

# 煤储层临界解吸压力理论计算误差分析及影响因素研究

彭泽阳<sup>1,2</sup>, 王鸣川<sup>1,2</sup>, 赵天逸<sup>1,2</sup>, 卢婷<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国石化石油勘探开发研究院, 北京

<sup>2</sup>页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京

Email: pengzy0328@sina.com

收稿日期: 2021年2月12日; 录用日期: 2021年3月18日; 发布日期: 2021年3月26日

## 摘要

本文基于现有的临界解吸压力计算方法, 对目前煤层气井在生产过程中常见到的理论计算临界解吸压力与实际排采不吻合的现象深入分析原因。分析认为, 临界解吸压力计算过程中吸附解吸曲线及含气量测定结果与实际的误差及其相互之间的不匹配性是临界解吸压力计算出现误差的主要原因。对于吸附解吸曲线而言, 目前的实验结果均是基于煤储层中不含液相水的前提, 而实际储层富含液相水; 对于含气量而言, 由于煤岩发育的非均质性及连通性导致的测定含气量与实际含气量存在差异。最后基于改进的临界解吸压力理论, 考虑到现场参数获得的难易程度, 提出新的临界解吸压力影响因素, 并以实际煤层气藏为例进行分析。

## 关键词

临界解吸压力, 吸附解吸曲线, 含气量测定, 液相水影响, 连通性影响

# Study on Influencing Factors and Error Analysis of Critical Desorption Pressure in Coal

Zeyang Peng<sup>1,2</sup>, Mingchuan Wang<sup>1,2</sup>, Tianyi Zhao<sup>1,2</sup>, Ting Lu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing

Email: pengzy0328@sina.com

Received: Feb. 12<sup>th</sup>, 2021; accepted: Mar. 18<sup>th</sup>, 2021; published: Mar. 26<sup>th</sup>, 2021

文章引用: 彭泽阳, 王鸣川, 赵天逸, 卢婷. 煤储层临界解吸压力理论计算误差分析及影响因素研究[J]. 渗流力学进展, 2021, 11(1): 29-38. DOI: 10.12677/apf.2021.111004

## Abstract

Based on the existing calculation method of critical desorption pressure, the reason why the critical desorption pressure is not consistent with the actual production is analyzed. It is considered that the main reason for the errors in the calculation of the critical desorption pressure is the mismatch between the adsorption/desorption curve and the measured results of the gas content and the actual values. For the adsorption/desorption curve, the current experimental results are based on the premise that there is no liquid phase water in the coal reservoir, while the actual reservoir is rich in liquid phase water; for the gas content, the measured gas content is different from the actual gas content due to the heterogeneity and connectivity of coal and rock development. Finally, based on the improved critical desorption pressure theory, considering the difficulty of obtaining field parameters, a new influencing factor of critical desorption pressure is proposed and analyzed by taking actual coalbed methane reservoir as an example.

## Keywords

Critical Desorption Pressure, Desorption Curve, Gas Content, Effect of Liquid Phase, Effect of Connectivity

Copyright © 2021 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

目前世界上煤层气的探明储量有  $256.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，主要分布在苏联、北美和亚太地区。在 2011 年，全球煤层气产量超过  $700 \times 10^8 \text{ m}^3$  [1]。但是，目前煤层气的开发过程中仍然存在许多问题，例如我国许多煤层气井产量远远低于预期；美国开发了多达 17 个盆地的煤层气，主要产气盆地仍然以圣胡安盆地和黑勇士盆地为主，两者产量占总产量的 80% 以上 [2] [3]。形成这种问题的主要原因之一是煤层气与常规气藏不同，气体在储层中主要以吸附态存在于储层的微纳米孔隙中，为了更好地描述煤储层特有的吸附特征，现场普遍采用临界解吸压力描述实际煤储层的吸附解吸能力及生产潜力。

煤层气储层的临界解吸压力是指解吸与吸附达到平衡时的压力，即在生产过程中，压力降低使储层中吸附在煤岩中的气体开始解吸时所对应的压力 [4]。对于地层压力大于临界解吸压力的煤层气藏，即不饱和煤层气藏，只有在煤储层压力下降到临界解吸压力之后，吸附在煤基质中的煤层气才能解吸出来 [5]。因此，临界解吸压力参数的确定，对于评价煤层气储层的开发潜力以及制定开发方案都是十分必要的 [6]。

