

饱和多孔介质多相流体系中孔隙压传播数值分析

杨多兴^{1,2)} 刘耀炜^{1,2)} 杨选辉^{1,2)} 张德良³⁾

1) 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085

2) 中国地震局地壳动力学重点实验室, 北京 100085

3) LHD 中国科学院力学研究所, 北京 100190

孔隙压传播与衰减对解释深部流体在地震孕育、触发和断裂活动过程中的作用机制, 以及石油与天然成藏机理等方面具有重要的学术和应用价值。目前孔隙压波的理论及计算以孔隙弹性介质理论、BISQ 理论为基础。Biot 孔隙弹性理论仅考虑流体沿着波的传播方向发生流动, 严重低估了 Biot 损失。Squirt 机理考虑了微裂隙中粘性流体的局部流动, 能够合理地解释超声波的衰减特征。Daillo 和 Appel 2000 年提出改进的 BISQ 模型, 克服了孔隙压对喷射流动长度的依赖性。孔隙弹性介质理论基于达西定律研究流体的动量输送, 对流体与多孔介质之间动量与能量交换、多相流界面动力机制缺乏考虑。

饱和多孔介质中孔隙压传播和介质动态响应等高度局部化现象都是高度非线性问题。在数值计算时物理量强间断处理和多相流界面发生较大变形的处理是当前的主要难题。对于复杂的介质结构, 在不同介质的接触面上, 物理量必然存在间断, 形成激波, 因此必须考虑物质界面的变形运动及其对物理量的影响, 多物质计算的一个关键困难在于如何高精度捕捉物质界面及界面处边界条件的确定。长期以来, Euler 型方法在孔隙弹性计算中占统治地位, 但面临两大挑战: 控制方程的离散方法, 包括强间断的处理, 以及确定物质界面的数值方法。

目前, 孔隙压数值计算方法主要是多尺度自适应有限元、积分有限差分、Boltzman 方法等, 但是这些经典的计算方法物理量在时间和空间上不能同时守恒, 甚至存在非物理解振荡现象。时空守恒元/解元方法是近年来出现的一种双曲型偏微分方程的全新高精度计算格式。CE/SE 方法无论从概念上还是从格式的构造方法上都与传统的数值方法有很大不同, 它把时间和空间统一起来同等对待, 并利用守恒型积分方程通过解元和守恒元使局部和整体都严格满足守恒律, 多维问题不需要算子分裂或方向交替技术, 其格式构造清晰, 物理意义明确, 计算精度高, 目前已推广到高阶精度, 并成功应用于各种高维的流体问题和工程实践中。但是, 至今尚未见到其在孔隙压波问题上的应用。

综上所述, 改进孔隙压波模型的控制方程组, 引入高精度数值模拟方法及多物质界面处边界条件的处理方法, 是孔隙弹性介质研究领域中新学科增长点, 具有重要的理论与应用价值。

本文基于孔隙弹性理论, 结合杂交粒子水平集方法、合适的物质接触界面和自由界面边界条件, 提出一套用于求解三维 Euler 型孔隙压波问题的 CE/SE 计算方案。研究孔隙压扩散和衰减的传播速度和衰减因子, 识别主导孔隙压扩散和衰减的特征水文地质参数。结合特定油藏及相关地质体物性参数, 定量分析孔隙压扩散和衰减的传播速度和衰减因子; 根据储层地质资料, 建立三维模型, 定量计算孔隙压扩散和衰减的空间特征, 结合孔隙压监测数据, 检验模型。