

# 瓦斯压力对含水合物煤体渗透率及滑脱效应影响研究

张保勇<sup>1</sup>, 赵国建<sup>1</sup>, 高霞<sup>2</sup>, 吴强<sup>1</sup>, 张旭辉<sup>3</sup>

(1. 黑龙江科技大学 安全工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022; 2. 黑龙江科技大学 建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022;  
3. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190)

**摘要:** 为研究瓦斯压力对含水合物煤体渗透特性以及滑脱效应影响规律, 借助应力-渗流-化学耦合作用含瓦斯水合物煤体三轴试验装置, 分别测量不同饱和度、粒径以及瓦斯压力条件下含瓦斯水合物煤体渗透率; 在此基础上, 结合二次渗透率修正方程量化水合物饱和度与滑脱效应相互间的关系, 并进一步定量评价滑脱效应对含瓦斯水合物煤体渗透率的影响程度。研究发现: (1) 含瓦斯水合物煤体渗透率随瓦斯压力增加呈指数函数降低, 下降幅度为 14.6%~66.4%, 渗透率变化可以分为加速减小变化阶段和平稳变化阶段 2 种阶段。(2) 采用基于渗透率变化率  $B_p$  与瓦斯压力敏感系数  $C_p$  评价含瓦斯水合物煤体渗透率对瓦斯压力的敏感程度; 瓦斯压力小于 1.50 或 1.625 MPa 时, 渗透率变化率  $B_p$  随瓦斯压力增大而快速增大; 瓦斯压力敏感系数  $C_p$  随瓦斯压力增大而快速减小, 瓦斯压力敏感程度强。(3) 水合物饱和度对滑脱效应有着重要影响, 随水合物饱和度增加, 滑脱因子呈减小趋势。(4) 滑脱效应对含瓦斯水合物煤体渗透率的影响率为 30.1%~98.2%, 滑脱效应影响率随瓦斯压力增加呈指数函数降低。本试验可为瓦斯水合固化防突技术应用提供数据支撑。

**关键词:** 采矿工程; 煤与瓦斯突出; 含瓦斯水合物煤体; 渗透率; 瓦斯压力; 滑脱效应

**中图分类号:** TD 32      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6915(2023)11-2655-13

## Experimental study on influence of gas pressure on permeability and slippage effect of gas hydrate bearing coal

ZHANG Baoyong<sup>1</sup>, ZHAO Guojian<sup>1</sup>, GAO Xia<sup>2</sup>, WU Qiang<sup>1</sup>, ZHANG Xuhui<sup>3</sup>

(1. School of Safety Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150022, China;  
2. School of Architecture and Civil Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150022, China; 3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** To evaluate impacts of gas pressure on permeability and slippage effect of gas hydrate bearing coal, the permeability was measured for gas hydrate bearing coal under different gas hydrate saturations, particle sizes and gas pressures, by using triaxial testing machine for coupling action of stress, seepage and chemical effect. Then, the relationship between the gas hydrate saturation and the slippage effect was quantified by combining with the secondary permeability correction equation. Furthermore, the slippage effect was quantitatively evaluated on the permeability. The results show that: (1) The permeability of gas hydrate bearing coal exponentially decreases with

**收稿日期:** 2023-01-03; **修回日期:** 2023-04-02

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(51974112); 国家自然科学基金联合基金项目(U21A20111)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51974112) and Natural Science Foundation Joint Fund Project(Grant No. U21A20111)

**作者简介:** 张保勇(1982-), 男, 博士, 2004年毕业于山东科技大学建筑环境与设备工程专业, 现任教授, 主要从事含瓦斯水合物煤体力学及渗透特性试验方面的研究工作。E-mail: byzhang1982@163.com。通讯作者: 高霞(1984-), 女, 博士, 现任副教授。E-mail: klgaoxia1984@163.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2023.0011

the increase of the gas pressure with a reduction between 14.6% and 66.4%, and the permeability variation can be divided into two stages, including accelerated decrease stage and stable variation stage. (2) The permeability change rate  $B_p$  and the gas pressure sensitivity coefficient  $C_p$  are introduced to evaluate the sensitivity of the permeability of gas hydrate bearing coal to the gas pressure. The permeability change rate  $B_p$  and the gas pressure sensitivity coefficient  $C_p$  respectively increase and decrease rapidly with the increase of the gas pressure, if the gas pressure is less than 1.50 or 1.625 MPa, indicating that the sensitivity of the gas pressure is significant. (3) The hydrate saturation has significant influence on the slippage effect and the slippage factor decreases with the increase of the hydrate saturation. (4) The influence rate of the slippage effect on the permeability of the gas hydrate bearing coal ranges from 30.1% to 98.2%, and the influence rate of the slippage effect exponentially decreases with the increase of the gas pressure. The results can provide experimental reference for hydrate method application in coal and gas outburst prevention.

**Key words:** mining engineering; coal and gas outburst; gas hydrate bearing coal; permeability; gas pressure; slippage effect

## 1 引言

煤与瓦斯突出是煤矿事故中极为严重的动力灾害<sup>[1]</sup>。随着煤炭开采深度逐渐增加,瓦斯赋存条件变得更加复杂,开采环境发生显著变化,严重威胁煤炭安全高效开采<sup>[2-4]</sup>。吴强等<sup>[5]</sup>所提出的瓦斯水合固化防突技术作为一种新型的预防煤与瓦斯突出方法,是指在一定温度和压力条件下,向煤层中注水,将煤层中瓦斯固化形成水合物。水合物生成不仅改善煤体强度<sup>[6]</sup>,还会引起煤体渗透率发生变化。在含瓦斯水合物煤体中,渗透率是衡量瓦斯运移难易程度关键指标,也是决定瓦斯水合物生长、分布及瓦斯水合固化效率重要参数。为此,研究含瓦斯水合物煤体渗透特性对于提高煤与瓦斯突出防治效果至关重要。

目前鲜有关于含瓦斯水合物煤体渗透率研究。在含水合物多孔介质渗透率研究方面,国内外学者主要集中于“天然气水合物-沉积物”体系进行研究。宋永臣等<sup>[7-8]</sup>发现,甲烷水合物饱和度与多孔介质渗透率呈指数函数关系。孙可明等<sup>[9]</sup>发现,有效体积应力和饱和度与含水合物沉积物渗透率呈负指数函数关系。吴丹梅等<sup>[10]</sup>发现,随水合物饱和度增加,含水合物石英砂渗透率减小,当水合物饱和度 $<10\%$ 时,渗透率下降速率较快。李刚等<sup>[11]</sup>发现,含甲烷水合物石英砂有效渗透率随甲烷水合物饱和度增加而降低。W. G. Liu 等<sup>[12]</sup>发现,在较低饱和度范围内,含水合物高岭土渗透率随饱和度增加先减小后增加。H. J. Wang 等<sup>[13]</sup>认为,在低有效应力下水合物饱和度对渗透率影响占主导地位。J. C. Lv 等<sup>[14]</sup>发

现水合物分解过程中,含水合物砂渗透率增加。

可以看出,上述研究主要围绕水合物饱和度、有效体积应力等因素对含水合物沉积物渗透率影响规律进行讨论。事实上,煤体渗透率不仅与所处应力状态有关,而且还受煤体赋存瓦斯压力的影响<sup>[15]</sup>。尤其是低瓦斯压力下,煤体渗透率会受到滑脱效应影响<sup>[16]</sup>。滑脱效应的存在有利于增加煤体渗透率,提高瓦斯在煤体中的流动性<sup>[17]</sup>。瓦斯水合物生成引起煤体中孔裂隙发生变化,进而导致滑脱效应发生变化。为此,研究瓦斯压力对含瓦斯水合物煤体渗透率影响规律及滑脱效应非常重要。

关于瓦斯压力、滑脱效应对煤体渗透率影响,国内外学者已开展研究。林柏泉和周世宁<sup>[18]</sup>发现煤体渗透率与瓦斯压力呈指数函数关系。许江等<sup>[19]</sup>研究气体压力加卸载过程中对煤体渗透率影响,发现升压阶段滑脱效应引起渗透率变化量大于降压阶段。赵阳升等<sup>[20]</sup>发现气体吸附作用表现为渗透率随孔隙压力呈幂函数关系。王刚等<sup>[21]</sup>发现煤体渗透率随瓦斯压力增加而降低。隆清明等<sup>[22-23]</sup>认为,气体吸附引起煤基质膨胀变形,影响煤体渗透率。王登科等<sup>[24-25]</sup>建立了突出煤体渗透率与瓦斯压力之间关系。魏建平等<sup>[26]</sup>建立了煤体渗透率与瓦斯压力定量关系,并确立滑脱效应发生瓦斯压力范围。S. Harpalani 和 G. Chen 等<sup>[27]</sup>发现,渗透率随孔隙压力增加先降低后趋于平缓。Y. Meng 等<sup>[28]</sup>发现,煤体渗透率随瓦斯压力增加,滑脱效应逐渐减弱。Y. F. Niu 等<sup>[29]</sup>认为,低渗透煤体在高有效应力下滑脱效应更加明显。K. Wang 等<sup>[30]</sup>认为,煤体渗透率受气体吸附、有效应力和滑脱效应共同作用影响。J. P. Zou 等<sup>[31]</sup>发现,在较低孔隙压力下,滑脱

