



重复注气压降法煤层渗透率模型与原位测试研究

李伟 杨世龙 周红星 刘金兆

引用本文：

李伟, 杨世龙, 周红星, 等. 重复注气压降法煤层渗透率模型与原位测试研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 193–202.
LI Wei, YANG Shilong, ZHOU Hongxing. Study on the permeability model and in-situ testing of coal seams using repeated injection pressure drop method[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 193–202.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1340>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

注热强化煤层气抽采的试验研究及工业应用

Experimental research and industrial application of heat injection-enhanced coalbed methane extraction
煤炭科学技术. 2022, 50(12): 194–205 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.mcq22-1407>

抽采衰竭期注气增压强采欠压瓦斯技术研究

Study on technology of gas injection pressurization and strong production of underpressured gas during drainage exhaustion period
煤炭科学技术. 2021, 49(8): 125–130 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a6245180-bab1-424f-841d-f44d16c821a7>

深部煤层原位保压保瓦斯取心技术装备及初步应用

Technology and application of in-situ pressure and gas maintaining coring for deep coal seam
煤炭科学技术. 2024, 52(4): 143–154 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0156>

瓦斯压力和应力对裂隙影响下的渗透率模型研究

Study on permeability model under the influence of gas pressure and stress on fracture
煤炭科学技术. 2021, 49(2): 115–121 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.015>

基于非线性渗透率模型的高抽巷精准抽采参数优化

Optimization of precise extraction parameters in high-drainage roadway based on nonlinear permeability model
煤炭科学技术. 2021, 49(5): 100–109 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/7bcd3983-bfc9-4c77-8c10-00fd8c177ecf>

贵州省低渗薄煤层水力增渗模拟及地面抽采试验

Surface permeability improvement and gas control extraction test of low permeability thin coal seam in Guizhou province——Taking the YP-7 well of Shanjiaoshu Mine as an example
煤炭科学技术. 2023, 51(S2): 60–70 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1275>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

李伟, 杨世龙, 周红星, 等. 重复注气压降法煤层渗透率模型与原位测试研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 193–202.

LI Wei, YANG Shilong, ZHOU Hongxing, et al. Study on the permeability model and in-situ testing of coal seams using repeated injection pressure drop method[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 193–202.

重复注气压降法煤层渗透率模型与原位测试研究

李伟^{1,2}, 杨世龙^{1,2}, 周红星^{1,2}, 刘金兆^{1,2}

(1. 中国矿业大学 煤矿瓦斯治理国家工程研究中心, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 煤层渗透率作为衡量瓦斯渗流与抽采难易程度的重要指标, 对其进行准确测定具有重要意义。针对现有方法计算渗透率测试周期长、结果不稳定、模型不完善等问题, 研究煤层渗透率的快速准确测定方法及相应的计算模型。基于煤层中气体径向不稳定流控制方程, 结合不同压差下气体在煤层中的体积流量方程, 建立可利用全区间压降数据测定煤层渗透率的注气压降计算模型。应用 COMSOL 数值模拟软件的达西渗流模块对模型进行求解, 针对现场工程设计中可对压降曲线产生影响的测压气室长度进行单变量处理, 根据模拟结果分析钻孔的测压气室长度可设计为 2.0 m。根据数值模拟结果进行现场布置, 搭建井下重复注气压降试验系统, 结合煤层瓦斯赋存条件和巷道条件施工两组穿层钻孔, 对 2 个测点分别注入两次高于煤层瓦斯压力的补偿气体进行渗透率原位测试, 测试周期分别约为 6 d 和 17 d, 第 2 轮测试的注气压力高于第 1 轮。结合理论推导验证了注气压降过程中煤层瓦斯的雷诺数均处于线性达西渗流段, 瓦斯在煤层中的渗流符合达西定律, 满足计算模型的假设。与传统煤层渗透率计算方法进行了比较, 结果表明: 本方法和径向流量法的计算结果基本一致, 可以满足实际工程需要。重复注气压降法的测试结果稳定可靠, 具备快速测定的优点。

关键词: 重复注气压降法; 煤层渗透率; 注气参数优化; 原位测试; 瓦斯抽采

中图分类号: TD712 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2024)04-0193-10

Study on the permeability model and in-situ testing of coal seams using repeated injection pressure drop method

LI Wei^{1,2}, YANG Shilong^{1,2}, ZHOU Hongxing^{1,2}, LIU Jinzhao^{1,2}

(1. National Engineering Research Center for Coal Mine Gas Control, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Faculty of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Permeability of coal seams is an important indicator for assessing the difficulty of gas seepage and extraction, and its accurate determination holds significant significance. In light of the existing issues with long testing cycles, unstable results, and imperfect models, this research focuses on developing a rapid and accurate method for determining coal seam permeability and the corresponding computational model. Based on the radial unsteady-state gas flow control equation within coal seams and the volume flow equation for gas under different pressure differentials within the coal seam, we have established an injection pressure drop calculation model that utilizes the entire pressure drop dataset for measuring coal seam permeability. The COMSOL numerical simulation software, equipped with the Darcy flow module, is employed to solve the model. To address variables affecting the pressure drop curve in field engineering design, a univariate analysis of the length of the pressure measuring gas chamber is conducted. According to simulation results, the gas chamber length for pressure measurement in boreholes can be designed as 2.0 meters. Field arrangements are made based on the numerical simulation results, and an underground repeated gas injection pressure drop test system is established. This system, in conjunction with coal seam gas occurrence conditions and tunnel conditions, facilitates the drilling of two cross-seam boreholes for each of the two test points. These boreholes are injected with compensatory gas twice, each time exceeding the coal seam gas pressure, to conduct in-situ permeability tests. The testing periods are approximately 6 days and 17 days for the first and second rounds, respectively, with the second round having higher injec-

tion pressures. Combined with theoretical derivation, it was verified that the Reynolds numbers of coal seam gas remained within the linear Darcy flow regime during the gas injection pressure drop process, and gas flow within the coal seam adheres to Darcy's law, thus satisfying the assumptions of the calculation model. When compared to traditional methods for calculating coal seam permeability, the results indicate that this method aligns closely with the radial flow rate method, effectively meeting the requirements of practical engineering applications. The testing results of the repeated gas injection pressure drop method are stable and reliable, offering the advantage of rapid determination.

