样的影响程度来看,不同岩性的岩石,其影响的程度不同。围压对砂岩和泥岩动弹模量的影响明显大于灰岩。在围压从 0 变化到 74 MPa 左右时,泥岩的动弹模量增加幅度最大,其杨氏模量、剪切模量和体积模量的增加幅度依次为 96%, 90% 和 128%;其次为细砂岩,增加幅度依次为 76%, 63% 和 129%;灰岩的增加幅度较小,如鲕粒砂屑灰岩增加幅度依次为 10%, 10% 和 7%。

#### 3.2 温度对动弹模量的影响

通过对饱和气岩样固定围压(70 MPa 左右)、变化温度(20~140℃)的测试结果分析,随着温度的增加,各类岩样的动弹模量都有一定程度的减小,模量与温度之间有良好的线性相关关系,大多数相关系数都在 0.95 以上。从温度对岩样动弹

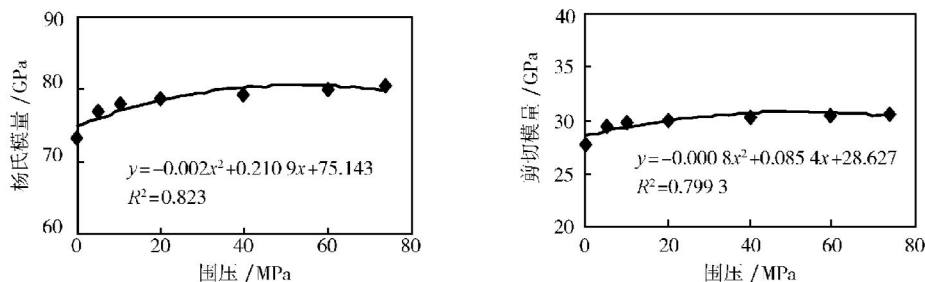


图 3 塔河油田灰色块状鲕粒砂屑灰岩 30℃条件下围压变化对岩石动弹模量的影响

Fig. 3 Diagram showing dynamic elastic modulus versus confining pressure of massive oolitic calcarenite saturated with gas at the temperature of 30℃ in Tahe oilfield

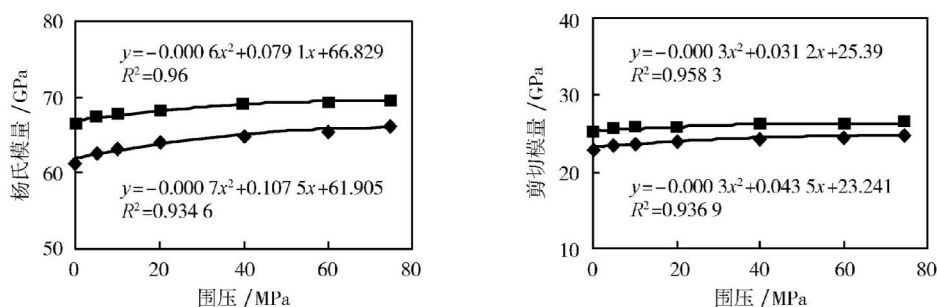


图 4 塔河油田含泥质介壳灰岩定温 (40℃) 和饱和水、饱和油时的动弹模量与围压的关系

Fig. 4 Dynamic elastic modulus versus confining pressure of argillaceous coquina saturated with oil or water at the temperature of 40℃ in Tahe oilfield

(图中 ■ 表示饱和油样, ◆ 表示饱和水样)

模量的影响程度来看,在 70 MPa 左右的围压环境下,温度的变化对岩样动弹模量的影响及其影响程度没有围压的变化那么明显。各类型岩样的变化特征基本上是一样的,各类岩石中模量降幅最大的可达到 9%,一般的降幅为 4% ~ 5%。