然而，在实际生产应用过程中，大量的实例表明理论计算出的临界解吸压力与实际生产存在较大的误差。除了目前较为公认的工程上含气量测量方法的误差及实际临界解吸压力与现场见气对应压力间存在时间差外 [7]，许多学者对此进行过更为深入的研究，程伟 (2012) [8] 通过统计规律发现煤层气临界解吸压力理论值和实际产气压力及含气饱和度存在正相关关系，并且储层压力越小，实测产气压力与储层压力的接近程度越高。田永东 (2009) [9] 则通过拟合方程分别计算了利用等温吸附曲线和等温解吸曲线下的临界解吸压力，发现采用吸附等温曲线计算的临界解吸压力远大于采用解吸等温曲线的计算结果，差值

可达采用吸附等温线计算临界压力的 33%。顾谦隆(2008) [10]则通过煤储层非均质性入手解释了计算误差,他认为在多煤层区,煤层气井大都穿过多个煤层气储层或厚度较大的煤层气储层,统一进行混合排采,这实际上是把各个煤储层当作是均匀的产气储层,这样计算出的某一目标储层的临界解吸压力显然是不符合实际情况的。

可以看出,煤储层临界解吸压力计算值误差的产生主要包括工程误差、临界吸附解吸曲线差异以及含气量测定误差三方面,但对产生原因的机理论述较少,由此在建立拟合方程的时候在拟合参数的选择不具有说服力。因此本文从机理上较为全面地分析煤储层临界解吸压力计算误差产生的原因,并基于此给出临界解吸压力的影响因素。

## 2. 煤层气临界解吸压力获取方式

煤层气的临界解吸压力是指煤储层解吸与吸附达到平衡时所对应的压力,即压力降低使吸附在煤微孔隙表面上的气体开始解吸时的压力。一般而言,煤储层压力要大于临界解吸压力,随着生产的进行,当煤储层压力下降到临界解吸压力之后,吸附在煤基质微纳孔隙中的煤层气才能够被解吸出来。因此理论上临界解吸压力越高,开采煤层气时所需的降压幅度就越小,煤储层越容易发生解吸,也就越有利于开采。

目前,获得临界解吸压力最常用的方法有两种,对生产井而言,工程上通常选取见气时或见气前一段时间(通常为一天)时的地层压力为临界解吸压力,该方法为煤储层解吸的实际反映,具有较高的精度,产生误差的原因通常是对地表见气与储层中开始解吸之间的时间段的选取问题。但该方法仅能对生产已经见气的井进行分析,而在早期分析储层或单井开采价值、制定开发方案的时候无法使用,此时通常采用第二种方案。

第二种临界解吸压力的获得方法是利用定义通过吸附等温曲线获取,即在吸附等温曲线上根据对应煤样的实测含气量及该煤层的原始地层压力,获得该储层状态在吸附曲线上所对应点,则过该点分别做 x 轴和 y 轴坐标的平行线与吸附曲线的焦点即为储层的最大储气能力及储层的临界解吸压力,具体如图 1 所示。

