

煤储层弹性能及其对煤层气成藏的控制作用

吴财芳* 秦 勇 傅雪海

(中国矿业大学资源与地球科学学院, 徐州 221008)

摘要 煤层气成藏维系于其能量平衡系统, 其核心是能量的有效传递及其地质选择过程. 煤储层弹性能包括煤基块弹性能、水体弹性能和气体弹性能. 在结合煤样力学实验的基础上, 对不同弹性能进行了定量分析研究, 并深入探讨了煤储层弹性能对煤层气成藏的控制作用, 结果表明: 当气藏无边水、底水时, 在成藏初期阶段, 储层的储气能力主要由煤基块弹性能控制, 气体弹性能的影响力次之, 水体弹性能影响最小. 在成藏中后期阶段, 储能主要受气体弹性能控制; 当气藏有边水、底水时, 初期阶段的储能主要以煤基块弹性能和气体弹性能为主, 但是随着水体增大, 水体弹性能的影响力增大. 中后期阶段, 还是以气体弹性能的影响为主, 占中后期全部储能的 80% 以上. 总之, 煤层气藏在形成初期以储存煤基块弹性能为主, 中后期以储存气体弹性能为主, 整个过程中, 水体越大, 水体弹性能对成藏的影响越大. 研究认为: 煤储层弹性能越高, 越有利于煤层气的富集成藏. 其中, 高的煤基块弹性能和气体弹性能, 有利于气藏高产, 而高的水体弹性能, 则有利于气藏稳产. 因此, 评价煤层气成藏的关键是煤储层弹性能量.

关键词 煤储层 弹性能 煤基块弹性能 水体弹性能 气体弹性能 煤层气成藏

宏观动力学因素^[1]作用于煤储层, 使煤储层中固、液、气三相物质的耦合关系不断发生变化, 能量系统的这种动态平衡变化特征, 体现为固、液、气三相物质弹性能综合而成的地层弹性能, 并制衡着煤层气的成藏效应^[2]. 因此, 地层弹性能在本质上是联系煤层气成藏动力学条件与煤层气成藏效应之间的纽带, 也是解译煤层气成藏动力学条件耦合特征的关键, 但以往普遍受到忽视. 为此, 本文从物理学经典定律出发, 试图将各类弹性能统一起来研究.

1 基本概念及模拟实验结果分析

1.1 基本概念

储存于热力学系统中的能量称为系统的储存能, 包括系统本身热力状态所确定的热力学能、宏观动能

以及宏观位能. 储存能表现在煤储层中则为地层弹性能, 简称煤储层弹性能(E), 是地质历史中各类动力学因素汇聚的结果, 包括煤基块弹性能、煤层中水体弹性能和气体弹性能, 可表示为

$$E = E_{\text{煤}} + E_{\text{水}} + E_{\text{气}} \quad (1)$$

煤层气中主要成分甲烷的超临界温度为 293 K, 超临界压力为 4.68 MPa. 在地层条件下, 无论压力有多高, 绝对呈气态存在, 系统中可压缩弹性介质的体积、压力状态变化过程, 在忽略状态变化中发生温度变化时, 是一绝热过程. 在这样的封闭体系中, 地层压力场作用于气、水流体后, 要改变煤层气体积状态的过程可能不会出现, 流体内能的增加以消耗地层压力场水体势能来实现. 前人的研究成果以及煤层气开发实践证明, 在煤层气吸附、解吸、运移、聚集

收稿日期: 2006-10-23; 接受日期: 2006-11-21

国家 973 煤层气项目(编号: 2002CB211704)、国家自然科学基金重点项目(批准号: 50134040-03)、中国博士后科学基金项目(批准号: 2005037749)和江苏省博士后基金项目资助

* E-mail: caifangwu@sina.com

的整个过程中, 地层压力场都在持续不断地消耗地层中的水体势能, 增加煤层气分子的动能^[2]. 到煤层气在储层系统中的运移、聚集成藏结束, 系统内地层压力场势能达到相对平衡稳定状态时, 煤储层中流体分子运动的平均速度也就达到了相对稳定状态. 由于系统中流体的弹性是地层压力场作用于气体分子, 通过能量转换而获得的, 并且系统的稳定性发生变化时, 弹性能量场与地层压力场可以相互转换. 因此, 我们必须把它们综合起来加以研究.

