

文章编号: 1001 - 6112(2002)02 - 0164 - 04

岩样中孔隙、裂缝声波特征的实验研究

钟 锴¹, 徐鸣洁¹, 王 宏², 王 勇², 邹新宁²

(1. 南京大学 地球科学系, 江苏 南京 210093; 2. 中国石油 长庆石油局 勘探开发研究院, 陕西 西安 710021)

摘要: 作者采用超声波测量技术, 对长庆气田储层岩样孔隙和裂缝情况进行测量和研究。研究中, 对穿透岩样的声波中携带的大量关于其内部结构的信息, 通过接收声波的运动学(如波速)和动力学(如波形、波谱)特征的综合对比, 对岩样内部孔隙、裂缝是否发育及发育程度作出了定性和半定量分析。首先, 孔隙、裂缝的存在使岩样波速偏低, 其中裂缝对波速的影响较大, 尤其是未完全充填的裂缝。其次, 孔隙、裂缝发育的岩样的接收波形表现出不同程度的初动弱、振幅低和能量衰减现象, 其中孔隙的影响更明显; 但完全充填的孔隙和裂缝对波形几乎没有影响。最后, 孔隙、裂缝对波谱的影响表现在对波谱中高、中、低频成分滤波作用的差异。此外, 在孔隙、裂缝发育的岩样中还存在着较为明显的波速各向异性。

关键词: 声波特征; 孔隙; 裂缝; 岩样

中图分类号: TE135

文献标识码: A

随着石油、天然气工业的发展, 目前在岩性勘探发展的地震勘探技术中, 利用地震波的运动学和动力学特征可以推断地下地层的构造形态、埋藏深度及地下目的层(储层)的岩性和物性等参数^[1-8]。同样在实验室对储层岩样的超声波测量中, 如能结合超声波的运动学(如波速)与动力学(如波形、波谱)特征, 也可以对岩样内部孔隙、裂缝的是否发育及发育程度进行分析, 为石油天然气的储集层物性研究提供更有效的依据^[9-13]。本文通过对长庆气田下古生界储层岩样的超声波测量, 分析了岩样中孔隙、裂缝的声波特征。

1 实验方法

1.1 岩样来源

实验用岩样来自长庆气田, 产出层位主要为下奥陶统下马家沟组五段($O_1xm^{5(1)}$), 为长庆气田的主力储层, 其中 $O_1xm^{5(1)}$ 第3小层的岩样孔隙及裂缝均较发育, 对气田储气贡献最大。岩性主要为白云岩或灰岩, 本次测量的部分岩样岩性描述见表1。岩样加工成4cm×4cm×(6.5~14.5)cm立方柱形(长轴方向为垂直于原生层面方向)。

表1 部分岩样岩性描述

Table 1 Lithological description of some samples

样品	层位	密度	岩性描述
X-33	$O_1xm^{5(1)}$ 第1小层	2.79	细粉晶溶孔云岩, 孔径1~2mm, 孔密2~5个/cm ² , 充填良好
X-5	$O_1xm^{5(1)}$ 第3小层	2.69	细粉晶溶孔云岩, 孔径1~2mm, 孔密20个/cm ² 见示顶构造
X-10	$O_1xm^{5(1)}$ 第3小层	2.69	细粉晶溶孔云岩, 孔径1~2mm, 孔密5~12个/cm ² , 灰色泥质充填, 见示顶构造, 网状裂隙发育
X-22	$O_1xm^{5(1)}$ 第3小层	2.83	角砾状云岩, 角砾分选性、磨圆度均较差, 角砾间裂隙发育
X-35	$O_1xm^{5(1)}$ 第3小层	2.79	细角砾状溶孔云岩, 网状裂隙发育, 孔、缝充填良好
X-18	$O_1xm^{5(1)}$ 第4小层	2.82	细粉晶泥质云岩, 致密均匀
X-38	$O_1xm^{5(1)}$ 第4小层	2.76	细粉晶云岩, 致密均匀, 见7~8条水平缝合线
X-7	$O_1xm^{5(2)}$	2.67	铝土质泥岩, 致密均匀

收稿日期: 2001 - 04 - 11; 修订日期: 2001 - 11 - 02.

作者简介: 钟锴(1974—), 男(汉族), 安徽祁门人, 硕士生, 主要从事构造地质学的研究.