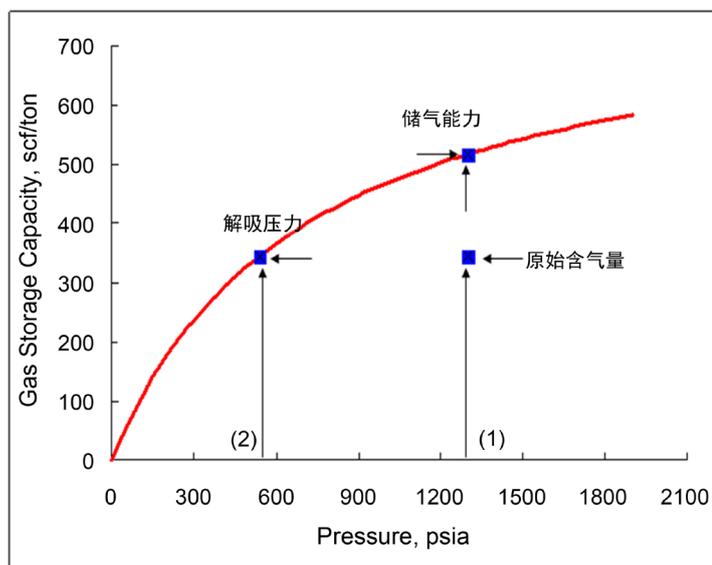


Figure 1. Figure of critical desorption pressure

图 1. 临界解吸压力获取示意图

目前已有大量文献从统计的角度分析了等温吸附曲线及含气量与实际值存在误差的原因包括等温吸附实验误差、含气量测量误差、储层压力测量误差、储层混合排采影响四个方面, 由于多煤层混合开采会极大增加数据处理难度, 难以获得研究煤层的精确压力、产量等参数, 而压力测量误差难以避免, 且难以定量描述, 因此目前针对临界解吸压力的研究大多不考虑多煤层混合开采和压力测量误差的, 一般认为获得临界解吸压力的重要参数主要有两个, 一个是等温吸附曲线, 另一个是原始储层含气量。这两个参数的准确性将直接影响最终获得的临界解吸压力的精度。因此, 本文将主要从机理方面出发, 分析等温吸附曲线及原始储层含气量产生误差的原因。

### 3. 煤层气等温吸附解吸曲线原理及其理想性

考虑到实验的简便性和可操作性, 目前国内外通常采用容量法来测定煤岩的等温吸附曲线, 其中我国具体的等温吸附实验流程主要采用基于美国材料与试验协会提出的标准 ASTM D-1412 修改而成的 GB/T19560 《煤的高压等温吸附实验方法——容量法》进行, 其主要思路为利用真实气体状态方程和 Langmuir 方程来计算各压力下的气体吸附量。

尽管早期大多采用干燥煤样进行实验, 但在越来越多的学者认识到煤储层普遍含水的特性后, 越来越多的实验普遍采用平衡水煤样进行等温吸附实验, 即首先利用平衡水对煤样进行预处理, 以更好的模拟煤层含水条件, 之后再行煤的等温吸附/解吸实验, 获取等温吸附曲线。

考虑到平衡水煤样的处理方法是把煤样放置在底部装有足量的硫酸钾过饱和溶液的密封装置中, 待溶液上气体中的水蒸气分子与煤样中达到平衡时所获得的, 因此此时煤样中的水仍然是以气态水分子的形式存在, 其本质仍然是气相分子与煤岩固相颗粒之间的固-气界面吸附过程, 根据固-气界面的吸附学理论[11], 固-气吸附随着压力的降低脱附出的气量与吸附气量相等, 即吸附可逆, 此时等温吸附曲线与等温解吸曲线相重合, 因此在工程上通常采用 Langmuir 吸附曲线代替煤储层的等温解吸曲线。

然而, 由于煤中广泛存在着水相, 在实际煤储层中部分原生孔内存在气相溶解于液相中再与固相吸附的固-液吸附[12] [13] [14] [15], 两者的差异如图 2 所示。

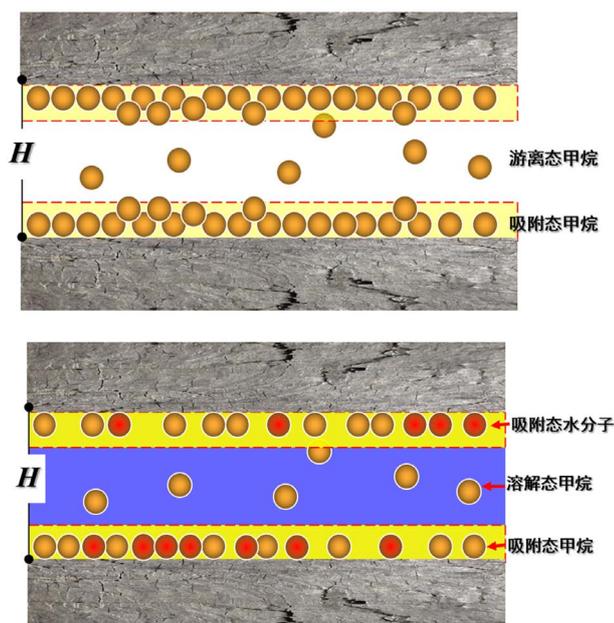


Figure 2. Difference between interface of solid-gas and solid-liquid

图 2. 固-气界面与固-液界面吸附分子差异示意图

由于固-液界面吸附对压力不敏感，而是压力通过溶液的浓度起作用。因此，当存在固-液界面吸附时，测定的吸附曲线将会与解吸曲线存在一定的差异。通过调研煤储层饱和水条件下的降压解吸实验结果可以看出[12]，对于固-液界面而言，尽管其吸附能力与固-气界面相似，但降压解吸率小于5%，因此实际煤储层中由于存在液相，会存在严重的滞后现象(图3)。

