

doi:10.3799/dqkx.2017.104

多尺度多孔介质有效气体输运参数的分形特征

徐鹏¹, 李翠红¹, 柳海成¹, 邱淑霞¹, 郁伯铭²

1. 中国计量大学理学院, 浙江杭州 310018

2. 华中科技大学物理学院, 湖北武汉 430074

摘要: 非常规油气资源的孔隙结构及其连通性非常复杂, 其孔隙尺度从毫米到纳米跨越多个量级. 多孔介质中气体的输运过程不仅依赖于介质的多尺度微观结构特征, 还依赖于气体的相关属性. 气体在多尺度多孔介质中的输运过程包括无滑流、滑脱流和过渡流, 涉及分子扩散和努森扩散等多种机制, 因此很难用唯一的连续介质理论来描述气体的输运特征. 大量的数据表明真实多孔介质中的内部孔隙具有分形标度特征, 因此采用分形几何表征多尺度多孔介质的孔隙结构, 引入孔隙分形维数和迂曲度分形维数定量表征多孔介质的微结构和弯曲流道, 建立多尺度多孔介质气体输运过程的微观模型; 推导了多尺度多孔介质中气体的有效渗透率和有效扩散系数, 并讨论了多尺度多孔介质微结构参数和气体属性对于气体等效输运特性的定量影响. 该研究不仅可以丰富渗流理论, 且有利于深入理解非常规油气藏的产出机制.

关键词: 多孔介质; 多尺度; 分形; 气体输运; 渗透率; 扩散系数; 石油地质.

中图分类号: P313.1

文章编号: 1000-2383(2017)08-1373-06

收稿日期: 2017-02-15

Fractal Features of the Effective Gas Transport Coefficient for Multiscale Porous Media

Xu Peng¹, Li Cuihong¹, Liu Haicheng¹, Qiu Shuxia¹, Yu Boming²

1. College of Science, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China

2. School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: The pore structures and connections in unconventional oil and gas resources are very complex, the size of which may vary several orders of magnitude from millimeter to nanometer. And gas transport process depends on both microstructure characteristics and gas properties in the multiscale porous media. As gas transport in multiscale porous media may involve multiple transport mechanisms such as no-slip and slip flow, transition flow, Knudsen and molecular diffusion, it is difficult to characterize the gas transport with continuum theory. Since it has been proven that natural pore structures indicate fractal scaling laws, fractal geometry is employed in this study to model the multiscale pore structures. The fractal dimensions are introduced to characterize the pore size distribution and tortuous flow path, and a mesoscopic model is developed to study the gas transport in multiscale porous media. The effective permeability and diffusion coefficient of multiscale porous media are derived and presented, and the effect of microstructures and gas properties on the equivalent transport properties is also discussed. This study may be helpful for the development of seepage theory and understanding the output mechanisms of unconventional oil and gas reservoirs.

Key words: porous media; multiscale; fractal; gas transport; permeability; diffusion coefficient; petroleum geology.

多孔介质中的气体输运是自然科学和工程技术中的常见输运现象, 其有效气体输运参数对于油气开采、微机电系统设计、气体封存、化工纺织及生物

工程等领域至关重要(Welty *et al.*, 2008). 然而多孔介质的孔隙结构和连通性十分复杂, 孔隙尺度范围极广, 从常规尺度到微纳米尺度形成了多尺度并

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.51576077); 浙江省自然科学基金项目(Nos.LY16A020002, LQ16E060002).

作者简介: 徐鹏(1981-), 男, 副教授, 主要从事多尺度多孔介质输运、分形理论和计算物理研究. ORCID: 0000-0002-4349-5627.

E-mail: xupeng@cju.edu.cn

引用格式: 徐鹏, 李翠红, 柳海成, 等, 2017. 多尺度多孔介质有效气体输运参数的分形特征. 地球科学, 42(8): 1373-1378.

存的物理结构.然而大多数研究都集中于单一尺度下多孔介质气体输运特性的分析和研究,对于多尺度多孔介质气体输运特性的研究相对较少且缺乏统一的物理数学模型.近年来,随着非常规油气资源、微机电系统、燃料电池和纳米多孔材料等领域的发展,多尺度多孔介质中的气体输运特性和机理研究成为国内外多学科和领域的研究热点和难点(Civan, 2001; Javadpour *et al.*, 2007; Ismail *et al.*, 2015; 郭迎春等, 2016; Li *et al.*, 2016b, 2016c).

