

深部储层岩石渗流的滑脱效应研究——以煤和砂岩为例

赵文杰¹, 赵洪宝^{1, 2, 3}, 荆士杰¹

(1. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 新能源开发与灾害防治研究中心, 北京, 100083;

3. 河北工程大学 矿业与测绘学院, 河北 邯郸 056000)

摘要: 深部高应力作用下致密储层岩石因其孔径与气体分子平均自由程相当, 会诱发气体的滑脱效应, 进而对瓦斯(煤层气)长期稳产产生重要影响。基于此, 开展深部高应力作用下煤和砂岩的氦气注入试验。研究结果表明: 在全抽采周期, 高应力煤体中氦气运移始终表现出显著的滑脱效应, 即使在高达 8 MPa 的储层压力下也不可避免, 砂岩渗流则基本上不受滑脱效应影响。相较于线性 Klinkenberg 方程和二次型 Klinkenberg 修正方程, 双滑移 Klinkenberg 方程更适用于深部高应力煤体的表观渗透率 k_a 修正, 进而得到煤体固有渗透率 k_∞ 与有效平均应力 σ_{vme} 之间满足线性关系, 这是由高应力状态下煤体内结构异质性减弱、均质性增强所致。均质性砂岩的渗流行为表现为线性力学响应特性, 证明了煤体滑脱效应修正的合理性。由于深部煤体 k_∞ 随 σ_{vme} 呈线性弱衰减规律, 导致应力型渗透率在应力加载作用下略有降低, 最终表现为滑脱效应随着 σ_{vme} 增加而减弱的反常现象。以双胡克定律为理论基础, 建立综合考虑高应力煤体裂隙开度呈线性变化和滑脱型渗透率呈指数衰减规律的渗透率模型, 并在不同边界条件下取得了良好的拟合效果。

关键词: 采矿工程; 滑脱效应; 线性响应; 双滑移 Klinkenberg 方程; 渗透率模型

中图分类号: TD 712

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2024)09 - 2189 - 12

Research on the slippage effect of deep reservoir rock seepage: A case study of coal and sandstone

ZHAO Wenjie¹, ZHAO Hongbao^{1, 2, 3}, JING Shijie¹

(1. School of Energy and Mining, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2. New Energy Development and Disaster Prevention Research Center, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 3. Mining and Surveying College, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056000, China)

Abstract: The pore size of tight reservoir rock subjected to deep high stresses approximates the average free path of gas molecules, leading to occurrence of gas slippage. This phenomenon can exert a significant impact on the sustained and stable production of gas(or coalbed methane) over the long term. The helium injection experiments on coal and sandstone under deep high stresses were investigated. The results demonstrate that helium migration exhibits a significant slippage effect throughout the entire extraction cycle within a high-stress coal, even under

收稿日期: 2023 - 12 - 29; **修回日期:** 2024 - 03 - 24

基金项目: 河北省自然科学基金项目(E2020402036)

Supported by the Hebei Provincial Natural Science Foundation(Grant No. E2020402036)

作者简介: 赵文杰(1986 -), 男, 2008 年毕业于西安工程大学环境科学专业, 现任工程师, 主要从事煤矿安全生产方面的研究工作。E-mail: wo287541781@126.com。通讯作者: 赵洪宝(1980 -), 男, 博士, 现任教授。E-mail: hongbaozhao@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2023.1252

reservoir pressures reaching up to 8 MPa. Under identical conditions, the seepage of sandstone typically remains unaffected by the slippage effect. When correcting the apparent permeability(k_a) of coal under deep high stresses, the double-slip Klinkenberg equation provides more accurate results compared to the linear Klinkenberg equation and the quadratic Klinkenberg correction equation. Furthermore, the linear relationship has been established between the inherent permeability(k_∞) of coal and the effective average stress(σ_{vme}), which is caused by the weakened heterogeneity and the enhanced homogeneity within the internal structure of coal subjected to high stresses. The seepage behavior of homogeneous sandstone exhibits a linear mechanical response, validating the rationality of correcting the coal slippage effect. As the inherent permeability of deep coal k_∞ decreases linearly with σ_{vme} , the stress-induced permeability exhibits a slight decline under stress loading, ultimately resulting in a decrease in the slippage effect as σ_{vme} increases. Based on the principles of double Hooke's law, a permeability model was established. The model comprehensively considered the linear law of coal fracture opening under high stress and the exponential attenuation law of slippage permeability, resulting in excellent fitting outcomes across diverse boundary conditions.

Key words: mining engineering; slippage effect; linear response; double-slip Klinkenberg equation; permeability model

1 引言

在长时间产气过程中,随着孔隙压力衰竭,在“解吸增渗”和“滑脱增渗”作用下,煤岩储层渗透率回升,这有助于深部瓦斯抽采(或煤层气开发,见图 1)^[1-4]。在千米级深部致密煤储层中,游离瓦斯含量很丰富^[2]。煤体在高应力作用下渗流孔径尺寸与气体分子自由程相当,游离瓦斯在排采过程中可能出现滑脱效应。

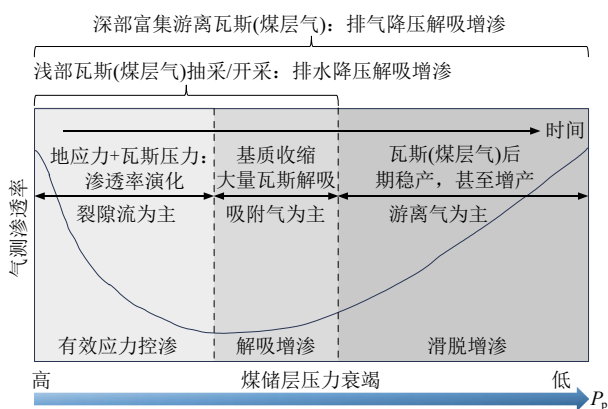


图 1 深部瓦斯(煤层气)渗流规律及工程启示^[1-2]

Fig.1 Deep gas(or coalbed methane) seepage law and engineering enlightenment^[1-2]

众多学者对储层岩石滑脱效应进行了研究。K. Yang 等^[4]得出低孔隙压力时气体的滑移效应更为明显。张保勇等^[5]研究了低围压($\sigma_3=7$ MPa)和低瓦斯压力(入口压力范围为 1.25~3.25 MPa)下,含水合物

煤体滑脱效应对渗流特性的影响,得出滑脱效应影响率(滑脱效应引起的渗透率与表观渗透率之比)随孔隙压力增加呈指数衰减。Z. Xiao 等^[1]研究了较低围压约束和高孔隙压力($P_p \approx 10$ MPa)内的煤岩滑脱效应,认为较窄的初始孔径和较高的有效应力,均增加了滑脱效应主导渗透率转化为应力主导型渗透率的临界孔隙压力。东 振等^[3]认为基质孔隙和割理显著影响着煤的滑脱效应,且孔隙压力越低,滑脱效应对表观渗透率的贡献越大。C. Liu 等^[6]认为深部高应力作用下,煤储层压力越低,滑脱效应越明显。王 军等^[7]开展了高应力状态下低孔隙压力页岩的滑脱效应研究,得出相较于孔隙压力降低,有效应力的增加对滑脱效应的强化作用甚微。李 伟等^[8]得出滑脱效应在瓦斯开采初期、中期和后期对抽采量的贡献程度分别呈快速增大、缓慢下降和缓慢增加趋势。段淑蕾等^[9]得出滑脱因子与煤岩裂隙通道的闭合程度呈正相关。通常情况下,裂隙闭合程度与平均应力大小密切相关。

对致密砂岩滑脱效应的研究也同样集中在浅部应力范畴内^[10-11]。对于滑脱效应的修正,最常见的是线性 Klinkenberg 方程,即在表观渗透率(k_a) - 平均孔隙压力倒数($1/P_{pm}$)坐标空间内进行线性拟合。然而,一些表观渗透率试验结果偏离了直线预测^[12-14]。合理选择修正准则,对揭示固有渗透率的真实应力响应(如线性关系、指数或幂律关系^[11, 6])至关重要。

综上所述,相关研究主要集中在低围压储层岩

石中较低孔隙压力下气体滑脱效应研究。随着埋深增加,储层岩石愈发致密,其滑脱效应更加明显^[15]。因此,有必要研究深部高应力储层岩石中高压气体运移引起的滑脱效应对渗流的影响以及基于试验事实的滑脱效应修正。基于此,本文以原煤和砂岩试件作为研究对象,依托真三轴流-固耦合试验平台,开展高地应力和高孔隙压力环境下原煤和砂岩的渗流试验,通过二者渗流行为差异对比,以期揭示滑脱效应对深部煤层气安全高效开发的重要意义。