Key words: repeated injection pressure drop method; coal seam permeability; gas injection parameter optimization; in situ test; gas extraction

0 引言

煤层渗透率是衡量瓦斯在煤层中流动难易程度的重要指标^[1],是评价煤层瓦斯抽放难易程度和瓦斯突出危险性的重要技术参数^[2],直接影响到煤层气的采收率和可采资源量^[3-6]。因此,如何快速准确地测定煤层渗透率对评估煤层瓦斯的可抽性以及进一步制定矿井瓦斯防治措施尤为重要。

煤层渗透率现场测定方法主要有苏联学者提出的马可尼压力法、克氏压力法、克里切夫斯基流量法^[7]以及周世宁院士^[8]提出的径向流量法。蒋承林^[9]通过对以上4种方法的现场实测结果分析,认为径向流量法是更适合我国煤矿环境的煤层透气性测定方法。但刘明举^[10]指出径向流量法需要多次试算才能找到合适的计算公式,而且计算时还存在着无法找到合适计算公式或存在两个互相矛盾的计算公式等问题。

压力恢复曲线法^[11-12]最早应用于油气开发领域,因煤层中瓦斯的运移状态与油气在储层中的流动状态均为达西渗流,其压力恢复过程非常相似,故将该理论引用到煤层中,用于测定煤储层的渗流特征参数。周世宁^[13]运用径向不稳定流控制方程,结合计算机数值解推导出基于压力恢复曲线求解煤层透气性系数的计算公式。刘明举等^[14]、王国际等^[15]通过对上、下向测压钻孔附近瓦斯压力与水压力分布曲线的分析,发现瓦斯压力恢复曲线为双曲线,水压力恢复曲线为直线,前者基于此提出富水煤层测压结果修正方法,后者对该理论进行了现场验证。邹永洛^[16]基于油气井压力恢复理论并结合煤层特点提出了可应用于煤层的瓦斯压力恢复曲线理论和瓦斯计算方法,测定结果与常规方法测得压力较为吻合。煤炭科学研究院抚顺分院及一众学者^[17-24]基于压力恢复曲线中的径向流段计算煤层渗透率,并用实例验证其可行性,同时指出该段的始末点难以确定或借鉴油气井领域相关理论,常常依靠经验公式或寻找与半对数坐标系横轴成45°线来界定。

现阶段我国普遍采用径向流量法测定煤层渗透率,但该方法对现场测定条件要求较高,测试周期长,所需参数多,且径向流场的瓦斯流动方程需进一步完善。压力恢复曲线法需对曲线中径向流段的始末点进行辨识,但现有的识别方法中个人主观选择对测定结果影响较大,且该方法默认径向流段内煤层瓦斯流量为一定值,难以反映煤层中瓦斯的真实渗透特性。据此,笔者基于煤层中气体径向不稳定流控制方程结合不同压差下气体在煤层中的体积流量方程,建立重复注气压降法煤层渗透率快速测定模型,通过原位测试以及与传统方法的比较,验证重复注气压降法测定煤层渗透率的稳定可靠性和快速准确性。

1 注气压降法煤层渗透率模型

瓦斯在煤层的运移受多种因素影响,为了便于研究,做出如下假设:

- 1) 流体与多孔介质均为各向同性均匀的连续介质,且在渗流过程中流场内介质温度不再变化;
- 2) 多孔介质的渗透性及孔隙率不受流体压力变化和流动过程的影响;
- 3) 瓦斯在煤层中的流动为层流渗流,且符合达西定律;
- 4) 煤层顶底板岩层为不透气层,且不含瓦斯。

煤层钻孔测压气室内压力随时间的变化曲线主要受瓦斯在煤层裂隙中达西渗流的影响^[25],该过程可通过连续性方程、达西定律和状态方程来分析^[11-12]。将这3个基本方程联立起来并结合钻孔模型的假设条件,运用叠加原理建立适用于煤层瓦斯压力降落曲线的数学模型,推导出测压气室内压力变化公式:

$$P(t) = P_1 - \frac{1.15q\mu}{\pi h K} \frac{ZTP_n}{Z_1 T_0} \lg \left(\frac{0.111\lambda t P^{\frac{3}{4}}}{\alpha r^2} \right) \quad (1)$$

式中, $P(t)$ 为封孔后 t 时刻对应的测压气室内压力的平方; P_1 为注入钻孔内气体压力的平方; q 为注入钻孔内气体的体积流量; μ 为瓦斯的绝对黏度; h 为测

压气室的长度; K 为煤层渗透率; Z 为气体偏差因子, 取值为 0.98; Z_1 为标准大气压下的偏差因子, 取值为 1; T 为煤体的绝对温度; T_0 为标准状态下的绝对温度, 取值为 273 K; p_n 为标准大气压, 取值为 0.1 MPa; λ 为煤层透气性系数; t 为压力降落时间; α 为煤层瓦斯含量系数; r 为钻孔半径。

重复注气压降法通过向测压气室中注入高于煤层瓦斯压力的氮气实现压降测试, 在压力梯度的驱动下, 测压气室内的气体不断向煤层中渗流, 但测压气室可注气量有限, 无法维持以恒定的流量向煤层中渗流。因此需对压降过程中的瓦斯体积流量求解, 构建变流量压降测试不稳定流动方程。

通过拉普拉斯变换对煤层中瓦斯径向流动微分方程求解, 求出的通解经过拉普拉斯逆变换, 得到径向流场瓦斯压力分布函数^[26]:

$$p(r,t) = p_1 - (p_1 - p) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{r - R_1}{2 \sqrt{\frac{K p_1^2}{\mu \alpha} t}} \right) \right] \quad (2)$$

将式(2)结合达西定律, 通过瓦斯流速表达式求出压降过程中瓦斯体积流量函数式:

$$q(r,t) = \frac{2 \sqrt{2\pi r L K}}{\mu} \frac{p_1 - p}{\sqrt{\frac{K p_1 t}{\mu \alpha}}} \quad (3)$$

式中, L 为钻孔见煤长度; p_1 为注入钻孔内的气体压力; p 为煤层瓦斯压力。

将式(3)代入式(1)并进行单位变换^[27], 可得测压气室内压力随时间的函数式:

$$\sqrt{t}[P_1 - P(t)] = \frac{7.78 \times 10^{-9} r (p_1 - p) Z T}{\sqrt{\frac{K p_1}{\mu \alpha}}} \times \left[\lg \left(t P^{\frac{3}{4}}(t) \right) + \lg \frac{0.111 \lambda}{\alpha r^2} \right] \quad (4)$$

