

基于孔裂隙理论的岩石物理实验研究 与理论应用

陈剑铭^{1,2)}, 涂运中²⁾, 张波⁴⁾, 尹浩²⁾, 王晓赛²⁾, 王文²⁾, 赵明²⁾,
吴纪修²⁾, 高鹏举²⁾, 田倩媛²⁾, 徐梦龙³⁾, 黄威³⁾, 张家声³⁾

1) 哈利法科技大学, 阿拉伯联合酋长国阿布扎比, 127788;

2) 中国地质科学院勘探技术研究所, 中国廊坊, 065000;

3) 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 中国廊坊, 065000;

4) 深圳市勘察测绘院有限公司, 中国深圳, 518028

关键词: 岩石物理实验; 孔裂隙理论; 理论应用

地下地质构造中含有一系列不同尺度的孔隙和裂缝, 相比于裂隙, 孔隙不易发生形变而裂隙在压力作用下易于变形闭合, 这一特性显著影响着岩石中弹性波的传播。在此背景下, 提出的新理论模型, 就裂隙对弹性介质的影响进行了分析, 引入了“挤喷流”(squirt flow)效应的贡献, 最终得到“含孔隙、裂隙介质的双孔介质统一理论”(唐晓明, 2011)。在含孔隙、裂隙介质的双孔介质统一理论中, 裂隙密度和裂隙纵横比是两个非常重要的参数。在这个新理论中, 可以通过反演实验室测量的干燥和饱和流体岩石条件下, 不同围压下的岩石速度(V_p , V_s), 来获得裂隙密度和裂隙纵横比的反演结果(唐晓明等, 2013)。除此之外, 基于已发表的实验数据, 利用岩石脆性计算公式得出岩石脆性数值, 并与反演得到的裂隙密度进行相关度分析。结果发现: 岩石的脆性与其裂隙的发育程度(即裂隙密度)呈“正相关”的关系, 岩石中的裂隙越发育, 岩石裂隙密度越大, 其对应的岩石脆性越高, 利用这一规律和结论, 有助于我们在岩石脆性评价以及岩石可压裂性评价中进行应用分析。

1 含孔隙、裂隙介质的双孔介质统一理论

1.1 含孔、裂隙岩石介质中弹性波传播理论研究与发展

地壳中的岩石含有不同类型的孔隙, 包括和裂隙和裂缝(孙灵辉等, 2022)。通过将经典的 Biot 孔隙弹性理论从多孔介质扩展到具有裂隙的岩石, 唐晓明在原始模型基础上, 加入了裂隙密度和裂隙纵横比这两个重要的参数(唐晓明, 2011)。在这种新方法中, 裂隙密度和裂隙纵横比这两个参数, 可以通过反演实验室测得的干燥和流体饱和岩石的纵横波速度数据来获得。本文研究利用实验室超声数据反演裂隙参数确定岩石的裂隙参数和孔隙流体模量。

从 1950 年至今, Eshelby 和 Walsh 开始研究含有裂隙的介质的弹性特性。后来, O'Connell 和 Budiansky 发表了一系列关于这个问题的论文。根据他们的研究, 在压力变化的条件下, 裂隙中的流体会流失, 从而引起“喷射流”的效应, 从而导致含裂隙介质的具有粘弹性状态。

Biot 假定孔隙在介质中均匀分布, 然后为多孔介质建立了著名的多孔弹性波理论。值得一提的是, 该理论主要集中在流体饱和多孔介质的动力响应上, 同时也关注孔隙流体与固体基质的粘性耦合问题。然而, 这个理论有其不足之处和局限性, 特别是当它用于描述勘探应用问题中的多孔岩石行为时。例如, Dvorkin 和 Nur 发现该理论无法准确预测一般多孔岩石中的弹性波频散和衰减。其主要原因在于假设孔隙分布的均匀性, 忽略了孔隙尺度局部流体运动引起的“喷流”效应。

收稿日期: 2023-12-10; 改回日期: 2024-02-05; 责任编辑: 章雨旭。DOI: 10.16509/j.georeview.2024.s1.075

作者简介: 陈剑铭, 男, 1992 年生, 硕士, 中级工程师, 主要从事岩石物理, 岩石力学研究; Email: chenjm_upc@foxmail.com。通讯作者: 涂运中, 男, 1979 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事地质钻探研究工作; Email: tumichael@163.com。

