



基于真三轴试验装置的岩石渗流密封方式改进及实验研究

武鹏飞^{1,2}, 雒小飞^{1,2}, 王建美^{1,2}, 宋晓夏², 王建龙^{1,2}

(1. 太原理工大学 原位改性采矿教育部重点实验室, 太原 030024; 2. 太原理工大学 矿业工程学院, 太原 030024)

摘要: 国内现有的非常规油气储层的渗透性测试大多采用圆柱试样, 通过假三轴试验装置进行测试, 而真三轴条件下立方体试件棱边大多存在棱边串流与端面密封不严的缺陷。基于现有真三轴试验装置, 以及大量的实验经验, 针对现有的立方体试件单橡胶套渗流密封方式进行改进。介绍了嵌套式“上下密封套”结构特征, 特别对棱边区的密封进行了设计, 提出了密封套顶-底端面凹陷型内嵌“单孔网槽导流板”结构设计, 并对顶部传压板的尺寸进行了讨论。对 100 mm×100 mm×100 mm 立方体煤样进行了真三轴渗流试验分析, 得到了不同入口渗透压力真三轴围压条件下的渗透率。该密封方法的改进有助于提高科研单位及测试中心对原位地应力条件下非常规油气储层渗透性测试精度, 并提高高端科研人才的实践创新能力与科研素养。

关键词: 非常规油气储层; 真三轴试验装置; 渗透性; 密封套; 密封方法

中图分类号: TD802

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20220470

Improvement of the Seepage Sealing Method and Test of Rock Based on the True Triaxial Test Device

WU Pengfei^{1,2}, LUO Xiaofei^{1,2}, WANG Jianmei^{1,2}, SONG Xiaoxia², WANG Jianlong^{1,2}

(1. Key Laboratory of In-situ Property-improving Mining of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Most of the existing unconventional oil and gas reservoirs in China are tested with cylindrical samples by the false triaxial test device. However, under the condition of true triaxial, the edges of cube specimens are mostly deficient in edge flow and face seal. Based on the existing true triaxial test device and a large number of experiments, the existing seepage sealing method of cube specimen with single rubber sleeve was improved. This paper introduces the structural features of nested sealing sleeve, especially the design of the seal in the edge area, puts forward the structural design of the top and bottom end of the sealing sleeve concave with a single hole mesh groove, and discusses the size of the top pressure transfer plate. Taking the 100 mm×100 mm×100 mm cubic coal sample as an example, the true triaxial seepage test analysis was carried out, and the permeability under different inlet seepage pressures under true triaxial confining pressures was obtained. The improvement of the sealing method is helpful to improve the permeability test accuracy of unconventional oil and gas reservoirs under in-situ stress conditions in scientific research institutions and testing centers, and improve the practical innovation ability and scientific research accomplishment of high-end scientific research talents.

Key words: unconventional oil and gas reservoirs; true triaxial test device; permeability; seal sleeve; sealing method

煤系气、页岩气、致密气等非常规油气资源^[1-4]作为洁净、优质能源和化工原料, 其开发和利用可以缓解我国能源供需矛盾, 改善能源

结构, 减少温室效应, 受到了国际社会的广泛关注。

非常规油气储层的渗透性作为非常规油气开

收稿日期: 2022-07-28; 修回日期: 2022-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(51904196); 山西省科技重大专项项目(20201102002); 山西省基础研究计划面上项目(202103021224059)。

作者简介: 武鹏飞(1984-), 男, 博士, 高级实验师, 主要从事岩石力学、碳封存、煤层致裂增渗煤层气开采理论与技术等方面研究。E-mail: wupengfei@tyut.edu.cn

采技术的一项关键技术参数，是衡量非常规油气采收效率的重要指标^[5-7]。国内现有的非常规油气储层渗透性的测试过程中，为了便于试件密封，大多采用了假三轴圆柱形试件^[8-11]，但试件在假三轴条件下的应力载荷并不能真实还原原位三向地应力，也就无法真实测试原位三向地应力条件下的渗透性。

