

文章编号: 1001-1986(2007)02-0028-03

构造抬升过程中煤储层压力的定量分析

吴永平¹, 李仲东^{1,2}, 王允诚^{1,2}

(1. 成都理工大学能源学院, 四川成都 610059;
2. 油气藏地质与开发工程国家重点实验室, 四川成都 610059)

摘要: 从煤储层在构造抬升过程中异常压力的成因机理入手, 通过沁水、塔巴庙地区抬升过程的定量模拟研究, 分析在整个抬升过程中煤储层流体体积的变化所引起的流体压力的变化情况, 从而反映储层压力在整个构造抬升过程中的动态演化过程, 得出“抬升过程是异常低压形成的重要机制”的结论。

关键词: 煤层气; 异常压力; 成因机制

中图分类号: P618.11 **文献标识码:** A

Quantitative analysis on coal reservoir pressure in process of geologic uplifting

WU Yong-ping¹, LI Zhong-dong^{1,2}, WANG Yun-cheng^{1,2}

(1. College of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of
Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Considering the genetic mechanisms of abnormal pressure of coal reservoir in process of geologic uplifting, through quantitative simulation analysis on geologic uplifting process in Qinshui basin and Tabamiao district, the variety of fluid physical volume of coal reservoir causing pressure variety of coalbed gas is analyzed, which reflects the dynamic evolvement process of whole reservoir pressure in the process of geologic uplifting, resulting in conclusion that means the geologic uplifting process is an important mechanism of abnormal low pressure.

Key words: coalbed gas; abnormal pressure; genetic mechanism

目前, 煤层气储层异常压力的形成机理及其在煤层气勘探开发和煤与瓦斯突出预测中的应用, 在国内外煤田与油气地质与工程界越来越受到关注。有关煤储层异常压力的形成机理及该方面的定量讨论, 近年来已有不少报道^[1-6]。2005年, 韦重韬利用质量守恒原理, 将封闭体系中煤储层压力表示为 $P = P_c + P_x$ (式中, P 为储层压力; P_c 为由膨胀能引起的储层压力; P_x 为由储层流体势引起的储层压力), 建立了煤层气生成、运移、聚集及散失动态平衡动力学模型; 2004年, 苏现波根据吸附态、游离态气体和水的状态方程, 结合埋藏史、热史分析, 提出了一种地质历史时期不同演化阶段煤储层压力的计算方法, 由此对抬升后的储层压力进行预测。但鉴于煤储层在整个地质历史时期压力成因及压力演化过程的复杂性, 到目前为止, 认识仍然十分有限。

本文在对煤储层抬升过程中压力成因理论分析研究的基础上, 讨论了煤储层在抬升过程中流体压

力变化的数学模型。虽然这种模型的假设条件较多, 但可以反映储层压力的整个动态演化过程。经计算知, 煤储层的抬升可引起流体压力降低。在构造抬升中, 当盖层产生破裂, 大量气体瞬间散失, 可导致流体压力迅速明显地下降。

1 构造抬升过程理论分析

煤层气在复杂的地质演化过程中, 一直处在“生气—运移—保存—破坏”的不断交替过程中, 同时, 地层压力也在不断地发生变化。地层压力是以地层流体为前提的物理量。按照压力封存箱理论, 系统内流体体积增加, 即使温度不变, 流体压力也会增大。降低系统压力的唯一方法就是箱体系统遭到破坏、箱内流体移出。煤层压力值的大小随煤层内流体的变化而变化, 若煤储层压力高, 即煤层封闭性好, 与外界流体交换越少, 煤层内所封闭的流体就越多; 相反, 若煤储层压力低, 或许是因为煤层封闭性