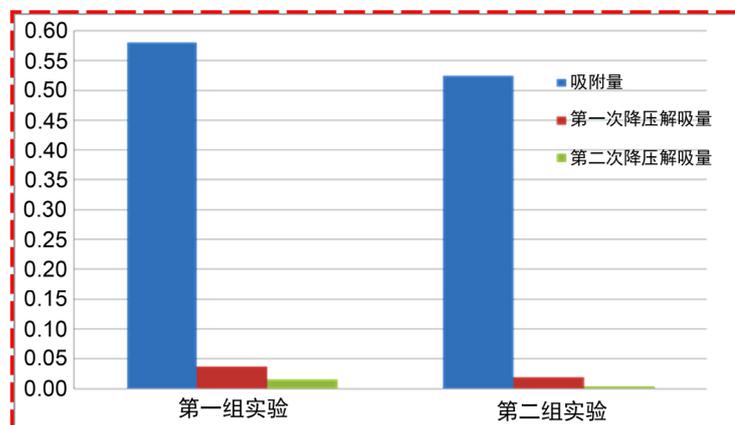


Figure 3. Experimental data of desorption in solid-liquid interface

图3. 固-液界面吸附解吸实验数据图

因此，在考虑煤层气中的水相引起的固-液吸附解吸后，最终的解吸曲线将不再与吸附曲线重合，而是与含水密切相关，如图4所示。显然，此时仍旧采用实验的吸附曲线进行临界解吸压力的计算会存在较大误差。

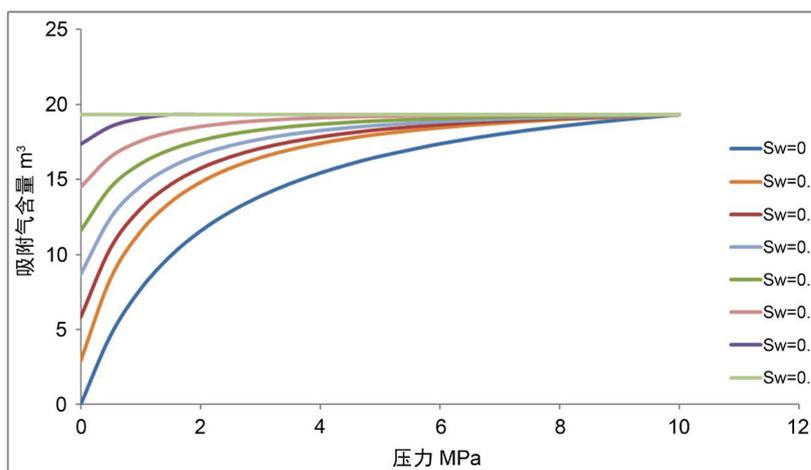


Figure 4. Desorption curve in different saturation

图4. 煤储层不同含水对解吸的影响

显然，在含气量保持不变的情况下，储层含水孔隙越多，解吸曲线越向左移，最终获得的临界解吸压力越小。

#### 4. 煤层气含气量测量方法及误差分析

目前我国煤层气常用的含气量获取方法为基于 GB/T 19559《煤层气含量测定方法》的现场含气量实验法，该方法测定的最终含气量可以根据来源分为三部分：损失气、解吸气和残余气，如图5所示[16]。

