

油藏数值模拟技术在缝洞型碳酸盐岩油藏中的应用

周春明（大港油田天津储气库分公司，天津 300280）

摘要：高速发展的信息技术已经渗透到我国的各行各业中，在石油行业，油藏数值模拟技术的大范围应用就是信息技术助推工业发展的最好例证。对于缝洞型碳酸盐岩油藏来说，其本身具备着尺度差异大、流动形式复杂、类型多样等特点，而这些特点的存在就使得传统数值模拟方法并不能较好满足这类油藏开发机理和剩余油分布规律研究的需要，为此本文就缝洞型碳酸盐岩油藏数值的模拟技术与应用展开了具体研究。本文首先介绍了缝洞型碳酸盐岩油藏储集体类型，分析了缝洞型碳酸盐岩油藏数值模拟技术的两种方式，等效数值模拟方法以及离散裂缝模拟方法，并通过实例，论证了数值模拟技术在缝洞型碳酸盐岩油藏中的应用，为剩余油分布与挖潜增效方案的改进，提供强有力的数据支持。

关键词：数值模拟；缝洞型；碳酸盐岩；油藏

0 引言

碳酸盐岩在油气藏储层中具有十分重要的价值，作为碳酸盐岩油气藏储集层的一种，缝洞型油气藏储层有非常强的各向异性，是非常典型的非常规油气藏储集类型。因为其油气储量十分丰富，因此受到世界各国的广泛关注，并采取了措施，深入开展研究，进展迅速。

1 缝洞型碳酸盐岩油藏储集体类型

碳酸盐岩的孔洞和裂缝是理想的油气储集场所，因此碳酸盐岩的缝洞储层一直是地质学家的重点研究对象。然而，由于碳酸盐岩缝洞储层具有强烈的高山特征，即缝洞形态组合多样，分布复杂，储层空间分布不规则，预测碳酸盐岩缝洞储层非常困难。常见的缝洞型碳酸盐岩油藏储集体类型有以下几种。

1.1 洞穴型储层

洞穴型油气储层的油气储集场所指的是直径 $> 500\text{mm}$ 的大型溶洞，分布位置主要在鹰山组顶部及断裂发育区。洞穴型储层测井解释孔隙度 $\geq 12\%$ 。在成像测井图像上，该类型的储层，显示为暗色条带、暗色块状夹局部亮色团块等。

1.2 孔洞型储层

该类型储层油气储集场所是溶蚀改造后形成的，裂缝欠发育。就碳酸盐岩孔洞型储层而言，其物性标准一般为 $\Phi \geq 1.8\%$ ， $\Phi_f < 0.04\%$ 。一般情况下，孔隙度在较发育断为 $4\sim 6\%$ ，局部发育较好的岩层可能更高。孔洞型储层在成像测井图上一般表现为不规则的暗色斑点，而且其电阻率与密度成正比。如果电阻率降低，那测井结果中会出现声波时差，并且存在中自跳跃的问题。

1.3 裂缝型储层

该类储层基质孔隙及孔洞孔隙度均不发育，一般小于 1.8% ，裂缝发育，裂缝孔隙度大于 0.04% 。储层的渗透性会受到裂缝分布情况与发育程度的影响，所以，裂缝型储层孔隙度低且渗透率高。裂缝型储层从成像测井图像上，非常容易识别，其产状与有效性也很容易从图中看出。图像上多呈正弦曲线、高角度和网状线条，其中呈黑色多为半-未充填。

1.4 裂缝-孔洞型储层

目前最主要的一种储层类型是裂缝-孔洞型储层，这类储层孔洞、裂缝均较发育。在该种类型储层中，裂缝既起到了是连通渗流的作用，还能够储存部分油气，但是大部分的油气还是储存在空洞中。该类型储层由于存在裂缝连通各孔洞，大大提高了渗流能力。从成像测井图像上，可以看到暗色线条与暗斑同时发育，这是裂缝与孔洞的识别标志。

