第 33 卷第 5 期	地 质 与 资 源		Vol. 33 No. 5
2024 年 10 月	GEOLOGY AND RESOURCE	ES	Oct. 2024
文章编号:1671-1947(2024)05-0671-09 DOI:10.13686/j.enki.dzyzy.2024.05.007	中图分类号:P618.13 文献标志码:A	开放科学标志码(OSID):	

页岩纳米孔隙中滑脱效应及克努森扩散实验研究

孙艳玲,高 博,佟智强,王建伟,谷马军,王 振,刘启明

中国地质调查局 牡丹江自然资源综合调查中心,黑龙江 牡丹江 1570021

摘 要:页岩纳米孔隙中除达西流外,滑脱效应及克努森扩散也是页岩气的主要流动方式.查明其特征、变化趋势及影响因子对页 岩气开采开发十分必要.本研究选取柴达木盆地东部石炭系5块页岩样品,测得 TOC、R。、孔径及矿物成分等物理化学性质.根据 达西原理设计实验,结合质量通量模型和表观渗透率公式,得到达西流、滑脱效应及克努森扩散的渗透率贡献值、分配系数及质量 通量随压力变化的趋势,分析物理化学性质影响.结果表明:滑脱效应的渗透率贡献值在压力较小时比例最大,后逐渐变小,质量 通量变化不大;克努森扩散所占比例小,随着压力升高而下降;达西流产生的渗透率贡献值不变,所占比例及质量通量上升.TOC、 R。对真实地层中页岩气流动影响较大,矿物含量及孔径对渗流有直接影响.

关键词:达西流;滑脱效应;克努森扩散;质量通量;表观渗透率;页岩气

EXPERIMENTAL STUDY OF SLIPPAGE EFFECTS AND KNUDSEN DIFFUSION IN SHALE NANOPORES

SUN Yan-ling, GAO Bo, TONG Zhi-qiang, WANG Jian-wei, GU Ma-jun, WANG Zhen, LIU Qi-ming Mudanjiang Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Mudanjiang 157021, Heilongjiang Province, China

Abstract: In addition to Darcy flow, slippage effect and Knudsen diffusion are also the main flow modes of shale gas in nanopores. It is necessary to find out their characteristics, changing trend and influencing factors for shale gas exploitation. In this study, five Carboniferous shale samples are collected from the eastern Qaidam Basin to test the physical and chemical properties such as TOC, R_o , pore size and mineral compositions. The experiment is designed on the basis of Darcy principle. Combined with mass flux model and apparent permeability formula, the permeability contribution values, distribution coefficients and the trend of mass flux with pressure of Darcy flow, slippage effect and Knudsen diffusion are obtained to analyze the effects of such physicochemical properties. The results show that the permeability contribution value of slippage effect is the largest when the pressure is small, and then gradually decreases, with a little change in mass flux. The proportion of Knudsen diffusion is small and decreases with the increase of pressure. The permeability contribution value of Darcy flow remains unchanged, while the proportion and mass flux increase. The TOC and R_o have great effect on shale gas flow in real formation, and mineral content and pore size have direct influence on seepage.

Key words: Darcy flow; slippage effect; Knudsen diffusion; mass flux; apparent permeability; shale gas

收稿日期:2023-02-08;修回日期:2023-08-14.编辑:张哲.

基金项目:国家自然科学基金项目"连锁破坏性关键块体的确定方法"(41272387).