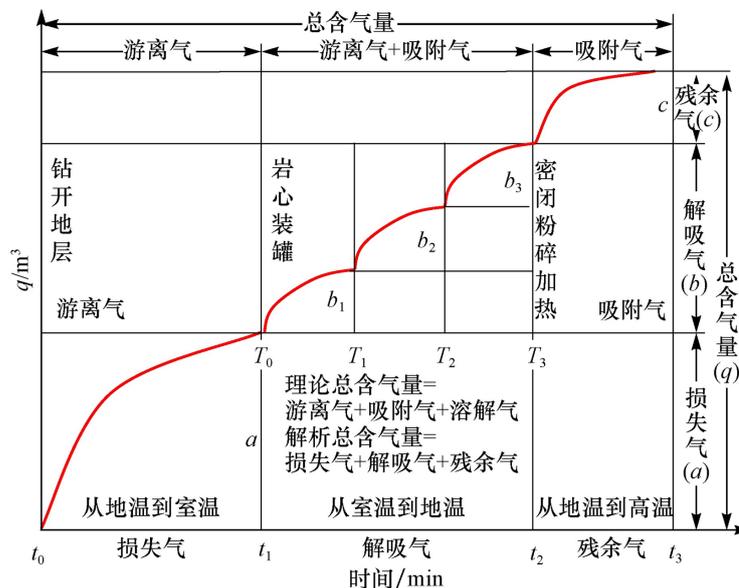


Figure 5. Method of gas content  
图 5. 含气量确定方法示意图(据张金川)

其中，损失气是指煤样被钻开至煤样被采出放入解吸罐这段作业时间内所损失的气量，通常利用作业时间带入经验公式进行计算。然而，目前国内外不同学者根据不同区块煤层气井的生产数据及室内试验数据，给出了多种多样的经验公式，采取不同的经验公式获得的结果差异也非常大，例如采用较为常用的根号时间法和幂函数法，所获得的损失气量的误差可能高达 50% 以上，如图 6 所示[17]。

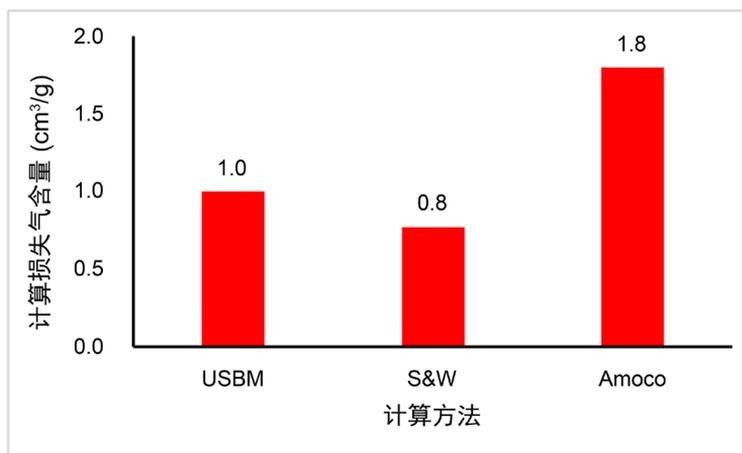


Figure 6. Difference of results in different lost gas content method  
图 6. 不同损失气计算方法计算结果对比

对于解吸气而言，解吸气量的获得是将样品放入解吸罐中，保证地表压力及储层温度条件所获得的最终解吸气量，该方法虽然已经尽可能的模拟了当地层压力下降至地表压力时的解吸过程，然而仍然存在如下问题：

- ① 测试压力太低，实际生产过程中由于井筒压力和回压等工程因素，储层压力不可能下降至地表压力；
- ② 取样过程中样品在井筒中存在温度的变化，由此造成的样品伤害是不可逆的，因此尽管样品在储层温度下恒温进行实验，仍然无法获得样品实际的储层解吸过程；

③ 取样过程中不可避免的存在水分的损失或者侵入，而水分对吸附解吸的影响非常重要。

对于残余气而言，残余气量的获得是将解吸后的样品粉碎后再次放入解吸罐中进行测定。然而，从图7煤储层孔隙电镜照片和上文中煤地质的研究可以发现，煤岩中作为主要储气和产气来源的气孔，其本身连通性很差，大量含气孔隙原本无法动用，而残余气使得大量未连通的气孔中的气被产出，而这部分气实际是无法产出的，这大大增加了计算含气量与实际含气量的差异。

