

# 多孔介质水油两相系统相对渗透率与饱和度关系试验研究

陈家军, 尚光旭, 杨官光, 田 亮

(北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875)

**摘要:** 相对渗透率和饱和度定量关系是多孔介质多相流动系统中重要的动力学参数关系。使用设计的试验装置及试验方法测定了一维砂柱中油水两相动态流动系统的相对渗透率及饱和度数据, 由试验结果分析表明: 所测得的相对渗透率与实际情况吻合较好; 细砂的强亲水性对不同先湿条件下的油、水相相对渗透率及饱和度有较大影响, 并造成了不同先湿条件下流体间驱替机制的差异; 相饱和度是影响相对渗透率的主要因素, 孔隙空间中两种流体的分布方式和流体的饱和历史也影响各相相对渗透率。对试验结果用 VGM 模型 (Parker-Lenhard 模型) 进行拟合所得结果较好; 在水先湿条件下, 将 van 公式拟合毛细压力-饱和度数据所得拟合参数用于 VGM 模型预测相对渗透率-饱和度曲线, 所得结果与 VGM 模型直接拟合所得结果有差异, 但两者所得结果均较好。

**关 键 词:** 多孔介质; 两相系统; 相对渗透率; 饱和度; 试验研究

中图分类号: P641 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2009)02-0261-08

石油溢出和地下输油、储油设施破裂致使 NAPL (Non-aqueous Phase Liquid, 简称“油”) 进入地下环境形成水-气-油多相流系统。用数值模拟方法研究多相流规律对预防和修复土壤及地下水污染有重要的指导意义, 而相对渗透率-饱和度-毛细压力函数关系 (简称为  $k_r \sim S \sim h$  函数关系, 其中  $k_r$ 、 $S$ 、 $h$  分别代表相对渗透率、饱和度、毛细压力) 是数值模型中重要的本构关系, 进一步通过试验研究获得现有常用  $k_r \sim S \sim h$  关系是必要的<sup>[1]</sup>。根据 Parker 等<sup>[2]</sup>的理论, 两相流系统的  $k_r \sim S \sim h$  关系可以推广到三相流<sup>[1,2]</sup>, 两相流研究成为三相流研究的基础。

目前实际模拟计算中常用 van Genuchten 模型<sup>[3]</sup>描述两相系统中  $h \sim S$  关系 (van 公式)<sup>[1]</sup>

$$\begin{cases} S = \frac{r - r_s}{s - r_s} = [1 + (\frac{h}{h_0})^n]^{-m} & h > 0 \\ S = 1 & h = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $r$  为体积含水量;  $r_s$  和  $s$  分别为残余含水量和饱和含水量;  $h_0$  和  $n$  是曲线形状参数;  $m = 1 - 1/n$ 。Parker 等<sup>[2]</sup>在 van Genuchten 模型基础上, 得到任意两相系统中  $h \sim S$  关系的统一表达式, 进而根据一定假设可得到三相系统中  $h \sim S$  关系<sup>[4]</sup>。

两相系统  $k_r \sim S$  关系方面, Parker-Lenhard 模型<sup>[2]</sup> (简称 VGM 模型) 和 Brooks-Corey-Burdine 模型<sup>[5]</sup> 是目前应用较广的两个模型<sup>[1,6]</sup>。VGM 模型如下

$$\begin{cases} k_{rw} = \bar{S}_w^{1/2} \left\{ 1 - [1 - \bar{S}_w^{1/m}]^m \right\}^2 \\ k_{rno} = \bar{S}_{ow}^{1/2} [1 - \bar{S}_{ow}^{1/m}]^{2m} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $k_{rw}$ 、 $k_{rno}$  分别为水相和油相的相对渗透率;  $\bar{S}_w$  为有效水相饱和度;  $\bar{S}_{ow}$  为有效油相饱和度。此两相模型也是推导至三相模型的基础。