多孔介质的输运过程常常采用简化模型来表征,宏观尺度下多孔介质中的气体输运满足连续介质理论.但是,当孔隙尺度小于分子平均自由程时,连续介质理论不再适用(Karniadakis and Beskok, 2002).努森数(Kn)可以表征气体分子平均自由程和孔隙尺度的相对大小,通常用来划分多孔介质的流动区域.当 $Kn \leq 0.001$ 时,多孔介质的孔隙尺寸远大于气体分子平均自由程,此时连续介质理论适用,可以采用 Navier-Stokes 方程描述气体在多孔介质中的输运过程;当 $0.001 < Kn < 0.1$ 时,孔隙尺寸与气体分子自由程相当,气体分子与多孔介质壁面间的碰撞不可忽略,此时可以采用滑移边界条件的 Navier-Stokes 方程描述气体输运;随着努森数的进一步增大($0.1 < Kn < 10$),气体分子间的碰撞和气体分子与固体壁面之间的碰撞频率相当,连续介质理论不再适用,可以采用包含碰撞积分项的 Boltzmann 方程求解;对于 $Kn \geq 10$ 的自由分子流区,气体扩散占主导地位,一般采用分子运动理论进行求解.事实上,多尺度的孔隙中可能同时存在气体扩散行为(Martínez *et al.*, 2002; Cussler, 2009).当 $Kn \ll 1$ 时,孔隙尺寸远大于分子平均自由程,分子之间的碰撞对于扩散过程起主导作用;当 $Kn \gg 1$ 时,孔隙尺寸远小于分子平均自由程,分子与壁面的碰撞频率高于分子间的碰撞,努森扩散占主导地位;而当孔隙尺度和分子平均自由程相当时,分子扩散和努森扩散可能同时起作用,称之为过渡扩散区.

分形几何具有自相似性和尺度不变性,而且大量的数据表明天然多孔介质具有分形标度特征(Katz and Thompson, 1985; Perfect and Kay, 1995; Yu, 2008; Xu, 2015; 方旻等, 2016).因此,很多学者采用分形几何理论研究多孔介质中多种输运过程的等效输运特性.例如, Zhang (2008) 基于分形理论构建了包含宏观及微观结构的多孔介质气体输运模型,同时考虑了泊肃叶流和努森流两种机制,并根据达西定律计算了有效渗透率; Wu *et al.* (2011)

利用分形几何方法建立了质子交换膜燃料电池中多孔气体扩散层在干燥和湿润条件下的气体扩散模型,并计算了过渡区的氧气有效扩散系数; Lo *et al.* (2011) 针对质子交换膜燃料电池微孔层和气体扩散层提出了一种分形串联模型,同时考虑了宏观流和分子流两种机制,计算了微孔层和气体扩散层的有效渗透率; Zheng *et al.* (2012) 基于分形毛管束模型推导了多孔介质的气体有效扩散系数,同时考虑了分子扩散和努森扩散两种机制; Shou *et al.* (2014) 考虑了气体在分子扩散区和过渡区以及努森扩散区中的气体输运,并提出了气体通过微纳米级纤维多孔材料的气体扩散分形模型; Li *et al.* (2016a) 考虑了气体滑移效应,采用分形几何理论和数值模拟计算了有效气体渗透率和滑移因子,结果表明当 $0.01 \leq Kn \leq 0.1$ 时气体滑移效应对气体渗透率具有显著影响.

综上所述,尽管目前有一些修正模型能够描述多尺度多孔介质中的气体多种输运过程,但是通常存在一些经验常数、微观渗流机理不明确、缺乏统一的数学和物理模型等问题.因此,本文采用分形几何理论表征多孔介质的多尺度孔隙结构,建立了气体输运的细观物理模型,系统研究了多孔介质的多种输运机制,并计算了多孔介质的有效气体输运参数.