将按式(4)处理后的数据绘制到以 $\lg(t P^{\frac{3}{4}}(t))$ 为 x 轴, $\sqrt{t}[P_1 - P(t)]$ 为 y 轴的半对数坐标系中, 对坐标系中各散点进行线性拟合, 拟合方程的斜率:

$$i = \frac{7.78 \times 10^{-9} r (p_1 - p) Z T}{\sqrt{\frac{K p_1}{\mu \alpha}}} \quad (5)$$

则煤层渗透率:

$$K = \frac{\mu \alpha}{p_1} \left[\frac{7.78 \times 10^{-9} r (p_1 - p) Z T}{i} \right]^2 \quad (6)$$

2 注气压降过程数值模拟

2.1 模型建立及基础参数设置

数值模拟及原位测试研究区域位于某矿Ⅲ41采区4煤层。为保障测试过程中瓦斯压力测定结果的准确性, 选取在Ⅲ41采区-960 m东翼轨道大巷拐角处施工两组穿层钻孔, 每个采样点各收集一组煤样, 并将其编号为C1号,C2号。

将井下收集的两组煤样破碎、筛分至实验所需粒径, 对其进行煤体物性参数、吸附解吸特性和孔隙结构等测试实验。结合煤矿现场及实验室测定数据, 得到数值模拟及原位测试所需参数见表1。

表1 基础参数设置

Table 1 Basic parameter settings

类型	参数	数值	
		C1号	C2号
现场设置参数	钻孔半径/m	0.047	0.047
	钻孔长度/m	33	26
	封孔长度/m	30	23
	见煤长度/m	3.0	2.5
煤层基础参数	初始孔隙率/%	0.04	
	瓦斯动力学黏度系数/(Pa·s)	1.08×10 ⁻⁵	
	煤层温度/K	298	
	煤的视密度/(kg·m ⁻³)	1 350	
	初始瓦斯压力/MPa	1.20	1.14
	瓦斯含量/(m ³ ·t ⁻¹)	9.51	10.65
	初始渗透率/10 ⁻¹⁸ m ²	2.27	3.85
	Langmuir常数(压力)/MPa	1.02	1.64
	Langmuir常数(极限吸附量)/(m ³ ·t ⁻¹)	26.88	39.26
	瓦斯含量系数/(m ³ ·(m ³ ·MPa ^{0.5}) ⁻¹)	12.17	13.96

采用COMSOL数值模拟软件的达西渗流模块建立单孔渗流模型, 根据现场实际情况做相应简化, 建立半径为20 m, 厚度为2 m的三维几何模型, 在模型圆心处设置半径为47 mm的煤层渗透率测试钻孔, 如图1所示。

为尽可能还原现场操作流程, 数值模拟共设置排放、注气、压降3个不同的阶段:

1) 钻孔周围的破碎区煤体渗透率高于弹性区, 且钻孔封孔会使测压空间减小, 导致瓦斯涌出量波动较大, 因此需排放数天后再测稳定的自然瓦斯涌出量。排放阶段设置钻孔边界定压0.1 MPa, 建模时长5 d, 时间步长为0.1 d。

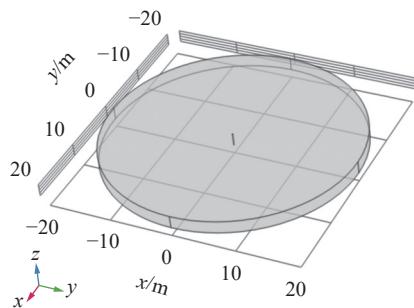


图1 重复注气测定煤层渗透率几何模型

Fig.1 Geometric modeling for measuring coal seam permeability through repeated gas injection

2) 测得稳定的瓦斯流量后,连接高压氮气瓶、连接阀、节流阀和压力表对测压气室进行注气。注气阶段根据不同的模拟条件,设置对应的钻孔边界注气流量,建模时长3 d,时间步长为0.05 d。

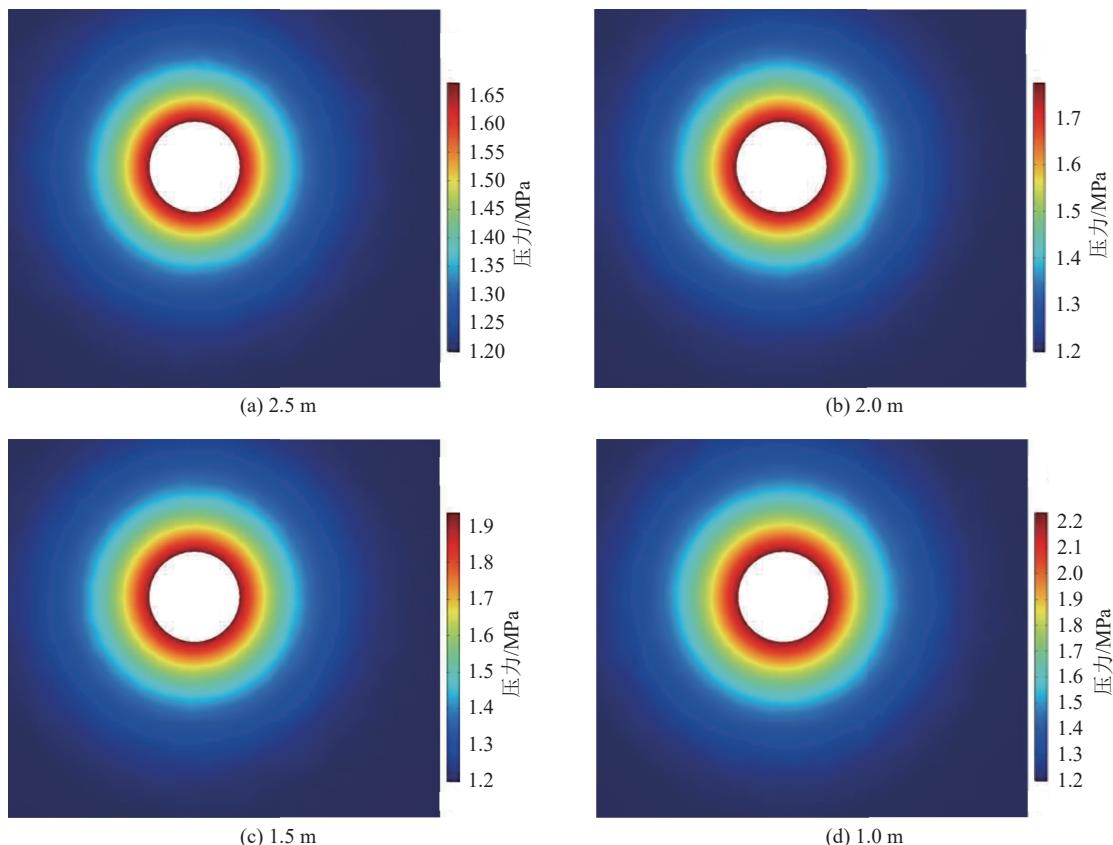


图2 不同长度测压气室的孔周压力分布

Fig.2 Pressure distribution around the orifice of different lengths of compressed air chambers

