

文章编号:1673-5005(2010)02-0093-05

## 介质间流体交换对裂隙介质渗流的影响

黄朝琴<sup>1,2</sup>, 姚 军<sup>1,2</sup>, 吕心瑞<sup>1,2</sup>, 李亚军<sup>1,2</sup>

(1. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 青岛 266555; 2. 中国石油大学 石油工程教育部重点实验室, 山东 东营 257061)

**摘要:** 建立光滑可渗透平行板单裂隙新模型, 以此为基础分析介质间流体交换对基质岩块渗透性和单裂隙导流能力的影响, 推导出两者的等效渗透率修正公式, 并对不同裂隙开度和间距下的裂隙介质渗透性进行分析, 研究介质间流体交换对裂隙介质渗流的影响。结果表明, 当裂隙开度大于 250  $\mu\text{m}$  或裂隙间距大于 1.36 cm 时, 可忽略介质间流体交换对裂隙介质渗流的影响。

**关键词:** 裂隙介质; 流体交换; 渗流; 裂隙开度; 裂隙间距

**中图分类号:** TV 138; TE 371 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1673-5005.2010.02.019

## Influence of fluid exchanging between rock matrix and fractures on seepage of fractured porous medium

HUANG Zhao-qin<sup>1,2</sup>, YAO Jun<sup>1,2</sup>, LÜ Xin-rui<sup>1,2</sup>, LI Ya-jun<sup>1,2</sup>

(1. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266555, China;

2. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

**Abstract:** A new single fracture model was set up, namely a smooth parallel plate model with permeable rock matrix. Based on this model, the impact of fluid exchanging process on the permeability of the rock matrix and the flow conductivity of single fracture were analyzed. And then the equivalent permeability formulas of rock matrix and single fracture were obtained. The permeability of fractured porous medium with different fracture aperture and spacing was analyzed, and the influence of fluid exchanging process on the seepage of fractured porous medium was researched. The results show that the impact of fluid exchanging between rock matrix and fractures could be ignored completely when the fracture aperture is larger than 250  $\mu\text{m}$  or the space interval of fractures is larger than 1.36 cm.

**Key words:** fractured porous medium; fluid exchanging process; seepage; fracture aperture; space interval of fracture

在地下流体动力学中, 把裂隙发育的岩体称为裂隙介质。裂隙介质渗流问题广泛存在于水利水电、油气田开发和地下水资源开发与利用等工程中, 近年来由于国际上高放核废料处理工程和裂缝性油藏开发的需要, 对于裂隙介质的研究逐渐成为热点问题<sup>[1-3]</sup>。目前用来描述裂隙介质渗流的数学模型主要有两种<sup>[4-6]</sup>: 一是考虑岩体中裂隙系统和基质岩块系统的流体交换过程, 即所谓的裂隙—孔隙双重介质模型; 二是忽略了两类系统间的流体交换过程, 即非双重介质模型, 包括等效连续介质模型和离散裂隙网络模型<sup>[7]</sup>。裂隙介质的渗透性与裂隙的

开度、裂隙的分布及基质岩块的渗透性密切相关。笔者首先建立光滑可渗透平行板单裂隙新模型, 以此为基础分析介质间流体交换对基质岩块渗透性和单裂隙导流能力的影响, 并给出各自的等效渗透率修正公式, 对不同裂隙开度和间距(或密度)下的裂隙介质渗透性进行分析。

### 1 单裂隙模型

#### 1.1 光滑可渗透平行板单裂隙模型的沿革

传统的单裂隙渗流模型为光滑、不渗透平行板模型, 如图 1(a) (图中  $b$  为裂隙开度,  $h$  为岩块厚

收稿日期: 2009-05-21

基金项目: 国家“973”重点基础研究发展计划项目(2006CB202404)

