



基于煤心原位体积复原的免封孔测压试验研究

吴宽 王兆丰 施式亮 崔永杰 王龙 陈勇

引用本文:

吴宽, 王兆丰, 施式亮, 等. 基于煤心原位体积复原的免封孔测压试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 186–195.

WU Kuan, WANG Zhaofeng, SHI Shiliang. Experimental study of pressure measurement without sealing hole based on coal core in situ volume recovery[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 186–195.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0252>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

基于长距离密闭取心的煤巷条带瓦斯预抽效检研究

Study on efficiency verification of strip in gas pre-drainage coal roadways based on long-distance sealed coring

煤炭科学技术. 2021, 49(3): 106–111 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.03.013>

顺层钻孔瓦斯抽采漏气规律及封孔技术研究

Study on gas leakage law and hole sealing technology of gas drainage in layered drilling

煤炭科学技术. 2020, 48(8): 90–96 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b3b915a1-4079-42fb-816d-3fc380b9c3b9>

煤层顶板深孔预裂爆破高效封孔材料及工艺研究

Research on high-efficiency sealing material and technology of coal roof deep-hole pre-splitting blasting

煤炭科学技术. 2023, 51(4): 30–36 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0357>

真空充He法测定吸附罐剩余体积试验研究

Experimental study on determination of residual space volume of adsorption tank by vacuum filled He method

煤炭科学技术. 2024, 52(S1): 86–93 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0517>

瓦斯抽采钻孔非凝固材料性能与智能封孔装置研究

Study on the properties of non-solidified materials and intelligent hole sealing device for gas drainage drilling

煤炭科学技术. 2020, 48(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e62996d0-da24-460a-ade7-f8348666765e>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

吴 宽,王兆丰,施式亮,等. 基于煤心原位体积复原的免封孔测压试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 186-195.

WU Kuan, WANG Zhaofeng, SHI Shiliang, *et al.* Experimental study of pressure measurement without sealing hole based on coal core in situ volume recovery[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 186-195.

基于煤心原位体积复原的免封孔测压试验研究

吴 宽¹,王兆丰²,施式亮³,崔永杰⁴,王 龙⁵,陈 勇^{3,6}

(1. 湖南城市学院 土木工程学院, 湖南 益阳 413000; 2. 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 3. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411100; 4. 国家能源神东煤炭集团布台煤矿, 内蒙古 鄂尔多斯 017209; 5. 湘潭大学 环境与资源学院, 湖南 湘潭 411100; 6. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037)

摘要:基于“状态复原”的免封孔测压技术是通过将瓦斯压力测试煤样由井下原始煤体赋存状态被剥离出来装入实验煤样罐后进行漏失瓦斯量补偿、煤心体积复原、人工模拟煤体储层温度来复原原始煤体赋存状态下的煤层瓦斯压力的实验测压新技术,是准确快速获取预抽煤层残余瓦斯压力的可行性新技术,该技术不受井下测压地点和封孔质量的限制。煤心体积的准确复原是该方法准确测定预抽煤层残余瓦斯压力的关键环节。为了探究合适的煤心体积复原方式,依托团队自主研发的免封孔煤层瓦斯压力测定仪,开展了加载轴压煤心体积复原、接触注液(水/油)煤心体积复原、加压与注液结合的煤心体积复原实验研究。结果发现:设定加载轴压依次为 5、10、15……65 MPa 进行煤心体积复原时,由于煤样颗粒之间相互支撑抵抗作用,导致因取样破碎煤体而新生的裂隙无法完全“愈合”,单纯通过加压的方式复原煤心体积在理论和技术上均难以实现;设置初始吸附平衡压力 P_0 为 0.31、0.53、0.74、1.00、1.50 MPa 进行接触注水、接触注硅油、加压/注液结合的煤心体积复原实验,接触注水的煤心体积复原方式实验误差为 40.67%~116.13%,接触注硅油的煤心体积复原方式实验误差为 29.33%~87.10%,加压/注液结合的煤心体积复原方式的实验误差在 2.67%~9.68%,且误差随吸附平衡压力的增大而减小;对比 3 种煤心体积复原方式的实验效果,最终确定以上腔加压与下腔注硅油结合的方式复原煤心原位体积。为基于“状态复原”的免封孔测压技术的实现提供了一种可靠途径,为煤矿准确快速获取预抽煤层残余瓦斯压力值提供了一种新方法,为煤层瓦斯抽采效果检验与达标评判提供了技术支撑。

关键词:残余瓦斯压力测定;煤心体积复原;免封孔;加压;注液

中图分类号: X948 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2025)05-0186-10

Experimental study of pressure measurement without sealing hole based on coal core in situ volume recovery

WU Kuan¹, WANG Zhaofeng², SHI Shiliang³, CUI Yongjie⁴, WANG Long⁵, CHEN Yong^{3,6}

(1. College of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China; 2. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 3. School of Resource & Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411100, China; 4. National Energy Shendong Coal Group Buertai Coal Mine, Ordos 017209, China; 5. College Environment and Resources, Xiangtan University, Xiangtan 411100, China; 6. China Coal Technology Engineering Group Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, China)

Abstract: The non-sealing pressure measurement technology based on “state recovery” is a new experimental pressure measurement technology that compensates the gas loss, restores the coal core volume, and artificially simulates the coal reservoir temperature to restore the coal seam gas pressure under the original coal body occurrence state by transferring the gas pressure test coal sample from the original coal body occurrence state to the stripped coal sample and put it into the experimental coal sample tank. It is a feasible new technology to ob-

收稿日期: 2024-02-28 策划编辑: 宫在芹 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.12438/cst.2024-0252

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52274196, 52074107); 湖南省自然科学基金区域联合基金资助项目(2025JJ70386)

作者简介: 吴 宽(1985—),男,湖南衡东人,讲师,博士。E-mail: wukuan6978@163.com

tain the residual gas pressure of pre-pumped coal seam accurately and quickly, which is not limited by the location of downhole pressure measurement and the quality of hole sealing. The accurate recovery of the core volume is the key to the accurate determination of residual gas pressure in the pre-pumped coal seam by this method. In order to explore the appropriate coal core volume restoration method, relying on the no-seal coal seam gas pressure tester independently developed by the team, the coal core volume restoration experiment was carried out by loading axial compression coal core volume restoration, contact liquid injection (water/oil) coal core volume restoration, and the combination of pressure and liquid injection coal core volume restoration. The results showed that: When the loading axial pressure is set as 5, 10, 15...65 MPa in order to restore the coal core volume, due to the mutual support and resistance between the coal sample particles, the newly formed cracks caused by the sampling of broken coal body cannot be completely "healed", and it is difficult to restore the coal core volume by simply pressurizing it in both theory and technology. Set the initial adsorption equilibrium pressure P_0 to 0.31, 0.53, 0.74, 1.00 and 1.50 MPa for the coal core volume recovery test of contact water injection, contact silicone oil injection and compression/liquid injection combination. The experimental error of the coal core volume restoration method is 40.67% ~ 116.13%. The experimental error of the coal core volume restoration method with contact silicone oil injection is 29.33% ~ 87.10%, and the experimental error of the coal core volume restoration method with pressure/liquid injection is 2.67% ~ 9.68%, and the error decreases with the increase of adsorption equilibrium pressure. Comparing the experimental results of three kinds of coal core volume restoration methods, it is finally determined that the combination of pressure in the upper cavity and injection of silicone oil in the lower cavity restores the coal core volume in situ. It provides a reliable way for the realization of non-sealed hole pressure measurement technology based on "state recovery", provides a new method for coal mine to accurately and quickly obtain the residual gas pressure value of pre-pumped coal seam, and provides technical support for coal seam gas extraction effect inspection and extraction standard evaluation.

