

Numerical Method and Figures Based on the Network Structure Model of Two-Phase Seepage Flow*

Lijiang Zhou, Qingyu Li, Qian Wang, Xianzhi Xu[#]

University of Science and Technology of China, Hefei
Email: [#]xuxz@ustc.edu.cn

Received: Dec. 6th, 2012; revised: Dec. 14th, 2012; accepted: Dec. 26th, 2012

Abstract: This paper investigates a method to describing the porous medium, which is simplifying the pore part of porous medium into network structure model consist of node and pipeline. We simulate seepage flow of water and air in porous medium through this model, obtain the figures of gas-liquid distribution when steady, and cipher out the probability of that water flows through the whole medium.

Keywords: Two-Phase Seepage Flow; Node; Pipeline; Network Structure; Hydrophilic; Hydrophobic; Figures of Gas-Liquid Distribution

两相渗流的拓扑网络模型算法和图形*

周李姜, 李清宇, 王 乾, 徐献芝[#]

中国科学技术大学, 合肥
Email: [#]xuxz@ustc.edu.cn

收稿日期: 2012 年 12 月 6 日; 修回日期: 2012 年 12 月 14 日; 录用日期: 2012 年 12 月 26 日

摘 要: 本文探究一种描述多孔介质的方法, 将多孔介质的孔隙部分简化为由节点和管道组成的拓扑网络模型, 模拟水和空气两相在介质中的渗流过程, 得到流动稳定时介质中两相的分布图形, 并计算出水能够透过整个介质的概率。

关键词: 两相渗流; 节点; 管道; 拓扑网络; 亲水; 憎水; 气液分布图形

1. 引言

关于多孔介质中渗流过程的研究, 前人已做过许多工作^[1-6]。本文试图提出一种简明的描述多孔介质的模型, 利用这个模型模拟二维的两相渗流过程。

多孔介质包含孔隙部分和固体骨架部分, 由于流体只会在孔隙部分流动, 所以模型只研究孔隙部分, 而将固体骨架部分排除在模型之外。

多孔介质可能由多种材料构成, 不同材料的润湿性也会不同。模型只研究整个多孔介质中的两相分

布, 而不涉及介质某个孔隙中的两相分布, 故对于润湿性的不同本文做了合理的简化。

本文在多孔介质的简化模型中, 对两相渗流进行计算, 得到了不同材料构成的多孔介质的两相渗流图形, 并对图形进行了分析。

2. 一种简单的两相渗流物理模型

如图 1 所示, 多孔介质是均匀、各向同性的, 介质上方是空气, 下方是水。水和空气的压力相同。初始状态下介质的孔隙中全部是空气, 介质下方的水由于表面张力作用通过介质向上渗透, 同时水也可以在介质中向各个方向流动(包括向下流动)。

*基金项目: 国家自然科学基金, 项目批准号 10872193, 2009.1-2011.1。

[#]通讯作者。

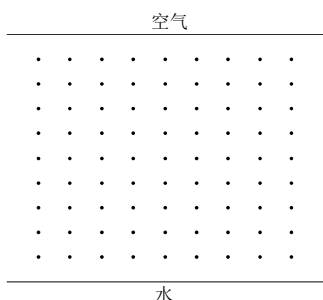


Figure 1. The two phase flow of physical model
图1. 两相渗流的物理模型

液气两相渗流的基本方程有(不考虑空气在水中的溶解):

$$v_w = -\frac{K_w}{\mu_w} gradP \quad (\text{液相运动方程})$$

$$v_o = -\frac{K_o}{\mu_o} gradP \quad (\text{气相运动方程})$$

$$div(\rho_w v_w) = -\varphi \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w s_w) \quad (\text{液相连续方程})$$

$$div(\rho_g v_g) = -\varphi \frac{\partial}{\partial t} (\rho_g (1 - s_w)) \quad (\text{气相连续方程})$$

