

文章编号: 1001-1986(2015)01-0030-05

钻井液对煤心煤层气解吸损失量的影响

谢向向¹, 张玉贵^{1,2}, 姜家钰¹, 张大伟¹

(1. 河南理工大学安全科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室—省部共建国家重点实验室培育基地, 河南 焦作 454002)

摘要: 为了准确求取钻井液作用下煤心煤层气解吸损失量, 借助物理化学、界面化学、表面浸润、浸润相变和煤化学等理论, 并通过相关实验研究, 讨论了游离态煤层气对解吸损失量的影响, 探讨了钻井液作用下液置气和水锁现象对煤层气解吸机理的影响。结果表明: 在钻井液作用下, 煤心煤层气解吸是多因素动态耦合作用的结果, 煤层气原始压力、煤结构破坏类型、粒度、煤级、提钻速度和装罐时间是影响煤层气解吸损失量的主要因素; 另外, 煤心煤层气在钻井液和空气两种介质中有置换解吸、变压解吸和常压解吸3种解吸过程。

关 键 词: 钻井液; 煤心煤层气; 损失量; 液置气; 水锁; 解吸

中图分类号: P618.13 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2015.01.007

The influence of drilling fluid on coal bed methane desorption loss of coal core

XIE Xiangxiang¹, ZHANG Yugui^{1,2}, JIANG Jiayu¹, ZHANG Dawei¹

(1. College of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454002, China)

Abstract: In order to accurately calculate the loss of CBM under the effect of drilling fluid, in this paper, with the help of physical chemistry theory, interfacial chemistry theory, surface wetting theory, wetting transition theory, coal chemistry theory and so on, meanwhile through the relevant experiment, the influence of free CBM on loss quantity was discussed. The influence of "liquid-replaced gas" and "water locking" phenomena on the desorption mechanism of CBM under the effect of drilling fluid was investigated. The results show that CBM desorption of coal core is the result of dynamic coupling of multi-factors under the effect of drilling fluid. CBM in-situ pressure, failure type, granularity, coal rank, core-hoisting velocity and canning time are the main factors influencing the desorption loss of CBM. Furthermore, CBM of coal core have three kinds of desorption process in the medium of drilling fluid and air: displacement desorption, variable pressure desorption, atmospheric pressure desorption.

Key words: drilling fluid; coal core CBM; loss quantity; liquid-replaced gas; water locking; desorption

准确的气含量数据是煤层气开发规划中估算资源量必不可少的参数之一, 它关系到产气能力的预测、布井和开采条件的确定, 决定着煤层气资源前景的好坏及能否进行经济开发^[1]。在煤层气含量测试过程中, 自然解吸量和残存量为实际测定值, 气含量的误差主要来自损失量的求取。煤层气损失量是钻头钻开煤层到煤样装罐密封连通解吸仪开始解吸之前释放掉的气含量, 准确求取损失量是煤层气含量测定的难点^[2-5], 也是一个亟待解决的基础科学问题^[6]。目前, 国内外各类煤心煤层气损失量推算方法均是基于煤样在空气介质中的解吸规律和煤样

提及地面测得的气体解吸数据来推算取心过程煤层气在钻井液介质中的损失量^[7], 实质上, 煤心煤层气在空气介质中解吸扩散为等压解吸过程, 而在钻井液条件下是个变压解吸过程^[8]。

前人对空气介质中煤层气解吸损失量做过大量研究, 而对钻井液作用下煤心煤层气解吸损失量的研究很少, 尤其是对钻井液作用下煤心煤层气各阶段不同解吸机理对损失量的研究尚无报道, 且现行各类煤层气损失量均不包括游离态煤层气含量^[9]。本文通过实验室空气介质中煤层气解吸实验和现场煤心煤层气解吸实验, 并借鉴前人相关研究实验^[8,10-11], 对钻

收稿日期: 2013-07-26

基金项目: 国家科技重大专项课题(2011ZX05040-005); 国家自然科学基金项目(40772094)

作者简介: 谢向向(1986-), 男, 河南商丘人, 硕士, 从事煤层气地质与工程研究. E-mail: xiangxiangxiepu@163.com

引用格式: 谢向向, 张玉贵, 姜家钰, 等. 钻井液对煤心煤层气解吸损失量的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(1):30-34.