效应对渗透率影响占主导地位。J. Q. Meng 等<sup>[32]</sup>发现，在相同轴向压力下，氦气吸附使煤体中渗流通道变小导致其滑脱效应较氮气和二氧化碳明显。Y. Q. Tao 等<sup>[33]</sup>建立动态渗透率模型，得出滑脱效应受应力、气体压力分布和边界条件影响。

基于上述讨论，目前主要围绕“天然气水合物-沉积物”和“瓦斯-煤体”2种介质体系，开展饱和度、有效体积应力对“天然气水合物-沉积物”体系渗透率以及瓦斯压力、滑脱效应对“瓦斯-煤体”体系渗透率影响研究。然而针对瓦斯压力下含瓦斯水合物煤体渗透率以及滑脱效应影响研究却鲜见报道。上述研究与“瓦斯水合物-煤体”体系有何差异？瓦斯压力对含瓦斯水合物煤体渗透率呈现何种影响规律？本试验采用自制应力-渗流-化学耦合作用含瓦斯水合物煤体三轴试验装置，开展不同粒径和饱和度下瓦斯压力对含瓦斯水合物煤体渗透特性的试验，分析瓦斯压力和水合物饱和度作用下对含瓦斯水合物煤体渗透率的影响规律，结合二次渗透率修正方程量化水合物饱和度与滑脱效应相互间的关系，并进一步定量评价滑脱效应对含瓦斯水合物煤体渗透率的影响程度。以期为瓦斯水合固化防突技术的应用提供试验参考和理论指导。

## 2 含瓦斯水合物煤体渗透率试验

### 2.1 试样制备

试验用煤取自龙煤集团城山矿二采区 42#煤层。甲烷气样(体积浓度为 99.99%)由哈尔滨春霖气体有限公司提供。纯水由实验室自制。试样制备主要包括煤块破碎、筛分煤粉、型煤制备及烘干制备 4 个部分组成，具体步骤见张保勇等<sup>[6]</sup>研究。煤样高度、质量等参数见表 1。

表 1 煤样基本参数

目数	高度/mm	直径/mm	质量/g	含水量/g	饱和度/%
	98.3	50.89	248.8	12.52	80
20~40	99.7	50.81	245.0	9.39	60
	98.05	50.53	248.8	6.26	40
	101.35	50.61	239.9	9.19	80
40~60	99.71	50.83	238.7	6.90	60
	99.73	50.60	240.1	4.60	40
	99.82	50.79	236.5	10.62	80
60~80	99.56	50.65	235.1	7.97	60
	100.87	50.72	237.0	5.31	40

### 2.2 水合物饱和度控制

#### (1) 煤体中瓦斯水合物生成控制

水合物饱和度是水合物占据多孔介质中孔隙体积与总孔隙体积的比值<sup>[34]</sup>。本文选取瓦斯水合物生成压力为 4 MPa、生成温度为 0.5 °C<sup>[35]</sup>，采用气饱和法和法控制水合物饱和度，气饱和法是制备试样所需饱和度的初始含水量，水合物生成持续补充气体，若压力无明显变化，判定试样中的初始含水量全部转化为水合物<sup>[36]</sup>。

#### (2) 渗流过程中瓦斯水合物维持稳定状态

在渗透率测试过程始终保证温度为 0.5 °C，控制较低的水合物分解驱动力，以防水合物在煤体中分解。此外，统计发现多孔介质中水合物分解时长为 1.17~6.17 h<sup>[37-44]</sup>，可以保证煤体中瓦斯水合物的稳定状态。

### 2.3 试验装置

试验装置为应力-渗流-化学耦合作用含瓦斯水合物煤体三轴试验装置可用来测试不同瓦斯压力、水合物饱和度下含瓦斯水合物煤体渗流特性，如图 1<sup>[45]</sup>所示。该装置主要由水合固化-荷载高压

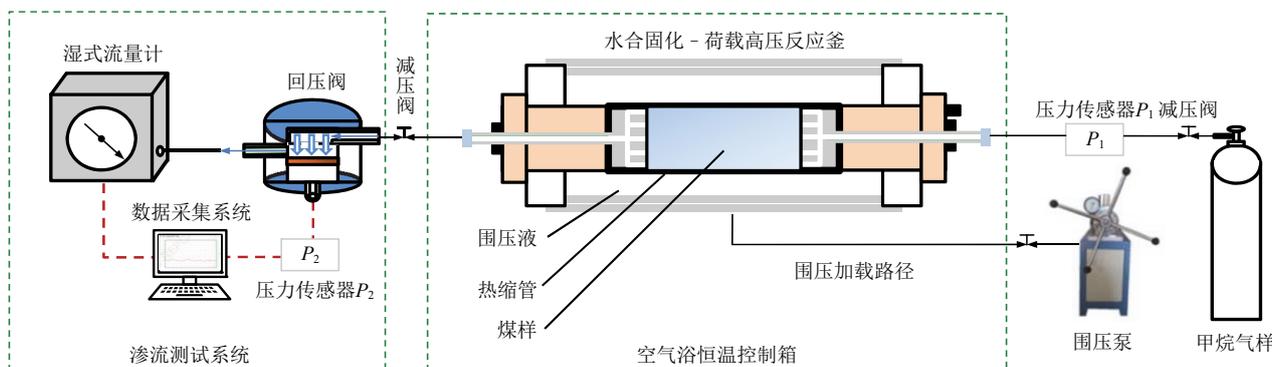


图 1 应力-渗流-化学耦合作用含瓦斯水合物煤体三轴试验装置<sup>[45]</sup>

Fig.1 Triaxial testing machine for coupled seepage, chemical and stress measurements in gas hydrate bearing coal<sup>[45]</sup>

反应釜、渗透率测试系统、压力控制系统、温度控制系统以及数据采集系统 5 个部分组成。

### 2.4 试验方案及步骤

为探究恒围压下瓦斯压力对含瓦斯水合物煤体渗透率影响规律，进行 9 种进口瓦斯压力下含瓦斯水合物煤体渗透率试验。具体步骤如下：

(1) 瓦斯水合物生成：首先，将制备好的型煤试样，用热风机使热缩管紧贴两端夹持器与型煤试样，并用铁丝捆扎密封，装入三轴反应釜内，注满围压液。其次，调节增压泵控制围压  $\sigma_3$  稳定至 7 MPa。然后，将空气浴恒温箱中温度调至 0.5 °C，通过调节稳压阀将进口瓦斯压力  $P_1$  至 4 MPa，关闭煤体出口端阀门，充分进行恒压瓦斯气体吸附。然后，采用气饱和法进行后续试验，当发现气压降低后进行补气至 4 MPa，始终保持瓦斯水合物生成过程持续供气，直到最终补气后进口瓦斯压力值保持稳定不变时，则瓦斯水合物生成结束。

(2) 含瓦斯水合物煤体渗透率测试：通过调节稳压阀控制进口瓦斯压力  $P_1$  为 1.25→1.50→1.75→2.00→2.25→2.50→2.75→3.00→3.25 MPa 依次增加。同时，回压阀设置出口瓦斯压力  $P_2 = 1$  MPa，调节增压泵控制围压  $\sigma_3$  稳定至 7 MPa，温度一直维持 0.5 °C，待湿式流量计出口流量稳定后并记录试验数据。渗透率测试过程中压力、流量变化曲线以及试验方案分别见图 2 和表 2。依照上述试验步骤，采用出口端流量稳态法测试煤体渗透率，由以下公式<sup>[46]</sup>计算得到含瓦斯水合物煤体渗透率：

$$k_g = \frac{2\mu P_0 L Q}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (1)$$

式中： $k_g$  为渗透率( $m^2$ )； $\mu$  为气体动力黏度系数，取  $1.0214 \times 10^{-11}$  MPa·s(0.5 °C)<sup>[47]</sup>； $P_0$  为标准大气压力，取 0.101 MPa； $L$  为煤样长度(m)； $Q$  为煤样出口端流量( $m^3/s$ )； $A$  为煤样横截面积( $m^2$ )。

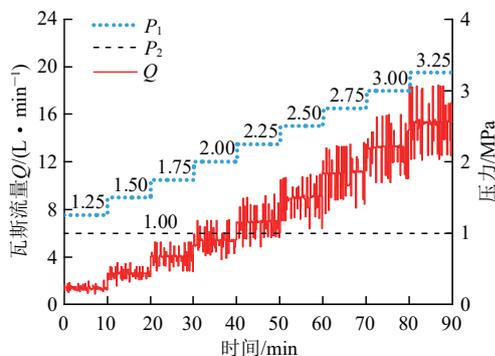


图 2 含瓦斯水合物煤体渗透率测试过程中压力、流量变化情况

Fig.2 Variation of pressure and flow curve of seepage test in gas hydrate bearing coal

