

基于 Langmuir 公式的残余气预测方法

付殿敬¹, 宣伟², 邓泽³, 李贵中³

1. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083
2. 中国石油天然气股份有限公司吐哈油田分公司勘探事业部, 新疆哈密 839000
3. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007

摘要 针对现场测试中残余气过低和需要快速获取含气量的情况, 以残余气预测为重点, 总结了现场残余气测试中存在的问题: (1) 慢速解吸法测量低煤阶煤层含气量时, 残余气量小可能导致常规方法无法获得结果或误差偏大; (2) 快速解吸法测试煤层气含气量时, 粉碎煤样测试残余气的方式可能造成少量煤层气的散失而使残余气结果偏低。分析了残余气比重的影响因素, 以描述吸附过程 Langmuir 公式为依据, 首次提出了用于残余气计算的曲线拟合法, 通过与实测数据进行对比分析, 认为该方法准确度较高、稳定性高, 能够较准确地获得低含气量情况下的残余气, 能有效提高现场含气量测试工作效率。

关键词 煤层含气量; 残余气; 计算方法; Langmuir 曲线拟合法

中图分类号 P618.11

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.10.007

Numerical Regression for Residual Gas in the Coal Gas Content

FU Dianjing¹, YI Wei², DENG Ze³, LI Guizhong³

1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
2. Exploration Department, Turpan-Hami Oilfield Company, China National Petroleum Corporation, Hami 839000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China
3. Langfang Branch, Research Institute of Petroleum Exploitation and Development, Langfang 065007, Hebei Province, China

Abstract For residual gas, especially in two special situations during in-situ gas content testing, including the case when the content of residual gas is too small to measure and the case where the gas content should be obtained quickly, the residual gas field problems in testing are summarized. (1) In the measurement of the content of low rank coal seam gas of slow desorption, the residual gas may be too small so that the conventional methods can not be used or the error will be too large. (2) For rapid desorption test bed methane gas, in the crushed coal sample in the testing of residual gas, a small amount of methane may be lost to make the residual gas results too low. The paper proposes a new numerical regression method (Langmuir curve regression) for residual gas, which is different to the normal test and is quick, accurate and efficient with respect to preparation to the actual measurement data.

Keywords CBM gas content; residual gas; regression method; Langmuir curve regression

0 引言

煤层气含量是表征煤层气储层特征的关键参数之一, 准确获取煤层气含量对于煤层气资源勘探开发和煤矿瓦斯灾害防治具有重要意义。在测试过程中, 煤层含气量分为损失气量、解吸气量和残余气量 3 部分, 损失气量通过数值方法回归计算, 解吸气量和残余气量则是实际解吸测试得到^[1-2]。一般情况下, 残余气可通过选取解吸剩余样品并破碎获得,

但特殊情况下, 直接测试不能满足残余气测试的要求。针对以上问题, 本文将详细探讨导致该特殊情况的原因, 并首次提出一种基于 Langmuir 公式的残余气数值计算方法。

1 残余气测试中存在的特殊问题

国内学者对煤层含气量的测试和计算方法进行了大量的研究, 周胜国、徐成法等^[3-5]通过解吸模拟实验, 发现煤样

收稿日期: 2011-02-10; 修回日期: 2011-03-02

作者简介: 付殿敬, 博士研究生, 研究方向为油气田开发, 电子信箱: fudianjing@163.com

全过程解吸特征曲线为不对称的 S 型,认为解吸初期气体解吸是与解吸时间的平方根呈线性关系的结论需修正;张群等^[6]通过模拟实验发现实测的模拟损失气量比美国矿业局直接法估算的损失气量高很多;邓泽等^[7]通过分析测试中解吸温度和损失时间对损失气量的影响,提出曲线拟合法计算损失气量;高绪晨^[8]、傅雪海^[9-10]、董红等^[11]根据含气煤层的测井物理响应,基于含气煤岩物理特征和密度、伽马、声波时差等测井的统计关系,提出了间接计算含气量的方法;张群等^[12]对残余气做了大量分析研究,认为残余气在煤层气中占的比例变化很大,为 15%—30%,受煤级、灰分和煤样粒度等因素影响,煤级和灰分越高,残余气含量越高;刘洪林等^[13]指出煤阶、灰分、温度、显微煤岩类型、割理发育程度和煤样粒度等参数是影响吸附时间的重要因素,并决定了残余气的比例。之前的研究主要集中在损失气的模拟和计算、总含气量的直接或间接预测以及残余气比重的影响因素分析,未对有关残余气的计算方法进行详细论述。