1.2 煤基块弹性能物理模拟实验结果

煤基块弹性能可用其弹性变形特征来衡量^[3-5], 一般是在单轴抗压实验中测得. 但煤层气开发均是在地下一定深度范围内进行的, 所以原地应力条件下的煤体力学性质就显得更为重要. 本文采用煤样品三轴力学实验来获得求算弹性能的基本参数^[5], 即水、气饱和煤储层围限压力下的弹性变形特征, 显然与一般意义下的单轴压缩实验不同. 实验模拟样品共 8 件, 涵盖了从气煤至超无烟煤的煤级范围.

实验样品的加工按国际岩石力学学会的标准进行. 实验前先将样品置于 5%KCl 溶液, 抽真空排除其中的气相介质, 饱和水平衡 24~48 h; 实验中, 在保持有效应力不变的情况下, 向饱和水煤样充入纯度为 99.99% 的甲烷气体, 设定甲烷压力点以及相应围压点, 分别测试各压力点条件下煤样吸附甲烷的轴向、径向及体积膨胀量, 每点稳定时间为 12 h; 实验时的围压设计为 8 MPa, 轴压为 100 MPa, 加载速率为 0.035 MPa/s, 计算机采集的主要数据有围压、轴压、轴向应变、径向应变、时间等, 实验结果见表 1.

2 煤储层中不同相态物质的弹性能量

2.1 煤基块弹性能及其影响因素

在原始应力状态下, 煤储层处于弹性状态, 其储存的能量为^[6]

$$E_{\text{煤}} = \frac{1}{2E}[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)], \quad (2)$$

式中: E 为弹性模量; μ 为煤岩体泊松比; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为三轴压力, 其中 σ_1 是轴压; σ_2, σ_3 是围压, 在假三轴力学实验中, $\sigma_2 = \sigma_3 = P_c$. 轴压 σ_1 与围压 P_c 之间具有如下关系^[7]:

$$P_c = \frac{\mu}{1-\mu}(\sigma_1 - P_{\text{流体}}), \quad (3)$$

式中, α 为 Biot 系数; $P_{\text{流体}}$ 为媒体中的流体压力.

煤基块弹性能随着有效应力的增加而增大, 总体上来看, 无烟煤基块弹性能的变化率要低于瘦煤~贫煤, 而大于焦煤. 不同煤化程度的自然煤样、水饱和煤样、气、水饱和煤样的基块弹性能与有效应力的相关关系如图 1 所示. 在无烟煤系列中(图 1(a)), 气、水饱和煤样的基块弹性能最大, 自然煤样次之, 水饱和煤样最低; 在瘦煤~贫煤系列中(图 1(b), (c)), 气、水饱和煤样的基块弹性能最小, 自然煤样与水饱和煤样两者相差不大; 在肥煤系列中(图 1(d)), 虽然气、水饱和煤样的煤基块弹性能仍然最小, 但与水饱和煤样的煤基块弹性能大小却相当接近. 这是由于无烟煤的高变质程度使其弹性模量降低, 在泊松比变化不大的情况下, 基块弹性能远高于其他煤种. 这种情况同时也说明在低煤级煤中, 气、水的存在对煤基块弹性能的影响不大.

表 1 煤岩体力学实验成果汇总表^{a)}

煤样	采样位置	$R_{o,\max}/\%$	三轴压缩($P_c=8$)/MPa									
			自然状态			水饱和			气、水饱和			
			P_0/MPa	E/MPa	μ	$M_s/\%$	P_0/MPa	E/MPa	μ	P_0/MPa	E/MPa	μ
1	晋城成庄矿, 3 煤	3.83	40	3168	0.17	1.94	40	3104	0.31	24	1829	0.26
2	高平望云矿, 3 煤	2.17	78	4200	0.17	1.16		3049	0.25	54	3648	0.29
3	潞安常村矿, 3 煤	2.10	52	3650	0.16	1.23	42	3351	0.20	59	4536	0.28
4	潞安五阳矿, 3 煤	1.89	39	3529	0.17	0.97	41	3360	0.19	22	2380	0.43
5	霍州李家村矿, 3 煤	0.89				0.82	44	4296	0.11	54	4471	0.12
6	阳泉一矿, 3 号煤	2.24	52	4840	0.23		23.8	2810	0.38	18.5	1960	0.12
7	左权石港矿, 15 煤	2.30	56	3730	0.45		34.8	2630	0.29			
8	阳城卧庄矿, 3 煤	4.29	70	4230	0.28		62	4550	0.36	52	4250	0.42

