

Numerical Simulation of Sonic Logging in Fractured Tight Sandstone Reservoirs

Dan Gong^{1,2}, Chengguang Zhang¹

¹Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources (Yangtze University), Ministry of Education, Wuhan Hubei

²Periodical Agency of Yangtze University, Jinzhou Hubei

Email: 332486030@qq.com

Received: Jan. 12th, 2016; accepted: Apr. 11th, 2016; published: Jun. 15th, 2016

Copyright © 2016 by authors, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The logging methods to evaluate the effectiveness of the tight sandstone reservoir mainly include conventional logging, imaging logging and acoustic logging. It was difficult to effectively identify the microfractures by conventional logging and imaging logging, because the width of fractures in fractured tight sandstone reservoirs was less than 100 μm , but the acoustic logging makes a qualitative identification and quantitative evaluation to microfractures through the Stoneley wave attenuation coefficient and other parameters. It will be of great importance to master the influencing rule of fracture of borehole acoustic field for acoustic logging data processing and interpretation by numerical simulation, researching the borehole acoustic field on tight reservoir with the fractures. The method of three-dimensional staggered grid stress and speed finite difference was applied to numerically simulate the problems of borehole acoustic field, which was aroused by point source in layer of elastic media and pore media containing inclined thin cracks. The microfractures in fractured tight sandstone reservoirs were effectively identified and evaluated by using the parameters of energy amplitude of Stoneley wave and etc. In consideration of single horizontal crack, the influence of crack width (20 - 1000 μm) on the Stoneley wave used to identify microfractures was determined, the wider the fracture was, the smaller the amplitude of Stoneley wave was. When the width of fractures was narrower (crack width was less than 100 μm), the waveform amplitude diminished rapidly. The wider the fracture was, the bigger the Stoneley wave attenuation would be. Nevertheless, the relationship between its waveform amplitude, attenuation and fractural width was also obtained under the condition of different porosities of porous medium in formation, that was, the bigger the porosity was, the smaller the amplitude of Stoneley wave, P-wave and S-wave was, the larger the attenuation coefficient of Stoneley wave, P-wave and S-wave was.

Keywords

Acoustic Logging, Stoneley Wave, Fractured Tight Sandstone, Numerical Simulation, Logging Response Characteristics

裂缝性致密砂岩储层声波测井数值模拟

龚丹^{1,2}, 章成广¹

¹油气资源与勘探技术教育部重点实验室(长江大学), 湖北 武汉

²长江大学期刊社, 湖北 荆州

作者简介: 龚丹(1981-), 女, 博士, 讲师, 主要从事石油天然气勘探的研究及编辑工作。

Email: 332486030@qq.com

收稿日期: 2016年1月12日; 录用日期: 2016年4月11日; 发布日期: 2016年6月15日

摘要

目前, 用来评价致密砂岩储层有效性的测井方法主要有常规测井、成像测井及声波测井3种。由于裂缝性致密砂岩储层的裂缝宽度一般小于100 μm , 常规测井和成像测井对微裂缝难以进行有效识别, 而声波测井可通过斯通利波衰减系数等参数对微裂缝进行定性甚至定量识别。通过数值模拟计算, 对含有裂缝的致密储层井孔声场进行研究, 掌握裂缝对井内声场的影响规律, 对于声波测井数据处理及解释具有重要意义。应用三维交错网格应力-速度有限差分方法, 模拟了含有倾斜薄裂缝的孔隙介质地层中点声源所激发的井孔声场问题。针对单条水平裂缝, 确定了不同裂缝宽度(20~1000 μm)对斯通利波识别微裂缝的影响, 即裂缝宽度越大, 波形振幅越小; 裂缝宽度较小时(裂缝宽度小于100 μm), 波形幅度对裂缝宽度的变化非常敏感, 递减非常快; 裂缝宽度越大时, 斯通利波衰减系数越大。此外, 还计算了孔隙介质地层不同孔隙度条件下斯通利波、横波、纵波幅度及衰减系数与裂缝宽度的关系, 即孔隙度越大, 斯通利波、横波、纵波幅度越小, 衰减系数越大。