2 试验装置与方案

2.1 试验装置

试验平台为重庆大学自主研发的多功能真三轴流-固耦合试验系统,如图 2 所示。该系统压力室内 6 个加载板可独立控制。以 100 mm 立方体受力试样为例,有 2 个方向(X 和 Y 向)可提供最大 600 MPa 的应力,另一个方向(Z 向)可提供最大 400 MPa 的应力,还可提供最大 60 MPa 的流体压力。加载模式有“力控制”、“位移控制”、“追踪位移”等多种模式,可以实现复杂应力路径下煤岩流-固耦合特性的多物理场真三轴试验研究,具体功能与参数配置见尹光志等^[16]。

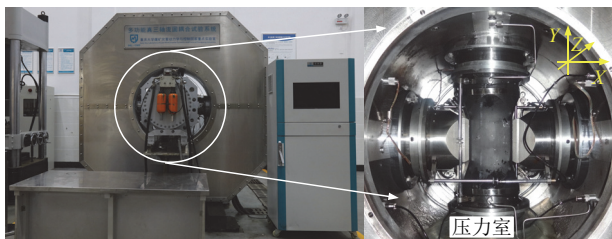


图 2 多功能真三轴流固-耦合试验系统
Fig.2 Multi-functional true triaxial fluid-solid coupling experiment system

2.2 试样准备

试验所用煤样取自某煤矿 2461 工作面,现场采取原煤大块,用保鲜膜包裹防止风化;所用砂岩块取自重庆市长江南岸东面茶园新区露头处,该砂岩均质性良好,离散性小,呈灰白色。煤和砂岩块运至实验室后,经过钻取、切割、打磨、倒角、烘干等工序,形成 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试样。试样误差标准满足相对端面间不平行度差值小于 0.02 mm。加工成型的原煤和砂岩试样如图 3 所示,基本力学参数如表 1 所示。

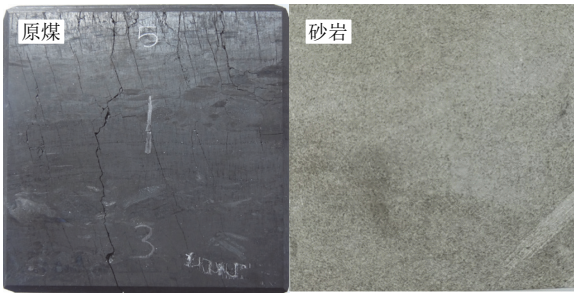


图 3 立方体原煤和砂岩试样
Fig.3 Cubic coal and sandstone samples

表 1 基本力学参数
Table 1 Basic mechanical parameters

试样种类	UCS/MPa	σ_1 /MPa	E/GPa	φ /%
原煤	25.82	2.06	3.29	5.38
砂岩	78.09	6.86	12.4	4.7

注: UCS, σ_1 , E 和 φ 分别为单轴抗压强度、巴西劈裂强度、弹性模量和孔隙率。

2.3 试验方案

本文聚焦于深部储层岩石滑脱效应对渗流特性的影响,我国千米深井地应力类型主要表现为 σ_{ver} (垂直应力) $>\sigma_{\text{H}}$ (水平最大主应力) $>\sigma_{\text{h}}$ (水平最小主应力),以 1 800 m 采深为例, $\sigma_{\text{ver}} \approx 48.6$ MPa, $\sigma_{\text{H}} \approx 41.97$ MPa, $\sigma_{\text{h}} \approx 22.29$ MPa^[17]。为厘清原煤和砂岩在高应力状态下渗流的滑脱效应与有效应力的响应特性,试验采用吸附性较弱的氦气(He)作为注入流体,不考虑气体的吸附/解吸对渗流的影响^[18]。基于上述背景,展开试验,具体试验步骤如下:

- (1) 为消除试样内部存在的柔软裂隙、孔隙、空洞等天然缺陷对渗透率结果的影响,在测试既定应力路径下的原煤和砂岩渗透率前,对试样进行预加载处理,以静水压力加载的方式加载至 60 MPa(超过渗透率测试过程中所设计的应力最大值),循环次数为 3 次。
- (2) 将三向主应力以 0.05 MPa/s 的速率同时加载至 20 MPa 静水压力,然后固定 $\sigma_3 = 20$ MPa,继续加载 σ_1 和 σ_2 至 30 MPa,保持 $\sigma_2 = 30$ MPa 和 $\sigma_3 = 20$ MPa 不变,继续加载 σ_1 至 40 MPa。待位移传感器示数稳定后,通入 2 MPa 的 He,待流量稳定后继续通入 4, 6 和 8 MPa 的 He(砂岩氦气注入压力为 4, 6, 8 和 10 MPa)。同样待流量稳定后记录数据并进行下一步加卸载。
- (3) 保持 $\sigma_2 = 30$ MPa 和 $\sigma_3 = 20$ MPa 不变, σ_1 以 0.05 MPa/s 的速率加载至 42, 44, 46, 48 和 50 MPa,每个应力点依次注入 2, 4, 6 和 8 MPa 的 He,待流

量稳定后进行下一步加卸载。

(4) 保持 $\sigma_3 = 20$ MPa 和 $\sigma_1 = 50$ MPa 不变, σ_2 以 0.05 MPa/s 的速率由 30 MPa 分别加载至 32, 34, 36, 38, 40 MPa。流体注入方式如上所述。

(5) 保持 $\sigma_2 = 40$ MPa 和 $\sigma_1 = 50$ MPa 不变, σ_3 以 0.05 MPa/s 的速率由 20 MPa 分别加载至 22, 24, 26, 28, 30 MPa。流体注入方式如上所述。

(6) 试验结束。试验应力路径如图 4 所示。后续研究中体应力、平均(体)应力和有效平均(体)应力分别记为 σ_v ($\sigma_v = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$), σ_{vm} ($\sigma_{vm} = \sigma_v / 3$) 和 σ_{vme} ($\sigma_{vme} = \sigma_{vm} - P_{pm}$); P_{pm} ($P_{pm} = (P_1 + P_2) / 2$) 为平均孔隙压力, 其中, P_1 为进口处氦气压力(MPa), P_2 为出口处氦气压力, 取 0.1 MPa。

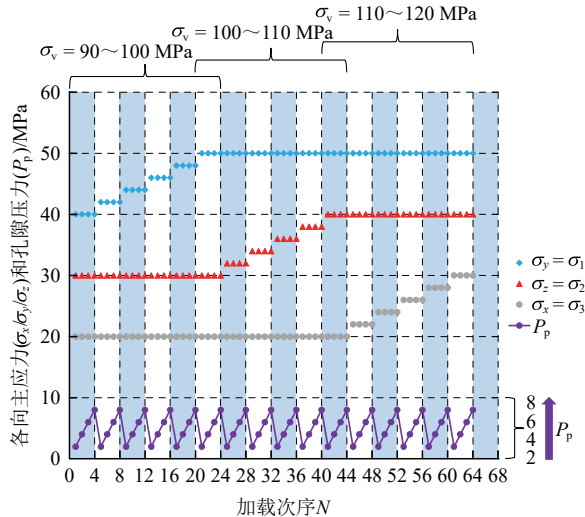


图 4 试验应力路径
Fig.4 Experimental stress paths

3 试验结果

3.1 原煤和砂岩渗流特性

试验中, He 在原煤和砂岩试样内流量(q)与气体压力梯度($G_{He} = (P_1^2 - P_2^2) / L$)的关系如图 5 所示。可知, q 与 G_{He} 之间线性关系良好(见表 2), 符合稳态流动特性, 渗透率计算可由达西定律给出, 其表达式^[6]为

$$k_a = \frac{2q\mu LP_2}{A(P_1^2 - P_2^2)}$$

(1)

式中: k_a 为气测渗透率, 等于表观渗透率(m^2); q 为氦气的渗流速度(或流量)(m^3/s); μ 为氦气动力黏度系数(MPa · s); L 为煤样长度(m); A 为煤样横截面积(m^2)。

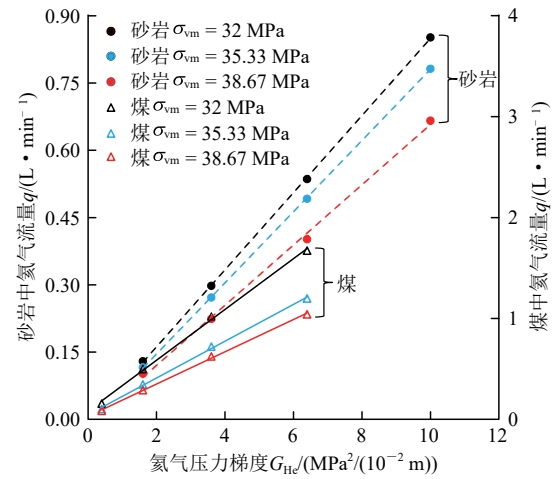


图 5 流量与氦气压力梯度的关系(取 $\sigma_{vm} = 32, 35.33$ 和 38.67 MPa)

