

注水对煤体瓦斯解吸综合影响的试验研究及分析

Experimental Research and Analysis of the Comprehensive Effects of
Water Injection on Coal Gas Desorption

程红林(山西华阳集团新能股份有限公司二矿, 山西 阳泉 045000)

摘要:本文在阳泉二矿煤层注水防尘基础上,发现在高压注水润湿煤层施工过程中,水分进入煤体孔裂隙会导致宏观上能够驱赶瓦斯,微观上能够与原有吸附瓦斯展开竞争吸附。本文在上述基础上进行不同含水量以及不同注水量煤体瓦斯气体解吸的实验研究。研究结果表明:水分含量与瓦斯极限吸附量存在函数关系,同时注水量增大,含瓦斯煤体解吸量增大,注水驱替瓦斯效果明显。

关键词:煤层注水; 不同含水量; 瓦斯驱替; 作用机理

中图分类号: TD724 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2022)04-0016-05

Abstract: On the background of coal seam water injection and dust prevention of Yangquan No. 2 Coal Mine, it is found that in the construction process of high pressure water injection to wet the coal seam, the water entering the coal pore and fracture can drive away the gas from the macro level and realize competitive adsorption with the original adsorbed gas from the micro level. On the basis of the above, this paper conducts experimental research on the coal gas desorption with different water content and different water injection volume. The results indicate that there is a functional relationship between the water content and the gas adsorption limit. The desorption amount of gas-containing coal body increases with the increase of water injection, and the effect of gas displacement by water injection is obvious.

Key words: water injection; different water content; gas displacement; mechanism of action

1 前言

煤层注水防尘是广为有效的矿井综合防尘技术,在煤层被高压注水润湿的过程中,孔裂隙中有水分充分进入,存在宏观上的瓦斯驱替以及微观上的瓦斯竞争吸附。相关的学者已经深入研究了水分对煤体中瓦斯的解吸影响,学者们认为水和瓦斯在煤体孔隙中存在两种作用关系:一是认为水能充分置换出吸附在孔裂隙表面的瓦斯,另一种是认为水能堵塞瓦斯渗流通道阻碍煤体中的瓦斯解吸。

在理论研究方面,国内外专家对煤层气的解吸

以及量化的表征^[1-3],数值模型以及数学模型^[4-6],不同粒径构造以及孔隙的煤层气解吸实验研究^[7-9],煤层气采排技术以及影响因素方面作了大量研究^[10-13]。但是众多学者在不同的水分含量以及不同的注水量对瓦斯解吸的影响研究有所欠缺,因此,本文在阳泉二矿的15号煤层注水应用的基础上,提出不同条件下的注水对煤层瓦斯解吸实验,分析水分对煤体内瓦斯解吸的综合影响。

2 实验系统及方法

2.1 实验系统

吸附—注水—解吸实验装置主要包括真空脱气单元、温度控制单元、充气吸附单元、高压注水单元、压力监测单元、瓦斯解吸单元。实验装置实物如图1所示。其中的充气吸附单元主要包括:甲烷气瓶;蓄气罐内部容积为2.5 L,耐压20 MPa,一端连接高压甲烷气瓶,另一端连接精密压力表;煤样罐耐压20 MPa,且分别与蓄气罐、注水泵和压力监测装置连接;气体减压阀输入压力0~25 MPa,输出压力0~

[作者简介] 程红林(1969-),男,工程师,现任山西华阳集团新能股份有限公司二矿总工程师,长期从事瓦斯地质及通风安全方面工作。

[基金项目] 国家自然科学基金资助(51874015);国家重点研发计划(2017YFC0805204);中央高校基本科研业务费(3142015028, HKJYD201604);山西华阳集团重点项目(GY19007)

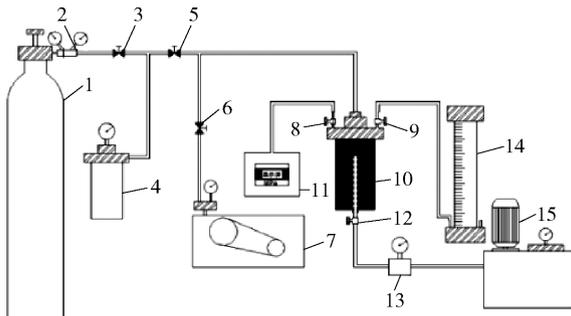
[引用格式] 程红林. 注水对煤体瓦斯解吸综合影响的试验研究及分析[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(4): 16-20.