1 分形模型

本文采用毛管束模型研究各向同性均质多孔介质中的单相气体输运过程(图 1),其中圆形毛管束的直径尺度分布和弯曲毛管长度假设满足如下分形标度率(Yu and Cheng, 2002):

$$f(\lambda) = D_f \lambda_{\min}^{D_f} \lambda^{-(D_f+1)}, \quad (1)$$

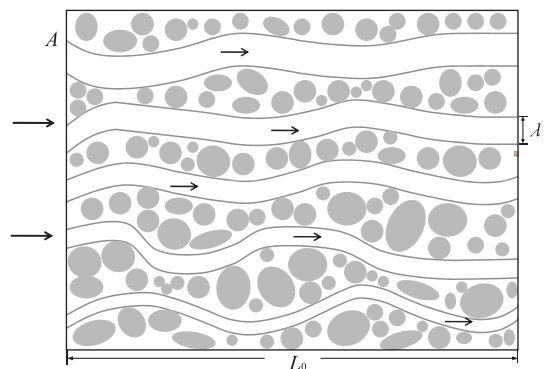


图 1 多孔介质分形毛管束模型示意

Fig. 1 The sketch of fractal capillary bundle model of porous media

$$L_t(\lambda) = \lambda^{1-D_T} L_0^{D_T}, \quad (2)$$

其中,式(1)为毛管直径(λ)分布的概率密度函数,式(2)是毛细管的弯曲长度.上述方程中, D_f 和 D_T 分别为毛管直径分布的分形维数和迂曲度分形维数,角标 min 和 max 分别表示最小和最大孔隙直径.而对于多孔介质的面孔隙率和分形维数之间存在如下关联:

$$\varphi = (\lambda_{\min}/\lambda_{\max})^{2-D_f}, \quad (3)$$

根据上述分形毛管束模型,横截面上的孔隙面积之和为:

$$A_p = \frac{\pi}{4} \frac{D_f}{2-D_f} (1-\varphi) \lambda_{\max}^2, \quad (4)$$

如果假设图1所示的多孔介质的代表性单元为立方体,则多孔介质横截面和长度可以分别按照 $A = A_p/\varphi$ 和 $L_0 = \sqrt{A}$ 计算.

努森数通常定义为气体分子平均自由程(l)和孔隙直径(λ)之比:

$$Kn = \frac{l}{\lambda}, \quad (5)$$

其中,气体分子平均自由程可以由下式进行计算:

$$l = \frac{\mu}{p} \sqrt{\frac{\pi R_g T}{2M}}, \quad (6)$$

其中, k_B 为玻尔兹曼常数, T 是温度, R_g 是气体常数, p 是压强, M 是气体的摩尔质量, μ 为气体粘度.

2 多孔介质中的气体渗流

根据努森数的划分,当 $Kn \leq 0.001$ 时,流体在单根圆形通道中的流动状态满足哈根-泊肃叶方程:

$$q(\lambda) = \frac{\pi \lambda^4}{128\mu} \frac{\Delta P}{L_t(\lambda)}, \quad (7)$$

根据质量守恒定律,多孔介质单元中的总流量为:

$$Q = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} q dN, \quad (8)$$

其中最小孔隙直径 $\lambda_{\min} = 1000l$, $dN = D_f \lambda_{\max}^{D_f} \lambda^{-(D_f+1)} d\lambda$ 表示分布在 $\lambda \sim \lambda + d\lambda$ 区间的毛细管数目.联立式(1)、(2)、(7)和(8)可得:

$$Q = \frac{\pi}{128\mu} \frac{D_f \lambda_{\max}^{3+D_T}}{3+D_T-D_f} \frac{\Delta P}{L_0^{D_T}} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}} \right)^{3+D_T-D_f} \right], \quad (9)$$

根据达西定律:

$$Q = \frac{K}{\mu} A \frac{\Delta P}{L_0}, \quad (10)$$

因此,有效渗透率可以表示为:

$$K_{\text{no-slip}} = \frac{\pi}{128A} \frac{D_f}{3+D_T-D_f} \frac{\lambda_{\max}^{3+D_T}}{L_0^{D_T-1}}, \quad (11)$$

由式(11)可知,对于无滑移粘性流,有效渗透率仅取决于分形维数和最大孔隙直径,而与最小孔隙直径无关.可以验证,当分形维数 $D_f = 2$ 和 $D_T = 1$ 时,式方程(11)可以退化为单根圆管的渗透率,因此和实际相符.