井液作用下煤层气解吸机理及煤心煤层气解吸损失量影响因素进行探讨。

1 钻井液作用下煤层气解吸机理

1.1 自然解吸法测定原理

自然解吸法的理论依据是：煤层气主要以吸附态和游离态赋存于煤层中，其中吸附态占 70%~95%，游离态占 5%~20%，在原始状态下，吸附态和游离态煤层气处于动态平衡，当外界条件改变时，该平衡被打破。当外界压力小于煤层气的临界解吸压力时，吸附态煤层气开始解吸：首先是煤基质表面或孔隙内表面上的吸附态发生微观解吸；随后在浓度差的驱动下，已经解吸的煤层气向裂隙中扩散即宏观解吸。

1.2 液置气原理

液置气即置换解吸，其本质是钻井液浸入到煤心，钻井液与吸附态煤层气发生竞位吸附，由于煤对钻井液的吸附能力强于煤层气，钻井液占据已被煤层气分子吸附的吸附位，使原来呈吸附态的煤层气转化为游离态，从而促进煤心煤层气解吸。张遂安等^[12]通过 CO₂ 置换 CH₄ 吸附与解吸实验，证实了存在置换解吸，并总结出“竞争吸附与弱势解吸”的基本规律。

1.3 水锁机理

水锁机理是煤基质浸入并吸附钻井液，导致煤层气扩散渗流通道变小，渗透率降低，同时孔隙通道中产生毛细管阻力和流体摩擦阻力，如孔隙中的煤层气

的驱动压力小于此阻力，通道堵塞导致水锁，抑制和延缓煤心煤层气解吸(图 1)。文献[13-14]应用热力学和动力学理论研究指出，界面张力、接触角、孔喉半径、孔隙结构和储层压力等影响煤心水锁效应。

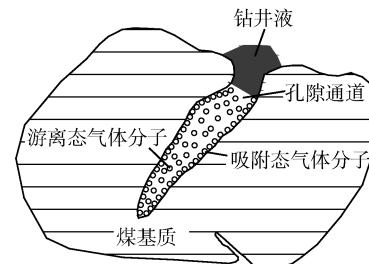


图 1 水锁现象示意图

Fig.1 Sketch of water locking

2 实验结果

2.1 空气介质中煤层气解吸实验

实验煤样采自河南鹤壁六矿和祁东矿，煤样的详细信息如表 1。空气介质中的煤层气解吸实验采用自制的煤层气解吸实验装置^[15]。将实验样品按标准制成不同的粒度，105 °C 烘干 2 h，称重装罐，放在 30 °C 恒温水浴中抽真空，再充纯度为 99.99% 的甲烷气体，调到特定的煤层气吸附平衡压力，待压力稳定后开始解吸。为了提高解吸速率精度，本实验采用气体质量流量计，数据采集频率为 1 s。通过实验，得到不同吸附平衡压力、不同破坏类型、不同粒度、不同煤级对煤层气解吸的影响情况(表 2、图 2)。

表 1 实验样品煤质特征与煤层气参数

Table 1 Coal characteristics of laboratory samples and CBM adsorption-desorption parameters

煤样编号	煤样来源	煤级	煤的破坏类型	坚固性系数	煤层气(瓦斯)放散初速度	真密度/(g·cm ⁻³)	工业分析/%			等温吸附试验	
							M _{ad}	A _{ad}	V _{adf}	a/(cm ³ ·g ⁻¹)	b/MPa ⁻¹
H6N	鹤壁原生结构煤	贫瘦煤	II类	0.62	8	1.37	0.66	7.82	14.17	26.84	1.15
H6D	鹤壁构造煤	贫瘦煤	IV-V类	0.13	12	1.38	0.92	8.42	13.98	31.57	1.34
QDN	祁东原生结构煤	气煤	II类	0.91	3	1.39	0.71	10.91	36.72	21.62	0.26

表 2 不同实验条件下煤样的煤层气解吸量

Table 2 CBM desorption quantity of samples in different experimental conditions

实验编号	煤样	煤样粒度/mm	压力/MPa	0~60 min 的解吸量/(mL·g ⁻¹)	0~1 min 的解吸量/(mL·g ⁻¹)	0~3 min 的解吸量/(mL·g ⁻¹)	0~5 min 的解吸量/(mL·g ⁻¹)	0~10 min 的解吸量/(mL·g ⁻¹)
1	鹤壁构造煤	0.5~1.0	1.0	8.19	2.44	3.78	4.5	5.62
2		0.25~0.5	1.0	6.74	1.73	2.53	2.98	3.66
3	鹤壁原生结构煤	0.5~1.0	1.0	6.43	1.26	1.89	2.27	2.86
4		0.5~1.0	0.5	2.44	0.83	1.29	1.55	2.00
5	祁东原生结构煤	0.5~1.0	1.0	5.12	1.03	1.26	1.40	1.63