2 缝洞型碳酸盐岩油藏数值模拟技术

2.1 基本方法

由于油藏描述方法和相关数值建模软件的局限性，使得缝洞型碳酸盐岩油气藏数值模拟工作和生产动态分析预测的难度加大，油气藏数值化进程缓慢，较难制定合理的油气藏开发技术政策。根据国内外的相关研究和应用，目前主要有两种方法来模拟缝洞型油气藏。第一类是对地质储量、渗透率和渗流方式三个参数进行等效，使用的参数分别是弹性储容比、渗透率级差和窜流系数。在基质——裂缝型油气藏渗流模型的基础上建立溶洞——裂缝双重介质油气藏渗流数学模型，称为“等效数值模拟方法”。第二类方法是建立流动的模型，完整的还原缝洞的真实形态和分布，能够更加直接和精确地对缝洞型油气藏进行数值模拟求解，这类方法叫做“离散裂缝方法”。

2.2 等效数值模拟方法

碳酸盐岩油气藏等效连续介质数值模拟方法的数学模型主要有以下几种：单重孔隙模型、双重介质模型（分为双孔单渗模型和双孔双渗模型）以及三重介质或多重介质模型。等效连续介质模型并没有直接将裂缝包含到模型中，而是通过岩块体积平均化等来求得裂缝所在网格的渗透率和孔隙度的方法来表征。等效连续介质模型是将裂缝、洞和孔隙等划分为一种或几种不同的连续性介质，如当采用双重介质模型进行模拟，一般将裂缝、孔隙分别作为一种连续性介质，而互相连通的洞或与裂缝连通的洞归并到裂缝系统中，离散的洞或与孔隙连通的洞归并到岩块系统中。

但是, 等效连续介质模型存在许多不足之处。因为地下的裂缝网络存在很强的非均质性和不连续性, 等效模型对裂缝系统和岩块系统的窜流量还不能精确描述, 例如对混合润湿油藏模拟计算精度较低等效模型中的传统的“糖块”模型对裂缝采用网格块系统来表示, 根据网格大小对裂缝的渗透率和孔隙度进行加权平均, 如果网格块中含有裂缝, 则该网格的裂缝就具有渗流能力, 但实际上该网格内裂缝并没有形成与其他网格块裂缝之间的连通。现实中, 地层中的流入流出经常会出现在不同的方向, 有时甚至会出现互相垂直的两个方向, 但是传统的网格块描述方式只能描述同一个方向上的流入和流出。

2.3 离散裂缝方法

离散裂缝模型是把裂缝近似为一个等宽的矩形, 通过测井资料得到其长度及产状等特征。把孔洞近似为一个球形, 通过缝洞雕刻数据或者测井数据来计算得到裂缝和孔洞的密度。

传统的方法在模拟裂缝时, 通常是采用局部加密网格的方式, 无法精细准确的描述裂缝方向。而离散裂缝方法采用非结构化网格来处理裂缝问题。离散裂缝模型虽然最为精确, 但通常由于计算量过于庞大而导致其实际应用存在很大困难, 加上缝洞型油气藏地质模型的复杂性和目前电脑性能的限制, 要求使用有效的简化模型来完成快速的数值模拟计算, 目前最为有效的处理方法是利用局部的离散裂缝模型计算推导出双孔双渗模型参数, 从而系统有效地将离散模型与双孔双渗模型联系起来, 最终应用到各种复杂流动的计算中去。这种方法被称为“多重次级网格”法 (MSR)。

在油藏中油水两相流动的控制方程为:

$$\frac{\partial(\phi \rho_l s_l)}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{\rho_l k_{rl}}{\mu_l} \nabla p_l \right) + q_l$$

其中 ϕ 是孔隙度, ρ 是流体密度, p 是压力, k 是渗透率, μ 是流体粘度, q 是外部源汇项, l 代表液体 o 和 w (油和水)。

在有限体积方法中, 每一个控制体网格都有一个总体积和孔隙度。控制方程离散之后, 流动相可以基于连通控制体来表示。连通性定量表示为从网格到网格的传导率, 它将流量与网格之间的压力差通过如下方程联系起来:

$$Q_{l,ij} = T_{ij} \rho_l \lambda_l (P_{li} - P_{lj})$$

其中 $Q_{l,ij}$ 是流体相 l (l = 油或水) 从网格 i 到 j 的质量流动速率, P_{li} 表示相 l 在网格 i 中的压力, T_{ij} 是网格 i 与 j 之间的传导率, ρ_l 是流体相密度, $\lambda_l = k_{rl} / \mu_l$ 表示基于上游权的流度。

