

岩溶含水层水流模型研究进展

陶小虎,赵 坚,陈孝兵,甘 磊,邱莉婷

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:以岩溶含水层的复杂结构和水流运动特性为重点,简要阐述了岩溶含水层系统中物理概念和
水流模型,包括等效连续介质模型、裂隙网络模型、双重介质模型、三重介质模型、连续管流耦合模
型以及 Darcy-Stokes 耦合模型,对各模型特点及在应用中的优缺点进行了分析比较和评述,指出
Darcy-Stokes 耦合模型可以广泛应用于岩溶含水层的水流模拟微观研究;三重介质模型能较真实反
映简单结构岩溶含水介质及岩溶水流态复杂性,应用和发展前景非常广阔。已有岩溶水流运动数
学模型还不能够真正解决工程实际问题,有待进一步探索;在岩溶含水层非饱和水流运动机理、交
叉岩溶裂隙水力特性、水文地质不确定性以及多场耦合数学模型研究等方面也有待进一步发展。

关键词:岩溶含水层;孔隙;裂隙;岩溶管道;水流模型;综述

中图分类号:P641.134;TV139.14 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)02-0076-09

Research progress in numerical models for water flow in karst aquifer//TAO Xiaohu, ZHAO Jian, CHEN Xiaobing, GAN Lei, QIU Liting (College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The complex construction of a karst aquifer and the characteristics of flow movement being the key points, physical concepts of karst aquifer systems and numerical models for water flow, including the equivalent continuous medium model, fracture network model, double medium model, triple medium model, continuous flow pipe coupling model, and Darcy-Stokes coupling model, are briefly introduced. The characteristics of these models as well as their advantages and disadvantages in application are analyzed and compared. The results show that the Darcy-Stokes coupling model can be widely applied in microscopic study of flow simulation of a karst aquifer, and the triple medium model can simulate the state of water flow in a simple karst aquifer, having a higher applied value and extremely broad prospects for development. The existing numerical models for karst water flow movement, which cannot actually solve the practical engineering problems, should be further explored. Research on the mechanism of unsaturated flow in a karst aquifer, the hydraulic characteristics of a crossed karst fissure, hydrological uncertainty, and numerical modeling of multi-field coupling should also be further developed.

Key words: karst aquifer; pore; fissure; karst conduit; numerical model for water flow; review

近几十年来,岩溶含水层(或碳酸盐岩)中水流运动得到国内外学者广泛的关注和持续的研究。在岩溶地区,由于岩溶发育的高度各向异性和非均质性,使得岩溶含水介质中的水流运动除了层流以外,还可能在主干裂隙及岩溶管道中出现紊流,岩溶含水介质复杂性和水流运动的多样性加大了对岩溶地下水进行模拟分析的难度。在 1975 年的国际水文地质大会上岩溶水研究第一次成为大会的主题^[1],此后岩溶水的研究逐渐形成了一个独立的学科。岩溶含水层水力特性规律研究在地下水、水利水电工程、岩土工程、石油工程、环境工程以及高放射性核废料地下储存等实际问题中都有着广泛的应用。

1 岩溶含水层

岩溶含水层由基质(孔隙)、裂隙和岩溶管道等不同尺度的空隙空间交叠嵌套构造而成(图 1),这种构造源于成岩作用、多期构造运动和多期岩溶叠

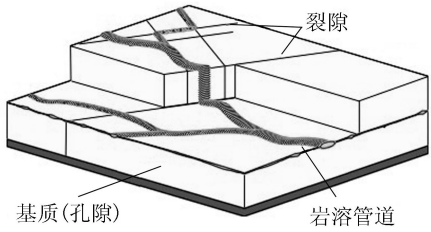


图 1 岩溶含水层结构示意图

加改造,所以显现出复杂的多尺度性。由于岩溶含水层发育规律复杂,裂隙和岩溶管道空间分布极不规则,加上二者本身的多尺度性,流体在含水层内的流动模式不一,裂隙和岩溶管道内的自由流动与基岩的渗流共存,整个岩溶含水介质内的流体流动状态和规律异常复杂。例如,在我国西南喀斯特地区,由于受地下水强烈的溶蚀作用,含水层裂隙和岩溶管道高度发育并且相互连通,含水层具有强烈的非均质性,地下水循环过程十分复杂^[2]。

White 等^[3-4]认为岩溶含水层的透水性是由 3 种不同孔隙度的介质(即三重介质)造成的,这三重介质依其透水作用分为基质、裂隙和岩溶管道,表 1 归纳描述了岩溶含水层中三重介质水流特性。基质(孔隙)是处于裂隙之间的岩石,如图 1 所示,基质中的流体流速非常缓慢,远小于另两类介质中的流速,在地下水运动中主要起储水、释水作用;裂隙在某一方向的尺寸远小于其他两个方向的尺寸,而岩溶管道则是某一方向较长,其他两个方向相对较短,尺寸范围从微米到几百千米,岩溶管道在这个尺度范围内的变化对水流运动和溶质运移有着巨大的影响^[5]。岩溶管道和开度较大的裂隙具有较低的储水性和高流速的特性^[6-7]。岩溶管道和裂隙的内壁与基质一样有着渗透性,可以允许水和溶质在岩溶管道、裂隙和基质之间进行交换^[8]。

表 1 岩溶含水层中三重介质水流特性^[3]

介 质	尺 度	水流运动	水流流态	分布形式
基质(孔隙)	1 μm ~ 1 mm	时间长,缓慢	层流,符合达西定律	连续
裂 隙	10 μm ~ 10 mm	中等	通常层流,符合立方定理	离散
岩溶管道	>10mm	时间短,较快	管流,紊流	离散