当 $Kn > 0.001$ 时,流体在单根管道中的流动状态可以采用修正的哈根-泊肃叶方程描述(Beskok and Karniadakis, 1999):

$$q(\lambda) = \frac{\pi \lambda^4}{128\mu} \left(1 + \frac{8l}{\lambda} \right) \frac{\Delta P}{L_t(\lambda)}, \quad (12)$$

采用类似的方法可得,滑移区的有效渗透率为:

$$K_{\text{slip}} = \frac{\pi}{128A} \frac{D_f}{3+D_T-D_f} \cdot \frac{\lambda_{\max}^{3+D_T}}{L_0^{D_T-1}} \left[1 + \frac{8l(3+D_T-D_f)}{\lambda_{\max}(2+D_T-D_f)} \right], \quad (13)$$

由式(13)可知,滑移区的有效渗透率不仅取决于多孔介质的孔隙结构,还依赖于气体的属性(分子平均自由程).式(13)可以进一步表示为:

$$K_{\text{slip}} = K_{\text{no-slip}} \left[1 + \frac{8l(3+D_T-D_f)}{\lambda_{\max}(2+D_T-D_f)} \right]. \quad (14)$$

若多孔介质的孔隙尺度跨越非滑移区和滑移区,设临界孔隙直径 $\lambda_{pf} = 1000l$,此时 $Kn = 0.001$.多孔介质的流量可以按照以下方式计算:

$$Q = \int_{\lambda_{pf}}^{\lambda_{\max}} q_{\text{no-slip}} dN + \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{pf}} q_{\text{slip}} dN, \quad (15)$$

因此,有效渗透率可以表示为:

$$K_e = \frac{\pi}{128A} \frac{D_f}{3+D_T-D_f} \frac{\lambda_{\max}^{3+D_T}}{L_0^{D_T-1}} \left[1 + \frac{8l(3+D_T-D_f)}{\lambda_{\max}(2+D_T-D_f)} \left(\frac{\lambda_{pf}}{\lambda_{\max}} \right)^{2+D_T-D_f} \right], \quad (16)$$

从式(16)可见,当最大孔隙远大于临界孔隙直径 $\lambda_{\max} \gg \lambda_{pf}$ 时, $K_e = K_{\text{no-slip}}$; 而当 $\lambda_{\max} \leq \lambda_{pf}$ 时, $K_e = K_{\text{slip}}$.

3 多孔介质中的气体扩散

当孔隙尺度远大于气体分子平均自由程,分子之间的碰撞占主导地位,气体的扩散系数主要依赖于分子平均自由程和分子平均速度.因此,当 $Kn < 1$ 时,根据菲克定律可得单通道的气体扩散通量:

$$j(\lambda) = \frac{\pi \lambda^2}{4} \frac{lu}{3} \frac{\Delta C}{L_t(\lambda)}, \quad (17)$$

其中 $u = \sqrt{8k_B N_A T / (\pi M)}$ 为气体平均速率.因此,多孔介质代表性单元的总扩散通量为:

$$J = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} j(\lambda) dN = \frac{\pi ul}{12} \frac{D_f \lambda_{\max}^{1+D_T}}{1 + D_T - D_f} \cdot \frac{\Delta C}{L_0^{D_T}} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}} \right)^{1+D_T-D_f} \right], \quad (18)$$

因此根据菲克定律:

$$J = DA \frac{\Delta C}{L_0}, \quad (19)$$

因此气体有效扩散系数为:

$$D_F = \frac{\pi ul}{12A} \frac{D_f}{1 + D_T - D_f} \frac{\lambda_{\max}^{1+D_T}}{L_0^{D_T-1}} \cdot \left[1 - \left(\frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}} \right)^{1+D_T-D_f} \right], \quad (20)$$

由式(20)可知,多孔介质的菲克扩散系数不仅取决于孔隙结构,而且依赖于气体属性.值得指出的是,多孔介质的最小孔隙尺度也对有效扩散系数具有重要影响.当分形维数 $D_f = 2$ 和 $D_T = 1$ 时,式(20)可以退化为气体的自扩散系数,与实际情况相符.