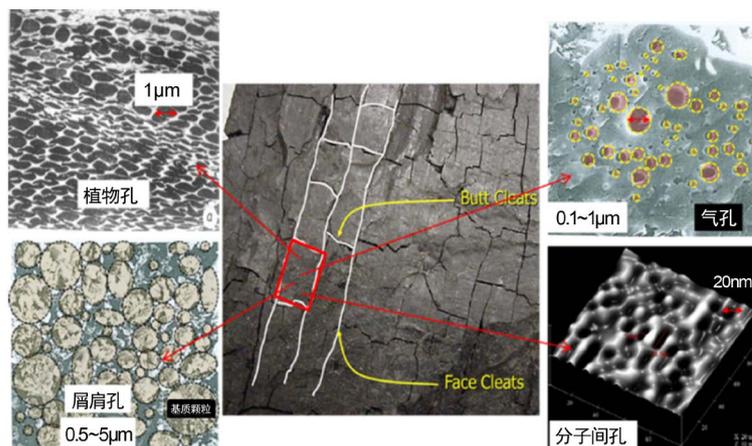


Figure 7. Pore characteristics of coal

图7. 煤储层孔隙特征

## 5. 目前临界解吸压力组合曲线误差因素评价

除了等温吸附解吸曲线及含气量测定方法与实际储层存在误差之外，两者之间也由于获得方式、假设条件的差异在联立使用的时候也会出现不匹配的现象。

其中，吸附解吸曲线是在实验室条件下测得的，测定过程中孔隙内为单相气或含束缚水的理想条件，测定的尺度决定了其主要反映的是岩心尺度下煤岩的性质。

而原始含气量测定中损失气的计算采用的是在理想条件下获得的经验公式；解吸气的测定采用的是现场从地下取到地面的条件下测定的，尽管该条件与理想条件和实验室条件相比更接近实际储层条件，但取样过程中气水两相的流失、温度和压力的变化都会使其仍然与实际储层条件存在一定的差异；而残余气则是在理想条件下针对煤样进行进一步粉碎所获得的。综合考虑原始含气量的测定过程，是经验公式、理想条件与实际条件的复杂耦合结果，测定的尺度同样是岩心尺度下煤岩的性质。

而原始地层压力下的储层是一个三维的复杂渗流环境，储层极强的非均质性决定了吸附解吸曲线与含气量测定过程中采用的岩心尺度在体现宏观储层时所产生的误差，而吸附解吸曲线与含气量测定过程中孔隙内理想的气水分布状态在体现储层复杂的气液两相流分布及渗流时也势必会产生一定的误差。

## 6. 理论临界解吸压力影响因素敏感性分析

根据前文的分析，引起临界解吸压力理论计算与实际存在误差的因素主要包括：由于煤储层含水导致的吸附曲线与解吸曲线不一致性，由于煤岩发育的非均质性及连通性导致的测定含气量与实际含气量存在差异。为了更进一步的分析各影响因素的敏感性，需要选取能够代表不同影响因素的储层参数。

在参数选取过程中，考虑到实际的工程应用，对于较难获得的参数或现场很少进行测试的参数，例如煤储层的解吸参数或煤岩基质的含水饱和度，即使该参数能更好的体现产生误差的影响因素，对应的分析结果具有更高的精度，其在实际生产中也很难取得实际应用。

因此综合考虑临界解吸压力的影响因素及工程上参数获得的普遍程度,最终采用煤储层水分( $M$ )以及热成熟度( $R_o$ )作为最终的影响因素指标,两者不仅描述了储层煤岩的基础性质和含水能力,同时在实验室岩心分析中极易获得。

以 H 区块进行过取心实验的煤层气井为例,以理论临界解吸压力与实际排采结果的比值作为研究对象,比值越接近 1,说明计算误差越小。分别绘制煤储层水分( $M$ )以及热成熟度( $R_o$ )与它的对应关系如图 8、图 9 所示。从图中可以明显看出,理论临界解吸压力与实际产气压力完全不吻合。

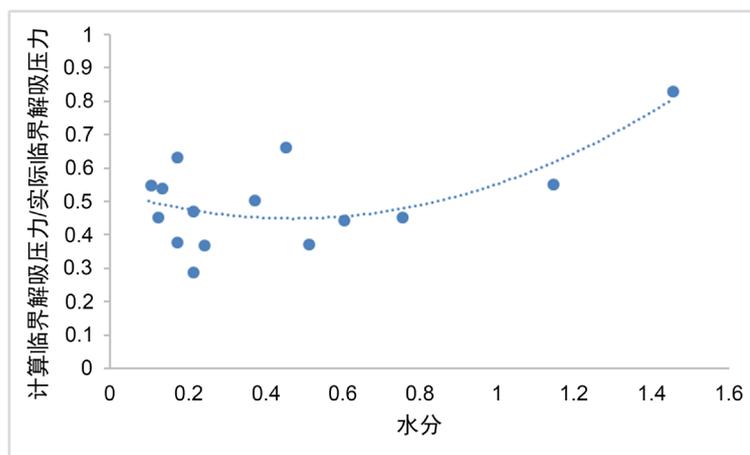


Figure 8. Relationship between water saturation and critical desorption pressure  
图 8. 水分与临界解吸压力计算误差的关系