岩溶含水层基质中的地下水流与一般多孔介质中的地下水流一样,都可以用达西定律描述,即流量与水力梯度成正比关系。Lomize 等^[9-11]对光滑平行裂隙进行了开创性试验研究及理论研究,建立了通过裂隙的流量与隙宽 3 次方成比例的经典公式,即立方定律。然而诸多饱和条件下的单裂隙室内和野外试验研究表明,经典理论中将裂隙视为一对光滑的平行板是不足以准确地描绘出真实的裂隙水流的。Neuzil 等^[12-16]提出了大量改进的概念模型,但只有一部分模型被广泛认可。岩溶管道是区别岩溶含水层和其他含水层最主要的特征,通常岩溶管道可以作为基质甚至裂隙岩体的边界。当岩溶管道中未充满水流时,管道中的水流和明渠一样具有自由表面,此时可以采用曼宁公式描述;当岩溶管道中充满水流时,岩溶管道中水的平均流速与水力梯度成

正比,可用泊肃叶公式描述。对于岩溶管道中的紊流可采用 Darcy-Weisbach 方程描述,即岩溶管道中的水流与水力梯度的平方根成正比。

模拟岩溶含水层水流运动需要大量的信息,如地理、材料、坡度、裂隙或岩溶管道走向、粗糙度、雷诺数、裂隙开度、孔隙度、岩溶管道直径等。由于这些信息很难掌握,甚至不可能得到,因此岩溶含水层的水流运动不能被很好地模拟,在现有的数学模型研究中需要有很多的简化假设。目前对岩溶含水层水流运动模型的研究主要基于两个方向,一是基于经典的渗流理论,二是基于渗流与自由流耦合理论。

2 渗流理论模型

20 世纪 60 年代以来,很多用来描述含水层运动规律的数学模型已应用于实际之中^[17],其中有等效连续介质模型、离散介质模型、双重介质模型、三重介质模型以及连续管流耦合模型。

2.1 等效连续介质模型

等效连续介质模型忽略裂隙系统和孔隙系统之间的水力交替过程,在统计意义上,认为岩石孔隙介质和裂隙网络均匀分布于整个研究域内,裂隙岩体表现出与多孔连续介质相似的渗流特性,水头随空间点连续分布,渗流场的求解以渗透系数张量为基础,同时假定地下水在岩体中的流动服从 Darcy 定律^[18],视水力传导系数为岩体单元的平均值。等效连续介质模型是将裂隙中的水流等效平均到整个岩体中,将裂隙岩体模拟为具有对称渗透张量的各向异性连续体,把裂隙的透水性按流量等效原则均化到岩石中,即把裂隙当作孔隙体处理,得到以渗透张量表示的等效连续介质模型^[19],然后利用经典的连续介质理论进行分析,Snow 等^[11-20]对此做过研究,并取得了一定的成效。

等效连续介质模型可以用来模拟区域岩溶含水层地下水,是目前应用最为广泛的模型^[21],然而从物理含义上看,岩溶管道、裂隙介质和孔隙介质差别很大,无法定义一个特征单元体,特别是当裂隙的作用很强烈时,岩溶含水层有着高度的各向异性,可能和孔隙介质根本就不等效,即采用等效连续介质模型可能会得出完全错误的结果^[22]。此外等效连续介质模型没有考虑裂隙和岩溶管道中存在的非线性流现象,亦不能准确模拟出水流方向以及流速,特别在进行地下水溶质运移问题分析时,会造成较大的误差。因此等效连续介质模型不适合应用在高度各向异性的区域^[23]。

2.2 离散介质模型

离散介质模型分为离散裂隙网络模型和离散管道网络模型两类^[17]。离散裂隙网络模型最早是由

Wittke 和 Louis 提出^[24]。由于流体在岩体中的流速非常缓慢,可以忽略岩石基质的透水性,假设流体只在裂隙面和管道中渗透,以立方定律和达西定律为基础,利用流入和流出各裂隙交叉点流量相等的原则建立方程。该模型选择起主要导水作用的裂隙为构成空间裂隙网络结构的主要构件,并按各个裂隙的特征参数(长度、开度、产状、密度等)来描述各个裂隙构件的空间位置、连通性和导水性,较等效连续介质模型更接近实际裂隙系统水流运动状态。Sudicky 等^[25]将裂隙作为二维基质单元中的一维单元进行处理,Graf 等^[26-28]则将裂隙作为三维基质单元中的二维平面单元处理;Long 等^[29]首先提出了三维圆盘裂隙网络模型,并采用混合解析-数值方法对此进行了求解;Dershowitz 等^[30]提出了多边形裂隙网络模型;佘彦卿^[31-32]对二维裂隙网络稳定流和非稳定流模型进行了总结和研究;熊祥斌等^[33-35]将裂隙网络视为若干个环绕孔隙岩石的封闭回路,简化了程序处理;Dverstorp 等^[36]利用离散裂隙网络模型对稀疏裂隙岩体进行了溶质运移模拟,并根据在瑞典的示踪试验结果对模型进行校正。

研究发现水在裂隙岩体内的流动呈现沟槽流现象,Cacas 等^[37]将三维裂隙网络用一维管单元分析,形成了离散裂隙管道网络模型;Dershowitz 等^[38]用管单元对三维裂隙网络水流运动做了进一步分析研究。

裂隙网络中裂隙交叉点的局部水头损失问题一直处于研讨之中。传统的网络分析方法假定:①水流特性与交汇流交叉角无关;②水流通过交叉点的水头损失可以忽略不计^[24]。田开铭等^[39-40]在交叉裂隙水流模型试验后认为,裂隙交叉点的局部水头损失不可以忽略,并建立了交叉水流局部水头的损失理论模型,通过模型试验结果与理论模型的相关性分析,确定了理论模型的修正参数。陈舟^[41]通过试验得到交叉粗糙裂隙中水流平均流速与水力梯度呈二次非线性关系。Tsang 等^[42]假设岩体裂隙为许多曲折的、交叉的管道,其开度沿程可变,用于研究裂隙介质中的水流运动和溶质运移。陈雾等^[43-44]利用正交试验法对光滑岩溶管道和裂隙交叉的水力特性进行了试验,结果表明裂隙开度对管道汇流量影响最显著,其次为裂隙进水水头、管道直径,而管道与裂隙夹角对裂隙沿程水头损失的影响较小。

离散介质模型在近几十年得到了很好的发展,成为裂隙和岩溶理论研究的主流模型。它的主要优点是可以精确考虑裂隙或岩溶管道对于水流流动和溶质运移的影响,同时考虑裂隙和岩溶管道中的层流和紊流现象,适用于岩体完整性较好且岩体渗透性微弱的裂隙系统模拟。但是该模型仅考虑级别较