收稿日期: 2006-09-11

基金项目: 国家“973”计划项目“煤层储层异常流体压力成因机制及古压力模拟研究”(2002CB211705)部分成果

作者简介: 吴永平(1979—), 男, 青海湟中人, 博士研究生, 油气田开发工程专业

遭到破坏,造成流体泄露,使压力降低;也可能是一个较封闭系统,由于系统内孔隙空间增大(产生张裂缝,或固体体积压缩等)而形成。

煤变质史及人工煤化—生气实验证明,造成低饱和度煤层气藏(常伴有低流体压力)的原因并不是煤中生成的煤层气量不足,而是封闭保存条件的不良导致的散失^[7]。构造抬升作用一方面致使煤储层内部广泛发育裂隙,使煤储层的渗透性有所改善;另一方面致使煤储层中原有的内生裂隙系统遭到改造与破坏^[8]。所以,当煤储层在抬升过程中,因其原有的裂隙系统遭到破坏,吸附气解吸为游离气很快被逸散掉,而使煤层含气量减少,煤储层流体大量散失,进而导致压力降低。若抬升过程中整个系统处于压力封闭状态,则可从构造抬升引起的上覆层变薄、温压条件以及煤岩孔隙体积的变化着手,分析抬升前后流体压力系数的变化情况。在系统封闭状态下,如果抬升后的压力系数小于抬升前,则抬升过程为一个降压过程;相反,若抬升后的压力系数大于抬升前,则抬升过程是一个增压过程。本文通过对封闭系统下流体压力的定量研究,分析了煤储层压力在整个构造抬升过程中的动态演化过程。

1.1 构造抬升过程中异常压力的成因机制

构造抬升往往形成异常低压,它是导致异常低压的重要机制^[9]。异常低压的形成主要由于上覆地层的抬升和剥蚀所致(Russell, 1972; Barker, 1972; Fertl, 1988)。如:在稳定升降的北美地台,所有大气田(如Keyes气田^[9]以及阿巴拉契亚地区^[11])的异常低压都与构造抬升有关^[10];构造抬升使得鄂尔多斯盆地含气层系古超压消失^[9, 12]。抬升过程之所以能够导致异常低压,主要是:地层抬升过程引起的流体向下倾方向泄露,负荷减少引起的孔隙反弹以及温度降低引起的流体收缩;同时,抬升过程中负载和温度的降低使油气生成、水热增压和矿物的转变都趋于停止,难以形成和维持超压;地层孔隙的反弹对异常低压的贡献有可能超过地层水收缩的贡献。在抬升阶段,如果只考虑降温引起的压力系数的变化,即使是纯粹的气层发生抬升,带来的超压也很有限。构造抬升之所以导致明显降压,是因为当盖层产生破裂时,大量气体瞬间散失,致使流体压力迅速下降。需要说明的是,抬升虽然倾向于形成异常低压,但这只有在低渗透地层、且无明显构造挤压条件下才会表现出来^[9]。

1.2 构造抬升前后流体质量的变化

煤层在抬升前经历了二次生烃作用,在不断生气的过程中,孔(隙)一割(理)系统的压力不断增高,

当孔—割系统的压力达到盖层的突破压力时,盖层开始出现破裂。盖层一旦发生破裂,孔隙中的气体就迅速散失,孔—割系统的压力随即迅速降低,盖层裂缝闭合,相应的割理开度变小,趋于闭合。当压力回升,反复生气、反复扩散—渗流—突破—闭合,使压力在抬升前一直维持在突破压力值以下。

抬升前,由于刚经历过二次生烃,甲烷的吸附量明显增大。气体的总量包括煤层基质中的甲烷吸附气体、煤层割理中的游离气以及溶解气3部分。同时,吸附量、游离量和溶解量均处于最大值。在抬升过程中,由于压力、地下温度以及上覆负荷的降低,导致吸附量、游离量和溶解量也同时降低,从而使孔隙水可能出现明显的收缩作用,并产生半真空状态和异常低流体压力。