目前常用的含气量测试方法有慢速解吸法和快速解吸法,这两种方法在残余气现场操作和测试中均存在一些问题,主要表现在:①利用慢速解吸法测量低煤阶煤层含气量时,由于含气量普遍偏小,残余气量更低,常规方法可能无法直接测得残余气量,或因测值太低导致误差增大;②快速解

吸法测试煤层气含气量时,由于人为终止自然解吸,并通过粉碎煤样测试残余气,可能造成少量煤层气散失,致使残余气的测试结果小于实际值,总含气量偏小,另一方面由于解吸记录数据较少,不能正确反映煤岩解吸规律,无法得到吸附时间、扩散能力等关键参数。针对以上问题,本文提出一种新的残余气数值计算方法,即 Langmuir 曲线拟合法,试图从数值计算的角度探讨残余气,解决存在的问题。

2 残余气比重的影响因素和 Langmuir 曲线拟合法的提出

2.1 煤层气解吸曲线特征

图 1 为高煤阶、低煤阶样品解吸曲线,由图可知,两样品解吸气量随时间延长,均不断增大,呈先陡后缓的曲线形态。解吸记录起始点为将煤样密封至解吸罐的时刻,由于此时解吸压力为大气压力(远低于临界压力),吸附于大中孔隙表面的煤层气率先通过有利路径解吸,导致解吸初期曲线陡峭,但在吸附时间之后,随着常规解吸试验的进行,煤基质中气体浓度逐渐减小,产生扩散的驱动力即浓度梯度亦随之减小,越来越多的气体难以克服微孔隙产生的扩散阻力,无法从煤中解吸出来^[3],曲线之间逐渐趋于平缓,此时解吸出来的煤层气以残留在煤基质内的微孔表面的气体为主。

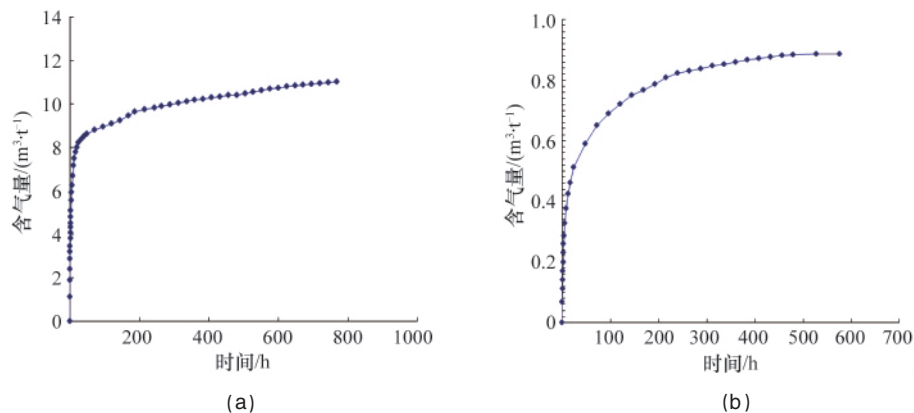


图 1 某高煤阶(a)、低煤阶(b)解吸曲线

Fig. 1 Desorption curves of high (a) and low (b) rank coal

2.2 残余气比重的影响因素分析

残余气比重是指残余气占总含气量的百分比。其影响因素主要包括煤阶、煤样粒度和灰分等。煤阶不同,岩隙结构不同。低阶煤以大、中孔为主,有利于解吸扩散,同时微孔比例小,保持残余气的能力有限,即残余气比重小;相反高阶煤微孔发育,气体需克服较大的扩散阻力,使得自然解吸结束时仍残余相对较多的煤层气;中阶煤介于二者之间。煤样粒度对解吸速度有一定影响,一般而言,粉煤、煤屑(钻屑)、煤心(块样)的解吸速度依次减小,吸附时间增大,残余气滞留能力增强^[4]。煤样越碎,解吸距离缩短,扩散阻力减小,使得在柱状和块状煤样中不能解吸出来的一些气体解吸出来,因此一般情况下煤样粒度越小,残余气比重越小。另外随着煤中灰分的增加,

