中国科学: 地球科学 2014 年 第 44 卷 第 12 期: 2645 ~ 2651
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

沁水盆地南部煤层气藏的有效运移系统

吴财芳[①②*], 秦勇[①②], 周龙刚[①②]

① 中国矿业大学资源与地球科学学院, 徐州 221116;
② 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 徐州 221008
* E-mail: caifangwu@sina.com

收稿日期: 2013-10-12; 接受日期: 2014-02-28; 网络版发表日期: 2014-11-14
国家自然科学基金项目(批准号: 41272178)、国家科技重大专项项目(编号: 2011ZX05034)、国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2009CB219605)和江苏省"青蓝工程"项目资助

摘要 煤层气藏有效运移系统的优劣取决于煤储层的裂隙发育程度与开合程度, 决定着煤储层的渗透性, 其外在显现形式主要表现为煤储层的孔裂隙系统特征. 本文基于煤基块弹性自调节效应理论和煤储层综合弹性能量理论, 提出了煤储层裂隙开合程度参数Δ和裂隙发育程度参数ξ, 定量化研究了沁水盆地南部煤层气藏有效运移系统, 探讨了其对煤层气富集高产的控制作用. 结果表明: 研究区现今阶段, ξ高值区位于安泽、沁源一带, 郑庄、樊庄次之, 说明这两个区域内, 煤储层裂隙发育程度较高; Δ高值区位于郑庄、樊庄一带, 安泽、沁源次之, 说明区域内煤基块弹性自调节正效应占优势, 裂隙趋于张开. 综合分析ξ和Δ可以发现, 二者的最佳匹配区域位于郑庄、樊庄一带, 说明此区域内煤层裂隙相对较发育, 裂隙张开程度较高, 可能具有较高的流体压力和较好的渗透性, 有利于煤层气藏高产.

关键词
煤层气藏
有效运移系统
裂隙开合程度
裂隙发育程度
渗透率

煤储层是由宏观裂隙、微观裂隙和孔隙构成的三元体系(傅雪海, 2001), 煤、气、水三相介质耦合关系与互动实质决定了煤层气聚集或逸散的"微观"环境. 在本文中, 将煤储层中有利于煤层气运移赋存的三相耦合关系称为有效运移系统. 有效运移系统是煤层气成藏微观动力能综合作用的必然结果, 是盆地内包括煤储层在内的含煤岩系中物性特征的具体表现形式, 这种地质选择过程取决于煤储层的裂隙发育程度与开合程度, 决定着煤储层的渗透性, 其外在显现形式主要表现为煤储层的孔裂隙系统特征(吴财芳, 2004). 有效运移系统宏观上受控于盆地演化过程中的构造分异作用, 并且与煤储层的受热-生烃史息息相关; 微观上受控于煤基块自调节综合效应和煤储层弹性自封闭效应, 与储层物性以及弹性能量的演化分异紧密相连. 在诸多地质因素中, 构造应力场、地下水动力场、热力场特征以及地层状况等均可在一定程度上对相对"封闭"环境有所贡献. 然而, 这些因素的作用首先体现于煤储层本身, 即煤储层自身允许煤层气扩散渗流或导流的能力(秦勇, 2003). 煤自身对气体的扩散能力极低, 相比之下, 煤储层中天然裂隙的发育特征, 特别是地质历史中天然裂隙的发育程度与开合程度, 就成为决定煤层气藏能否高产的关键要素之一(吴财芳等, 2007; 吴财芳和秦勇, 2012; 姜玮和吴财芳, 2011).