Key words: residual gas pressure measurement; coal core volume recovery; no-seal hole; pressurization; liquid injection

0 引 言

大区域超前治理已是煤矿瓦斯防治的发展趋势^[1-2], 煤层残余瓦斯压力是区域防突措施效果检验和煤矿瓦斯危险程度评价的首选指标, 准确测定煤层残余瓦斯压力对研究与评价煤层瓦斯抽采与瓦斯突出问题具有非常重要的意义^[3-7]。近年来, 因残余瓦斯压力测定结果失真导致煤层瓦斯危险程度误评价, 而引发的瓦斯事故屡见不鲜。河南、湖南等省级矿山安全监察局出台文件要求煤矿企业进行煤层区域预抽效果检验时必须采用残余瓦斯压力和残余瓦斯含量双指标且残余瓦斯压力必须为实测值, 严禁用瓦斯含量推算瓦斯压力。预抽煤层残余瓦斯压力的测定一直是困扰煤矿瓦斯防治工作者的难题, 国内外学者针对如何准确、快速地测定预抽煤层残余瓦斯压力开展了大量研究和探索, 提出了各种各样的测定方法, 总体上可分为直接测定法和间接推算法两大类^[8-10]。井下施工钻孔直接测压在施工检验钻孔时极易与措施孔串孔, 成功率较低^[11-15]。间接法主要形成了根据煤层瓦斯含量、瓦斯涌出量、瓦斯压力梯度、煤屑瓦斯解吸量和解吸指标 Δh_2 间接测定方法^[16] 和基于钻孔瓦斯涌出量的瓦斯压力动态反演^[10] 以及从热力学角度和考虑地应力、地温影响的煤层瓦斯压力理论计算方法^[17-20], 其中根据瓦斯含量确定瓦斯压力的方法应用最为广泛, 目前主要有以下 4 种: ① 朗格缪尔反演法从理论上讲无可置疑, 但是需要测试的参数太多(瓦斯含量, 吸附常数、工

业分析, 孔隙率等), 人为因素影响大, 关键是瓦斯含量测值的可靠性没有保障, 推算出来的瓦斯压力准确性难以保证; ② 根据残余瓦斯含量推算煤层瓦斯压力方法井下操作较少, 可适用于煤层测压但实验室内工作量大, 且煤样经过反复吸收和放散后, 煤体结构恐有所变化, t_0 时间是否准确也值得商讨; ③ 由残存瓦斯含量确定煤层瓦斯压力方法易受煤样粒度影响、实验室工作量较大; ④ 开放式取心与原位保压保瓦斯取心测定煤层原始瓦斯含量^[21], 根据煤层原始瓦斯含量推算煤层瓦斯压力方法, 瓦斯含量取心过程要求密闭钻头和保压保瓦斯装备密封性能良好, 当密封性能良好时, 其所求得的瓦斯压力比较准确, 实际上, 要使密封钻头完全不漏气, 在技术上有一定的困难, 因此, 所测值也具有一定的误差, 目前这一方法多用于地质勘探时期的地面钻孔测压中; 该方法需要专门的设备和熟练的操作技术, 在生产矿井中难于应用。传统测压方法测定预抽煤层残余瓦斯压力存在现场应用难、测试成功率低、测试时间长、过程复杂、误差较大等问题^[11], 均不能准确、快速地测定预抽煤层残余瓦斯压力, 已不能满足政府监管和企业防突工作要求。

鉴于此, 2021 年笔者团队提出了一种基于“状态复原”的免封孔煤层瓦斯压力测定技术, 该免封孔测压技术是相对传统的井下封孔直接测压而言的, 研究的出发点是为了解决预抽煤层残余瓦斯压力测定, 是通过将瓦斯压力测试煤样由井下原始煤体赋存状态被剥离出来装入实验煤样罐后进行漏失瓦斯量补

偿、煤心体积复原、人工模拟煤体储层温度来复原原始煤体赋存状态下的煤层瓦斯压力的实验测压新技术,该技术不受井下测压地点和封孔质量限制,是一种准确、快速测定预抽煤层残余瓦斯压力的新技术。该技术目前已取得了阶段性成果:实验验证了免封孔煤层瓦斯压力测定技术可行性^[10];自主研发了免封孔煤层瓦斯压力测定仪,具备漏失瓦斯量定量补偿、煤心体积复原至储层状态、储层温度瓦斯压力恢复三大功能且获得了专利授权^[22]。

煤心体积的准确复原是实现免封孔测压技术现场应用的关键环节,笔者在团队自主研发的免封孔煤层瓦斯压力测定仪开展了加载轴压煤心体积复原、接触注液(水/油)煤心体积复原、加压与注液结合的煤心体积复原试验,探索了煤心体积复原的合适方式,为预抽煤层残余瓦斯压力的准确、快速测定提供可靠途径。

1 试验原理与过程

1.1 基本原理

免封孔测压技术基本原理是基于瓦斯压力测试煤样由井下煤层赋存条件到装入试验煤样罐后发生3种变化:①煤样被揭露到装入煤样罐的取样过程

中,煤体瓦斯解吸导致瓦斯量漏失;②煤体由井下煤层围压条件下的致密块状形态装入煤样罐后煤体破碎膨胀变为松散的颗粒状态,取样前后煤样所占据的空间体积发生了改变;③煤样前后2种状态所处环境温度由井下煤层温度变为实验室条件温度。免封孔煤层瓦斯压力测定技术针对煤样前后发生的3种不同变化分别进行煤样漏失瓦斯量补偿,煤心体积复原以及人工模拟煤体储层温度来复原煤体赋存条件下的瓦斯压力。具体分5个步骤进行:①煤样采集一分为二,分别装入测压罐和解吸罐;②井下平行样解吸测定推算测压样漏失瓦斯量;③测压样漏失瓦斯量补偿;④测压样煤心体积复原;⑤储层温度下瓦斯压力恢复,如图1所示。