对于两相渗流问题, 可以利用基本方程求解, 但求解过程比较复杂, 并且本模型中不存在压力, 运动方程不完全适用。因此我们试图使用另一种方法进行计算, 得到渗流稳定时介质中的气液分布。

3. 简化模型

如图2所示, 我们忽略掉介质中的固体骨架部分, 用节点堆砌成介质, 每个节点通过管道与它周围节点相连, 那么介质的孔隙就简化为了节点和管道, 流体沿各个方向的管道流动。

如果介质由多种材料构成, 体现在网络模型中就是水在不同管道中的润湿性可能不同。在保证计算结果准确性的基础上, 为使计算过程更简单, 我们将所有管道分为两类: 极端亲水管道和极端憎水管道。具体来说, 就是将水能完全通过的管道一律视为极端亲水的, 管道中水的流动速度没有差别; 将水不能完全通过的管道一律视为极端憎水的, 管道中没有水的存在。两种管道分别均匀分布在整个模型中。

4. 基于拓扑网络模型的渗流过程算法

我们设置了不同的亲水和憎水管道所占比例, 建

立不同比例下的拓扑网络模型(网络尺寸为 60×60)。如图3所示, 初始状态下的网络图形如下(亲水、憎水管道各占 50%, 蓝色管道表示亲水的, 红色管道表示憎水的):

算法一: 欧拉算法, 基于坐标进行计算。底部节点全部赋值为有水, 从坐标底部向上一层一层扫描, 再从坐标顶部向下扫描, 反复进行该过程, 直到扫描的结果不再变化为止, 最后得到气液分布图。

算法二: 拉格朗日算法, 基于质点进行计算。选取网络最下层第一个节点作为出发的水头, 水头每到一个节点, 都可能流向它周围所有管道, 直到水头所到节点周围所有管道都有水或憎水为止。然后选取最下层第二个节点, 重复上述计算, 直到底部所有节点计算完成为止, 最后得到气液分布图。

我们分别使用上述两种算法进行计算。虽然得出的结果完全相同, 但与欧拉算法相比, 拉格朗日算法略为简洁一些, 而且计算过程更接近实际物理情形。在以后的计算中, 我们全部使用拉格朗日算法。该算法是由 Matlab 软件编程实现的, 程序代码见附录。

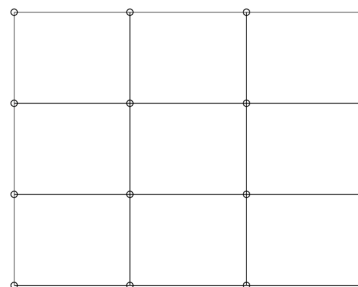


Figure 2. Porous medium topology network model
图2. 多孔介质的拓扑网络模型

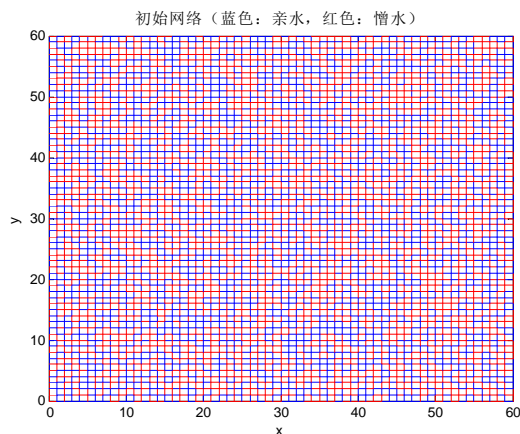


Figure 3. The initial state of the topology network model
图3. 初始状态下的拓扑网络模型

5. 不同管道比例下的气液分布图

我们基于拓扑网络模型，使用拉格朗日算法对两相渗流过程进行计算，得到不同管道比例下的气液分布图。一些典型的图形(如图 4~9)可见，(蓝色管道中为水，红色管道中为空气)：