高的裂隙或断层,对裂隙系统的覆盖面有限,而且对裂隙交叉形成的水头损失规律等还认识不够。该模型对紊流的计算用经验公式来模拟,存在很大的误差。此外该模型受限于裂隙和岩溶管道的分布,在实际工程中应用较少。

2.3 双重介质模型

Barenblatt 等^[45-46]首先提出了水力双重介质模型的概念,该模型中裂隙岩体由孔隙性较好而导水性弱的基质系统和孔隙性较差而导水性较强的裂隙系统共同组成,在裂隙岩体内每个空间点上有两种流体压力,即基质块体中的流体压力和裂隙中的流体压力。基质系统和裂隙系统存在水量交换,基于达西定律和 Richard 方程,可分别建立这两个系统的渗流方程,通过水量交换方程将两个系统水流运动耦合起来。

Warren 等^[47]在 Barenblatt 模型的假设之上对裂隙系统的几何特性和渗透特性增加了新的限制,建立了广义双重介质模型。他们将裂隙岩体储层理想化为由正交裂隙网络切割的统一平行六面体块组成,在这个模型中有 3 个假设:①材料中的基质性质是均值各向同性的;②裂隙系统是连续、正交的,并和渗流主轴平行;③流体仅在裂隙介质中流动,基质块体仅作为储水体,裂隙孔隙和基质块体间的水体交换是以拟稳态的形式进行的。

Streletsova^[48]根据前人的研究成果,在考虑两种介质交换的情况下,推导了含裂隙水头和孔隙水头的连续方程,为了克服变量多的弊端,又将孔隙水头进行简化,推导出了只含裂隙水头的连续方程。Khaled 等^[49]采用有限元数值方法求解双重介质模型方程组,克服了很难得到解析解的问题,使孔隙-裂隙介质数值模拟跨出了新的一步。但是,该模型并没有深入研究裂隙与基质间的渗流机理,裂隙与基质之间的水交换方程很难得到,其应用受到了很大的限制。Fujio^[50]提出将流体力学引入孔隙-裂隙双重介质中,利用 N-S 方程和连续性方程作为控制方程,提供了解决这一难题的思路。

双重介质模型既反映了基质岩块孔隙系统和裂隙系统两类介质渗透各向异性的特点,也对两个系统水流运动作了区分,可以较好地模拟基质中的缓流和裂隙岩溶管道中的快速流。从研究进展看,目前双重介质模型还只能应用于正交裂隙网络岩体,对流速分布以及溶质浓度的空间分布还不能做到准确定位和模拟,且该模型中所定义的表达连续体之间的水量交换函数取自经验值,不能对交换量进行准确模拟。

2.4 三重介质模型

由于岩溶管道以及裂隙具有极大的导水能力,其中的地下水流往往处于紊流“非线性流”状态^[4,6],而前述3种模型均不能刻画出这一流态。在实际岩溶含水层中,地下水是在岩溶管道、裂隙、基质三重介质内流动的,前面所述的双重介质模型是三重介质模型的一个特例。早期的三重介质模型认为岩溶含水层由两种不同的基质系统和一个裂隙介质系统构成,微裂隙为一种基质系统,开度较大裂隙以及岩溶管道为裂隙介质系统^[51]。Jalali 等^[52]提出了双裂隙三重介质模型,认为岩溶含水层是由一个基质系统和两种裂隙系统构成,把微裂隙划分为一种裂隙系统。

陈崇希等^[53]将岩溶管道内的水流与井周围的地下水流作为模拟对象,并在此基础上建立“渗流-管流耦合模型”,利用渗流刻画孔隙中的水流,管流刻画井管中的水流。在该模型中,岩溶管道中水流部分视为渗透系数很大的圆柱形透镜体,并对管流引入形式上服从 Darcy 定律的等效折算渗透系数,推导出管道与裂隙在达西流与非达西流状态下的渗透系数与折算渗透系数的表达式,将达西流与非达西流耦合在一个模型中,由此开发出了岩溶管道、裂隙、孔隙三重介质地下水流模型。陈崇希的三重介质模型能够较全面反映岩溶含水层非连续介质储水、导水、阻水的基本特性,真实反映岩溶含水层渗流的规律,数值模拟的拟真性较好,模拟结果可信度高。但是该模型中的折算渗透系数未考虑水流在岩溶管道与裂隙交叉时的特性,且模型中的等效折算渗透参数和非线性流是通过雷诺数判定的,因此模拟岩溶含水层水流运动有一定的局限性。

李苍松等^[54]以陈崇希提出的三重介质理论和曹玉清等提出的岩溶地下水化学动力学理论为基础,根据武隆隧道岩溶水文地质条件,建立了该隧道的水文地质概化模型和水文地球化学模型。赵坚等^[55]在总结各种岩溶地下水渗流计算方法的基础上,针对岩溶地区渗流场的特点,提出可同时考虑达西和非达西渗流流态的两种岩溶渗流计算方法,即改进折算渗透系数法和变渗透系数法。

2.5 连续管流耦合模型

连续管流耦合(coupled continuum pipe flow,CCPF)模型,又称混合模型,最早是由 Király 和 Morel 提出的^[56]。该模型综合了等效连续介质模型和离散介质模型,同时考虑了基质和岩溶管道的透水性。岩溶管道作为三维基质中的一维或二维管道单元处理,管道和多孔介质之间流体的交换通过特别的交换项 $a(h_m - h_c)$ 来决定,其中 a 是交换系数,即水交换量与

基质和岩溶管道中的水头差呈线性关系。Király^[57-58]进一步发展了混合模型,并应用于实际工程计算。Hu^[59]认为连续管流耦合模型的计算使得基质中的水流流速和水头比实际偏大,Wang^[60]对该模型进行了研究和修正,并对该模型的算法进行了改进。