确定  $k_r$  的实验室方法主要有稳定和非稳定流动法<sup>[7]</sup>。稳定法如非饱和土壤渗透系数  $K(\theta)$  测定<sup>[8]</sup>法, 该法

收稿日期: 2008-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40772148)

作者简介: 陈家军 (1962-), 男, 黑龙江绥滨人, 教授, 博士生导师, 主要从事环境模拟与污染治理研究。

E-mail: jeffchen@bnu.edu.cn









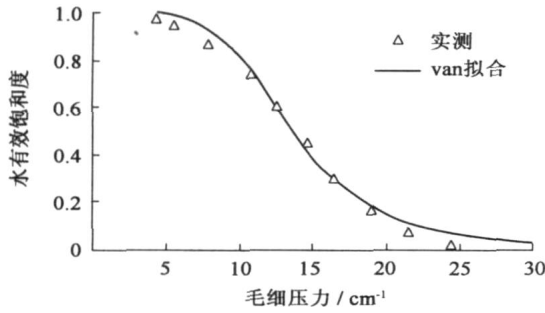


图8  $h \sim S$  实测值与 van 公式拟合线

Fig. 8 Curve for fitting measured  $h \sim S$  values and van formula fitted curve

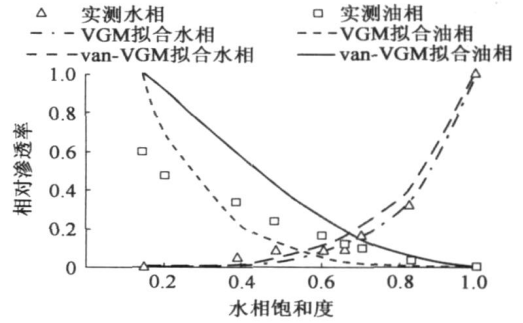


图9 VGM 拟合与 var-VGM 预测的水油相对渗透率(水先湿)

Fig. 9 Water oil permeability in the water firstly wetting condition for comparison of fitted in VGM and predicted in var-VGM water

表2表明不同试验不同流体相的  $m$  值均不同,但是由 Parker<sup>[2]</sup>的推导知,同一  $k_r \sim S$  试验中的两个  $m$  值应与相应  $h \sim S$  实验中的  $m$  值相同。而试验结果并非如此,水先湿的  $h \sim S$  拟合出的  $m$  为 0.8060,而水先湿水相与油相相对渗透率曲线拟合出的  $m$  值分别为 0.7190 和 1.3162,其均值 1.0176 与  $h \sim S$  数据拟合的  $m$  值接近。油先湿的  $k_r \sim S$  曲线拟合的  $m$  值分别为 0.8870 和 0.3039,差异也较大。由于 Parker 给出的关系式并未区分先湿条件,即未考虑滞后性的影响,因而用其公式拟合油先湿数据的适宜性尚需进一步验证;在水先湿情况下,水相和油相相对渗透率拟合的  $m$  值不同的原因也待进一步研究。

图9为水先湿条件下  $h \sim S$  数据经 van 公式拟合所得  $m$  值代入 VGM 模型预测 (var-VGM 预测) 所得  $k_r \sim S$  曲线以及由实测  $k_r \sim S$  数据用 VGM 模型拟合 (VGM 拟合) 所得曲线图,从图中可以看出,两者所得曲线的趋势相对应,  $k_{ro}$  值差别很大,而  $k_{rw}$  值较为接近, var-VGM 预测数据大于 VGM 拟合数据。水饱和度为 0.8 附近  $k_{rw}$  差异最大,水饱和度为 0.4 附近  $k_{ro}$  差异最大。造成这种差异的原因应从 Parker 推导两相相对渗透率公式过程中的假定和取舍与实际情况的差异中去探寻。

