

煤储层原位含气量测试分析：以淮南潘集深部煤层为例

随峰堂

安徽省煤田地质局勘查研究院，安徽 合肥

收稿日期：2023年4月21日；录用日期：2023年5月21日；发布日期：2023年5月31日

摘要

为对比不同方法对于煤层含气量测试数值的差异，以淮南潘集深部煤层为研究对象，采用直接法和间接法对含气量进行计算。结果表明：由于损失气量计算方法不同，采用直接法测定的煤储层含气量结果存在差异。而损失气量的误差主要来源于煤样暴露时间。采用间接法对煤样推算出的煤储层含气量更接近实际煤储层含气量。从数值上来看，采用直接法计算的结果相比间接法结果偏小，而间接法可以避免估算煤层气损失量，可为煤储层含气量的计算提供一种新思路。

关键词

煤储层，含气量，直接法，间接法，淮南煤田

Analysis of Gas Content Testing in Coal Reservoirs: Taking the Deep Coal Seam of Panji Mining Area in Huainan Coalfield as an Example

Fengtang Sui

Exploration Research Institute Anhui Provincial Bureau of Coal Geology, Hefei Anhui

Received: Apr. 21st, 2023; accepted: May 21st, 2023; published: May 31st, 2023

Abstract

In order to compare the differences in gas content testing values of coal seams by using different

methods, the deep coal seams of Panji mining area of Huainan Coalfield were taken as the research objects, the gas content was calculated using direct and indirect methods. The results indicate that due to different calculation methods for the lost gas content, there are differences in the gas content results of coal reservoirs measured using direct methods. The error in lost gas content mainly comes from the exposure time of the coal sample. The indirect method is used to calculate the gas content of coal reservoirs, which is closer to the actual situation. From a numerical perspective, the results obtained by using the direct method are smaller than those obtained by the indirect method. However, the indirect method can avoid estimating the lost gas content, and provide a new approach for calculating the gas content of coal seams.

Keywords

Coal Reservoirs, Gas Content, Direct Method, Indirect Method, Huainan Coalfield

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤储层原位含气量是煤层气资源评价的重要指标, 测试煤储层原位含气量方法有直接法和间接法, 即野外瓦斯解吸实验和平衡水下吸附实验, 对比两种方法的适用性, 有益于进行煤层气资源评价和分析煤层气资源开发潜力[1]。直接法所得含气量为现场解吸量、残余气体量及损失量之和, 而间接法是通过进行等温吸附实验来确定相关参数求得含气量[2]。直接法中损失量主要基于解吸时间与初始解吸点的关系图, 然后采用图解法和分析法获得, 通常受暴露时间、气体解吸速率和煤质等因素影响[3]。直接法于 1970 年被提出并被美国矿务局(USBM)采用。基于煤层气赋存状态及煤层的多重孔裂隙结构, 解吸过程一般被视为气体从表面浓度为零、初始气体浓度恒定的球形煤颗粒中扩散[4]。资料显示, 初始时间的累积解吸气体体积与时间的平方根正相关关系, 可以用于计算损失量。随着暴露时间的延长, 损失量和相对误差表现出很大的数值[5]。如果损失量占总气体含量的 20%以上, 则视为不准确[6]。基于此, 常采用 USBM 法、多项式法、Amoco 法和 Smith-William 法对损失量进行计算[4] [5] [6] [7]。目前, 煤层气原位密封取样装置已经成熟, 由于在一定程度上减少了含气量计算的误差, 因此得到了广泛的应用。然而, 由于各种方法的适用性和分析原理, 它们在气体含量估计方面存在不同程度的误差[3]。间接法是在平衡水条件下的甲烷等温吸附实验结果的基础上, 结合煤储层压力、温度和含气饱和度估算得出煤储层理论含气量[8]。本文以淮南潘集深部煤层为研究对象, 采用直接法和间接法对含气量进行计算, 对比不同方法对于煤层含气量测试数值的差异。本研究可为煤层气勘探和开发提供一定的理论依据。