连续管流耦合模型得到了很好的发展和应用,美国地质研究协会最受欢迎的地下水数值模拟软件 MODFLOW 2005 版本正已将此模型嵌入,即 CFP 模块(conduit flow process)^[61]。这个模型的优点在于它相对于其他模型具有简单和高效的特点。然而该模型中的 a 是一个非常重要的参数,计算结果对于这个参数的变化比较敏感,不合适的交换系数可能会导致结果与实际物理问题的差别非常明显^[62]。

在岩溶含水层区域,上述5种模型以渗流理论为基础,对于真实岩体非连续介质中水流运动模拟有较大的误差^[63-64],达西定律、立方定理是在层流状态下忽略了惯性项(可以通过 N-S 方程的 Hagen-Poiseuille 解推导得出),只适用于雷诺数较小的层流运动,传统的数值模拟方法在模拟岩溶含水层水流运动时受到很大的限制。同时,由于岩土工程及模型结构和参数的非确定性,这些渗流模型预测的可靠性受到质疑^[65-66]。

3 渗流与自由流耦合理论模型

岩溶含水介质内的流动状态和流动规律异常复杂,裂隙和岩溶管道内的自由流动和基质中的渗流共存,如图2所示,对基质域 Ω_m 的研究采用达西定律(式(1))已是定论^[67-68],在自由流体域 Ω_c 满足 N-S 方程,即式(2),再加上不可压缩流体连续方程(式(3)),以及交界面 Γ_{cm} 上的耦合条件,构成 Darcy-Stokes 耦合方程组。

$$\rho S \frac{\partial p_m}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\rho \frac{k}{\mu} \nabla p_m \right) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_f}{\partial t} + (u_f \cdot \nabla) u_f \right) + \nabla p_f - \mu \nabla^2 u_f = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3)$$

图2 岩溶含水层典型剖面

式中: S 为储水系数; p_m 为基质中的压力; p_f 为裂隙和岩溶管道中的自由流压力; k 为基质固有渗透率; ρ 为流体密度; μ 为水力黏滞系数; u_f 为裂隙和岩溶管道中的自由流流速; u 为速度矢量。

对自由流和渗流的交界面 Γ_{cm} 上的耦合边界条件, 目前主要分为两种类型, 一种是基于 Darcy 定律的 Brinkman 型, 另一种则是 Beavers-Joseph 型。

3.1 Brinkman 型边界条件

Brinkman^[69] 在 Darcy 方程的基础上考虑 N-S 方程中流体黏性剪切应力项, 提出了 Brinkman 方程:

$$-\frac{\mu}{\varepsilon} \nabla^2 u_{br} - \left(\frac{\mu}{k} u_{br} + \nabla p_{br} \right) = 0 \quad (4)$$

式中: μ 为水力黏滞系数; ε 为孔隙度; u_{br} 为流速; k 为多孔介质渗透率; p_{br} 为压力。当 k 较大时, 该方程较接近 N-S 方程 (忽略惯性力); 当 k 较小时, 与 Darcy 定律较近似。

Brinkman 方程可以很好地满足多孔介质流动区域和裂隙、岩溶管道中纯流体流动区域交界面处的无滑移条件。Popov 等^[70-71] 认为真实溶洞往往会伴随着不同程度的充填, 因此应用 Stokes-Brinkman 统一方程系统来描述岩溶含水层中的耦合流动更为方便和实用, 通过选择恰当的方程系数得到 Stokes 方程或者 Brinkman 方程, 来分别描述自由流动和渗流, 由于在渗流和自由流动区域交界面上无须引入额外的交界面条件, 因此便于数值计算。在研究岩溶含水层介质时, 他们把裂隙作为小溶洞来处理, 并得到了一些有益的结果, 但裂隙和溶洞本身存在着尺度的差异性, 使得计算量过大而无法实际应用。多数数值模拟研究结果^[72-74] 表明, 只有当多孔介质的孔隙率较高 (一般在 0.7 以上) 时 Brinkman 方程才是正确的。

3.2 Beavers-Joseph 型边界条件

假设流体为不可压缩黏性流体, 裂隙中的流动为层流, 裂隙中的水流满足 N-S 方程。Beavers 等^[68] 认为裂隙中流体切向流速较孔隙介质中流速有滑移, 切向流速不连续, 其滑移量与剪切应力呈正比关系 (式 (5)), 即 Beavers-Joseph 接触面条件), 并通过大量的实验进行了证。Saffman^[75] 运用统计近似原理将达西定律运用到非均质孔隙介质中, 为了推导的方便, 特别假设交界面上的张力与流速呈线性关系, 并对 Beavers-Joseph 接触面条件进行了修正, 发现裂隙流体在交界面上的切向速度正比于切应力, 得到了 Beavers-Joseph-Saffman 滑移速度边界条件 (简称 BJS 条件, 即式 (6)), 得到广泛应用, 在此基础上形成了 Darcy-Stokes 耦合模型。

$$\frac{du}{dy} = \frac{\alpha}{\sqrt{k}} (u_f - u_m) \quad (5)$$

$$u_f = -\frac{k}{2\mu} \left(\frac{\sigma^2 + 2\alpha\sigma}{1 + \alpha\sigma} \right) \frac{dp}{dx} \quad (6)$$

其中

$$\sigma = \frac{b}{\sqrt{k}}$$

式中: b 为裂隙开度; α 为无量纲数, 与基质渗透率有关。

佛罗里达州立大学的学者们对岩溶含水层的岩溶管道和基质进行了试验模拟, 并开发出了 Beavers-Joseph 接触面条件下的 Darcy-Stokes 模型的计算方法^[76-78]。Le Bars 等^[79-80] 对 Beavers-Joseph 实验中的泊松流动进行了数值研究, 并提出了不同于 Beavers-Joseph 的接触面条件, 即 Bar-Woster 接触面条件, 他们利用体积平均法对界面区域进行了计算, 发现与 Beavers-Joseph 的实验结果吻合更好。图 3 为分别采用 Darcy-Brinkman 公式、Beavers-Joseph 接触面条件的 Stokes-Darcy 公式以及 Bars-Worster 接触面条件计算所获得的速度分布曲线, 图中 v_s 为 Beavers-Joseph 接触面条件下接触面滑移速度, δ 为水流过渡区宽度, h 为裂隙隙宽。由图 3 可知, Darcy-Brinkman 和 Bars-Worster 都是采用的是无滑移边界条件, Beavers-Joseph 是滑移边界条件。