真三轴加载状态下渗流实验过程中立方体试件的密封，涉及 4 个侧面、上下 2 个端面(进出端带含“单孔多槽板”)、12 条棱边窜流的共性密封问题。而目前国内真三轴设备多进行力学实验，在立方体试件渗流实验的密封问题上，大多存在棱边窜流或某个试件面密封不严的困扰，公布号 CN 107907467 A^[12]“一种施加非均匀载荷的真三轴渗流实验装置”、公布号 CN 104677807 A^[13]“一种大尺寸土样真三轴渗流特性与强度试验装置”、公布号 CN 108918250 A^[14]“围岩或土作用下的真三轴渗流试验装置和试验方法”、公布号 CN 110220834 A^[15]“可视化单裂隙岩石应力-渗流耦合试样的三轴渗流试验方法”的中国发明专利，在渗流密封过程中均未提及具体的立方体试件的渗流如何密封的方法。

文献 [16-20] 基于假三轴条件对煤岩的不同渗流特性试验进行了试验研究，但真三轴条件下的渗流实验研究鲜见报道，其根本原因在于当前立方体试件的密封存在缺陷或不足，其密封方式有待进一步完善改进。

公布号为 CN 104655495 A^[21] 的中国发明专利，公开了“一种煤岩高温高压真三轴压裂渗流试验装置与试验方法”，该专利真三轴渗流试件的密封采用了耐超高温密封胶均匀涂抹在试件外围与“多孔槽板”一起进行密封的方法。该方法在试验过程中将耐超高温密封胶均匀涂抹在试件外围，在涂胶过程中操作较繁杂，涂抹的均匀性及厚度特别是在棱边的交汇处难以得到保障，需要对现有的真三轴煤岩单向渗流试验的密封方式做进一步的改进。

1 嵌套式密封套设计

1.1 单孔网槽导流板结构

为了方便密封以及保证密封效果，渗流试验涉及上下端面的出-入口导流槽板区别于以往的“多孔槽板”，设计采用单孔注入，单孔收集，

上下端面采用网格槽方式进行导流的“单孔多槽”薄钢板。考虑三轴载荷条件下试件的一定变形量，以及为了防止棱边的窜流，保证棱边处密封效果，设计该“单孔网槽”板的尺寸比试件尺寸小 5~10 mm，渗流“网格槽”槽深为 0.5~1.0 mm，结构示意图如图 1 所示。

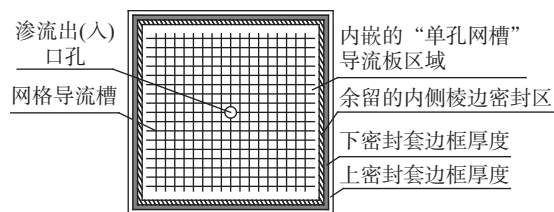


图 1 单孔网槽导流板内嵌入“上密封套”顶端面结构图

单孔网槽导流板由于有一定的厚度(约 1.5~2.0 mm)，又由于岩石试件受载后会产生一定变形量，故导流板尺寸应小于试件一定的尺寸，置于试件上下端时，在试件的棱边会余留出一定的宽度区域。

1.2 嵌套密封套结构

上下嵌套的密封套结构如图 2 所示，将下密封套与上密封套进行嵌套组合，三轴应力通过传压板施加载荷于密封套实现密封。综合考虑棱边区域密封的宽度及试件在受载条件下的变形，设计将该单孔网槽导流板内嵌入上下密封套的端部，在密封套端面留出一个“凹”型的内嵌区域，预留出的一定宽度的橡胶棱边区域在上流改下端传压板载荷作用下起到密封端面棱边区域的效果。