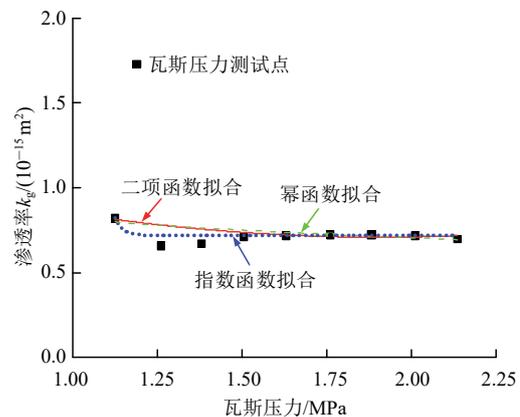
表 2 含瓦斯水合物煤体渗透率试验方案

Table 2 Experimental schemes of permeability test in gas hydrate bearing coal

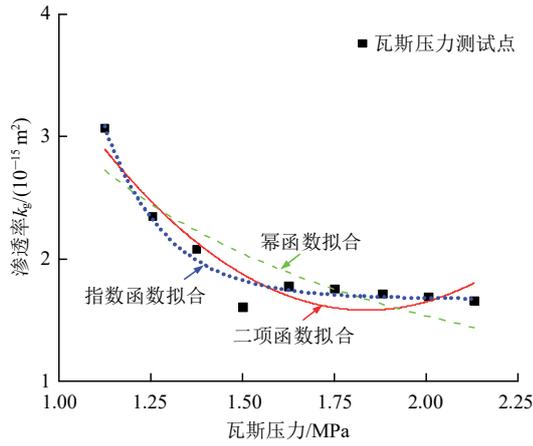
目数	饱和度/%	$P_1$ /MPa	$P_2$ /MPa	$\sigma_3$ /MPa	$k_g/(10^{-15} m^2)$
	40		1	7	0.70~0.82
20~40	60	1.25~3.25	1	7	1.67~3.06
	80		1	7	0.94~1.97
	40		1	7	1.71~4.98
40~60	60	1.25~3.25	1	7	2.63~5.33
	80		1	7	1.55~3.68
	40		1	7	0.82~1.10
60~80	60	1.25~3.25	1	7	2.76~4.33
	80		1	7	2.15~6.41

### 3 瓦斯压力对含瓦斯水合物煤体渗透率的影响

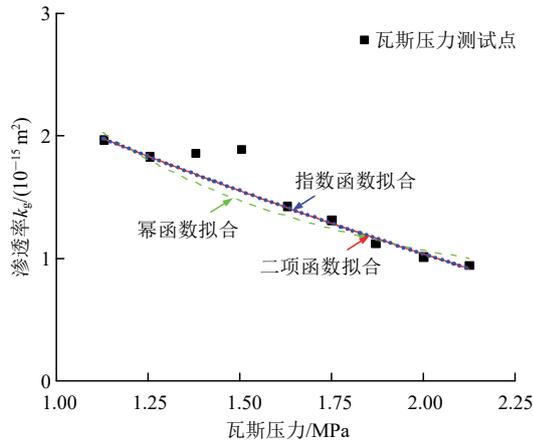
图 3 给出了不同粒径和水合物饱和度下含瓦斯水合物煤体渗透率与瓦斯压力关系曲线。由图 3 可知，随瓦斯压力增大，含瓦斯水合物煤体渗透率降低，其他粒径均有类似现象。瓦斯压力从 1.125 MPa 增大至 2.125 MPa 时，煤体渗透率下降幅度分别为 14.6%~52.1%(20~40 目)、50.7%~65.8%(40~60 目)和 25.9%~66.4%(60~80 目)。分析认为，随瓦斯压力增大过程中，渗透率变化规律是由滑脱效应和有效应力两者共同作用的结果。瓦斯压力减小，气体平均自由程增大，使自由程更接近煤体有效孔裂隙半径，滑脱效应显著<sup>[28]</sup>。随瓦斯压力增大，滑脱效应逐渐减弱；同时，有效应力减小阻碍煤体中孔裂隙结构收缩程度，使瓦斯运移通道增大。在试验瓦斯压力范围内，滑脱效应对渗透率抑制作用大于有效应力对渗透率促进作用<sup>[48]</sup>，导致含瓦斯水合物煤体渗透率降低。



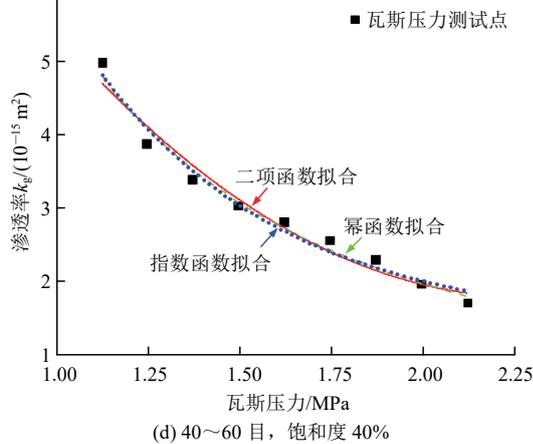
(a) 20~40 目，饱和度 40%



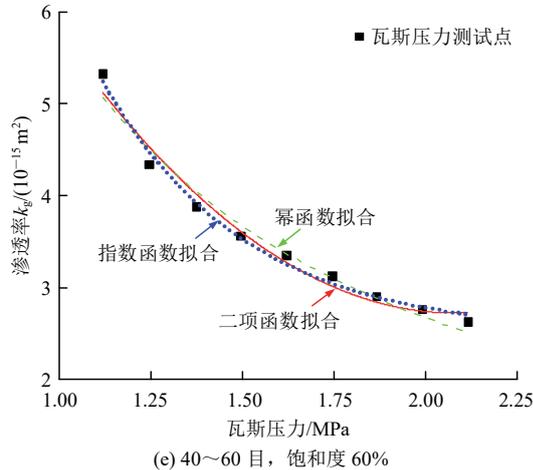
(b) 20~40 目, 饱和度 60%



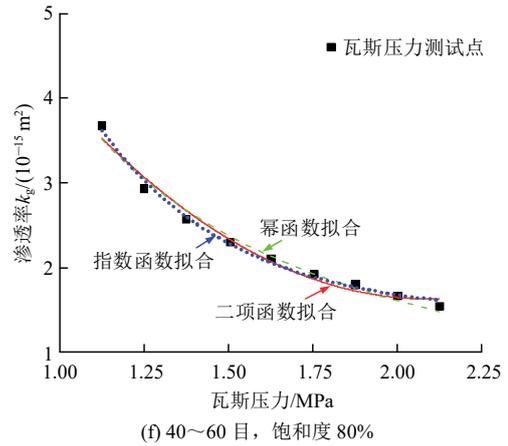
(c) 20~40 目, 饱和度 80%



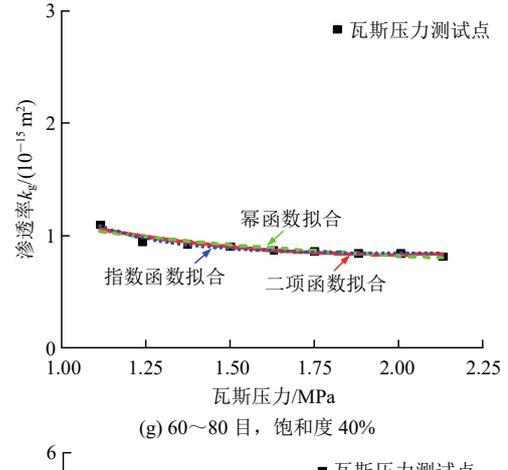
(d) 40~60 目, 饱和度 40%



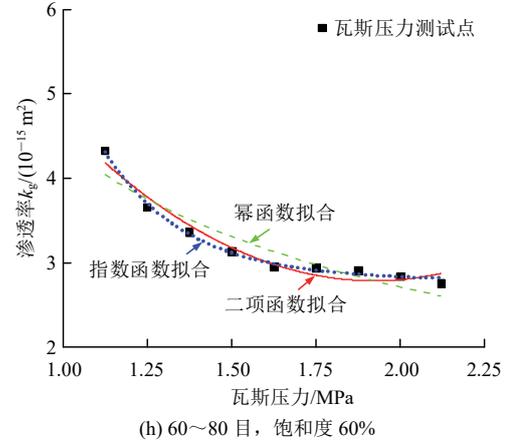
(e) 40~60 目, 饱和度 60%



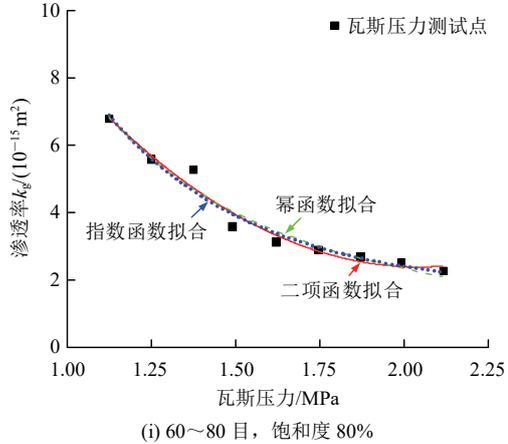
(f) 40~60 目, 饱和度 80%



(g) 60~80 目, 饱和度 40%



(h) 60~80 目, 饱和度 60%



(i) 60~80 目, 饱和度 80%

图 3 含瓦斯水合物煤体渗透率与瓦斯压力的关系

Fig.3 Relation between permeability and gas pressure of gas hydrate bearing coal

为定量分析含瓦斯水合物煤体渗透率与瓦斯压力的关系，运用数学公式对含瓦斯水合物煤体渗透率与瓦斯压力的关系进行拟合。目前存在 3 种渗透率与瓦斯压力拟合公式<sup>[49]</sup>：