作者简介:孙艳玲(1990—),女,硕士,工程师,主要从事水工环地质调查工作,通信地址 黑龙江省牡丹江市东安区卧龙街 45 号,E-mail//1049845147 @qq.com

通信作者:高博(1991—),男,工程师,主要从事水文地质、工程地质、环境地质调查工作,通信地址 黑龙江省牡丹江市东安区卧龙街 45 号,E-mail// 845916835@qq.com

0 引言

随着我国能源安全新战略的持续推进,天然气等 清洁能源的需求量也日益增加. 页岩气作为一种非常 规天然气,主要赋存于以富有机质页岩为主的储集岩 系中. Javadpour 等^[1]对页岩样品进行实验分析,表明 页岩中孔隙形态各异,结构不规则,孔径为纳米级,导 致页岩气具有低渗透性,不能用常规的渗流模型计算. 国内外提出许多低渗模型, Beskok 等^[2]提出当气体在 微孔介质中流动时会出现滑脱现象,并建立滑脱模型; Javadpour 等^[3-4]提出扩散对渗流的影响,测试了页岩 储层中气体的平均自由程和克努森数,还提出了页岩 具有表观渗透率,并且对表观渗透率与达西渗透率的 影响因素进行了研究;杨泽皓等55建立了页岩一维流 动的非线性渗流数学模型及求解方法,研究了页岩中 气体的渗流特征和规律.系列研究表明,页岩中存在 连续流、滑脱效应及克努森扩散3种流动状态,但均未 对3种流动状态在不同压力下,对表观渗透率贡献值 的变化做详细研究.

柴达木盆地是中国主要的含油气盆地之一^[6],调 查表明,该盆地东部石炭系层序齐全.李军亮等^[7]根 据石炭系露头、钻井等资料,证实盆地石炭系泥页岩为 海相沉积烃源岩,具备良好的生烃潜力和勘探前景. 然而针对该地区页岩储层的渗流特征研究尚处于起步 阶段,因此开展页岩气的低渗机理研究,对本区页岩气 的勘探及开采是有意义的.

为研究储层特征,在柴达木盆地东部三湖拗陷区, 选取石浅1井及ZK1-1井石炭系克鲁克组不同深度 的5块页岩样品,编号分别为s16、s23、s27、s39、s49. 通过测试得到样品的TOC、R。、孔径及矿物成分等物理 化学性质.利用连续流、滑脱效应及克努森扩散的质 量通量,建立整体的质量通量模型和表观渗透率公式. 设计实验,使用室温(25℃)条件下干燥的甲烷气体, 测得不同压力作用下的气测渗透率,研究表观渗透率 与压强之间的相互关系.利用公式拟合关系,进一步 确定3种流态的渗透率贡献值、分配系数以及质量通 量随压力变化的情况.最后结合前期测得的物理化学 性质,分析物理化学性质对渗透率的影响.

1 建立质量通量模型

在纳米孔隙中可用克努森值(Kn)来划分不同的

流态,表现为随着 Kn 值的升高,气体流动状态逐渐从 连续流转为滑脱流,最终转为分子间扩散^[8].此外,通 过研究表明, Kn 受孔径及分子自由程控制,与孔径 负相关,与分子自由程呈正相关关系.由于页岩中孔 隙不规则,不同孔隙内 Kn 不相同,因此气体的流动 方式不相同.对于相同的流动气体,在同一压力下的 分子自由程是固定的,而当压力升高时,分子自由程 会随之减少,Kn 值随之减少,导致气体流动状态发生 变化^[9].

把纳米孔中气体的流动状态分解为连续流、滑脱 流及分子间扩散3部分.因此,纳米孔中气体流动的 总质量通量由以上3部分的质量通量组成^[10].

J=J_a+J_h+J_k (1) 式中:J为纳米孔中总质量通量,kg/s;J_a为连续流质 量通量,kg/s;J_h为滑脱流质量通量,kg/s;J_k为扩散 质量通量,kg/s.

1.1 连续流质量通量

连续流发生于孔径较大处,页岩中主要为井筒附 近以及微裂隙中^[11].连续流的气体流动速度可用常规 的达西方程表示.

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{K}}{\mu} \nabla \mathbf{p} \tag{2}$$

式中: v 为流速, m/s; K 为渗透率, m²; μ 为流体黏度, Pa·s; ∇p 为压力梯度, Pa/m.