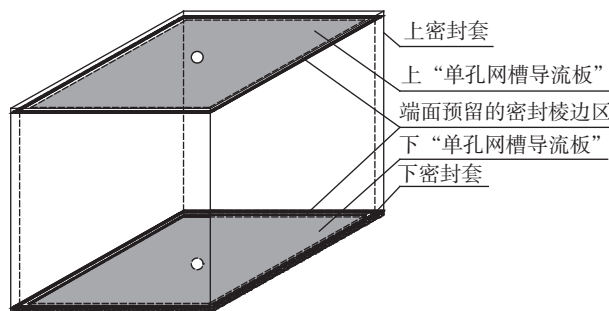


图 2 “上下密封套”嵌套结构图

下密封套采用顶部敞口的形式如图 3(a)所示，内部尺寸与立方体试件的长×宽×高保持一致，底部端面结构主要包含一个与底部“单孔网槽导流板”厚度及长宽尺寸相适应的“凹”型的

内嵌区域, 以及四周预留的橡胶棱边区域。

上密封套的结构如图 3(b)所示, 该密封套采用底部敞口的形式, 内部尺寸与下密封套外边框长×宽×高保持一致, 可将下密封套内嵌置入上密封套, 顶部端面结构主要包含一个与顶部“单孔网槽导流板”厚度及长宽尺寸相适应的“凹”型的内嵌区域, 以及四周预留的橡胶棱边区域。