2.2 外液浸入时煤层气解吸实验

钻井液对煤心煤层气解吸损失量的影响，可引用张国华^[10]对煤层注水防止工作面瓦斯涌出量超限

实验进行说明。该实验煤样采自七台河桃山矿，煤样粒度 20~30 mm，实验温度 17 °C。通过实验，得到煤心甲烷在外液浸入过程中的置换解吸(图 3a)、

浸入后降压解吸(图 3b)、浸入后常压解吸(图 3c)3 个解吸过程。而在钻井液条件下, 煤心煤层气含量测定过程中先后经历了钻井液置换煤基质表面吸附态煤层气的置换解吸、提钻过程中的变压解吸、煤心提至地面后的常压解吸 3 个解吸过程。

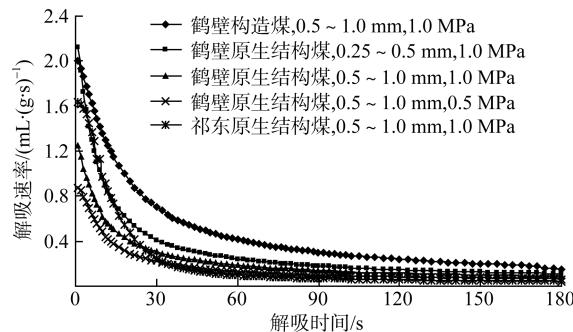


图 2 空气介质中煤层气解吸速率随时间的变化曲线
Fig.2 Change of the desorption rate of CBM in air medium with time

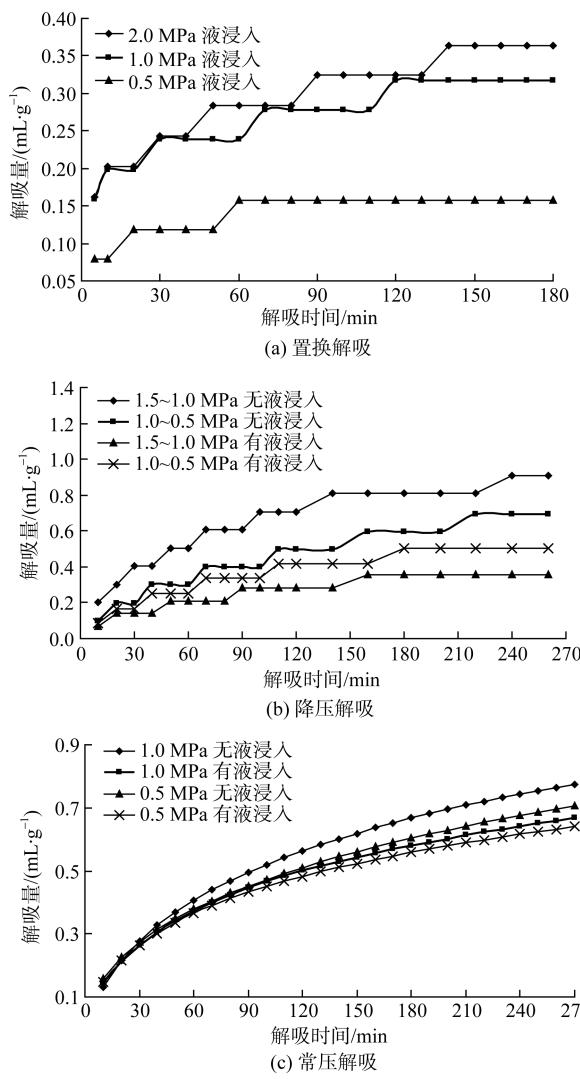


图 3 外液浸入时甲烷解吸曲线(据文献[10]修改)
Fig.3 Methane desorption under liquid immersion

2.3 不同提钻速度和装罐时间时煤层气解吸实验

提钻速度对煤心煤层气解吸损失量的影响, 可通过引用孙锐^[7]对不同提钻速度下煤心煤层气的解吸实验进行说明。该实验样品为晋城无烟煤, 煤样粒度 1~3 mm, 煤层气原始压力 2.50 MPa, 钻井液初始压力 6.15 MPa, 孔深 535 m, 实验结果如图 4。