6 MPa; 压力量程 0 ~ 10 MPa, 精确度等级为 0.25%。
连接管路选用耐压值不低于 15 MPa。



图1 实验系统实物图

瓦斯解吸单元中采用排水集气法测定不同时间煤的瓦斯解吸量, 解吸单元包括两根量程 1 200 mL 的解吸量筒, 精度为 4 mL。连接解吸量筒和煤样罐的管路可以根据实验系统的管路需要随意弯曲变形, 且气密性好, 能够保证在实验过程中不漏气, 不影响实验测量。实验原理图如图 2 所示。



1—甲烷气瓶; 2—减压阀; 3、5、6—阀门; 4—蓄气罐; 7—真空泵; 8、9、12—控制阀; 10—煤样罐; 11—压力监测仪; 13—流量计; 14—解吸仪; 15—注水泵

图2 实验系统原理图

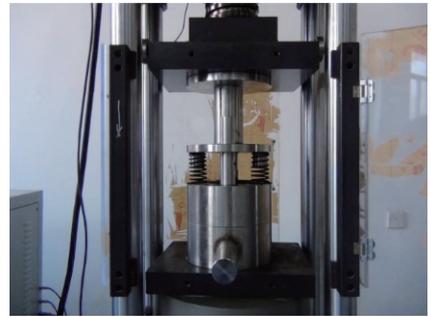
2.2 实验样品

实验煤样取自阳煤二矿 81201 工作面 15# 煤。采集新鲜暴露的块状煤样, 剔除夹矸密封送至实验室。

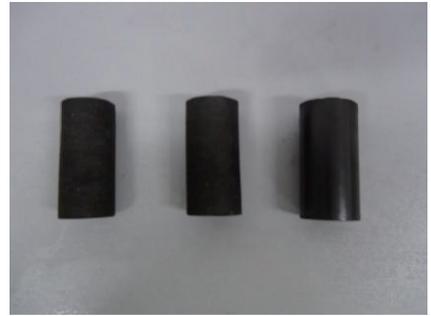
通过对采集的块状煤样破碎和研磨筛分(粒径 < 200 目), 将煤粉与少量纯净水均匀混合, 煤样质量控制在 260 g 左右, 利用自制的高压成型装置在单轴压力试验机上制备了标准煤样试件, 压制过程缓慢升压(50 N/s), 成型压力 196 kN, 稳压 4 ~ 5 h。高压成型装置及压制的型煤试件如图 3 所示。

2.3 实验步骤

(1) 将制备好的一定质量煤样(根据实验目的有干燥煤样和不同含水量煤样)装入煤样罐中后轻



(a) 高压成型装置



(b) 标准型煤试件

图3 高压成型装置及压制的型煤试件

微震平, 旋紧螺钉密封煤样罐并对系统进行气密性检查。

(2) 开启真空泵, 对实验系统进行长时间抽真空后将常压氦气充入实验装置, 通过测量充入氦气的体积获得系统的自由体积, 测定 3 次取平均值为最终测定值。煤样罐内自由体积为

$$V_d = V_s - \frac{G}{\rho_t} \quad (1)$$

式中, V_d 为煤样罐内部自由体积, cm^3 ; V_s 为煤样罐容积, cm^3 ; G 为实验煤样质量, g ; ρ_t 为煤的真相对密度, cm^3/g 。

(3) 经过气密性检查后释放高压瓦斯, 恒温进行真空脱气, 脱气时间视不同煤样、煤样质量及泵的能力而定。

(4) 煤样充气包括常压充气吸附和高压充气吸附, 两个阶段后进行高压注水吸附平衡, 在向吸附平衡煤样高压注水, 注水压力及注水量根据实验水分确定, 记录注水压力、时间及流量。利用压力监测系统实时采集不同时间的气体压力值和最终吸附平衡压力。