残余气含量逐渐增高,两者呈较好的正相关关系。通过煤岩学和扫描电子显微镜研究,初步认为,这是因为煤中存在的细小矿物如黏土矿物等充填在煤的孔隙中,不同程度地阻碍了气体的运移通道,使气体在煤中扩散运移的能力减弱,不利于气体从煤中解吸出来所致。此外煤岩组分、测试温度等对残余气比重也有一定程度的影响。

2.3 Langmuir 曲线拟合法

Langmuir 公式是根据汽化和凝聚动力学平衡原理建立的,其方程简单实用,已被广泛应用于煤和其他吸附剂对气体的吸附,同时,根据其动态平衡的假设,该方程同样可以描述煤层气解吸过程。煤层气吸附和解吸通常认为是一种可逆过程,但是适用于煤层气吸附的 Langmuir 公式能否较好地描述

其解吸曲线形态值得研究。为此,基于 Langmuir 公式,通过参数意义转换,提出用于预测残余气含量的新方法,并通过拟合度检验判断其是否适用于解吸过程。

标准 Langmuir 公式为

$$V = V_L P / (P + P_L) \quad (1)$$

其中, V 为吸附量, m^3/t ; P 为吸附压力, MPa ; V_L 为 Langmuir 体积,即理论最大吸附量, m^3/t ; P_L 为 Langmuir 压力,即体积达到 $0.5V_L$ 时对应的吸附压力, MPa 。可以看出,吸附量随压力的增大不断增加,当压力趋近于无穷大时,吸附量亦无限接近吸附量最大值,而解吸量同样随着解吸时间的增大不断增加,当解吸时间趋近于无穷大时,解吸气量亦接近于最大值而趋于稳定,体现出与吸附曲线相似的曲线变化形态,因此变换 Langmuir 公式的字母意义,将解吸量对应吸附量,解吸时间对应吸附压力,即根据吸附和解吸的可逆性规律得

$$G = G_L T / (T + T_L) \quad (2)$$

其中, G 为实测解吸气含量, m^3/t ; T 为实测解吸时间, h ; G_L 为极限解吸气含量, m^3/t ; T_L 为解吸气含量达到 $0.5G_L$ 时对应的实测解吸时间, h 。变换式(2),得

$$T = G_L T / G - T_L \quad (3)$$

根据实测解吸数据,参照式(3)得到 T/G 与 T 的对应关系图,拟合即可得到极限解吸含气量 G_L 。又因为 G_L 为实测解吸气量 Q_2 与残余气量 Q_3 之和,则可由下式求得残余气量

$$Q_3 = G_L - Q_2 \quad (4)$$

3 现场应用

Langmuir 曲线拟合法计算残余气主要依据现场解吸数据,其结果的可靠性主要受限于解吸时间的长短,如图 2 所示,解吸时间越长,解吸曲线越平缓,预测值越可靠。

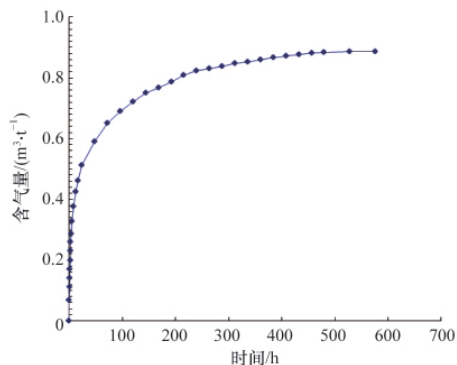


图 2 样品 A 实测解吸曲线
Fig. 2 Desorption curve of sample A

吐哈盆地某煤层气井测试中发现,大量低阶煤样品均存在残余气极低而无法直接测量或误差大的问题。以某样品 A 为例,采用本文提出的 Langmuir 曲线拟合法对低煤阶煤层残余气量进行计算,达到了比较满意的效果,如图 3 所示,预测极限解吸气量为 $1.26\text{m}^3/\text{t}$,且根据解吸测得的 $Q_2=1.24\text{m}^3/\text{t}$,求