1.2 测量方法

超声波测量仪器采用 DB99 - 4 型多波参数分析仪, 仪器通带宽度设定 0.1 ~ 1000kHz, 由微机触发宽度为 5μs 的负方波脉冲激发换能器进行工作, 纵波换能器的主频为 240kHz。为保证测量精度, 每次记录的波形长度为 8 192 个采样点, 采样间隔 0.1μs, 记录时间总长 819.2μs。测量在实验室的常温常压条件下进行, 分别沿岩样的三轴方向采用透射法进行对测, 在测定时始终保持换能器与岩样间耦合良好, 并要求收、发换能器位于岩样两端的中轴线上。

2 实验结果及分析

2.1 波速分析

表 2 为部分岩样的波速测定数据, 其中以岩样三轴方向纵波的平均值作为岩样的平均速度值。A 为长轴方向, B、C 分别为垂直于长轴方向, 各向异性值为: $= (V_{max} - V_{min}) / V_{arg}$, 其中 V_{max} 、 V_{min} 、 V_{arg} 分别为三轴方向测量值的最大、最小值和平均值。

由测量结果可见, 岩样内部孔隙、裂缝的发育程度与波速之间有明显关系。致密均匀的岩样波速较高, 均大于 5 500m/s; 而孔隙、裂缝发育的岩样波速偏低, 一般小于 5 000m/s。完全充填的孔隙、裂缝波速较高; 而不完全充填的孔隙、裂缝对波速均会产生一定影响, 尤其是裂缝的影响, 岩样中裂缝的充填程度直接影响波速的大小。此外, 还可看到在孔隙、裂缝发育的岩样中存在较为明显的波速各向异性。

2.2 波形分析

根据所得样品的波形特征, 可以将波形分为两类(表 3)。

第 类: 该类岩样的接收信号与图 1 中的声源信号相比, 振幅差异很大, 衰减强烈, 如 X - 5、X - 10、X - 22 和 X - 35。

以 X - 5 为例(图 2), 波形特征主要为初动弱且平缓, 由声源发出的声信号经过岩样传播到接收换能器后的能量微弱, 其最大振幅仅为声源信号的 1/10 左右, 表明超声波信号能量衰减非常强烈, 即岩样对超声波的吸收作用较强。

第 类: 此类样品的接收信号与图 1 中的声源信号相比差异不大, 如 X - 7、X - 33、X - 18。

以 X - 7 为代表(图 3), 波形初动陡峭, 振幅高, 最大振幅约是声源信号的 1/2, 保持有较高的穿透能。波形包络线呈前后不对称的纺锤形。

第 类样品中的超声波能量衰减强烈的主要原

表 2 岩样波速测定表

Table 2 Wave velocity determination of rock samples

岩样	平均速度/ (m/s)	A 方向/ (m/s)	B 方向/ (m/s)	C 方向/ (m/s)	各向异性值 / %
X - 5	4 568	4 000	4 371	5 333	29
X - 7	5 960	5 752	6 042	6 086	6
X - 10	5 776	5 484	5 886	5 959	8
X - 18	5 673	5 564	5 929	5 526	7
X - 22	4 115	4 151	5 870	4 545	11
X - 33	5 877	5 410	6 250	5 972	14
X - 35	4 942	4 631	5 195	5 000	11
X - 38	5 333	5 460	5 173	5 365	5

表 3 岩样波形特征分类表

Table 3 Classification of waveform characteristics for rock samples

分类	波形特征	代表性样品号
类	初动弱, 波形平缓, 衰减强烈	X - 5、X - 10、X - 22、X - 35
类	初动陡峭, 振幅较大, 衰减较小	X - 18、X - 33、X - 38、X - 7

