第36卷第9期　　煤　炭　学　报　　Vol. 36　No. 9
2011年　9月　　JOURNAL OF CHINA COAL SOCIETY　　Sep.　2011

文章编号:0253－9993(2011)09－1446－05

基于均匀化方法的周期性缝洞型介质渗透率的数值计算

闫国亮[1,2],王殿生[1],刘金玉[1],隋宏光[1]

(1. 中国石油大学(华东) 物理科学与技术学院,山东 东营　257061;2. 中国石油大学(华东) 地球资源与信息学院,山东 青岛　266555)

摘　要:为了有效计算缝洞型介质的渗透率,在假设缝洞型介质具有细观周期性的基础上,构建了其细观数学模型——Darcy－Stokes方程组,即在缝洞型介质的岩石基质区域,应用Darcy定律;在其缝洞区域,应用Stokes方程;在两个区域的边界上,应用合适的耦合边界条件。在细观数学模型的基础上,利用均匀化方法推导出了缝洞型介质宏观渗透率的计算公式,并根据区域分解算法给出了求解渗透率的有限元计算方法,计算了周期性缝洞型介质的渗透率,并用解析方法验证了数值计算方法的正确性。结合二维缝洞型介质模型的算例,讨论了基岩渗透率、缝张开度和洞半径对渗透率的影响,结果显示缝张开度对缝洞型介质的渗透率具有决定性的影响:裂缝张开度从0.001 m增加到0.004 m,缝洞型介质渗透率从1.03×10^{-11} m^{2}快速增加到6.33×10^{-10} m^2。

关键词:均匀化方法;缝洞型介质;渗透率;Darcy－Stokes方程组;区域分解算法

中图分类号:TU457　　**文献标志码:**A

Numerical calculation of permeability for periodic fractured-vuggy porous medium based on homogenization method

YAN Guo-liang[1,2],WANG Dian-sheng[1],LIU Jin-yu[1],SUI Hong-guang[1]

(1. *College of Physics Science and Technology*,*China University of Petroleum*,*Dongying*　257061,*China*;2. *College of Geo-resources and Information*,*China University of Petroleum*,*Qingdao*　266555,*China*)

Abstract: Based on the assumption of micro period,a formula of permeability in periodic fractured-vuggy porous media was given from Darcy-Stokes equation by homogenization method. The finite element method of permeability was given by using domain decomposition method. Those methods were verified by analytical method. The numerical solution was in good agreement with the analytical method. The permeability of periodic fractured-vuggy porous media was got and the relationship between permeability and matrix permeability,fracture aperture and vuggy radius was discussed. The numerical results show that the fracture aperture has crucial effect on the permeability of fractured-vuggy porous media. If the fracture aperture varies from 0.001 m to 0.004 m,the permeability of fractured-vuggy porous media varies quickly from 1.03×10^{-11} m^2 to 6.33×10^{-10} m^2.

Key words: homogenization method;fractured-vuggy porous media;permeability;Darcy-Stokes equations;domain decomposition method

由于受岩石结构构造、成岩后生作用、构造断裂作用、溶蚀作用等对储集空间的综合影响,碳酸盐岩油藏的储层结构非常复杂,在空间和时间上具有多尺度特性,对这种类型储层参数的计算,尤其是渗透率参数的计算和定量评价,一直处于定性和半定量的水平[1]。这也是困扰碳酸盐岩油藏勘探开发的主要技术难题之一。目前主要采用岩芯测定法[2]、测井解释[3-4]和数值模拟[5-6]的方法获取碳酸盐岩储层的

收稿日期:2010－11－29　　责任编辑:常　琛
基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2006CB202404);中国石油科技创新基金研究项目(2001D－5006－0306)
作者简介:闫国亮(1984—),男,内蒙古乌兰察布人,博士研究生。Tel:0546－8394537,E－mail:y_guo-liang@163.com

渗透率。碳酸盐岩储层一般分为缝洞型和裂缝型两种,Arbogast T 等[7-8] 采用均匀化方法研究了缝洞型介质的渗透率,不过计算时需用标准的正方形单元,对求解区域有很大限制。