(1) 二项函数：

$$k_g = B_2 P_m^2 + B_1 P_m + c \quad (2)$$

(2) 指数函数：

$$k_g = A_1 \exp(-e P_m) + y_0 \quad (3)$$

(3) 幂函数：

$$k_g = a P_m^{-d} \quad (4)$$

式中： $B_2, B_1, c, A_1, e, y_0, a, d$  均为拟合参数； $P_m$  为瓦斯压力(MPa)，且有  $P_m = (P_1 + P_2)/2$ 。

运用式(2)~(4)拟合公式分别对含瓦斯水合物煤体渗透率与瓦斯压力的关系进行拟合，拟合结果见表 3。由表可知，相比于二项函数和幂函数拟合度，指数函数拟合度最好，拟合度  $R^2$  均大于 0.94，与林柏泉和周世宁<sup>[18]</sup>研究发现一致。

需要说明的是：20~40 目体系下饱和度 40% 和 80% 下出现 2 种瓦斯压力条件下渗透率与整体趋势偏差较大的，表 3 中为去除 4 个离散点后的拟合结果。

## 4 瓦斯压力敏感程度分析

### 4.1 瓦斯压力敏感程度评价参数

上述试验结果表明：含瓦斯水合物煤体渗透率随瓦斯压力变化呈先迅速下降后逐渐趋于平稳状态。为了进一步探讨含瓦斯水合物煤体渗透率对瓦

斯压力敏感程度，参照许江等<sup>[50-53]</sup>的研究成果，本文采用渗透率变化率和瓦斯压力敏感系数 2 种参数量化评价瓦斯压力敏感程度。

(1) 渗透率变化率  $B_p$  (%)：渗透率变化率  $B_p$  反映在相同饱和度下，瓦斯压力变化过程中引起含瓦斯水合物煤体渗透率下降的百分数。计算公式<sup>[50]</sup>如下：

$$B_p = \frac{k_1 - k_m}{k_1} \times 100\% \quad (5)$$

式中： $k_1$  为第 1 个瓦斯压力点对应的渗透率值( $m^2$ )， $k_m$  为瓦斯压力增加过程中对应的渗透率值( $m^2$ )。

(2) 瓦斯压力敏感系数  $C_p$  ( $MPa^{-1}$ )：瓦斯压力敏感系数  $C_p$  反映在相同饱和度下，单位瓦斯压力引起含瓦斯水合物煤体渗透率相对变化量。计算公式<sup>[50]</sup>如下：

$$C_p = -\frac{1}{k_1} \frac{\partial k_g}{\partial P_m} \quad (6)$$

式中： $\partial k_g$  为煤体渗透率变化量( $m^2$ )， $\partial P_m$  为瓦斯压力变化量(MPa)。

由式(5)，(6)可以看出， $B_p$  和  $C_p$  越大，反映含瓦斯水合物煤体瓦斯压力敏感程度强，煤体渗透率变化越大。反之， $B_p$  和  $C_p$  越小，反映含瓦斯水合物煤体瓦斯压力敏感程度弱，煤体渗透率变化越小。

### 4.2 瓦斯压力敏感程度分析

由式(5)和(6)对试验数据进行计算可得到不同粒径和饱和度下瓦斯压力敏感评价参数，渗透率变化率  $B_p$  和瓦斯压力敏感系数  $C_p$  见表 4。由表可知，随瓦斯压力增加过程中，渗透率变化率  $B_p$  最终值范围为 14.6%~66.4%；瓦斯压力敏感系数  $C_p$  平均值范围为 0.13~1.58  $MPa^{-1}$ 。20~40 目体系下，瓦斯压

表 3 含瓦斯水合物煤体渗透率与瓦斯压力拟合参数  
Table 3 Fitting parameters for the permeability of gas hydrate bearing coal with gas pressure

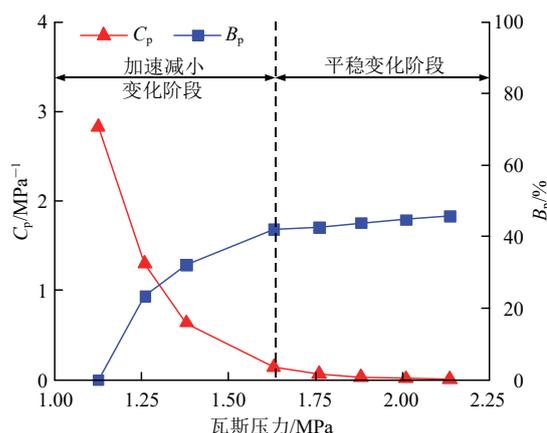
目数	饱和度/%	指数函数拟合				二项式拟合				幂函数拟合		
		$A_1$	$e$	$y_0$	$R^2$	$B_2$	$B_1$	$c$	$R^2$	$a$	$d$	$R^2$
20~40	40	$3.71 \times 10^{-18}$	40.01	0.76	0.95	0.17	-0.65	1.33	0.78	0.81	0.22	0.67
	60	$1.20 \times 10^3$	5.97	1.67	0.95	2.59	-9.54	10.34	0.86	3.06	1.00	0.73
	80	6.76	0.23	-3.25	0.99	0.13	-1.47	3.48	0.99	2.31	1.12	0.97
40~60	40	30.68	1.94	1.37	0.97	2.20	-10.02	13.18	0.96	5.74	1.55	0.98
	60	49.14	2.57	2.49	0.99	2.61	-10.84	14.00	0.97	5.75	1.11	0.97
	80	36.88	2.51	1.43	0.99	2.03	-8.50	10.52	0.97	4.13	1.36	0.98
60~80	40	31.84	4.35	0.84	0.94	0.30	-1.18	2.00	0.87	1.08	0.40	0.83
	60	153.82	4.10	2.79	0.99	2.20	-8.47	10.92	0.95	4.38	-0.69	0.87
	80	65.98	2.26	1.68	0.96	5.23	-21.40	24.27	0.96	8.50	1.86	0.96

表 4 含瓦斯水合物煤体瓦斯压力敏感程度评价参数  
Table 4 Evaluation parameters of gas pressure sensitivity for gas hydrate bearing coal

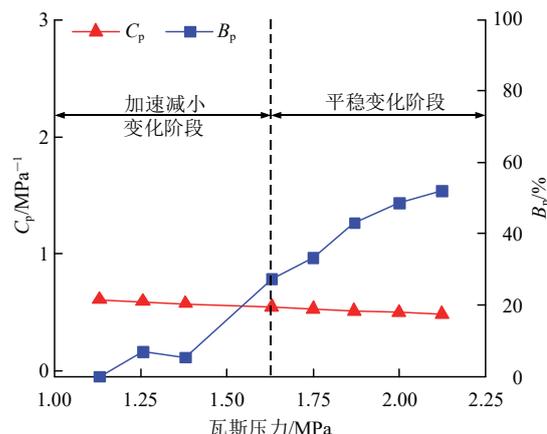
目数	饱和度/%	$B_p$ 最终值/%	$C_p$ /MPa <sup>-1</sup>		
			最小值	最大值	平均值
20~40	40	14.6	$8.90 \times 10^{-18}$	2.37	1.19
	60	45.9	0.01	2.83	1.42
	80	52.1	0.48	0.61	0.55
40~60	40	65.7	0.20	1.34	0.77
	60	50.7	0.10	1.33	0.67
	80	57.9	0.12	1.49	0.81
60~80	40	25.8	0.01	0.99	0.50
	60	36.3	0.02	1.45	0.74
	80	66.4	0.20	1.83	1.02
平均值		46.2	0.13	1.58	0.86