因此,连续流质量通量公式为:

$$\mathbf{J}_{a} = \rho \frac{\mathbf{K}}{\mu} \nabla \mathbf{p} \tag{3}$$

式中: J_a 为达西流质量流量, kg/s; ρ 为气体密度, kg/m³.

代入气体密度 $\rho = \frac{M}{V} = \frac{Mp}{ZRT}$,则可将连续流的质量 通量公式转化为:

$$\mathbf{J}_{a} = \frac{\mathbf{M}\mathbf{p}}{\mathbf{Z}\mathbf{R}\mathbf{T}}\frac{\mathbf{K}}{\boldsymbol{\mu}}\nabla p \tag{4}$$

式中: *M* 为气体摩尔质量, kg/mol; *p* 为压力, Pa; *Z*为 压缩因子; *R* 为气体常数, J/(mol·K); *T* 为绝对温度, K.

1.2 滑脱流质量通量

Klinkenberg^[12]实验证实滑脱效应的存在,并解释 了在相同压力下气测渗透率大于液测渗透率的原因. 当页岩孔径变小时,克努森值增大,气体分子与孔壁因 碰撞作用,导致与介质边界速度不为零,存在滑脱效 应.滑脱流的质量通量表达式为:

$$\mathbf{J}_{\mathsf{h}} = F' \frac{\mathsf{K}\rho}{\mu} \nabla p \tag{5}$$

式中: F'为滑脱因子.

引入滑脱因子公式[13]:

$$F' = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \frac{\mu}{pr} \left(\frac{2}{a} - 1\right)$$
(6)

式中: r 为孔隙半径, nm; a 为角度调节系数,常数,数 值范围为 0~1.

由于滑脱因子与压强呈现负相关,可引入系数
$$b_k$$

 $b_k=F'p$ (7)

式中: b_k为修正的滑脱因子, MPa⁻¹.

将 *b*_k代入滑脱因子公式中,滑脱流质量通量可转 化为:

$$J_{h} = \frac{Mp}{ZRT} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \frac{\mu}{pr} \left(\frac{2}{a} - 1\right) \frac{K}{\mu} \nabla p$$
(8)

1.3 扩散流质量通量

孔径小于气体分子的平均自由程时,气体分子对 孔壁的碰撞较之气体分子间的碰撞要频繁得多,这种 扩散就称分子自由扩散,又可称为克努森扩散.克努 森扩散常发生在 Kn>10 时,此时的孔径很小^[14],其所 产生的质量通量可表示为:

$$J_{k}=MD_{k}\frac{\partial C}{\partial L}$$
(9)

式中: D_k 为气体扩散系数, m^3 s;C为气体浓度, mol/m^3 ; L为流动长度,m.

引用扩散系数^[15],其公式为:

$$\mathsf{D}_{\mathsf{k}} = \frac{2\mathsf{r}}{3} \sqrt{\frac{\mathsf{8RT}}{\pi\mathsf{M}}} \tag{10}$$

真实气体的浓度公式为 $C=\frac{\rho}{M}=\frac{p}{ZRT}$,代入浓度

公式,由此,扩散质量通量可转化为:

$$\mathbf{J}_{\mathsf{k}} = \frac{2\mathsf{r}}{3} \frac{\mathsf{M}}{\mathsf{Z}\mathsf{R}\mathsf{T}} \sqrt{\frac{\mathsf{8}\mathsf{R}\mathsf{T}}{\pi\mathsf{M}}} \nabla p \tag{11}$$

将上述的连续流、滑脱流及扩散流所产生的质量 通量求和,则总质量通量表达式可转化为:

$$J = \frac{Mp}{ZRT} \left[\frac{K}{\mu} + \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \frac{\mu}{pr} \left(\frac{2}{a} - 1 \right) \frac{K}{\mu} + \frac{2r}{3p} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \right] \nabla_p$$
(12)

根据达西流质量通量公式形式,引入了表观渗透 率概念,可将公式(12)简化为:

$$\mathsf{J} = \rho \frac{\mathsf{K}_{\mathsf{app}}}{\mu} \nabla p \tag{13}$$

式中: Kapp 为表观渗透率, mD.