关键词

声波测井, 斯通利波, 裂缝性致密砂岩, 数值模拟, 测井响应特征

1. 引言

随着世界油气勘探的发展, 裂缝性储集层已成为油气勘探的主要对象之一。由于致密砂岩储层的微裂缝宽度一般小于100 μm , 裂缝与井壁之间的位置关系也不确定, 常规测井和成像测井等测井方法难以对微裂缝进行有效识别, 使得对裂缝地层的识别与评价成为当今测井行业所面临的难题之一。利用声波测井检测倾斜地层、探测裂缝性储集层以及对微裂缝进行有效识别等, 是实际工作中迫切需要解决的问题。通过数值模拟计算, 对含有裂缝的致密储层井孔声场进行研究, 掌握裂缝对井内声场的影响规律, 对于声波测井数据处理及解释具有重要意义。Spring and Dudley [1]和 Kostek 等[2]分别采用积分方程和有限差分法计算了裂缝存在时的时域井孔声波场; Matuszyk 等[3]采用有限元法模拟计算了裂缝性地层的井孔声场; Guan 等[4]采用有限差分法计算了水平分层孔隙介质地层中的井孔声波场; 陈德华等[5]、丛健生[6]也针对裂缝性地层的井孔声场进行了有限差分模拟计算, 但上述计算都是针对二维情况, 并且水平层或裂缝宽度较大。

由于有限元法在地震波模拟问题上比有限差分法更耗时, 因此对于井孔声场的模拟大都采用有限差分法。三维交错网格有限差分法近年来被应用于大斜度井、倾斜分层地层及各向异性介质地层等非轴对称问题的数值模拟研究[7]-[11], 得到了较好效果, 但对非轴对称裂缝地层的井孔声场研究相对较少。为

此, 笔者采用三维不规则交错网格有限差分法对含有倾斜薄裂缝孔隙地层中的井孔声场进行了数值模拟计算, 考察了不同裂缝宽度(20~1000 μm)及地层参数情况下的井孔声场特性, 为进一步研究、利用井孔声场信息反演裂缝参数奠定基础。

2. 模型建立

该次研究应用三维交错网格应力 - 速度有限差分方法, 模拟了含有倾斜薄裂缝孔隙介质地层中点声源所激发的井孔声场问题。图 1 为含有倾斜裂缝地层的井孔模型示意图, 假定声源位于笛卡尔坐标系的原点, 井轴与 Z 轴重合, 井外裂缝与 XZ 轴构成的平面垂直, 与 XY 轴构成的平面倾角为 α , 裂缝下界面与 Z 轴的交点与原点的距离为 d , 裂缝的垂直厚度为 H , 裂缝间隔为 h 。

3. 变网格有限差分处理

由于需要计算的裂缝很薄, 受井孔模型大小的影响, 如果采用很小的网格进行数值计算会导致计算速度过慢, 甚至无法计算的情况。采用不均匀网格的办法在裂缝处采用小网格, 在非裂缝处采用大网格, 可以大大减小计算量, 在保证计算精度的同时提高了计算速度。在使用变网格时, 网格步长的变化可能会导致数值反射的出现, 其原因是因为波场离散后, 相速度是网格步长的函数, 当相速度梯度较大时, 即使速度和密度都没有变化, 入射波的能量也会部分反射回来, 导致了数值反射现象。在网格变化的区域对波场进行插值计算虽可以在某种程度上压制数值反射, 但是插值算法计算量大, 且效果并不令人满意, 所以该次研究没有采用插值计算, 而是根据各点所对应的步长的变化计算其差分系数, 该方法不会产生数值反射, 并且减小了计算量。

当井外为无裂缝的孔隙介质地层时, 将有限差分结果与实轴积分法结果进行对比(图 2), 声源频率为 2.5 kHz, 接收器与声源间距为 1 m, 图中黑线为有限差分法计算结果, 红线为实轴积分法计算结果, 2 种方法计算结果基本符合, 证明了有限差分方法的正确性。图 2 中幅度上的差异是由归一化造成的, 不影响研究结果。

4. 计算结果分析

4.1. 裂缝宽度的影响

图 3 为频率 5 kHz 时的砂岩不同级别裂缝宽度(20~1000 μm)的波形对比图。从图 3 中可以看出, 声探头穿过不同裂缝宽度的裂缝时, 裂缝宽度越大, 波形衰减越明显, 波形幅度越小; 裂缝宽度较小(裂缝宽度 $< 100 \mu\text{m}$)时, 波形幅度递减较快, 波形衰减更明显。