作者简介: 黄朝琴(1981-), 男(汉族), 湖南安仁人, 博士研究生, 研究方向为复杂油气藏渗流理论及开发。

度)所示,由 Navier-Stokes 方程导出立方定律。考虑裂隙面粗糙度、张开度等因素对渗流的影响,一些学者引用了等效水力传导开度的概念,对立方定律进行了修正。图 1(a)单裂隙模型中,平行板被视为不渗透边界即忽略基质岩块与裂隙间的流体交换。Beavers 和 Joseph<sup>[8]</sup>最早通过试验研究了可渗透边界对平行板中流动的影响,并提出了半经验公式的速度滑移条件;Saffman 和 Jager<sup>[9-10]</sup>从理论上验证了速度滑移条件的正确性,但该边界条件引入了新的参数需通过试验来确定,因此很难应用于实际;Berkowitz<sup>[11]</sup>应用 Brinkman<sup>[12]</sup>方程来描述多孔介质中的流动,并详细研究了可渗透边界对单裂隙导流能力的影响,但 Brinkman 方程中也引入了有效黏性系数  $\mu_e$ ,并给出了经验值;Ochoa-Tapia 和 Whitaker 等<sup>[13-14]</sup>应用体积平均方法推导得到了 Brinkman-Darcy 扩展方程,该方程中有效黏性系数意义明确,并得到了与 Beavers 和 Joseph 试验一致的结果。本文中采用 Brinkman-Darcy 扩展方程来描述渗透性岩块中的流体流动,并建立光滑可渗透平行板单裂隙新模型,如图 1(b)所示。本文中仅对二维问题进行研究。

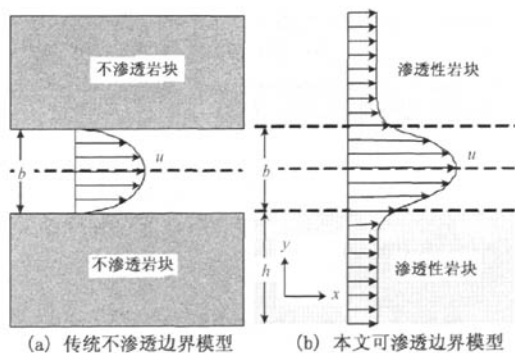


图 1 单裂隙平行板模型

Fig. 1 Parallel plate model of single fracture

## 1.2 数学模型的建立及求解

(1)裂隙中的流动方程。考虑如图 1(b)所示裂隙中的稳态、不可压缩层流流动,忽略迁移惯性项的影响,则其黏性系数和密度的 Navier-Stokes 方程为

$$0 = \rho g - \nabla p + \mu \nabla^2 u. \quad (1)$$

式中,  $\rho$  为流体质量密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}$  为 Hamilton 算子;  $p$  为流体压力, Pa;  $\mu$  为流体黏性系数,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $\mathbf{u} = \{u, v, w\}$  为速度向量,  $\text{m}/\text{s}$ 。

当流速较小时,上述模型可简化为一维均匀流方程

$$\mu \frac{d^2 u}{dy^2} = \frac{dp}{dx}. \quad (2)$$

(2)基质岩块中的流动方程。考虑均质各向同性岩块中流体的宏观流动,应用 Brinkman-Darcy 扩展方程来描述其流动规律,具体形式为

$$-\frac{\mu}{k} \bar{u} + \frac{\mu}{\varphi} \frac{d^2 \bar{u}}{dy^2} = \frac{d\bar{p}}{dx}. \quad (3)$$

式中,  $k$  为基质岩块的渗透率,  $\text{m}^2$ ;  $\varphi$  为基质岩块的孔隙度;  $\bar{u}$  为定义在岩块表征单元体积上的平均渗流速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\bar{p}$  为定义在岩块表征单元体积上的平均压力, Pa。定义  $\mu_e = \mu/\varphi$ 。

为了解方程(2)和(3),必须给出一定的边界条件以形成定解问题。由对称性,仅需研究图 1(b)中模型的一半,因此边界条件为

$$\frac{dp}{dx} = \frac{d\bar{p}}{dx} = \text{const}; \quad (4)$$

$$u = \bar{u}, \mu \frac{du}{dy} = \mu_e \frac{d\bar{u}}{dy}, y = 0; \quad (5)$$

$$\frac{du}{dy} = 0, y = b/2; \quad (6)$$

$$\bar{u} = -\frac{k}{\mu} \frac{d\bar{p}}{dx} = v, \text{ 且 } \frac{d\bar{u}}{dy} = 0, y = -h. \quad (7)$$