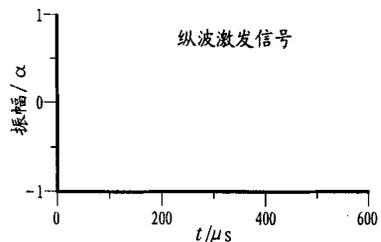


图 1 激发纵波波形图

Fig. 1 Oscillogram of the excitation P wave

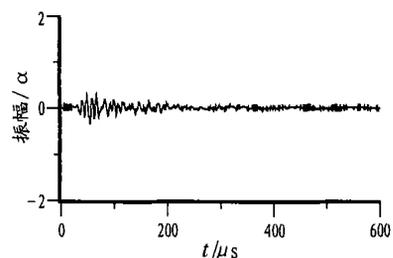


图 2 第 类 X - 5 纵波波形图

Fig. 2 Oscillogram of the -typed P wave for sample X-5

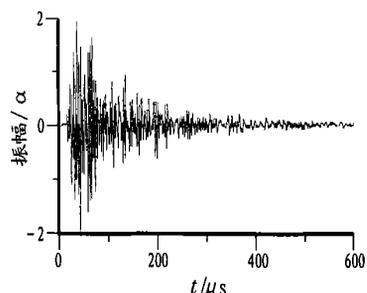


图 3 第 类 X - 7 纵波波形图

Fig. 3 Oscillogram of the -typed P wave for sample X-7

因为岩石样品中存在大量孔隙和裂缝,样品 X-5、X-10 中孔隙最为发育,样品 X-5 中还可见部分孔隙压扁、拉长,相互贯通,造成超声波在传播过程中衰减强烈;X-10 中孔隙为灰质充填,声阻抗与周围介质有明显差异,加上网状裂隙发育,因此超声波衰减也较快。X-22 衰减强烈则是因为角砾中存在大量不完全充填的裂缝造成的。第 类样品岩性较均匀致密,超声波在传播过程中能量损失不大,其最高振幅至少可达第 类样品的 3~5 倍。

2.3 波谱分析

对接收声波信号的波形分析主要是对各类波形在形态和细节上的差异进行描述,波形之间的差异是由传播介质对激发信号的滤波差异作用造成的。为进一步分析不同岩样对声波的滤波作用,将激发信号与接收到的时域信号经快速傅立叶变换分别转换为频率域信号,并求它们的振幅谱 $A_0(f)$ 和 $A(f)$,进而从接收声波的波谱信息中分析声信号在各类样品中的衰减规律。

从获得的接收声波谱图比较分析,也可以将谱图分为两类(表 4)。

第 类:从 $A(f)/A_0(f)$ 波谱图中可以看出岩石介质强烈的滤波作用,接收谱图中对原激发谱的主频成分 240kHz 及高于 400kHz 的高频组分几乎没有响应,接收信号只出现了不易滤除的低频信号,

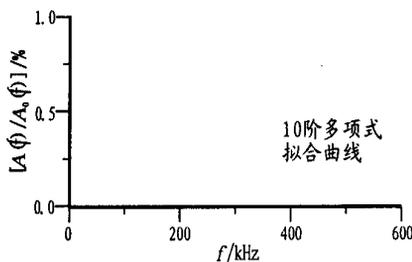


图 4 第 类 X-10 谱图

Fig. 4 Spectrum diagram of sample X-10 (type 1)

表 4 岩样波谱特征分析表

Table 4 Wave spectrum characteristics of rock samples

分类	波谱特征	样品号
类	低频成分丰富,对高频成分几乎无响应	X-5、X-10、X-22、X-33、X-35
类	对激发信号各频段均有较好响应	X-7、X-18、X-38

这一特征反映了这一类岩石介质对声波的强烈滤波作用。样品 X-5、X-22、X-33、X-35 等样品的接收谱图也都反映了这一特征。以 X-10 为代表(图 4),显示了第 类岩样对声波的强烈滤波作用在谱图上反映的特征(以长轴方向接收纵波谱图为例)。

第 类:在谱图中,谱峰值从低频到高频都有分布,且能量衰减很少,说明了这类样品对声源信号中各个频段成分的良好响应。图 5 为第 类代表岩样 X-38 的谱图。

对波谱信号进行 10 阶多项式拟合,拟合曲线显示为能量主要分布在 0~200、200~400、400~600kHz 低、中、高 3 个频段,第一、第二、第三谱峰值见表 5。可以看出,岩样内部的孔隙、裂缝发育状况,从不同频段的丰富程度中得到较好的反映。在孔隙、裂缝发育的岩样中,第一、第二、第三峰值明显衰减,反映了孔隙、裂缝对高频成分的强吸收作用。

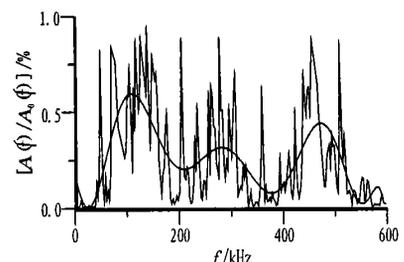


图 5 第 类 X-38 谱图

Fig. 5 Spectrum diagram of sample X-5 (type 2)

