

储层砂岩波阻抗及拉梅常数实验研究

胡作维¹, 黄思静¹, 单钰铭¹, 裴昌蓉¹, 张亚洲²

(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 长庆油田分公司, 陕西 西安 710021)

[摘要] 地层条件下应用岩石物理参数测试系统(MTS)测试了岩石纵横波速度, 结合已研究成果, 根据实验数据和计算结果总结了波阻抗和拉梅常数与不同地层条件的关系, 得到地表条件下岩样(饱气)的波阻抗随岩石孔隙度的增加而减小。同一个岩样(饱水)的波阻抗随着模拟地层深度的增加而增加。在各自相对应的模拟地层深度条件下, 饱水岩样的纵波阻抗和拉梅常数值均明显大于饱气岩样的数值, 但横波阻抗变化很小。

[关键词] 岩石物理参数; 纵波速度; 横波速度; 波阻抗; 拉梅常数

[中图分类号] P584; P631.4 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6561(2006)04-0054-04

Experimental Study on Wave Impedance and Lame Constant of Reservoir Sandstones

HU Zuowei¹, HUANG Sijing¹, SHAN Yuming¹, PEI Changrong¹, ZHANG Yazhou²

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Changqing Oil Field Company, PetroChina, Xi'an 710021, Shaanxi, China)

Abstract Forty petrophysic parameters P wave and S wave velocity data of Tertiary sandstones from Southern China Sea were tested using the MTS machine under different formation pressures and temperatures. Based on the data, the wave impedance, Lame constant and other parameters are calculated, and the relationships between wave impedance, Lame constant and formation conditions are discussed. The conclusions from our experimental study are as follows: (a) Wave impedance decreases with the increase of porosity of sandstones (dry samples), but the variations of Lame constant are uncertain under the conditions of room temperature and pressure; (b) Wave impedance of sandstone samples (saturated by water) increases with the increase of the formation pressures and temperatures, but the variations of Lame constant is uncertain; (c) P wave impedance and Lame constant of the sandstone samples (saturated by water) are larger than those of dry sandstones under the corresponding formation pressures and temperatures.

Key words: petrophysical parameters; velocity of longitudinal wave; velocity of transverse wave; wave impedance; Lame constant

0 引言

近年来,随着油气勘探开发难度的不断增大,油气地球物理勘探面临巨大挑战,急需加强自身研究的深度和广度。岩石物性差异是地球物理勘探

的基础,因而岩石物性的研究,特别是接近真实地层条件下岩石物性的研究具有十分重要意义。目前,岩石物理参数已经成为油气勘探开发的重要基础资料,也是近年储层研究的重要领域之一。

岩石纵横波速度是油气勘探开发领域中最有意义的参数之一,为国内外众多学者所广泛关注,

[收稿日期] 2006 03 30

[基金项目] 油气藏地质及开发工程国家重点实验室开放基金项目(PLN9919)

[作者简介] 胡作维(1981-),男,广东顺德人,硕士研究生,从事油气储层综合评价研究。

并积累了大量实验数据, 获得了较多经验和方法^[1-10]。然而当前岩石物性研究已不是以往单一岩石样品的测量与统计, 而是依据岩石物性规律, 发展成为岩石各项物性参数之间的相互沟通和转换。为此, 笔者用地层条件下岩石物理参数测试系统(MTS)测试了岩石纵横波速度, 在对储层砂岩纵横波速度研究的基础上, 根据目前油气勘探实践中大量使用波阻抗和拉梅常数地震反演的事实, 应用实验数据和计算结果对砂岩的波阻抗和拉梅常数与不同地层条件的关系进行了探讨。

1 波阻抗、拉梅常数及其实验方法

1.1 波阻抗

波阻抗是反映地震波在地层介质中穿透和反射能力的重要参数。当地震波在传播过程中遇到介质性质不同的岩层界面, 一部分能量反射, 一部分能量透过界面, 反射波和透射波的能量分配与介质的波阻抗有关^[11]。在地震反演中含油气层的波阻抗与非含油气层差异较大, 形成局部的波阻抗异常, 这对油气地震勘探有着特殊意义。波阻抗为

$$I_P = \rho \times V_P \quad I_S = \rho \times V_S \quad (1)$$

式中: I_P 为纵波波阻抗; I_S 为横波波阻抗; ρ 为岩石密度; V_P 为纵波速度; V_S 为横波速度。

1.2 拉梅常数

拉梅常数是把应力和应变联系起来、反映岩石弹性性质的一个物理参数。通常拉梅常数只是作为特征参数, 其在物理意义上没有确切定义^[3]。也有学者认为: 拉梅常数是阻止物体侧向收缩所需要的侧向张应力与纵向的拉伸形变之比^[4]。在地震反演中拉梅常数对地层的含气性相当敏感, 是寻找天然气气藏的有效线索之一。拉梅常数为