本文对碳酸盐岩储层进行了理想化,对于图 1 所示的周期性缝洞型介质(灰色区域表示岩石基质,白色区域表示缝洞),在直角坐标 x_3 方向上无限长,可以看作一个二维区域。由于流场和压力场在缝洞型介质中变化剧烈,采用常规的数值模拟方法计算该类介质的渗透率,如多重介质模型[9],需要十分精细的网格划分,当介质区域的大小为油田级别时,巨大的计算量使常规方法无法进行。均匀化方法可以解决这一问题: 通过计算周期性缝洞型介质一个周期的渗透率,即可以得到整个周期性介质的渗透率,从而大大降低计算量。本文在缝洞型介质单相流细观数学模型的基础上,应用均匀化方法推导了单相流宏观数学模型和渗透率的计算公式,并根据区域求解算法建立了渗透率的有限元计算方法[10-11],最后结合具体算例分析了渗透率的计算结果。

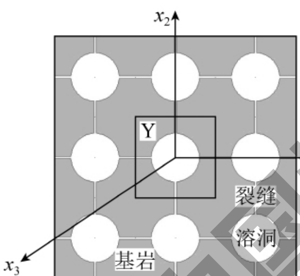

图 1　周期性缝洞型介质模型

Fig. 1　Periodic model of fractured-vuggy porous medium

1　基本理论

1.1　缝洞型介质单相流的细观数学模型

假设缝洞型介质区域 Ω 满足 Lipschitz 条件[7],并且在三维情况下是有界的。区域的一部分由缝洞组成,用 Ω_s^ε 表示; 一部分由多孔岩石组成,用 Ω_d^ε 表示; 两者界面用 Γ^ε 表示。$\boldsymbol{\eta}_s$ 表示 Γ^ε 上由 Ω_s^ε 指向 Ω_d^ε 的单位法向向量,$\boldsymbol{\tau}$ 表示 Γ^ε 的单位切向向量,$\boldsymbol{\eta}$ 表示 $\partial\Omega^\varepsilon/\Gamma^\varepsilon$ 上指向外部的单位法向向量。在细观尺度上,$\partial\Omega$ 表示区域 Ω 的边界。在 Ω_s^ε 中,用 Stokes 方程模拟流体流动; 在 Ω_d^ε 中,用 Darcy 定律模拟流体流动。在 Γ^ε 上,用 Beavers-Joseph-Saffman 边界条件(简称 BJS 边界条件) 以及界面法线方向的质量和动量的守恒条件。在上述假设基础上,缝洞型介质单相流的细观数学模型[8] 可表示为

缝洞区域(Stokes 方程)

$$-2\mu\varepsilon^2\,\nabla\cdot D\boldsymbol{u}_s^\varepsilon+\nabla p_s^\varepsilon=\boldsymbol{f} \tag{1}$$

$$\nabla\cdot\boldsymbol{u}_s^\varepsilon=q \tag{2}$$

岩石基质(Darcy 定律)

$$\mu(K^\varepsilon)^{-1}\boldsymbol{u}_d^\varepsilon+\nabla p_d^\varepsilon=\boldsymbol{f} \tag{3}$$

$$\nabla\cdot\boldsymbol{u}_d^\varepsilon=q \tag{4}$$

界面 Γ^ε

$$\boldsymbol{u}_s^\varepsilon\cdot\boldsymbol{\eta}_s=\boldsymbol{u}_d^\varepsilon\cdot\boldsymbol{\eta}_s \tag{5}$$

$$2\boldsymbol{\eta}_s\cdot D\boldsymbol{u}_s^\varepsilon\boldsymbol{\tau}=-\left(a/\varepsilon\sqrt{\boldsymbol{K}^\varepsilon}\right)\boldsymbol{u}_s^\varepsilon\cdot\boldsymbol{\tau} \tag{6}$$

$$2\mu\varepsilon^2\boldsymbol{\eta}_s\cdot D\boldsymbol{u}_{k,s}^\varepsilon\cdot\boldsymbol{\eta}_s=p_s^\varepsilon-p_d^\varepsilon \tag{7}$$