2 构造抬升过程中煤储层压力的定量模拟

2.1 方法原理

利用构造抬升演化史数值模拟方法预测研究区煤层气压力变化特征的基本思路是:首先根据前人恢复研究区域煤层构造演化史、沉积埋藏史和热史成果,通过定量模拟煤层气在抬升过程中压力演化历史,建立煤层气压力演化史模型;进而根据模拟结果,预测研究区煤层气异常压力特征。

2.2 基本数学模型

建立抬升阶段压力模型的关键,在于全面考虑整个煤层气抬升演化过程。在查明构造演化史、埋藏史、热史的基础上,考虑到抬升过程中煤有机质生烃已趋于停止,煤层气在煤储层中的各种散失作用难以定量研究,因此,模型的建立首先需假设:a. 抬升过程中,没有盖层突破流体的散失,整个系统处于压力封闭状态;b. 抬升过程中,只考虑煤岩深度及温度变化时的压力系数变化;c. 煤储层的密度在抬升前后没有变化;d. 煤基质孔隙中的气体仅为甲烷。

首先,设 H_1 为现今(煤储层)埋深; P_1 为现今地压; T_1 为现今地温; H_2 为(煤储层抬升前的)原始埋深; P_2 为(煤储层抬升前的)原始地压; T_2 为(煤储层抬升前的)原始地温; $H_2 - H_1 = H$ 为剥蚀深度; $P_2 - P_1 = P$ 为因地温降低引起的压降。

根据气体状态方程 $PV = nRT$,可得抬升后煤储层流体的压力为:

$$P_1 = \frac{nRT_1}{V_1}, \quad (1)$$

式中 $T_1 = 20 + 0.03H_1 + 273$; R 为摩尔体积常数。煤储层抬升前后,因基质孔隙体积变化很小,所以假

设 $V_1 = V_2$ 。这样, 抬升前煤储层流体的压力为:

$$P_2 = \frac{nRT_2}{V_2} = \frac{nRT_2}{V_1}, \quad (2)$$

式中 $T_2 = 20 + 0.056H_2 + 273$ 。

式(1)~式(2)得:

$$\Delta P = \frac{nR(T_2 - T_1)}{V_1} = \frac{nR(0.056H_2 - 0.03H_1)}{V_1}。 \quad (3)$$

抬升后因温度降低引起的降压为:

$$P_2 = \rho g H_2;$$

抬升后煤储层流体的压力可表达为:

$$P_1 = P_2 - (P_2 - P_1) = \rho g H_2 - \frac{nR(T_2 - T_1)}{V_1} = \rho g H_2 - \frac{nR(0.056H_2 - 0.03H_1)}{V_1}。 \quad (4)$$

因此, 抬升后的压力系数即:

$$\frac{P_1}{\rho g H_1} = \frac{H_2}{H_1} - \frac{nR(0.056H_2 - 0.03H_1)}{\rho g H_1 V_1}。 \quad (5)$$

最后, 根据实际气体状态方程得到压力系数为:

$$\frac{P_2 - \Delta P}{\rho g H_1} = \frac{\rho g (H_1 + \Delta H) - \frac{nR}{V - nb} (0.056H_2 - 0.03H_1)}{\rho g H_1} = 1 + \frac{\Delta H}{H} - \frac{nR(0.056H_2 - 0.03H_1)}{\rho g H_1 (V - nb)}。 \quad (6)$$

式中 R 为摩尔体积常数 ($8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); b 为范德华常数 ($42.78 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$); V 为 1 t 储层的孔隙体积; n 为现今 1 t 储层中气体的摩尔数; $g = 9.8 \text{ N/kg}$; $\rho = 1.02 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

2.3 计算实例及其结果分析

在相关参数已知的条件下, 利用数学模型对阳城和塔巴庙地区煤层气构造抬升压力演化史进行了模拟研究。计算结果如表 1。

表 1 不同情况下煤储层压力系数对比表

Table 1 Comparison of coal reservoir pressure coefficient under different conditions coefficient chart