力敏感系数  $C_p$  平均值随饱和度增大呈降低趋势，而 40~60 目和 60~80 目体系下，瓦斯压力敏感系数  $C_p$  平均值随饱和度增大呈增加趋势。根据 H. L. Lu 等<sup>[54]</sup>研究结果，认为沉积物颗粒大小对水合物在其孔隙内的生成与分布起主要作用。上述现象可能是粒径大小对水合物在煤体孔裂隙空间中生成位置、分布模式导致的结果呈现一定的差异性。因此，不同粒径下瓦斯压力敏感系数  $C_p$  平均值随饱和度增大呈不同的变化规律。

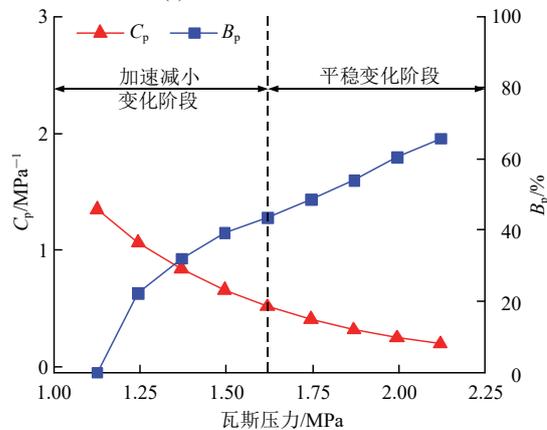
图 4 给出了不同粒径和饱和度下含瓦斯水合物煤体渗透率变化率和瓦斯压力敏感程度随瓦斯压力变化曲线。由图 4 可知，瓦斯压力小于 1.50 或 1.625 MPa，瓦斯压力敏感系数随瓦斯压力的增大而快速减小，渗透率变化率随瓦斯压力的增大而快速增加；瓦斯压力大于 1.50 或 1.625 MPa，瓦斯压力敏感系数随着瓦斯压力的增大而缓慢减小，渗透率变化率随瓦斯压力的增大而缓慢增加。



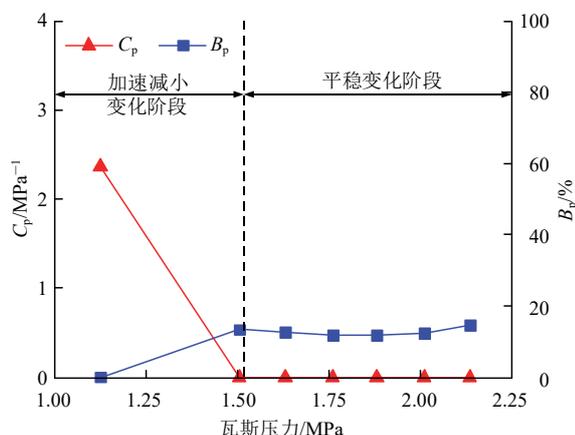
(b) 20~40 目，饱和度 60%



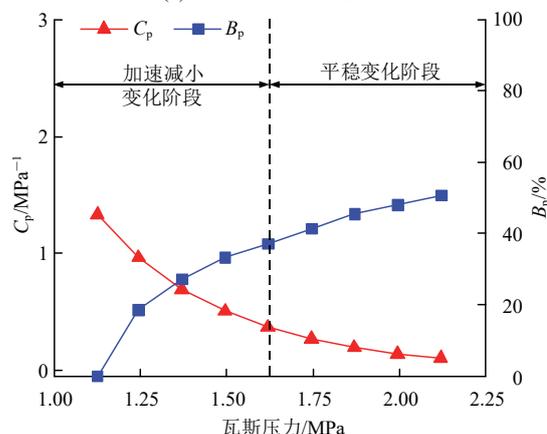
(c) 20~40 目，饱和度 80%



(d) 40~60 目，饱和度 40%



(a) 20~40 目，饱和度 40%



(e) 40~60 目，饱和度 60%

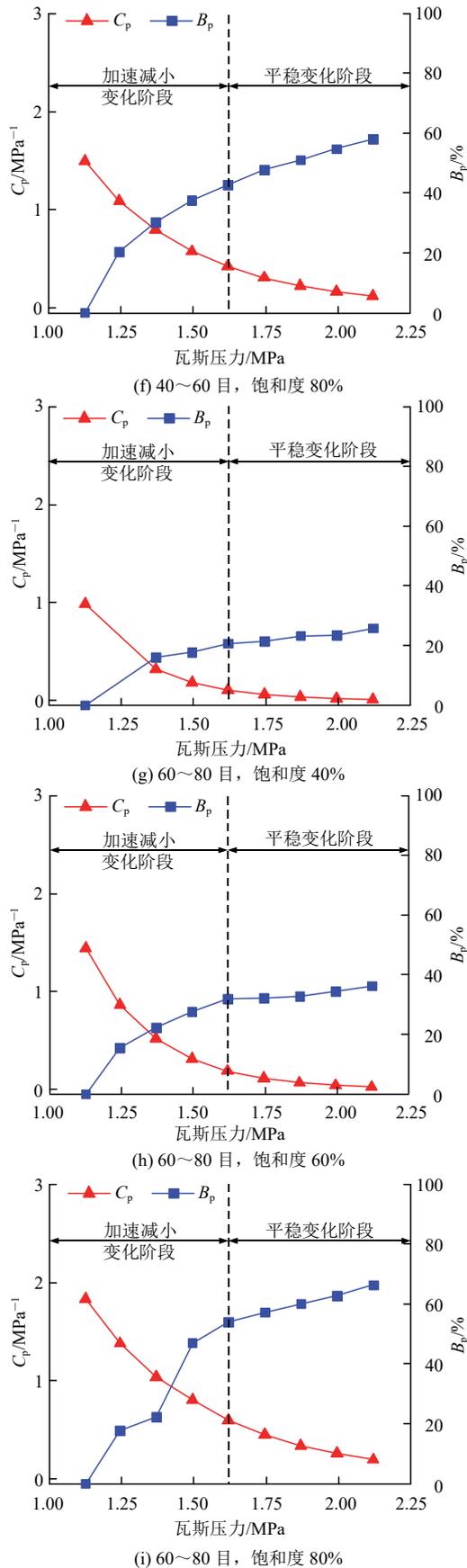


图 4 含瓦斯水合物煤体渗透率变化率和瓦斯压力敏感系数与瓦斯压力的关系

Fig.4 Relation between permeability change rate, sensitivity coefficient of gas hydrate bearing coal and gas pressure

进一步从渗透率变化率和瓦斯压力敏感系数变化趋势可以看出, 含瓦斯水合物煤体渗透率随瓦斯压力变化可以分为 2 个阶段: 第 1 阶段为渗透率加速减小变化阶段(瓦斯压力 < 1.50 或 1.625 MPa), 滑脱效应对渗透率的影响较大, 渗透率下降较快; 第 2 阶段为渗透率平稳变化阶段(瓦斯压力 > 1.50 或 1.625 MPa), 滑脱效应对渗透率的影响减弱, 有效应力减小的效应有所增强, 渗透率逐渐趋于平稳。

## 5 滑脱效应对含瓦斯水合物煤体渗透率影响

### 5.1 水合物饱和度对滑脱效应的影响

滑脱效应是指气体在多孔介质渗流中, 气体平均自由程接近多孔介质的有效孔裂隙半径时, 孔裂隙面壁上气体分子流速不在为 0, 在气体渗流中增加滑脱流量, 使得测得渗透率大于液体渗透率的现象<sup>[49]</sup>。为分析滑脱效应与水合物饱和度的关系, 采用滑脱因子评价滑脱效应强弱程度, 其中滑脱因子越大, 滑脱效应越显著。此外, G. H. Tang 等<sup>[55]</sup>提出一种二次渗透率修正方程可以准确地解释多孔介质中存在的滑脱效应:

$$k_g = k_0 \left( 1 + \frac{b}{P_m} + \frac{B}{P_m^2} \right) \quad (7)$$

式中:  $k_0$  为绝对渗透率,  $B$  为二次滑脱因子,  $b$  为滑脱因子。由式(7)对不同粒径下含瓦斯水合物煤体渗透率与瓦斯压力倒数的关系进行拟合, 可得到不同粒径和水合物饱和度下绝对渗透率  $k_0$ 、滑脱因子  $b$ , 见表 5。

表 5 滑脱因子  $b$  和绝对渗透率  $k_0$   
Table 5 Slippage factor  $b$  and absolute permeability  $k_0$

目数	饱和度/%	滑脱因子 $b$ /MPa	绝对渗透率 $k_0$ / ( $10^{-15}$ m <sup>2</sup> )
20~40	40	19.45	0.11
	60	4.60	0.67
	80	5.98	2.35
40~60	40	35.44	0.09
	60	1.90	1.12
	80	3.51	0.41
60~80	40	1.12	0.57
	60	1.64	1.66
	80	0.93	0.82