$$\lambda = \rho \times (V_P^2 - 2 \times V_S^2), \quad (2)$$

式中: λ 为拉梅常数。

由式(1)和式(2)知, 储层砂岩的波阻抗和拉梅常数值, 可以应用实验室测定的岩石相关数据计算得到。笔者根据实验研究的需要, 选取30个取心岩样, 进行了岩石组成、密度、孔隙度、波速(包括了30个近常温常压下饱气样品, 10个模拟地层条件下饱含不同流体(饱气或饱水)样品)的实验室测定。岩矿和物性分析结果表明, 岩石类型以长石砂岩和岩屑砂岩为主, 少量砾岩和石英砂岩; 孔隙物中泥质体积分数为0%~8%, 平均为3.95%, 说明

各岩样的泥质含量较为均匀; 碳酸盐体积分数总量在0%~36%, 但碳酸盐总量平均值为5.38%, 说明各岩样的碳酸盐含量很不均匀; 岩石孔隙度在4.18%~25.00%, 平均为14.14%, 说明各岩样的孔隙度有较大差别。

对岩石密度的测试。由于岩心取出地表后, 体积和孔隙空间变化都很小, 密度测量的校正值不会超过0.002~0.003 g/cm³^[2], 通常实验室密度测定精度是0.01 g/cm³, 故将地表样品密度测定值视为地层条件下岩样密度值, 未作压力和温度校正。

岩石纵横波波速的测试是利用岩石物性参数自动测试系统(MTS)完成的。该系统的岩石超声波测试子系统可以在单轴加载、三轴加载以及控制岩石样品孔隙压力、温度等条件下进行岩样的纵波(P波)和2个同轴面振动方向相互垂直的横波(S_1 波、 S_2 波)速度的测试^[12]。

2 波阻抗和拉梅常数的变化规律

从结构上看, 储层砂岩是由固体的岩石骨架和孔隙流体组成的二相体(或三相体), 岩石的弹性则是这样的二相体(或三相体)的等效弹性。因此岩石弹性与其固体骨架(不同类型矿物)、内部孔隙(大小、几何结构、所含流体类型、所含流体饱和度等)有密切关系。波阻抗和拉梅常数都是反映岩石弹性的物理参数, 若岩石弹性发生变化, 那么其必然有所变化。

沉积岩的组成和结构相当复杂, 如砂岩骨架颗粒的构成(如长石、石英和岩屑的相对含量)、碎屑的粒度、分选和圆度, 以及岩石的孔隙度、渗透率和孔隙结构都会以不同的组合方式影响岩石的物理性质, 因而影响波阻抗和拉梅常数变化的因素也是多方面的和极其复杂的。根据近常温常压下30个饱气样品和模拟地层条件下5个分别饱含不同流体(饱水或饱气)样品(共40个样品)的实验和计算结果, 总结了孔隙度、模拟地层深度和孔隙流体类型对砂岩波阻抗和拉梅常数的影响。

2.1 地表条件下孔隙度对储层砂岩波阻抗和拉梅常数的影响

为使实验条件类似, 选用了30个近常温常压(地表条件)、饱气条件下样品纵横波速度测试结果, 并求得相应的波阻抗和拉梅常数值, 以讨论孔隙度对波阻抗和拉梅常数的影响。实验与计算

结果表明,波阻抗随岩石孔隙度的增加而减小,两者之间呈较好的负相关性(图 1a,图 1b),表现为对数函数关系(式 3)。该关系在油气勘探工作中,对于孔隙发育的砂岩层段的预测具有一定意义。但储层砂岩的拉梅常数和孔隙度间的相关性较差,数据分布相当离散(图 1c),说明这两者之间不存在明确的关系。

$$I_p = -2.0497 \times \ln \varphi + 12.059 \quad (r = 0.7203)$$
$$I_s = -1.5144 \times \ln \varphi + 8.2305 \quad (r = 0.8794) \quad (3)$$

式中: φ 为孔隙度。

2.2 模拟地层条件下储层砂岩波阻抗和拉梅常数的变化特征

为得地下某一深度岩样的岩石物理参数实验值,须在实验室模拟地下相应深度的应力环境。处于地层条件下的储层岩石,受垂向应力、水平应力、孔隙压力的共同作用。一般上述应力均为地层深度的函数,即地层深度是影响它们的最主要因素。根据实验要求,确定了不同模拟地层深度的砂岩样品所应承受的应力值^[13]。通过在模拟地层条件下,5 个饱含水样品的实验数据与计算结果表明,同一个岩样的波阻抗值随着模拟地层深度的增加