(5) 瓦斯解吸量测定。瓦斯解吸时间为 8 h, 解吸时间 1 ~ 10 min 每 1 min 读取一次观测值, 10 ~ 20 min 每 2 min 读取一次数据, 随着解吸速度降低, 逐渐增大续取时间间隔, 180 ~ 480 min 每 60 min 读

取一次数据。当气体解吸量小于 $0.05 \text{ cm}^3/\text{h}$ 时,终止解吸测定。将不同阶段的解吸量换算为标准状态下单位质量煤的体积,计算公式为

$$Q_t = \frac{273.2Q'_t(P_0 - 9.8h_w - P_s)}{101325G(273.2 + T)} \quad (2)$$

式中, Q_t 为解吸时间 t 的标准状态下累积气体解吸量, cm^3 ; Q'_t 为解吸时间 t 的实测累积气体解吸量, cm^3 ; P_0 为实验室大气压力, Pa ; h_w 为实验时量筒内水柱高度, mm ; P_s 为温度 T 时的饱和水蒸气压力, Pa ; T 为实验室环境温度, $^\circ\text{C}$; G 为实验煤样质量, g 。

3 实验结果分析

3.1 不同含水量对煤体瓦斯解吸影响

本文为探讨水分含量大小对煤吸附瓦斯量的影响,高压容量法测试了不同含水量煤样 30°C 条件下的吸附等温线。依据朗格缪尔方程计算煤的吸附常数 a , a 为煤的极限(饱和)瓦斯吸附量,表征煤的瓦斯吸附能力强弱。2组煤样的吸附常数 a 与水分含量的关系曲线如图4所示。

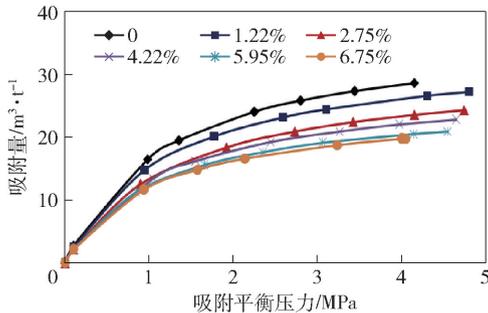


图4 不同含水量煤样瓦斯吸附等温线

由图4可知,不同含水量煤样的瓦斯吸附等温线均表现为先快速增长后趋于平缓的变化趋势;在低压段(吸附平衡压力 $< 0.3 \text{ MPa}$)各煤样吸附瓦斯量的差异不显著,随着吸附平衡压力增大,差异性逐渐显著。

随着煤样含水量增加,相同吸附平衡压力下,煤样的瓦斯吸附量变小,但存在一个临界水分含量值(平衡水分),当超过该值时,水分含量的增加对瓦斯吸附量的变化基本无影响。

由图5可知,随着煤样含水量增加,极限瓦斯吸附量(a 值)先快速下降,之后下降趋势变缓,最终趋于一稳定值,即水分含量再增加对煤样的极限吸附瓦斯量无影响。15#煤样的极限瓦斯吸附量 a 与水分含量 m 的关系多项式拟合公式为

$$a = 0.14m^2 - 2.66m + 37.08 \quad (3)$$

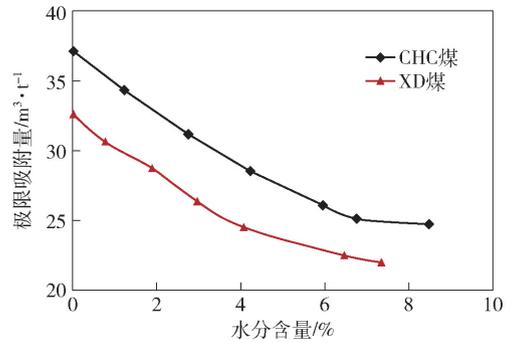


图5 极限吸附量与水分含量关系曲线

上述拟合公式的相关系数均大于0.9。煤吸附瓦斯的能力随水分含量增加降低,但存在水分含量临界值,与相关学者研究结果一致。对于CHC煤,干燥煤的 a 值为 $37.08 \text{ m}^3/\text{t}$,水分含量为6.75%, a 值为 $25.14 \text{ m}^3/\text{t}$,吸附能力降低32.20%。当水分含量为10%时,煤样的吸附能力降低近40%。预制水分侵入对煤体瓦斯吸附量影响显著,能够降低煤的瓦斯吸附量,但水分含量的影响作用存在一个极限值。