2. 地质背景

研究区位于淮南市潘集境内, 具有丰富的煤炭和煤层气资源。潘集深部北部界限为明龙山断层, 东部与怀远县相接, 西部依次与朱集东煤矿、潘一煤矿等相邻; 南部与新集二矿、新集三矿等相邻(图 1)。研究区的主体构造形态呈东西向, 构造格局近似于“对冲式断、褶皱造带”, 煤田构造形式为对冲构造盆地, 南北为推覆构造形成的叠瓦扇。其断层规模可分为正断层和逆断层。正断层是平行于郯庐断层的横切正断层, 逆断层则是伴随褶皱而形成的走向逆冲、逆掩断层[9]。

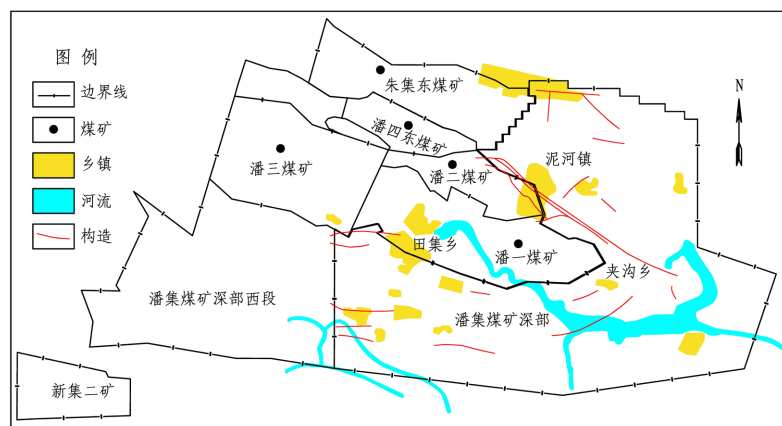


Figure 1. Location range of the deep mining area in Panji, Huainan
图 1. 淮南潘集深部矿区位置范围图

3. 方法与原理

3.1. 直接法

直接法测定的煤储层含气量由解吸量、损失量以及残余量构成，解吸量可通过基础数据来计算，残余量也得反复解吸测得，其中关键在于损失量的计算。煤储层含气量为解吸气量、损失气量、残余气量相加之和与实验室测得煤样质量之比[4]。损失气量难以计量，因此必须根据煤样暴露时间来计算。一般来说，煤样暴露时间越长，所估算得出的损失气量越多。利用直接法计算煤储层含气量，需计算损失气量，具体计算可通过各种数值方法进行回归获得[4]。

1) 国标法

采用国标法计算损失气量，假设钻机加速过程为匀速，以提钻时间的二分之一为煤样在孔中的暴露时间，再加上从孔中取出煤样至装入解吸罐之前的时间，其和为样品的总暴露时间，总暴露时间加上现场解吸积累时间，最终得出煤样解吸时间点[7]。

2) 泥浆法

与国标法不同的是，泥浆法以煤样被提升至煤层瓦斯压力与泥浆压力平衡的时间为暴露时间[4]。在求得煤样开始暴露时间的基础上，可得出煤层瓦斯压力与泥浆压力相平衡时所处的深度，煤样由此深度到达孔口所需时间可结合钻机的平均提速获得，此时间即为煤样在孔内的暴露时间[8]。

以上两种方法的差异点在于煤样在钻孔中的暴露时间。但是，计算煤储层损失量方法为 \sqrt{t} 法和图解法[9][10]。 \sqrt{t} 法是半经验计算方法，在解吸较短的一段时间，解吸量 V_{oi} 与解吸时间 $\sqrt{t+t_0}$ 呈线性关系，通过线性方程可求得损失气量，公式如下：

$$V_{oi} = K\sqrt{(t+t_0)} - V_s \quad (1)$$

在公式(1)中： V_{oi} 是煤样自暴露开始时起一定时间段内煤储层解吸气量， V_s 是煤样自暴露开始时起一定时间段内的损失气量， K 是待定系数； t_0 是暴露时间。

利用图解法和公式，绘制直线关系图，其直线截距的绝对值即为损失气量。

3.2. 间接法

间接法所需参数较多[4]，可适用于深部地区含气量的拟合[8]。通过等温吸附实验可得出等温吸附曲线所需相关参数，为运用 Langmuir 方程提供拟合数据。在实验之前，为使煤样中的孔隙达饱和，模拟煤