最后,将实测值与预测值及拟合值进行对比,用  $DEV$  表示预测值及拟合值与实测值之间的偏差(标准差),所得对比结果见表3。由表3可看出,两种拟合对于水相相对渗透率的拟合效果均较好,而对于油相相对渗透率的拟合则不理想,用 VGM 模型拟合的偏差总体较小, var-VGM 预测的偏差总体偏大,可见 VGM 模型的拟合效果较好,但是总体而言,预测与拟合所得结果均较好,这说明利用  $h \sim S$  关系去推求  $k_r \sim S$  关系是可行的。实测值与估计值之间不可避免地存在误差,这种误差除了由不可避免的实验误差引起外,还与模型推导过程中所做的简化假定等有关。

表3 预测及拟合偏差

Table 3 Deviation of predicted and fitted values	
拟合项目	$DEV$
VGM 拟合水相相对渗透率	0.0293
VGM 拟合油相相对渗透率	0.1705
var-VGM 预测水相相对渗透率	0.0475
var-VGM 预测油相相对渗透率	0.2288

### 3 结 论

(1) 自行开发设计的试验装置所测得的相对渗透率结果与实际情况吻合较好。如果测压系统用可测定正负压的传感器代替,此种试验装置和试验方法可以扩展到油气、水气和油水气等系统中各相相对渗透率的测定。

(2) 细砂具强亲水性,造成不同先湿条件下驱替机制的差异,对不同先湿条件下的油水相对渗透率及饱和度有较大影响。水先湿条件下,油水相的相对渗透率值比在油先湿条件下小;水先湿情况两相相对渗透率相等时的水相饱和度和相对渗透率值均小于油先湿情况。

(3) 水饱和度相同时,不同先湿条件下的两相相对渗透率值不相同,滞后性对油相相对渗透率的影响大于对水相的影响。同一水饱和度下两相相对渗透率之和小于1。相对渗透率应取决于孔隙空间中两种流体的分布方式和流体的饱和历史。

(4) 对试验结果用VGM模型进行拟合所得结果较好;水先湿情况下,由 $h \sim S$ 数据拟合所得参数 $m$ 值 $k_r \sim S$ 数据拟合所得的两个 $m$ 值的均值较接近;水先湿条件下,将van公式拟合 $h \sim S$ 数据所得参数用于VGM模型获取 $k_r \sim S$ 曲线时发现所得结果与VGM模型拟合结果有差异但两者所得结果均较好。