1.2 试验装备

试验主要依托自主研发的免封孔煤层瓦斯压力测定仪完成,该装备主要有7个系统组成分别为:抽真空系统、解吸测定系统、常压定量补气系统、煤心体积复原系统、储层环境瓦斯压力恢复系统、死体积标定系统及数据采集分析系统。该套“免封孔煤层瓦斯压力测定仪”试验装备,实现了漏失瓦斯量定量补偿、储层温度瓦斯压力恢复、煤心体积复原至储层状态3个主要功能,试验装备原理如图2、图3所示。

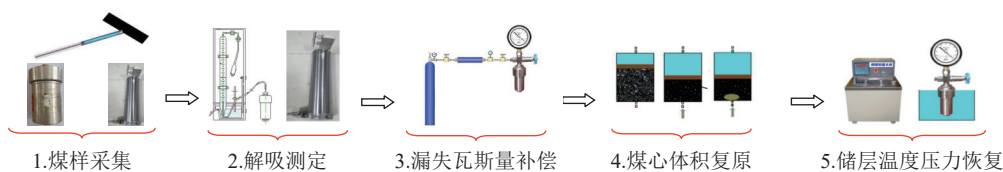
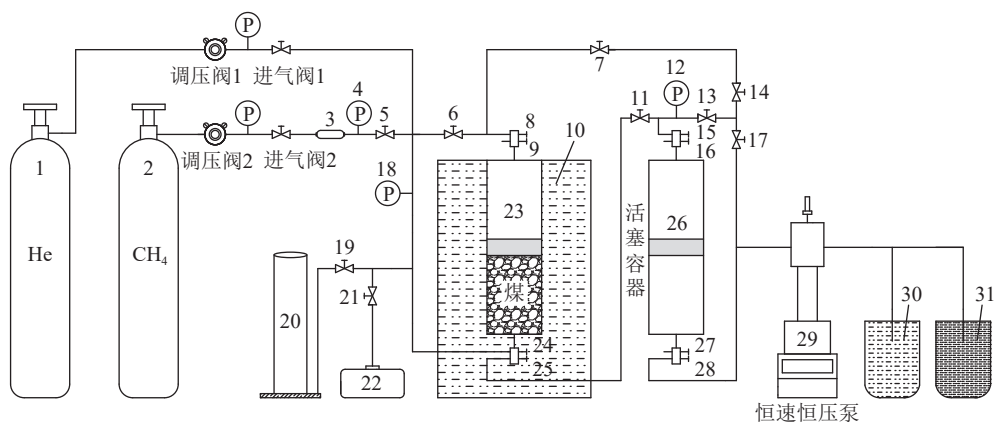


图1 免封孔测压流程示意

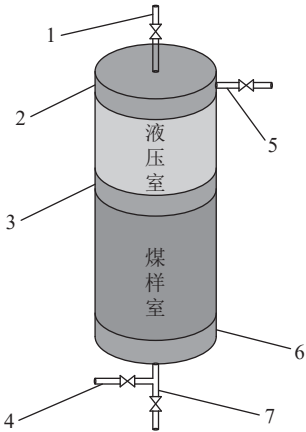
Fig.1 Schematic diagram of pressure measurement process without sealing hole



1—氦气瓶; 2—高压甲烷瓶; 3—参考罐; 4, 12, 18—高精度压力传感器; 10—恒温水浴; 5—9, 11, 13—17, 19, 21, 24, 25, 27, 28—阀门; 20—解吸装置; 22—真空泵; 23—特制煤样罐; 26—活塞容器; 29—恒速恒压泵; 30—水杯; 31—油杯

图2 免封孔煤层瓦斯压力测定仪原理

Fig.2 Principle diagram of gas pressure tester for non-sealing coal seam



1—注液加压管路；2—煤样罐上盖；3—活塞；4—充气/注液管路；5—排液管路；6—煤样罐下盖；7—定量补气管路

图 3 煤样罐示意

Fig.3 Schematic diagram of coal sample tank

1.3 实验过程

为获得最佳的原位体积恢复效果，根据实验原理，分别提出了应力加载、接触注水/注油、应力加载与接触注油相结合的煤心体积复原方法，并依托免封孔煤层瓦斯压力测定仪开展了相关试验

分析。

1.3.1 试验准备

① 制作煤样：选取焦煤集团古汉山煤样筛分至粒径 3 mm 以下，作为测压试验对象。② 测定煤样视密度：按照中国国标 GB/6949—2010 对采集的煤样筛分至 10~13 mm 的粒度进行视相对密度(ARD)测定，结果为 1.51 g/cm³。③ 体积标定：经气密性检查后，采用 PVT 法对参考罐、煤样罐及管路体积进行标定，标定气体为氦气，V₂ 为标定的煤样罐体积。④ 计算煤样死体积增量：设测压煤样储层状态下体积为 V₀，装入测压煤样罐后所占体积为 V_s，则煤样取样前后的死体积增量 ΔV 为

$$\Delta V = V_s - V_0,$$

$$V_0 = (M/\rho_A - M/\rho_T) + M/\rho_T = M/\rho_A$$

式中：V₀ 为煤样储层状态下体积，cm³；M 为煤样质量，g；ρ_T 为真相对密度，g/cm³；ρ_A 为视相对密度，g/cm³，V_S=V₂；ΔV=V_S-V₀=V₂-M/ρ_A，煤样死体积增量参数见表 1。

表 1 煤样死体积增量参数

Table 1 Volume increment parameters of coal sample

粒径/mm	质量/g	ρ _A /(g·cm ⁻³)	V ₀ /mL	V ₂ /mL	ΔV/mL
≤3	380	1.51	251.656	483.364	231.708

1.3.2 应力加载

① 煤样装罐完毕后接入试验设备中并检查确保所有管路连接无误，将恒温水浴设置 30 ℃ 循环工作模式，使煤样始终处于恒定的温度环境；② 打开阀门使煤样罐下腔的煤样室与大气连通，排除由于煤样罐上腔加压而导致下腔中游离气体压缩对煤心体积复原的影响；③ 将恒速恒压泵的泵体吸满水后关闭吸液阀，再依次打开阀门和恒速恒压泵的排液阀门向该段管路注水，待阀门处有水流出现时立即关闭阀门和恒速恒压泵的排液阀，证明该段管路已充满水；④ 将恒速恒压泵操作界面的累计流量清零，然后设置恒压工作模式(5 MPa)并打开排液阀启动排液，向活塞煤样罐上腔液室持续注水加压推动活塞下移压缩煤样。一次吸液不够时恒速恒压泵可循环吸液、排液，持续注液使恒速恒压泵的当前压力显示为 5 MPa；⑤ 由于煤体的压缩、蠕变是一个缓慢的过程，煤样并未充分压实，因此，继续注液直至当前注液流速长时间为零时关闭阀门和恒速恒压泵的排液阀，并使其停止运行。由于水是不可压缩流体，所以，操