综合上文提到的修正滑脱因子及扩散系数概念, 可得出表观渗诱率公式:

$$K_{app} = \mathbf{K} + (\mathbf{b}_{k}\mathbf{K} + \mu\mathbf{D}_{k})\frac{1}{p}$$
(14)

2 渗流特征实验

经上述过程我们建立了渗流质量通量模型,得出 了综合考虑达西流、滑脱流及扩散的表观渗透率 K_{app} . 从公式(14)看出,表观渗透率与压强倒数成正比,其中 扩散系数通过计算求得.测出不同压力下的实测气测 渗透率值,将气测渗透率与压强倒数的关系拟合,其截 距为达西渗透率,并根据斜率计算可得出滑脱因子和 扩散系数.式中压强采用的为平均压强 $p=\frac{p_1+p_2}{2}$.

2.1 实验过程

由于页岩的低渗性质,不能采用常规的实验装置 测试,本次实验采用稳态法测试岩石渗透率^[16].实验 装置如图1所示.

选取5块实验样品,样品取自柴达木盆地东部石炭系页岩,编号为S16、S23、S27、S39、S49.实验样品测试的基本信息如表1所示.

表 1 实验样品信息表 Table 1 Basic information of test samples

样品号	S16	S23	S27	S39	S49
深度/m	805.60	565.17	839	846.24	865.34
孔隙度/%	2.19	1.89	4.79	4.20	2.99
长度/cm	1.47	1.03	1.49	1.53	1.52
半径/cm	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25

实验过程主要是将烘干的岩样沿测定方向装入岩 心夹持器中,加比入口压力高2倍或5MPa以上环 压;在室温25℃下,将干燥的甲烷气体注入岩心,用压 力调节器调节甲烷入口压力;入口压力从最低压力开 始,由低到高测定5个压力点;在测每一点入口压力的 同时,用排水法测定对应的5个流量.由公式(14)求 出渗透系数及渗透率.

气测渗透率计算公式[17]:

$$K_{g} = 2p_{a}V\mu L \frac{10^{2}}{A(p_{1}^{2}-p_{2}^{2})}$$
(15)

式中: K_g 为气测渗透率, $10^3 \mu m^2$; p_a 为地面标准压力,



图 1 岩石渗透率实验装置图 Fig. 1 Experimental device of rock permeability

MPa; V 为气体流量, cm²/s; L 为样品长度, cm; A 为 样品横截面积, cm²; p₁ 为入口压力, MPa; p₂ 为出口 压力, MPa.

2.2 实验结果

根据实验结果得出曲线,如图 2.



图 2 渗透率实验结果

Fig. 2 Test result of permeability

根据实验结果, 拟合计算得出 $K \, \mu D_k \, D_k \, b_k$ 值. 结果如表 2.

2.3 流动状态分析

2.3.1 渗透率贡献值

综上所述,根据达西渗透率、滑脱系数及克努森扩 散系数的值,可计算出样品各流动状态对表观渗透率 的贡献值(如图 3).

表 2 实验计算结果表 Table 2 Test and calculation results of samples

样品号	S16	S23	S27	\$39	S49
K/µm²	2.76E-09	5.05E-09	8.26E-09	1.12E-08	5.68E-09
$\mu D_k / (\mu m^2 / MPa)$	2.39E-10	8.58E-11	1.50E-10	1.61E-10	8.17E-11
b _k /MPa ⁻¹	8.81	4.17	7.55	16.54	8.98

结果表明,渗透率贡献值中连续流和滑脱流占比 较高,扩散流占比低,达西渗透率不随压力变化,滑脱 效应及扩散对渗透率的贡献值随压力增加而变小.