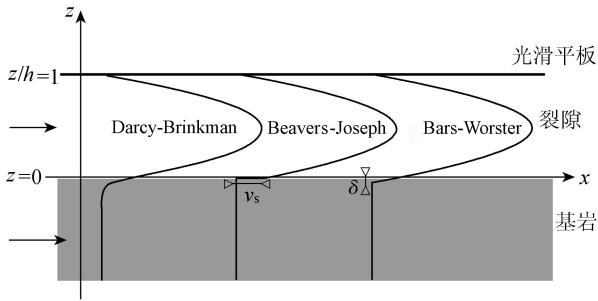


图 3 泊肃叶流体在孔隙-裂隙介质中的速度分布

Darcy-Stokes 模型可以比较精确地从细观角度模拟岩溶含水层中的水流特性, 但是计算量较大, 而且岩溶含水层的结构很难勘测, 结构复杂, 使得 Darcy-Stokes 模型不适合工程应用。

3.3 Darcy-Stokes 耦合模型与等效渗透张量

等效连续介质模型比较广泛地应用于地下水模拟, 但是模型中的等效渗透率张量参数很难确定, 裂隙岩体几何参数、有效孔隙度以及等效渗透张量的确定仍有待于更深入的研究, 而从细观力学结构入手研究渗流耦合模型将具有重大的理论意义和实用价值。很多学者根据岩溶含水层的特点和流体在不同尺度空间的流动特征, 建立了 Darcy-Stokes 耦合数学模型, 推导出考虑基岩渗透率的等效渗透率张量表达式。

贺瑶瑶^[81] 采用四因素四水平的正交试验方案,

通过 Darcy-Stokes 耦合方程,讨论了对裂隙-孔隙介质内流体流动影响最大的因素,并得出了等效渗透率与其中 3 个影响因素之间的拟合方程。Arbogast 等^[82-83]对溶洞型介质的渗透性进行了系统的研究,他们应用 Darcy-Stokes 耦合方程系统来描述溶洞型介质中流体的宏观流动,基于均匀化理论推导了大尺度上的等效 Darcy 流动方程,并给出了溶洞型介质等效渗透率张量的理论求解公式,但该公式在实际应用中存在困难。李亚军等^[84-85]建立了在 Beavers-Joseph-Saffman 滑移速度边界条件下的广义立方定律和单裂缝多孔介质的等效渗透率理论计算公式,但是该公式是基于二维考虑的,有很大的局限性,而且没有考虑裂隙和岩溶管道交叉的情况。

4 存在问题及展望

岩溶地下水系统的建模具有很大的挑战性。模拟岩溶含水层水流运动需要大量的信息,由于这些信息很难掌握,甚至不可能得到,因此岩溶含水层的水流运动不能被很好地模拟,在现有的数学模型研究中有很多的简化假设。Darcy-Stokes 耦合模型可以广泛应用于岩溶含水层的水流模拟细观研究;三重介质模型能较真实反映简单结构岩溶含水介质及岩溶水流态复杂性,其应用和发展前景非常广阔。

a. 目前各种岩溶含水层数学模型均未能真正解决工程实际问题。由于岩溶含水层高度的各向异性和非均质性,流体在含水层内的流动模式不一,裂隙和岩溶管道内的自由流动与基岩的渗流共存,整个岩溶含水介质内的流体流动状态和规律异常复杂。各类模型在一定程度上是相互补充相互促进的,因此可以借助于不同的概念模型来研究岩溶含水层中的水流问题。

b. 现实中,普遍存在裂隙和岩溶管道交叉的情况,在交叉处水流通常呈现紊流状态,对溶质运移也有着很大的影响,目前大多数数学模型均是针对裂隙或孔隙介质或岩溶管道相互独立或者两两耦合情况,尚缺乏孔隙、裂隙、岩溶管道交叠情况下三重介质的水流特性研究。

c. 裂隙面以及岩溶管道壁面的粗糙度较为复杂,对岩溶含水层水流影响不仅仅局限于流量,而且在流态、水流方向等其他水力特性方面有较大的影响。目前数学模型中对粗糙度的研究只是简单引入了经验摩擦系数,对三重介质下的粗糙度的水力特性研究不够。

d. 自然界中岩溶含水层中非饱和和流动是普遍、客观存在的。由于裂隙、岩溶管道与孔隙介质的孔隙空间之间存在差异,其非饱和运动机理亦不相同,

目前裂隙、岩溶管道的非饱和运动机理研究尚不成熟,有待于通过大量天然裂隙和岩溶管道非饱和渗流试验和理论分析概括出切实符合裂隙和岩溶管道非饱和渗流特性的拟合模型。

e. 在岩溶含水层水流模型研究中,裂隙和岩溶管道随机分布,水文地质参数具有明显的不确定性,这也引起了数值模拟的不确定性,岩溶含水层数值模拟的不确定分析是一个重要的研究方向。

f. 由于三重介质的水流试验物理模型较复杂,裂隙和管道中的物理量难以测量,给物理试验增加了难度。应运用流体力学和渗流力学相结合的方法(即 Darcy-Stokes 模型)对岩溶含水层水流细观机理进行研究,并对其他模型中的参数(如双重介质理论中的水量交换函数等)进行修正,使之更接近于实际情况。

g. 目前对沿海岩溶含水层的水力性质仍知之甚少,由于存在许多岩溶管道,而且这些管道也在不断发育,因此,盐化作用的演化可能无规律可循。淡水和咸水的过渡带厚度非常不稳定,水资源的开采很容易打破这种平衡,从而造成过渡带的反复变化。因此研究能够预测过渡带位置和厚度的水流运动数学模型就显得尤为重要。

h. 岩溶水的化学特征与水的补给交替强度密切相关,在补给区受降雨稀释作用,一般矿化度较小;随着向深部或排泄区运动,不断溶解含水介质壁上的岩石,增大了裂隙开度以及岩溶管道半径,从而对水流运动造成影响,现有的岩溶含水层数学模型尚不能解决此类问题。此外还应考虑应力、应变特性、温度场、化学场与流体的相互作用。

参考文献:

[1] 赖苗,赵坚. 岩溶地下水渗流计算方法综述[J]. 水电能源科学, 2002, 20 (4): 44-47. (LAI Miao, ZHAO Jian. System overview of seepage computation methods in karst regions[J]. Water Resources and Power, 2002, 20 (4): 44-47. (in Chinese))

[2] 薛显武,陈喜,张志才,等. 岩溶裂隙对坡面饱和水流汇集的影响研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27 (6): 20-23. (XUE Xianwu, CHEN Xi, ZHANG Zhicai, et al. Effect of karst fracture on saturated subsurface flow confluence[J]. Water Resources and Power, 2009, 27 (6): 20-23. (in Chinese))

[3] WHITE W B. Conceptual Models for karstic aquifers[J]. Karst Modeling, 1999 (5): 11-16.