外部边界 $\partial\Omega^\varepsilon/\Gamma^\varepsilon$

$$\boldsymbol{u}_s^\varepsilon=0 \tag{8}$$

$$\boldsymbol{u}_d^\varepsilon\cdot\boldsymbol{\eta}=0 \tag{9}$$

式(1)~(9) 中,μ 为流体黏度; $\boldsymbol{K}^\varepsilon$ 为渗透率张量; α 为 Beavers-Joseph 滑移系数[12]; ε 为一个小量; q 为源或汇; f 为体力项; $\boldsymbol{u}_d^\varepsilon$、$p_d^\varepsilon$ 和 $\boldsymbol{u}_s^\varepsilon$、$p_s^\varepsilon$ 分别为 Darcy 区域和 Stokes 区域流体的速度和压力。式(5)~(7) 分别是质量连续方程、切向应力的 BJS 边界条件方程和法向应力连续方程。

1.2　缝洞型介质单相流的均匀化方法

设 Ω 是以 εY 为周期的周期性介质,Y 是周期性介质的参考单元,称为胞元。令 Y_s 表示胞元中的 Stokes 区域,Y_d 表示胞元中的 Darcy 区域,Γ 是两者之间的界面。若用 x 表示 Ω 中一点,y 表示 Y 中一点,且 $y=x/\varepsilon$,$0<\varepsilon\ll1$; 将 $\boldsymbol{u}_l^\varepsilon$ 和 $p_l^\varepsilon(l=s,d)$ 展开为 ε 的多项式表达形式

$$\boldsymbol{u}_l^\varepsilon=\sum_{j=0}^{\mu}\varepsilon^j\boldsymbol{u}_{l,j}(x,x/\varepsilon) \tag{10}$$

$$p_l^\varepsilon=\sum_{j=0}^{\mu}\varepsilon^j p_{l,j}(x,x/\varepsilon) \tag{11}$$

式(10) 和(11) 中 $\boldsymbol{u}_{l,j}$ 和 $p_{l,j}$ 是以 Y 为周期的 Y-周期性函数。

将展开式代入式(1)~(7),令 $\nabla=\nabla_x+\varepsilon^{-1}\nabla_y$,$D=D_x+\varepsilon^{-1}D_y$,其中 $\nabla_x\varphi=\dfrac{\partial\varphi}{\partial x_i}e_i$,$\nabla_y\varphi=\dfrac{\partial\varphi}{\partial y_i}e_i$,$D_x\psi=\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial\psi_i}{\partial x_j}+\dfrac{\partial\psi_j}{\partial x_i}\right)$ 和 $D_y\psi=\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial\psi_i}{\partial y_j}+\dfrac{\partial\psi_j}{\partial y_i}\right)$,整理得到下述方程式,即

$$-2\mu\,\nabla_y\cdot D_y\boldsymbol{u}_s^0+\nabla_x p_s^1(x,y)+\nabla_y p^0(x)=\boldsymbol{f}\quad(\Omega\times Y_s\text{ 区域}) \tag{12}$$

$$\nabla_y\cdot\boldsymbol{u}_s^0=0\qquad(\Omega\times Y_s\text{ 区域}) \tag{13}$$

$$\mu K(y)^{-1}\boldsymbol{u}_d^0+\nabla_x p^0(x)+\nabla_y p_d^1(x,y)=\boldsymbol{f}\quad(\Omega\times Y_d\text{ 区域}) \tag{14}$$

$$\nabla_y\cdot\boldsymbol{u}_d^0=0\qquad(\Omega\times Y_d\text{ 区域}) \tag{15}$$

$$\boldsymbol{u}_s^0\cdot\boldsymbol{\eta}_s=\boldsymbol{u}_d^0\cdot\boldsymbol{\eta}_s\qquad(\Omega\times\Gamma\text{ 区域}) \tag{16}$$

$$2\boldsymbol{\eta}_s \cdot D_y \boldsymbol{u}_s^0 \cdot \boldsymbol{\tau} = -\left(\alpha/\sqrt{K(y)}\right)\boldsymbol{u}_s^0\boldsymbol{\tau}$$

$(\Omega \times \Gamma$ 区域$)$ (17)

$$2\mu\boldsymbol{\eta}_s \cdot D_y \boldsymbol{u}_s^0 \cdot \boldsymbol{\eta}_s = p_s^1 - p_d^1 \quad (\Omega \times \Gamma \text{ 区域}) \tag{18}$$