式中,  $v$  为 Darcy 渗流速度。

边界条件(5)为两个流动区域间的连续性边界条件,即认为在  $y = 0$  边界上速度和剪切应力均为连续的;边界条件(6)为对称性条件;式(4)表明岩块和裂隙具有相同的压力梯度;式(7)说明远离裂隙的岩块区域符合 Darcy 流动。结合上述边界条件可求解方程(2)和(3),其解为

$$u = \left( -\frac{\gamma^2}{2k} + \frac{\gamma b}{2k} + \frac{\alpha}{2\beta} \theta + 1 \right) v, 0 \leq y \leq b/2; \quad (8)$$

$$\bar{u} = \left[ 1 + \frac{\alpha(\exp(\varepsilon h) + \exp(-\varepsilon h - \varepsilon y))}{2\beta(\exp(\varepsilon h) - \exp(-\varepsilon h))} \right] v, -\infty \leq y \leq 0. \quad (9)$$

其中

$$\alpha = b/\sqrt{k}; \beta = \sqrt{\mu_e/\mu} = \sqrt{1/\varphi}; \theta = \frac{\exp(\varepsilon h) + \exp(-\varepsilon h)}{\exp(\varepsilon h) - \exp(-\varepsilon h)}; \varepsilon = \sqrt{\varphi/k}.$$

由于  $\varepsilon$  值很大,故  $\theta \rightarrow 1$ ,因此式(8),(9)可简化为

$$u = \left( -\frac{\gamma^2}{2k} + \frac{\gamma b}{2k} + \frac{\alpha}{2\beta} + 1 \right) v, 0 \leq y \leq b/2; \quad (10)$$

$$\bar{u} = \left[ 1 + \frac{\alpha}{2\beta} \exp\left(\frac{\gamma}{\beta\sqrt{k}}\right) \right] v, -\infty \leq y \leq 0. \quad (11)$$

## 2 流体交换对单裂隙渗流的影响

### 2.1 对基质岩块渗流的影响

由式(11)可知在渗透性岩块中存在一个明显的过渡区域,而在此区域以外渗流速度与 Darcy 渗流速度  $v$  基本相同。设过渡区域厚度为  $\delta$ , 且在  $y = -\delta$  处  $\bar{u} = 1.01v$ , 将其代入式(11)可得

$$\delta = \beta \sqrt{k} \ln \left( \frac{50\alpha}{\beta} \right). \quad (12)$$

考虑一真实岩块,其孔隙度  $\varphi = 0.1$ , 渗透率  $k = 0.1 \mu\text{m}^2$ 。由式(12)得  $\delta = 7.6 \mu\text{m}$ , 可知该过渡区域较小。式(11)中的第二项为超出 Darcy 渗流速度  $v$  的额外项,对其进行积分可得到流体交换对基质岩块导流能力的影响流量,表达式为

$$Q_e = \int_{-\delta}^0 v \frac{\alpha}{2\beta} \exp\left(\frac{y}{\beta\sqrt{k}}\right) dy \approx \frac{b}{2} v, \quad (13)$$

显然岩块中的额外流量等于 Darcy 渗流速度乘以半裂隙宽度。为进一步考虑流体交换对岩块导流能力的影响,可先求得基质岩块中的 Darcy 渗流量  $Q_m = hv$ , 然后求得基质岩块的等效渗透率修正公式为

$$k_{me} = \frac{Q_m + Q_e}{Q_m} k_m = \left(1 + \frac{b}{2h}\right) k_m. \quad (14)$$

式中,  $k_m$  为基质岩块的渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $k_{me}$  为考虑流体交换过程后的等效渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

在裂隙介质中裂隙开度  $b$  的量级一般为几十微米,而基质岩块的厚度  $h$  比裂隙开度大几个数量级,因此流体交换过程对于基质岩块渗流的影响是有限的,一般可忽略。若令  $b/(2h) \leq 5\%$  (本文中定义允许误差为 5%), 则有  $b/h \leq 0.1$ , 因此仅当裂隙开度很大时才予以考虑。

### 2.2 对单裂隙导流能力的影响

考察图 1(a) 所示的光滑不渗透平行板模型,将边界条件考虑为

$$u = 0, y = 0; du/dy = 0, y = b/2.$$

求得其裂隙中的速度分布为

$$u = \left(-\frac{y^2}{2k} + \frac{yb}{2k}\right)v, 0 \leq y \leq b/2. \quad (15)$$

对式(10)和式(15)分别进行积分可求得单裂隙中的净流量,分别记为  $Q$  和  $Q_0$ , 则

$$Q = 2 \int_0^{b/2} \left(-\frac{y^2}{2k} + \frac{yb}{2k} + \frac{\alpha}{2\beta} + 1\right) v dy = -\frac{b^3}{12\mu} \frac{dp}{dx} - \frac{kb(\alpha + 2\beta)}{2\mu\beta} \frac{dp}{dx}. \quad (16)$$

$$Q_0 = 2 \int_0^{b/2} \left(-\frac{y^2}{2k} + \frac{yb}{2k}\right) v dy = -\frac{b^3}{12\mu} \frac{dp}{dx}. \quad (17)$$