表 5 岩样波谱各频段峰值一览表

Table 5 Peak values in each frequency scope of wave spectrum for rock samples

样品号	第一谱峰值		第二谱峰值		第三谱峰值		孔隙、裂缝发育状况
	峰值/ %	对应频率	峰值/ %	对应频率	峰值/ %	对应频率	
X-5	0.2	90	0.03	300	无	无	孔隙发育
X-10	0.23	110	0.07	290	0.05	480	孔隙、裂缝较发育
X-35	0.23	90	0.10	280	0.03	480	少量孔隙、裂缝发育
X-22	0.23	100	0.19	280	0.06	480	裂隙发育,无孔隙
X-33	0.46	90	0.33	280	0.12	480	少量孔隙,充填良好
X-18	0.5	110	0.33	280	0.32	470	致密均匀
X-38	0.59	110	0.32	280	0.44	470	致密均匀
X-7	0.56	100	0.44	280	0.48	480	致密均匀

表6 岩样中孔隙、裂隙对声波特征影响程度一览表

声波特征	孔 隙		裂 缝	
	完全充填	部分充填	完全充填	部分充填
波速	*	**	*	***
波形	*	***	*	**
波谱	*	**	*	*

注: * 表示几乎没有影响; ** 表示有一定影响; *** 表示影响较大。

本次测量采用的纵波换能器主频为 240kHz,其在岩石介质中对应的波长为毫米级至厘米级,与岩样中孔隙和张裂缝的尺寸大致相当。声源激发的各频率段超声波信号经过岩石样品时,受到这些孔隙、裂缝的散射作用,使其中高频(波长较短)成分强烈衰减,而低频成分(波长较长)不易受到这些散射体的影响。从接收谱的高频、低频成分的衰减差异,可以反映出岩样的孔隙及裂缝的发育程度,从而揭示岩样内部的微观信息。

2.4 综合分析

以上分别对测试中获得的有关岩样的波速、波形、波谱 3 方面进行了分析,综合这 3 方面的声学特征与岩样孔隙、裂缝的关系(表 6),揭示了一些声学特征与岩样内部结构(主要是孔隙与裂缝分布)的内在联系。对时间域和频率域的超声波信号进行声波的运动学和动力学特征的综合分析,不仅获得了有关岩样(岩体)的物理性质,还更深一步揭示了岩样(岩体)内部的微观信息,这些宝贵信息将能提供有关石油天然气中储层岩样(岩体)结构特征的研究。

3 结论与讨论

a) 岩样中孔隙、裂缝的存在均会造成岩样的波速偏低,其中裂缝的影响更为明显,尤其是未完全充填的裂缝。

b) 孔隙、裂缝发育的岩样的接收波波均表现出不同程度的初动弱、振幅低和能量衰减现象,其中孔隙的影响程度大于裂缝。但必须指出,完全充填的孔隙和裂缝对波形几乎没有产生影响。

c) 岩样中的孔隙、裂缝对接收波波谱的影响表现为对波谱中高、中、低频成分滤波作用的差异。

d) 在孔隙、裂缝发育的岩样中还存在着较为明显的波速各向异性。

致谢:对南京大学地球科学系黄钟瑾教授、董火根教授在本研究中给予作者的指导表示衷心感谢。

参考文献:

- [1] 马永生,等. 碳酸盐岩储层沉积学[M]. 北京:地质出版社, 1999. 260 - 270.
- [2] 张 进,张庆龙,等. 相关褶皱——鄂尔多斯盆地中的构造样式[J]. 石油实验地质,1999,21(1):61 - 65.
- [3] 余春昊,李长文. 利用斯通利波信息进行裂缝评价[J]. 测井技术,1998,22(4):273 - 277.
- [4] 周继宏. 探测井附近裂缝及其中流体性质的实验初探[J]. 测井技术,1999,23(1):6 - 8.
- [5] 冯敬英,何建军,高向东,等. 辽河油田某地区孔隙度的预测[J]. 矿物岩石,1999,19(5):25 - 28.
- [6] 罗朝盛,董庆德,王克协. 孔隙地层探井中首波的共振与衰减的数值研究[J]. 计算物理,1998,15(5):629 - 634.
- [7] 边瑞雪,邓少贵,张立鹏,等. 地层纵横波幅度与裂缝倾角及张开度的关系[J]. 测井技术,1998,22(5):327 - 331.
- [8] Theodoros Klimentos. Attenuation of P and S-wave as a method of distinguishing gas and condensate from oil and water[J]. Geophysics,1995,60(2):447 - 458.
- [9] 韩绪山. 声波扫描成像在石灰岩地层中的应用[J]. 煤炭地质与开发,1999,增刊:70 - 72.
- [10] 王让甲. 声波岩石分级和岩石动弹性力学参数的分析研究[M]. 北京:地质出版社,1997. 131.
- [11] 刘 彤,徐鸣洁,等. 风化花岗岩岩谱特征分析[J]. 高校地质学报,2000,6(4):588 - 594.
- [12] 刘 斌,葛宁洁, Kern H,等. 不同温压条件下蛇纹岩和角闪岩中波速与衰减的各向异性[J]. 地球物理学报,1998,41(3):371 - 381.
- [13] 刘 斌, Kern H, Popp T. 不同围压下孔隙度不同的干燥及水饱和岩样中的纵横波速度及衰减[J]. 地球物理学报,1998,41(4):537 - 546.