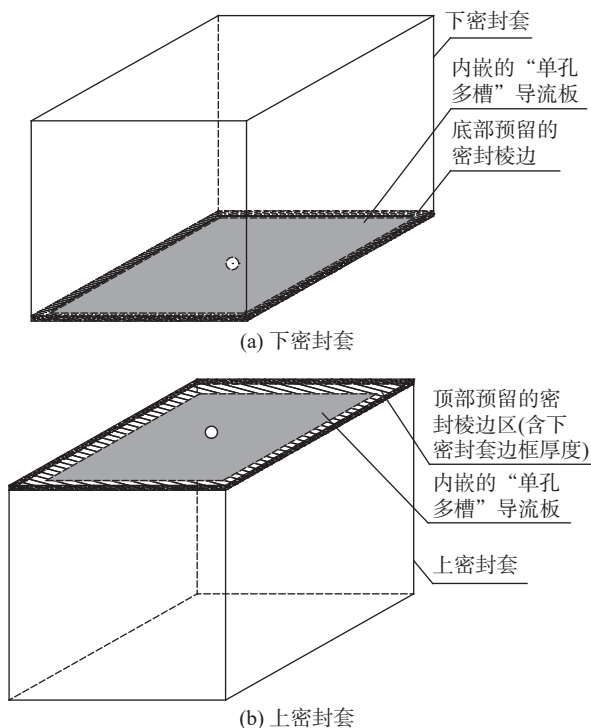


图 3 “密封套”嵌置“单孔网槽导流板”的结构图

试件的 4 个侧面依靠相互错位的传压板, 如图 4 所示, 传递压力将密封套侧面与试件贴合实现侧面密封(包含了侧面的棱边区域), 从而防止棱边窜流。

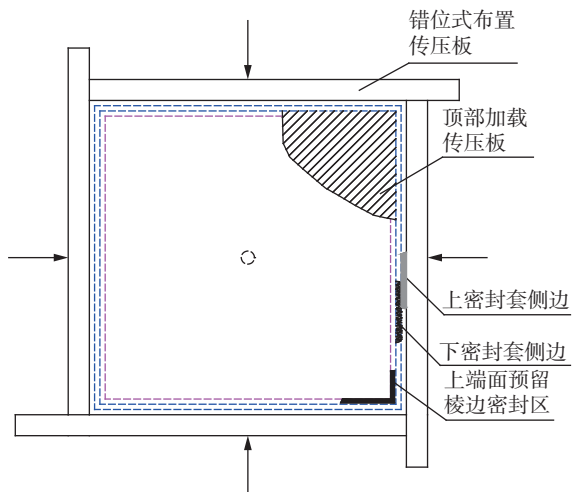


图 4 错位式传压板与“密封套”配合局部剖面图

该组合“上下密封套”嵌套结构, 四周侧向传压板采用了内错式结构, 当传压尺寸与试件断面尺寸一致时, 四周侧面在加载过程中产生形变时, 顶部传压板将与四周侧面传压板相互挤压导致加载失效, 故顶部的传压板尺寸应小于试件尺寸, 但考虑顶部端面棱边的密封需靠顶部传压板施加的载荷来实现, 顶部传压板的尺寸还需要覆盖嵌套“单孔网槽导流板”后预留的棱边橡胶边区域一定范围。

以煤岩立方体试件尺寸 200 mm×200 mm×200 mm 为例, 上密封套顶部凹嵌内置“单孔网槽导流板”区域尺寸为 190 mm×190 mm×2 mm, 那么试件各棱边预留的密封区域宽度为 10 mm。综合考虑试件受载后的变形量以及棱边密封需要覆盖的宽度, 可将顶部传压板的尺寸根据侧向载荷大小产生的变形量设为 195 mm×195 mm×30 mm~198 mm×198 mm×30 mm, 即余留 2~5 mm 的变形量适应空间, 棱边密封区覆盖 5~8 mm。

2 密封渗流方法步骤

以煤岩立方体试件尺寸 200 mm×200 mm×200 mm 为例:

- 1) 底部中心带出孔的“单孔网槽导流板”尺寸为 190 mm×190 mm×2 mm;
- 2) 顶部中心带入口孔的“单孔网槽导流板”尺寸为 190 mm×190 mm×2 mm;
- 3) 上部敞口的“下密封套”内径尺寸为 200 mm×200 mm×200 mm;
- 4) 橡胶套壁厚 5 mm, 底部凹嵌区域尺寸为 190 mm×190 mm×2 mm;
- 5) 下部敞口的“下密封套”内径尺寸为 205 mm×205 mm×200 mm;
- 6) 橡胶套壁厚 5 mm, 顶部凹嵌区域尺寸为 190 mm×190 mm×2 mm。

密封渗流主要包含以下步骤:

- ① 将底部中心带出孔的“单孔网槽导流板”内嵌置于上端敞口的“下密封套”中, 内嵌后底端每侧预留出橡胶边用来对底部棱边区域密封;
- ② 将煤岩立方体试件置于已安置好“单孔网槽导流板”的“下密封套”中;
- ③ 将顶部中心带入口孔的“单孔网槽导流板”内嵌置于下端敞口的“上密封套”中, 内嵌后顶端每侧预留橡胶边用来对顶部棱边区域密封;

④ 将“上密封套”与安置试件后的“下密封套”进行嵌套封装；

⑤ 将封装好的煤岩立方体试件置于真三轴装置内施加载荷，设定渗透压力及出口压力进行三轴渗流试验。

3 实验及其分析研究

以无烟煤煤岩立方体试件尺寸 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 为例，为保证试件与橡胶套密封贴合，要求试件加工精度控制在 $-1 \sim 0\text{ mm}$ 范围(如图 5 所示)。所用的真三轴力学试验机如图 6 所示，最大加载载荷为 600 kN 。



图 5 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 煤岩立方体试件



图 6 真三轴力学试验机

1) 胶套底部中心带出孔的“单孔网槽导流板”尺寸为 $90\text{ mm} \times 90\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ ，顶部中心带入孔的“单孔网槽导流板”尺寸为 $90\text{ mm} \times 90\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ ；

2) 上部敞口的“下密封套”内径尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ ；

3) 橡胶套壁厚 5 mm ，底部凹嵌区域尺寸为

$95\text{ mm} \times 95\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ ，下部敞口的“上密封套”内径尺寸为 $105\text{ mm} \times 105\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ ；