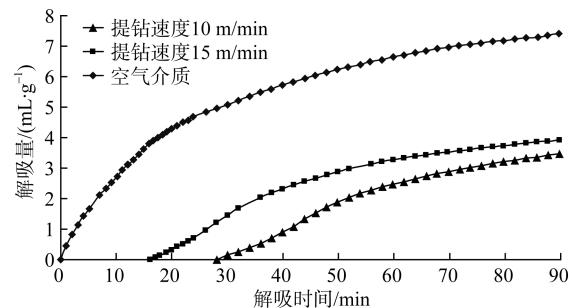


图 4 提钻速度与煤层气解吸量关系(据文献[11]修改)
Fig.4 The relationship between core-hoisting velocity and desorption quantity

为了研究地面装罐时间对煤心煤层气解吸损失量的影响, 作者在对潞安矿区某煤层气参数井 15 号煤层进行煤层气含量测定时做了一组对比实验。实验中, 煤层气含量采用自然解吸法测定, 绳索取心, 钻井液为泥浆, 罐 1 和罐 2 为同一次提钻取心煤样, 实验结果见图 5 和表 3。

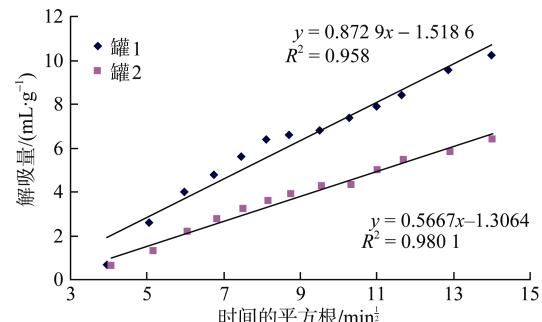


图 5 不同装罐时间与煤层气解吸量的关系
Fig.5 The relationship between CBM desorption quantity and different canning time

3 煤心煤层气解吸损失量影响因素分析

3.1 游离态煤层气对损失量的影响

煤的孔隙和裂隙中充满游离态煤层气, 这部分气体服从一般气体方程, 即:

$$W_y = k \cdot \rho \cdot P \cdot S_g$$

式中 W_y 为游离气含量, cm^3/g ; k 为煤层气压缩系数, MPa^{-1} ; ρ 为有效孔隙体积, cm^3/g ; P 为煤层气压力, MPa ; S_g 为含气饱和度, %。

前人研究发现: 低阶煤的大、中孔发育, 小、

表3 煤心煤层气解吸实测记录
Table 3 The measurement record of CBM desorption of coal core

煤样	采样深度 /m	装样暴露时间 /min	煤层气损失量 /(mL·g ⁻¹ ,daf)	煤层气自然解吸量 /(mL·g ⁻¹ ,daf)	煤层气残存量 /(mL·g ⁻¹ ,daf)	煤层气含量 /(mL·g ⁻¹ ,daf)
罐1	717.0~717.4	3.10	1.52	8.50	4.78	14.80
罐2	717.4~717.8	4.07	1.31	7.23	4.82	13.36

微孔不发育，孔隙体积大，其中大孔孔容约占总孔容的20%~46%，个别煤样可达90%，游离气含量通常占总气含量的50%以上^[9,16]；中阶煤的大、中孔较发育，尤以焦煤最高，占总孔隙体积的38%左右，微孔相对较少，小于总孔隙体积的50%；高阶煤的微孔发育，占总孔隙体积的50%以上，大、中孔所占比例较低，平均小于总孔隙体积的10%^[17]，其中无烟煤游离气约占总气含量的5%^[18]。游离态煤层气在装罐之前就已逸散，而国内外计算煤层气损失量时却并未考虑这一部分气体，这就使测得的低阶煤的气含量严重偏小，中阶煤的气含量偏小，而高阶煤的气含量较接近真实值。

3.2 液置气和水锁对煤层气损失量的影响

煤基质渗入并吸附钻井液，导致煤层气扩散渗流通道变小，渗透率降低，出现液置气和水锁现象。由能量最低原理可知^[19~21]，钻井液在裂隙及大中孔隙渗流过程中，占据煤基质表面的吸附态煤层气的吸附位，置换出吸附态煤层气，促进煤层气解吸，导致损失量增加；随着浸泡和浸入时间延长，钻井液逐渐浸入到煤基质的小微孔中，出现水锁现象，抑制煤层气的解吸，减少煤层气损失量。

实验结果(图3)显示：无论有无钻井液浸入，在其他实验条件一定时，煤层气原始压力越大，置换解吸、变压解吸和常压解吸3个解吸阶段的煤心煤层气的解吸量和解吸速率都相应增大，解吸持续时间也都相应延长。在有钻井液的实验条件下，浸入过程中的置换解吸、提钻过程中煤心煤层气压力与其周围钻井液压力不断寻求平衡的变压解吸、提至地面后煤心煤层气的常压解吸三者之间，解吸量变化曲线极为相似，都经历了3个明显的变化过程；所不同的是：置换解吸经历了快速置换、缓慢置换和停止置换，变压解吸经历了缓慢增加解吸、快速增加解吸和再缓慢增加解吸，而常压解吸经历了快速解吸、缓慢解吸和平稳解吸。