作界面所显示的累计流量即该压力下煤心死体积增量的补偿量。⑥ 按以上操作步骤，每次重新装入煤样，设定不同压力 5、10、15……65 MPa 即可得到不同压力下所对应的煤心死体积增量补偿量，拟合曲线便可得到煤心死体积增量完全补偿时(即煤心体积复原至储层状态)所需的压力。

1.3.3 接触注液(水/油)

分别设置 0.31、0.53、0.74、1.00、1.50 MPa 共 5 个初始吸附平衡压力，以煤样此时的状态为其在储层条件下的状态(即煤层残余瓦斯压力)。① 打开恒速恒压泵的吸液阀将其泵体吸满水后关闭吸液阀；② 将恒速恒压泵的工作模式设置为恒速模式，注液流速为 5 mL/min，打开阀门和恒速恒压泵的排液阀并启动排液；③ 观察精密压力传感器示数变化，当其示数大于本试验的初始吸附平衡压力时，迅速打开阀门实现向煤样罐液室注液补偿煤样死体积增量。一次注液补偿不够时，重复以上操作再次注液；④ 当恒速恒压泵的操作界面上显示的累计流量值为前文所述的取样前后煤样死体积增量 ΔV 时，立即依次关

闭阀门和恒速恒压泵的排液阀并使其停止运行。

⑤ 使煤样在恒温水浴环境下(30 ℃)瓦斯压力自然恢复,当压力传感器示数连续 4 h 不变化时,即可认为该煤样已再次吸附平衡。

1.3.4 加压与注液结合

① 先将活塞容器上腔中注入适量的硅油并记录此时活塞容器上位移传感器的刻度值 h_1 ,依次打开阀门和恒速恒压泵的排液阀,将恒速恒压泵设置为恒速模式,注液流速 3.00 mL/min 并启动排液,观察压力传感器示数变化,当示数大于传感器示数时打开阀门将硅油注入煤样罐下腔液室内;② 当位移传感器的示数为 $h_2(h_2=h_1-0.1\Delta V/S)$ 时(S 为试验罐液室的截面积),立即关闭阀门和恒速恒压泵的排液阀并使其停止工作,下腔注油完成;③ 打开阀门和恒

速恒压泵的排液阀向该段管路注水,待放液阀门 9 处有水流出时,即可证明已排尽其中的空气,立即关闭阀门;④ 将恒速恒压泵设置为恒速模式,注液流速 5.00 mL/min,操作界面的累计流量清零,启动排液持续注液至累计流量示数为 $0.9\Delta V$ 时立即关闭阀门和恒速恒压泵的排液阀并使其停止工作,至此,完成煤心体积的完全复原。之所以选择先下腔注油再上腔加压,是因为这样操作开始注油时煤样室内瓦斯压力较小注油更为容易。

2 试验结果分析

2.1 应力加载复原

为减小试验误差,做了 4 组相同的试验,不同压力下煤心死体积增量补偿量试验数据见表 2。

表 2 不同覆压下煤样死体积增量补偿量

Table 2 Volume incremental compensation of coal under different pressures

覆压/MPa	煤样死体积增量补偿量/mL			
	1组	2组	3组	4组
5	157.908	159.897	159.197	158.908
10	187.608	184.982	184.482	188.308
15	201.593	200.385	198.685	201.993
20	208.702	208.937	207.963	208.502
25	212.918	213.411	213.511	212.518
30	216.341	216.691	216.691	216.641
35	218.762	219.256	218.856	218.762
40	220.938	221.112	220.712	220.938
45	222.353	222.296	221.996	222.353
50	223.997	223.189	223.189	223.697
55	—	224.079	223.909	224.435
60	—	224.996	224.796	225.161
65	—	225.724	225.324	225.801

当加载覆压足够大时,死体积增量会趋于极限死体积补偿量,参考朗格缪尔方程,选择拟合函数为: $y = ABx/(1 + Bx)$, 其中, A 为当 x 趋近于无穷大时的极限死体积补偿量; B 为常数。根据表 2 中的实验数据,采用 Origin 绘图软件对数据进行处理,得相关度 R^2 为 0.995 ~ 0.999,死体积补偿量与加载覆压的关系曲线、拟合的相关参数及推算的煤样死体积增量完全补偿时所需要的压力如图 4 所示。

由以上试验研究结果可知:① 该煤样(粒径 0 ~ 3 mm、死体积增量 231.708 mL)死体积增量完全补偿时所需要的覆压大小为 179 ~ 203 MPa,当所加载的覆压为 200 MPa 左右时,对整个试验设备器材

的耐压强度、仪器精度等多方面要求极为严苛,生产制造较为困难。② 所推测得煤样死体积增量完全补偿时的覆压值并不具有普适性,可能仅限于这种煤样且这么大死体积增量的情况。③ 针对不同煤种,不同质量的煤样所预测的煤心体积复原压力也不同,结果甚至比 200 MPa 更大。④ 从理论角度分析,煤样由储层条件下的致密块状型态经采集取样装入煤样罐后,煤体破碎为不同粒径大小的颗粒状态,在加压时,由于不同颗粒之间互相支撑抵抗煤心体积复原,因煤体破碎而新生的裂隙无法完全“愈合”。所以,单纯通过加载轴压的途径来补偿煤样死体积增量完全复原煤心体积无论是从技术难度,还是从理