Fig.5 Relationship between the flow rate and the pressure gradient of helium(taking $\sigma_{vm} = 32, 35.33$ and 38.67 MPa as an example)

表 2 流量与氦气压力梯度线性拟合

Table 2 Linear fitting of the flow rate to the pressure gradient of helium

试件	体应力 σ_v /MPa	拟合关系($q = a_1 G_{He} + b_1$)	相关系数 R^2
砂岩	96	$q = 0.086 G_{He} - 0.010 1$	0.999 9
	106	$q = 0.079 3 G_{He} - 0.012 6$	0.999 9
	116	$q = 0.067 1 G_{He} - 0.014$	0.998 1
原煤	96	$q = 0.251 6 G_{He} + 0.081 8$	0.998 2
	106	$q = 0.182 G_{He} + 0.045 8$	0.998 7
	116	$q = 0.159 5 G_{He} + 0.031 6$	0.998 9

由式(1)得到不同孔隙压力 P_p 下原煤和砂岩表观渗透率 k_a 随平均应力 σ_{vm} 的演化规律, 如图 6 所示。流 - 固耦合作用下, 二者表观渗透率变化呈以下特点:

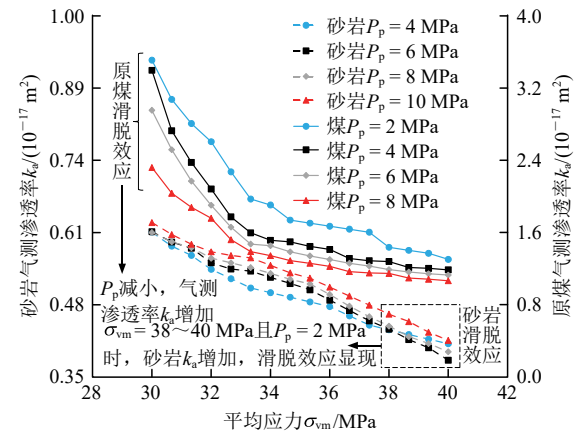


图 6 原煤和砂岩表观渗透率与平均应力的关系

Fig.6 Relationship between the apparent permeability and the mean stress of coal and sandstone

(1) 煤体表观渗透率 k_a 随孔隙压力 P_p 的增加而减小, 即使在较高气体压力(试验中 $P_p = 8$ MPa, 与大宁—吉县区块埋深 1 000~1 500 m 的中深部 8 号煤层的储层压力 7.64~7.66 MPa 接近^[2])下, 煤体仍旧表现出显著的滑脱效应, 可能意味着对千米级深部煤储层/高瓦斯突出煤层进行瓦斯抽采产量全周期预测时, 应着重考虑滑脱效应的影响, 而不仅限于低压力瓦斯抽采后期, 这也是笔者的研究重点。滑脱效应影响下, 煤体表观渗透率 k_a 随着有效平均应力 σ_{vme} 的增加而增加(见图 7)。

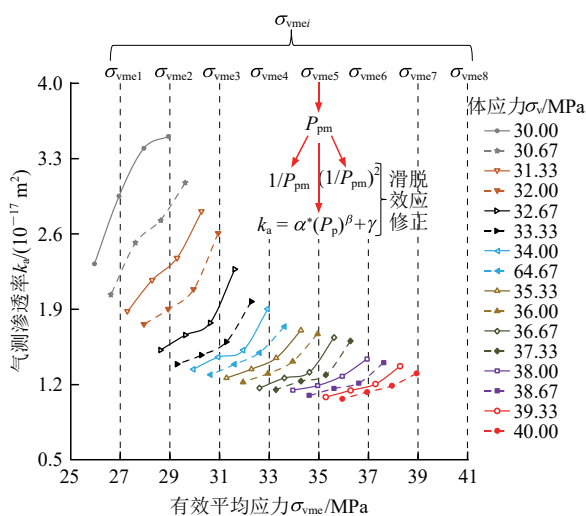


图 7 原煤表观渗透率与有效平均应力的关系

Fig.7 Relationship between the apparent permeability and the effective mean stress of coal

(2) 砂岩表观渗透率 k_a 随孔隙压力 P_p 的增加基本呈增加趋势, 在设计应力路径下, 对深部砂岩储层深度而言, 致密砂岩气的滑脱效应可忽略。随着平均应力 σ_{vm} 的增加, 砂岩在较低孔隙压力下仍会出现滑脱效应, 渗流控制机制出现了转变, 在超深储层环境下, 滑脱效应显现应予以重视。

(3) 固定孔隙压力 P_p 下, 原煤表观渗透率 k_a 随平均应力 σ_{vm} 的增加呈指数降低, 这一试验现象已得到广泛验证。然而, 砂岩表观渗透率 k_a 则随 σ_{vm} 增加大致呈线性降低, 这意味着原煤固有渗透率 k_∞ 在同一应力路径下也存在相似的线性衰减规律, 为下一步进行滑脱效应修正提供了参考依据。

(4) 本试验是在真三轴应力路径下开展的煤和砂岩渗流试验, 二者的表观渗透率变化并没有因各向主应力依次加载而导致突变或其他演化行为。因此, 在后续渗透率的应力响应研究中, 可用平均应

力 σ_{vm} 代替 σ_1 , σ_2 和 σ_3 。

3.2 原煤表观渗透率修正

原煤渗透率因纳米~微米尺度孔隙系统的存在而变得复杂。当气体流经煤体时, 可能会引起气体的滑脱效应^[19]。随着孔隙压力 P_p 的减小, 气体分子的平均自由程 λ 接近煤结构的孔隙尺寸(或特征长度), 气体的滑脱效应增强, 增加了表观渗透率 k_a , 这有利于煤层气增产。针对 k_a 在低孔隙压力下的回升现象, 相关学者提出了以下常见含气储层岩石固有渗透率的修正方程: (1) 经典的线性 Klinkenberg 方程; (2) 为解决表观渗透率 k_a 与平均孔隙压力 P_{pm} 倒数之间偏离线性关系的客观试验现象, A. Moghadam 和 R. Chalaturnyk^[12], G. Tang 等^[13]分别提出了表观渗透率和孔隙压力倒数的二次关系表达式, 前者呈下凹形曲线、后者呈上凹形曲线; (3) E. Fathi 等^[14]基于气体分子动量会由孔隙壁面传递至孔吼中央的特性, 提出了双滑移 Klinkenberg 方程。上述表达式分别如下:

$$k_a = k_\infty \times (1 + b / P_{pm}) \quad (2)$$

$$k_a = k_\infty \times (1 + b / P_{pm} - d_1 / P_{pm}^2) \quad (3)$$

$$k_a = k_\infty \times (1 + b / P_{pm} + d_2 / P_{pm}^2) \quad (4)$$

$$k_a = k_\infty \times [1 + (b / P_{pm})^2 (L_{ke} / \lambda)] \quad (5)$$

式中: k_∞ 为气体压力无穷大时的渗透率(=液体渗透率), 也称固有渗透率或绝对渗透率(m^2); P_{pm} 为平均孔隙压力(MPa); b 为 Klinkenberg 修正系数(或称为滑脱系数)(MPa); d_1 和 d_2 为二次滑脱系数(MPa^2); λ 为气体分子平均自由程(m); L_{ke} 为与回弹分子的动能有关的长度标度(m)。记 $\rho = L_{ke} / \lambda$, 无量纲。

在固定有效应力前提下利用双滑移 Klinkenberg 方程修正滑脱效应, 进而得出岩石固有渗透率 k_∞ 。首先要确定渗透率有效应力系数 χ , 本文默认 $\chi = 1$, 这也常用于致密储层岩石中滑脱效应的研究中^[1, 20]。煤体表观渗透率 k_a 的修正步骤具体如下:

(1) 确定渗透率有效应力系数 $\chi = 1$, 绘制固定体应力 σ_v 下的 k_a - σ_{vme} 曲线(见图 7)。(2) 在 k_a - σ_{vme} 空间内给定一系列有效平均应力 σ_{vme1} , σ_{vme2} , ..., σ_{vmeq} , 得到相应的一系列平均孔隙压力 P_{pm} , 并与不同 σ_v 下的 k_a - σ_{vme} 曲线相交。(3) 交点处的表观渗透率 k_a 由每一 σ_v 下的拟合关系式 $k_a =$

$\alpha(P_p)^\beta + \gamma$ (其中, α , β 和 γ 为拟合系数) 得出。在进行 k_a 预测时, 为了防止预测结果出现显著偏差, 只对孔隙压力 P_p 在 2~8 MPa 范围内的预测渗透率进行分析。(4) 绘制 $k_a - (1/P_{pm})$ 曲线和 $k_a - (1/P_{pm}^2)$ 曲线, 进行滑脱效应修正。基于上述步骤, 利用式(2)~(5)得到如图 8 所示的深部原煤固有渗透率 k_∞ 变化情况, 具体拟合系数见表 3。