从图3a可见，在钻井液浸入过程中，存在液置气现象，随着煤层气原始压力增大，钻井液置换解吸出的煤层气含量增加，置换解吸时间延长，而置换解吸量的增幅减小，这说明了大中孔表面积占总表面积较小。从图3b可知，在其他实验条件一定时，与无钻井液浸入相比，钻井液浸入后，提钻过程中的煤心

煤层气解吸量大大减少，前1 h降幅为15.66%~50.19%，且解吸时间缩短，这说明钻井液浸入煤基质发生水锁现象，抑制和延缓了煤层气解吸。而由图3可看出，钻井液浸入后，常压解吸量比无钻井液条件下虽有减少，但变化不大，前1 h降幅仅为2.12%~7.13%；此外，从此图中也可看出，在吸附平衡压力为0.5 MPa和1.0 MPa条件下，前20 min内，有钻井液浸入时，其解吸量均大于无钻井液条件，这也证明了液置气现象的存在。

3.3 影响煤层气损失量的主要因素

从钻遇煤层、取心、提钻、地面装罐、连接解吸仪开始解吸之前，这段时间一直有煤层气逸散，且解吸速率越快，暴露时间越长，煤心煤层气损失量越大。因此，影响煤心煤层气解吸的因素便是影响煤心煤层气损失量的因素。这些因素包括煤层气原始压力、煤的破坏类型、粒度、煤级、提钻速度和地面装罐时间。

a. 煤层气原始压力不但表征了煤中煤层气含量的大小，而且为煤层气解吸扩散提供了所需的能量。原始压力越大，煤层气在钻井液介质中起始解吸时间越早，单位时间内压降梯度越大，解吸速度越快，损失量也更大^[22]。实验结果显示：空气介质中，粒度0.5~1.0 mm的鹤壁贫瘦煤在吸附平衡压力为1.0 MPa时的解吸初速率为1.25 mL/(g·s)，为0.5 MPa压力条件下的1.28倍；压力为1.0 MPa时，煤层气前1 min、10 min和1 h内的解吸量分别是0.5 MPa压力条件下的1.52倍、1.43倍和1.58倍(图2中曲线1、曲线4和表2)。钻井液浸入后，压降为1.5~1.0 MPa时，煤层气在前10 min、1 h内的解吸量分别为压降1.0~0.5 MPa的1.19倍和1.32倍(图3b)。

b. 王佑安等^[23]研究表明，煤的破坏类型越高，瓦斯解吸量和解吸速度愈大，与I类煤相比，II类煤、III类煤、IV类煤和V类煤在前10 min解吸指标分别提高了0.8、1.8、3.1和3.6倍。张玉贵等^[24]研究指出，破坏强烈的构造煤的大分子结构中芳香化程度高，低分子化合物含量大，造成分子间的间隙大，煤体强度低，比表面积大，导致构造煤具有高吸附、快解吸的特性。李云波等^[15]研究表明，构造煤前10 min瓦斯解吸量可达1 h内解吸总量的60%。实验结果(图2中曲线1、曲线3和表2)显示：鹤壁构造煤的解吸初速率为2.01 mL/(g·s)，为共生原生结构煤的1.61

倍 ;鹤壁构造煤前 1 min 的解吸量是共生原生结构煤的 1.94 倍 , 前 10 min 是共生的原生结构煤的 1.97 倍 , 而前 1 h 仅为共生原生结构煤的 1.07 倍。构造煤初期(前 3 min)解吸速率和解吸量非常大 , 因此 , 增大提钻速度和缩短装罐时间对减小构造煤损失量效果不明显。