式中，

$$p^0(x) = p_s^0(x) = p_d^0(x)$$

其中，p_s^0 和 p_d^0 与 y 无关，且相等。

用 $\boldsymbol{e}_j$ 表示笛卡尔坐标系 j 方向的单位矢量，令 (ω_j,φ_j) 为下面辅助方程的解

$$-2\nabla\cdot D\boldsymbol{\omega}_j^s + \nabla\varphi_j^s = \boldsymbol{e}_j \quad (Y_s \text{ 区域}) \tag{19}$$

$$\nabla\cdot \boldsymbol{\omega}_j^s = 0 \quad (Y_s \text{ 区域}) \tag{20}$$

$$K^{-1}\boldsymbol{\omega}_j^d + \nabla\varphi_j^d = \boldsymbol{e}_j \quad (Y_d \text{ 区域}) \tag{21}$$

$$\nabla\cdot \boldsymbol{\omega}_j^d = 0 \quad (Y_d \text{ 区域}) \tag{22}$$

$$\boldsymbol{\omega}_j^s \cdot \boldsymbol{\eta}_s = \boldsymbol{\omega}_j^d \cdot \boldsymbol{\eta}_s \quad (\text{界面 } \Gamma \text{ 上}) \tag{23}$$

$$2\boldsymbol{\eta}_s \cdot D\boldsymbol{\omega}_j^s \cdot \boldsymbol{\tau} = -\frac{\alpha}{K^{-1/2}}\boldsymbol{\omega}_j^s \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (\text{界面 } \Gamma \text{ 上}) \tag{24}$$

$$2\boldsymbol{\eta}_s \cdot D\boldsymbol{\omega}_j^s \cdot \boldsymbol{\eta}_s = \varphi_j^s - \varphi_j^d \quad (\text{界面 } \Gamma \text{ 上}) \tag{25}$$

将式(19)～(22)两边同时乘以 $\frac{1}{\mu}\left[f_j(x) - \frac{\partial p^0}{\partial x_j}(x)\right]$，并对 j 求和，对照式(12)～(15)，可以将 $\boldsymbol{u}_s^0$ 和 $\boldsymbol{u}_d^0$ 表示为

$$\boldsymbol{u}_l^0(x,y) = \frac{1}{\mu}\sum_j\left[f_j(x) - \frac{\partial p^0}{\partial x_j}(x)\right]\boldsymbol{\omega}_j^l(y)$$

$(l = s,d)$ (26)

定义平均算符 $\bar{v}_l$

$$\bar{v}_l = \frac{1}{|Y|}\int_{Y_l} v_l(y)\,\mathrm{d}y \tag{27}$$

因此

$$\bar{\boldsymbol{u}}_0(x) = \bar{\boldsymbol{u}}_s^0(x) + \bar{\boldsymbol{u}}_d^0(x) = -\frac{1}{\mu}\left[\sum_j\left(f_j(x) - \partial_j p^0(x)\right)\right](\overline{\boldsymbol{\omega}}_j - \overline{\boldsymbol{\omega}}_j^d) \tag{28}$$

定义矩阵 $\widetilde{K}$

$$\widetilde{K}_{i,j} = \bar{\omega}_{j,i}^s + \bar{\omega}_{j,i}^d = \frac{1}{Y}\left[\int_{Y_d}(\boldsymbol{\omega}_j^d)_i\,\mathrm{d}y + \int_{Y_s}(\boldsymbol{\omega}_j^s)_i\,\mathrm{d}y\right] \tag{29}$$

将式(29)代入式(28)，令 $\sum_j f_j(x) = f$，$\sum_j \partial_j p^0(x) = \nabla p^0$，得

$$\mu\widetilde{\boldsymbol{K}}^{-1}\bar{\boldsymbol{u}}_0 + \nabla p^0 = \boldsymbol{f} \tag{30}$$

同理可得

$$\nabla\cdot\bar{\boldsymbol{u}}_0 = 0 \tag{31}$$

从式(30)和(31)形式的分析可以得到结论：$\bar{\boldsymbol{u}}_0$ 在 Ω 区域形式上满足 Darcy 定律，绝对渗透率矩阵 $\widetilde{K}$ 独立于流体黏度，式(29)给出了其计算表达式。