图 5 给出了不同粒径下饱和度与滑脱因子的关系。由图可知，随饱和度从 40%增加到 80%过程中，滑脱因子呈减小趋势，其他粒径均有类似现象。例如，40~60 目体系下，饱和度 40%滑脱因子为 35.44，饱和度 80%滑脱因子为 3.51。分析认为，随饱和度从 40%增加到 80%过程中，水合物会填充于煤体孔裂隙空间中<sup>[56]</sup>。同时，水合物存在增强煤体颗粒之间黏聚力和内摩擦角<sup>[57]</sup>，煤体更难以被压缩，有效孔裂隙半径增加<sup>[17]</sup>，滑脱效应随煤体中有效孔裂隙半径变小而显著<sup>[58]</sup>。因此，随饱和度从 40%增加到 80%过程中，滑脱效应减弱。

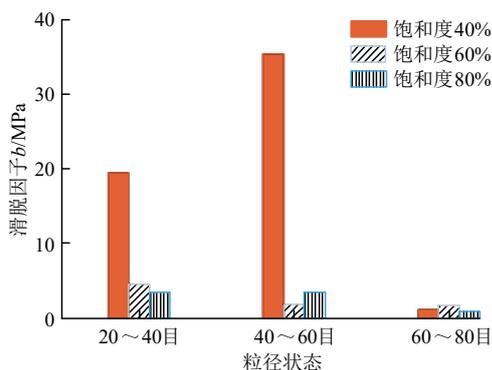


图 5 水合物饱和度与滑脱因子关系

Fig.5 Relationship between slippage factor and hydrate saturation

60~80 目体系下，随饱和度从 40%增加到 80%过程中，滑脱因子变化不明显。例如，在 60~80 目体系下，随饱和度从 40%增大到 80%过程中，滑脱因子变为原来的 0.83。煤体孔隙按照连通性可分为交联孔、通孔、封闭孔和半封闭孔，其交联孔、通孔、半封闭孔称为开孔<sup>[59]</sup>。瓦斯水合物形成具有一定随机性，可能形成于开孔中，也可能形成于封闭

孔中，其半封闭孔中瓦斯水合物对煤体渗透率几乎无影响。分析认为，随瓦斯水合物增多，可能一定量水合物分布在半封闭孔中，对瓦斯渗流通道没有产生影响，即煤体有效孔裂隙半径无明显变化，导致滑脱效应无明显变化。

### 5.2 滑脱效应对含瓦斯水合物煤体渗透率的影响率

为探究滑脱效应对含瓦斯水合物煤体渗透率的影响情况，采用滑脱效应影响率  $M_k$  量化评价滑脱效应影响程度，其计算公式<sup>[60]</sup>如下：

$$M_k = \frac{k_g - k_0}{k_g} \times 100\% \quad (8)$$

式中： $k_g$  为测试渗透率， $k_0$  为绝对渗透率。由式(8)可得不同粒径和水合物饱和度下滑脱效应影响率  $M_k$  (见表 6)。

由表 6 可知，在相同瓦斯压力下，随饱和度增加，滑脱效应贡献率减小。20~40 目和 40~60 目体系出现类似现象。例如，20~40 目体系下，在瓦斯压力为 1.125 MPa 时，饱和度 40%滑脱效应影响率为 86.6%，饱和度 80%滑脱效应影响率为 76.6%。从表还可知，瓦斯压力增大过程中，滑脱效应影响率对含瓦斯水合物煤体影响率逐渐减小，其他粒径均有类似现象。例如，40~60 目饱和度 60%体系下，瓦斯压力 1.125 MPa 滑脱效应贡献率为 79.0%，瓦斯压力 2.125 MPa 滑脱效应贡献率为 57.3%，减少 21.7%。

图 6 给出了不同粒径和饱和度下含瓦斯水合物煤体滑脱效应影响率与瓦斯压力的变化关系。由图可知，在较低瓦斯压力(<1.25 MPa)时，滑脱效应显著，其相应含瓦斯水合物煤体渗透率影响率较大，随瓦斯压力增大，滑脱效应逐渐减弱，其相应含瓦斯水合物煤体渗透率影响率减小。

表 6 滑脱效应影响率

Table 6 Impact rates of gas slippage effects

瓦斯压力/MPa	滑脱效应影响率/%								
	20~40 目			40~60 目			60~80 目		
	饱和度 40%	饱和度 60%	饱和度 80%	饱和度 40%	饱和度 60%	饱和度 80%	饱和度 40%	饱和度 60%	饱和度 80%
1.125	86.6	77.5	76.6	98.2	79.0	88.9	48.1	61.7	87.2
1.250	83.3	70.7	74.9	97.7	74.1	86.0	39.6	54.6	84.5
1.375	83.7	66.9	75.3	97.3	71.1	84.0	38.1	50.6	84.5
1.500	84.5	57.1	75.6	97.0	68.5	82.2	37.0	47.0	75.8
1.625	84.7	61.2	67.8	96.8	66.5	80.5	34.5	43.7	72.2
1.750	84.8	60.7	65.0	96.5	64.1	78.7	33.9	43.5	70.0
1.875	84.8	59.9	58.9	96.1	61.4	77.2	32.4	42.9	67.9
2.000	84.7	59.2	54.5	95.4	59.5	75.4	32.2	41.6	65.6
2.125	84.3	58.4	51.2	94.7	57.3	73.5	30.1	39.8	61.9

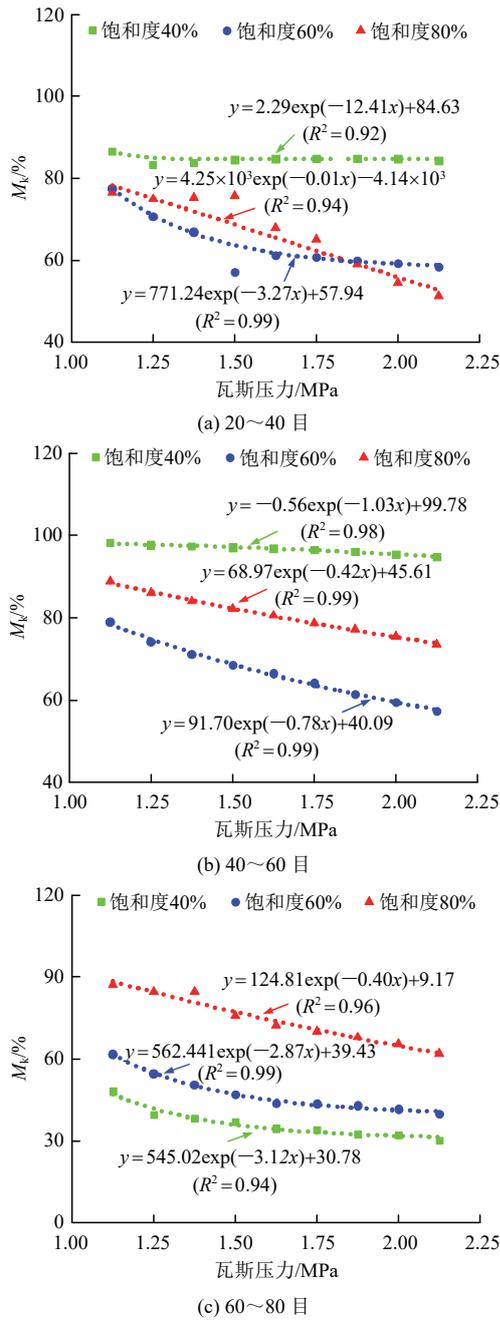


图6 含瓦斯水合物煤体滑脱效应影响率与瓦斯压力的关系  
Fig.6 Relation between gas slippage effects rate of gas hydrate bearing coal and gas pressure

为进一步定量分析含瓦斯水合物煤体滑脱效应影响率与瓦斯压力之间的关系，运用指数函数对滑脱效应影响率与瓦斯压力之间关系进行拟合，拟合度  $R^2$  均大于 0.92，显示出较好拟合效果。因此，指数函数更好反映滑脱效应影响率与瓦斯压力之间关系。

当滑脱效应影响率大于 5%，在工程实践过程中，不能忽视瓦斯渗流中滑脱效应的影响<sup>[61]</sup>。由表 6 可知，滑脱效应对含瓦斯水合物煤体渗透率影响率  $M_k$  为 30.1%~98.2%。因此，在瓦斯水合固化防突技术应用中应考虑滑脱效应对含瓦斯水合物煤体渗

透率的影响。

## 6 结 论

(1) 含瓦斯水合物煤体渗透率与瓦斯压力服从指数函数，即  $k_g = A_1 \exp(-eP_m) + y_0$ ，其渗透率变化可以分为加速减小变化阶段和平稳变化阶段。

(2) 瓦斯压力小于 1.50 或 1.625 MPa 时，渗透率变化率  $B_p$  随瓦斯压力增大而快速增大，瓦斯压力敏感系数  $C_p$  随瓦斯压力增大而快速减小；瓦斯压力大于 1.50 或 1.625 MPa 时，渗透率变化率  $B_p$  和瓦斯压力敏感系数  $C_p$  随瓦斯压力变化趋于平缓。