c. 煤层气的解吸速率和解吸量对煤的粒度极为敏感。煤的粒度越大 , 煤层气扩散流动的距离越大 , 阻力越大 , 解吸速率和解吸量就小 ; 煤的粒度越小 , 煤层气扩散运移的距离越短 , 解吸速率和解吸量就大。前人研究认为 , 粒度为 $1 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$ 、 $100 \mu\text{m}$ 、 1 mm 、 1 cm 的煤样解吸其中 90% 的煤层气所需理论时间为 4.65 s、10 min、13 h、1 月、15 a。但杨其銮等研究表明 , 煤的解吸存在一个极限解吸粒度 , 当煤的粒度小于其极限粒度时 , 粒度越大 , 瓦斯解吸速度越小 , 衰减越慢。实验结果(图 2 中曲线 2、曲线 3 和表 2)显示 : 粒度为 $0.25\text{--}0.5 \text{ mm}$ 的鹤壁贫瘦煤煤层气的解吸初速率为 $2.12 \text{ mL/(g}\cdot\text{s)}$, 是粒度 $0.5\text{--}1.0 \text{ mm}$ 煤的 1.70 倍 粒度为 $0.25\text{--}0.5 \text{ mm}$ 煤的煤层气前 1 min、10 min、1 h 的解吸量是粒度 $0.5\text{--}1.0 \text{ mm}$ 煤的 1.37 倍、1.28 倍、1.05 倍。

d. 随着煤级的增高 , 煤中的微孔和小孔增加 , 比表面积增加 , 吸附能力增强 , 而大孔和中孔的迅速减小 , 导致煤中的总孔容呈指数下降^[25-26] ; 而煤的煤层气吸附解吸能力取决于煤的孔隙结构和比表面积。以鹤壁贫瘦煤和祁东肥煤为例 , 实验结果(图 2 中曲线 3、曲线 5 和表 2)显示 : 祁东肥煤的煤层气解吸初速率为 $1.64 \text{ mL/(g}\cdot\text{s)}$, 是鹤壁贫瘦煤的 1.31 倍 , 而在第 24 s , 鹤壁贫瘦煤的煤层气解吸速率与祁东肥煤相同 , 随后鹤壁贫瘦煤的煤层气解吸速率大于祁东肥煤的煤层气解吸速率 ; 鹤壁贫瘦煤前 5 min 的煤层气解吸量为 2.27 mL/g , 是祁东肥煤的 1.62 倍 ; 鹤壁贫瘦煤前 10 min 的煤层气解吸量为 2.86 mL/g , 是祁东肥煤的 1.75 倍。

e. 提钻速度决定着作用于取心管底钻井液压降梯度、煤层气起始解吸时间和解吸速率 , 从而影响煤层气损失量。实验结果(图 4)显示 : 提钻速度为 10 m/min 时 , 煤心煤层气在 28.09 min 开始解吸 , 煤心提至地面时煤层气解吸了 1.64 mL/g ; 而提钻速度为 15 m/min 时 , 煤心煤层气在 16.06 min 便开始解吸 , 煤心提至地面时解吸量只有 0.96 mL/g 。研究表明 : 在钻井液作用下 , 提钻速度快 , 煤心在钻井液中的时间短 , 煤层气损失量小。

f. 煤的地面装罐时间对煤心煤层气解吸损失量的影响很大。从图 5 和表 3 中看出 : 罐 2 比罐 1 装样暴露时间只多 58 s , 其推算损失气含量却比罐 1 小

0.21 mL/g , 自然解吸气含量小 1.27 mL/g , 造成煤层气含量比罐 1 偏小 1.44 mL/g 。

4 结 论

为了准确求取煤层气含量 , 本文深入探讨了游离态煤层气、煤层气原始压力、煤的破坏类型、粒度、煤级、提钻速度和装罐时间对煤层气解吸损失量的影响及钻井液作用下煤心煤层气的 3 个解吸过程(置换解吸、变压解吸和常压解吸)。

实验结果表明 : 钻井液浸入过程中的置换解吸行为 , 是钻井液和煤表面吸附态煤层气进行竞争吸附 , 基于弱势解吸理论 , 钻井液置换出吸附态煤层气 , 促进煤层气解吸 , 同时随着钻井液的不断浸入 , 煤基质膨胀变形 , 渗透率降低 , 在局部小孔和微孔部位发生水锁 , 抑制煤层气解吸 ; 提钻过程中的变压解吸行为 , 实质上是多因素动态耦合的复杂解吸过程 , 煤心煤层气解吸速率和解吸量先后经历了缓慢增加、快速增加、再缓慢增加的 3 个阶段 ; 空气介质中常压解吸规律 , 煤心煤层气一开始解吸速率便达到最大值 , 随后一直减小 , 这是现今国内外各类煤心煤层气损失量求取的理论依据。

分析认为 : 游离态煤层气、煤层气原始压力、煤的破坏类型、粒度、煤级、提钻速度和装罐时间是煤层气解吸损失量最主要的影响因素 ; 钻井液作用下 , 置换解吸、变压解吸和常压解吸的解吸规律有本质的差异 , 因此 , 有必要根据我国各含煤盆地煤的特殊情况 , 分别建立各含煤盆地包括游离态煤层气在内的钻井液作用下的置换解吸、变压解吸和常压解吸损失量的求取模型。