通过求裂隙中的平均流速,可把式(16), (17)写成经典 Darcy 定律形式,求得裂隙渗透率为

$$k_f = \frac{b^2}{12} + \frac{k(\alpha + 2\beta)}{2\beta}, \quad (18)$$

$$k_0 = b^2/12.$$

式(18)即为考虑流体交换过程影响的单裂隙等效渗透率修正公式。

$$\frac{k_f}{k_0} = \frac{Q}{Q_0} = 1 + \frac{6(\alpha + 2\beta)}{\beta\alpha^2} = 1 + \sigma.$$

其中

$$\sigma = 6(\alpha + 2\beta)/(\beta\alpha^2).$$

可以看到影响项  $\sigma$  由裂隙开度  $b$  和基质岩块渗透率  $k$ 、孔隙度  $\varphi$  来控制,其中岩块的渗透率往往是孔隙度的某一特征函数,对于不同的岩体具有不同的表征关系式,因此影响项  $\sigma$  是与裂隙和岩块的结构特征相关的。为进一步考察这一影响项,分别从裂隙开度和岩块结构特征来对  $\sigma$  进行分析<sup>[15]</sup>。

选择 5 组典型岩石进行分析,岩石的具体参数见表 1。各典型岩石中单裂隙导流能力影响项  $\sigma$  与裂隙开度  $b$  的关系曲线如图 2 所示。现场岩石裂隙统计资料表明,裂隙开度基本在 10 ~ 200  $\mu\text{m}$ ,因此本文中主要研究此范围内的裂隙,其中最常见的裂隙为 10 ~ 40  $\mu\text{m}$ ,当开度小于 10  $\mu\text{m}$  可将其视为基质岩块中的孔隙。只有当影响项小于 5% (允许误差)时才忽略流体交换过程的影响。

表 1 各种岩石的典型参数值

Table 1 Typical parameter value of various rocks

| 岩石类型 | 孔隙度 $\varphi/\%$ | 渗透率 $k/10^{-3} \mu\text{m}^2$ |
|------|------------------|-------------------------------|
| 砂砾石岩 | 40               | 10000                         |
| 含油岩石 | 30               | 1000                          |
| 普通砂岩 | 10               | 100                           |
| 低渗砂岩 | 10               | 1                             |
| 石灰岩  | 1                | 0.001                         |

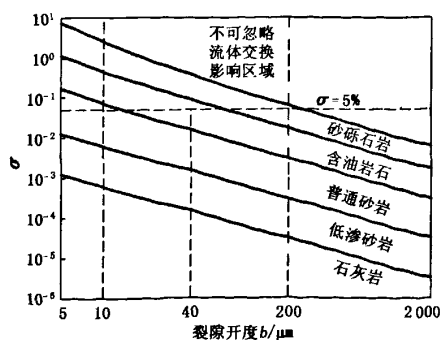


图 2 单裂隙  $\sigma-b$  双对数曲线

Fig. 2  $\sigma-b$  log-log graph of single fracture

图2表明,只有图中不可忽略流体交换影响区域需考虑流体交换对单裂隙导流能力的影响。对于石灰岩和低渗砂岩等致密岩石,其影响项 $\sigma < 5\%$ ,因此可以完全忽略流体交换过程对单裂隙导流能力的影响;对于孔隙度较高的砂砾石岩块,裂隙开度为 $10 \sim 200 \mu\text{m}$ 时影响项 $\sigma > 5\%$ ,因此对于该类岩石不可忽略流体交换过程的影响;对于普通的含油岩石,当裂隙开度大于 $60 \mu\text{m}$ 时可忽略影响项,在 $10 \sim 60 \mu\text{m}$ 时应考虑影响项加以修正;对于普通砂岩,当裂隙开度小于 $15 \mu\text{m}$ 时才予以考虑,同时可看到在 $10 \sim 15 \mu\text{m}$ ,其影响项 $\sigma$ 的最大值不超过10%,可根据研究精度要求忽略或考虑流体交换过程的影响。从图2中可进一步发现,当裂隙开度大于 $250 \mu\text{m}$ 时,无论何种介质均可忽略其影响项。