式(30)和(31)就是缝洞型介质单相流细观数学模型经过均匀化方法处理后的结果，其中的均匀化参数——宏观渗透率 $\widetilde{K}$，可由式(29)计算。

2 渗透率的数值计算方法

宏观渗透率 $\widetilde{K}$ 的计算需要知道 ω^s 和 ω_j^d 的表达式或数值解。$\boldsymbol{\omega}_j^s$ 和 $\boldsymbol{\omega}_j^d$ 可通过求解式(19)～(25)得到。Arbogast T 于 2007 年[13]应用 Stokes 混合有限元方法对式(19)～(25)进行了求解，不过他的方法只能求解规则的矩形区域，不能求解曲折边界区域。本文采用区域分解算法求解式(19)～(25)。具体算法流程[14]为

(1) 在边界 Γ 上选择标量 $\lambda^{(0)} = \boldsymbol{\omega}_j^{s(0)} \cdot \boldsymbol{\eta}_s$，并给定一个 $\boldsymbol{\omega}_j^{s(0)}$；

(2) 取迭代变量 $k=0$，计算步骤(3)和(4)的方程;

(3) 应用有限元方法求解方程

$$\nabla\cdot\left(K(-\nabla\varphi_j^{d(k+1)} + \boldsymbol{e}_j)\right) = 0 \quad (Y_d \text{区域})$$

$$K(-\nabla\varphi_j^{d(k+1)} + \boldsymbol{e}_j)\cdot\boldsymbol{n} = \lambda^{(k)} \quad (\text{边界 } \Gamma \text{ 上})$$

周期性边界条件　　边界 $\partial Y_d/\Gamma$

(4) 应用有限元方法求解方程

$$-2\nabla\cdot D\boldsymbol{\omega}_j^{s(k+1)} + \nabla\varphi_j^{s(k+1)} = \boldsymbol{e}_j \quad (Y_s \text{ 区域})$$

$$\nabla\cdot\boldsymbol{\omega}_j^{s(k+1)} = 0 \quad (Y_s \text{ 区域})$$

$$2\boldsymbol{\eta}_s \cdot D\boldsymbol{\omega}_j^{s(k+1)} \cdot \boldsymbol{\tau} = -\frac{\alpha}{K^{-1/2}}\boldsymbol{\omega}_j^{s(k+1)}\boldsymbol{\tau}$$

(边界 Γ 上)

$$2\boldsymbol{\eta}_s D\boldsymbol{\omega}_j^{s(k+1)}\boldsymbol{\eta}_s - \varphi_j^{s(k+1)} = -\varphi_j^{d(k+1)} \quad (\text{边界 } \Gamma \text{ 上})$$

周期性边界条件　　边界 $\partial Y_s/\Gamma$

(5) 在边界上取 $\lambda^{(k+1)} = \theta\boldsymbol{\omega}_j^{s(k+1)} \cdot \boldsymbol{\eta}_s + (1-\theta)\lambda^{(k)}$，松弛参数 $\theta \in (0,1)$；

(6) 如果不收敛，取 $k=k+1$，返回步骤(3)。

将求得的 $\boldsymbol{\omega}_j^s$ 和 $\boldsymbol{\omega}_j^d$ 数值解代入式(29)，采用高斯积分法即可得到渗透率的数值解。

3 计算方法的验证

为了验证缝洞型介质渗透率均匀化计算方法的正确性，选取如图 2 所示的周期性孔洞型介质模型计算渗透率。首先采用解析法[15]求出不同孔径半径介质的渗透率，然后根据上述数值方法再计算出渗透