当 $Kn > 1$ 时,努森扩散成为主导扩散机制,此时,单通道的气体扩散通量可以表示为:

$$j(\lambda) = \frac{\pi \lambda^2}{4} \frac{\lambda u}{3} \frac{\Delta C}{L_c(\lambda)}, \quad (21)$$

因此,多孔介质的努森扩散系数为:

$$D_K = \frac{\pi u}{12A} \frac{D_f}{2 + D_T - D_f} \frac{\lambda_{\max}^{2+D_T}}{L_0^{D_T-1}} \cdot \left[1 - \left(\frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}} \right)^{2+D_T-D_f} \right]. \quad (22)$$

而当菲克扩散和努森扩散同时存在,假设临界孔隙直径为 $\lambda_{pd} = 1$,此时努森数为 $Kn = 1$,多孔介质的气体扩散通量可以表示为:

$$J = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{pd}} j_{\text{fick}}(\lambda) dN + \int_{\lambda_{pd}}^{\lambda_{\max}} j_{\text{kudsen}}(\lambda) dN, \quad (23)$$

因此,多孔介质的有效扩散系数可以表示为:

$$D_e = \frac{\pi ul}{12A} \frac{D_f}{1 + D_T - D_f} \frac{\lambda_{\max}^{1+D_T}}{L_0^{D_T-1}} \cdot \left[1 + \left(\frac{1 + D_T - D_f}{2 + D_T - D_f} \frac{\lambda_{pd}}{l} - 1 \right) \left(\frac{\lambda_{pd}}{\lambda_{\max}} \right)^{1+D_T-D_f} \right], \quad (24)$$

将 $\lambda_{pd} = l$ 代入式(24),多孔介质的有效扩散系数还可以表示为:

$$D_e = \frac{\pi ul}{12A} \frac{D_f}{1 + D_T - D_f} \frac{\lambda_{\max}^{1+D_T}}{L_0^{D_T-1}} \cdot \left[1 + \left(\frac{1 + D_T - D_f}{2 + D_T - D_f} - 1 \right) \left(\frac{l}{\lambda_{\max}} \right)^{1+D_T-D_f} \right]. \quad (25)$$

4 结果和讨论

根据上述有效渗透率和有效扩散系数的解析表达式,利用多孔介质的孔隙结构参数可以预测多孔介质的气体有效渗透率和有效扩散系数.但是,需要首先验证多孔介质的孔隙结构是否满足分形标度律(式(1)),并确定分形上下限.不仅如此,本文给出的解析结果适用于多种运输机制共存的情况,见式(16)和式(25).为了讨论分形维数对于多孔介质有效运输参数的定量影响,取参数如下: $\lambda_{\min} = 1 \times 10^{-9}$ m, $\lambda_{\max} = 1 \times 10^{-3}$ m, $L_0 = 0.1$ m, $A = 0.01$ m², 氢气分子的平均自由程和平均速率分别为 $l = 2.1 \times 10^{-7}$ m 和 $u = 1.7 \times 10^3$ m/s.此时多孔介质的努森数范围为 $[2.1 \times 10^{-4}, 2.1 \times 10^2]$,多种运输机制共存,分别采用式(16)和式(25)计算多孔介质的有效渗透率和有效扩散系数.

图 2 和图 3 分别显示了孔隙尺寸分布分形维数和迂曲度分形维数对于有效渗透率和有效扩散系数的定量影响.如图 2 所示,多孔介质的有效渗透率随着孔隙尺寸分布分形维数的增加而增加,这是由于分形维数的增加意味着孔隙的增加,从而导致渗透率上升.但是,随着迂曲度分形维数的增加,毛细管弯曲程度(迂曲度)增加,从而导致流动阻力增加,因此,有效渗透率逐渐减小.如图 3 所示,分形维数对于有效扩散系数同样具有显著的影响,随着孔隙尺寸分布分形维数的增加,有效扩散系数呈指数形式快速增长.而扩散迂曲度通常大于水利学迂曲度,因此,迂曲度分形维数的增加可以快速降低有效扩散系数.需要指出的是,上述分析重点研究了多孔介质的孔隙结构对于有效运输参数的影响,而气体属性