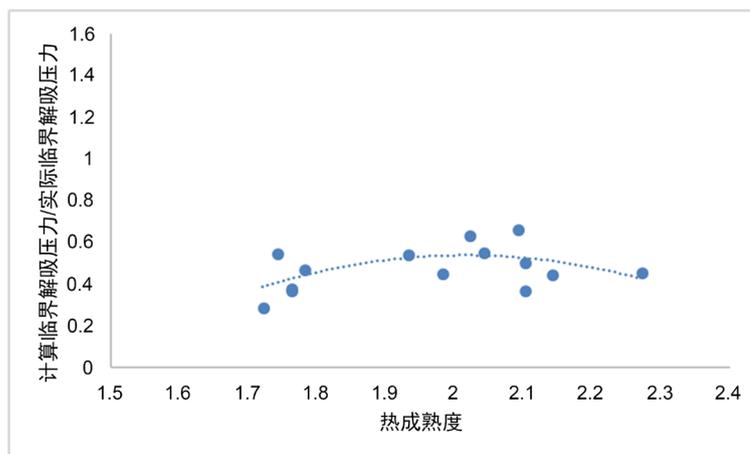


Figure 9. Relationship between thermal maturity and critical desorption pressure  
图 9. 热成熟度与临界解吸压力计算误差的关系

为了分析研究含水、热成熟度与临界解吸压力计算误差的关系,首先需要研究含水与热成熟度之间的关系。在煤地质学中,目前普遍认为含水与热成熟度之间存在显著联系,即当热成熟度较低时,随着热成熟度的增加,含水逐渐降低,而当热成熟度较高时,随着热成熟度的增加,含水逐渐升高,如图 10 所示[17]。

因此,当热成熟度较低时,随着热成熟度的增加,含水逐渐降低,由于液相水导致的解吸曲线误差逐渐减小,同时含水越低,对应的热成熟阶段产气量越高,气孔越发育,即此时气孔连通性越好,由于非联通孔隙造成的含气量计算误差也越小,因此临界解吸压力计算误差逐渐减小;当热成熟度较高时,

随着热成熟度的增加, 含水逐渐增加, 由于液相水导致的解吸曲线误差也逐渐增加, 同时含水越高, 对应的热成熟阶段产气量越高, 气孔越不发育, 即此时气孔连通性越差, 由于非联通孔隙造成的含气量计算误差也越大, 因此临界解吸压力计算误差逐渐增加, 最终形成误差先减小在增加的抛物线形态。

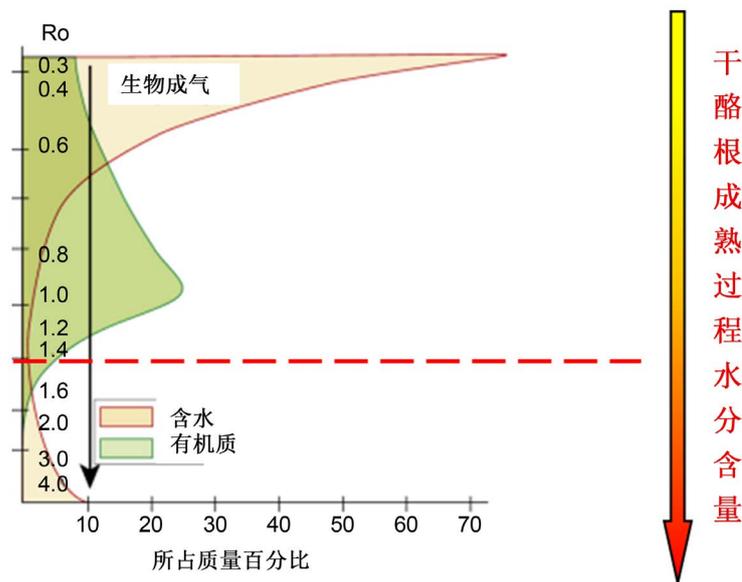


Figure 10. Relationship between thermal maturity and water saturation  
图 10. 热成熟度与煤储层含水的关系示意图