### 3.3 不同温度、压力条件下孔隙流体与动弹模量的关系

岩样饱和水和饱和油后,温压的变化对动弹模量的影响基本上是一致的,但饱和水与饱和油岩样的动弹模量变化幅度,尤其是体积模量的变化幅度比同类饱和气岩样要低。对比含泥质介壳灰岩分别进行的饱和水与饱和油测试结果(图 4),可以看出:其随温压变化的关系与饱和气岩样基本一致,但变化的幅度要小于同类的饱和气岩样。饱和油样的杨氏模量和剪切模量要略高于饱和水样,但饱和水样两模量随围压变化的幅度要略大于饱和油样。饱和油样的体积模量在低围压下要略低于饱和水样,当围压升高时,两者趋于相同,因而饱和油样体积模量随围压变化的幅度要略大于饱和水样。

随着温度的升高,饱和水样和饱和油样的动弹模量都呈线性减小的规律。当温度从 30℃ 升高

到 130 多摄氏度时,动弹模量的变化幅度为 1% ~ 5%。两者杨氏模量和剪切模量的变化幅度基本相同,但饱和油样体积模量随温度的降低速度要明显低于饱和水样。

## 4 地层条件下衰减测试及结果

地震波衰减或岩石的  $Q$  值,是重要的岩石地球物理特征之一。研究中将地震波传播简化为在理想状态下的传播,即地震波在纯弹性地层中传播。但是,实际观测与由弹性方程得到的理论期望值之间有着明显的差异性,其主要差异是振幅的损耗,其损耗值已超过了界面的几何扩散和反射的影响。这种额外的振幅损失称为衰减。这种衰减是由于地震波在实际岩石中传播时,由于多种原因造成纵横波能量的损耗,如地震波能量在岩石中转化为热能而发生的衰减现象等。岩石的这种粘弹性衰减过程是弹性波在实际岩石中传播的基本特性之一。已有的研究成果表明,岩石物理状态的变化引起的衰减变化比速度的变化更大,特别是饱和条件与孔隙流体性质对衰减影响较大<sup>[8-12]</sup>。但是,衰减测量比速度测量更为困难,因为,要测量衰减我们不仅要利用波的到达时间,

而且还要利用波的振幅信息。

实用中常用品质因子( $Q$ )及其倒数( $Q^{-1}$ )来度量衰减, $Q$ 值是储能与耗散能的比率,它作为岩石的一个内禀特性。实验测量时选用铝样作为参考样,在不同的模拟环境条件下(包括压力、温度、流体饱和度等)用同样方法测得穿过相同尺寸岩样的透射波的波至时间和透射波信号;由透射波的波至时间求得速度,根据实测的岩样和铝样的透射波信号用“谱比法”求得 $Q$ 值<sup>[13]</sup>。

#### 4.1 围压对品质因子的影响

通过对饱和气岩样定温条件下不同围压的测试结果分析,围压与纵横波品质因子即衰减之间存在着一定的相关关系,多数岩样随着围压的增加,纵横波品质因子都有不同程度的增加,即在围压增加的情况下,岩样的衰减逐渐变小。在岩样饱和水与饱和油情况下,围压与纵横波品质因子的变化关系与饱和气情况基本一致。不同岩类、含不同流体岩样的围压与纵横波品质因子的变化关系见图 5。

#### 4.2 温度对品质因子的影响

根据测试结果分析,温度与纵横波品质因子即衰减之间存在着一定的相关关系,多数饱和气岩样

随着温度的增加,纵横波品质因子都有不同程度的减小,即在温度增加的情况下,岩样的衰减逐渐变大,纵波的这种变化趋势要好于横波。在岩样饱和水与饱和油情况下,温度与纵横波品质因子的变化关系与饱和气情况基本一致(图 6)。

## 5 认识和结论

1) 纵横波速度随围压的增大而增大,随温度的升高而降低。对于具有正常压力和温度梯度的地层,压力对速度的影响大于温度对速度的影响,所以岩石纵横波速度随深度的增加一般是增大的,其增加幅度受岩石类型、孔隙度及饱和流体条件等控制。然而,对于一些具异常高温、高压条件的地层,温度对岩石纵横波速度的影响可以大于压力的影响,使速度随深度的变化趋势出现和正常地层相反的趋势。