2.3.2 三种流动状态分配系数

计算得出连续流、滑脱流及扩散流对应的渗透率 和表观渗透率之间比值,得到3种流动状态对表观渗 透率的贡献比例,即分配系数.分配系数随压力变化 曲线见图4.

如图 4 所示,随着压强的增加,达西流分配系数逐渐上升,而滑脱效应和扩散的分配系数则逐渐下降.

2.3.3 质量通量

总质量通量由达西流、滑脱效应及克努森扩散所 产生的质量通量组成^[18].各个样品质量通量随压力变 化趋势见图 5.

结果显示,达西流质量通量随压力上升而增加, 而扩散流及滑脱流所产生的质量通量随压力变化不 明显.





Fig. 3 Contribution values of Darcy flow, diffusion flow and slippage flow to apparent permeability
 1—达西渗透率(Darcy permeability); 2—克努森扩散渗透率(Knudsen diffusion permeability); 3—滑脱效应渗透率(slippage permeability); 4—表观渗 透率(apparent permeability)



图 4 样品达西流、扩散流及滑脱流对表观渗透率的贡献分配系数

Fig. 4 Contribution distribution coefficients of Darcy flow, diffusion flow and slippage flow to apparent permeability 1—达西流(Darcy flow); 2—扩散流(diffusion flow); 3—滑脱流(slippage flow)



图 5 样品达西流、扩散流及滑脱流对质量通量贡献值

Fig. 5 Contribution values of Darcy flow, diffusion flow and slippage flow to mass flux

1—达西流质量通量(mass flux of Darcy flow); 2—扩散流质量通量(mass flux of diffusion flow); 3—滑脱流质量通量(mass flux of slippage flow); 4— 总质量通量(total mass flux)

3 渗流影响因子讨论

页岩具有低渗透性,影响渗透率的因素较多,主要 包括页岩样品的孔径大小、孔隙连通性以及 TOC、镜 质体反射率等物理化学性质.

3.1 物理化学性质的影响

页岩的物理化学性质对页岩气运移有直接影响^[19].首先测定样品物理化学性质:本次研究有机碳含量使用 Leco 碳硫测定仪进行分析;沉积岩中镜质体 反射率采用 MPV-Sp 显微光度计进行测试;全岩组分 采用 D/max-rA 型 X 射线衍射仪进行分析.主要测得 的物理化学性质及矿物成分如表 3、4 所示.

图 6a、b 分别为镜质体反射率、TOC 对渗透率的 影响.镜质体反射率及 TOC 对渗透率无明显影响,但 对页岩气的含量有很大影响^[20],所以在实际页岩气开 采中,两者的影响不容忽视.图 6c 为黏土含量及石英 含量对页岩渗透率的影响,结果显示,页岩的渗透率随 着石英含量增加有升高的趋势,而随着黏土含量的增 加下降.原因主要是页岩岩性对孔径的大小、分布及 形状均有影响.如石英含量越多,岩样越脆,容易破 裂;同样,黏土含量越多,岩石越硬,则不容易破裂.

表 3 页岩样品的物理化学性质

Table 3 Physica	l and che	mical pro	operties o	of shale s	amples
样品号	S16	S23	S27	S39	S49
TOC/%	1.04	0.93	0.18	1.13	0.46
S/%	1.1	0.57	0.66	0.16	0.46
镜质体反射率/R。	1.44	2.03	1.97	1.46	1.89
干酪根类型	∏ 2	∐ 2	∏ 2	<u>∏</u> 1	∏ 2

表 4 页岩样品矿物成分测试结果

Table 4	Mineral	compositions	of	shale s	amples

样品号	S16	S23	S27	S39	S49
石英	38	46	64	87	84
白云石	2	<1	—	<1	—
方解石	16	<1	—	<1	—
菱铁矿	10	<1	—	—	<1
斜长石	3	—	—	—	—
黏土总量	31	51	36	11	15

含量单位:%.