参考文献

- [1] 孟召平 , 田永东 , 李国富. 煤层气开发地质学理论与方法[M]. 北京 : 科学出版社 , 2010.
- [2] 徐成法 , 周胜国 , 郭淑敏. 煤层含气量测定方法探讨[J]. 焦作 : 河南理工学院学报 , 2005 , 24(2) : 106-108.
- [3] 邓泽 , 刘洪林 , 康永尚. 煤层气含气量测试中损失气量的估算方法[J]. 天然气工业 , 2008 , 28(3) : 85-86.
- [4] 李小彦. 煤层气含量测试中的有关问题[J]. 煤田地质与勘探 , 2000 , 28(2) : 22-24.
- [5] 丁石滚 , 杨昌光 , 贾翠芝. 用解析法测定煤层瓦斯含量时应注意的一些问题[J]. 焦作矿业学院学报 , 1994 , 13(6) : 94-98.
- [6] 秦勇 , 朱旺喜. 中国煤层气产业发展所面临的若干科学问题[J]. 中国科学基金 , 2006(3) : 148-151.
- [7] 杨兆彪 , 秦勇 , 王兆丰 , 等. 钻井液作用下煤心煤层气解吸-扩散模型及逸散量求取[J]. 中国科学 , 2010 , 40(2) : 171-177.

(下转第 42 页)

中心的环形导水通道，使冻结过程中的阻水构造转变成解冻后的良好通道，孔内高压水头将井筒较薄弱部位压裂而发生涌水灾害。

b. 处理冻结法成井后解冻造成的涌水，通过在含水层下主要工程结构上特定地层开挖环形巷道，揭露并切断冻结管，向环形导水通道内注浆，混凝土回填环形巷道形成人工隔水层的措施，控制与预防井筒涌水灾害。

c. 本文所述在建煤矿主井，通过注浆和形成人工隔水层后，井筒的涌水量由 $90 \text{ m}^3/\text{h}$ 降低至 $2 \text{ m}^3/\text{h}$ ，且施工对其他作业干扰小，方法简单高效且防治效果好，有效解决了深井冻结法施工解冻后水害治理问题。

d. 环形巷道结合耳碉措施，揭露并截断冻结管，利用注浆改善地层条件并形成局部人工隔水层的方法治理矿井水害，在国内尚属首例，对于深井冻结法施工的完善和深化研究具有重要的意义。

参考文献

- [1] BOWMAN I. Well-drilling methods[M]. Washington : United States Government Printing Office , 1911.
- [2] YANG Chunlai , WANG Zongmin. Surface pre-grouting and freezing for shaft sinking in aquifer formations[J]. Mine Water and the Environment , 2005 , 24 (4) : 209–212.
- [3] 余力 , 马英明. 特殊凿井法在矿井建设中的应用和发展[J]. 岩土工程学报 , 1984 , 6(3) : 1–10.
- [4] 周志利. 大断面立井井筒综合治水技术研究[J]. 中国煤炭 , 2011 , 37(2) : 56–58.
- [5] HUANG Shuxun , WANG Ling , CHEN Qinshu. Application of grouting technique to restore submerged shafts in China[J]. Mine Water and the Environment , 1984 , 3(3) : 19–34.
- [6] 王树常 , 葛洪章. 兖州矿区立井井壁破裂的原因分析及防治[J]. 中国矿业大学学报 , 1999 , 28(5) : 494–498.
- [7] 袁海峰 , 陈惠苏. 冻融破坏下水泥基材料中裂缝连通行为的模拟[J]. 东南大学学报 :自然科学版 ,2010 ,40(增刊 2) :126–132.
- [8] PIGEON M , PLEAU R. Durability of concrete in cold climates[M]. London : E&FN Spon , 1995.
- [9] 叶建雄 , 陈越 , 张靖 , 等. 水泥基材料超低温冻融循环试验研究[J]. 土木建筑与环境工程 , 2010 , 32(5) : 125–129.
- [10] BASHEER L , CLELAND D J. Freeze-thaw resistance of concretes treated with pore liners[J]. Construction and Building Materials , 2006 , 20(10) : 990–998.
- [11] 赵娟 , 巴恒静 , 邹超英 , 等. 冻融环境下钢筋混凝土间粘结界面的显微结构[J]. 武汉理工大学学报 , 2009 , 31(19) : 78–81.
- [12] SUBRAMANIAM K V , ALI-AHMAD M , GHOSN M. Freeze-thaw degradation of FRP-concrete interface : impact on cohesive fracture response[J]. Engineering Fracture Mechanics , 2008 , 75 (13) : 3924–3940.
- [13] 冀晓东 , 宋玉普. 冻融循环后光圆钢筋与混凝土粘结性能退化机理研究[J]. 建筑结构学报 , 2011 , 32(1) : 70–74.
- [14] BEHFARNIA K. Studying the effect of freeze and thaw cycles on bond strength of concrete repair materials[J]. Asian Journal of Civil Engineering(Building and Housing) 2010 ,11 (2) :165–172.
- [15] 肖长来 , 梁秀娟 , 王彪. 水文地质学[M]. 北京 : 清华大学出版社 , 2010.
- [16] 邵红旗. 综合注浆封堵全深冻结井筒井壁渗漏(涌)水技术[J]. 煤炭工程 , 2011(9) : 40–42.