2) 岩石的动弹模量(杨氏模量、剪切模量、体积模量)与岩石的类型、岩性、岩石的组成和结构之间有着密切的关系,不同类型岩石的动弹模量分布具有明显的规律性。在温度保持不变的情况下,随着围压的增加,岩石的动弹模量都有明显的增加,模量与所加围压之间有良好的二项式相关关系,变化幅度与岩石的类型相关。随着温度的增

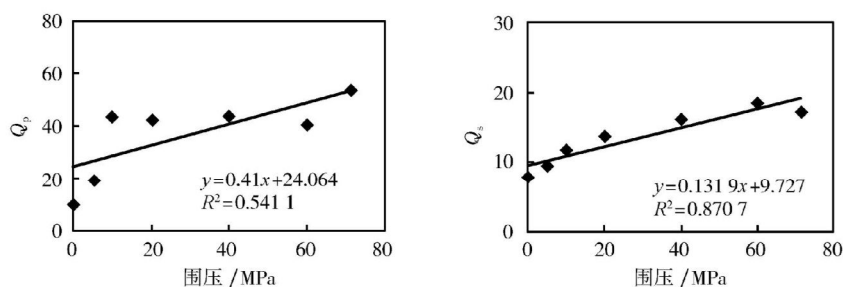


图 5 塔河油田含膏泥质灰岩在 18℃ 和饱和气时围压变化对纵横波品质因子的影响  
Fig. 5  $Q_p$  and  $Q_s$  versus confining pressure of gypsiferous argillaceous limestone saturated with gas at the temperature of 18℃ in Tahe oilfield

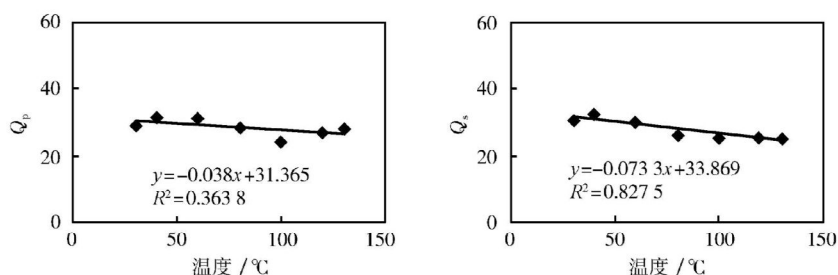


图 6 灰色块状鲕粒灰岩在定压 74 MPa 和饱和气时温度变化对纵横波品质因子的影响  
Fig. 6  $Q_p$  and  $Q_s$  versus temperature of gray massive oolitic limestone saturated with gas at the confining pressure of 74 MPa in Tahe oilfield

加,岩石的动弹模量呈线性减小。总体而言,温度变化对岩样动弹模量的影响及其影响程度没有围压的变化那么明显。温压的变化对饱和水与饱和油岩样的动弹模量的影响基本上是一致的,但饱和水与饱和油岩样的动弹模量变化幅度,尤其是体积模量的变化幅度比同类饱和气岩样要低,而饱和油和饱和水岩样两者之间动弹模量变化规律也有差异。

3) 不同类型的岩石,其衰减程度不同。就塔河地区岩样而言,碳酸盐岩、泥岩和砂岩之间的纵横波品质因子虽然差别不大,但仍有从碳酸盐岩、砂岩到泥岩衰减逐渐增强的趋势;对于同一岩性的岩石来说,岩石的结晶程度越高,压实作用越强,衰减则越弱;孔隙流体对衰减的影响非常显著,并且不同的流体影响程度也不一样;岩样饱和水与饱和油后,纵横波衰减增强。油对纵横波的影响明显大于水。实验岩样饱和水后纵横波品质因子平均降低了 36%、3%和 11%,而饱和油后则平均降低了 54%、32%和 12%。

4) 围压对岩样纵横波衰减有着明显的影响,随着围压的增加,纵横波的衰减逐渐减弱,品质因子增加。温度对岩样纵横波衰减的影响,是随着温度的增加,纵横波的衰减逐渐增强,品质因子减小。