注入测压气室的气体一部分用于孔周破碎区和塑性区煤体的吸附以及向煤层中渗流,一部分在测压空间内被不断压缩,积聚了一定的弹性能量,最终在测压气室和煤层间形成了图2所示的压力梯度。由图2可以看出,随着测压气室长度减小,测压气室和煤层间的压力梯度不断增大,孔周的总体压力也呈

3) 测压气室压力维持一段时间不再变化后,停止注气,关闭各阀门,观测压力随时间的变化。压降阶段钻孔边界为自由流动边界,建模时长10 d,时间步长为0.05 d。

2.2 可调节变量数值模拟优化

采用压降法对主动测压过程中压力变化数值和速率进行研究时,需考虑现场设计因素对压降曲线的影响,研究表明,压降曲线受测压气室长度影响^[28]。

通过数值模拟研究注气流量和注气时间恒定时,不同长度测压气室的压力变化规律,为原位测试提供理论参考。依据现场测压钻孔布置情况,模拟选择的测压气室长度分别为2.5, 2, 1.5, 1 m, 图2为注气结束后不同长度测压气室对应的测压气室及周围煤层的压力分布图。

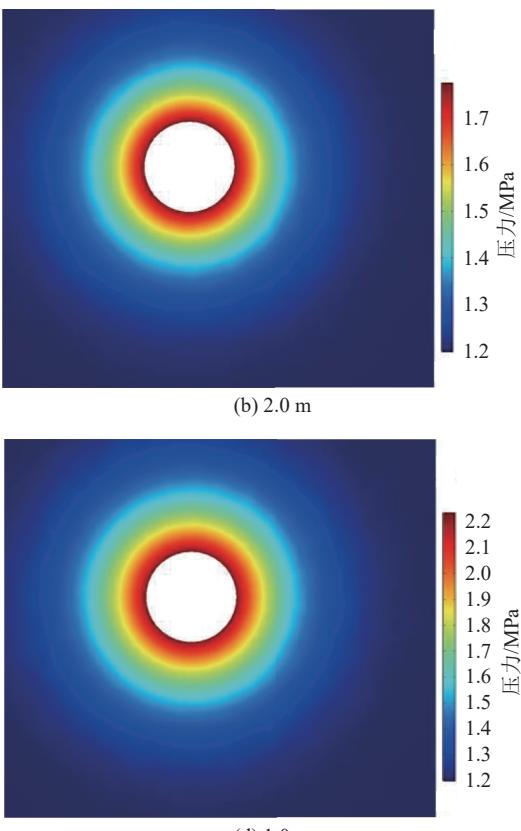


图2 不同长度测压气室的孔周压力分布

现升高趋势。

在压力梯度的驱动下,测压气室内的高压气体开始向煤层渗流,将不同长度测压气室测得的压降曲线绘制到图3中。随着测压气室长度减小,测压气室和煤层间的压力梯度增大,测压气室气体向煤层渗流速度增大,对应的压力曲线下降更快,如图3

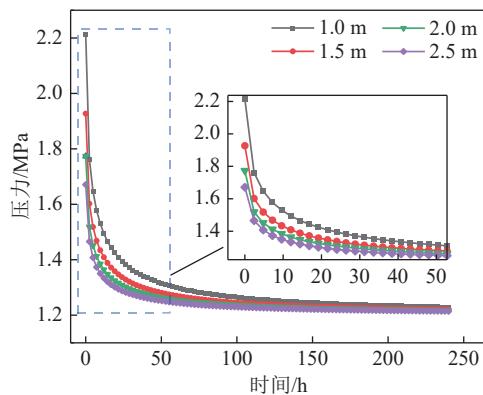


图3 不同长度测压气室对应的压降曲线

Fig.3 Pressure drop curves corresponding to different lengths of compressed air chambers

所示,该规律与以往研究所得到的结论一致。

将图3中的压降数据半对数化处理后进行线性拟合,所得结果如图4所示。计算不同长度测压气室对应的煤层渗透率见表2。

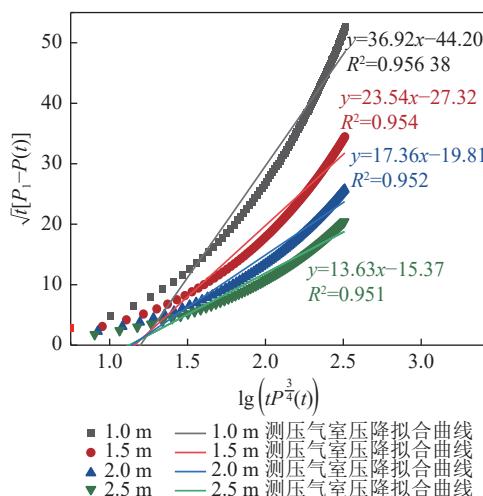


图4 不同长度测压气室对应的半对数压降拟合曲线

Fig.4 Semilogarithmic pressure drop fitting curve to different lengths of compressed air chambers

表2 不同长度测压气室测得的煤层渗透率

Table 2 Permeability of coal seams measured with different lengths of compressed air chambers

测压气室 长度/m	煤层瓦斯 压力/MPa	注气后 压力/MPa	测定渗透 率/ 10^{-18} m^2	模型设置渗 透率/ m^2
1.0		2.23	0.525	
1.5		1.94	0.767	1.0
2.0	1.20	1.78	0.944	
2.5		1.67	1.072	