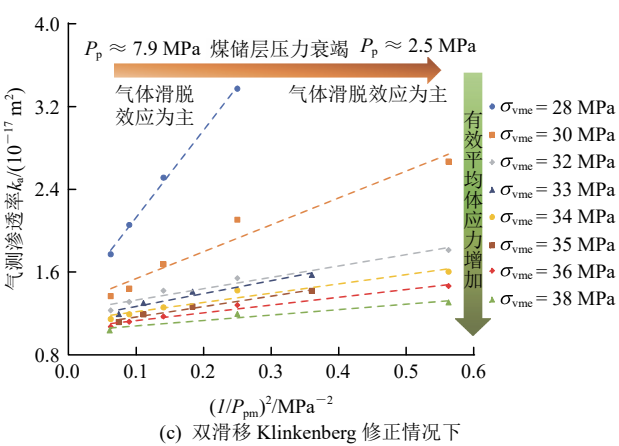
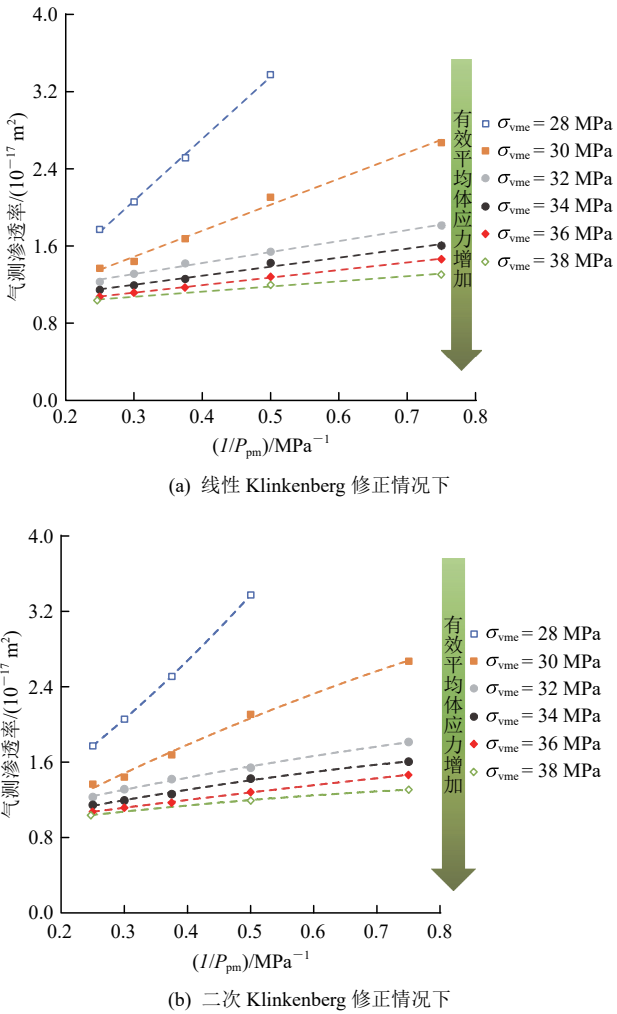


图 8 不同滑脱效应修正模型下的深部原煤表观渗透率与平均孔隙压力倒数坐标空间

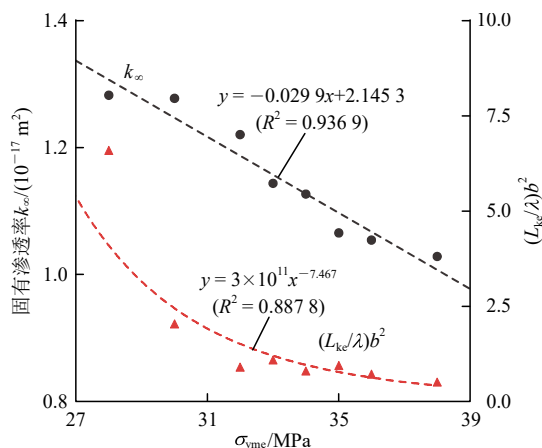
Fig.8 Coordinate space of the apparent permeability and the reciprocal of average pore pressure of deep coal under different slippage models

从图 8(a)和表 3 可知, 式(2)拟合效果良好, 但随着有效平均应力 σ_{vme} 增加, 煤体固有渗透率 k_∞ 呈增加趋势, 这与弹性状态下岩石固有渗透率与有效应力呈线性或指数负相关的客观事实相悖。因此, 线性 Klinkenberg 方程不能用于本文的滑脱效应修正。同理, 从表 3 中可知, 对煤体表观渗透率 k_a 进行二次项修正时, 不同有效平均应力 σ_{vme} 下, k_a 并不总是遵循同一修正准则, 如 $\sigma_{vme} = 28$ MPa 时, 式(4)适合于描述 k_a 与 σ_{vme} 之间的拟合关系; $\sigma_{vme} = 30, 32, 34, 36$ 和 38 MPa 时, 式(3)适合于描述 k_a 与 σ_{vme} 之间的拟合关系。此外, 二次函数修正下, 煤体固有渗透率 k_∞ 随 σ_{vme} 的增加整体上也呈增加趋势, 同样不符合客观事实。二次型 Klinkenberg 方程不适用于所用原煤试样的滑脱效应修正。图 8(c)为双滑移 Klinkenberg 修正示意图。可知, 煤体固有渗透率 k_∞ 随着有效平均应力 σ_{vme} 的增加而增加, 满足

表 3 不同修正准则下的拟合系数

Table 3 Fitting coefficients under different correction criteria

有效平均应力 σ_{vme}/MPa	修正准则											
	线性 Klinkenberg 修正			二次 Klinkenberg 修正					双滑移 Klinkenberg 修正			
	k_∞	$k_\infty b$	R^2	k_∞	$k_\infty b$	$-k_\infty d_1$	$k_\infty d_2$	R^2	k_∞	$k_\infty b_2 (L_{ke} / \lambda)$	R^2	
28	0.138 7	6.428 4	0.998 3	0.639 9	3.597 1	—	3.737 3	1	1.282 2	8.444 1	0.997 3	
30	0.678 5	2.697 0	0.991 4	0.452 9	3.740 0	-1.031 5	—	0.994 3	1.277 3	2.597 8	0.958 6	
32	0.967 1	1.139 4	0.994 1	0.864 5	1.613 7	-0.469 1	—	0.997 3	1.220 2	1.096 9	0.96	
33	—	—	—	—	—	—	—	—	1.143 6	1.240 9	0.948 2	
34	0.917 9	0.935 6	0.986 9	0.794 2	1.507 6	-0.565 6	—	0.994	1.126 5	0.897 3	0.946	
35	—	—	—	—	—	—	—	—	1.065 3	1.004 7	0.976 6	
36	0.881 3	0.781 8	0.998 4	0.849 1	0.930 3	-0.146 9	—	0.999 1	1.054 2	0.755 9	0.972 6	
38	0.911 6	0.537 9	0.989 5	0.832 9	0.918 3	-0.381 8	—	1	1.028 4	0.520 6	0.94	

图 9 煤体固有渗透率、 $(L_{kc}/\lambda)b^2$ 与有效平均应力的关系Fig.9 Relationship between intrinsic permeability, $(L_{kc}/\lambda)b^2$ and effective mean stress of coal

二者的负相关规律,且整体上拟合效果良好。因此,可用双滑移 Klinkenberg 方程进行本试验所用的低渗煤体滑脱效应修正。进一步,从图 8(c)得到同一孔隙压力 P_p 下,有效平均应力 σ_{vme} 越小,煤体的表观渗透率 k_a 越大。随着煤储层压力衰竭,气体的滑脱效应更加显著,也就是低孔隙压力 P_p 下,不同 σ_{vme} 间的 k_a 差值越大。

煤体固有渗透率 k_∞ 与有效平均应力 σ_{vme} 之间的关系如图 9 所示,为了使拟合关系式的选取更加合理,笔者增加了 $\sigma_{vme} = 33$ 和 35 MPa 下双滑移修正 k_∞ ,见表 3。可知,两者整体上呈线性关系($R^2 = 0.9369$),这与低围压条件下原煤渗透率随应力加载呈指数下降明显不同^[21],也不同于 C. Liu 等^[6]得出高围压条件下二者呈幂函数关系。笔者认为产生这一现象的原因是,已经历内部柔软孔隙、裂隙闭合阶段的高应力煤样处于弱结构各向异性(或均质性较好)阶段,其内部控制渗流的裂隙均匀分布^[1],裂隙开度在应力加载作用下满足线性变化^[22],也就是平均孔隙半径呈线弹性效应^[8],最终表现为 $k_\infty = -0.0299\sigma_{vme} + 2.1453$,而不是常见的指数或幂律关系。应注意,处于弹性状态的均质性良好的砂岩在同一应力路径、无滑脱效应影响以及不同孔隙压力下, k_a 与 σ_{vme} 也呈良好的线性关系(所有渗透率数据汇总时 $R^2 = 0.9531$,见图 10, 11 和表 4)。结合图 9 可知,原煤和砂岩的拟合斜率(分别表示为 K_c 和 K_s ,下标“c”和“s”分别表示原煤和砂岩)处于同一数量级,由于原煤体积模量较小,斜率(或称渗透率梯度)呈 $K_c = -0.0299 < K_s = -0.0193$,表明通过双滑移 Klinkenberg 修正得到的原煤固有渗透率线性演化规律是合理的,证明了笔者的猜想。由于二者斜率量级