得残余气含量为 $0.02\text{m}^3/\text{t}$,相关系数在 0.99 以上,具有较高的可信度;同时得到了该区残余气比重分布(图 4),残余气比重为 0.10%—4.35%,平均 0.94%。

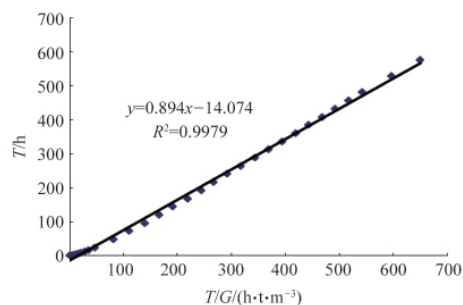


图 3 样品 A 拟合曲线
Fig. 3 Fitted curve for sample A

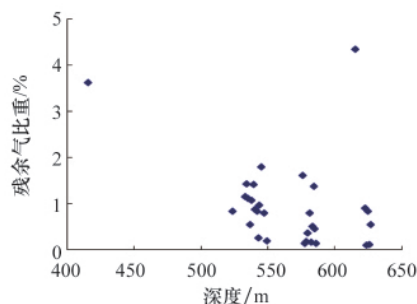


图 4 残余气比重分布
Fig. 4 Proportion of residual gas

针对在快速解吸条件下残余气测量误差可能增大的情况,利用 Langmuir 曲线拟合法对某井 10 个样品 48h 内的解吸数据进行拟合分析,得到残余气量。从表 1 和图 5 可以看出,预测值比实测值普遍偏高,平均高出 16%。说明现场快速解吸法中关于 48h 之后即进入残余气测试阶段的规定欠妥,期间造成部分煤层气散失,对损失气量 Q_1 乃至总含气量有一

表 1 某井样品实测结果
Table 1 Measured results for some samples

样品编号	实测 Q_1 $/(m^3 \cdot t^{-1})$	实测 Q_2 $/(m^3 \cdot t^{-1})$	实测 Q_3 $/(m^3 \cdot t^{-1})$	总含气量 $/(m^3 \cdot t^{-1})$
1-2	0.12	1.21	1.20	2.53
2-1	0.05	1.72	1.29	3.06
2-2	0.12	1.65	1.41	3.18
3-1	0.01	1.75	1.02	2.78
3-2	0.14	2.23	1.75	4.12
4-1	0.22	1.89	1.35	3.46
4-2	0.01	1.00	0.95	1.96
4-3	0.03	1.56	2.13	3.72
4-4	0.04	1.54	2.20	3.78
5-1	0.17	1.00	1.03	2.20

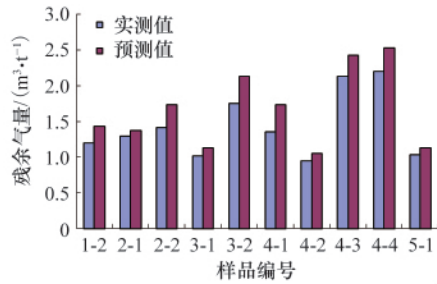


图 5 残余气结果对比

Fig. 5 Comparison of measured and predicted residual gas results

定影响,建议将解吸时间延长至解吸曲线较平缓或解吸量日增长不超过 10% 的时刻。另外二次取样也会影响残余气测试的准确性,建议现场尽量均匀取样,且至少重复测试两次,取两组相近数据的平均值作为最终残余气量。