(责任编辑 张宏)

(上接第 34 页)

- [8] 王兆丰. 空气、水和泥浆介质中煤层气解吸规律与应用研究[D]. 徐州 : 中国矿业大学安全学院 , 2001.
- [9] 张新民 , 韩保山 , 李建武. 褐煤煤层气储集特征及气含量确定方法[J]. 煤田地质与勘探 , 2006 , 34(3) : 28–30.
- [10] 张国华. 外液侵入对含瓦斯煤体瓦斯解吸影响实验研究[D]. 阜新 : 辽宁工程技术大学 , 2011.
- [11] 孙锐. 泥浆介质非等压条件下煤心瓦斯解吸规律研究[D]. 焦作 : 河南理工大学 , 2010.
- [12] 张遂安 , 霍永忠 , 叶建平 , 等. 煤层气的置换解吸实验及机理探索[J]. 科学通报 , 2005 , 50(增刊 1) : 143–146.
- [13] 贺承祖 , 华明琪. 水锁效应研究[J]. 钻井液与完井液 , 1996 , 13(6) : 13–15.
- [14] 谢晓永 , 郭新江 , 蒋祖军 , 等. 基于孔隙结构分形特征的水锁损害预测新方法[J]. 天然气工业 , 2012 , 32(11) : 68–71.
- [15] 李云波 , 张玉贵 , 张子敏 , 等. 构造煤瓦斯解吸初期特征实验研究[J]. 煤炭学报 , 2013 , 38(1) : 15–20.
- [16] 李小彦 , 司胜利. 我国煤储层煤层气解吸特征[J]. 煤田地质与勘探 , 2004 , 32(3) : 27–29.
- [17] 汤达祯 , 王维. 煤储层物性控制机理及有利储层预测方法[M]. 北京 : 科学出版社 , 2010.
- [18] BUSTIN R M , CLARKSON C R. Free gas storage in matrixporosity : a potentially significant coal bed resource in low rank coals[C]//Proceedings of the 1999 International Coal bed Methane Symposium. Tuscaloosa :The University of Alabama ,1999 :197–214.
- [19] 聂百胜 , 何雪秋 , 王恩元. 煤的表面自由能及应用探讨[J]. 太原理工大学学报 , 2000 , 31(4) : 346–348.
- [20] 周来 , 冯启言 , 秦勇. CO_2 和 CH_4 在煤基质表面竞争吸附的热力学分析[J]. 煤炭学报 , 2011 , 36(8) : 1307–1311.
- [21] 张时音 , 桑树勋 , 杨志刚. 液态水对煤吸附甲烷影响的机理分析[J]. 中国矿业大学学报 , 2009 , 38(5) : 707–712.
- [22] 杨兆彪 , 秦勇 , 王兆丰 , 等. 钻井液条件下煤心煤层气解吸扩散行为及其影响[J]. 中国矿业大学学报 , 2009 ,38(5) :624–628.
- [23] 王佑安 , 杨思敬. 煤和瓦斯突出危险煤层的某些特征[J]. 煤矿安全 , 1980(1) : 47–53.
- [24] 张玉贵 , 张子敏 , 曹运兴. 构造煤结构与瓦斯突出[J]. 煤炭学报 , 2007 , 32(3) : 281–284.
- [25] 杨起 , 韩德馨. 中国煤田地质学[M]. 北京 : 煤炭工业出版社 ,1979.
- [26] 霍永忠. 煤储层的气体解吸特性研究[J]. 天然气工业 , 2004 , 24(5) : 24–26.

(责任编辑 张爱香)