图 4 为频率 5 kHz 时的砂岩裂缝宽度与斯通利波幅度值关系图及砂岩裂缝宽度与斯通利波衰减系数关系图, 可以看出, 裂缝宽度越大, 波形幅度越小; 裂缝宽度较小(裂缝宽度 $< 100 \mu\text{m}$)时, 波形幅度递减较快, 波形衰减更明显; 裂缝宽度越大, 斯通利波衰减系数越大, 并逐渐趋于平稳。

4.2. 孔隙度的影响

4.2.1. 斯通利波

图 5 是孔隙介质地层频率 5 kHz 时不同孔隙度下裂缝宽度与斯通利波幅度的汇总图, 可以看出, 随着裂缝宽度的增加, 斯通利波幅度均呈明显的下降趋势, 且裂缝宽度较小(裂缝宽度 $< 100 \mu\text{m}$)时, 波形幅值递减较快, 波形衰减更明显; 孔隙度越大, 相同裂缝宽度下的斯通利波幅度越小。

图 6 是孔隙介质地层频率 5 kHz 时不同孔隙度下裂缝宽度与斯通利波衰减系数的汇总图, 可以看出, 随着裂缝宽度的增加, 不同孔隙度下的斯通利波衰减系数均呈明显的上升趋势; 且孔隙度越大, 斯通利波衰减系数越大。

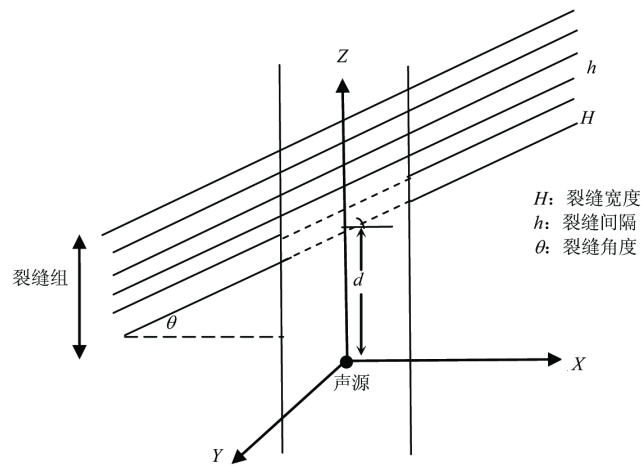


Figure 1. Hole model containing an inclined crack in a formation
图 1. 倾斜裂缝地层中的井孔模型

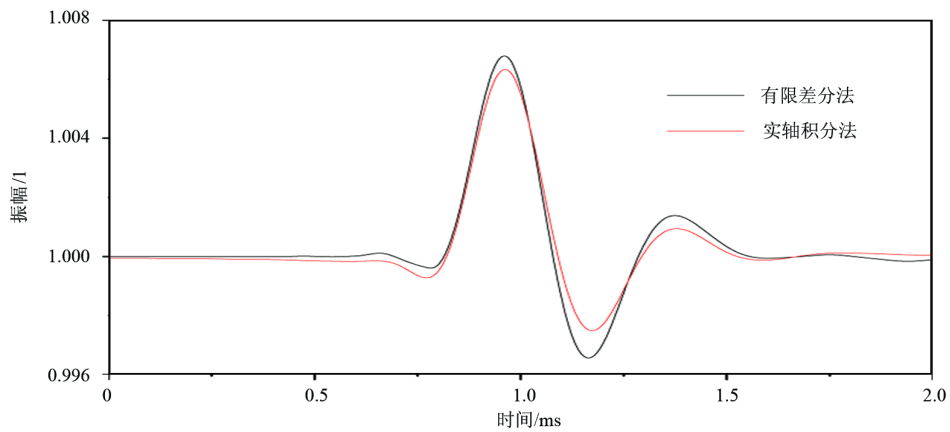


Figure 2. The comparison results of real axis integrate method and finite-difference method
图 2. 有限差分法与实轴积分法的结果对比图