图 6 页岩物理化学性质对表观渗透率的影响

Fig. 6 Effects of shale physicochemical properties on apparent permeability 1-镜质体反射率(vitrinite reflectance); 2-总有机碳(TOC); 3-黏土矿物(clay mineral); 4-石英(quartz)

3.2 孔径大小的影响

孔隙是气体在介质中运移的主要通道,介质孔隙 特征直接影响到气体的渗流特征. 孔隙特征主要包括 孔径大小、孔隙分布及连通性等. 本次样品孔径测量 采用压汞法及气体吸附法,其中,压汞用于测量大孔 隙,而氦气吸附法用于测量几纳米到几十纳米孔径比 较准确^[21].大孔径是页岩气运移的优先通道,但相同 孔隙率条件下,大孔径越多,反而会导致孔隙连通性越 差^[22].本次利用压汞法测得孔径大小及孔径总体积, 利用氦气吸附法再次测得样品孔径大小,求取平均值, 并利用公式计算得出各样品在 5 MPa 压力下的表观 渗透率值(如表5 所示).

表 5 5 MPa 下页岩表观渗透率及平均孔径 Table 5 Apparent permeability and average pore size of shale under the pressure of 5 MPa

样品号	S16	S23	S27	S39	S49
压汞法孔径总体积/ μm ³	2.93	15.74	0.256	0.058	0.05
压汞法孔径大小/nm	12.32	3.56	4.77	6.3	3.58
氮气吸附法孔径 大小/nm	4.73	1.7	2.97	3.2	1.62
孔径平均值/nm	8.525	2.63	3.87	4.75	2.6
表观渗透率/µm²	7.68E-09	9.28E-09	2.08E-08	4.83E-08	1.59E-08

根据计算结果,绘制孔隙半径和表观渗透率的相 互关系(如图 7).

如图 7 所示, S23、S27、S39、S49 的表观渗透率总体表现为随着孔隙半径的增加而上升,但是 S16 样品表现异常,分析其主要原因如下:S16 样品的孔径为



apparent permeability

8.525 nm,在5个样品中孔径最大,孔隙度仅为2.189%, 排第四位. 从样品的物理化学性质可以看出,S16 的方 解石、菱铁矿及黏土的含量较高. 方解石和菱铁矿是 较容易产生破裂的,所以S16 所测得的孔隙多数来自 方解石和菱铁矿晶间内孔,比较集中. 其他地区的孔 隙比较小且少,致使其孔隙连通率差,孔喉较小,渗透 能力弱. 此外,所测样品中孔径分布具有很多不确定 因素,导致了页岩渗流的复杂性. 如利用压汞及氮气 测量孔径的分布,不同孔径分布会产生一定的误差,且 气体运移多由孔喉的大小决定^[23].

4 结论

本文研究了页岩纳米孔隙的达西流、滑脱效应和 克努森扩散3种流动状态,得到了质量通量模型及表 观渗透率表达式.分析得到了3种流态的特征、变化 趋势,以及渗透率的影响因素.

针对柴达木盆地东部石炭系的5个样品,用实验 的方法测得不同压力下的气测渗透率值.得出纳米孔 中页岩气的渗流主要由达西流和滑脱流两部分组成, 达西流质量通量随压强增加而增加,滑脱流及扩散流 所产生的质量通量随压强变化小.

纳米孔中页岩气流动特征与岩石的物理化学性质 及孔径的分布、形态、大小有关.研究得出,随着石英 含量增加,渗透率值上升;随着黏土含量增加,渗透率 值变小.TOC、R。对真实地层中的页岩气开采影响较 大.页岩气的渗透率随着孔径的增加而增加,但同时 页岩孔隙的连通性和不确定性也会对页岩的渗透性产 生影响.