#### 参考文献:

- [1] FAGERLUND F, NIEMI A, ODEN M. Comparison of relative permeability fluid saturation capillary pressure relations in the modelling of non-aqueous phase liquid infiltration in variably saturated, layered media[J]. *Advances in Water Resources*, 2006, 29: 1705 - 1730.
- [2] PARKER J C, LENHARD R J, KUPPUSAMY T. A parametric model for constitutive properties governing multiphase flow in porous media[J]. *Water Resource Research*, 1987, 23(4): 618 - 624.
- [3] van Genuchten M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892 - 898.
- [4] LENHARD R J, PARKER J C. Measurement and prediction of saturation-pressure relationships in three phase porous media systems[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1987, 1(4): 407 - 424.
- [5] OOSTROM M, LENHARD R J. Comparison of relative permeability-saturation-pressure parametric models for infiltration and redistribution of a light non-aqueous-phase liquid in a sandy porous media[J]. *Advances in Water Resources*, 1998, 21(2): 145 - 157.
- [6] 叶自桐, 韩冰, 杨金忠, 等. 岩石裂隙毛管压力-饱和度关系曲线的试验研究[J]. *水科学进展*, 1998, 9(2): 112 - 117. (YE Zhi-tong, HAN Bing, YANG Jin-zhong, et al. Laboratory experimental study of capillary pressure-saturation relationships for rock fracture[J]. *Advances in Water Science*, 1998, 9(2): 112 - 117. (in Chinese))
- [7] 贝尔 J. 多孔介质流体动力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983: 356 - 373. (BEAR J. *Fluid dynamics in porous media*[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1983: 356 - 373. (in Chinese))
- [8] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 225 - 226. (LEI Zhi-dong, YANG Shi-xiu, XIE Sen-chuan. *Dynamics of soil water*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988: 225 - 226. (in Chinese))
- [9] 陈家军, 彭胜, 王金生, 等. 包气带水气二相流动参数确定实验研究[J]. *水科学进展*, 2001, 12(4): 467 - 472. (CHEN Jia-jun, PENG Sheng, WANG Jin-sheng, et al. Experimental study on parameter identification for two-phase (water and air) flow in vadose zone[J]. *Advances in Water Science*, 2001, 12(4): 467 - 472. (in Chinese))
- [10] 秦文龙, 蒲春生, 张荣军. 油水相对渗透率测量规范在低渗油藏中的应用[J]. *石油工业技术监督*, 2006, 22(9): 10 - 11, 17. (QIN Wen-long, PU Chun-sheng, ZHANG Rong-jun. Application of specifications for measuring oil-water relative permeability in low permeability reservoirs[J]. *Technology Supervision in Petroleum Industry*, 2006, 22(9): 10 - 11, 17. (in Chinese))
- [11] 闻德荪, 李兆年, 黄正华. 工程流体力学(水力学)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 167 - 169. (WEN De-sun, LI Zhao-nian, HUANG Zheng-hua. *Fluid mechanics in engineering(hydraulics)*[M]. Beijing: High Education Press, 2004: 167 - 169. (in Chinese))
- [12] SY/T 5345-1999. 油水相对渗透率测定[S]. (SY/T 5345 - 1999. Measurement of relative permeability of oil and water in porous media[S]. (in Chinese))
- [13] 杨官光, 陈家军, 支银芳. 包气带水、气和油三相相对渗透率研究进展[J]. *云南环境科学*, 2006, 25(3): 26 - 29. (YANG Guan-guang, CHEN Jia-jun, ZHI Yin-fang. Study on relative permeability of water, air and oil of three-phase in vadose zone[J]. *Yunnan Environmental Science*, 2006, 25(3): 26 - 29. (in Chinese))
- [14] 支银芳, 陈家军, 杨周喜, 等. 多孔介质两相系统毛细压力与饱和度关系试验研究[J]. *水科学进展*, 2007, 18(2): 151 - 157. (ZHI Yin-fang, CHEN Jia-jun, YANG Zhou-xi, et al. Experimental study of relationship between capillary pressure and saturation in two-phase system in porous media[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(2): 151 - 157. (in Chinese))

## Experimental study of the relationship between relative permeability and saturation in water-oil two-phase system in porous media<sup>\*</sup>

CHEN Jia-jun , SHANG Guang-xu , YANG Guan-guang , TIAN Liang

(*State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control , School of Environment ,*

*Beijing Normal University , Beijing 100875 , China*)

**Abstract :** The quantified relationship between relative permeability and saturation is the key dynamic parameter relationship of multiphase flow system in porous media. Under the dynamic condition , the designed apparatus and method are employed to measure the relative permeability and saturation in water-oil two-phase system. The experiment was conducted in a one dimension sand column and the results were analyzed. It indicates that the results measured by the apparatus are in accord with those in practical condition. The fine sand is hydrophilic , which remarkably affects the relative permeability and saturation of water-oil and causes the displacement mechanism difference of different fluids in different firstly wetting conditions. The oil-water phase saturation is the main influential factor of phase relative permeability , and the viscous difference of different fluids affects the relative permeability. And the relative permeability should be determined by the liquids distribution in porous media and the saturation history of fluids. The experimental data are very well fitted in with the VGM model (or the Parker-Lenhard model) . At the same time the parameter in fitting capillary pressure-saturation data using the van formula is transferred in predicting relative permeability-saturation curve with VGM model in the water firstly wetting condition. And the result is compared with that of direct fitting of the relative permeability-saturation data by the VGM model , which suggests the latter model shows a better performance.

**Key words :** porous medium ; two-phase system ; relative permeability ; saturation ; experimental study

---

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40772148) .