国外研究者在20世纪90年代就已经注意到煤基块自调节效应对煤储层渗透率的动态影响, 并进行

中文引用格式: 吴财芳, 秦勇, 周龙刚. 2014. 沁水盆地南部煤层气藏的有效运移系统. 中国科学: 地球科学, 44: 2645–2651
英文引用格式: Wu C F, Qin Y, Zhou L G. 2014. Effective migration system of coalbed methane reservoirs in the southern Qinshui Basin. Science China: Earth Sciences, 57: 2978−2984, doi: 10.1007/s11430-014-4988-z

了相关研究工作(Gash 等, 1993; Puri 等, 1991; Harpalani 和 Shraufnagel, 1990; Geonge 和 Barakat, 2001). 但这些研究成果更多的侧重于煤基块收缩规律的实验方法研究, 主要关注煤储层割理孔隙率、绝对渗透率及相对渗透率等与围压、储层压力、割理频率、煤基块收缩率之间的表观关系(Harpalani 和 Shraufnagel, 1990; Geonge 和 Barakat, 2001), 研究思路也多局限于煤岩体物理力学性质变化, 对煤基块自调节综合效应的地质控制机理的探讨较少. 在地层能量方面, 国外学者主要集中于石油天然气储层宏观能量场的定性分析(Amyx 等, 1960; Abdullah 等, 2001), 缺乏直接有效的定量计算方法, 对于煤储层地层能量的量化计算更是甚少涉及, 因而煤储层综合弹性能对煤层气藏勘探开发的具体控制作用也不得而知.

鉴于此, 本文基于煤基块弹性自调节综合效应理论和煤储层综合弹性能量理论, 提出了煤层气藏有效运移系统的两个定量化表征参数—煤储层裂隙开合程度参数 Δ 和裂隙发育程度参数ξ, 并以沁南煤层气藏为例, 探讨了其对煤层气富集高产的控制作用.

1 煤基块弹性自调节综合效应

在煤层气成藏过程中, 煤基块吸附气体使其自身发生膨胀, 对煤储层中天然裂隙面形成相对挤压作用, 导致天然裂隙相对闭合; 吸附煤层气的直接原因是流体压力增大, 使相同构造应力场条件下煤储层所受有效应力减小, 对煤储层中天然裂隙面形成相对拉张作用, 导致天然裂隙相对开张. 换言之, 即有效应力增大致使储层渗透率降低, 而煤基块收缩导致储层渗透率增高. 这两种效应都是煤基块自身弹性能分别对不同地质诱因响应的结果, 表现为煤基块自调节效应. 前者称为负效应, 后者称为正效应(陈金刚, 2003). 在地层条件下, 煤储层天然裂隙开合程度的变化, 正是这两种效应直接综合作用的结果, 称为煤基块自调节综合效应. 因此, 煤基块弹性自调节综合效应总体体现了储层裂隙系统的开合程度.

本文在模拟实验的基础上, 厘定了煤基块弹性自调节综合效应模式及其量版(图 1~4). 由此, 可以发现以下几点.