(3) 水合物饱和度对滑脱效应有着明显的影响，随饱和度增加，滑脱因子呈减小趋势，即滑脱效应减弱。

(4) 滑脱效应影响率与瓦斯压力服从指数函数。滑脱效应影响率为 30.1%~98.2%，在瓦斯水合固化防突技术应用过程中，要考虑滑脱效应对含瓦斯水合物煤体渗透率影响。

## 参考文献(References):

[1] 袁 亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 716 - 725.(YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 716 - 725.(in Chinese))

[2] 袁 亮. 我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 1 - 6.(YUAN Liang. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 1 - 6.(in Chinese))

[3] 白 鑫, 王登科, 田富超, 等. 三轴应力加卸载作用下损伤煤岩渗透率模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(8): 1 536 - 1 546. (BAI Xin, WANG Dengke, TIAN Fuchao, et al. Permeability model of damaged coal under triaxial stress loading-unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(8): 1 536 - 1 546.(in Chinese))

[4] 唐巨鹏, 郝 娜, 潘一山, 等. 基于声发射能量分析的煤与瓦斯突出前兆特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(1): 31 - 42.(TANG Jupeng, HAO Na, PAN Yishan, et al. Experimental study on precursor characteristics of coal and gas outbursts based on acoustic emission energy analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1): 31 - 42.(in Chinese))

[5] 吴 强, 李成林, 江传力. 瓦斯水合物生成控制因素探讨[J]. 煤炭学报, 2005, 30(3): 283 - 287.(WU Qiang, LI Chenglin, JIANG Chuanli. Discussion on the control factors of forming gas hydrate[J].

- Journal of China Coal Society, 2005, 30(3): 283 - 287.(in Chinese))
- [6] 张保勇, 于洋, 高霞, 等. 卸围压条件下含瓦斯水合物煤体应力-应变特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(增 1): 281 - 290. (ZHANG Baoyong, YU Yang, GAO Xia, et al. Stress-strain characteristics of coal mine gas hydrate coal mixture under confining pressure unloading[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(Supp.1): 281 - 290.(in Chinese))
- [7] 宋永臣, 黄兴, 刘瑜, 等. 含甲烷水合物多孔介质渗透性的实验研究[J]. 热科学与技术, 2010, 9(1): 51 - 57.(SONG Yongchen, HUANG Xing, LIU Yu, et al. Experimental study of permeability of porous medium containing methane hydrate[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2010, 9(1): 51 - 57.(in Chinese))
- [8] 刘瑜, 陈伟, 宋永臣, 等. 含甲烷水合物沉积层渗透率特性实验与理论研究[J]. 大连理工大学学报, 2011, 51(6): 793 - 797.(LIU Yu, CHEN Wei, SONG Yongchen, et al. Experimental and theoretical study of permeability character of sediments containing methane hydrates[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2011, 51(6): 793 - 797.(in Chinese))
- [9] 孙可明, 翟诚, 辛利伟, 等. 不同饱和度水合物沉积物的三轴加载渗透率试验[J]. 天然气工业, 2017, 37(12): 61 - 67.(SUN Keming, ZHAI Cheng, XIN Liwei, et al. Triaxial loading permeability experiments on hydrate bearing sediments with different saturations[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(12): 61 - 67.(in Chinese))
- [10] 吴丹梅, 李刚, 李小森, 等. 不同水合物饱和度下渗透率变化特性的实验研究[J]. 化工进展, 2017, 36(8): 2 916 - 2 923.(WU Danmei, LI Gang, LI Xiaosen, et al. Experimental investigation of permeability characteristics under different hydrate saturation[J]. Chemical Industry And Engineering Progress, 2017, 36(8): 2 916 - 2 923.(in Chinese))
- [11] 李刚, 李超, 李小森, 等. 石英砂中甲烷水合物渗透率实验与模型验证[J]. 天然气工业, 2017, 37(12): 53 - 60.(LI Gang, LI Chao, LI Xiaosen, et al. The permeability experiment on the methane hydrate in quartz sands and its model verification[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(12): 53 - 60.(in Chinese))
- [12] LIU W G, WU Z R, LI Y H, et al. Experimental study on the gas phase permeability of methane hydrate-bearing clayey sediments[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 36: 378 - 384.
- [13] WANG H J, WU P, LI Y H, et al. Gas permeability variation during methane hydrate dissociation by depressurization in marine sediments[J]. Energy, 2023, 263: 125749.
- [14] LV J C, JIANG L L, MU H L, et al. MRI investigation of hydrate pore habits and dynamic seepage characteristics in natural gas hydrates sand matrix[J]. Fuel, 2021, 303: 121287.
- [15] 张朝鹏, 高明忠, 张泽天, 等. 不同瓦斯压力原煤全应力应变过程中渗透特性研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 836 - 842.(ZHANG Zhaopeng, GAO Mingzhong, ZHANG Zetian, et al. Research on permeability characteristics of raw coal in complete stress-strain process under different gas pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 836 - 842.(in Chinese))
- [16] 李波波, 高政, 杨康, 等. 考虑温度、孔隙压力影响的煤岩渗透性演化机制分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45(2): 626 - 632.(LI Bobo, GAO Zheng, YANG Kang, et al. Analysis of coal permeability evolution mechanism considering the effect of temperature and pore pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(2): 626 - 632.(in Chinese))
- [17] 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))
- [18] 林柏泉, 周世宁. 煤样瓦斯渗透率的实验研究[J]. 中国矿业学院学报, 1987, 16(1): 21 - 28.(LI Baiquan, ZHOU Shining. Experimental investigation on the permeability of the coal sample containing methane[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1987, 16(1): 21 - 28.(in Chinese))
- [19] 许江, 张敏, 彭守建, 等. 不同温度条件下气体压力升降过程中瓦斯运移规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(6): 1 579 - 1 587.(XU Jiang, ZHANG Min, PENG Shoujian, et al. Experimental study of migration laws of gas during loading-unloading process at different temperatures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(6): 1 579 - 1 587.(in Chinese))
- [20] 赵阳升, 胡耀青, 杨栋, 等. 三维应力下吸附作用对煤岩体气体渗流规律影响的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 651 - 653.(ZHAO Yangsheng, HU Yaoqing, YANG Dong, et al. The experimental study on the gas seepage law of rock related to adsorption under 3D stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(6): 651 - 653.(in Chinese))
- [21] 王刚, 程卫民, 郭恒, 等. 瓦斯压力变化过程中煤体渗透率特性的研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(5): 735 - 739.(WANG Gang, CHENG Weimin, GUO Heng, et al. Study on permeability characteristics of coal body with gas pressure variation[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2012, 29(5): 735 - 739.(in Chinese))
- [22] 隆清明, 赵旭生, 孙东玲, 等. 吸附作用对煤的渗透率影响规律试验研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(9): 1 030 - 1 034.(LONG Qingming, ZHAO Xusheng, SUN Dongling, et al. Experimental study of coal permeability by adsorption[J]. Journal of China Coal Society, 2008,