Dvorkin 和 Nur 提出了一个统一的理论, 将喷射流与 Biot 理论相结合。以这种方式, 测量的大弹性波衰减和扩散可以在多孔岩石中建模。但是 Dvorkin 和 Nur 理论忽略了裂隙介质中的两个重要参数: 裂隙密度和裂隙纵横比。更重要的是, Dvorkin 和 Nur 理论未能描述 Biot 的慢波传播。这就是为什么 Dvorkin 和 Nur 理论不能被视为裂缝多孔介质中的统一理论的原因(唐晓明, 2011)。

1.2 含孔隙、裂隙介质弹性波动理论

基于经典的 Biot 弹性波理论, 并加入了由于裂隙的存在而导致的“挤喷流”效应的贡献, 唐晓明提出了一个统一的新理论, 即“含孔隙、裂隙介质弹性波动理论”。在该理论中, 唐晓明详细分析了孔隙和裂隙之间的喷流效应, 并且该理论还将该效应与裂隙介质的重要参数(即裂隙密度与裂隙纵横比作为描述岩石重要的裂隙参数)相关联。由于新理论不仅包含了原始理论的特点, 并且能够更好地解释和说明弹性波在实际地层岩石中的频散和衰减, 而且大大增强了建模能力, 可以预测弹性波在这种介质中的传播。因此, 新理论在使用地震波或声波测量地壳岩石特性方面具有更广泛的应用范围。

2 利用实验室测量的声速数据反演岩石的裂隙参数

2.1 反演岩石裂隙参数的方法原理

笔者等研究利用实验室超声数据反演裂隙参数以及利用测井资料确定井壁岩石的裂隙参数和孔隙流体模量的方法, 在此估算过程中需要有适合于描述非常规储层岩石的弹性波理论作支撑。对于孔隙结构复杂、微裂隙发育的复杂介质, 当岩石空间内充满液体时, 由于裂隙与孔隙的压缩性不同, 受压时会导致液体在裂隙与孔隙之间产生局部非均匀流动, 这对基于均匀介质和理想流体假设的经典 Biot 理论提出了挑战。因为 Biot 理论只考虑了表征体元尺度上的宏观平均渗流导致的液体与固体间的粘滞摩擦产生的能量耗散机制, 其预测的弹性波衰减远远小于实验测得的值。为适应新时期非常规油气勘探的需求, 需要发展含裂隙的双相孔隙介质弹性波动理论, 为研究岩石中存在裂隙、裂缝时的岩石物理学性质及其在声波测井、地震勘探中的油、气显示和响应特征奠定理论基础。

孔隙、裂隙的分布状态明显影响着岩石的弹性

模量, 因此我们可以从岩石的声波速度反演岩石的孔隙结构或裂隙参数。对孔隙、裂隙介质弹性波动理论的模型参数(如裂隙密度等)进行反演, 是通过用理论公式对实验室测量数据做最小二乘拟合得到的。对同一岩石样品在干燥和流体饱和状态下分别测量波速随压力的变化。在压力加载范围内进行 N 次测量, 测得的干燥和饱和岩石的纵、横波速, 理论和实验数据拟合所得的均方误差即可作为反演所需的目标函数。

为模拟计算理论纵横波速, 岩石中流体的体积模量, 在实验中是已知的。需要说明的是: 若实验数据只有干燥岩石的速度, 那么可以通过调整目标函数来实现裂隙密度的反演。为解决反演的非唯一性问题, 可以采用求全局极小值的 GA 最优化方法。经过反演得到模型参数后, 再代入理论模型, 模拟出不同压力下纵横波速度的值。模拟结果与实测数据的符合程度可以用来检验理论的正确性和适用性。

2.2 反演岩石裂隙参数的应用实例

岩石中传播的纵横波速大小不仅与岩石的裂隙发育程度(即笔者等所讨论到的裂隙密度)有关, 也与岩石中裂隙结构(即笔者等所讨论到的裂隙纵横比)有关。在不同围压下的加载下, 岩石中传播的纵横波速大小会有改变, 岩石中的裂隙密度与裂隙纵横比在不同压力下也会发生相应的变化。图 1 为干燥和水饱和条件下的纵横波速度数据与理论拟合结果, 表 1 为水饱和条件下测量的岩石纵横波速度和模量数据。