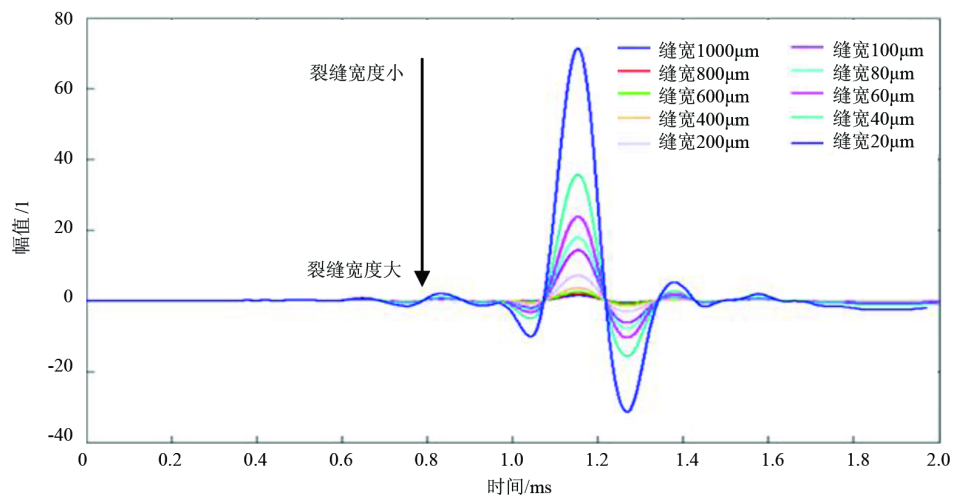


Figure 3. The waveform comparison of different crack levels (20 - 1000 μm) of sandstone (frequency 5 kHz)
图 3. 砂岩不同裂缝级别(20~1000 μm)波形对比图(频率 5 kHz)

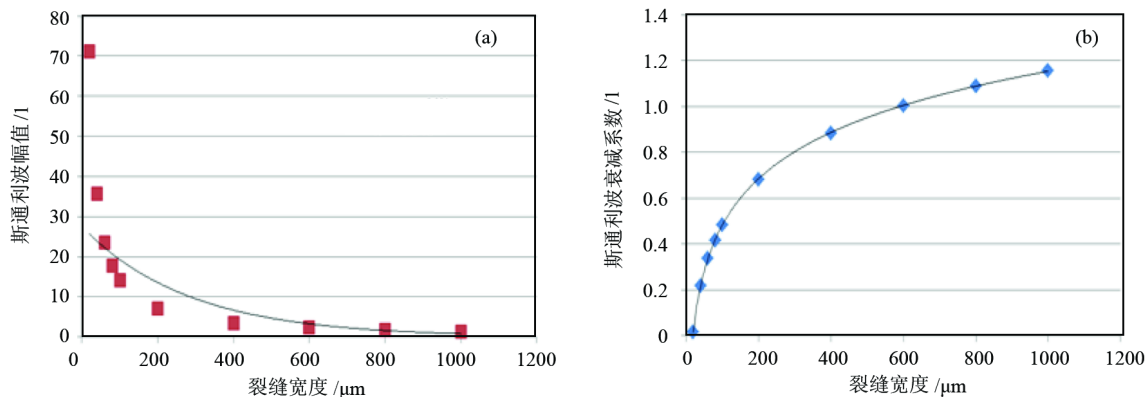


Figure 4. Relationship between crack width and the Stoneley wave amplitude, the Stoneley wave attenuation coefficient of sand stone (frequency 5 kHz)
图 4. 砂岩裂缝宽度与斯通利波幅值关系图(a)及裂缝宽度与斯通利波衰减系数关系图(b)

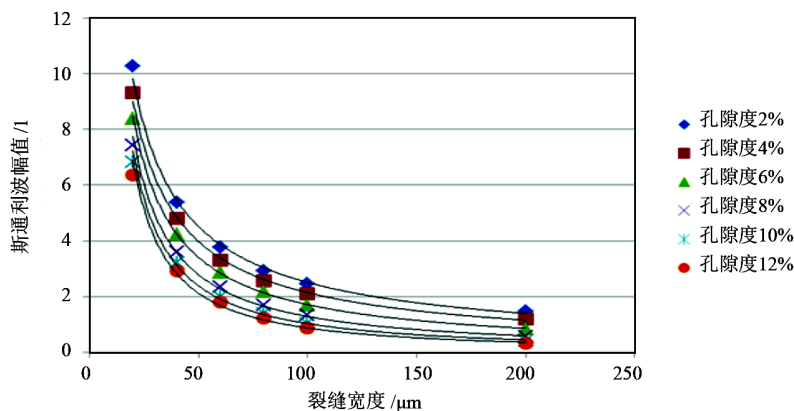


Figure 5. Summary of relationship between crack width and Stoneley wave amplitude with different porosities of porosity formation (frequency 5 kHz)
图 5. 孔隙介质地层不同孔隙度下斯通利波幅值与裂缝宽度关系汇总图(频率 5 kHz)