[4] 陈崇希. 岩溶管道-裂隙-孔隙三重空隙介质地下水流模型及模拟方法研究[J]. 地球科学, 1995 (4): 361-366. (CHEN Chongxi. Groudwater flow model and simulation method in triple media of karstic tube-fissure-pore [J]. Earth Science, 1995 (4): 361-366. (in

- Chinese))
- [5] BERKOWITZ B. Characterizing flow and transport in fractured geological media; a review [J]. *Advances in Water Resources*,2002,25:861-884.
 - [6] CHENG Jianmei, CHEN Chongxi. An integrated linear/non-linear flow model for the conduit-fissure-pore media in the karst triple void aquifer system [J]. *Environmental Geology*,2005,47(2):163-174.
 - [7] CLEMENS T, HUECKINGHAUS D, SAUTER M, et al. Modelling the genesis of karst aquifer systems using a coupled reactive network model [C]//*Proceedings of the 5th Scientific Assembly of the International Association of Hydrological Sciences*. Wallingford: IAHS Press, 1997: 3-10.
 - [8] LI Guangquan. Analytical solution of advective mixing in a conduit [J]. *Ground Water*,2009,47(5):714-722.
 - [9] LOMIZE G M. Flow in fractured rocks [M]. Moscow: State Press, 1951.
 - [10] ROMM E C. Fluid flow in fractured rocks [M]. Moscow: Nedra Publishing House, 1966. (in Russian)
 - [11] SNOW D T. Anisotropic permeability of fractured media [J]. *Water Resource Research*,1969,5(6):1273-1289.
 - [12] NEUZIL C E, TRACY J V. Flow through fractures [J]. *Water Resource Research*,1981,17(1):191-199.
 - [13] LOUIS C. Rock hydraulics in rock mechanics [M]. New York: Springer-Verlag, 1974.
 - [14] TSANG Y W, WITHERSPOON P A. Hydromechanical behavior of a deformable rock fracture subject to normal stress [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86: 9287-9298.
 - [15] WALSH J B. Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*,1981,18(5):429-435.
 - [16] BARTON N, BANDIS S, BAKHTAR K. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1985, 22 (3) : 121-140.
 - [17] GHASEMIZADEH R, HELLWEGER F, BUTSCHER C, et al. Review: groundwater flow and transport modeling of karst aquifers, with particular reference to the North Coast Limestone aquifer system of Puerto Rico [J]. *Hydrogeology Journal*,2012,20(8):1441-1461.
 - [18] QUINN J J, TOMASKO D, KUIPER J A. Modeling complex flow in a karst aquifer [J]. *Sedimentary Geology*, 2006,184(3/4): 343-351.
 - [19] 仵彦卿. 岩体水力学基础 (二): 岩体水力学的基础理论 [J]. *水文地质工程地质*, 1997 (1) : 24-28. (WU Yanqing. Basis of the rock mass hydraulics, the basic theory of the rock mass hydraulics [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*,1997(1):24-28. (in Chinese))
 - [20] WILSON C R, WITHERSPOON P A, LONG J C S, et al. Large-scale hydraulic conductivity measurements in fractured granite [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*,1983,20(6):269-276.
 - [21] 祝云华,刘新荣,梁宁慧,等. 裂隙岩体渗流模型研究现状与展望 [J]. *工程地质学报*,2008,16(2):178-183. (ZHU Yunhua, LIU Xinrong, LIANG Ninghui, et al. Current research and prospects in modeling seepage field in fractured rockmass [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008,16(2):178-183. (in Chinese))
 - [22] 赵全升,戴其祥,吕月娥,等. 二重孔隙介质地下水溶质运移模型应用研究 [J]. *青岛海洋大学学报:自然科学版*, 2003, 33 (5) : 680-686. (ZHAO Quansheng, DAI Qixiang, LÜ Yue'e, et al. Application research on groundwater solute transport in dual-porosity media [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2003, 33 (5) : 680-686. (in Chinese))
 - [23] SCANLON B R, MACE R E, BARRETT M E, et al. Can we simulate regional groundwater flow in a karst system using equivalent porous media models? [J]. *Journal of Hydrology*,2003,276:137-158.
 - [24] 朱岳明. 裂隙岩体渗流研究述评 [J]. *河海科技进展*, 1991, 11 (2) : 16-25. (ZHU Yueming. The review of seepage in the fractured rocks [J]. *Advances in Science and Technology of Hohai University*,1991,11(2):16-25. (in Chinese))
 - [25] SUDICKY E A, MCLAREN R G. The Laplace transform Galerkin technique for large-scale simulation of mass transport in discretely fractured porous formations [J]. *Water Resources Research*,1992,28(2):499-514.
 - [26] GRAF T, THERRIEN R. A method to discretize non-planar fractures for 3D subsurface flow and transport simulations [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*,2008,56(11):2069-2090.
 - [27] GRAF T, THERRIEN R. Variable-density groundwater flow and solute transport in irregular 2D fracture networks [J]. *Advances in Water Resources*,2007,30(3):455-468.
 - [28] WEATHERILL D, GRAF T, SIMMONS C T, et al. Discretizing the fracture-matrix interface to simulate solute transport [J]. *Ground Water*,2008,46(4):606-615.
 - [29] LONG J C S, GILMOUR P, WITHERSPOON P A. A model for steady fluid flow in random three-dimensional networks of disc-shaped fractures [J]. *Water Resources Research*, 1985,21(8):1105-1115.
 - [30] DERSHOWITZ W, DOE T. Analysis of heterogeneously connected rock masses by forward modeling of fractional dimension flow behavior [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34 (3/4) : 611-619.
 - [31] 仵彦卿. 岩体水力学概述 [J]. *地质灾害与环境保护*, 1995,6(1):57-64. (WU Yanqing. A brief description of rocks mass hydraulics [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 1995, 6 (1) : 57-64. (in Chinese))