基于注气压降法模型设置的煤层渗透率,对表2中计算得到的煤层渗透率分析可知,随着测压气室

长度增加,测得的煤层渗透率误差呈现总体降低的趋势。结合现场煤层赋存条件及囊袋式封孔的难易程度,C1号,C2号钻孔的测压气室长度可设计为2.0 m,加上两端囊袋的总长度为3.0 m。

3 重复注气压降法原位测试

3.1 现场试验系统搭建

采用重复注气压降法测定煤层渗透率的试验系统主要分为注气系统、注浆系统和封孔系统,现场试验系统及原理示意如图5、图6所示。



图5 现场试验系统

Fig.5 Field test system diagram

3.1.1 注气系统

注气系统主要由连接阀、高压氮气瓶、节流阀和压力表4个部件组成。连接阀的主要作用是将高压氮气瓶与压力表或节流阀连接,通过控制螺栓的紧固程度实现对注气系统的密封作用;在现场试验过程中由高压氮气瓶提供注入的高压气体;在压力表与气瓶之间安装节流阀,通过控制节流阀旋钮的开放程度来调节流经压力表的流量,同时起到保护压力表的作用;压力表在进行量程选取时应保证其弹性元件在安全的弹性变形范围内工作,现场试验中最大注气压力约2.0 MPa,选取量程为2.5 MPa的压力表来观测孔内数据。

3.1.2 注浆封孔系统

原位测试过程中采用“囊袋封堵-水泥砂浆后注”的注浆封孔方法。煤矿井下常用的囊袋式封孔器为FKJW-50/0.5型矿用封孔器,该封孔器主要由前端囊

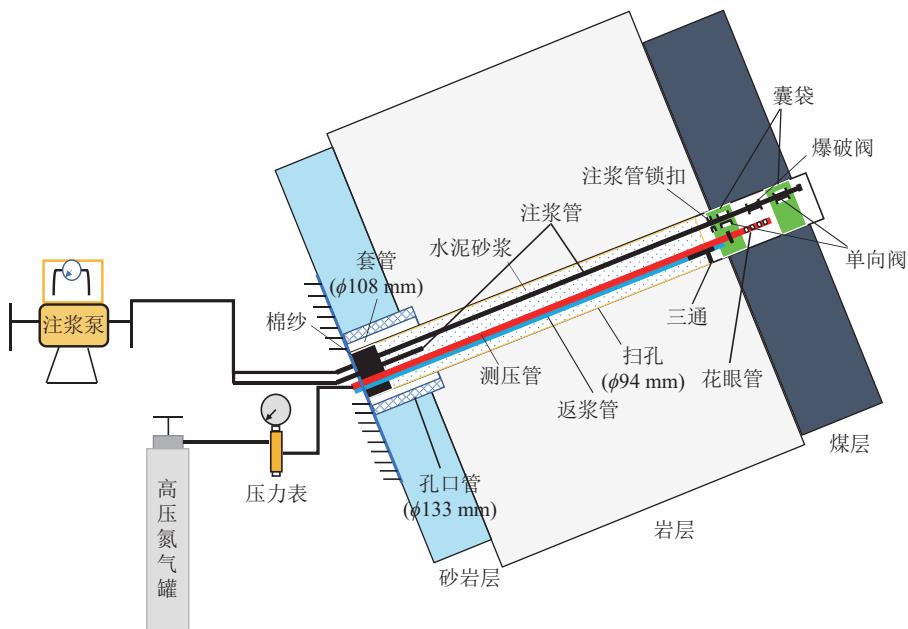


图 6 试验系统原理

Fig.6 Schematic diagram of the test system

表 3 重复注气压降法计算的煤层渗透率

Table 3 Calculation of coal seam permeability using repeated injection pressure drop method

钻孔编号	煤层瓦斯压力/MPa	注气压力/MPa	煤层渗透率/ 10^{-18} m^2
C1号	1.20	1.5	2.124
		2.0	0.941
C2号	1.14	1.6	3.680
		1.8	1.248

袋、注浆管、爆破阀及后端囊袋组成,通过注浆泵对前后两段囊袋进行注浆,使其膨胀,进而封堵出密闭空间。当注浆压力大于0.5 MPa时,两囊袋间注浆管上的爆破阀破裂,浆液随即向封堵空间内涌入,即可实现中间段封堵。为保证本次试验测压空间不被封堵,将封孔器爆破阀的爆破压力调节至3.0 MPa,使其在煤层中形成上下封堵的2个囊袋的同时,保证封闭空间内注浆管上的爆破阀不破裂,在煤层中形成气体可径向流动的测压空间,如图7所示。待煤层下端囊袋内浆液固化后,注入水泥砂浆封堵囊袋下端的钻孔空间。

3.2 现场煤层渗透率计算

在井下注气过程中,当孔内压力达到预设压力后适当调小阀门,以稳定的流量向测压气室周围裸露的煤层补充压力,当压力表读数稳定在预设压力一段时间后,停止注气,一天3班观察孔内的压力变化。C1号,C2号钻孔重复注气不同阶段的压力变化及处理后的半对数曲线如图8所示。

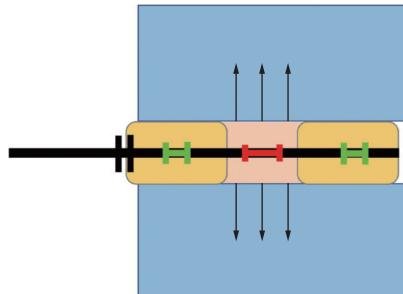


图 7 囊袋封隔的密闭空间内气体径向流动示意

Fig.7 Schematic diagram of radial flow of gas in the enclosed space sealed by bags

每轮压降测试前期,测压气室内补充的高气压随时间呈指数规律衰减,压降测试后期,测压气室内的压力缓慢恢复至煤层瓦斯压力。第1轮注气的一部分气体用于平衡孔周煤体的吸附,所测渗透率偏离煤层实际渗透率。在第1轮压降测试达到平衡后进行重复注气,第2轮设定的注气压力高于第1轮。经过一轮注气煤体的吸附平衡后,二轮测试中高压气体向煤层渗流更充分,测得的煤层渗透率更接近真实值。

将C1号,C2号钻孔压降测试半对数曲线的线性拟合方程斜率及相关数据代入式(6),计算得到对应的煤层渗透率,见表3。

井下测定过程中,在平均应力恒定的条件下,不断升高的孔隙压力使煤层所受的有效应力减小,煤岩体孔隙和裂隙的压缩抑制作用相对减弱,对煤层渗透率起促进作用。随着不断注入高压气体,煤基