致谢:成文过程中,中国地质大学(北京)水资源与 环境学院于青春教授给予悉心指导,审稿专家和编辑 部老师对论文提出许多宝贵意见,在此一并致以诚挚 谢意!

参考文献(References):

- [1]Javadpour F, Farshi M M, Amrein M. Atomic-force microscopy: A new tool for gas-shale characterization[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2012, 51(4): 236–243.
- [2]Beskok A, Karniadakis G E. Report: A model for flows in channels, pipes, and ducts at micro and nano scales[J]. Microscale Thermophysical Engineering, 1999, 3(1): 43–77.
- [3]Javadpour F, Fisher D, Unsworth M. Nanoscale gas flow in shale gas sediments [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2007, 46 (10): 55-61.
- [4]Javadpour F. Nanopores and apparent permeability of gas flow in mudrocks (shales and siltstone) [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2009, 48(8): 16–21.
- [5]杨泽皓,宫厚健,李亚军,等.页岩中气体流动规律数值模拟研究
 [J].中国科技论文,2016,11(5):527-532.
 Yang Z H, Gong H J, Li Y J, et al. Numerical simulation study for gas transport in shale[J]. China Sciencepaper, 2016, 11(5): 527-532.
- [6]张欣, 刘吉余, 侯鹏飞. 中国页岩油的形成和分布理论综述[J]. 地质与资源, 2019, 28(2): 165-170.

Zhang X, Liu J Y, Hou P F. A review on the formation and distribution theories of the shale oil in China[J]. Geology and Resources, 2019, 28 (2): 165–170.

[7]李军亮,柳忠泉,肖永军,等.柴达木盆地东部地区石炭系泥页岩

生烃条件及选区[J]. 地质通报, 2016, 35(2/3): 312-320.

Li J L, Liu Z Q, Xiao Y J, et al. Shale gas formation conditions and potential area selection in Carboniferous strata in eastern Qaidam Basin [J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(2/3): 312–320.

- [8]Yue X A, Wei H G, Zhang L J, et al. Low pressure gas percolation characteristic in ultra-low permeability porous media[J]. Transport in Porous Media, 2010, 85(1): 333-345.
- [9]张晓. 致密气藏气体克努森扩散特征[J]. 非常规油气, 2019, 6(6): 80-82, 88.

Zhang X. Characteristics of Knudsen diffusion in tight gas reservoirs[J]. Unconventional Oil &Gas, 2019, 6(6): 80-82, 88.

[10]宋付权,刘禹,王常斌.微纳米尺度下页岩气的质量流量特征分析[J].水动力学研究与进展,2014,29(2):150-156.

Song F Q, Liu Y, Wang C B. Analysis of the mass flow rate characteristics of the shale gas in micro/nano scale [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2014, 29(2): 150–156.

- [11]Deng J, Zhu W Y, Ma Q. A new seepage model for shale gas reservoir and productivity analysis of fractured well[J]. Fuel, 2014, 124: 232-240.
- [12]Klinkenberg L J. The permeability of porous media to liquids and gases[J]. API Drilling and Production Practice, 1941 (2): 200-213.

[13]Brown G P, DiNardo A, Cheng G K, et al. The flow of gases in pipes

at low pressures [J]. Journal of Applied Physics, 1946, 17(10): 802-813.