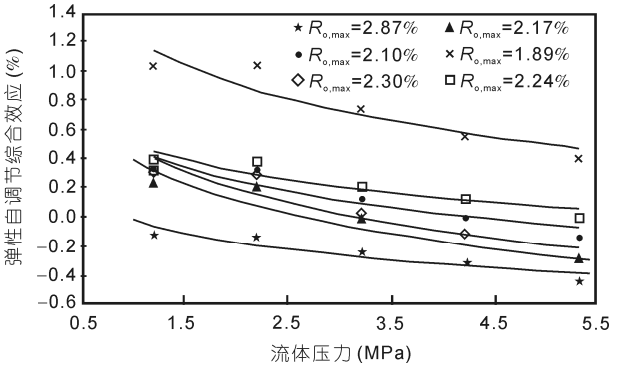

图 1 储层流体压力-弹性自调节综合效应耦合关系及模式

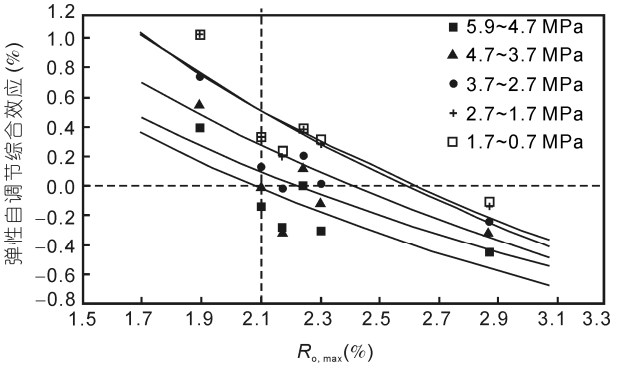

图 2 储层煤级-弹性自调节综合效应耦合关系及模式

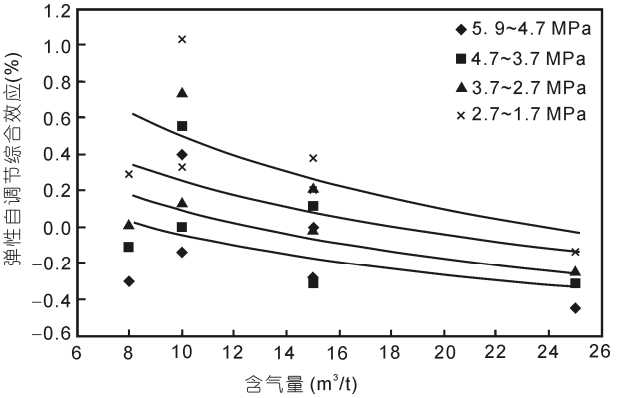

图 3 储层含气量-弹性自调节综合效应耦合关系及模式

第一, 在煤级恒定的情况下, 煤储层孔隙、裂隙流体压力增大, 综合效应呈逐渐降低的趋势(图 1). 在流体压力大致低于 3 MPa 时, 随流体压力增大, 综合效应的降低速率相对较快. 在流体压力大约高于 3 MPa 之后, 综合效应随流体压力增大而降低的速率相对变缓. 或者说, 流体压力较低时煤基块弹性变形

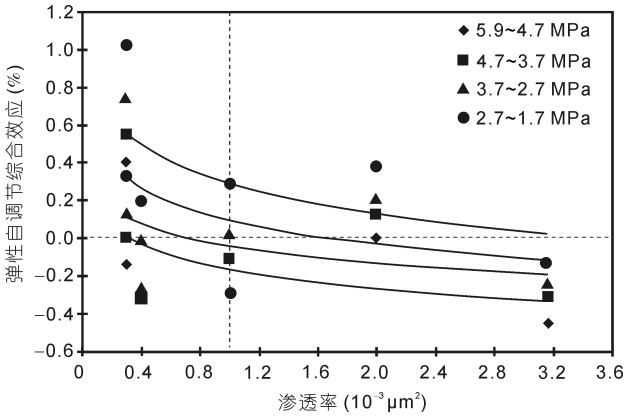

图 4　储层渗透率-弹性自调节综合效应耦合关系及模式

量相对较大, 流体压力增高则相对变形量减小(秦勇等, 2005).

第二, 在流体压力恒定的条件下, 煤级增高, 煤基块弹性自调节综合效应逐渐降低(图 2). 由此显示, 煤化程度的高低, 是决定煤储层弹性变形特征的关键自身因素. 进一步来看, 煤级越高, 煤储层在吸附或解吸煤层气时的弹性变形能力就越弱, 尤其是在煤层气发生解吸时煤储层中天然裂隙就越不容易得到相对拉张, 煤层气的内部保存条件就会趋于变好. 在实验的流体压力范围内, 无论流体压力大小如何, 一旦镜质组最大反射率大于 2.1%, 综合效应均从正值转变为负值. 这一转折点, 不仅是瘦煤与贫煤的分界, 而且正对应于第三次煤化作用的跃变点. 当镜质组最大反射率大于 2.8%时, 无论流体压力如何降低或升高, Δ始终为负值, 这种情况说明, 高煤级煤的煤基块自调节负效应始终大于其正效应. 所以, 对于高煤级煤层气藏来说, 煤基块自调节负效应决定了储层吸附煤层气的能力较高, 而且吸附气体难以解吸, 煤储层始终能够保持较高的含气量和含气饱和度.