3.2 水分对煤体瓦斯微观置换解吸作用

煤的瓦斯解吸类型主要有降压解吸、升温解吸、置换解吸、扩散解吸和混合解吸等。置换解吸是指向含瓦斯煤体注入比 CH_4 吸附性更强的气体或液体时,该流体与 CH_4 展开竞争吸附,促使部分煤吸附的 CH_4 解吸。置换解吸作用示意图如图6所示。

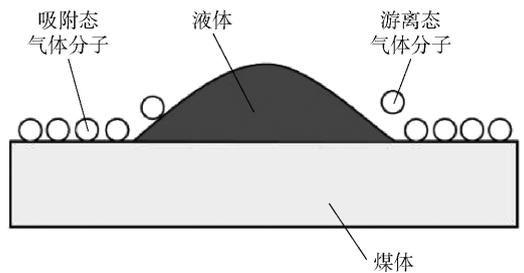


图6 置换解吸作用示意图

实验室注水实验不同实验条件水分置换解吸瓦斯量见表1。

由表1可知,再平衡后的罐内气体压力高于初始状态吸附平衡压力,最大增加32%;在相同注水量条件下,随着吸附平衡压力增大,水分置换解吸瓦斯量增加;在相同吸附平衡压力条件下,随着注水量的增大,水分置换瓦斯量增加。吸附平衡压力为 0.5 MPa ,注水量为 50 mL ,YE煤的置换解吸瓦斯量为 $1.34 \text{ m}^3/\text{t}$ 。实验表明注水卸压后再平衡过程(时

间较长)中,水分缓慢充分润湿煤样,并与甲烷展开竞争吸附,水分置换解吸了部分吸附瓦斯,瓦斯由吸附态转化为游离态,进而导致再平衡气体压力升高,进一步验证了水分对煤体瓦斯的置换解吸作用。

表1 不同实验条件置换解吸瓦斯量结果

煤样	吸附平衡压力/ MPa	注水量/ mL	注水结束压力/ MPa	再平衡压力/ MPa	置换解吸瓦斯量/ m ³ ·t ⁻¹
YE煤	0.3	50	0.78	0.37	0.65
	0.5	50	1.39	0.61	1.34
	0.8	50	2.29	0.88	1.85
	0.5	25	0.95	0.57	0.99
	0.5	100	2.79	0.66	1.68

3.3 注水对煤体瓦斯宏观驱赶作用

实验室对含瓦斯煤体注水实验时,注水压力、流量及润湿煤体区域均较小,压力水克服渗流阻力进入煤体内部孔裂隙,导致煤样罐内自由空间体积减小,罐内游离CH₄气体被压缩导致气体压力升高。由于注水时间较短(10 min),且注入煤体水量可知,忽略注水过程中气体压力变化影响煤对CH₄的吸附和水分的蒸发,不考虑压力水对煤体孔隙的沟通作用引起的罐内自由空间变化,则可认为气体压力升高引起游离气变化值即为驱赶瓦斯量Q_q,计算公式为

$$Q_q = \frac{22.4 \times 10^3 (V_0 - V_w)}{mRt} \left(\frac{P_1}{Z_1} - \frac{P_0}{Z_0} \right) \quad (4)$$

式中,m为煤样罐内煤样质量,g;V₀为煤样罐内自由空间体积,可采用式(1)计算,mL;V_w为注入煤样罐水的体积,可采用实际注水量计算,mL;P₀、P₁分别为初始平衡气体压力和注水后再平衡压力,MPa;Z₀、Z₁分别为恒温条件对应P₀、P₁的甲烷气体压缩因子,MPa;T为实验时恒温温度,K;R为摩尔气体常数,9.314 J/mol。