率,两者计算结果如图 3 所示。

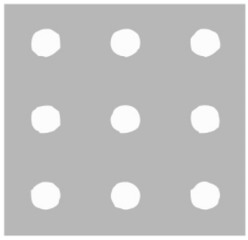

图 2　用于验证的孔洞介质模型

Fig. 2　Model of vuggy medium using for verification

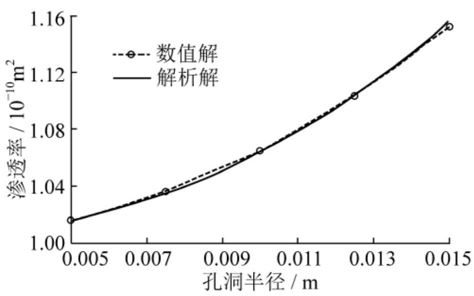

图 3　孔洞介质模型解析解与数值解的计算结果

Fig. 3　Analytical solution and numerical solution of vuggy medium

图 3 中实线和虚线分别是解析解和数值解的渗透率随孔洞半径的变化关系。从图 3 中可以看出,解析解与数值解的结果基本重合,因此均匀化数值方法能够求解周期性缝洞型介质的渗透率。

4　算　　例

采用均匀化方法计算缝洞型介质的渗透率,选取实际缝洞型油藏储层简化为如图 1 所示周期性二维缝洞型介质模型,周期性胞元为图 1 中实线框区域 Y。计算时所选用基本参数取值见表 1。

表 1　计算时所选用基本参数

Table 1　Parameters in the process of calculation

基岩 K	初值 $\omega_j^{s(0)}$	孔洞半径 r	缝张开度 δ	胞元边长 L
1.0×10^{-14} m^2	0	0.01 m	0.001 m	0.1 m

计算后得到宏观渗透率为

$$\widetilde{\boldsymbol{K}} = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.030\,7\times10^{-11} & 0 \\ 0 & 1.030\,7\times10^{-11} \end{pmatrix}$$

结果表明,x_1 方向的渗透率与 x_2 方向的渗透率数值大小相同,也就是水平方向和垂直方向的渗透率相同,这与计算区域的对称性一致。基岩渗透率、缝张开度和洞半径对缝洞型介质 x_1 方向渗透率影响的计算结果如图 4 所示。

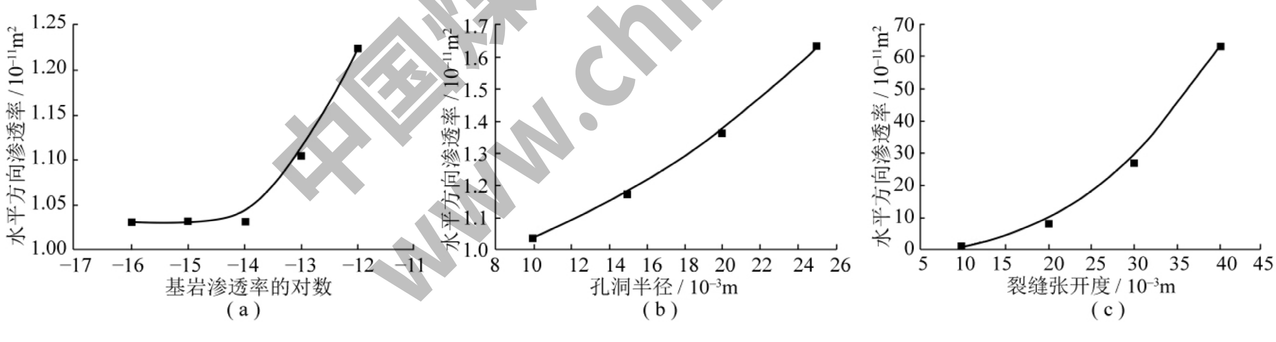

图 4　基岩渗透率孔洞半径和裂缝张开度与缝洞型介质 x_1 方向渗透率的关系

Fig. 4　Relationship between matrix permeability, vuggy radius, fractured apertwre and x_1-permeability of fractured-vuggy medium

图 4(a) 计算所用参数除基岩渗透率变化外,其他参数与表 1 中参数相同,可以看出,随着基岩渗透率的增大,缝洞型介质 x_1 方向的渗透率也增大,不过数值变化不大,从 1.03×10^{-11} m^2 增加到 1.22×10^{-11} m^2。图 4(b) 计算所用参数除孔洞半径变化外,其他参数与表 1 中参数相同,可以看出,水平方向渗透率数值变化较小。随着孔洞半径从 0.010 m 增加到 0.025 m,缝洞型介质的水平方向渗透率从 1.03×10^{-11} m^2 增加到 1.63×10^{-11} m^2。图 4(c) 计算所用参数除裂缝张开度变化外,其他参数与表 1 中参数相同,可见,随着裂缝张开度的增大,水平方向的渗透率也增大,且增幅非常大。