而增加(图 2a,图 2b),因而在油气勘探工作中,波阻抗值可作异常地层压力的表征,如异常高压的预测,即对于埋深相近的同一储层中,若存在异常高压段,一般可能表现为波阻抗的低值异常(图 2a、图 2b)。但模拟地层深度对砂岩的拉梅常数值的的影响并不能确定(图 2c),有待今后进一步探讨。

2.3 模拟地层条件下孔隙流体类型对储层砂岩波阻抗和拉梅常数的影响

地下储层砂岩的孔隙通常为流体(液体或气体)所饱和(并具有不同的饱和度)。事实上,当化学上不与固体(岩石骨架)相互作用的液体饱含在孔隙中时,该孔隙系统的弹性会增加,同样流体充填物密度和压缩性的变化也会对岩石弹性特征有重要影响^[2]。由此可见,孔隙流体类型的差异会对砂岩的波阻抗和拉梅常数等参数产生重要影响。

通过模拟地层条件下,5 个样品分别饱含不同流体(饱水或饱气)的实验数据和计算结果表明,在各自对应的模拟地层深度条件下,饱含不同孔隙流体类型(饱气或饱水)砂岩的纵波阻抗和拉梅常数均发生了较大程度变化,即饱水岩样的纵波阻抗和拉梅常数均明显大于饱气岩样值(图 3a,图 3c),

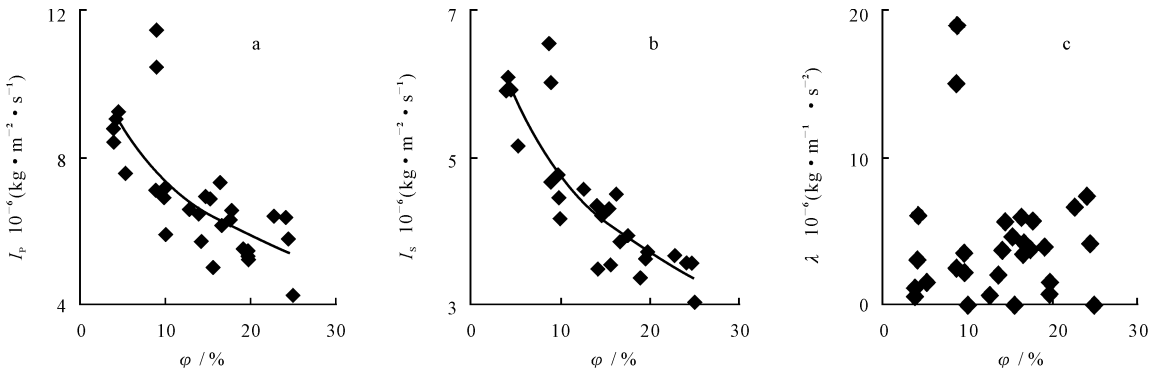


图 1 地表条件下储层砂岩的波阻抗和拉梅常数与岩石孔隙度关系

Fig.1 Relationships between Wave Impedance or Lamé Constant and Porosity for Sandstones (Dry Samples) under the Conditions of Room Temperature and Pressure