煤样不同注水条件实测的驱赶瓦斯量见表2,下文表中,为方便标记,均使用YE煤代表阳泉二矿煤样。

由表2可知,在相同注水量条件下,随着吸附平衡压力增大,注水驱赶瓦斯量增加;相同吸附平衡压力条件下,随着注水量的增大,注水驱赶瓦斯量增加。吸附平衡压力为0.5 MPa,注水量为50 mL, YE煤的驱赶瓦斯量为0.89 m³/t。煤的瓦斯吸附平衡压力大,吸附瓦斯量和游离瓦斯量均增大,相同注水

量条件(占据的自由空间体积相同)驱赶的瓦斯量较大。注水量增大时,注入水占据的煤体自由空间体积大,相同的游离瓦斯量被压缩升压排出量更大。实验结果验证了高压注水对煤层游离瓦斯的驱赶作用。

表2 不同实验条件驱替瓦斯量结果

煤样	吸附平衡压力/ MPa	注水量/ mL	注水结束压力/ MPa	驱赶瓦斯量/ m ³ ·t ⁻¹
	0.3	50	0.78	0.35
	0.5	50	1.39	0.89
YE煤	0.8	50	2.29	1.48
	0.5	25	0.95	0.58
	0.5	100	2.79	1.35

3.4 注水对含瓦斯煤体瓦斯影响综合分析

注水是抑制含瓦斯煤体瓦斯解吸还是促进解吸,可通过对比注水煤样和初始条件煤样的瓦斯解吸量验证。以YE煤样吸附平衡压力0.5 MPa量为例,注水煤样不同阶段瓦斯解吸量和注水后煤样的平均含水量见表3和图7所示。

表3 不同实验条件下的YE瓦斯总解吸量结果

吸附平衡压力/ MPa	注水量/ mL	驱赶瓦斯量/ m ³ ·t ⁻¹	置换解吸瓦斯量/ m ³ ·t ⁻¹	卸压解吸瓦斯量/ m ³ ·t ⁻¹	水分含量/ %	总解吸量/ m ³ ·t ⁻¹
0.5	0	0	0	7.55	1.15	7.55
0.5	25	0.58	0.99	6.88	2.55	8.45
0.5	50	0.89	1.34	6.40	3.98	8.63
0.5	100	1.35	1.68	5.88	7.42	8.91

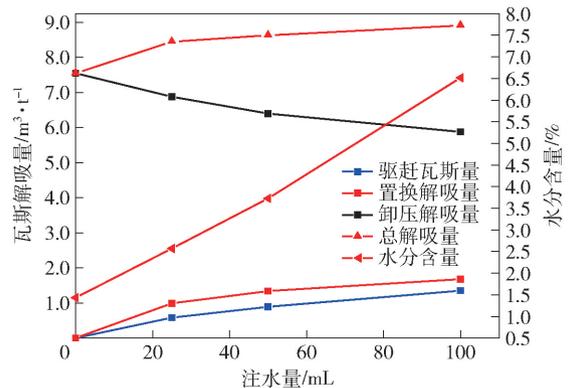


图7 解吸量注水量与水分含量关系曲线

由图7可知,随着注水量的增大,煤样的平均水分含量增大,注水量为100 mL,煤样的含水量超过6.5%;含瓦斯煤样注水后的总瓦斯解吸量均大于原

始煤样的卸压解吸量,且注水量越大增值越明显;YE煤不同注水条件总瓦斯解吸量增加 $0.90 \sim 1.36 \text{ m}^3/\text{t}$,最大增加 18.01% ;实验表明注水能够增加含瓦斯煤体的瓦斯解吸量,注水驱替瓦斯(驱赶作用和置换解吸作用)效应明显。