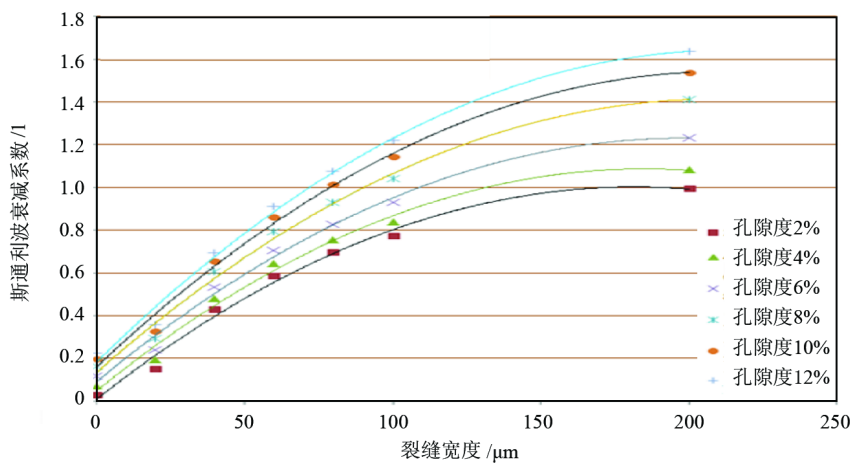


Figure 6. Summary of relationship between crack width and Stoneley wave attenuation coefficient with different porosities of porosity formation (frequency 5 kHz)
图 6. 孔隙介质地层不同孔隙度下斯通利波衰减系数与裂缝宽度关系汇总图(频率 5 kHz)

通过对比孔隙介质地层与弹性介质地层斯通利波衰减系数与裂缝宽度关系汇总图(图 7)可以发现, 孔隙介质中孔隙度对斯通利波衰减系数的影响更大, 不同孔隙度下, 斯通利波衰减系数与裂缝宽度的关系曲线差别更大。

4.2.2. 横波

图 8 是孔隙介质地层不同角度情况下横波幅度与孔隙度关系汇总图, 可以看出, 随着孔隙度的增大, 横波幅度逐渐减小; 相同孔隙度下, 裂缝角度越大, 横波幅度越大。

4.2.3. 纵波

图 9 为频率 5 kHz 时不同孔隙度下纵波衰减系数与裂缝宽度的汇总图, 可以看出, 随着裂缝宽度的增加, 不同孔隙度下的纵波衰减系数均呈明显的上升趋势; 且孔隙度越大, 纵波衰减系数越大。

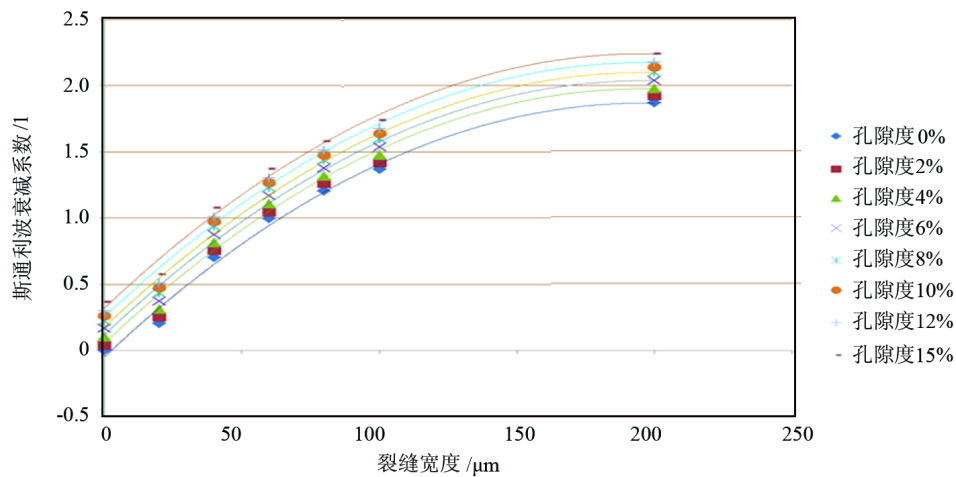


Figure 7. Summary of relationship between crack width and Stoneley wave attenuation coefficient with different porosities of elastic medium formation (frequency 5 kHz)