a) P_0 —抗压强度, P_c —围压, E —弹性模量, μ —泊松比, M_s —煤样水饱和含量

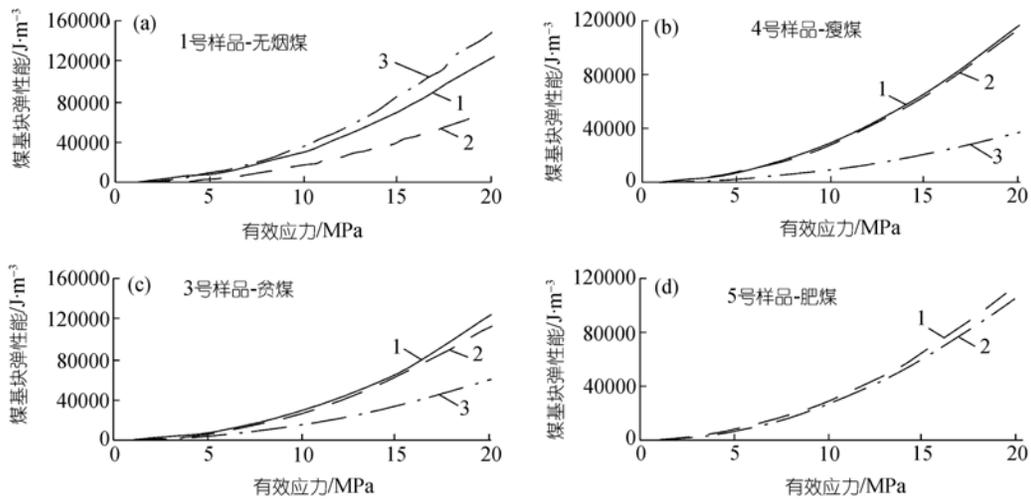


图 1 不同煤样煤基块弹性能对比

1 示自然煤样; 2 示水饱和和煤样; 3 示气、水饱和和煤样

2.2 煤储层水体弹性能

当煤储层的温度和压力发生变化时, 其中一部分能量转化为水体弹性能. 在合适的条件下, 这部分能量会释放出来, 驱动流体流动^[8].

$$\text{流体的压缩系数: } \beta = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta\rho}{\Delta P} \text{ 或 } \beta = -\frac{1}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta P}, \quad (4)$$

式中: ρ 为流体的原始密度; $\Delta\rho$ 为流体密度的变化量; ΔP 为压力变化量; V_0 为流体的原始体积; ΔV 为流体体积变化量.

$$\text{流体的热膨胀系数: } \alpha = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta\rho}{\Delta T} \text{ 或 } \alpha = \frac{1}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta T}, \quad (5)$$

式中: ρ 为流体的原始密度; $\Delta\rho$ 为流体密度的变化量; ΔT 为温度变化量; V_0 为流体的原始体积; ΔV 为流体体积变化量.

根据热膨胀系数定义, 假设流体压力不变, 温度升高, 这时的流体体积为: $V' = V_0(1 + \alpha\Delta T)$; 根据压缩系数定义, 再假设温度不变, 压力增加, 这时的流体体积为: $V = V_0(1 + \alpha\Delta T)(1 - \beta\Delta P)$; 最后根据能量公式, 当温压同时变化时, 储存于水体中的弹性能为

$$E_{\text{水}} = RT_0 \left[\frac{P_1}{P_0} (1 + \alpha\Delta T)(1 - \beta\Delta P) \right], \quad (6)$$

式中: P_1 为变化后的流体压力; P_0 为原始流体压力; T_0 为原始流体温度; α 为初始时刻水的热膨胀系数; β 为初始时刻水的压缩系数; ΔT 为温度变化量; ΔP 为压力变化量; R 为摩尔气体常数, 其值为 8.314 J/

$(\text{mol} \cdot \text{k})$.

从温度和热膨胀系数与水体弹性能的关系(图 2)来看, 当温度低于 60°C 时, 储层中水体的弹性能随着温度的升高, 增加不大; 当温度高于 80°C 时, 水体弹性能的增加很快, 这是由于此时的温度接近水的汽化温度, 水体热膨胀系数增大, 体积显著增加, 弹性能增大. 从流体压力和压缩系数与水体弹性能的关系(图 2)来看, 流体压力与水体弹性能呈正相关关系.