样在煤储层中的状态，需要将煤样用饱和溶液进行浸泡并置于封闭容器内[10] [11]。

理论上，甲烷分子与煤分子之间的相互作用属于表面均匀的单分子层吸附，由于被吸附分子间无作用力，吸附平衡属动态平衡。基于此动态平衡理论，Langmuir 方程可以较好地对象煤这样多孔隙介质对气体的吸附进行计算。由于 Langmuir 方程能较好地描述甲烷在煤介质中的吸附规律，其适用性也较为普遍[12]。Langmuir 方程为：

$$V = \frac{V_L P}{P_L + P} \tag{2}$$

式中： V 是吸附体积(m^3/t)， P 是压力(MPa)， V_L 是兰氏体积， P_L 是兰氏压力(MPa)。

4. 结果与分析

4.1. 直接法

建立坐标系，将数据点绘制坐标系内，在煤样解吸初期，连接线性关系较好的数据点，得出方程，其截距的绝对值即为损失气量(图 2 和图 3)。

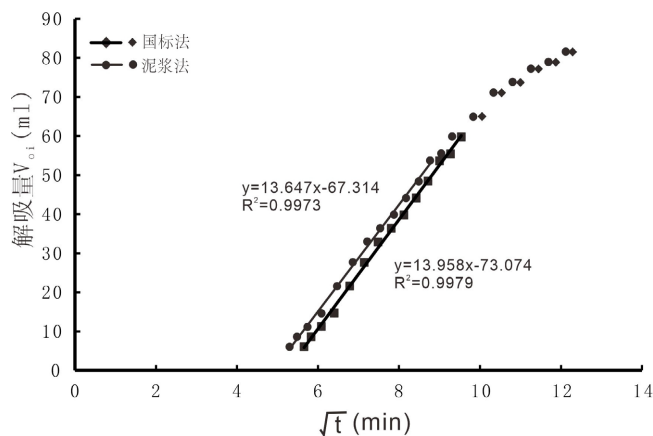


Figure 2. 13-1 Comparison diagram of direct method for coal reservoir

图 2. 13-1 煤储层直接法对比图

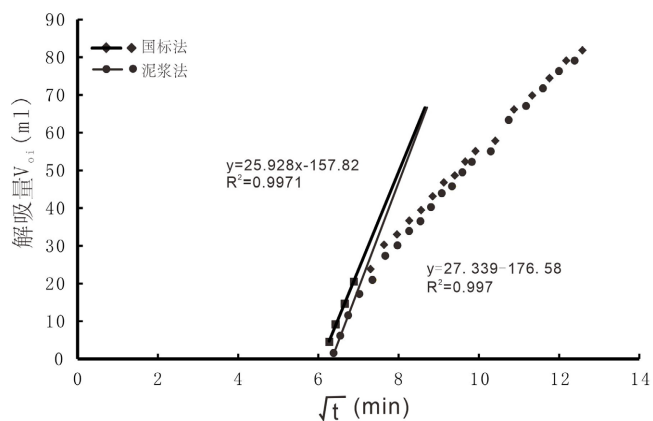


Figure 3. 11-2 Comparison diagram of direct method for coal reservoir

图 3. 11-2 煤储层直接法对比图

基于野外解吸原始数据, 如 13-1 煤层中, 国标法所得煤样暴露时间为 31 min, 泥浆法为 27.53 min。国标法求得煤储层损失气量为 73.07 ml, 泥浆法为 67.31 ml, 而相对损失气量误差为 8.60% (表 1 和表 2)。从数据来看, 泥浆法暴露时间更短, 所得的相对损失量误差更小。综上所述, 煤样暴露时间越短, 煤储层损失气量的计算结果误差越小, 则泥浆法计算的煤储层损失气量较符合实际[13]。

Table 1. Summary of coal sample desorption amount and gas amount (national standard method)

表 1. 煤样解吸量与瓦斯量筒表(国标法)

煤样	煤层	埋深(m)	储层温度(°C)	解吸量(ml)	含气量(cm ³ /g)
2-4	11-2	988.10	27	81.89	5.30
5-2	11-2	1300.97	42	142.89	6.37
4-5	11-2	1338.50	46	67.40	2.03
1-3	11-2	1280.85	36	116.86	9.69
8-2	11-2	1340.00	44	82.23	4.25
2-2	13-1	914.00	26	81.52	4.49
1-1	13-1	1228.40	41	676.02	4.89
4-3	13-1	1268.00	36	414.22	6.85
1-2	13-1	1215.19	34	128.00	4.53
6-1	13-1	1135.00	41	256.18	3.58