- [32] 作彦卿. 岩体水力学基础(五): 岩体渗流场与应力场耦合的裂隙网络模型[J]. 水文地质工程地质, 1997(5): 43-7. (WU Yanqing. Basis of the rock mass hydraulics; coupled seepage field and stress field fracture in the fracture network model [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1997(5): 43-47. (in Chinese))
- [33] 熊祥斌, 张楚汉, 王恩志. 岩石单裂隙稳态渗流研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1839-47. (XIONG Xiangbin, ZHANG Chuhan, WANG Enzhi. A review of steady state seepage in a single fracture of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1839-1847. (in Chinese))
- [34] 王恩志, 王洪涛, 孙役. 三维裂隙网络渗流数值模型研究[C]// 中国力学学会工程力学编辑部. 第六届全国结构工程学术会议论文集: 第二卷. 北京: 工程力学杂志社, 1997: 520-525.
- [35] 王恩志, 孙役, 黄远智, 等. 三维离散裂隙网络渗流模型与实验模拟[J]. 水利学报, 2002(5): 37-40. (WANG Enzhi, SUN Yi, HUANG Yuanzhi, et al. 3-D seepage flow model for discrete fracture network and verification experiment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(5): 37-40. (in Chinese))
- [36] DVERSTORP B, ANDERSSON J, NORDQVIST W. Discrete fracture network interpretation of field tracer migration in sparsely fractured rock[J]. Water Resources Research, 1992, 28(9): 2327-2343.
- [37] CACAS M C, LEDOUX E, DE MARSILY G, et al. Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation; 2. the transport model [J]. Water Resources Research, 1990, 26(3): 491-500.
- [38] DERSHOWITZ W S, FIDELIBUS C. Derivation of equivalent pipe network analogues for three-dimensional discrete fracture networks by the boundary element method [J]. Water Resource Reseach, 1999, 35(39): 2685-2691.
- [39] 田开铭. 裂隙水交叉流的水力特性[J]. 地质学报, 1986(2): 202-14. (TIAN Kaiming. The hydraulic properties of crossing-flow in an intersected fracture [J]. Acta Geologica Sinica, 1986(2): 202-214. (in Chinese))
- [40] 速宝玉, 詹美礼, 郭笑娥. 交叉裂隙水流的模型实验研究[J]. 水利学报, 1997(5): 2-7. (SU Baoyu, ZHAN Meili, GUO Xiao'e. Experiment research of cross fracture flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(5): 2-7. (in Chinese))
- [41] 陈舟. 交叉粗糙裂隙中水流与溶质运移试验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [42] TSANG Y W, TSANG C F. Channel model of flow through fractured media[J]. Water Resources Research, 1987, 23(3): 467-479.
- [43] 陈雾. 岩溶与裂隙交叉渗流特性试验及数值模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [44] 沈振中, 陈雾, 赵坚. 岩溶管道与裂隙交叉渗流特性试验研究[J]. 水利学报, 2008, 39(2): 137-145. (SHEN Zhenzhong, CHEN Fen, ZHAO Jian. Experimental study on seepage characteristics of the intersection of tubular karst passage and fissure [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(2): 137-145. (in Chinese))
- [45] BARENBLATT G I, ZHELTOV I P, KOCHINA I N. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks [strata] [J]. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1960, 24(5): 1286-1303.
- [46] 王媛, 速宝玉, 徐志英. 裂隙岩体渗流模型综述[J]. 水科学进展, 1996, 7(3): 93-99. (WANG Yuan, SU Baoyu, XU Zhiying. Comment on the models of seepage flow in fractured rock masses [J]. Advances In Water Science, 1996, 7(3): 93-99. (in Chinese))
- [47] WARREN J E, ROOT P J. The behavior of naturally fractured reservoirs [J]. Society of Petroleum Engineers, 1963, 3(3): 245-255.
- [48] STREL TSOVA T D. Well testing in heterogeneous formations [M]. New York: John Wiley & Sons, 1988.
- [49] KHALED M, BESKOS D, AIFANTIS E. On the theory of consolidation with double porosity [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1984(20): 1009-1035.
- [50] FUJIO K. A macroscopic momentum equation for flow in porous media of dual structure [J]. Proceeding of Japan Chemical Society, 2000, 26(6): 837-841.
- [51] ABDASSAH D, ERSHAGHI I. Triple-porosity systems for representing naturally fractured reservoirs [J]. SPE Formation Evaluation, 1986, 1(2): 113-127.
- [52] JALALI Y, ERSHAGHI I. Pressure transient analysis of heterogeneous naturally fractured reservoirs [C]//SPE: California Regional Meeting. Ventura, California: Society of Petroleum Engineers, 1987: 8-10.
- [53] 陈崇希, 胡立堂. 渗流-管流耦合模型及其应用综述[J]. 水文地质工程地质, 2008(3): 70-5. (CHEN Chongxi, HU Litang. A review of the seepage-pipe coupling model and its application [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008(3): 70-75. (in Chinese))
- [54] 李苍松, 何发亮, 陈成宗. 渝怀线武陵隧道岩溶涌水量计算新方法[J]. 中国铁道科学, 2005, 26(5): 41-46. (LI Cangsong, HE Faliang, CHEN Chengzong. New calculation method of water inflow quantity in Wulong tunnel on Chongqing-Huaihua railway [J]. China Railway Science, 2005, 26(5): 41-46. (in Chinese))
- [55] 赵坚, 赖苗, 沈振中. 适于岩溶地区渗流场计算的改进折算渗透系数法和变渗透系数法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1341-1347. (ZHAO Jian, LAI Miao, SHEN Zhenzhong. Improved converting permeability coefficient method and variable permeability coefficient method for seepage calculation in karst region [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1341-1347. (in Chinese))
- [56] KIRÁLY L, MOREL G. Etude de régularisation de l'Affreuse par modèle mathématique [J]. Bulletin du Centre d'Hydrogéologie, 1976(1): 19-36.
- [57] KIRÁLY L. Modeling karst aquifers by the combined discrete channel and continuum approach [J]. Bull Centre