图 7. 弹性介质地层不同孔隙度下斯通利波衰减系数与裂缝宽度关系汇总图(频率 5 kHz)

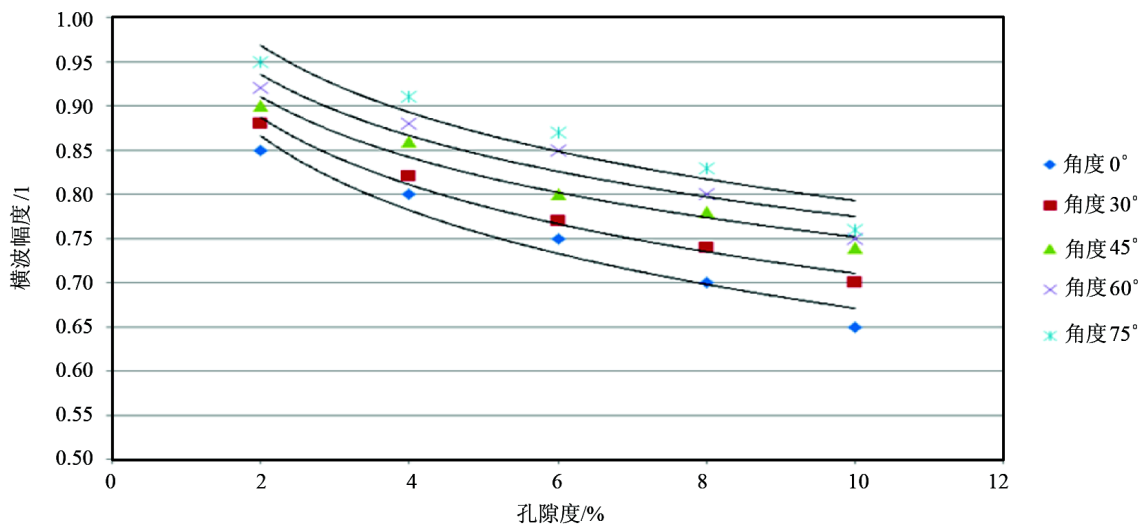


Figure 8. Summary of relationship between shear wave amplitude and porosity with different crack dips of porosity formation (frequency 5 kHz)

图 8. 孔隙介质地层不同角度情况下横波幅度与孔隙度汇总图(频率 5 kHz)

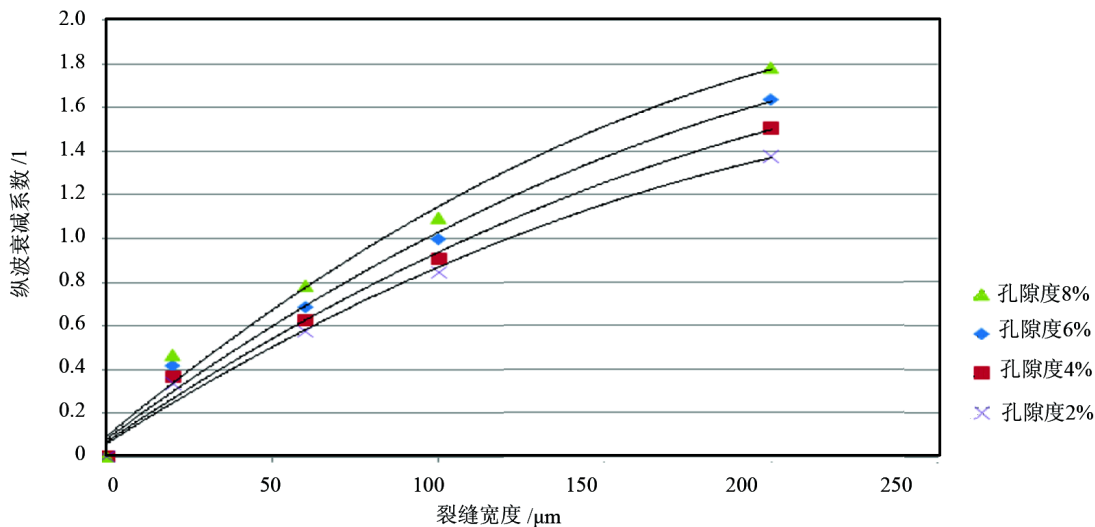


Figure 9. Summary of relationship between crack width and longitudinal wave attenuation coefficient with different porosities of porosity formation (frequency 5 kHz)