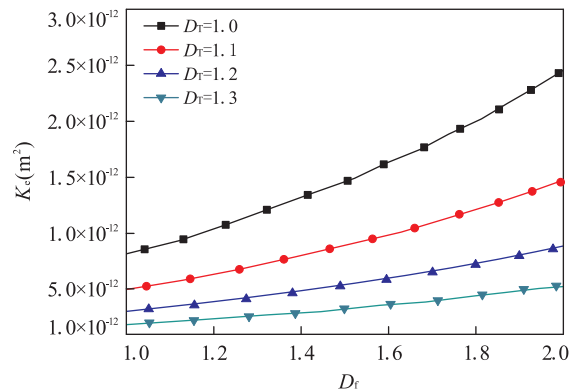


图 2 多孔介质有效渗透率和分形维数的定量关系

Fig. 2 The relationship between effective gas permeability and fractal dimensions

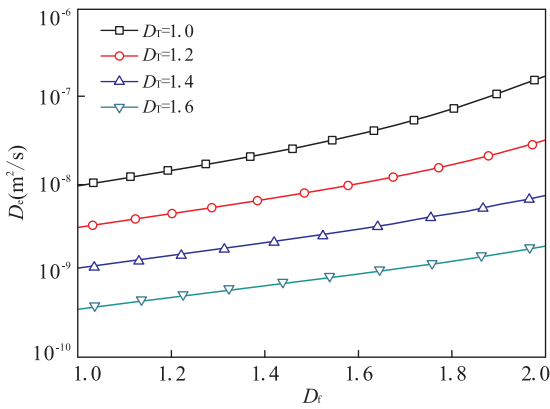


图 3 分形维数对于有效扩散系数的定量影响

Fig.3 The effect of fractal dimensions on the effective gas diffusion coefficient

以及气体分子平均自由程和孔隙尺寸的相对大小(努森数)同样对于气体输运具有非常显著的影响。

5 结论

本文根据多尺度多孔介质的分形标度特征,建立了稳态气体输运的微观模型,在孔隙尺度上研究了气体的渗流和扩散机理.本文给出了不同努森数范围的有效渗透率和有效扩散系数的解析表达式.结果表明,多尺度的气体输运参数不仅依赖于多孔介质的孔隙结构特征,还取决于气体的属性.进一步的计算表明,孔隙尺度分布分形维数的增加导致孔隙率的增加,进而可以提高有效渗透率和有效扩散系数;而迂曲度分形维数的增加导致流动/扩散阻力增加,从而会降低有效渗透率和有效扩散系数.本文的理论模型不含有经验常数,每一个参数均有明确的物理意义,因此对于理解多尺度多孔介质的气体输运机理以及非常规油气资源开发等具有重要的理论意义.需要指出的是,多尺度的分叉裂缝系统对于多孔介质中的气体输运特性具有重要的影响.另外,气体吸附解吸、启动压力梯度也是页岩气等非常天然气的重要机制。

References

Beskok, A., Karniadakis, G. E., 1999. Report: A Model for Flows in Channels, Pipes, and Ducts at Micro and Nano Scales. *Microscale Thermophysical Engineering*, 3(1): 43–77. doi:10.1080/108939599199864

Civan, F., 2001. Scale Effect on Porosity and Permeability: Kinetics, Model and Correlation. *AIChE Journal*, 47(2): 271–287. doi:10.1002/aic.690470206

Cussler, E. L., 2009. *Diffusion Mass Transfer in Fluid Systems* (3rd Ed.). Cambridge University Press, New York.

Fang, Y., Xie, S. Y., He, Z. L., et al., 2016. Thin Section-Based Geochemical Dissolution Experiments of Ooid Carbonates. *Earth Science*, 41(5): 779–791 (in Chinese with English abstract).

Guo, Y. C., Song, Y., Pang, X. Q., et al., 2016. Characteristics and Genetic Mechanism of Near-Source Accumulated Accumulation for Continuous-Type Tight-Sand Gas. *Earth Science*, 41(3): 433–440 (in Chinese with English abstract).