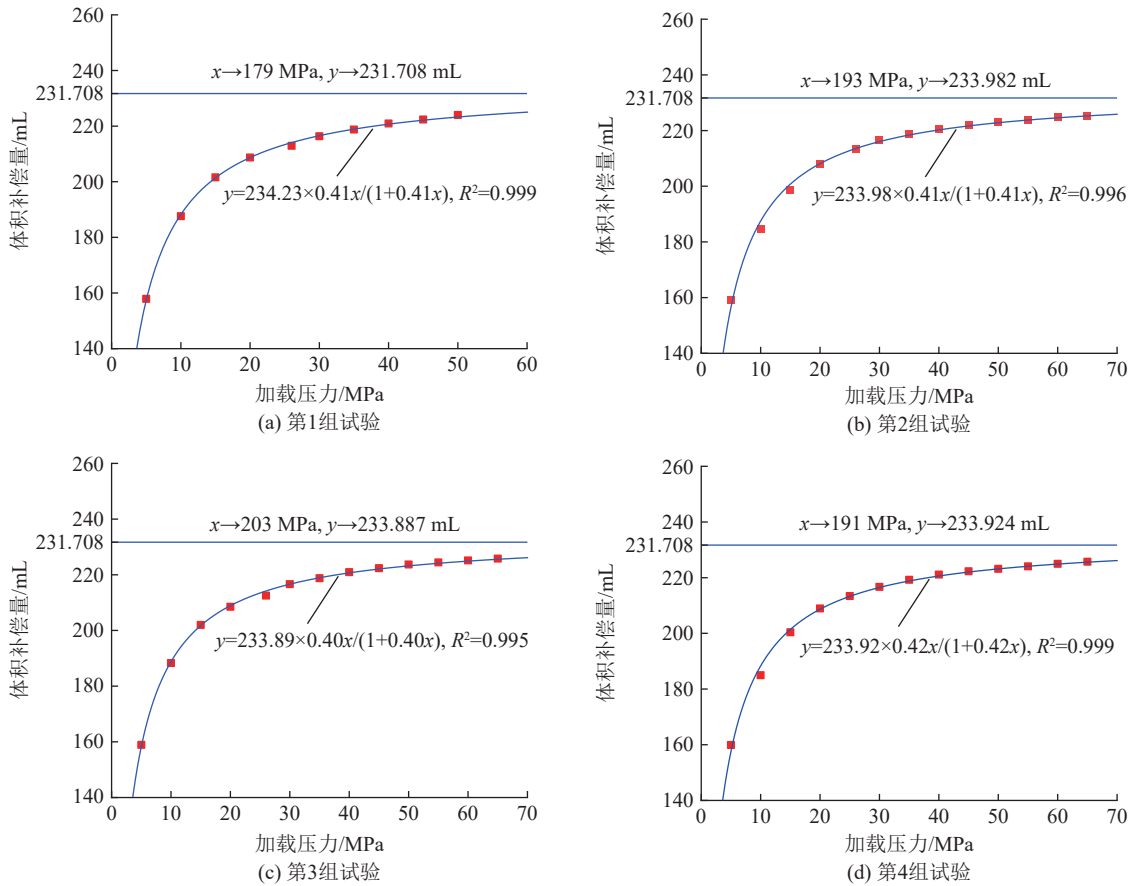


图 4 死体积增量补偿量与覆压关系

Fig.4 Relationship between dead volume compensation and overpressure

论层面分析都是难以实现的。

2.2 接触注液复原

接触注液复原煤心体积原理是用不吸附瓦斯的液体填充死体积的方法达到煤心体积复原的目的。由于煤样罐上腔液压室同样加载 20.00 MPa 覆压的情况下,煤样罐下腔煤样室内不同的瓦斯初始吸附平衡压力几乎不影响 20.00 MPa 覆压对煤样的压实程度,卸压集液体积基本一致,可见接触注液煤心体积复原理论上可行,但注液是否会对瓦斯吸附解吸产生影响不得而知。根据“相似相容”原理,硅油对瓦斯气体不具有吸附性,选用二甲基硅油。水对瓦斯吸附解吸具有影响,但对瓦斯压力恢复值的影响程度尚未可知。为了探究其影响程度和对比硅油复原试验,对注水接触煤心体积复原也开展了试验研究。接触注水/油煤心体积复原后瓦斯压力恢复结果及误差如图 5、图 6 所示。

由以上试验研究结果可知,接触注水煤心体积复原后的瓦斯压力恢复值 P_{s1} (注水)分别为: 0.67、0.93、1.19、1.48、2.11 MPa; 与对应初始吸附平衡压力 P_0 的误差分别为: 116.13%、75.47%、60.81%、48.00% 和 40.67%, 总体误差范围在 40.67% ~

116.13%。接触注水复原煤心体积的实验误差随吸附平衡压力的增大而减小。分析接触注水复原煤心体积瓦斯压力恢复值偏大的原因,主要分为 2 个方面: ① 水分能够促进煤中吸附态瓦斯发生置换解吸,且含水率越大,置换解吸量越大^[23-27],游离态瓦斯的含量增加所表现的瓦斯压力也就增大,所以向煤样室内注水复原煤心体积的过程中瓦斯压力急剧增加的原因,除了注水使游离空间减小外还有水对煤中吸附瓦斯的置换作用; ② 游离瓦斯量增加的同时,完全通过向煤样室内注液复原煤心体积的方式势必会发生注入的液体将煤样完全浸没,下端注液将游离瓦斯气体驱赶至煤样室的顶部,注液完成时,又在煤样最上端形成一定厚度的液面隔绝了顶部游离瓦斯进入煤样的路径,且注入的液体将煤样颗粒完全包裹,使其吸附瓦斯更加困难,致使煤样室内压力平衡稳定时的游离瓦斯量比初始吸附平衡时的游离瓦斯量增加(图 7a)。

接触注油煤心体积复原后的瓦斯压力恢复值 P_{s2} 分别为: 0.58、0.84、1.08、1.36、1.94 MPa; 与对应初始吸附平衡压力 P_{s3} (加压+注油)的误差分别为: 87.10%、58.49%、45.95%、36.00% 和 29.33%, 总体