但是, 从弹性能的数据中可以看出, 水体弹性能与煤基块弹性能不在一个数量级上, 两者相差了两个数量级以上. 所以, 对于无底水、边水的煤储层来说, 其水体弹性能可以忽略, 只有在水体较大、迳流弱的煤层中, 水体弹性能显著提高, 对成藏和开采影响较大, 此时不能忽略.

2.3 煤储层甲烷气体弹性能

赋存于煤层中的煤层气, 当温度和压力发生变化时, 具有向外膨胀做功的能量^[9,10], 这种能量称为气体弹性能, 它与储层中的煤层气含量和膨胀前后的温度压力变化直接相关.

(i) 游离态甲烷弹性能公式. 在原始地层状态下, 温度压力的变化属于一多变过程^[11,12], 结合气体热力学方程中的多变过程公式, 可以得到游离态甲烷弹性能公式:

$$E_{\text{游}} = \frac{\beta RT_0 (1 + \alpha\Delta T)(1 - \beta\Delta P)}{k - 1} \frac{P}{P_0} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right], \quad (7)$$

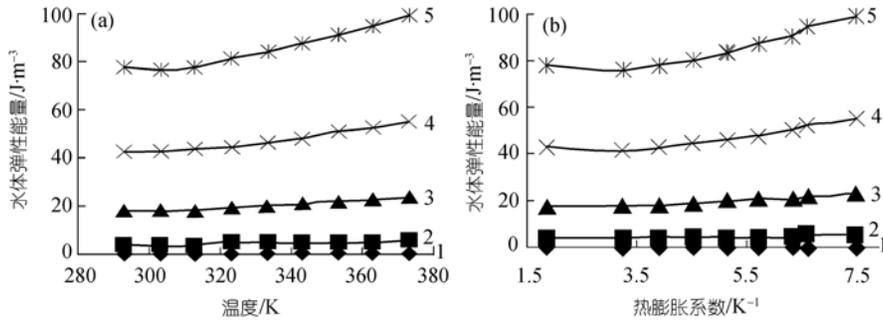


图 2 水体弹性性能(a)与温度压力以及热膨胀系数(b)之间的关系

1 示 1 MPa; 2 示 5 MPa; 3 示 10 MPa; 4 示 15 MPa; 5 示 20 MPa

式中, α 为温度从 T_0 到 T 时甲烷的热膨胀系数; β 为压力从 P_0 到 P 时甲烷的压缩系数; R 为摩尔气体常数, $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为气体状态变化后的环境温度; P_0 为气体状态变化前的流体压力; P 为气体状态变化后的流体压力; $\Delta T = T - T_0$, 表示温度的变化量; $\Delta P = P - P_0$, 表示压力的变化量; k 为多变指数, $k = C_p/C_v$, 其中 C_p 为甲烷气体的定压热容; C_v 为甲烷气体的定容热容. 对于甲烷来说, $k=1.30$.

若多变过程按照低压下理想气体处理, 则有

$$\frac{T_0}{T} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{k-1} = \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad \text{式中 } T_0, V_0, P_0 \text{ 为原始气体}$$

状态下的温度、体积和压力; T, V, P 为气体状态变化后的温度、体积和压力. 将此式代入(7)得

$$E_{\text{游}} = \frac{\beta RT_0 (1 + \alpha \Delta T) (1 - \beta \Delta P) P \Delta T}{k-1 P_0 T}. \quad (8)$$

(ii) 吸附态甲烷弹性性能公式. 为了计算方便, 吸附甲烷含量计算公式采用周世宁院士推导的简化公式^[13]: $V_{\text{吸附}} = a\sqrt{P}$, 式中 P 为煤储层流体压力; a 为甲烷含量系数, 其值为 $3.16 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{t} \cdot \text{Pa}^{0.5})$. 当储层流体压力有一微小变化时(降低), 解吸出的甲烷量为:

$$dV = \frac{a}{2\nu\sqrt{P}} dP, \quad \nu \text{ 为标准状态下甲烷的摩尔体积,}$$

$22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$. 依照多变过程, 每摩尔解吸甲烷所具有的弹性能量可以用(8)式表示. 所以, 由于压力降低 dP 所解吸的甲烷具有的弹性能为: $dE =$

$$E_{\text{游}} \frac{a}{2\nu\sqrt{P}} dP, \quad \text{所以,}$$

$$E_{\text{吸}} = \int_P^{P_0} E_{\text{游}} \frac{a}{2\nu\sqrt{P}} dP = E_{\text{游}} \frac{a}{\nu} (\sqrt{P_0} - \sqrt{P}), \quad (9)$$