综合考虑等效连续介质模型和离散裂缝网络模型的优缺点, 在复杂区域采用离散裂缝网络模型模拟, 简单区域则采用等效连续介质模型模拟的方法孕育而生, 这就是混合模型。混合模型使得碳酸盐岩油气藏数值模拟时间有所减少, 起到了一定的作用。

3 缝洞型碳酸盐岩油藏数值模拟技术的应用

假设一个裂缝油藏需要进行数值模拟, 首先我们必须用非结构化网格将其进行剖分, 同时定义一套粗网格, 然后一次对每一个粗网格进行离散裂缝模型模拟。在求解局部离散裂缝模型的时候, 我们定义一个封闭边界条件, 同时在裂缝中注入单相流体, 然后解出在拟稳定状态下的压力分布, 并作出相应的压力等值区域划分。对每一个粗网格重复以上计算过程, 我们能够将整个油藏划分为一系列的多重次级网格, 并得出每一个粗网格中不同次级网格间的传导率。

结合上文研究得出的结果, 针对某油田某缝洞型碳酸盐岩油藏区块, 我们就可以开展井组剖面数值模拟, 这一模拟中需要结合缝洞型碳酸盐岩油藏野外露头与地质建模结果, 而由此笔者建立了 5 个剖面模型, 这其中的 3 个剖面模型一注一采, 而剩下的剖面模型则为 2 采, 而由此开展缝洞型碳酸盐岩油藏数值模拟, 我们就能够得出这一缝洞型碳酸盐岩油藏的剩余油分布。在缝洞型碳酸盐岩油藏数值模拟过程中, 笔者确定了给定井底流压 40MPa、注水井恒定注入速度 10m³/d、总模拟时长为 500d, 而这一缝洞型碳酸盐岩油藏数值模拟就能够显示出不同类型的剩余油分布, 而由此进行分析笔者发现缝洞型碳酸盐岩油藏的剩余油主要分布在溶洞顶部、阁楼、边角、高导流通道屏蔽、充填溶洞等五部分中, 而这些剩余油主要是受边界驱动力不足、缝洞储集体高出未井控、洞体的天然不规则形状、底水驱、底水不充足、高渗透区形成快速主流通道、充填溶洞水驱动用较小等因素的影响而出现的, 这些必须引起我们的高度重视。

因此, 针对不同类型剩余油, 可将对策调整为: 洞顶剩余油通过注气、侧钻井挖潜; 井间剩余油通过注水优化、上返挖潜; 高导流通道屏蔽剩余油通过注水优化和上返挖潜; 边角剩余油可通过侧钻井、新钻井挖潜。

4 结束语

在本文就缝洞型碳酸盐岩油藏数值的模拟技术与应用展开的研究中, 笔者详细论述了缝洞型碳酸盐岩油藏储集体类型、缝洞型碳酸盐岩油藏数学模型、数值解法、缝洞型碳酸盐岩油藏数值模拟技术应用等内容, 而结合这一系列内容我们就能够较为深入了解一种新的缝洞型碳酸盐岩油藏数值模拟技术, 而通过本文所进行的该技术实际应用研究, 我们也能够直观认识到该方法所具备的实际应用价值, 希望这一实例所证明的模拟模型正确、方法合理能够为相关研究人员带来一定启发, 并以此在一定程度上推动我国石油领域的更好发展。

参考文献:

- [1] 张学磊, 胡永乐, 樊茹, 焦玉卫, 张守良. 塔里木油田缝洞型碳酸盐岩油藏开发对策研究 [J]. 西南石油大学学报 (自然科学版), 2010, 06: 107-112+192.
- [2] 康志江, 赵艳艳, 张允, 吕铁, 张冬丽, 崔书岳. 缝洞型碳酸盐岩油藏数值模拟技术与应用 [J]. 石油与天然气地质, 2014, 06: 944-949.