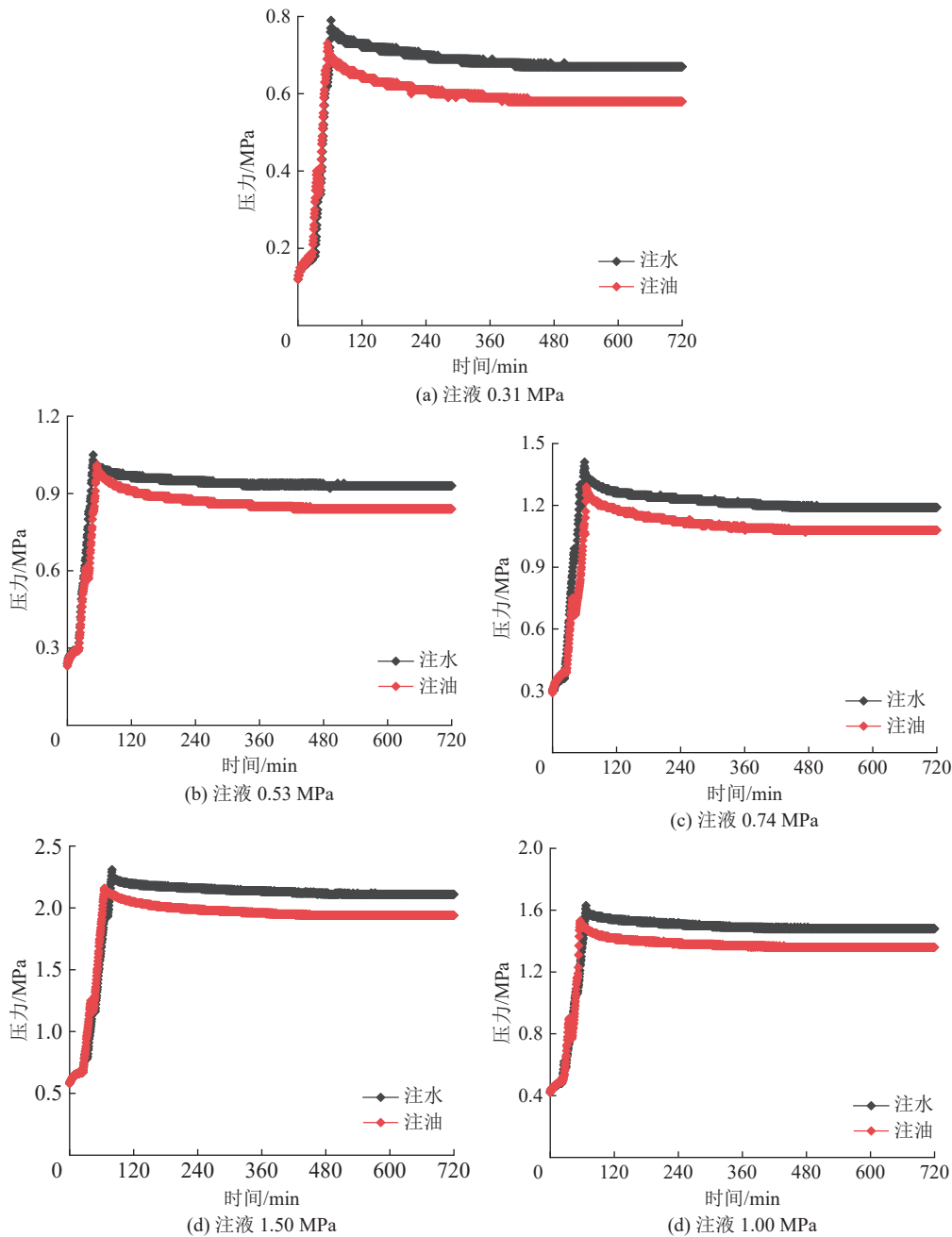


图 5 接触注水/注液煤样压力恢复曲线

Fig.5 Pressure recovery curves of contact water/liquid injection coal sample

误差范围在 29.33% ~ 87.10%。与接触注水煤心体积复原后的瓦斯压力恢复值一样,都比对应的初始吸附平衡压力大,但同一压力下注油比注水煤心体积复原的瓦斯压力恢复值误差小;2 种注液煤心体积复原方式的实验误差与吸附平衡压力关系一致,都随吸附平衡压力的增大而减小。接触注油复原煤心体积瓦斯压力恢复值偏大的原因主要是煤样室下端注油复原煤心体积的过程中,会将游离瓦斯气体驱赶至煤样室的顶部,注油完成时,同样在煤样最上端形成一定厚度的液面隔绝了顶部游离瓦斯进入煤样的路径,且注入的硅油对煤样颗粒的包裹作用更强,使

其吸附瓦斯更加困难(图 7b)。比接触注水复原煤心体积误差偏小的原因,是因为注入的硅油对煤中的吸附瓦斯不具有置换作用,相对而言游离瓦斯量要小,故接触注油比接触注水复原煤心体积的实验误差小。

2.3 加压注液结合复原

根据“接触注液(水/油)煤心体积复原”结果发现,无论是接触注水还是接触注油煤心体积复原后的瓦斯压力恢复值均比初始吸附平衡压力大得多,完全通过向煤样室内注液来补偿煤样死体积增量导致注入的液体将煤样浸没、包裹,影响了煤对游离瓦

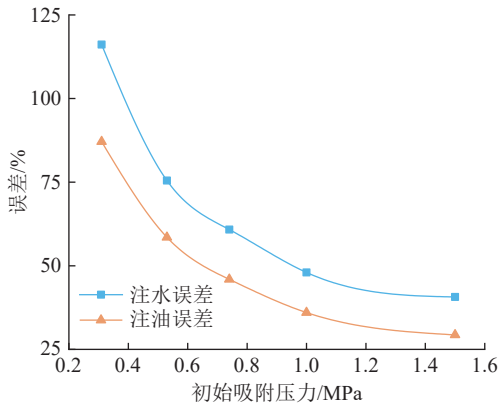


图 6 注液复原误差与吸附平衡压力关系
Fig.6 Relationship between error and adsorption equilibrium pressure

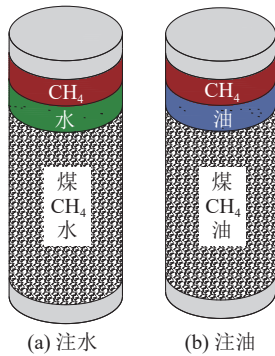


图 7 注水压力复原示意
Fig.7 Sketch of gas pressure recovery by liquid injection

斯气体的吸附, 游离瓦斯量增加, 导致最终的瓦斯压力恢复值比初始吸附平衡压力大, 单一采取这种方式来复原煤心体积不可靠。单纯加压虽无法使煤心体积完全复原, 但可复原至 90.00% 以上; 接触注液虽可完全复原煤心体积, 但是注入的液体会严重影响煤样对瓦斯的再次吸附。因此, 设想将上腔加压与下腔注液相结合复原煤心体积, 上腔加压补偿绝大部分的死体积增量, 剩余的死体积增量差值通过下腔注液的方式补偿至煤样室中, 既保证了煤心体积复原又使与煤样接触的液体量极其微小, 对煤吸附性能的影响自然也就最小化, 实现煤心体积完全

复原。接触注油的实验误差小于接触注水, 因此, 实验研究上腔加压与下腔注油相结合的煤心体积复原方式。加压与注油相结合的煤心瓦斯压力恢复曲线如图 8 所示。

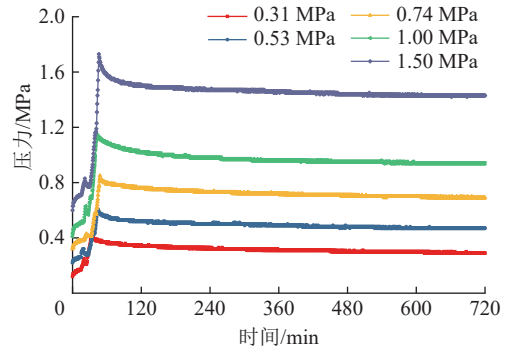


图 8 上腔加压与下腔注油煤样压力恢复曲线
Fig.8 Pressure recovery curves between upper and lower chamber of coal sample