- Hydrogeol.,1998(16):77-98.
- [58] KIRÁLY L. Karstification and groundwater flow [J]. *Speleogenesis Evol Karst Aquifers*,2003(1):1-26.
- [59] HU B X. Examining a coupled continuum pipe-flow model for groundwater flow and solute transport in a karst aquifer [J]. *Acta Carsologica*,2010,39(2):347-359.
- [60] WANG X. On the coupled continuum pipe flow model (CCPF) for flows in karst aquifer [J]. *Discrete and Continuous Dynamical Systems: Series B*,2010,13(2):489-501.
- [61] SHOEMAKER W B. Documentation of a conduit flow process (CFP) for MODFLOW-2005 [M]. Reston, Virginia:US Geological Survey,2008.
- [62] 陈南. 岩溶含水层耦合数学模型的理论分析及数值模拟[D]. 上海:复旦大学,2011.
- [63] FIELD M,NASH S. Risk assessment methodology for karst aquifers: (1) estimating karst conduit-flow parameters [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*,1997,47(1):1-21.
- [64] FIELD M. Risk assessment methodology for karst aquifers: (2) solute-transport modeling [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*,1997,47(1):23-37.
- [65] SUN Nezheng, YANG Shuli, YEH W G. A proposed stepwise regression method for model structure identification [J]. *Water Resources Research*, 1998, 34(10):2561-2572.
- [66] 杨会军,孙吉主. 三重介质渗流耦合数值模拟[J]. 隧道建设,2007(增刊2):76-79. (YANG Huijun,SUN Jizhu. Numerical simulation of triple-media coupling seepage [J]. *Tunnel Construction*, 2007 (Sup2): 76-79. (in Chinese))
- [67] 郭会荣. 优先流影响下的入渗补给过程及溶质运移实验与模拟[D]. 北京:中国地质大学,2008.
- [68] BEAVERS G S,JOSEPH D D. Boundary conditions at a naturally permeable wall[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1967,30(1):197-207.
- [69] BRINKMAN H. A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles [J]. *Applied Scientific Research*,1949,1(1):27-34.
- [70] POPOV P,EFENDIEV Y,QIN G. Multiscale modeling and simulations of flows in naturally fractured karst reservoirs [J]. *Communications in Computational Physics*,2009,6(1):162-184.
- [71] POPOV P,QIN G,BI L,et al. Multiphysics and multiscale methods for modeling fluid flow through naturally fractured carbonate karst reservoirs[J]. *Spe Reservoir Evaluation & Engineering*,2009,12(2):218-231.
- [72] 李亨,张锡文,何枫. 论多孔介质中流体流动问题的数值模拟方法[J]. 石油大学学报:自然科学版,2000,24(5):111-116. (LI Heng,ZHANG Xiwen,HE Feng. Development of numerical simulation methods for fluid flow in porous media [J]. *Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science*, 2000, 24(5):111-116. (in Chinese))
- [73] ALKAM M K, AL-NIMR M A. Transient non-darcian forced convection flow in a pipe partially filled with a porous material [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,1998,41(2):347-356.
- [74] TATSUO N,TORU T,MITSUHIRO S,et al. Numerical analysis of natural convection in a rectangular enclosure horizontally divided into fluid and porous regions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,1986,29(6):889-898.
- [75] SAFFMAN P G. On the boundary condition at the interface of a porous medium[J]. *Studies in Applied Mathematics* 1971,50(2):77-84.
- [76] HU X,WANG X,GUNZBURGER M,et al. Experimental and computational validation and verification of the Stokes-Darcy and continuum pipe flow models for karst aquifers with dual porosity structure [J]. *Hydrological Processes*, 2012,26(13):2031-2040.
- [77] WANG X. An efficient second order in time scheme for approximating long time statistical properties of the two dimensional Navier-Stokes equations [J]. *Numer Math*, 2012,121(4):753-779.
- [78] FAULKNER J,HU B X,KISH S,et al. Laboratory analog and numerical study of groundwater flow and solute transport in a karst aquifer with conduit and matrix domains[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*,2009,110(1/2):34-44.
- [79] LE BARS M,WORSTER M G. Interfacial conditions between a pure fluid and a porous medium: implications for binary alloy solidification [J]. *Journal of Fluid Mechanics*,2006,550:149-173.
- [80] LE BARS M,WORSTER M G. Solidification of a binary alloy: finite-element, single-domain simulation and new benchmark solutions [J]. *Journal of Computational Physics*,2006,216(1):247-263.
- [81] 贺瑶瑶. 裂隙-孔隙介质细观渗流机理研究[D]. 武汉:武汉工业学院,2010.
- [82] ARBOGAST T,BRUNSON D S. A computational method for approximating a Darcy-Stokes system governing a vuggy porous medium [J]. *Computational Geosciences*,2007,11(3):207-218.
- [83] ARBOGAST T,LEHR H L. Homogenization of a Darcy-Stokes system modeling vuggy porous media [J]. *Computational Geosciences*,2006,10(3):291-302.
- [84] 李亚军. 缝洞型介质等效连续模型油水两相流动模拟理论研究[D]. 北京:中国石油大学,2011.
- [85] 李亚军,姚军,黄朝琴,等. 基于 Darcy-Stokes 耦合模型的缝洞型介质等效渗透率分析[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2011,35(2):91-95. (LI Yajun,YAO Jun,HUANG Chaoqin,et al. Estimating equivalent permeability of fractured-vuggy media based on coupled Darcy-Stokes model [J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2011, 35(2):91-95. (in Chinese))

(收稿日期:2013-03-25 编辑:熊水斌)