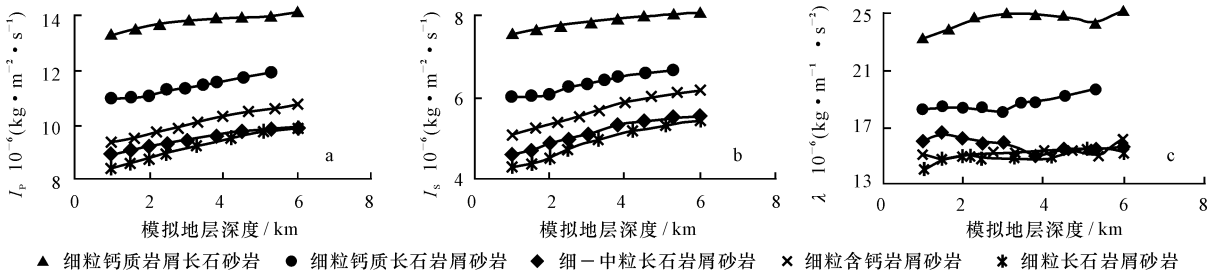


图 2 模拟地层条件下储层砂岩(饱水样品) 的波阻抗和拉梅常数的变化特征

Fig.2 Variations of Wave Impedance or Lamé Constant for Saturated Water

Samples under the Formation Pressures and Temperatures

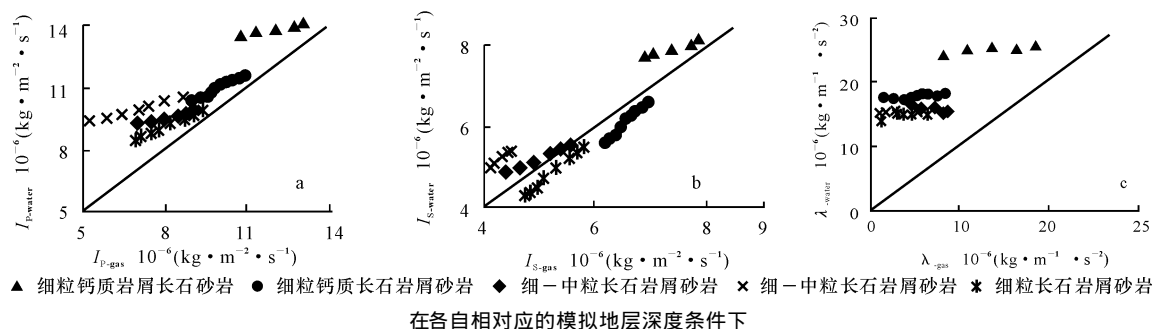


图 3 饱含不同的孔隙流体类型(饱气或饱水) 砂岩的波阻抗值和拉梅常数对比

Fig. 3 Correlations between Wave Impedance or Lamé Constant for Dry and Saturated Water Samples under the Corresponding Formation Pressures and Temperatures

但横波阻抗变化很小(图 3b)。因此, 在天然气的勘探中, 可利用储层砂岩纵波阻抗和拉梅常数的异常情况, 较可靠地判断和预测天然气所在层位, 即当某一层位存在纵波阻抗和拉梅常数值出现负异常时, 则该层位可能聚集了天然气, 从而提高勘探的成功率。实际研究工作可把纵波阻抗和拉梅常数视为检测地下天然气存在与否的有效表征参数。

3 结论

(1) 近常温常压条件下岩样(饱气) 的波阻抗随岩石孔隙度的增加而减小, 两者表现为对数函数关系。该关系在油气勘探中, 对于孔隙发育的砂岩层段的预测具有一定意义。但储层砂岩的拉梅常数和孔隙度之间不存在明确的关系。

(2) 实验结果表明: 同一个岩样(饱水) 的波阻抗随着模拟地层深度的增加而增加, 与之不一致的异常现象可能与异常地层压力有关。但模拟地层深度对砂岩的拉梅常数的影响并不能确定, 有待今后进一步探讨。

(3) 在各自对应的模拟地层深度条件下, 饱水岩样的纵波阻抗和拉梅常数均明显大于饱气岩样的数值, 但横波阻抗变化很小。因而, 实际研究可把纵波阻抗和拉梅常数视为检测地下天然气存在与否的有效表征参数。

(4) 岩石物理参数是联系岩石性质与地球物理学的有效桥梁, 也是地震反射特征和天然气地震识别技术的重要基础。因而, 加强对储层岩石物理学的研究, 推动储层地球物理学向前发展, 可以提高油气勘探的成功率和油气预测的可信度。

[参 考 文 献]

- [1] 陈 颢, 黄庭芳. 岩石物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2001.
- [2] 万明浩, 秦顺亭, 起凤梧, 等. 岩石物理性质及其在石油勘探中的应用[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [3] 张 文, 陈信平. 莺歌海盆地岩石弹性参数研究[J]. 中国海上油气(地质), 2001, 15(4): 264 - 268.
- [4] 黄 凯, 徐群洲, 杨晓海, 等. 纵、横波在岩石中的传播速度比及弹性模量与岩石所含流体的关系[J]. 新疆石油地质, 1998, 19(5): 369 - 371.
- [5] 李亚林, 谢贤鹏, 贺振华, 等. 地层条件下 CX 盆地地表岩样动弹参数的实验分析[J]. 成都理工学院学报, 1999, 26(2): 161 - 167.
- [6] 李亚林, 谢贤鹏, 贺振华, 等. 岩石孔隙流体对纵横波速度影响的实验研究及意义[J]. 矿物岩石, 1998 18(增刊): 188 - 191.
- [7] 姜修道, 朱光明, 朱龙生, 等. 中国大陆科学钻探先导孔零偏 VSP 资料解释[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(1): 55 - 60.
- [8] 卓乐芳. 液体 - 固体与界面处斯通利波的波速方程[J]. 长安大学学报: 地球科学版, 2003, 25(1): 76 - 78.
- [9] Klimentos T, Cann Mc. Relationships Among Compression al Wave Attenuation, Porosity, Clay Content, and Permeability in Sandstones[J]. Geophysics, 1990, 55(8): 998 - 1014.
- [10] Nur A, Mavko G, Dvorkin J, et al. Critical Porosity: A key to Relating Physical Properties to Porosity in Rocks[J]. Leading Edge, 1998, 51(3): 757 - 766.
- [11] 中国大百科全书总编辑委员会. 中国大百科全书 - 固体地球物理学测绘学空间科学卷[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1985.
- [12] 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.
- [13] 贺振华, 李亚林, 曹 钧, 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.