由图 8 可知: 加压+注油煤心体积复原后的瓦斯压力恢复值 P_s 分别为: 0.34、0.57、0.78、1.04、1.54 MPa, 与接触注水/注油煤心体积复原后的瓦斯压力恢复值一样, 都比对应的初始吸附平衡压力大。试验结果略微偏大的原因是因为注入的少量硅油与小部分煤样接触并附着于其表面, 致使这部分被包裹的煤样颗粒后续无法参与吸附游离瓦斯, 真正有效的煤样量减少使吸附的游离瓦斯量相对于初始吸附平衡状态时减小, 再次平衡时游离瓦斯量相对增加, 故压力恢复值略有偏大。但极少量的硅油相对于完全注油对煤样吸附瓦斯的影响已大幅减小, 试验误差较为理想, 均在 10.00% 以内。同时, 误差与吸附平衡压力关系与 2 种接触注液煤心体积复原方式的变化趋势一致, 都随吸附平衡压力的增大而减小。

2.4 复原方式误差对比

注水、注油、注油+加压结合的 3 种方式煤心体积复原后的瓦斯压力恢复值与初始吸附平衡压力值的对比结果见表 3, 试验误差与初始吸附平衡压力的关系如图 9 所示。

表 3 3 种煤心体积复原方式试验结果

Table 3 Experimental results of three coal core volume restoration methods

煤心体积复原方式	不同初始吸附压力下的复原压力/MPa, 误差/%				
	0.31 MPa	0.53 MPa	0.74 MPa	1.00 MPa	1.50 MPa
接触注水	0.67, 116.13	0.93, 75.47	1.19, 60.81	1.48, 48.00	2.11, 40.67
接触注油	0.58, 87.10	0.84, 58.49	1.08, 45.95	1.36, 36.00	1.94, 29.33
加压+注油	0.34, 9.68	0.57, 7.55	0.78, 5.41	1.04, 4.00	1.54, 2.67

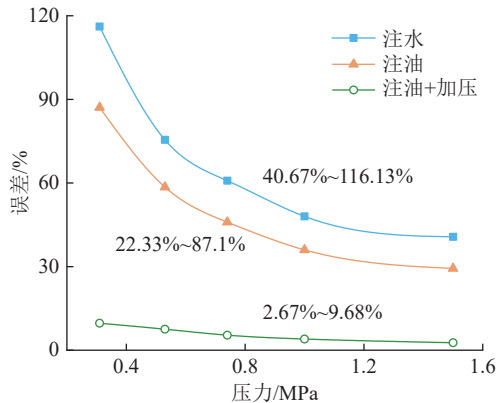


图9 不同复原方式误差与吸附平衡压力关系

Fig.9 Relationship between the errors of different recovery methods and the adsorption pressure

由以上试验结果可知,3种煤心体积复原方式中接触注水的试验误差在40.67%~116.13%;接触注油的试验误差在29.33%~87.10%;这2种煤心体积复原方式的瓦斯压力恢复值均严重偏离初始吸附平衡压力,故不可靠、行不通。而加压/注油结合的煤心体积复原方式试验误差在2.67%~9.68%,均在10.00%以内,试验效果较好,且误差随瓦斯压力的增大而减小。因此,确定以上腔加压/下腔注油结合的方式复原煤心体积。

3 结 论

1)加载轴压复原煤心体积可复原至90.00%以上,但由于煤样颗粒之间相互支撑抵抗作用,导致因取样破碎煤体而新生的裂隙无法完全“愈合”,单纯通过加压的方式复原煤心体积无论是从技术难度,还是理论分析角度都难以实现。

2)接触注液复原煤心体积试验效果较差,接触注水的煤心体积复原方式,瓦斯压力恢复值(P_{s1})严重偏离初始吸附平衡压力(P_0),误差可达40.67%~116.13%;接触注油的煤心体积复原方式瓦斯压力恢复值(P_{s2})与初始吸附平衡压力(P_0)的误差为29.33%~87.10%,接触注油比接触注水复原煤心体积的试验误差小。

3)综合加压与注油双重优点,上腔加压补偿绝大部分的死体积增量,剩余的死体积增量差值通过下腔注硅油的方式补偿至煤样室中,既保证了煤心体积复原又使与煤样接触的液体量极其微小,对煤吸附性能的影响也最小化,上腔加压/下腔注油结合的煤心体积复原方式试验效果最佳,误差在2.67%~9.68%,且误差随吸附平衡压力的增大而减小,满足工程要求,方法可行,结果可靠。

4)对比3种煤心体积复原方式的试验效果,最终确定以上腔加压与下腔注硅油结合的方式可较好地复原煤心原位体积。为基于“状态复原”的免封孔测压技术的实现提供了一种可靠途径,也进一步验证了免封孔测压技术的可行性,为煤矿准确快速获取预抽煤层残余瓦斯压力值提供了一种新方法,为现场煤层瓦斯抽采效果检验与抽采达标评判提供技术支撑。

参考文献(References):

- [1] 刘程,孙东玲,武文宾,等.我国煤矿瓦斯灾害超前大区域精准防控技术体系及展望[J].煤田地质与勘探,2022,50(8):82-92.
LIU Cheng, SUN Dongling, WU Wenbin, et al. Analysis and prospect of precise prevention and control technical system ahead of large areas and time for gas disasters in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(8): 82-92.
- [2] 李延河.地面井分区式瓦斯抽采技术体系及工程实践[J].煤炭科学技术,2023,51(3):100-108.
LI Yanhe. Surface well partition gas extraction technology system and engineering practice[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 100-108.
- [3] 张占存.压力恢复曲线测定煤层瓦斯赋存参数的试验研究[J].煤炭学报,2012,37(8):1310-1314.
ZHANG Zhancun. Experimental research on applying pressure build-up curves to determine the gas occurrence parameters of coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8): 1310-1314.
- [4] 刘三钧,薛志俊,林柏泉.含水煤岩层瓦斯压力测定新技术[J].中国安全科学学报,2010,20(10):97-100.
LIU Sanjun, XUE Zhijun, LIN Baiquan. New technique of measuring gas pressure in coal and rock seam with water[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(10): 97-100.
- [5] 王浩,蒋承林,张建军.煤层瓦斯压力测定中的钻孔注浆新技术研究[J].中国安全科学学报,2011,21(6):78-83.
WANG Hao, JIANG Chenglin, ZHANG Jianjun. Novel technology studies on drilling grouting in methane pressure measurement of coal seam[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(6): 78-83.
- [6] 许彦鹏,吴宽,李进.穿含水层下向钻孔瓦斯压力测定技术研究[J].煤炭科学技术,2013,41(3):66-69.
XU Yanpeng, WU Kuan, LI Jin. Study on gas pressure measuring technology with downward borehole drilling through aquifer[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(3): 66-69.
- [7] 郭德涛,曹运兴,杜冬冬,等.立井揭煤前测定煤层瓦斯压力的方法与实践[J].安全与环境学报,2017,17(2):496-501.
GUO Detao, CAO Yunxing, DU Dongdong, et al. Renovated reliable method for determining the coal seam gas pressure before exposure to the gassy coal seam in vertical shaft coal excavation[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(2): 496-501.
- [8] 谢和平,崔鹏飞,尚德磊,等.深部煤层原位保压取心技术原理与瓦斯参数测定研究进展[J].煤田地质与勘探,2023,51(8):1-12.