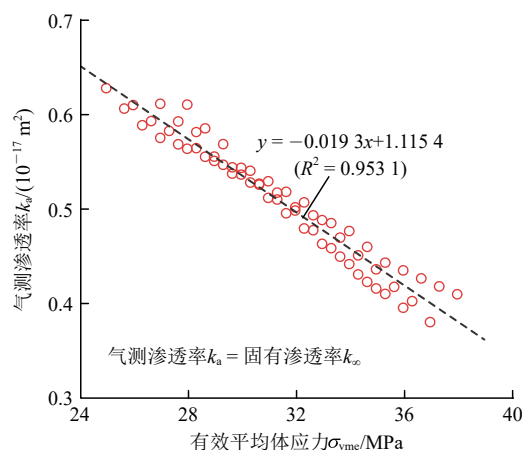
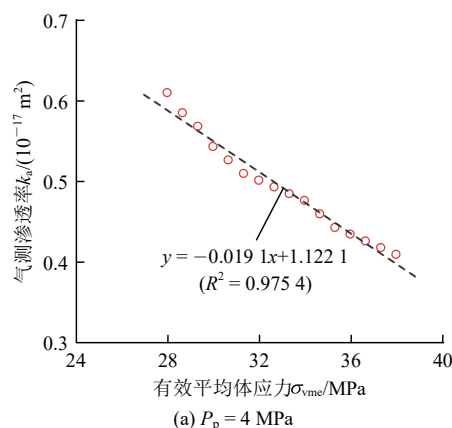
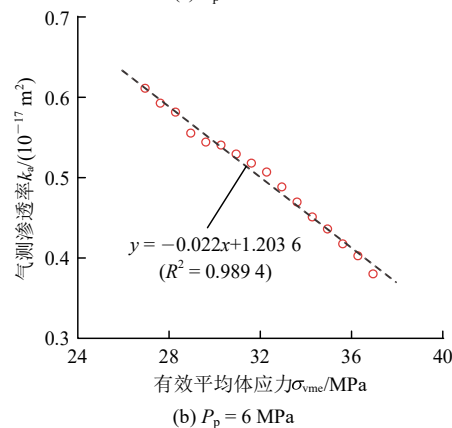
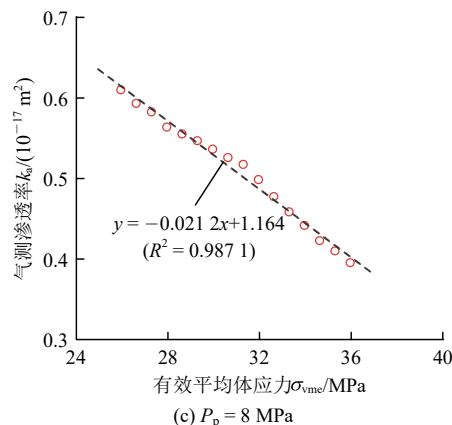


图 10 砂岩表观渗透率与有效平均应力的线性关系

Fig.10 Linear relationship between apparent permeability and effective mean stress of sandstone

(a) $P_p = 4$ MPa(b) $P_p = 6$ MPa(c) $P_p = 8$ MPa

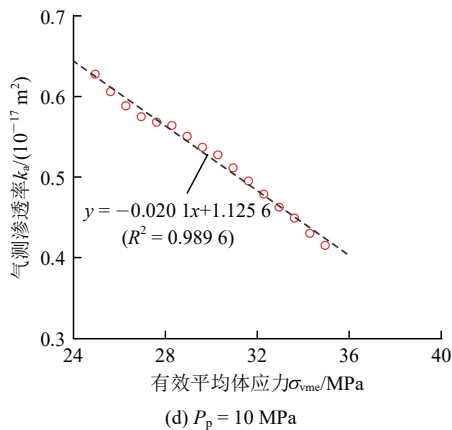


图 11 不同孔隙压力下砂岩表观渗透率与有效平均应力的关系

Fig.11 Relationship between apparent permeability and effective mean stress of sandstone under different pore pressures

表 4 砂岩表观渗透率与有效平均应力的线性拟合系数
Table 4 Linear fitting coefficient between apparent permeability and effective mean stress of sandstone

孔隙压力 P_p /MPa	线性拟合 $k_a = a_2 \sigma_{vme} + b_2$	相关系数 R^2
4	$k_a = -0.019 1 \sigma_{vme} + 1.1221$	0.975 4
6	$k_a = -0.022 \sigma_{vme} + 1.203 6$	0.989 4
8	$k_a = -0.021 2 \sigma_{vme} + 1.164$	0.987 1
10	$k_a = -0.020 1 \sigma_{vme} + 1.125 6$	0.989 6

相当，也说明在高应力状态下，原煤和砂岩的裂隙压缩系数数量级也可能相当。此外，对构建渗透率模型评价拟合效果而言，煤体固有渗透率与有效应力之间的线性、指数或幂律关系似乎都能接受。然而，在设计应力路径(见图 4)下，由于高应力煤体的渗流行为始终受滑脱效应影响，不可能由试验直接给出其固有渗透率 k_∞ 的演化规律。选择不同的函数匹配关系，意味着模型中某一项或某一参量对表观渗透率的贡献可能发生根本性变化，影响着煤层气长期产量的精准评估。

3.3 应力型与滑脱型渗透率

在图 8(c)和 9 基础上，分别研究：(1) 固定孔隙压力 P_p 条件下，表观渗透率 k_a 、应力型渗透率 $k_\sigma (=k_\infty$ ，仅与有效应力有关)和滑脱型渗透率 k_{slip} (仅与滑脱效应有关)与有效平均应力 σ_{vme} 的关系(见图 12)；(2) 固定平均应力 σ_{vm} 条件下， k_a ， k_σ 和 k_{slip} 与 P_p 之间的关系(见图 13)。

从图 12 可知， k_a 和 k_{slip} 均随 σ_{vme} 呈指数下降，具体为： σ_{vme} 由 27.95 MPa 增加至 37.95 MPa 时， k_a 下降了 65.02%， k_{slip} 下降了 91.51%； k_σ 呈线性衰减，下

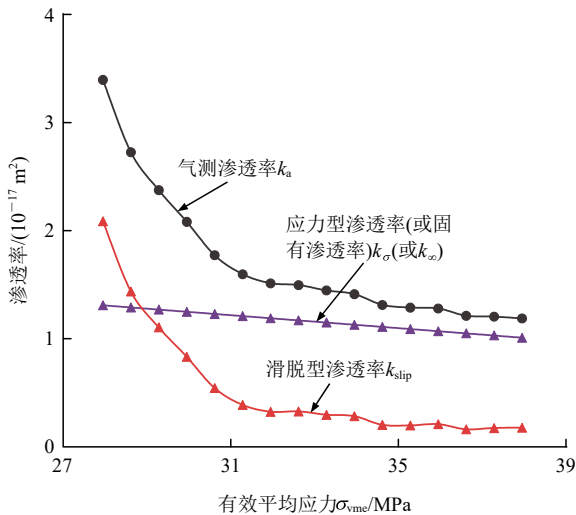


图 12 孔隙压力不变条件下表观渗透率(k_a)、应力型渗透率(k_σ)和滑脱型渗透率(k_{slip})与有效平均应力的关系(以 $P_p = 4$ MPa 为例)

Fig.12 Relationship between apparent permeability, stress-type permeability and slippage-type permeability with effective mean stress under constant pore pressure (taking $P_p = 4$ MPa as an example)

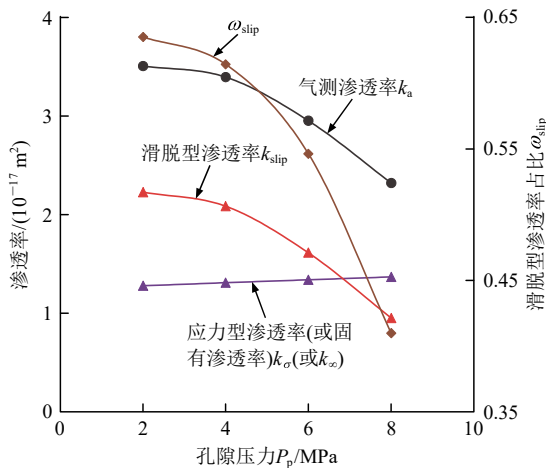


图 13 平均应力不变条件下 k_a ， k_σ 和 k_{slip} 与孔隙压力 P_p 的关系(以 $\sigma_{vm} = 30$ MPa 为例)