我们计算了水渗出介质的概率，取的亲水管道比例区间为 40%~60%，概率曲线图如如图 10：

6. 分析讨论

1) 在绘制拓扑网络气液分布图形的过程中我们发现，虽然各次绘制的图形细节上有所不同，但整个气液分布图仍然有一定规律可循。当亲水管道比例小于 40%时，水基本只分布在网络的底层；当亲水管到比例大于 60%时，水基本能够均匀分布在整个网格

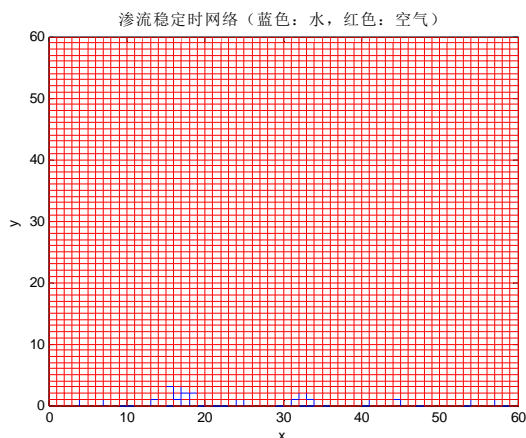


Figure 4. Close water pipeline accounted for 20%, hydrophobic pipeline 80% of the gas liquid profile
图4. 亲水管道占20%、憎水管道占80%的气液分布图

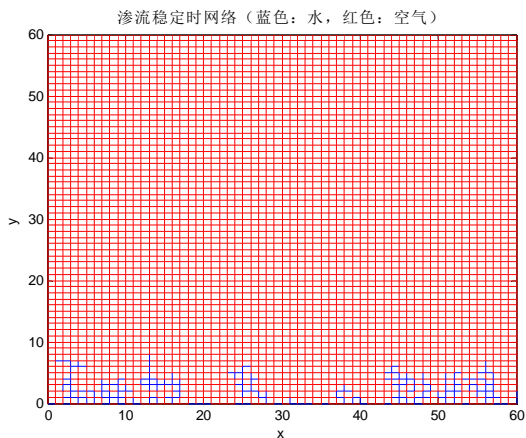


Figure 5. Close water pipeline accounted for 40%, hydrophobic pipeline 60% of the gas liquid profile
图5. 亲水管道占40%、憎水管道占60%的气液分布图

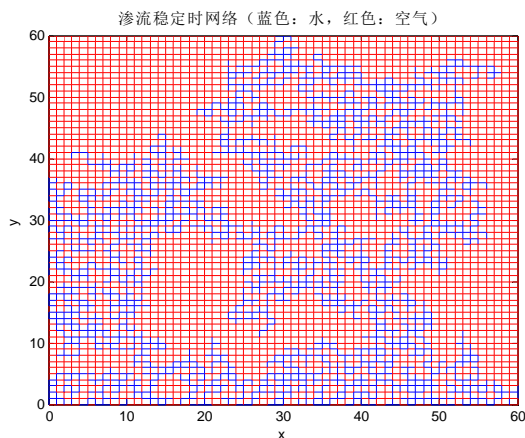


Figure 6. Close water pipeline accounted for 50%, hydrophobic pipeline 50% of the gas liquid profile (water can seep medium)
图6. 亲水管道占50%、憎水管道占50%的气液分布图(水能够渗出介质)

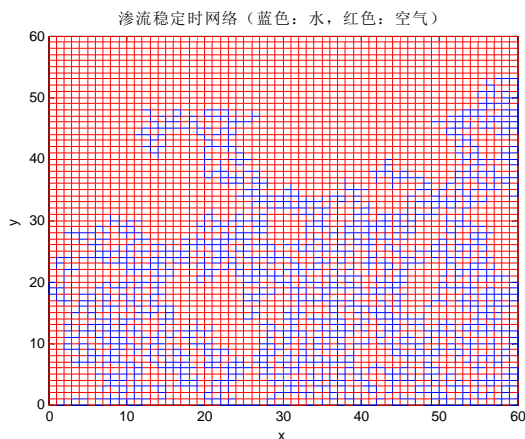


Figure 7. Close water pipeline accounted for 50%, hydrophobic pipeline 50% of the gas liquid profile (water can't seepage medium)
图7. 亲水管道占50%、憎水管道占50%的气液分布图(水不能渗出介质)