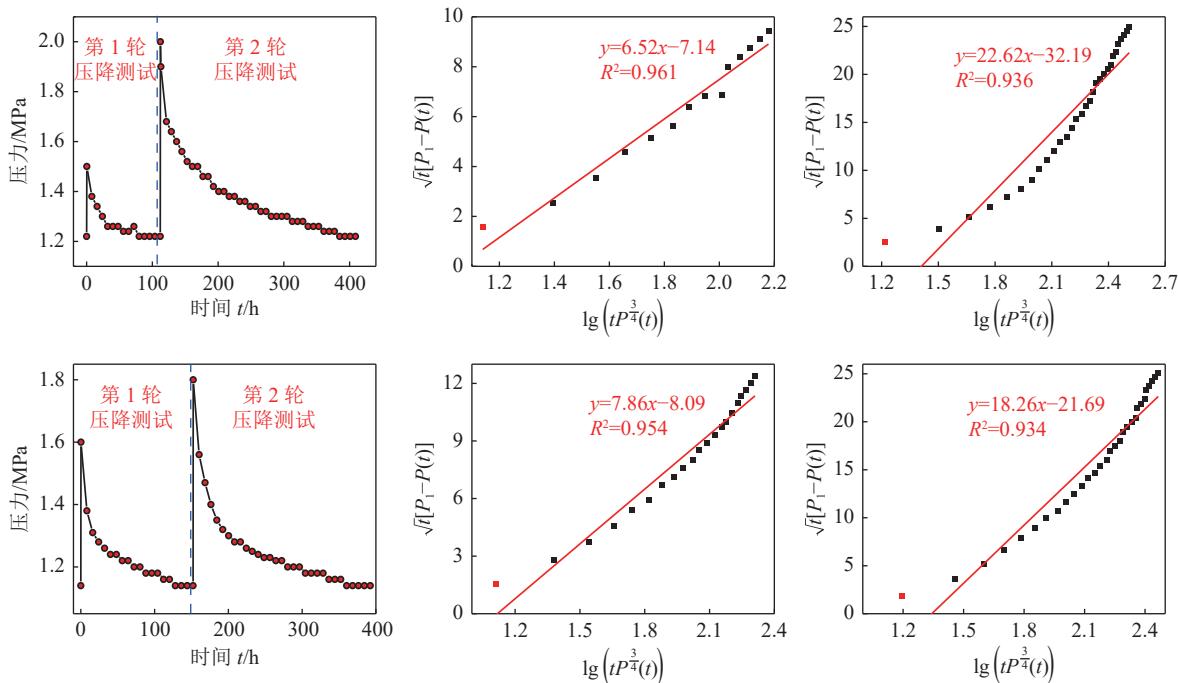


图 8 C1 号,C2 号孔不同阶段的压力变化及半对数曲线

Fig.8 Pressure changes and semi logarithmic curves at different stages of No. C1 and No. C2 boreholes

质的吸附量也不断上升,煤体裂隙间的有效渗流通道被持续压缩,对渗透率起到一定程度的抑制作用。在注气压降法原位测试的孔隙压力升高范围内,煤体的吸附膨胀效应对煤层渗透率的抑制作用始终大于有效应力减小对渗透率的促进作用,在未达到吸附量饱和之前,裂隙渗透率的降低态势将始终主导煤层总渗透率的变化趋势。

4 重复注气压降法可靠性分析

4.1 煤层瓦斯达西渗流验证

在建立注气压降法煤层渗透率模型时,曾假设瓦斯在煤层中的渗流状态符合达西定律。重复注气压降法通过注入高压氮气的方式加快煤层中瓦斯的渗流速度,以达到快速测定渗透率的目的,但瓦斯快速流动可能会导致其渗流状态不符合达西定律,需对瓦斯的流动状态进行验证。

多孔介质中流体的流动状态往往通过雷诺数 Re 来判定,雷诺数的物理意义是惯性力与粘滞阻力的比值,其数值的变化可以反应出流体在多孔介质中的渗流状态。巴甫洛夫斯基^[29]在雷诺数表达式的基础上提出的 Reynolds 表达式,并给出层流的临界雷诺数为 7~9。研究人员^[30-34]经过大量实验的总结,将雷诺数与无量纲阻力系数 f 综合起来,归纳出渗流全过程的 $f-Re$ 关系,并将流体运移划分为 5 个流态,其中达西渗流对应的雷诺数边界为 $10^{-4} \sim 10$ 。因此当雷诺数介于 $10^{-4} \sim 7$ 时,瓦斯在煤层中的渗流

状态为层流,且遵循线性达西定律。

根据式(3)可计算当 $r=R_1$ 时煤层中径向流场瓦斯的渗流速度,代入雷诺数的计算公式得:

$$Re = \frac{\rho d}{n\mu} \frac{\sqrt{2\alpha K}(p_1 - p)}{\sqrt{\pi p_1 t \mu}} \quad (7)$$

将现场及实验室测定的煤层物性参数代入式(7),可得不同时刻对应的雷诺数为

$$Re = \frac{2 \times 10^{-3}}{\sqrt{t}} \quad (8)$$

分析上式,随着时间增加,测压气室和煤层间的压差逐渐降低,压力梯度驱动的瓦斯渗流速度不断降低,对应的雷诺数也呈现不断降低的趋势。在现场通常每 8 h 观测一次数据,第 1 次观测时间 $t=1/3$ d,此时对应的雷诺数为 3.46×10^{-3} ,煤层中瓦斯的流动规律为层流;当 $t=400$ d 时达到临界雷诺数为 10^{-4} ;当观测时间继续增加时,瓦斯的渗流状态为低速非线性,不符合达西渗流。

重复注气压降法通过主动测压的形式,缩短测压气室内压力恢复至煤层瓦斯压力的时间,两轮的观测周期一般在 17 d 以内,测试过程中煤层瓦斯的雷诺数均处于线性达西渗流段,满足多孔介质中层流的判定条件,瓦斯在煤层中的渗流符合达西定律。