图 9. 孔隙介质地层不同孔隙度下纵波衰减系数与裂缝宽度汇总图(频率 5 kHz)

5. 结论

通过数值模拟手段,对微米级(裂缝宽度最低 $20 \mu\text{m}$)的单条或多条水平及不同角度的裂缝进行了数值模拟,分析了波形幅度、衰减系数与裂缝宽度、孔隙度的关系,取得了如下认识。

1) 声探头穿过裂缝时,波形幅度变小。声探头穿过不同宽度的裂缝时,裂缝宽度越大,波形幅度越小。裂缝宽度较小时(裂缝宽度 $< 100 \mu\text{m}$),波形幅值递减很快,波形幅度随裂缝宽度的变化非常敏感。因此,当裂缝宽度小于 $100 \mu\text{m}$ 时,不能定量确定裂缝宽度,即声波测井对微裂缝的反映下限是裂缝宽度 $100 \mu\text{m}$ 。

2) 裂缝宽度越大,斯通利波、横波、纵波幅度均减小,衰减系数均增大;在其他参数不变的情况下,孔隙度越大,斯通利波、横波、纵波衰减系数越大。

基金项目

国家科技重大专项(2011ZX0502-008)。

参考文献 (References)

- [1] Spring, C. and Dudley, D. (1992) Acoustic-Wave Propagation in a Cylindrical Borehole with Fractures. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **91**, 658-669. <http://dx.doi.org/10.1121/1.402527>
- [2] Kostek, S., Johnson, D. and Randall, C. (1998) The Interaction of Tube Waves with Borehole Fractures. Part I: Numerical Models. *Geophysics*, **63**, 800-808. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1444391>
- [3] Matuszyk, P.J., Torres-Verdín, C. and Pardo, D. (2013) Frequency-Domain Finite-Element Simulations of 2D Sonic Wireline Borehole Measurements Acquired in Fractured and Thinly Bedded Formations. *Geophysics*, **78**, 193-207. <http://dx.doi.org/10.1190/geo2012-0397.1>
- [4] Guan, W., Hu, H. and He, X. (2009) Finite-Difference Modeling of the Monopole Acoustic Logging in a Horizontally Stratified Porous Formation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **125**, 1942-1950. <http://dx.doi.org/10.1121/1.3081518>
- [5] 陈德华, 丛健生, 徐德龙, 等. 裂缝性地层中的井孔声场模拟[J]. 大庆石油学院学报, 2004, 28(3): 4-6, 13.
- [6] 丛健生. 利用有限差分法模拟计算具有分层和裂缝地层井内外声场[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 大庆石油学院, 2004.

- [7] Leslie, H.D. and Randall, C.J. (1992) Multipole Sources in Boreholes Penetrating Anisotropic Formations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **91**, 12-17. <http://dx.doi.org/10.1121/1.402761>
- [8] Cheng, N.Y., Cheng, C.H. and Toksoz, M.N. (1995) Borehole Wave Propagation in Three Dimensions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **97**, 3483-3493. <http://dx.doi.org/10.1121/1.412996>
- [9] Sinha, B.K., Ergün, Ş. And Liu, Q.H. (2006) Elastic-Wave Propagation in Deviated Wells in Anisotropic Formations. *Geophysics*, **71**, 191-202. <http://dx.doi.org/10.1190/1.2358402>
- [10] 林伟军, 王秀明, 张海澜. 倾斜地层中的井孔声场研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(1): 284-294.
- [11] 阎守国, 宋若龙, 吕伟国, 等. 横向各向同性地层斜井中正交偶极子激发声场的数值模拟[J]. 地球物理学报, 2011, 54(9): 2412-2418.

再次投稿您将享受以下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>