Fig.13 Relationship between k_a ， k_σ ，and k_{slip} with pore pressure P_p under constant mean stress(taking $\sigma_{vm} = 30$ MPa as an example)

降了 22.83%。由于 k_σ 线性下降幅度相比 k_{slip} 较小，表现为随着 σ_{vme} 增加，其所占比重 $\omega_\sigma (\omega_\sigma = k_\sigma / k_a)$ 逐渐增大(见图 14)。

这一反常现象颠覆了以往认知，与 C. Liu 等^[6]得出的滑脱效应随着 σ_{vme} 增加而增强的传统结论相反，笔者认这是由本试验煤体固有渗透率与应力的线性关系(尤其是斜率大小，见图 9)所导致的。换言之，若应力型渗透率的演化规律未经试验验证采取幂律型，则会出现滑脱效应随着 σ_{vme} 增加而增强的

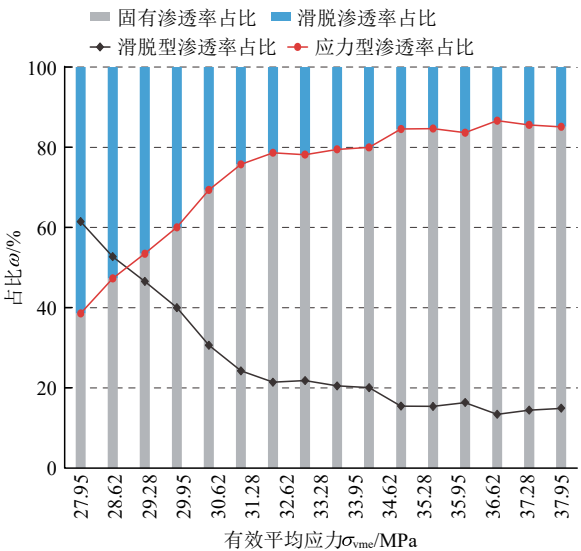


图 14 滑脱型渗透率与表观渗透率之比(ω_{slip})与有效平均应力的关系

Fig.14 Relationship between the ratio of slippage-type permeability to apparent permeability and the effective mean stress

现象，符合传统共识。滑脱效应强弱与有效平均应力的关系见表 5。令 $B = (L_{\text{ke}} / \lambda)b^2$ ， B 与有效平均应力 σ_{vme} 呈幂律关系(见图 9)，也意味着滑脱效应随着 σ_{vme} 的增加而减弱。实际上，通过对页岩渗流过程中滑脱效应的研究可知，有效应力的增加可能对高应力状态下储层岩石滑脱效应的强化作用有限，甚至可以忽略不计^[7]。此外， k_{slip} 的指数下降趋势表明，煤体内与滑脱效应有关的裂隙在应力作用下可能部分表现为“软”裂隙性质。从图 13 可知，当保持平均应力 σ_{vm} 不变时，随着孔隙压力 P_{p} 增加，滑脱效应减弱，这符合常识。 k_{a} 和 k_{slip} 均减小， k_{σ} 相应增加，滑脱型渗透率占比($\omega_{\text{slip}} = k_{\text{slip}} / k_{\text{a}}$)随之减小， ω_{slip} 由 63.52% 降至 40.98%。

表 5 煤体滑脱效应强弱与有效平均应力的关系
Table 5 Relationship between the intensity of coal slippage effect and effective mean stress

固有渗透率 k_{∞} 与有效平均应力 σ_{vme} 关系	表观渗透率 k_{a} 与有效平均应力 σ_{vme} 关系	煤体滑脱效应
线性: $k_{\infty} = a_3 \sigma_{\text{vme}} + b_3$	幂律型: $k_{\infty} = a_4 \sigma_{\text{vme}}^{-b_4}$	减弱(本研究)
幂律型: $k_{\infty} = a_4 \sigma_{\text{vme}}^{-b_4}$	幂律型: $k_{\infty} = a_4 \sigma_{\text{vme}}^{-b_4}$	增强 ^[6]

注：实质上滑脱效应强弱的本质由应力型渗透率和表观渗透率随应力加载下降的快慢决定。

3.4 原煤表观渗透率预测

式(2)~(4)中，滑脱系数 b 的表达式为

$$b = \frac{4c\lambda}{r} P_{\text{pm}} \tag{6}$$

$$\lambda = \frac{k_{\text{B}}T}{\sqrt{2\pi}\delta^2 P_{\text{pm}}} \tag{7}$$

式中： P_{pm} 为平均孔隙压力(MPa)； r 为孔隙半径(m)； c 为比例系数， $c=1$ ； k_{B} 为玻尔兹曼常数， $k_{\text{B}}=1.380\,649\times10^{-23}\,\text{J/K}$ ； δ 为气体分子动力学直径(m)，对 He 而言， $\delta=2.58\times10^{-10}\,\text{m}$ ； T 为开氏温度(K)。

相关研究表明，与滑脱效应有直接关系的孔隙半径 r 可用来表征岩石渗流通道的开度 w ^[23]，即

$$w = 2r \tag{8}$$

由于煤岩材料之间(如砂岩和原煤)以及材料内部构造之间(如层理和基质)弹性模量存在明显差异，导致不同组分间的渗流裂隙开度 w 在应力作用下呈线性或指数形式变化^[1, 6, 24]，结合 Z. Xiao 等^[1, 6, 24]对煤岩裂隙的应力响应处理，认为煤体内渗流裂隙开度 w 遵循双胡克定律，满足：

$$w = w_{0,\text{e}}(1 - c_{\text{e}}\sigma_{\text{vme}}) + w_{0,\text{t}}e^{-c_{\text{t}}\sigma_{\text{vme}}} \tag{9}$$

$$w_0 = w_{0,\text{e}} + w_{0,\text{t}} \tag{10}$$

式中：下标“e”代表硬裂隙，“t”代表软裂隙； w_0 为裂隙初始开度(m)； $w_{0,\text{e}}$ 为硬裂隙初始开度(m)； $w_{0,\text{t}}$ 为软裂隙初始开度(m)； c_{e} 为硬裂隙压缩系数(MPa^{-1})； c_{t} 为软裂隙压缩系数(MPa^{-1})。

将式(10)代入式(9)得到

$$w = w_{0,\text{e}}(1 - c_{\text{e}}\sigma_{\text{vme}}) + (w_0 - w_{0,\text{e}})e^{-c_{\text{t}}\sigma_{\text{vme}}} \tag{11}$$

结合式(8)和(11)得到

$$r = \frac{w}{2} = \frac{1}{2}[w_{0,\text{e}}(1 - c_{\text{e}}\sigma_{\text{vme}}) + (w_0 - w_{0,\text{e}})e^{-c_{\text{t}}\sigma_{\text{vme}}}] \tag{12}$$

结合图 9，13 和 14 可知，固有渗透率 k_{∞} 随有效平均应力 σ_{vme} 的线性变化规律和应力型渗透率占比 w_{σ} 较大的试验事实均表明，煤体内渗流裂隙的弹性模量介于一个适度值，并非很大或很小，裂隙开度的线性力学响应不能忽视，在进行渗透率模型构建时不能省略，这与 Z. Xiao 等^[1]的研究不同。基于客观试验基础，煤体固有渗透率在应力响应下的演化规律采用线性方程，而不是广泛应用的指数形式，即

$$k_{\infty} = -c_{\text{fo}}\sigma_{\text{vme}} + k_{\infty 0} \tag{13}$$

式中： c_{fo} 为渗透率梯度(m^2/MPa)。

综上，结合式(6)，(7)和(12)得到

$$b = \frac{4\sqrt{2}k_{\text{B}}T}{\pi\delta^2[w_{0,\text{e}}(1 - c_{\text{e}}\sigma_{\text{vme}}) + (w_0 - w_{0,\text{e}})e^{-c_{\text{t}}\sigma_{\text{vme}}}]} \tag{14}$$

进一步，将式(13)和(14)代入式(5)得

$$k_a = (-c_{f\infty}\sigma_{vme} + k_{\infty 0}) \cdot \left\{ 1 + \frac{32\rho k_B^2 T^2}{\pi^2 \delta^4 [w_{0,e}(1 - c_e \sigma_{vme}) + (w_0 - w_{0,e})e^{-c_i \sigma_{vme}}]^2} \cdot \frac{1}{(P_{pm})^2} \right\} \quad (15)$$

式(15)中, 令 $\xi = 32k_B^2 T^2 / (\pi^2 \delta^4)$, T 取 303.15 K 时, 得到 $\xi = 1.2819 \times 10^{-14} \text{ MPa}^2 \cdot \text{m}^2$ 。