4.2 计算结果可靠性分析

我国煤矿井下普遍采用径向流量法测定煤层渗透率,但该方法测试周期长,所需参数多,在测定流

量时使用不同的流量计所得结果差异大,且径向流场的瓦斯流动方程需进一步完善。重复注气压降法向测压气室内注入高压补偿气体以减少气体动态平衡时间,缩短测试周期,通过构建变流量压降测试不稳定流动方程,建立压降数据全区间可用的计算模型,省去辨识径向流段始末的环节,消除了人为因素对测试结果的影响。因此在重复注气压降法计算结果可靠的前提下,用该方法测定煤层渗透率更加快速准确。

煤层透气性系数在煤壁暴露初期很不稳定,径向流量法一般经过10 d以上的排放时间后,测出的渗透率值趋于稳定^[35]。采用径向流量法计算得到C1号孔的煤层渗透率为 $2.271 \times 10^{-18} \text{ m}^2$,C2号孔的煤层渗透率为 $3.850 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 。径向流量法计算渗透率的相关参数见表4。

表4 煤层基础参数

Table 4 Basic parameters of coal seams

钻孔编号	初始瓦斯压力/MPa	瓦斯含量系数/ $(\text{m}^3 \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{MPa}^{0.5})^{-1})$	钻孔半径/m	排放时间/d	钻孔流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$
C1号	1.20	12.17	0.047	13.7	0.51
C2号	1.14	13.96	0.047	10.8	0.64

将重复注气压降法与径向流量法的计算结果进行对比分析,以评估压降法测定煤层渗透率的可靠性,2种方法计算所得的煤层渗透率见表5。

表5 重复注气压降法与径向流量法计算的煤层渗透率值

Table 5 Coal seam permeability values calculated by repeated injection pressure drop method and radial flow rate method

钻孔编号	渗透率/ 10^{-18} m^2	
	重复注气压降法	径向流量法
C1号	2.124	
	0.941	2.271
C2号	3.680	
	1.248	3.850

对两种煤层渗透率计算方法所得结果进行分析,两种方法测定的渗透率均在同一数量级。现场工程应用中煤层渗透率通常以数量级为划分单位,因此以径向流量法测定结果为基准,采用重复注气压降法计算煤层渗透率的结果可靠,证明了重复注气压降法计算模型求解煤层渗透率的方法是可行的。

5 结 论

1) 基于煤层气体径向不稳定流控制方程,建立

了煤层瓦斯压力降落曲线的数学模型,并结合压降过程中瓦斯体积流量函数,构建了重复注气压降法煤层渗透率计算模型。并通过数值模拟的方法得到了现场测试条件的优化参数。

2) 搭建井下重复注气压降试验系统进行煤层渗透率原位测试,结合煤层瓦斯赋存条件,设计了渗透率原位测试现场方案,并开展了每个钻孔两轮注气压降渗透率测试,第1、2轮压降测试周期分别约为6 d和17 d,第2轮测试的注气压力高于第1轮。

3) 基于建立的压降法渗透率模型和现场测试,计算得到了两轮注气对应的煤层渗透率,两轮的测试计算结果接近且均在同一数量级,与径向流量法测试结果一致,满足工程需求。显示了重复注气压降法渗透率测试具有较高的可靠性与稳定性,并具备了快速测试优点。

参考文献(References):

- [1] 李波波,王斌,杨康,等.煤岩孔裂隙结构分形特征及渗透率模型研究[J].煤炭科学技术,2021,49(2):226–231.
LI Bobo, WANG Bin, YANG Kang, et al. Study on fractal characteristics of coal and rock pore fissure structure and permeability model[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 226–231.
- [2] 尧春洪,李波波,高政,等.孔隙压力升降条件下煤岩双孔隙渗透率模型研究[J].煤炭科学技术,2022,50(11):116–121.
YAO Chunhong, LI Bobo, GAO Zheng, et al. Study on dual pore permeability model of coal under the conditions of pore pressure increasing and decreasing[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(11): 116–121.
- [3] 蒋长宝,余塘,段敏克,等.瓦斯压力和应力对裂隙影响下的渗透率模型研究[J].煤炭科学技术,2021,49(2):115–121.
JIANG Changbao, YU Tang, DUAN Minke, et al. Study on permeability model under the influence of gas pressure and stress on fracture[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 115–121.
- [4] 徐超,李小芳,陈晴晴,等.基于非线性渗透率模型的高抽巷精准抽采参数优化[J].煤炭科学技术,2021,49(5):100–109.
XU Chao, LI Xiaofang, CHEN Qingqing, et al. Optimization of precise extraction parameters in high-drainage roadway based on nonlinear permeability model[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(5): 100–109.
- [5] 李伟,钟艺,郭敬杰,等.不同类型煤颗粒侧限压缩变形破碎特性试验研究[J].煤炭科学技术,2022,50(2):163–170.
LI Wei, ZHONG Yi, GUO Jingjie, et al. Experimental study on confined compression deformation and breakage characteristics for different types of coal particles[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 163–170.
- [6] 傅雪海,许行行,王强,等.煤层气异常成分的界定、分布及其成因研究进展[J].煤炭科学技术,2023,51(1):343–352.
FU Xuehai, XU Hanghang, WANG Qiang, et al. Review of research on definition, distribution and causes of abnormal coalbed