4 结论

(1) 针对残余气测试中主要存在问题,根据煤层气吸附和解吸过程的可逆性规律,首次提出类似于 Langmuir 公式的残余气预测方法,通过现场实测数据验证,该方法拟合度较高,具有一定的可靠性。

(2) 快速解吸条件下,残余气实测值普遍偏低,建议延长解吸时间至解吸曲线较平缓或日增长解吸量不超过 10% 的时刻,且保持均匀取样,至少重复测试两次,取两组相近数据的平均值作为最终残余气量。

参考文献 (References)

- [1] 钱凯,赵庆波. 煤层甲烷气勘探开发理论与实验测试技术 [M]. 北京:石油工业出版社,1996:143-148.
 Qian kai, Zhao Qingbo. CBM geology, exploration and development technique[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996: 143-148.
- [2] 王红岩,刘洪林,赵庆波,等.煤层气富集成藏规律[M]. 北京:石油工业出版社,2005:50-75.
 Wang Hongyan, Liu Honglin, Zhao Qingbo, et al. CBM enrichment and accumulation[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005: 50-57.
- [3] 周胜国. 煤层含气量模拟试验方法及应用 [J]. 煤田地质与勘探, 2002,

- 30(5): 25-28.
 Zhou Shengguo. *Coal Geology & Exploration*, 2002, 30(5): 25-28.
- [4] 徐成法,周胜国,郭淑敏. 煤层含气量测定方法探讨[J]. 河南理工大学学报:自然科学版,2005,29(2):106-108.
 Xu Chengfa, Zhou Shengguo, Guo Shumin. *Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science*, 2005, 29(2): 106-108.
- [5] 周胜国. 损失气求取方法研究 [J]. 焦作工学院学报, 1995, 14 (1): 19-25.
 Zhou Shengguo. *Journal of Jiaozuo Institute of Technology*, 1995, 14(1): 19-25.
- [6] 张群,范章群. 煤层气损失气含量模拟试验及结果分析 [J]. 煤炭学报, 2009, 34(12): 1649-1654.
 Zhang Qun, Fan Zhangqun. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(12): 1649-1654.
- [7] 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): 85-87.
 Deng Ze, Liu Honglin, Kang Yongshang. *Natural Gas Industry*, 2008, 28 (3): 85-87.
- [8] 高绪晨,张炳,姜法. 煤工业分析、吸附等温线和含气量的测井解释[J]. 测井技术, 1999, 23(2): 108-111.
 Gao Xuchen, Zhang Bing, Xian Fa. *Well Logging Technology*, 1999, 23 (2): 108-111.
- [9] 傅雪海,陆国桢,秦杰,等. 用测井响应值进行煤层气含量拟合和煤体结构划分[J]. 测井技术, 1999, 23(2): 112-115.
 Fu Xuehai, Lu Guozhen, Qin Jie, et al. *Well Logging Technology*, 1999, 23(2): 112-115.
- [10] 彭金宁,傅雪海,申建,等. 潘庄煤层气解吸特征研究[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(6): 768-770.
 Peng Jinning, Fu Xuehai, Shen Jian, et al. *Natural Gas Geoscience*, 2005, 16(6): 768-770.
- [11] 董红,侯俊胜,李能根,等. 煤层煤质和含气量的测井评价方法及其应用[J]. 物探与化探, 2001, 25(2): 138-143.
 Dong Hong, Hou Junsheng, Li Nenggen, et al. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2001, 25(2): 138-143.
- [12] 张群,杨锡禄. 煤中残余气含量及其影响因素 [J]. 煤田地质与勘探, 1999, 27(5): 26-28.
 Zhang Qun, Yang Xilu. *Coal Geology & Exploration*, 1999, 27(5): 26-28.
- [13] 刘洪林,王红岩,张建博. 煤层气吸附时间计算及其影响因素分析[J]. 石油实验地质, 2000, 22(4): 365-367.
 Liu Honglin, Wang Hongyan, Zhang Jianbo. *Experimental Petroleum Geology*, 2000, 22(4):365-367.

(责任编辑 刘志远)

《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿:www.kjdb.org。