从实验数据结果可以显而易见地发现, 随着加载在岩石上的围压不断增大, 岩石中纵横比较小, 也就是较狭长的裂隙会优先闭合, 这使岩石中的裂隙密度会降低。随着压力增加到一定数值后, 可被压缩变形闭合的裂隙大体全部闭合, 这时岩石中裂隙的裂隙密度变化变缓慢, 逐渐趋于一个恒定的数值, 不再变化或者变化很小。根据这一性质和特点, 岩石中的传播的纵横波速也逐渐趋于一个稳定特性, 笔者等可以构建出纵横波速与岩石裂隙的函数关系式, 并根据之前所讨论到的含孔隙、裂隙介质弹性波的统一理论, 基于不同围压下岩石的纵横波速数据, 即可反演出该岩石介质在不同围压下的裂隙参数(裂隙密度和裂隙纵横比)。当我们得到反演出的裂隙参数(裂隙密度和裂隙纵横比)后, 我们可以将该裂隙参数带入理论岩石物理模型, 进而

可以模拟和预测出该岩石介质在其他液体饱和状态下纵横波速随围压变化的关系曲线，并与实际测量的实际数据相比较。

参 考 文 献 / References

孙灵辉, 萧汉敏, 谭龙, 李博文, 孙东盟, 王鹏威. 2022. 致密砂砾岩储层孔隙结构对比及差异机制研究. 地质学报, 96(6): 2155~2172.

唐晓明, 钱玉萍, 陈雪莲. 2013. 孔隙、裂隙介质弹性波理论的实验研究. 地球物理学报, 56(12): 4226~4233.

唐晓明. 2011. 含孔、裂隙介质弹性波动统一理论-Biot 理论的推广. 中国科学: 地球科学, 41(6): 784~795.

CHEN Jianming, TU Yunzhong, ZHANG Bo, YIN Hao, VAN Giaosai, WANG Wen, ZHAO Ming, WU Jixiu, GAO Pengiu, TIAN Qianyuan, XU Menglong, HUANG Wei, ZHANG Jiasheng: Inverting and applications of crack parameters based on Tang's cracked porous medium elastic

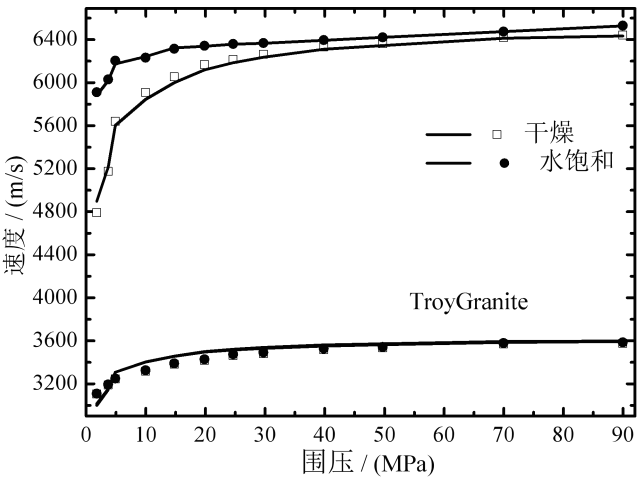


图1 干燥和水饱和条件下的纵横波速度数据与理论拟合结果

wave theory and experimental data

Keywords: rock physics experiment; wave theory in cracked porous medium; theoretical application

表 1 水饱和条件下测量的岩芯纵横波速度和模量数据

序号	围压	V_p	$V_s(1)$	$V_s(2)$	杨氏模量	泊松比
	(MPa)				(GPa)	
0	2.5	6443	3353	3354	79.22	0.314
1	4.9	6452	3354	3354	79.28	0.315
2	7.4	6462	3356	3356	79.40	0.315
3	9.9	6471	3356	3357	79.47	0.316
4	12.4	6471	3358	3357	79.50	0.316
5	14.9	6471	3358	3359	79.54	0.316
6	17.4	6480	3358	3359	79.58	0.316
7	19.9	6480	3358	3359	79.58	0.316