因此, 煤储层甲烷气体弹性性能公式为

$$E_{\text{气}} = E_{\text{游}} + E_{\text{吸}} = E_{\text{游}} \left[1 + \frac{a}{\nu} (\sqrt{P_0} - \sqrt{P}) \right]. \quad (10)$$

(iii) 储层甲烷气体弹性性能. 甲烷气体弹性性能随着温度压力的增加而增加(图 3). 不同温度压力下, 气体弹性性能的变化趋势基本一致. 在温度低于 40°C 、压力低于 12 MPa 之前, 弹性能量的增幅特别明显, 也就是说在这个阶段范围内, 温度压力的微小变化将会对气体弹性性能产生很大影响.

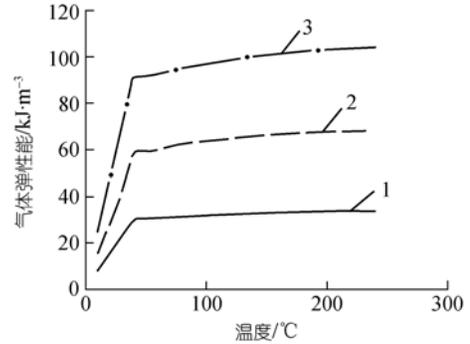


图 3 气体弹性性能随温度压力的变化

1 示 10 MPa; 2 示 20 MPa; 3 示 30 MPa

3 煤储层的地层弹性性能总体分析

3.1 不同温度压力下, “三能”以及综合能量的定量对比分析

在相同压力作用下, 随着温度的升高, 煤基块弹性性能、水体弹性性能和气体弹性性能都呈现增加的趋势, 前两者增加幅度很小, 后者的增加幅度较大(图 4); 在相同温度下, 随着压力的逐渐增大, 煤基块弹性性能、气体弹性性能的增幅很大, 而水体弹性性能增幅较小. 这种情况说明, “三能”都对压力的变化特别敏感, 而气体弹性性能则显然与温压变化都密切相关, 而且水体弹性性能与煤基块弹性性能、气体弹性性能相差不止一个数量级.

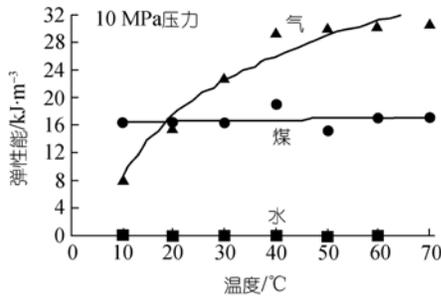


图 4 不同温度压力下,“三能”的定量关系

从综合能量与温度压力的关系图(图 5)中可看出,随着温度压力的增加,综合弹性能逐渐增大,但是压力对储层弹性能的控制作用明显要强于温度。

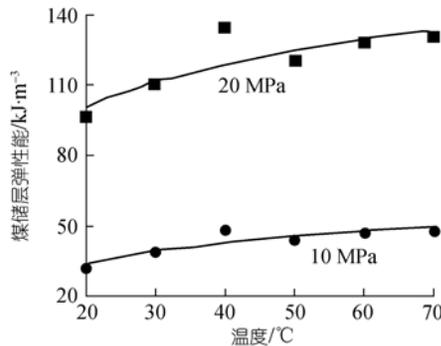


图 5 综合能量与温度压力的关系

3.2 不同类型煤储层弹性能对煤层气成藏的影响作用

煤层气藏的形成与开采是一个相互可逆的过程,成藏是能量系统达到平衡的过程,开采则是最大限度地破坏系统平衡.结合煤层气藏的开发实践,可以知道,煤层气成藏阶段随着压力温度的不断变化,其视地层压力和累计储存气量构成一条上凸曲线^[14].这是由于在煤层气成藏的初期,由于地层压实、储层基质和地层水压缩吸收的弹性能量使地层压力升降缓慢,当气藏具有边水、底水时,储水层吸收的弹性能量使曲线上凸更加明显,因此煤基块和地层水的压缩性不可忽略.当地层压力超过正常压力时,基块储存的弹性能量基本达到平衡,压缩系数降低基本不变,与随着地层压力升高而显著增加的煤层气的压缩系数相比,可以忽略不计.此时,气藏系统的平

衡主要依靠气体的压缩作用,表现为压力增加越快,成藏效应越明显的线性上升特征.因此,煤储层的地层弹性能对煤层气成藏意义重大.