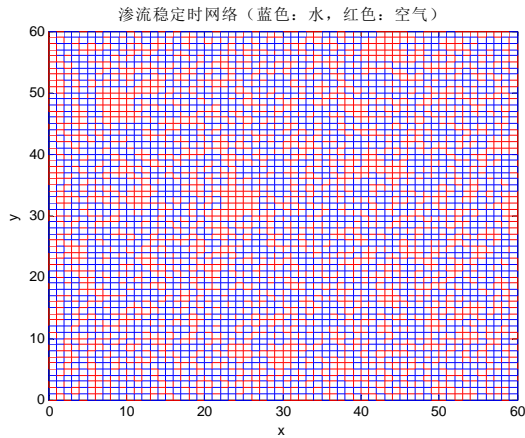


Figure 8. Close water pipeline accounted for 60%, hydrophobic pipeline 40% of the gas liquid profile
图8. 亲水管道占60%、憎水管道占40%的气液分布图

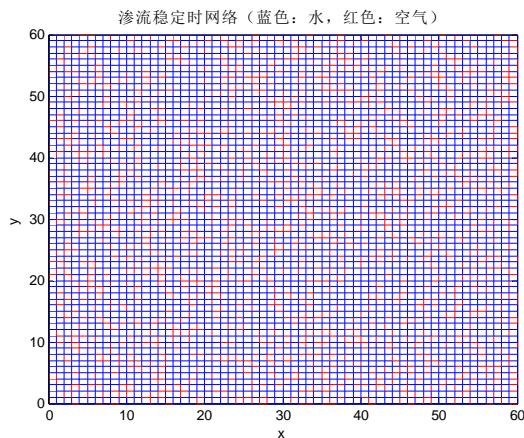


Figure 9. Close water pipeline accounted for 80%, hydrophobic pipeline 20% of the gas liquid profile
图9. 亲水管道占80%、憎水管道占20%的气液分布图

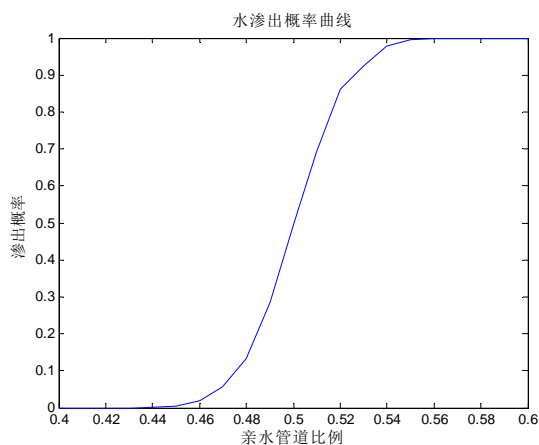


Figure 10. Chart water seepage probability curve
图10. 水渗出概率曲线

中。当亲水、憎水管到约各占一半时，会出现多种多样的图形，有些图形中水较均匀地分布在网格的下半部分，有些图形中水则较零散地分布在整个网格中。

2) 在亲水管道约占 50%的图形中，有些图形出现

了大面积的被水环绕的无水区域(如图 8)，通常称之为圈闭的死气区；还有一些图形的有水区域会沿着很细的路径向上延伸(如图 9)，通常称之为指进。

3) 从水渗出概率曲线(图 10)中可以看出，当亲水管道比例小于约 44%时，水基本无法渗出介质，当亲水管道比例大于约 56%时，水一定能渗出介质，当亲水管道比例处于 44%到 56%之间时，水渗出介质是有一定概率的，且概率随比例增大而增大。