Table 2. Summary of coal sample desorption and gas content (slurry method)

表 2. 煤样解吸量与瓦斯量筒表(泥浆法)

煤样	煤层	埋深(m)	储层温度(°C)	解吸量(ml)	含气量(cm ³ /g)
2-4	11-2	988.10	27	81.89	5.15
5-2	11-2	1300.97	42	142.89	8.31
4-5	11-2	1338.50	46	67.40	1.97
1-3	11-2	1280.85	36	116.86	10.09
8-2	11-2	1340.00	44	82.23	4.20
2-2	13-1	914.00	26	81.52	4.46
1-1	13-1	1228.40	41	676.02	7.64
4-3	13-1	1268.00	36	414.22	6.79
1-2	13-1	1215.19	34	128.00	4.56
6-1	13-1	1135.00	41	256.18	7.55

4.2. 间接法

利用公式(2)对数据进行拟合。对各样品数据进行拟合时, 曲线与解吸点、吸附点重合度高。各个煤样吸附解吸的结果拟合程度较好, 其相关系数均在 0.99 以上, 相关系数接近于 1, 相对误差也较小, 因此所得结果符合拟合标准。根据实验测试结果, 结合储层温度和压力, 换算煤储层理论含气量如表 3 所示。

Table 3. Calculation of gas content in coal reservoir by isothermal adsorption equation of coal samples (indirect method)
表 3. 煤样等温吸附方程推算煤储层含气量表(间接法)

煤样	煤层	埋深(m)	储层温度(°C)	储层压力(MPa)	实际含气量(cm ³ /g)
2-4	11-2	988.10	27	7.28	8.04
5-2	11-2	1300.97	42	11.85	8.44
4-5	11-2	1338.50	46	12.40	8.47
1-3	11-2	1280.85	36	11.55	10.09
8-2	11-2	1340.00	44	12.42	8.47
2-2	13-1	914.00	26	9.85	15.73
1-1	13-1	1228.00	41	13.24	11.59
4-3	13-1	1268.00	36	13.67	11.68
1-2	13-1	1215.19	34	13.10	11.56
6-1	13-1	975.40	38	10.51	16.06

4.3. 对比分析

1) 根据不同的方法,对 11-2、13-1 煤储层样品含气量进行计算,表 1 为国标法,表 2 为泥浆法,表 3 为间接法。11-2 煤层,国标法计算其煤储层含气量为 2.03 cm³/g~9.690 cm³/g (见表 1),泥浆法计算其煤储层含气量为 1.97 cm³/g~10.09 cm³/g (见表 2),间接法计算其煤储层含气量为 8.04 cm³/g~15.97 cm³/g (见表 3)。13-1 煤层,国标法所得煤储层含气量为 3.58 cm³/g~6.85 cm³/g (见表 1),泥浆法为 4.46 cm³/g~7.64 cm³/g (见表 2),间接法为 11.56 cm³/g~17.65 cm³/g (见表 3)。

2) 三种方法总体上看,11-2 煤层,泥浆法和国标法计算的煤储层含气量区间范围差别不大,且有少数点几乎重合,大部分计算结果低于 10 cm³/g。而采用间接法计算出煤储层含气量的数值大部分高于 10 cm³/g,其整体数值偏大(见图 4)。13-1 煤层同样可得此规律(见图 5)。

同一煤层,直接法(国标法,泥浆法)计算结果显示煤储层含气量较小,个别实验数据较小,究其原因与现场采集数据存在的人为误差有关,人为误差有很多因素,比如提取钻机的时间偏长,野外解吸实验时采取的解吸量偏小,导致损失气量的结果偏小,计算所得的解吸气量也偏小。而间接法拟合程度好,且以潘集矿区各煤矿煤储层压力推算出煤储层含气量因而更接近实际煤储层含气量。综上所述,直接法所得出的煤储层含气量相比较于间接法,其计算结果偏小,采用煤储层压力投影在等温吸附方程所得的含气量的间接法更接近实际。