在煤层气领域,采用卸压解吸原理的排采技术最多能开采出 50% 的煤层气资源。为提高煤层气产出率,基于置换解吸原理提出了注气驱替煤层气工艺技术,采用比 CH_4 吸附性更强的气体注入煤层,促使煤层中的 CH_4 解吸。理论与实践研究均表明,煤吸附 CH_4 、 CO_2 和 N_2 能力不同,由强到弱顺序为 $\text{CO}_2 > \text{CH}_4 > \text{N}_2$ 。研究表明,从吸附能角度考虑, CH_4 分子在煤表面吸附时,约释放 $12.29 \text{ kJ}/\text{mol}$ 的能量, H_2O 分子在煤表面吸附时,约释放 $20.06 \text{ kJ}/\text{mol}$ 的能量,煤吸附瓦斯时释放的能量小于吸附水释放的能量,煤吸附水的系统稳定性更强;另外从吸附趋势以及分子间作用力估算,煤对水的作用力强于对瓦斯的作用力,在煤注水置换解吸瓦斯规程中的瓦斯解吸量要大于直接注水驱替量。

4 结论

(1)预制的的水分侵入对煤体瓦斯吸附量影响显著,能够降低煤的瓦斯吸附量,水分含量与瓦斯极限吸附量之间存在函数关系。但水分含量对瓦斯极限吸附量的影响作用存在一个极限值。

(2)在相同注水量条件下,随着吸附平衡压力增大,注水驱赶瓦斯量增加。相同吸附平衡压力条件下,随着注水量的增大,注水驱赶瓦斯量增加。

(3)再平衡后的罐内气体压力高于初始状态吸附平衡压力,最大增加 32% ;在相同注水量条件下,随着吸附平衡压力增大,水分置换解吸瓦斯量增加;在相同吸附平衡压力条件下,随着注水量的增大,水分置换瓦斯量增加。

(4)随着注水量的增大,煤样的平均水分含量增大。含瓦斯煤样注水后的总瓦斯解吸量随注水量越大而增大。实验表明注水能够增加含瓦斯煤体的瓦斯解吸量,注水对瓦斯的驱赶作用和置换解吸作

用效应明显。

[参考文献]

- [1] 刘世奇,王恬,杜艺,等. 超临界 CO_2 对烟煤和无烟煤化学结构的影响[J]. 煤田地质与勘探,2018,46(5): 19-25.
- [2] 王镜惠,尹宇寒,梅明华,等. 高煤阶煤储层解吸曲线定量表征及解吸参数研究[J]. 地质与勘探,2020,56(5): 1096-1104.
- [3] 桑树勋,周效志,刘世奇,等. 应力释放构造煤煤层气开发理论与关键技术研究进展[J]. 煤炭学报,2020,45(7): 2531-2543.
- [4] 刘雄,周德胜,师煜涵,等. 考虑渗透压的致密砂岩储层渗吸半解析数学模型[J]. 油气地质与采收率,2018,25(5): 93-98.
- [5] 李宪文,刘锦,郭钢,等. 致密砂岩储层渗吸数学模型及应用研究[J]. 特种油气藏,2017,24(6): 79-83.
- [6] 王飞,潘子晴. 化学势差驱动下的页岩储集层压裂液返排数值模拟[J]. 石油勘探与开发,2016,43(6): 971-977.
- [7] 葛燕燕,秦勇,傅雪海,等. 不同粒径煤样常压与带压解吸对比实验研究[J]. 中国矿业大学学报,2015,44(4): 673-678.
- [8] 简阔,傅雪海,张玉贵. 构造煤煤层气解吸阶段分析及最大瞬时解吸量计算[J]. 煤炭科学技术,2015,43(4): 57-62.
- [9] 李全中,蔡永乐,胡海洋. 泥页岩中黏土矿物纳米孔隙结构特征及其对甲烷吸附的影响[J]. 煤炭学报,2017,42(9): 2414-2419.
- [10] 朱苏阳,杜志敏,李传亮,彭小龙. 基于复合解吸理论的煤层气物质平衡方法[J]. 天然气地球科学,2016,27(6): 1128-1133.
- [11] 杨柳,葛洪魁,程远方,等. 页岩储层压裂液渗吸-离子扩散及其影响因素[J]. 中国海上油气,2016,28(4): 94-99.
- [12] 郭钢,薛小佳,李楷,等. 压裂液存留液对致密油储层渗吸替油效果的影响[J]. 钻井液与完井液,2016,33(6): 121-126.
- [13] 马东民,李卫波,蔺亚兵. 降压解吸关系式在中高阶煤层气排采中的应用[J]. 安科技大学学报,2010,30(6): 697-701.