因此, 式(15)可写为

$$k_a = (-c_{f\infty}\sigma_{vme} + k_{\infty 0}) \cdot \left\{ 1 + \frac{\rho \xi}{[w_{0,e}(1 - c_e \sigma_{vme}) + (w_0 - w_{0,e})e^{-c_i \sigma_{vme}}]^2} \cdot \frac{1}{(P_{pm})^2} \right\} \quad (16)$$

式(16)为考虑深部高应力状态下煤体裂隙线性应变响应行为(I: $-c_{f\infty}\sigma_{vme} + k_{\infty 0}$)和气体滑脱效应(II: $1 + \frac{\rho \xi}{[w_{0,e}(1 - c_e \sigma_{vme}) + (w_0 - w_{0,e})e^{-c_i \sigma_{vme}}]^2} \cdot \frac{1}{(P_{pm})^2}$)的渗透率模型。图 15(a)为固定孔隙压力 $P_p = 2 \text{ MPa}$ 下, 式(16)的表观渗透率 k_a 预测情况。可知, 该模型能够较好地表征煤体表观渗透率 k_a 随有效平均应力 σ_{vm} 的演化规律。图 15(b)为固定平均应力 $\sigma_{vm} = 32.67 \text{ MPa}$ (对应图 4 中的 $\sigma_1 = 48 \text{ MPa}$, $\sigma_2 = 30 \text{ MPa}$ 和 $\sigma_3 = 20 \text{ MPa}$)下, 式(16)的预测渗透率与表观渗透

率的对比情况。同样, 该模型能够较好地预测气体的滑脱效应。

拟合参数见表 6, 应注意: (1) 表 6 中 c_e 的数量级与 Z. Xiao 等^[1, 3]计算的拟合值的数量级相当, 表明了其合理性。若固有渗透率 k_∞ 呈指数变化趋势, 即 $k_\infty = k_0 \exp(-c_{\text{total}} \sigma_{vme})$, 其中, c_{total} 为煤体整体的压缩系数, 其与 c_e 和 c_i 的关系在后续研究中会进一步讨论; (2) 2 种边界条件下, 相对于裂隙开度 w_0 , 硬裂隙初始开度 $w_{0,e}$ 并未小其 2 个或更多数量级, 不能忽略其在应力作用下对渗透率的贡献; (3) 孔隙压力不变时, 有效平均应力对高应力煤体的变形作用可看出硬裂隙的力学响应, 这可以从煤体固有渗透率随平均有效应力的增加呈线性衰减得到验证; (4) 平均体应力不变时, 孔隙压力对高应力煤体的渗流作用更多体现在软裂隙上。

3.5 砂岩滑脱效应

由图 16 可知, 砂岩在 $\sigma_{vm} = 38.67, 39.33$ 和 40 MPa 的应力作用下, 孔隙压力降至某一阈值时, 表观渗透率 k_a 在演化过程中也会出现滑脱效应。图 16(a)为砂岩渗流机制转变下临界孔隙压 P_{pc} (图中平行于 y 轴的直线)的动态演化情况。通过对 k_a 与 P_p 的二次函数拟合(见表 7)发现, 随着平均应力 σ_{vm} 增加, 砂岩渗流行为由滑脱效应主导转化为有效应

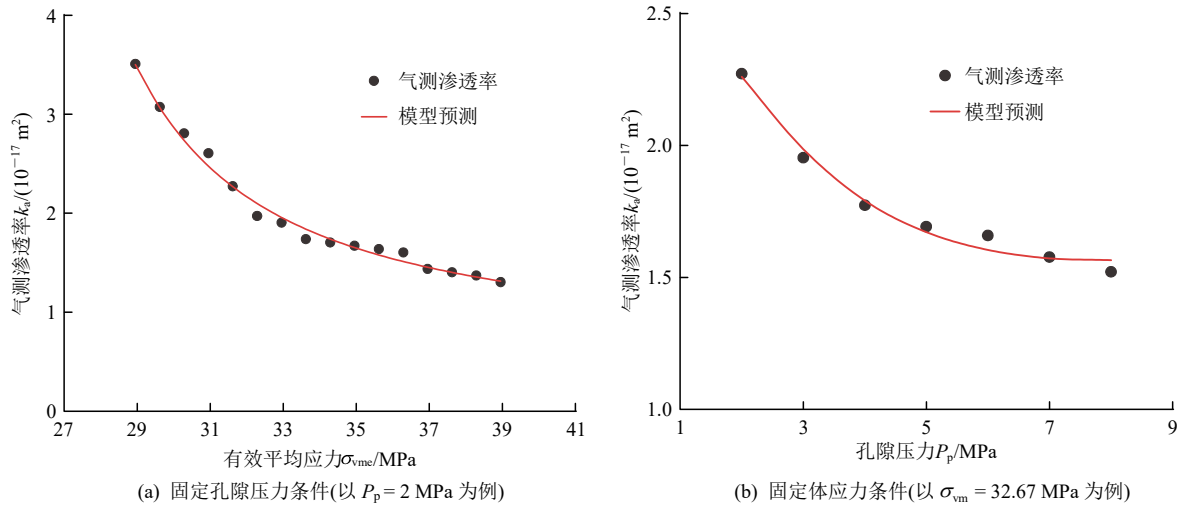


图 15 不同边界条件下渗透率模型预测表观渗透率

Fig.15 Predicted apparent permeability of the permeability model under different boundary conditions

表 6 利用式(16)预测表观渗透率演化的参数取值

Table 6 Parameters for predicting the evolution of apparent permeability using Eq. (16)

边界条件	式(16)的拟合系数						
	$k_{\infty 0} / (10^{-17} \text{ m}^2)$	$c_{f\infty} / (\text{m}^2 \cdot \text{MPa}^{-1})$	$w_0 / (10^{-7} \text{ m})$	$w_{0,e} / (10^{-7} \text{ m})$	c_e / MPa^{-1}	c_i / MPa^{-1}	ρ (无量纲)
孔隙压力不变($P_p = 2 \text{ MPa}$)	1.56	0.015	6.75	5.861	0.0451	1.301	5.877
平均体应力不变($\sigma_{vm} = 32.67 \text{ MPa}$)	3.606	0.112	1.255	0.131	0.0752	1.331	0.821

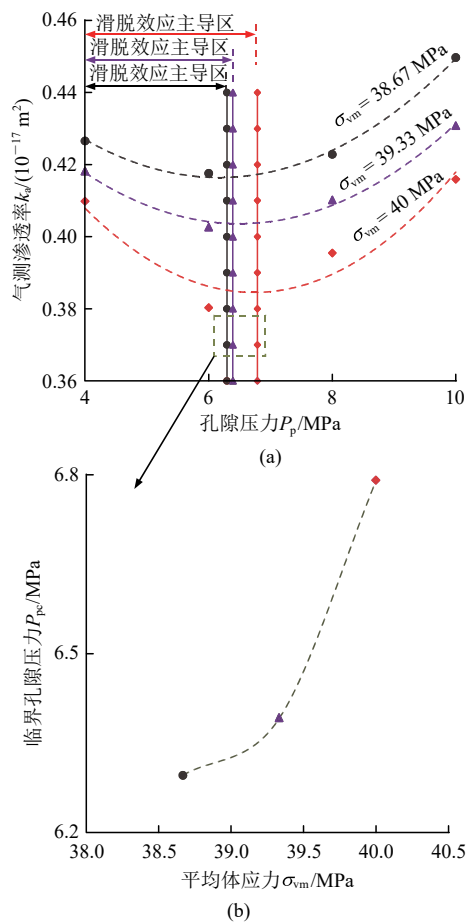


图 16 砂岩渗流机制转变下的临界孔隙压力变化
Fig.16 Changes in critical pore pressure under the transition of seepage mechanism in sandstone

表 7 $\sigma_{vm} = 38.67, 39.33$ 和 40 MPa 下砂岩表观渗透率与孔隙压力间二次拟合系数及临界孔隙压力
Table 7 Quadratic fitting coefficient between sandstone apparent permeability and pore pressure, and the calculated critical pore pressure at $\sigma_{vm} = 38.67, 39.33, 40 \text{ MPa}$

σ_{vm} / MPa	$k_a = a_5 P_p^2 + b_5 P_p + c_5$				k_a 最低点处 P_{pc} / MPa
	a_5	b_5	c_5	R^2	
38.67	0.002 2	-0.027 7	0.501 7	0.995 5	6.295 5
39.33	0.002 3	-0.029 4	0.499 0	0.988 4	6.391 3
40	0.003 1	-0.042 1	0.526 2	0.897 4	6.790 3

力主导的临界孔隙压力 P_{pc} 也随之增加(见图 16(b)), 这意味着随着储层深度增加, 致密砂岩气在整个开采周期中滑脱效应显现, 甚至居主导的时间将会显著增加。