4) 橡胶套壁厚 5 mm ，顶部凹嵌区域尺寸为 $95\text{ mm} \times 95\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 。

嵌套后的试件如图 7 所示，多孔槽板如图 8 所示。

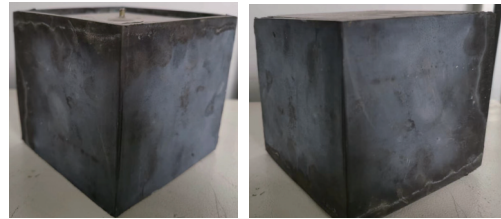


图 7 “上下密封套”嵌套煤岩试件

试验模拟仿真煤层的埋藏深度约 200 m ，垂直地应力约 4 MPa ，水平最大主应力为 5 MPa ，最小水平主应力为 3 MPa 。试件的入口渗透压采用伺服恒压泵进行渗流加载，分别设定恒压 0.3 、 0.5 、 0.7 、 0.9 、 1.1 MPa 共 5 个压力梯度渗透压进行试验，通过背压阀设定出口压力为 0.1 MPa ，采用非吸附性惰性气体 He 作为渗流介质。

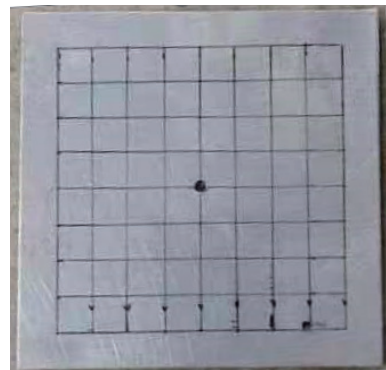


图 8 “上下密封套”内嵌一带中心孔的多槽板

试件加载过程中，为防止单向载荷过高破坏试件，加载轴压、围压过程中采用 0.5 MPa 的等应力梯度进行同时加载，直至达到各方向的设定目标载荷；依次进行 5 个不同渗透压力条件下的渗透性实验，试验过程中记录出口压力及出口流速。

实验数据应用达西定律计算 He 渗透率：

$$K = \frac{2\mu Q_0 L P_0}{(P_1^2 - P_2^2) A} \quad (1)$$

式中： K 为渗透率，单位 mD ； μ 为 He 粘度，单位 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； Q_0 为出口端流速，单位 mL/s ； L 为测试试件的长度，单位 m ； P_0 为大气压力，单位 MPa ； P_1 和 P_2 分别为入口和出口处 He 的压力，单位

MPa; A 为试件的截面积, 单位 m^2 。

实验结果发现: 随着入口渗透压力的升高, 出口流速及渗透率呈现指数规律增高, 其测试数据如表 1 所示, 该试件围压条件下, 不同渗透压条件下的渗透率随注入压力变化的曲线如图 9 所示。

所拟合的渗透率为:

$$y = 0.091 1e^{0.698 2x} \quad (2)$$

表 1 渗透率测量数据表

| 入口压力/MPa | 出口压力/MPa | 流速($mL \cdot s^{-1}$) | 渗透率/mD |
|----------|----------|-------------------------|---------|
| 0.3 | 0.1 | 0.1 | 0.10215 |
| 0.5 | 0.1 | 0.4 | 0.13693 |
| 0.7 | 0.1 | 0.9 | 0.16176 |
| 0.9 | 0.1 | 1.7 | 0.17646 |
| 1.1 | 0.1 | 2.6 | 0.18087 |