### 3 流体交换对裂隙介质渗流的影响

#### 3.1 裂隙介质渗流分析

裂隙介质的渗透性与基质岩块的渗透性和裂隙的开度、数量及其分布密切相关。岩体由于构造作用而形成几个裂隙组。每一裂隙组的裂隙数量往往很多,其分布规律在地质构造学上一般用裂隙间距(或裂隙密度)和产状(或方向)来表征。显然,当裂隙延伸方向与水力梯度方向平行时,裂隙对岩体宏观流动的影响是最大的,此时裂隙介质的渗流将由基质岩块渗透率和裂隙等效渗透率及其间距决定(图3)。图3中 $L+b$ 为裂隙组平均间距, $L$ 为裂隙间的基质岩块厚度。裂隙介质的总渗透率建立在单裂隙流体运动规律基础上。

将裂隙岩体视为等效的连续性介质,即假定流

体在整个岩体中流动(图3),把裂隙的渗透率转换为裂隙当量渗透率,假设岩块系统均质各向同性,则整个裂隙岩体的等效渗透率为基质岩块渗透率 $k_m$ 和裂隙当量渗透率之和,即不考虑流体交换时,

$$k_{if} = k_m \frac{L}{L+b} + k_0 \frac{b}{L+b};$$

考虑流体交换时,

$$k_{ie} = k_m \left( 1 + \frac{b}{2L} \right) \frac{L}{L+b} + k_{if} \frac{b}{L+b}.$$

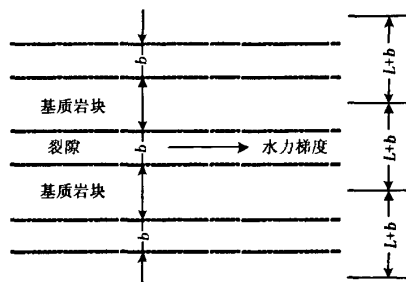


图3 裂隙与水力梯度平行渗透示意图

Fig.3 Schematic diagram of fractures parallel with hydraulic gradient

研究不同裂隙间岩块厚度 $L$ 下流体交换过程对等效渗透率的影响时,定义其等效渗透率影响项 $E$ 为

$$E = \frac{-k_{ie} - k_{if}}{k_{if}} = \frac{0.5k_m b + \sigma k_0 b}{k_m L + k_0 b}.$$

#### 3.2 对不同类型岩石渗流的影响

不同类型岩石的 $E \sim L$ 双对数曲线如图4所示。只有流体交换影响区域需考虑流体交换对裂隙介质渗流的影响。

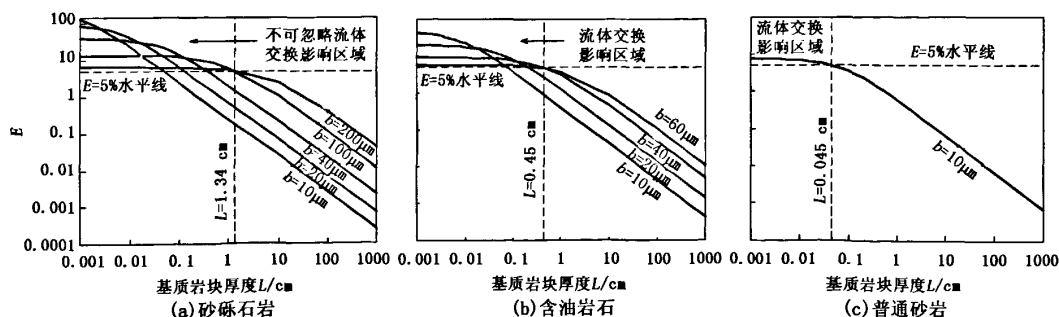


图4 不同类型岩石 $E \sim L$ 双对数曲线

Fig.4  $E \sim L$  log-log graph for different types of rocks

(1) 砂砾石岩。对于砂砾石裂隙岩体,从图2可知流体交换对其单裂隙的影响区域为 $10 \sim 200 \mu\text{m}$ 。图4(a)表明,随着裂隙开度的增大,介质间

流体交换影响区域增加,当 $b = 200 \mu\text{m}$ 时,需考虑流体交换影响的最大裂隙间距( $L+b$ )为1.36 cm,因此当裂隙间距大于1.36 cm时,可忽略砂砾石裂