5　结　　论

(1) 该理论及数值计算方法求得的缝洞型介质的渗透率与解析方法相吻合,这为碳酸盐岩渗透率的计算提供了一套新的理论和数值计算方法。

(2) 连通的裂缝对缝洞型介质渗透率有着决定性的影响,裂缝张开度从 0.001 m 增加到 0.004 m,渗透率从 1.03×10^{-11} m^2 快速增加到 6.33×10^{-10} m^2;缝洞型介质基岩渗透率和孔洞大小对宏观渗透

率影响较小。

参考文献:

[1] 王亚琳. 碳酸盐岩储层半定量评价技术[J]. 海洋石油,2002,14(2):42-48.
Wang Yalin. The semi-quantitative evaluation of carbonate reservoir[J]. Offshore Oil,2002,14(2):42-48.

[2] Dezabala E F,Kamath J. Laboratory evaluation of waterflood behavior of vugular carbonates[J]. SPE Journal,1995:805-813.

[3] 罗 利. 用测井资料计算碳酸盐岩渗透率[J]. 测井技术,2001,25(2):139-141.
Luo Li. Calculation of carbonate formation permeability with log data[J]. Well Logging Technology,2001,25(2):139-141.

[4] 刘晓东,符伟兵,李 强. 测井资料预测碳酸盐岩储层渗透率[J]. 内蒙古石油化工,2009(6):102-104.
Liu Xiaodong,Fu Weibing,Li Qiang. Calculation of carbonate reservoir permeability with log data[J]. Inner Mongulia Petrochemical Industry,2009(6):102-104.

[5] 李 兵,凌其聪,鲍征宇. 用数字化图像分析法确定岩石物性[J]. 新疆石油地质,2008,29(2):253-255.
Li Bing,Ling Qicong,Bao Zhengyu. Application of digital image processing to determination of petrophysical property[J]. Xinjiang Petroleum Geology,2008,29(2):253-255.

[6] Moctezuma-Berthier A,Vizika O,Thovert J F. One- and two-phase permeabilities of vugular porous media[J]. Transport in Porous Media,2004,56:225-244.

[7] Arbogast T,Brunson D S,Bryant S L. A preliminary computational investigation of a macro-model for vuggy porous media[J]. Chapel Hill Nc. USA,2004:13-17.

[8] Arbogast T,Lher H. Homogenization of darcy-stokes system modeling vuggy porous media[J]. Computational Geosciences,2006,10(3):291-302.

[9] 彭小龙. 裂缝-溶洞多重介质组分模型研究与应用[D]. 成都:西南石油大学,2002:8-10.
Peng Xiaolong. The reserch and application of multiple ingredient in feactured-vuggy medium[D]. Chengdu:Southwest Petroleum University,2002:8-10.

[10] 汪仁和,李栋伟. 正冻土中水热耦合数学模型及有限元数值模拟[J]. 煤炭学报,2006,31(6):757-760.
Wang Renhe,Li Dongwei. Moisture-temperature coupling mathematical model in freezing soil and finite element numerical simulation[J]. Journal of China Coal Society,2006,31(6):757-760.

[11] Dai Liqiang,Liu Baoyu. Numerical simulation of coal-bed methane transfer with finite element method[J]. Journal of Coal Science & Engineering(China),2003,9(2):99-103.

[12] Beavers G S,Joseph D D. Boundary conditions at a naturally permeable wall[J]. Journal of Fluid Mechanics,1967,30(3):197-207.

[13] Arbogast T,Brunson D S. A computational method for approximating a Darcy-Stokes system governing a vuggy porous medium[J]. Comput. Geosci.,2007,11(3):207-218.

[14] DiscacciatiI M,Quarteroni A. Convergence analysis of a subdomain iterative method for the finite element approximation of the coupling of Stokes and Darcy equations[J]. Computing and Visualization in Science,2004,6:93-103.

[15] Neale G H,Nader W K. The permeability of a uniformly vuggy porous medium[J]. SPE Journal,1973,13(2):69-74.