Ismail, M. S., Ingham, D. B., Hughes, K. J., et al., 2015. Effective Diffusivity of Polymer Electrolyte Fuel Cell Gas Diffusion Layers: An Overview and Numerical Study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(34): 10994–11010. doi:10.1016/j.ijhydene.2015.06.073

Javadpour, F., Fisher, D., Unsworth, M., 2007. Nanoscale Gas Flow in Shale Gas Sediments. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 46(10): 55–61. doi:10.2118/07–10–06

Karniadakis, G. E., Beskok, A., 2002. *Micro-Flows, Fundamentals and Simulation*. Springer-Verlag, New York.

Katz, A. J., Thompson, A. H., 1985. Fractal Sandstone Pores: Implications for Conductivity and Pore Formation. *Physical Review Letters*, 54(12): 1325–1328. doi:10.1103/PhysRevLett.54.1325

Li, C. H., Xu, P., Qiu, S. X., et al., 2016a. The Gas Effective Permeability of Porous Media with Klinkenberg Effect. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34: 534–540. doi:10.1016/j.jngse.2016.07.017

Li, D. L., Zha, W. S., Liu, S. F., et al., 2016b. Pressure Transient Analysis of Low Permeability Reservoir with Pseudo Threshold Pressure Gradient. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 147: 308–316. doi:10.1016/j.petrol.2016.05.036

Li, D. L., Zhang, L. J., Wang, J. Y. L., et al., 2016c. Composition-Transient Analysis in Shale-Gas Reservoirs with Consideration of Multicomponent Adsorption. *SPE Journal*, 21(2): 648–664. doi:10.2118/178435–PA

Lo, S. K., Tseng, C. J., Tsai, L. D., et al., 2011. Fractal Permeability Models for the Microporous Layer and Gas Diffusion Layer of PEM Fuel Cell. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 34(1): 39–47. doi:10.1080/02533839.2011.552964

Martínez, L., Florido-Díaz, F. J., Hernández, A., et al., 2002. Characterisation of Three Hydrophobic Porous Membranes Used in Membrane Distillation-Modelling and Evaluation of Their Water Vapour Permeabilities. *Jour-*

- nal of Membrane Science*, 203(1-2): 15-27. doi: 10.1016/S0376-7388(01)00719-0
- Perfect, E., Kay, B. D., 1955. Applications of Fractals in Soil and Tillage Research; A Review. *Soil & Tillage Research*, 36(1-2): 1-20. doi: 10.1016/0167-1987(96)81397-3
- Shou, D. H., Fan, J. T., Mei, M. F., et al., 2014. An Analytical Model for Gas Diffusion through Nanoscale and Microscale Fibrous Media. *Microfluidics and Nanofluidics*, 16(1-2): 381-389. doi: 10.1007/s10404-013-1215-8
- Welty, J. R., Wicks, C. E., Wilson, R. E., et al., 2008. Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer (5th Ed.). John Wiley & Sons, New York.
- Wu, R., Liao, Q., Zhu, X., et al., 2011. A Fractal Model for Determining Oxygen Effective Diffusivity of Gas Diffusion Layer under the Dry and Wet Conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(19-20): 4341-4348. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.05.010
- Xu, P., 2015. A Discussion on Fractal Models for Transport Physics of Porous Media. *Fractals*, 23(3): 1530001. doi: 10.1142/S0218348X15300019
- Yu, B., 2008. Analysis of Flow in Fractal Porous Media. *Applied Mechanics Reviews*, 61(5): 050801. doi: 10.1115/1.2955849
- Yu, B. M., Cheng, P., 2002. A Fractal Permeability Model for Bi-Dispersed Porous Media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(14): 2983-2993. doi: 10.1016/S0017-9310(02)00014-5
- Zhang, L. Z., 2008. A Fractal Model for Gas Permeation through Porous Membranes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(21-22): 5288-5295. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.03.008
- Zheng, Q., Yu, B. M., Wang, S. F., et al., 2012. A Diffusivity Model for Gas Diffusion through Fractal Porous Media. *Chemical Engineering Science*, 68(1): 650-655. doi: 10.1016/j.ces.2011.10.031

附中文参考文献

- 方晷, 谢淑云, 何治亮, 等, 2016. 基于岩石薄片的鲕粒碳酸盐岩地球化学溶蚀. *地球科学*, 41(5): 779-791.
- 郭迎春, 宋岩, 庞雄奇, 等, 2016. 连续型致密砂岩气近源累计聚集的特征及成因机制. *地球科学*, 41(3): 433-440.