AN EXPERIMENT STUDY ON THE ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF PORES AND FRACTURES IN ROCK SAMPLES

ZHONG Kai¹, XU Ming-jie¹, WANG Hong², WANG Yong², ZOU Xin-ning²

(1. Dept. of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development,

Changqing Petroleum Administration, CNPC, Xi'an, Shaanxi 710021, China)

(to be continued on page 171)

5 结束语

本文提出的油气聚集系数综合求取的方法,既考虑了目前的勘探程度(福克-沃德法、网格统计法),又考虑了诸如输导层的砂岩含量、储层类型、断层性质以及大地构造运动与主要排烃期的匹配关系等影响油气聚集的地质因素(地质综合分析法),然后再对这 3 个因素进行加权平均,最后求取的油气聚集系数可最大程度地接近地下地质情况。该方法应用于东营凹陷第 3 次油气资源评价,得到的资源量与用其他方法(油藏规模序列法、翁氏旋回理论)

等得到的资源量吻合较好,同时也得到了国内有关专家的充分肯定。

致谢:参加本课题研究的还有孔凡仙,王学军,罗佳强等,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] 盛志纬. 关于油气聚集量问题[J]. 石油实验地质, 1989, 21(3): 229 - 232.
- [2] 江汉油田石油地质志编写组. 中国石油地质志(九卷)——江汉油田[M]. 北京:石油工业出版社, 1991. 471 - 473.
- [3] 查明. 断陷盆地油气二次运移与聚集[M]. 北京:地质出版社, 1997. 25.

STUDY AND APPLICATION OF THE COEFFICIENT OF HYDROCARBON ACCUMULATION DETERMINED BY MULTIFACTORS

SONG Guo-qi

(Geological Scientific Institute of Shengli Oilfield Ltd., Dongying, Shandong 257015, China)

Abstract: The coefficient of hydrocarbon accumulation is the key parameter for hydrocarbon resource evaluation. Various references have showed that satisfied technology series have not been created although there have been a number of research methods of hydrocarbon accumulation coefficient. This paper discussed the method of hydrocarbon accumulation coefficient determined by multifactor colligating, which primarily integrated geological research with the Folk-Ward Method and the Method of Exploratory Well Statistics in Grid, and given the application to the 3rd hydrocarbon resource evaluation of the Dongying Sag in the Jiyang Depression.

Key words: multifactor; coefficient of hydrocarbon accumulation; method; application

(continued from page 167)

Abstract: To investigate the pores and fractures of rock samples from the reservoirs of Changqing gasfield, the P-wave ultrasonic data with the samples were measured. Much useful information about the inner structure of the samples can be learned from P waves penetrated them. Based on the synthetic analysis of kinematic (such as wave velocity) and dynamic (such as waveform, spectrum) characteristics, qualitative or semi-quantitative information about pores and fractures in samples can be determined. Firstly, the existence of pores and fractures makes wave velocity lower, and it is much more obvious for fractures especially those without being fully filled. Secondly, the waveform of samples with pores and fractures shows certain weak break, low amplitude and acoustic attenuation, but well-filled pores have few influence on them. Lastly, the influence of pores and fractures on spectrum can be indicated by different filtration of high, middle and low frequency spectrum. Besides, samples with pores and fractures obviously appear velocity anisotropy.

Key words: acoustic characteristics; pore; fracture; rock sample