- XIE Heping, CUI Pengfei, SHANG Delei, et al. Research advances on the in-situ pressure-preserved coring and gas parameter determination for deep coal seams[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(8): 1–12.
- [9] 齐黎明, 程根银, 陈学习. 瓦斯压力测定时间及其受控因素分析[J]. *中国安全科学学报*, 2013, 23(1): 67–71.
- QI Liming, CHENG Genyin, CHEN Xuexi. Analysis of gas pressure measurement time and controlling factors[J]. *China Safety Science Journal*, 2013, 23(1): 67–71.
- [10] WANG H, WANG E Y, LI Z H, et al. Study and application of dynamic inversion model of coal seam gas pressure with drilling[J]. *Fuel*, 2020, 280: 118653.
- [11] 崔永杰, 王兆丰, 范道鹏. 免封孔煤层瓦斯压力测定技术可行性研究[J]. *煤矿安全*, 2021, 52(11): 22–27.
- CUI Yongjie, WANG Zhaofeng, FAN Daopeng. Feasibility study on gas pressure measurement technology of coal seam without sealing hole[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(11): 22–27.
- [12] 唐巨鹏, 任凌冉, 潘一山, 等. 高地应力条件煤与瓦斯突出冲击力演化规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(8): 116–128.
- TANG Jupeng, REN Lingran, PAN Yishan, et al. Study on the impact force evolution law of coal and gas outburst under high ground stress[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(8): 116–128.
- [13] 张超, 程仁辉, 黄晓昇, 等. 基于光纤光栅的煤层瓦斯钻孔塌孔位置表征试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(11): 95–103.
- ZHANG Chao, CHENG Renhui, HUANG Xiaosheng, et al. Experimental study on hole collapse characterization of gas drainage holes in this coal seam based on fiber bragg grating[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(11): 95–103.
- [14] 李树刚, 刘李东, 赵翔鹏, 等. 倾斜厚煤层卸压瓦斯靶向区辨识及抽采关键技术[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(8): 105–115.
- LI Shugang, LIU Lidong, ZHAO Pengxiang, et al. Key technologies for extraction and identification of gas target area for pressure relief in inclined thick coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(8): 105–115.
- [15] 陈冬冬, 张俭. 近水平顺煤层钻孔瓦斯压力测试技术研究[J]. *煤矿安全*, 2017, 48(2): 83–85.
- CHEN Dongdong, ZHANG Jian. Study on testing technology of gas pressure in nearly level drilling along the seam[J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, 48(2): 83–85.
- [16] 安丰华, 程远平, 吴冬梅, 等. 基于瓦斯解吸特性推算煤层瓦斯压力的方法[J]. *采矿与安全工程学报*, 2011, 28(1): 81–85, 89.
- AN Fenghua, CHENG Yuanping, WU Dongmei, et al. Determination of coal gas pressure based on characteristics of gas desorption[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2011, 28(1): 81–85, 89.
- [17] 谭志伟, 程五一, 牛聚粉, 等. 利用钻屑解吸法测定煤层瓦斯压力的应用[J]. *华北科技学院学报*, 2006, 3(1): 17–19.
- TAN Zhiwei, CHENG Wuyi, NIU Jufen, et al. Determining methane pressure in coal seam application with the method of desorption of drill-cuttings[J]. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2006, 3(1): 17–19.
- [18] 贺建明, 王宏图, 鲜学福, 等. 煤层温度和应力梯度变化对煤层瓦斯压力计算的影响[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 1999, 22(5): 95–98.
- HE Jianming, WANG Hongtu, XIAN Xuefu, et al. The Influence of In-situ stress gradient and geothermal temperature on the calculation of coalbed gas pressure[J]. *Journal of Chongqing University(Natural Science Edition)*, 1999, 22(5): 95–98.
- [19] 许江, 鲜学福. 煤层中瓦斯压力的理论计算方法[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2000(S1): 15–17.
- XU Jiang, XIAN Xuefu. Theoretic computing methods about the gas pressure in coal seam[J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2000(S1): 15–17.
- [20] 王宏图, 鲜学福, 尹光志, 等. 煤矿深部开采瓦斯压力计算的解析算法[J]. *煤炭学报*, 1999, 24(3): 279–283.
- WANG Hongtu, XIAN Xuefu, YIN Guangzhi. Inversitigation of Analytical method for coalbed gas pressure in high temperature and deeply mining mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 1999, 24(3): 279–283.
- [21] 高明忠, 宋杰, 崔鹏飞, 等. 深部煤层原位保压保瓦斯取心技术装备及初步应用[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(4): 143–154.
- GAO Mingzhong, SONG Jie, CUI Pengfei, et al. Technology and application of in-situ pressure and gas maintaining coring for deep coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(4): 143–154.
- [22] 郑梦浩, 魏世义, 董家昕, 等. 一种基于钻孔采样实测的煤层瓦斯压力测试系统 [P]. CN210347634U, 2020-04-17.
- [23] 陈向军, 程远平. 注水对煤层吸附瓦斯解吸影响的试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(6): 96–99.
- CHEN Xiangjun, CHENG Yuanping. Experiment study on water injection affected to desorption of coal adsorption gas[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(6): 96–99.
- [24] 陈金生, 王兆丰, 樊亚庆. 水分自然侵入促进含瓦斯煤解吸效应实验研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2016, 12(4): 76–80.
- CHEN Jinsheng, WANG Zhaofeng, FAN Yaqing. Experimental study on desorption promoting effect of coal containing gas by water natural invasion[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2016, 12(4): 76–80.
- [25] 陈金生, 王兆丰, 岳基伟, 等. 水分润湿过程中煤中瓦斯解吸规律试验[J]. *安全与环境学报*, 2017, 17(4): 1309–1313.
- CHEN Jinsheng, WANG Zhaofeng, YUE Jiwei, et al. Experimental study for the coal gas desorption regularity in the process of moistening[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(4): 1309–1313.
- [26] CHEN X J, CHENG Y P. Influence of the injected water on gas outburst disasters in coal mine[J]. *Natural Hazards*, 2015, 76(2): 1093–1109.
- [27] 郑超, 马东民, 陈跃, 等. 水分对煤层气吸附/解吸微观作用研究进展[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(2): 256–268.
- ZHENG Chao, MA Dongmin, CHEN Yue, et al. Research progress micro effect of water on coalbed methane adsorption/desorption[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(2): 256–268.