隙岩体中介质间流体交换对其渗流的影响。

(2) 含油岩石。由图2可知,对于含油岩石裂隙岩体,流体交换对其单裂隙的影响区域为10~60  $\mu\text{m}$ 。图4(b)表明,随着裂隙开度的增大,介质间流体交换影响区域增加,当 $b=60\text{ }\mu\text{m}$ 时,需考虑流体交换影响的最大裂隙间距( $L+b$ )为0.456 cm,因此当裂隙间距大于0.456 cm时,可忽略砂砾石裂隙岩体中流体交换过程对其流动的影响。

(3) 普通砂岩。对于普通砂岩裂隙岩体,仅需对裂隙开度 $b=10\text{ }\mu\text{m}$ 进行分析。只有当裂隙间距( $L+b$ ) $\leq 0.046\text{ cm}$ 时,才应考虑流体交换过程对普通砂岩渗流的影响。当裂隙间距大于0.046 cm时,可忽略普通砂岩中流体交换过程对其渗流的影响。

## 4 结 论

(1) 流体交换过程对基质岩块渗透性的影响是有限的,一般可忽略;仅当裂隙开度很大即裂隙间距很小( $b/h \leq 0.1$ )时才予以考虑;介质间流体交换对于单裂隙导流能力的影响随着裂隙开度的增加而减小;当裂隙开度 $b > 250\text{ }\mu\text{m}$ 时,流体交换的影响完全可以忽略。

(2) 流体交换对裂隙介质渗透性的影响与裂隙间距(或密度)密切相关。随着裂隙间距的增大,其影响不断减小,当裂隙间距( $L+b$ ) $> 1.36\text{ cm}$ 时,可完全忽略介质间流体交换对裂隙介质渗流的影响。

### 参考文献:

- [1] HSIUNG S M, CHOWDHURY A H, NATARAJA M S. Numerical simulation of thermal-mechanical process observed at the drift-scale heater test at Yucca Mountain, Nevada, USA[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2005, 42(6): 652-666.
- [2] HASSAN B, JAMAL S, HADI P, et al. Characterization of fracture dynamic parameters to simulate naturally fractured reservoirs[R]. IPTC 11971, 2008.
- [3] NATHAN D, RICHARD J C, DIEGO M I. An adaptive continuum/discontinuum coupled reservoir geomechanics simulation approach for fractured reservoirs[R]. SPE 119524, 2009.
- [4] 程汉鼎, 柴军瑞, 李亚盟. 裂隙岩体溶质运移简述[J]. *水电能源科学*, 2007, 25(3): 33-37.
- CHENG Han-ding, CHAI Jun-rui, LI Ya-meng. Brief overview on solute transport in fractured rock masses[J]. *Water Resources and Power*, 2007, 25(3): 33-37.
- [5] 周志芳. 裂隙介质水动力学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [6] 葛家理. 现代油藏渗流力学原理[M]. 上册. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- [7] BERKOWITZ B. Characterizing flow and transport in fractured geological media: a review[J]. *Adv Water Resour*, 2002, 25: 861-884.
- [8] BEAVERS G S, JOSEPH D D. Boundary conditions at a naturally permeable wall[J]. *J Fluid Mech*, 1967, 30: 197-207.
- [9] SAFFMAN P G. On the boundary condition at the interface of a porous medium[J]. *Stud Appl Math*, 1971, 1: 93-101.
- [10] JAGER W, MIKELIC A. On the interface boundary condition of Beavers, Joseph, and Saffman[J]. *SIAM J Appl Math*, 2000, 60: 1111-1127.
- [11] BERKOWITZ B. Boundary conditions along permeable fracture walls: influence on flow and conductivity[J]. *Water Resour Res*, 1989, 25(8): 1919-1922.
- [12] BRINKMAN H C. A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles[J]. *Appl Sci Res*, 1947, 1: 27-34.
- [13] O-TAPIA J, WHITAKER S. Momentum transfer at the boundary between a porous medium and a homogeneous fluid—I: theoretical development[J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1995, 38(14): 2635-2646.
- [14] O-TAPIA J, WHITAKER S. Momentum transfer at the boundary between a porous medium and a homogeneous fluid—II: comparison with experiment[J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1995, 38(14): 2647-2655.
- [15] BEAR J, 李竞生. 多孔介质流体动力学[M]. 陈崇希, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983.

(编辑 李志芬)