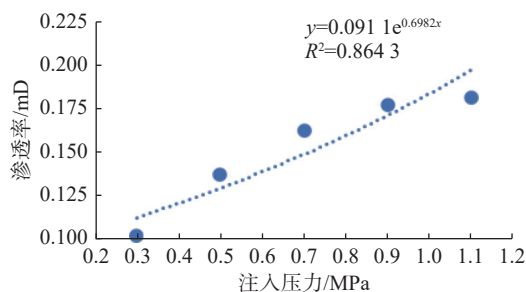


图 9 渗透率随注入压力测试曲线图

4 对比验证

为了验证真三轴单向渗流密封方法的可行性, 选取了同一采区无烟煤样进行常规圆柱 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 试件进行渗透性测试比较(非同

一试件, 内部原生孔裂隙发育程度有差异), 对照真三轴应力条件设置了相同的体积应力, 选取的轴压为 4 MPa, 围压为 4 MPa。其余测试条件及方案均与真三轴条件相同。

所采用的测试仪器为高温高压下气水相对渗透率测试系统, 如图 10 所示; 该系统内部核心圆柱形试件夹持器如图 11 所示; 所选取的无烟煤样如图 12 所示。



图 10 圆柱形试件渗透率测试系统



图 11 圆柱形试件渗透率测试夹持器

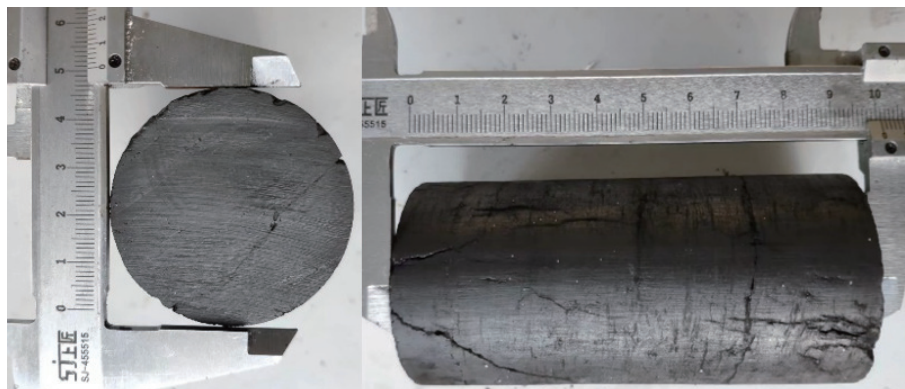


图 12 圆柱形无烟煤试件

经过常规圆柱形煤样测试, 结果如表 2 所示, 对比可发现: 改进的真三轴条件下的无烟煤试件的渗透率在相同体积应力、相同渗透压及出口压力条件下, 真三轴立方体试件的渗透率略大

于圆柱形试件, 但总体测试结果相差不大, 最大相差 0.038 14 mD, 最小相差 0.001 77 mD。分析认为造成该差异原因有:

- 1) 试件尺寸不同;

- 2) 试件原生孔裂隙发育程度不同;
- 3) 尽管体积应力相同, 但真三轴条件下三轴应力有差异;
- 4) 实验仪器设备等误差。

表 2 圆柱形无烟煤试件渗透率测试量数据

| 入口压力/MPa | 出口压力/MPa | 流速/(mL·s ⁻¹) | 渗透率/mD |
|----------|----------|--------------------------|---------|
| 0.3 | 0.1 | 0.035 | 0.08949 |
| 0.5 | 0.1 | 0.120 | 0.10229 |
| 0.7 | 0.1 | 0.290 | 0.12362 |
| 0.9 | 0.1 | 0.620 | 0.15860 |
| 1.1 | 0.1 | 1.050 | 0.17910 |

综合实验结果比较, 相同体积应力条件下测试的渗透率差异较小, 认为改进后的密封及测试方法可行。

5 结束语

考虑科研的需求, 并充分结合实验室现有真三轴设备及国内同类真三轴设备的密封缺陷, 对现有真三轴压力试验装置的岩石渗流密封方法进行了改进。该方法克服了以往真三轴单橡胶套密封棱边窜流与上或下端面密封不严的缺陷, 可实现大尺寸岩石类立方体试件在真三轴应力条件下的渗流密封, 同时操作简单, 能够直观反映原岩应力条件下的渗流特征。