下面通过煤基块、地层水和煤层气弹性能对煤层气藏储气能力的相对贡献来分析煤储层的地层弹性能对成藏的影响作用.假设压升 1 MPa 时弹性能量控制的气量之和为 100,其中煤基块、地层水和煤层气对储存总气量的相对贡献^[14]为

$$V_{煤} = \frac{C_f}{C_f + C_w S_{wi} + C_g S_{gi}} \times 100, \quad (11)$$

$$V_{水} = \frac{C_w S_{wi}}{C_f + C_w S_{wi} + C_g S_{gi}} \times 100, \quad (12)$$

$$V_{气} = 100 - V_{煤} - V_{水}, \quad (13)$$

式中: $V_{煤}$, $V_{水}$, $V_{气}$ 为煤基块、水体和气体弹性能对储气量的相对贡献; C_w 为束缚水压缩系数; C_f 为煤岩压缩系数; S_{wi} 为束缚水饱和度; C_g 为甲烷压缩系数; S_{gi} 为储层含气饱和度.

从表 2 中的计算结果可以看出,煤层气藏在不同的成藏阶段,气、水和煤三者的弹性能量所占比重不同.初期阶段,仅煤基块弹性能就占气藏储气能力的 57% 以上,也就是说,气藏形成初期储能主要受煤基块弹性能影响.在中后期阶段,煤基块和水体弹性能的共同贡献仅有 3.8%,而气体弹性能则成为控制储能的主要因素.

结合前面研究成果分析:(1)煤基块弹性能主要在成藏初期阶段被储存于煤层中,而且所占比重很大,这与成藏初期的成岩作用以及煤基块压缩系数随温度压力增加呈指数递减,后段变化平缓的规律密切相关.(2)在气藏的整个形成过程中,水体弹性能所占比重都很小.这是因为水的压缩系数变化较小,一般为 $3 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$,所以水的弹性压缩对综合能量的贡献一般不超过 5%,在实际计算中可以看作常数或忽略.(3)甲烷气体弹性能在成藏初期也起到了主要作用,但在中后期则直接决定煤储层的储能.

3.3 水体弹性能对成藏的影响

地下水控制着煤储层的束缚水饱和度,因此

表 2 煤层气成藏不同阶段参数的取值和计算结果

成藏阶段	含气饱和度/%	束缚水饱和度/%	压缩系数($\times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$)			对储存气量的相对贡献/%		
			C_g	C_f	C_w	$V_{煤}$	$V_{水}$	$V_{气}$
初期	70	30	30	30	4.4	57.3	2.13	40.57
中后期	70	30	400	10	4.4	3.43	0.45	96.2

表 3 煤层气、煤基块和束缚水弹性能对气藏储能的相对贡献

水体规模	含气饱和度/%	束缚水饱和度/%	成藏初期阶段/%			成藏中后期阶段/%		
			$V_{\text{气}}$	$V_{\text{水}}$	$V_{\text{煤}}$	$V_{\text{气}}$	$V_{\text{水}}$	$V_{\text{煤}}$
0	70.00	30.00	40.50	2.31	57.30	96.12	0.45	3.43
1	35.00	65.00	24.23	6.59	69.18	91.59	1.87	6.54
2	23.33	76.67	17.33	8.36	74.31	87.17	3.49	9.34
3	17.50	82.50	13.50	9.34	77.16	83.70	4.34	11.96
4	14.00	86.00	11.06	9.96	78.98	80.25	5.42	14.33

在煤储层地下水动力场中,边水和底水规模直接影响着水体弹性能,对煤层气成藏和开采具有重要作用.根据(11)~(13)式,在气藏不同形成阶段,煤层气、煤基块和束缚水弹性能对气藏储气能力的相对贡献,可以按照地下水体大小以及相应的煤储层束缚水饱和度与含气饱和度计算^[14](表 3).

当气藏中存在水体时,无论在那个成藏阶段,随着的束缚水饱和度增大,煤基块和地层水弹性压缩的贡献增大,煤层气弹性能对气藏储气能力的贡献减小.在成藏初期阶段,随着束缚水饱和度增大,煤基块的贡献甚至达到 78%以上,水体贡献也有 9%以上,但是没有超过 10%;在中后期成藏阶段,虽然气体弹性贡献降低,但还保持在 80%以上,仍然是储气能力的重要控制因素.表 3 同时也说明了一点,即地下水规模越大,压降就越缓慢,水体弹性能对储能的贡献就越大.