地区	抬前埋深 m	现今埋深 m	抬前模拟 压力系数	抬后计算 压力系数	现今实测 压力系数
阳城	3 000	600	1.26	0.74	0.85
霍州	1 000	600	1.35	0.59	0.85
沁源	3 700	2 800	1.07	0.62	0.92
塔巴庙	3 700	2 800	1.45	0.73	0.86

通过对阳城、霍州、沁源以及塔巴庙地区已有埋藏史资料的计算可知: 阳城地区从白垩纪末的 $3 000 \text{ m}$ 埋深, 经构造抬升剥蚀 $2 400 \text{ m}$ 后, 到现今的 600 m 埋深, 压力系数从 1.26 降至 0.74; 霍州地区从白垩纪末的 $1 000 \text{ m}$ 埋深, 经构造抬升剥蚀 400 m 后, 到现今的 600 m 埋深, 压力系数从 1.35 降至 0.59; 沁源地区从三叠纪末的 $3 700 \text{ m}$ 埋深, 经构造

抬升剥蚀 900 m 后, 到现今的 $2 800 \text{ m}$ 埋深, 压力系数从 1.07 降至 0.62; 塔巴庙地区从 $3 800 \text{ m}$ 埋深, 经构造抬升剥蚀 900 m 后, 到现今的 $2 700 \text{ m}$ 埋深, 压力系数从 1.45 降至 0.729。

通过对抬升后储层压力系数的计算值与实测值进行比较, 发现它们相差均不大。这充分说明构造抬升是一个降压过程, 它不会造成超压。鄂尔多斯整个地区储层异常低压的主要原因, 应该为构造抬升剥蚀所致。

3 结语

煤储层在构造抬升过程中, 其原有的裂隙系统遭到破坏, 吸附气解吸为游离气而快速逸散, 导致煤层含气量减少, 煤储层流体大量散失, 此时, 便引起降压。在地层渗透性低且压力封闭的情况下, 构造抬升同样倾向于形成异常低压。

构造抬升过程中, 煤储层流体压力变化的数学模型(虽然假设条件较多)可以反映储层压力的整个动态演化过程。当抬升过程中整个系统处于压力封闭状态时, 可从构造抬升引起的上覆层变薄、温度压力的变化情况, 经计算分析出抬升后流体压力系数比抬升前有所降低。这说明构造抬升过程是一个降压过程, 而当抬升中盖层产生破裂时, 因大量气体的瞬间散失, 可导致流体压力迅速而明显地下降。

参考文献

- [1] 苏现波. 煤层气储层压力预测方法[J]. 天然气工业, 2004, 24(5): 88—90.
- [2] 韦重韬. 沁水盆地中南部上主煤层超压史数值模拟研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 81—84.
- [3] 王胜利. 异常地层压力的形成机理与意义[J]. 新疆石油学院学报, 2004, 16(1): 21—24.
- [4] 苏现波, 张丽萍. 煤层气储层异常高压的形成机制[J]. 天然气工业, 2002, 22(4): 15—18.
- [5] 褚庆忠. 异常地层压力的形成机制讨论[J]. 天然气勘探与开发, 2001, 24(4): 38—41.
- [6] 韦重韬. 沁水盆地中南部煤层气聚散史模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(2): 146—148.
- [7] 王生维. 煤层气藏的封闭及其研究意义[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1999, 24(1): 49—51.
- [8] 王红岩. 中国煤层气成藏有利条件及评价方法[J]. 天然气工业, 2004, 24(增刊 A): 9—11.
- [9] 夏新宇. 构造抬升是异常高压的成因吗?[J]. 石油实验地质, 2002, 24(6): 496—498.
- [10] HUNT J M. Petroleum Geochemistry and Geology (2nd edition)[M]. New York: Freeman, 1995. 296—298.
- [11] RUSSELL W L. Pressure—depth relation in Appalachian region[J]. AAPG Bulletin, 1972, 56(3): 528—536.
- [12] 李仲东. 我国煤层气储层异常压力的成因分析[J]. 矿物岩石, 2004, 24(4): 87—92.