4 讨论与结论

4.1 讨 论

(1) 随着储层压力衰减, 解吸增渗与滑脱增渗

均会引起表观渗透率反弹(见图 1)。不同储层环境下, 因煤体结构和地应力各向异性特性的客观存在, 使得这 2 种增渗机制对渗透率演化始终存在竞争。因此, 在煤层瓦斯抽采周期内, 气体滑脱效应和吸附/解吸效应对抽采总量的贡献程度也是动态变化的。在瓦斯抽采初期、中期和末期, 应根据储层地质、岩性和应力条件, 科学判定 2 种增渗机制对渗透率的贡献以及对渗透率演化规律的控制作用。

(2) 试验注入流体是氦气(He), 其动力学直径 $\delta_{He} = 0.26 \text{ nm}$, 而甲烷(CH_4)的动力学直径 $\delta_{CH_4} = 0.38 \text{ nm}$, 这使得 He 在相同孔隙压力 P_p 下的气体分子自由程是 CH_4 的 2.14 倍, 增加了气体滑移效应的程度, 说明了本试验获得的滑移效应大于实际煤储层地应力和地质条件下 CH_4 的滑移效应。

4.2 结 论

滑脱效应在深部高应力致密储层岩石中愈发凸显, 影响着瓦斯/煤层气长期产量的精准预测。基于此, 笔者开展了深部滑脱效应对高应力储层岩石(煤和砂岩)渗流特性影响的试验研究, 得到:

(1) 在千米级埋深内, 煤体即使在高孔隙压力 P_p (8 MPa)下仍表现出显著的渗流滑脱效应。相同应力环境下, 砂岩渗流基本不受滑脱效应影响。随着埋深增加, 砂岩渗流机制转变的临界孔隙压力随之增加。

(2) 在深部高应力作用下, 煤体的表观渗透率 k_a 满足双滑移 Klinkenberg 修正, 而不是传统的线性 Klinkenberg 方程。煤体和砂岩的固有渗透率 k_∞ 与有效平均应力 σ_{vm} 呈线性负相关, 未经试验验证, 应慎重地将二者关系假定为低应力状态下的指数或幂函数形式。

(3) 由于煤体表观渗透率 k_∞ 随有效平均应力 σ_{vm} 呈线性衰减规律, 导致滑脱型渗透率 k_{slip} 占比随着 σ_{vm} 的增加反而减小。滑脱效应强弱与应力型渗透率 k_σ 随应力加载的衰减程度有关。

(4) 高应力煤体的固有渗透率演化和滑脱孔径均受裂隙的线性响应行为影响, 基于双胡克定律, 建立了考虑高应力煤体裂隙开度呈线性力学特性和滑脱效应的渗透率模型, 在定孔隙压力和定平均应力 2 种边界条件下, 均取得较好的拟合效果。

参考文献(References):

[1] XIAO Z, WANG C, WANG G, et al. An improved apparent permeability model considering full pore pressure range, variable

- intrinsic permeability and slippage coefficient[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 32: 1 233 - 1 244.
- [2] 闫 霞, 徐凤银, 聂志宏, 等. 深部微构造特征及其对煤层气高产“甜点区”的控制——以鄂尔多斯盆地东缘大吉地区为例[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(8): 2 426 - 2 439.(YAN Xia, XU Fengyin, NIE Zhihong, et al. Microstructure characteristics of Daji area in east Ordos Basin and its control over the high yield dessert of CBM[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(8): 2 426 - 2 439.(in Chinese))
- [3] 东 振, 申瑞臣, 薛华庆, 等. 考虑滑脱效应的低阶煤动态渗透率预测新模型[J]. *岩土力学*, 2019, 40(11): 4 270 - 4 278.(DONG Zhen, SHEN Ruichen, XUE Huaqing, et al. A new model for predicting low-rank coal dynamic permeability considering slippage effect[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(11): 4 270 - 4 278.(in Chinese))
- [4] YANG K, LI B, LI J, et al. Impact of adsorption swelling and slippage effects on changes in coal's permeability at different temperatures[J]. *Energy and Fuels*, 2023, 37: 7 130 - 7 150.
- [5] 张保勇, 赵国建, 高 霞, 等. 瓦斯压力对含水合物煤体渗透率及滑脱效应影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 42(11): 2 655 - 2 667.(ZHANG Baoyong, ZHAO Guojian, GAO Xia, et al. Experimental study on influence of gas pressure on permeability and slippage effect of gas hydrate bearing coal[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(11): 2 655 - 2 667.(in Chinese))
- [6] LIU C, YU B, ZHAO H, et al. Effective stress effect and slippage effect of gas migration in deep coal reservoirs[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 155: 105142.
- [7] 王 军, 李文璞, 刘 超, 等. 有效应力和滑脱作用对深部页岩气渗流的影响[J/OL]. *煤炭学报*, <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0317>. (WANG Jun, LI Wenpu, LIU Chao, et al. Effect of effective stress and slippage on deep shale gas seepage[J/OL]. *Journal of China Coal Society*, <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0317>.(in Chinese))
- [8] 李 伟, 杨 康, 邓 东, 等. 考虑孔弹性效应的煤岩微纳米孔隙瓦斯表观渗透率模型及其在瓦斯抽采中的应用[J/OL]. *岩石力学与工程学报*, <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2023.0527>.(LI Wei, YANG Kang, DENG Dong, et al. A gas apparent permeability model in coal micro/nano-pores considering the poroelastic effect and its application in gas extraction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2023.0527>.(in Chinese))
- [9] 段淑蕾, 李波波, 李建华, 等. 含水煤岩渗透率演化规律及动态滑脱效应的作用机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(4): 798 - 808.(DUAN Shulei, LI Bobo, LI Jianhua, et al. Permeability evolution of water-bearing coal considering dynamic slippage effect[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(4): 798 - 808.(in Chinese))
- [10] RUSHING J, NEWSHAM K, FRAASSEN K. Measurement of the two-phase gas slippage phenomenon and its effect on gas relative permeability in tight gas sands[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver: Society of Petroleum Engineers, 2003: 842 - 897.
- [11] HEID J, MCMAHON J, NIELSEN R, et al. Study of the permeability of rocks to homogenous fluids[M]. New York: API Drilling and Production Practice Press, 1950: 230 - 246.
- [12] MOGHADAM A, CHALATURNYK R. Expansion of the Klinkenberg's slippage equation to low permeability porous media[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2014, 123: 2 - 9.
- [13] TANG G, TAO W, HE Y. Gas slippage effect on microscale porous flow using the lattice Boltzmann method[J]. *Physical Review E*, 2005, 72(5): 056301.
- [14] FATHI E, TINNI A, AKKUTLU I. Correction to Klinkenberg slip theory for gas flow in nano-capillaries[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 103: 51 - 59.
- [15] 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.
- [16] 尹光志, 李铭辉, 许 江, 等. 多功能真三轴流固耦合试验系统的研制与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(12): 2 436 - 2 445.(YIN Guangzhi, LI Minghui, XU Jiang, et al. A new multi-functional true triaxial fluid-solid coupling experiment system and its applications[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(12): 2 436 - 2 445.(in Chinese))
- [17] 康红普, 伊丙鼎, 高富强, 等. 中国煤矿井下地应力数据库及地应力分布规律[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(1): 23 - 33.(KANG Hongpu, YI Bingding, GAO Fuqiang, et al. Database and characteristics of underground in-situ stress distribution in Chinese coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(1): 23 - 33.(in Chinese))
- [18] YU B, LIU C, ZHANG D, et al. Experimental study on the anisotropy of the effective stress coefficient of sandstone under true triaxial stress[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 84: 103651.
- [19] LETHAM E, BUSTIN R. The impact of gas slippage on permeability effective stress laws: Implications for predicting permeability of fine-grained lithologies[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 167: 93 - 102.
- [20] MENG Y, LI Z, LAI F. Influence of effective stress on gas slippage effect of different rank coals[J]. *Fuel*, 2021, 285: 119207.
- [21] LIU Y, LI M, YIN G, et al. Permeability evolution of anthracite coal considering true triaxial stress conditions and structural anisotropy[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 52: 492 - 506.
- [22] 程先振, 陈连军, 栾恒杰, 等. 基质-裂隙相互作用对煤渗透率的影响: 考虑煤的软化[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(10): 1 890 - 1 898.(CHENG Xianzhen, CHEN Lianjun, LUAN Hengjie, et al. Influences of softening behaviour of coal on evolution of its permeability by considering matrix-fracture interactions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(10): 1 890 - 1 898.(in Chinese))
- [23] HELLER R, VERMYLEN J, ZOBACK M. Experimental investigation of matrix permeability of gas shales[J]. *AAPG Bulletin*, 2014, 98(5): 975 - 995.
- [24] LIU H, RUTQVIST J, BERRYMAN J. On the relationship between stress and elastic strain for porous and fractured rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(2): 289 - 296.