4 结论

(1) 储层弹性能包括煤基块弹性能、储层水体弹性能和气体弹性能.煤基块弹性能受到地应力、煤岩弹性模量、泊松比的影响,均与上覆地层厚度(埋深)和煤化程度(煤级)密切相关;水体弹性能主要受流体压力、水压缩系数、热膨胀系数影响,同样受到埋深、流体压力、流体密度的控制;气体弹性能受流体压力、压缩系数、热膨胀系数、储层温度以及储层含气量影响.三者皆与构造应力能、热应力能、地下水动力能以及地下水化学场密切相关.实际上,“四场”是通过控制煤储层弹性能而控制煤层气的成藏作用.

(2) 在综合分析煤储层弹性能对煤层气成藏的影响过程中发现,当气藏无边水、底水时,在成藏初期阶段,储层的储气能力主要由煤基块弹性能控制,气体弹性能的影响力次之,水体弹性能影响最小.在成藏中后期阶段,储能主要受气体弹性能控制;当气藏有边水、底水时,初期阶段储存的能量主要以煤基块弹性能和水体弹性能为主,而且水体越大,其影响力所占比重越大,气体弹性能的影响反而降低.中后

期阶段,还是以气体弹性能的影响为主,占中后期全部储能的 80%以上.总之,煤层气藏在形成初期以储存煤基块弹性能为主,中后期以储存气体弹性能为主,整个过程中,地下水体越大,对煤层气成藏的影响越大,其影响力最大可达到 10%.

(3) 上述研究成果表明:煤储层弹性能量越高,就越有利于煤层气的富集成藏.其中,煤基块弹性能和煤层气气体弹性能直接控制着煤层气藏是否能够高产,两者能量越高,越有利于高产;水体弹性能则决定着煤层气藏是否可以稳产,水体弹性能越大,压降越缓慢,越有利于气藏稳产.因此,评价煤层气成藏高产的关键是储层弹性能量.

参 考 文 献

- 秦勇. 中国煤层气地质研究进展与评述. 高校地质学报, 2003, 9(3): 339—358
- 刘吉成, 董鲜滨. 川东石炭系储集体地层压力弹性能量场势研究. 天然气工业, 1995, 15(2): 20—24
- George J D, Barakat M A. The change in effective stress associated with shrinkage from gas deportation in coal. Int J Coal Geol, 2001, 45(2): 105—113[DOI]
- Ceglarska-Stefanska, Grazyna, Zarebska, Katarzyna. Expansion and contraction of variable rank coals during the exchange sorption of CO₂ and CH₄. Ads Sci Technol, 2002, 20(1): 49—62[DOI]
- 傅雪海, 秦勇, 姜波, 等. 多相介质煤岩体力学实验研究. 高校地质学报, 2002, 8(4): 446—452
- 鲜学福, 许江, 王宏图. 煤与瓦斯突出潜在危险区(带)预测. 中国工程科学, 2001, 3(2): 39—46
- 傅雪海, 秦勇. 多相介质煤储层渗透率预测理论与方法. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003. 129—130
- Stefoglo E F, Kuchin I V, Kravtsov A V. Study of gas-liquid stirred reactor stability taking into account the temperature influence on gas solubility. Chem Eng Sci, 2004, 59(19): 4137—4147[DOI]
- 张我华, 金冀, 陈云敏. 煤/瓦斯突出过程中的能量释放机理. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增刊): 829—835
- Clarkson C R. Application of a new multicomponent gas adsorption model to coal gas adsorption systems. SPE J, 2003, 8(3): 236—250
- 朱连山. 关于煤层中的瓦斯膨胀能. 煤矿安全, 1985, (2): 47—50
- 刘明举, 颜爱华. 煤与瓦斯突出的热动力过程分析. 焦作工学院学报, 2001, 20(1): 1—7
- 周世宁, 林柏泉. 煤层瓦斯赋存及流动规律. 北京: 煤炭工业出版社, 1999. 14—16
- 魏俊之, 郑荣臣. 异常高压气藏储集层的岩石压缩系数和边底水规模对开采特征的影响. 石油勘探与开发, 2002, 29(5): 56—58