- methane composition[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 343–352.
- [7] 切尔诺夫 O N, 罗赞采夫 E C. 瓦斯突出危险煤层井田的准备 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1980.
- [8] 周世宁. 煤层瓦斯赋存与流动理论 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1997: 11–17.
- [9] 蒋承林. 煤层透气性系数测定方法的研究 [J]. 中国矿业学院学报, 1988, 13(2): 80–86.
- JIANG Chenglin. Study on measurement method of permeability coefficient of coal seam[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1988, 13(2): 80–86.
- [10] 刘明举, 何学秋. 煤层透气性系数的优化计算方法 [J]. 煤炭学报, 2004, 29(1): 74–77.
- LIU Mingju, HE Xueqiu. Optimistic calculation method of gas seepage coefficients[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(1): 74–77.
- [11] 刘能强. 实用现代试井解释方法 (第五版) [M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 28–35.
- [12] 阿曼纳特 U. 乔德瑞. 油井试井手册 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 238–239.
- [13] 周世宁. 从钻孔瓦斯压力上升曲线计算煤层透气系数的方法 [J]. 中国矿业学院学报, 1982(3): 8–15.
- ZHOU Shining. Calculation of gas permeability coefficient of coal seams by means of the curve of rising gas pressure in boreholes[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1982(3): 8–15.
- [14] 刘明举, 陈亮, 曾昭友. 基于压力恢复曲线的富水煤层瓦斯测压结果修正 [J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(7): 71–74.
- LIU Mingju, CHEN Liang, ZENG Zhaoyou. Correction on pressure measured results of watery seam gas based on pressure recovered curve[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(7): 71–74.
- [15] 王国际, 岑培山, 田坤云, 等. 上倾角含水瓦斯压力测压孔压力恢复曲线分析 [J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(3): 52–54.
- WANG Guoji, CEN Peishan, TIAN Kunyun, et al. Analysis on pressure recovery curve of water bearing gas pressure measuring borehole with upward inclination[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(3): 52–54.
- [16] 邹永洛. 煤层瓦斯压力快速测定技术应用研究 [J]. 煤矿安全, 2019, 50(4): 138–141.
- ZOU Yongming. Application research on rapid determination technology of coal seam gas pressure[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(4): 138–141.
- [17] 煤炭科学研究院抚顺研究所, 焦作矿务局研究所. 应用压力恢复曲线测定煤层瓦斯渗流参数 [J]. 煤矿安全, 1986, 17(12): 1–6.
- Fushun Research Institute of Coal Science RESEARCH Institute, Jiaozuo Mining Bureau RESEARCH Institute. Application of pressure recovery curve to determine gas seepage parameters in coal seams[J]. Safety in Coal Mines, 1986, 17(12): 1–6.
- [18] 雷文杰, 雷建伟, 杨宏民, 等. 钻孔瓦斯压力恢复法求解煤层透气性系数 [J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(6): 28–33.
- LEI Wenjie, LEI Jianwei, YANG Hongmin, et al. Borehole gas pressure build-up to evaluate the permeability of coal seam[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(6): 28–33.
- [19] 傅永帅. 基于压力恢复曲线测定煤层瓦斯参数研究 [J]. 煤炭技术, 2018, 37(2): 181–183.
- FU Yongshuai. Study on gas parameters of coal seam based on pressure recovery curve[J]. Coal Technology, 2018, 37(2): 181–183.
- [20] 陶云奇, 国本正, 刘东. 煤矿井下煤层渗透率直接测定方法研究及应用 [J]. 煤矿安全, 2018, 49(3): 140–143, 147.
- TAO Yunqi, YAN Benzheng, LIU Dong. Study and application of direct determination method in coal seam permeability of coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(3): 140–143, 147.
- [21] 王剑英. 寺家庄井田 8 号煤层气储层物性特征研究 [J]. 煤, 2019, 28(11): 5–8, 80.
- WANG Jianying. Physical properties characteristics of the no. 8 coalbed methane reservoirs in Sijiazhuang minefield[J]. Coal, 2019, 28(11): 5–8, 80.
- [22] 关金锋, 王永周, 马静驰, 等. 古汉山矿二 1 煤层渗透性优势方位及对瓦斯抽采的影响 [J]. 煤矿安全, 2019, 50(6): 185–187, 191.
- GUAN Jinfeng, WANG Yongzhou, MA Jingchi, et al. Dominant permeability direction and its influence on gas drainage of II 1 coal seam in guanshan coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(6): 185–187, 191.
- [23] 郝家兴, 刘垒, 王彦敏. 压力恢复曲线测定煤层瓦斯赋存参数的试验研究 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2020(14): 64–65.
- HAO Jiaxing, LIU Lei, WANG Yanmin. Experimental study on the measurement of coal seam gas storage parameters by pressure recovery curve[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2020(14): 64–65.
- [24] 唐建新, 鲁思佳, 袁芳, 等. 极近距离煤层开采围岩应力及煤体渗透率演化规律 [J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(3): 160–165.
- TANG Jianxin, LU Sijia, YUAN Fang, et al. Evolution law of surrounding rock stress and coal permeability in very close coal seam mining[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(3): 160–165.
- [25] YU P, LIU Y T, WANG J, et al. A new fracture permeability model: influence of surrounding rocks and matrix pressure[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 193: 107320.
- [26] 周睿, 闫斌移. 穿层钻孔径向流量推算煤层瓦斯压力方法研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S1): 3147–3152.
- ZHOU Rui, YAN Binyi. Research on calculating gas pressure with gas flow in crossing borehole[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S1): 3147–3152.
- [27] 陈元千. 油气藏工程常用公式的单位变换 [J]. 油气井测试, 2011, 20(1): 1–9.
- CHEN Yuanqian. Unit conversion of often-used formulas in petroleum reservoir engineering[J]. Well Testing, 2011, 20(1): 1–9.
- [28] 游继军, 蒋承林, 汤海林. 主动式测压瓦斯压降曲线的影响因素分析 [J]. 煤矿安全, 2012, 43(12): 154–156.

- YOU Jijun, JIANG Chenglin, TANG Hailin. Analysis on influence factors for gas pressure decline curve of active pressure measurement[J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(12): 154–156.
- [29] 孙东坡. 水力学 [M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2007: 187.
- [30] SCHROTT B M, KLAVE G T, SCHUTTENHELM R T. Surface and subsurface expressions of gas seepage to the seabed[J]. Examples from the Southern North Sea Marine and Petroleum Geology, 2005, 22(4): 499–515.
- [31] BROWN A. Evaluation of possible gas microseepage mechanisms[J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(11): 1775–1789.
- [32] SASSEN R, MILKOV A V, De FREITAS D A. Gas venting and gas hydrate stability in the Northwestern Gulf of Mexico Slope: Significance to Sediment Deformation[A]//Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference[C]. Houston: Offshore Technology Conference, 2002: 377–383.
- [33] KLUSMAN R W. Detailed compositional analysis of gas seepage at the National Carbon Storage TEST Site, TEAPOT Dome, Wyoming, USA [J]. Applied Geochemistry, 2006, 21(9): 1498–1521.
- [34] VINSOT A, APPELO C J, CAILTEAU C. CO₂ data on gas and pore water sampled in situ in the Opalinus Clay at the Mont Terri rock laboratory[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2008, 33(1): 54–60.
- [35] 马跃龙, 林柏泉. 煤层透气性系数的测定及其分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 1998(3): 240–243.
- MA Yaolong, LIN Baiquan. The determination and analysis of permeability coefficient in coal seam[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 1998(3): 240–243.