而随着含水的增加, 一方面由于液相水导致的解吸曲线误差也逐渐增加, 因此由于液相水导致的解吸曲线误差逐渐增加, 另一方面, 越低的含水恰好对应产气量最多的热成熟阶段, 此时气孔连通性最好, 因此此时由于非联通孔隙造成的含气量计算误差最小, 因此含水越低临界解吸压力计算误差反而会有一定程度的降低, 最终形成误差先减小在增加的抛物线形态。

## 7. 结论

1) 分析了计算临界解吸压力与实际临界解吸压力存在差异的机理。由于煤储层含水导致的吸附曲线与解吸曲线不一致性, 以及由于煤岩发育的非均质性及连通性导致的测定含气量与实际含气量存在差异是存在差异的主要原因。

2) 分析了煤储层水分( $M$ )以及热成熟度( $R_o$ )对临界解析压力计算精度的影响。选取了工程上容易获得的煤储层水分( $M$ )以及热成熟度( $R_o$ )作为最终的影响因素指标, 其中水分影响结果是对解吸曲线和对含气量影响的耦合, 而热成熟度在不同阶段影响程度不同。

## 参考文献

- [1] Agharazi, A., Lee, B., Nagel, N.B., *et al.* (2013) Tip-Effect Microseismicity-Numerically Evaluating the Geomechanical Causes for Focal Mechanisms and Microseismicity Magnitude at the Tip of a Propagating Hydraulic Fracture. *SPE Unconventional Resources Conference Canada*, Calgary, November 2013, SPE-167129-MS. <https://doi.org/10.2118/167129-MS>
- [2] Birol, F. (2010) World Energy Outlook 2010. *International Energy Agency*, 1.
- [3] Langmuir, I. (1918) The Adsorption of Gases on Plane Surfaces of Glass, Mica and Platinum. *Journal of the American Chemical Society*, 40, 1361-1403. <https://doi.org/10.1021/ja02242a004>
- [4] 傅雪海, 秦勇, 韦重韬. 煤层气地质学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.

- [5] 张晓逵, 宋党有. 煤层气解吸特征研究进展[J]. 中国煤层气, 2009(5): 17-20.
- [6] 倪小明, 王延斌, 接铭训, 等. 煤层气井排采初期合理排采强度的确定方法[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(6): 101-104.
- [7] 张永生, 孙文卿, 高学通. 煤储层理论临界解吸压力与实际排采对比研究[J]. 山西焦煤科技, 2011(1): 4-7.
- [8] 程伟, 王平, 陈磊, 等. 延川南煤层气临界解吸压力误差分析[J]. 中国煤层气, 2012, 9(1): 23-25.
- [9] 田永东. 沁水盆地南部煤储层参数及其对煤层气井产能的控制[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2019: 5.
- [10] 顾谦隆. 煤层气井下排采参数及其诊断仪研制要点思考[J]. 中国煤炭地质, 2008, 20(3): 39-44.
- [11] 近藤精一(日). 吸附的科学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [12] 李相方, 蒲云超, 孙长宇, 任维娜, 等. 煤层气与页岩气吸附/解吸的理论再认识[J]. 石油学报, 2014, 35(6): 1113-1129.
- [13] Flores, R.M. (2013) Coal and Coalbed Gas: Fueling the Future. Elsevier Science, Burlington.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396972-9.00010-0>
- [14] Strack, M., Kellner, E. and Waddington, J.M. (2005) Dynamics of Biogenic Gas Bubbles in Peat and Their Effects on Peatland Biogeochemistry. *Global Biogeochemical Cycles*, **19**, GB1003. <https://doi.org/10.1029/2004GB002330>
- [15] Gan, H., Nandi, S.P. and Walker Jr., P.L. (1972) Nature of the Porosity in American Coals. *Fuel*, **51**, 272-277.  
[https://doi.org/10.1016/0016-2361\(72\)90003-8](https://doi.org/10.1016/0016-2361(72)90003-8)
- [16] 彭泽阳. 考虑煤层气孔隙水储量计算与临界解吸压力确定方法[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2019.
- [17] 李靖. 页岩气赋存方式及产气机理研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2017.