#### 参 考 文 献

- 黎玉战,徐传会.塔里木盆地塔河油田发现历程及其意义[J].石油实验地质,2004,26(2):180~186  
Li Yuzhan, Xu Chuanhui. Significance and discovery history of Tahe oilfield of the Tarim basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2004, 26(2): 180~186
- 闫相宾,张涛.塔河油田碳酸盐岩大型隐蔽油藏成藏机理探讨[J].地质论评,2004,50(4):370~376  
Yan Xiangbin, Zhang Tao. Discussion on forming mechanism of the large-scale carbonate rock subtle reservoir in the Tahe oilfield[J]. Geological Review, 2004, 50(4): 370~376
- 闫相宾.塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层特征[J].石油与天然气地质,2002,23(3):262~265  
Yan Xiangbin. Characteristics of Ordovician carbonate rock reservoirs in Tahe oilfield, China[J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(3): 262~265
- 李江龙,黄孝特,张丽萍.塔河油田 4 区奥陶系缝洞型油藏特征及开发对策[J].石油与天然气地质,2005,26(5):630~633  
Li Jianglong, Huang Xiaote, Zhang Liping. Reservoir characteristics and development strategy of Ordovician fractured-vuggy reservoirs in Block 4 of Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(5): 630~633
- 贺振华,杜正聪,文晓涛.碳酸盐岩喀斯特溶洞和裂缝系统的地震模拟与预测[J].地球科学进展,2004,19(3):399~402  
He Zhenhua, Du Zhengcong, Wen Xiaotao. Seismic modeling and prediction of carbonate karst caves and fracture sets[J]. Advanced in Earth Sciences, 2004, 19(3): 399~402
- 李宗杰,王勤聪.塔河油田奥陶系古岩溶洞穴识别及预测[J].新疆石油地质,2003,21(2):181~184  
Li Zongjie, Wang Qincong. Ordovician fossil karst cave reservoir recognition marker and prediction in Tahe oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2003, 21(2): 181~184
- Tibb D, Donaldson E C. Petrophysics (second edition) [M]. Elsevier Gulf Professional Publishing, 2004
- 陈颀,黄庭芳.岩石物理学[M].北京:北京大学出版社,2001  
Chen Yong, Huang Tingfang. Petrophysics[M]. Beijing: Beijing University Publishing House, 2001
- 崔永谦,刘池洋,张以明.油藏动态监测技术:时延(四维)地震述评[J].石油与天然气地质,2004,25(1):81~87  
Cui Yongqian, Liu Chiyang, Zhang Yinling. Reservoir dynamic monitoring: a commentary on time-lapse (or 4D) seismics[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(1): 81~87
- 刘树根,单钰铭,刘维国,等.地层条件下油气储集岩多参数同时测试技术[J].成都理工学院学报,1998,25(4):480~486  
Liu Shugen, Shan Yuming, Liu Weiguang et al. The simultaneous measurement technique of various physical parameters for oil and gas reservoir rocks under formation conditions[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1998, 25(4): 480~486
- 单钰铭,刘维国.地层条件下岩石动静力学参数的实验研究[J].成都理工学院学报,2000,27(3):249~254  
Shan Yuming, Liu Weiguang. Experimental study on dynamic and static mechanics parameters of rocks under formation conditions[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2000, 27(3): 249~254
- 贺振华,李亚林,曹均,等.地层温压条件下超声波测试技术[J].勘探地球物理进展,2003,26(2):84~87  
He Zhenhua, Li Yalin, Cao Jun et al. Ultrasonic physical modeling under real strata temperature and pressure[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2003, 26(2): 84~87
- 李亚林,贺振华,黄德济,等.露头砂岩纵横波衰减的各向异性实验研究[J].石油地球物理勘探,1999,34(6):659~664  
Li Yalin, He Zhenhua, Huang Deji et al. The experimental anisotropic analysis of P-wave and S-wave attenuations in cropping sandstone[J]. Petroleum Geophysical Exploration, 1999, 34(6): 659~664

(编辑 高 岩)