- [14]Roy S, Raju R, Chuang H F, et al. Modeling gas flow through microchannels and nanopores[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(8): 4870-4879.
- [15]Wei M Q, Duan Y G, Fang Q T, et al. Mechanism model for shale gas transport considering diffusion, adsorption/desorption and Darcy flow[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(7): 1928– 1937.
- [16]徐德敏,黄润秋,邓英尔,等.低渗透软弱岩非达西渗流拟启动压力梯度试验研究[J].水文地质工程地质,2008,35(3):57-60.
 Xu D M, Huang R Q, Deng Y E, et al. Non-Darcy flow quasi-threshold pressure gradient experimental study for low permeability soft rock[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2008, 35(3): 57-60.
- [17]Civan F, Rai C S S, Sondergeld C H H. Determining shale permeability to gas by simultaneous analysis of various pressure tests [J]. SPE Journal, 2012, 17(3): 717–726.
- [18]唐德中,王永堂,黄志军.测定气体压缩因子的 Burnett 方法[J]. 中国科学技术大学学报,1986,16(3):295-301.
 Tang D Z, Wang Y T, Huang Z J. Determination of gas gompressibilities by the Buruett method[J]. Journal of China University of Science and Technology, 1986, 16(3):295-301.

[19]石蕾,宗文明,孙求实,等.泥页岩有机非均质性评价及其在烃源

Shi L, Zong W M, Sun Q S, et al. Shale organic heterogeneity evaluation method and its application in source rocks grading evaluation: A case study of Mesoproterozoic Jixianianin in Liaoxi Depression[J]. Geology and Resources, 2022, 31(3): 367–374.

- [20]Slatt R M, O'Brien N R. Pore types in the Barnett and Woodford gas shales: Contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2017–2030.
- [21]中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管 理委员会. GB/T 21650.1—2008 压汞法和气体吸附法测定固体材 料孔径分布和孔隙度 第1部分: 压汞法[S]. 北京:中国标准出版

社,2008.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 21650.1— 2008 Pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption-Part 1: Mercury porosimetry [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

- [22]Wang F P, Reed R M, John A, et al. Pore networks and fluid flow in gas shales[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, USA: OnePetro, 2009.
- [23]Zhu W Y, Yue M, Ma D X, et al. The micro-structure and seepage characteristics of shale reservoir [J]. Journal of Chemical and Pharmaceutical Research, 2014, 6(1): 312-315.

(上接第 643 页/Continued from Page 643)

- [20]黎彤. 中国陆壳及其沉积层和上陆壳的化学元素丰度[J]. 地球化学, 1994, 23(2): 140-145, doi: 10.19700/j.0379-1726.1994.02.005.
 Li T. Element abundances of China's continental crust and its sedimentary layer and upper continental crust[J]. Geochimica, 1994, 23(2): 140-145, doi: 10.19700/j.0379-1726.1994.02.005.
- [21]史长义,梁萌,冯斌.中国水系沉积物 39 种元素系列背景值[J]. 地球科学,2016,41(2):234-251.

Shi C Y, Liang M, Feng B. Average background values of 39 chemical elements in stream sediments of China[J]. Earth Science, 2016, 41 (2): 234–251.

[22]刘东盛,王学求,聂兰仕,等.中国钴地球化学异常特征、成因及 找矿远景区预测[J].地球科学,2022,47(8):2781-2794.
Liu D S, Wang X Q, Nie L S, et al. Cobalt geochemical anomalies characteristics and genesis in China and metallogenic prospecting areas prediction[J]. Earth Science, 2022, 47(8): 2781-2794. [23]江西省地质矿产勘查开发局.中国矿产地质志-江西卷(下册)[M]. 北京:地质出版社,2015:221-356.

Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development. Mineral geology of China: Jiangxi Province (volume 2) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2015: 221–356. (in Chinese)

[24]邹凤辉,许德如,王智琳,等.湘东北横洞钻矿矿床地质特征及成因机制探讨[C]//中国矿物岩石地球化学学会第15届学术年会论文摘要集(4)会议论文集.长春:中国矿物岩石地球化学学会,2015:95-96.

Zou F H, Xu D R, Wang Z L, et al. Geological characteristics and genetic mechanism of the Hengdong cobalt deposit in northeastern Hunan [C]//Proceedings of the 15th Annual Meeting of the Chinese Society for Mineralogy, Petrology and Geochemistry (4). Changchun: Chinese Society for Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015: 95–96. (in Chinese)