- 33(9): 1 030 - 1 034.(in Chinese))
- [23] 李波波, 李建华, 杨康, 等. 孔隙压力与水分综合作用的煤岩渗透率演化规律[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(1): 44 - 53.(LI Bobo, LI Jianhua, YANG Kang, et al. Evolution law of coal permeability based on comprehensive effect of pore pressure and water[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2020, 49(1): 44 - 53.(in Chinese))
- [24] 王登科, 刘建, 尹光志, 等. 突出危险煤渗透性变化的影响因素探讨[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3 469 - 3 474.(WANG Dengke, LIU Jiang, YIN Guangzhi, et al. Research on influencing factors of permeability change for outburst-prone coal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3 469 - 3 474.(in Chinese))
- [25] 尹光志, 李小双, 赵洪宝, 等. 瓦斯压力对突出煤瓦斯渗流影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 697 - 702.(YIN Guangzhi, LI Xiaoshuang, ZHAO Hongbao, et al. Experimental study of effect of gas pressure on gas seepage of outburst coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 697 - 702.(in Chinese))
- [26] 魏建平, 李波, 王凯, 等. 受载含瓦斯煤渗透性影响因素分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(2): 322 - 327.(WEI Jianping, LI Bo, WANG Kai, et al. Influencing factors on permeability of loaded gas-bearing coal mass[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2014, 31(2): 322 - 327.(in Chinese))
- [27] HARPALANI S, CHEN G. Influence of gas production induced volumetric strain on permeability of coal[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1997, 15: 303 - 325.
- [28] MENG Y, LI Z, LAI F. Influence of effective stress on gas slippage effect of different rank coals[J]. Fuel, 2021, 285: 119207.
- [29] NIU Y F, MOSTAGHIMI P, SHIKHOV I, et al. Coal permeability: Gas slippage linked to permeability rebound[J]. Fuel, 2018, 215: 844 - 852.
- [30] WANG K, DU F, WANG G D. Investigation of gas pressure and temperature effects on the permeability and steady-state time of Chinese anthracite coal: An experimental study[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 40: 179 - 188.
- [31] ZOU J P, CHEN W Z, YANG D S, et al. The impact of effective stress and gas slippage on coal permeability under cyclic loading[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 31: 236 - 248.
- [32] MENG J Q, NIE B S, ZHAO B, et al. Study on law of raw coal seepage during loading process at different gas pressures[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2015, 25(1): 31 - 35.
- [33] TAO Y Q, LIU D, XU J, et al. Investigation of the Klinkenberg effect on gas flow in coal matrices: A numerical study[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 30: 237 - 247.
- [34] 颜荣涛, 韦昌富, 傅鑫晖, 等. 水合物赋存模式对含水合物土力学特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增2): 4 115 - 4 122.(YAN Rongtao, WEI Changfu, FU Xinhui, et al. Influence of occurrence mode of hydrate on mechanical behaviour of hydrate-bearing soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Supp.2): 4 115 - 4 122.(in Chinese))
- [35] SLOAN E.D. Fundamental principles and applications of natural gas hydrates[J]. Nature, 2003, 426: 353 - 359.
- [36] 吴杨, 崔杰, 廖静容, 等. 不同细颗粒含量甲烷水合物沉积物三轴剪切试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(1): 156 - 164.(WU Yang, CUI Jie, LIAO Jingrong, et al. Experimental study on mechanical characteristics of gas hydrate-bearing sands containing different fines[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(1): 156 - 164.(in Chinese))
- [37] 郝永卯, 薄启炜, 陈月明, 等. 天然气水合物降压开采实验研究[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(2): 217 - 220.(HAO Yongmao, BO Qiwei, CHEN Yueming, et al. Laboratory investigation of pressure development of natural gas hydrates[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(2): 217 - 220.(in Chinese))
- [38] 冯自平, 沈志远, 唐良广, 等. 水合物降压分解的实验及数值模拟[J]. 化工学报, 2007, 48(6): 1 548 - 1 553.(FENG Ziping, SHEN Zhiyuan, TANG Lianguang, et al. Experimental and numerical studies of natural gas hydrate dissociation by depressurization in different scale hydrate reservoirs[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2007, 48(6): 1 548 - 1 553.(in Chinese))
- [39] 李淑霞, 李杰, 靳玉蓉. 不同饱和度的天然气水合物降压分解实验[J]. 化工学报, 2014, 65(4): 1 411 - 1 415.(LI Shuxia, LI Jie, JIN Yurong. Depressurizing dissociation of natural gas hydrate with different saturation[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2014, 65(4): 1 411 - 1 415.(in Chinese))
- [40] ZHAO J F, ZHU Z H, SONG Y C, et al. Analyzing the process of gas production for natural gas hydrate using depressurization[J]. Applied Energy, 2015, 142: 125 - 134.
- [41] WANG S L, YANG M J, WANG P F, et al. In situ observation of methane hydrate dissociation under different backpressures[J]. Energy and Fuels, 2015, 29(5): 3 251 - 3 256.
- [42] ZHAN L, WANG Y, LI X S. Experimental study on characteristics of methane hydrate formation and dissociation in porous medium with different particle sizes using depressurization[J]. Fuel, 2018, 230: 37 - 44.
- [43] YANG M J, ZHENG J N, GAO Y, et al. Dissociation characteristics of methane hydrates in South China Sea sediments by depressurization[J]. Applied Energy, 2019, 243: 266 - 273.
- [44] WAN Q C, SI H, LI B, et al. Energy recovery enhancement from gas

- hydrate based on the optimization of thermal stimulation modes and depressurization[J]. *Applied Energy*, 2020, 278: 115612.
- [45] 张保勇, 李焕如, 高霞, 等. 饱和度对含瓦斯水合物煤体渗透率影响试验研究[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(增 1): 122 - 129.(ZHANG Baoyong, LI Huanru, GAO Xia, et al. Experimental study on effect of saturation on the permeability of gas hydrate bearing coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(Supp.1): 122 - 129.(in Chinese))
- [46] 祝捷, 王学, 于鹏程, 等. 有效应力对煤体变形和渗透率的影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(9): 2213 - 2219.(ZHU Jie, WANG Xue, YU Pengcheng, et al. Effects of the effective stress on deformation and permeability of coal[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(9): 2213 - 2219.(in Chinese))
- [47] 刘杰, 张永利, 崔余岩. 热力耦合作用下含瓦斯煤层渗透特性试验研究[J]. *辽宁工程技术大学学报: 自然科学版*, 2017, 36(12): 1270 - 1274.(LIU Jie, ZHANG Yongli, CUI Yuyan. Experimental study on permeability properties of coal containing gas with thermo-mechanical coupling[J]. *Journal of Liaoning Technical University: Natural Science*, 2017, 36(12): 1270 - 1274.(in Chinese))
- [48] 侯东升, 梁卫国, 张信宁, 等. CO<sub>2</sub> 驱替煤层 CH<sub>4</sub> 中混合气体渗流规律的研究[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(11): 3463 - 3471.(HOU Dongsheng, LIANG Weiguang, ZHANG Beining, et al. Seepage law of mixed gases in CO<sub>2</sub> displacement of coal seam CH<sub>4</sub>[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(11): 3463 - 3471.(in Chinese))
- [49] 巢志明, 王环玲, 徐卫亚, 等. 不同饱和度砂岩渗透率、孔隙度随应力变化规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(3): 665 - 680.(CHAO Zhiming, WANG Huanling, XU Weiya, et al. Variation of permeability and porosity of sandstones with different degrees of saturation under stresses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(3): 665 - 680.(in Chinese))
- [50] 许江, 曹偲, 李波波, 等. 煤岩渗透率对孔隙压力变化响应规律的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(2): 225 - 230.(XU Jiang, CAO Jie, LI Bobo, et al. Experimental research on response law of permeability of coal to pore pressure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(2): 225 - 230.(in Chinese))
- [51] 孙光中, 王公忠, 张瑞林. 构造煤渗透率对温度变化响应规律的试验研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(4): 1042 - 1048.(SUN Guangzhong, WANG Gongzhong, ZHANG Ruilin. An experimental study on response law of permeability of tectonic coal samples to temperature variation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(4): 1042 - 1048.(in Chinese))
- [52] 孟雅, 李治平. 覆压下煤的孔渗性实验及其应力敏感性研究[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(1): 154 - 159.(MENG Ya, LI Zhiping. Experimental study on the porosity and permeability of coal in net confining stress and its stress sensitivity[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(1): 154 - 159.(in Chinese))
- [53] MENG Y, LI Z P, LAI F P. Experimental study on porosity and permeability of anthracite coal under different stresses[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 133: 810 - 817.
- [54] LU H L, LORENSON T D, MOUDRAKOVSKI I L, et al. The characteristics of gas hydrates recovered from the Mount Elbert gas hydrate stratigraphic test well, Alaska North Slope[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(2): 411 - 418.
- [55] TANG G H, TAO W Q, HE Y L. Gas slippage effect on microscale porous flow using the lattice Boltzmann method[J]. *Physical Review E*, 2005, 72(5): 056301 - 056308.
- [56] 胡高伟, 李承峰, 业渝光, 等. 沉积物孔隙空间天然气水合物微观分布观测[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(5): 1675 - 1682.(HU Gaowei, LI Chengfeng, YE Yuguang, et al. Observation of gas hydrate distribution in sediment pore space[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(5): 1675 - 1682.(in Chinese))
- [57] 高霞, 刘文新, 高橙, 等. 含瓦斯水合物煤体强度特性三轴试验研究[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(12): 2829 - 2835.(GAO Xia, LIU Wenxin, GAO Cheng, et al. Triaxial shear strength of methane hydrate-bearing coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(12): 2829 - 2835.(in Chinese))
- [58] ZHANG S J, SANG Q, DONG M Z. Experimental study of pressure sensitivity in shale rocks: Effects of pore shape and gas slippage[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, 89: 103885.
- [59] 程远平, 刘清泉, 任廷祥. *煤力学*[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 62 - 63.(CHENG Yuanping, LIU Qingquan, REN Tingxiang. *Coal mechanics*[M]. Beijing: Science Press, 2017: 62 - 63.(in Chinese))
- [60] 王环玲, 徐卫亚, 巢志明, 等. 致密岩石气体渗流滑脱效应试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(5): 777 - 785.(WANG Huanling, XU Weiya, CHAO Zhiming, et al. Experimental study on slippage effects of gas flow in compact rock[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(5): 777 - 785.(in Chinese))
- [61] 朱光亚, 刘先贵, 李树铁, 等. 低渗气藏气体渗流滑脱效应影响研究[J]. *天然气工业*, 2007, (5): 44 - 47.(ZHU Guangya, LI Xianguai, LI Shutie, et al. A study of slippage effect of gas percolation in low permeability gas pools[J]. *Natural Gas Industry*, 2007, (5): 44 - 47.(in Chinese))