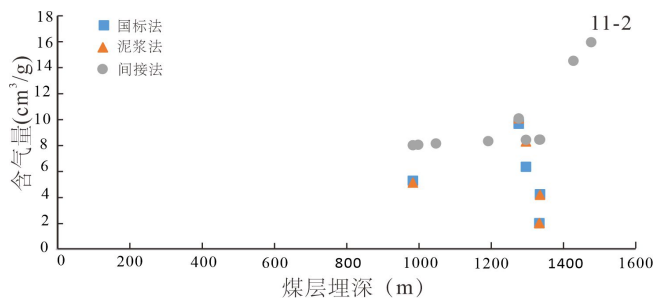


Figure 4. Comparison of in-situ gas content of coal reservoirs obtained by various methods in coal seams 11-2

图 4. 11-2 煤层各方法所得煤储层原位含气量对比图

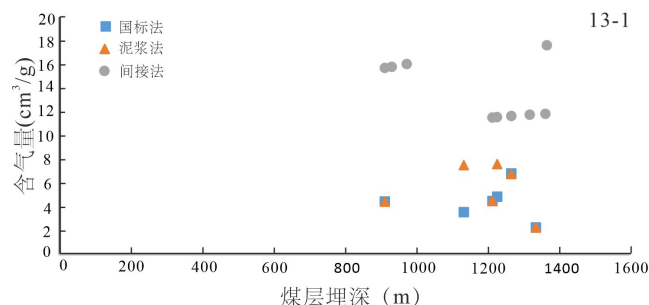


Figure 5. Comparison of in-situ gas content of coal reservoirs obtained by various methods in coal seam 13-1

图 5. 13-1 煤层各方法所得煤储层原位含气量对比图

5. 结论

1) 采用直接法测定煤储层含气量, 由于泥浆法和国标法计算的样品暴露时间不同, 其结果存在差异。采用间接法, 以潘集矿区各煤矿煤储层压力推算出的煤储层含气量更接近理论煤储层含气量, 间接法可用于深部煤层气估算。

2) 本文利用直接法和间接法相结合的方法对深部煤储层含气量进行计算, 可为煤层含气量研究以及勘探工作提供参考依据。

参考文献

- [1] 门鹏, 齐德源, 马林军, 等. 关于煤层气含气量测试结果的讨论[J]. 中国煤层气, 2021, 18(4): 29-31+42.
- [2] 夏大平, 王宏亮, 郭红玉. 空气干燥基煤的等温吸附平衡模式分析切[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2010, 29(5): 587-590.
- [3] Wei, Q., Hu, B.L., Fang, H.H., *et al.* (2022) Effective Approach with Extra Desorption Time to Estimate the Gas Content of Deep-Buried Coalbed Methane Reservoirs: A Case Study from the Panji Deep Area in Huainan Coalfield, China. *ACS Omega*, 7, 11240-11251. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00142>
- [4] 魏强. 淮南潘集深部煤储层吸附解吸特征分析[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.
- [5] 崔福田, 魏强, 冯文青, 等. 煤层瓦斯损失量计算方法探讨及其实践[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(36): 39-41+45.
- [6] 李迎春, 杨胜强. 瓦斯损失量计算方法的比较分析[J]. 煤矿安全, 2012, 43(9): 166-168.
- [7] 雷咸锐, 李恒乐, 侯海海. 关于解吸法测定煤层瓦斯含量中损失量计算的讨论[J]. 煤矿现代化, 2012(1): 57-59.
- [8] 郑凯歌, 陈赓, 胡宝林. 基于平衡水吸附实验的深部煤层瓦斯含量预测研究[J]. 煤炭工程, 2013, 45(12): 75-77.
- [9] 高德焱. 淮南地区煤系地层微量元素地球化学特征及地质意义[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
- [10] 张庆玲, 曹利戈. 煤的等温吸附测试中数据处理问题研究[J]. 煤炭学报, 2003, 28(2): 131-135.
- [11] 桑孝伟, 叶树刚, 芦俊. 几种煤层气含量测量方法的对比[J]. 中国煤层气, 2009, 6(3): 27-31.
- [12] 陈建伟, 张瑞林, 柴磊. 井下解吸法实测煤层原始瓦斯含量过程中采样损失量计算方法浅析[J]. 煤矿安全, 2010, 41(1): 84-86.
- [13] 丁安徐, 廖顺舟, 叶建国, 等. 测定煤层气含量的四种解吸法对比分析[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(S2): 194-196.