7. 结论

本文将多孔介质简化为由节点和管道组成的拓扑网络模型，并采用拉格朗日算法编程计算，绘制出两相渗流情形下介质中气液分布的网络图，图形能够表达更加细观的圈闭和指进等渗流图形，还可以由此模型得出水渗出整个介质的概率。

参考文献 (References)

- [1] J. Bockris, S. Srinivasan. Fuel cell: Their electrochemistry. New York: McGraw-Hill Book Company, 1969: 230-253.
- [2] F. Huang. Three-dimensional reconstruction and simulation of porous media. University of Science and Technology of China, 2007: 5-122.
- [3] S. P. Guo, D. S. Yu and W. D. Wu. The physical characteristics of the porous media concerning flow in viscera. Acta Mechanica Sinica, 1982, (1): 29-36, 116-118.
- [4] X. Z. Xu, M. Zhu, F. Li and H. Song. Research on microstructure of the gas diffusion electrode by the small pore diffusion law. Chinese Battery Industry, 2008, 13(1): 1-3.
- [5] B. M. Yu, P. Xu and J. Chen. Study on the seepage characteristics in fractured network porous media. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2007, (2): 7-8, 37-38, 41.
- [6] P. Chen, C. F. Wei, J. L. Wang, P. P. Yi and H. F. Cao. Numerical analysis of seepage processes in unsaturated porous media under nearly saturated conditions. Rock and Soil Mechanics, 2012, (1): 299-304.

附录：主要计算程序代码

```

M = 61; N = 60;
A = rand(M, N); B = rand(N, M); P = zeros(M);
Z = zeros(1, 2*M*M); top = -1;
p = input("");
for j = 1:M
P(1, j) = 1;
end
for j = 1:M*N
if A(j) < p
A(j) = 1;
else A(j) = 0;
end
if B(j) < p
B(j) = 1;
else B(j) = 0;
end
end
for k = 1:M
top = top + 2;
Z(top) = 1; Z(top + 1) = k;
for j = 1:M*M
if Z(top) < M && B(Z(top), Z(top + 1)) = 1 && P(Z(top) +
1, Z(top + 1)) = 0
Z(top + 2) = Z(top) + 1;
Z(top + 3) = Z(top + 1);
top = top + 2;
P(Z(top), Z(top + 1)) = 1;
elseif Z(top + 1) < M && A(Z(top), Z(top + 1)) = 1 && P
(Z(top), Z(top + 1) + 1) = 0
Z(top + 2) = Z(top);
Z(top + 3) = Z(top + 1) + 1;
top = top + 2;
P(Z(top), Z(top + 1)) = 1;
elseif Z(top) > 1 && B(Z(top)-1, Z(top + 1)) =
1 && P(Z(top)-1, Z(top + 1)) = 0
Z(top + 2) = Z(top) - 1;
Z(top + 3) = Z(top + 1);
top = top + 2;
P(Z(top), Z(top + 1)) = 1;
elseif Z(top + 1) > 1 && A(Z(top), Z(top + 1)-1) =
1 && P(Z(top), Z(top + 1) - 1) = 0
Z(top + 2) = Z(top);
Z(top + 3) = Z(top + 1) - 1;
top = top + 2;
P(Z(top), Z(top + 1)) = 1;
else top = top - 2;
end
end
end
end
if top = -1
break;
end
end
end
for m = 1:M
for n = 1:N
if P(m, n) = 0 && P(m, n + 1) = 0
A(m, n) = 0;
end
if P(n, m) = 0 && P(n + 1, m) = 0
B(n, m) = 0;
end
end
end
for m = 1:M
for n = 1:N
x = n-1:n;
if A(m, n) = 1
plot(x, x*0 + m - 1);
else plot(x, x*0 + m - 1, 'r');
end
holdon;
if B(n, m) = 1
plot(x*0 + m - 1, x);
else plot(x*0 + m - 1, x, 'r');
end
holdon;
end
end
end

```