以 100 mm×100 mm×100 mm 立方体煤样为例进行了真三轴渗流试验分析, 实验结果发现: 随着入口渗透压力的升高, 出口流速及渗透率呈现指数规律增高, 得到了不同入口渗透压力真三轴围压条件下的渗透率, 为科学研究测试地下原岩非常规油气资源的渗流特性提供了改进密封方式后的渗透性测试方法。

参考文献

- [1] 秦勇, 申建, 史锐. 中国煤系气大产业建设战略价值与战略选择[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 371-387.
- [2] 郭瑾. 非常规油气储层特征及分类研究[J]. *石化技术*, 2019, 26(6): 135-141.
- [3] 叶松, 肖利. 页岩气及国内发展前景[J]. *辽宁化工*, 2014(11): 1424-1426.
- [4] 何忱, 姚池, 邵玉龙, 等. 低裂隙密度条件下三维裂隙岩体的有效渗透性[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2021, 61(8): 827-832.
- [5] 孟雅, 李治平, 唐书恒, 等. 中、高阶煤样甲烷吸附应变及渗透性实验分析[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(6): 1915-1924.
- [6] 孟尚志, 侯冰, 张健, 等. 煤系“三气”共采产层组压裂裂缝扩展物模试验研究[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(1): 221-227.
- [7] 唐书恒, 朱宝存, 颜志丰. 地应力对煤层气井水力压裂裂缝发育的影响[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(1): 65-69.
- [8] 侯东升, 梁卫国, 张倍宁, 等. CO₂驱替煤层CH₄中混合气体渗流规律的研究[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(11): 3463-3471.
- [9] 傅雪海, 齐琦, 程鸣, 等. 煤储层渗透率测试、模拟与预测研究进展[J]. *煤炭学报*, 2022(4): 1-17.
- [10] 刘文革, 王勃, 赵岳, 等. 保德与韩城地区不同尺度煤样渗透率的应力敏感性试验[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(4): 114-120.
- [11] 张磊, 阚梓豪, 薛俊华, 等. 循环加卸载作用下完整和裂隙煤体渗透性演变规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(12): 2487-2499.
- [12] 李波波, 杨康. 一种施加非均布载荷的真三轴渗流实验装置: 中国, CN 107907467 A[P]. 2018-04-13.
- [13] 王云飞, 郑晓娟, 赵洪波, 等. 一种大尺寸土样真三轴渗流特性与强度试验装置: 中国, CN 104677807 B[P]. 2018-05-04.
- [14] 薛维培, 程桦, 姚直书, 等. 围岩或土作用下的真三轴渗流试验装置和试验方法: 中国, CN 108918250 B[P]. 2020-07-24.
- [15] 牛子豪, 刘承, 朱珍德. 可视化单裂隙岩石应力-渗流耦合试样的三轴渗流试验方法: 中国, CN 108918250 B[P]. 2020-07-24.
- [16] 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(6): 651-653.
- [17] 周军平, 鲜学福, 李晓红, 等. 吸附不同气体对煤岩渗透特性的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(11): 2256-2262.
- [18] 贺伟, 梁卫国, 张倍宁, 等. 不同煤阶煤体吸附储存CO₂膨胀变形特性试验研究[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(5): 1408-1415.
- [19] 曹树刚, 郭平, 李勇, 等. 瓦斯压力对原煤渗透特性的影响[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(4): 595-599.
- [20] 聂百胜, 卢红奇, 李祥春, 等. 煤体吸附-解吸瓦斯变形特征实验研究[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(4): 754-759.
- [21] 梁卫国, 武鹏飞, 胡耀青, 等. 一种煤岩高温高压真三轴压裂渗流试验装置与试验方法: 中国, CN 104655495 B[P]. 2017-05-10.

编辑 张俊