第三, 在储层压力恒定的条件下, 随着储层含气量的增加, 煤基块弹性自调节综合效应逐渐降低(图 3). 在不同的流体压力下, 流体压力越大, 煤基块弹性自调节负效应随含气量的增加越显著. 当流体压力超过 5.9 MPa 时, 煤基块弹性自调节综合效应始终为负值. 由此表明, 在流体压力和煤基块吸附膨胀对裂隙开合程度的双重作用下, 当储层压力较高(大于 5.9 MPa)时, 煤储层的弹性自封闭效应会明显显现出来, 含气量越高, 弹性自封闭效应越显著.

第四, 在储层压力恒定的条件下, 随着储层渗透率增大, 煤基块弹性自调节综合效应逐渐降低(图 4). 流体压力越大, 煤基块弹性自调节负效应随渗透率的增加越显著. 在渗透率低于 1×10^{-3} μm^2 时, 弹性自调节综合效应降低的速率较快; 在渗透率高于 1×10^{-3} μm^2 时, 自调节综合效应降低的速率缓慢. 这种现象表明, 随着流体压力的变化, 裂隙系统的闭合趋势越明显, 储层渗透率越低, 或者说, 储层渗透率的降低和升高是由储层裂隙系统的开合程度所控制的, 二者之间呈正相关关系.

2　煤储层裂隙开合程度参数

本文用参数"Δ"表征煤储层裂隙开合程度, 以沁水盆地中南部上主煤层为例, 其主要影响因素包括储层埋藏深度、流体压力、有效应力、煤级(煤化程度)、储层温度、含气量和渗透率(表 1). 依据实验室测试数据和煤基块弹性自调节综合效应模式量版对各参数进行取值, 利用数量化处理数据软件, 得到煤储层裂隙开合程度Δ定量化方程如下:

$$\Delta=-0.23748x(1)-0.12635x(2)-0.92177x(3)+0.12221x(4)+0.31783x(5), \quad (1)$$

式中, Δ是煤基块自调节综合效应; $x(1)$~$x(5)$分别表示储层流体压力、有效应力、煤化程度(煤级)、储层温度和储层渗透率.

经检验, 方程最大偏差为 0.429410, F 统计量为 52.67, 相关系数 R 为 0.976196, 剩余标准差 S 为 0.226112, 表明方程各变量之间相关性显著. 研究区Δ计算结果见表 1.

在沁水盆地中南部, 主向斜轴部 Δ 基本全为负值, 在中村-丰宜、阳城等地, 负效应最显著; 随着向两翼推移, 自调节正效应越来越强(图 5). 这是因为, 两翼地区煤化程度减弱, 镜质组反射率低于 2.8%, 并且由于埋深减少, 有效应力降低, 对煤基块的影响程度也降低. 这种情况说明, 埋藏深度较大的主向斜轴部可能不会存在较高渗透率, 但由于此处自调节负效应起主导作用, 裂隙系统趋于闭合, 煤储层的弹性自封闭效应增强, 吸附性更好, 含气量较高, 致使煤层气不至于大量扩散逸失, 有利于富集成藏, 但不利于煤层气高产; 在埋藏深度适中的盆地两翼的环斜坡带地区, 含气量较高, 自调节正效应起主导作用, 裂隙系统趋于张开, 可能存在较高渗透率, 而且此处

表 1　现今阶段自调节综合效应各参数一览表

地点	埋深 (m)	流体压力 (MPa)	有效应力 (MPa)	煤级($R_{o,max}$)	温度(℃)	含气量 ($m^3\ t^{-1}$)	渗透率 ($10^{-3}\ \mu m^2$)	裂隙开合程度(Δ)
阳城	200	1	4.2	3.8	26	8	0.5	–0.87
町店	400	2	8.4	4.0	32	10	0.4	–1.05
晋城	100	1	1.6	3.5	23	14	0.5	–0.68
沁水	500	2.5	10.5	3.1	35	14	0.5	–0.52
端氏	500	4	9	3.6	35	16	1.0	–0.81
郑庄	600	5	10.6	3.0	38	18	0.1	–0.59
樊庄	400	3	7.4	3.4	32	12	0.3	–0.82
高平	300	1	6.8	2.0	29	2	0.4	0.63
长子	400	3	7.4	2.5	32	13	0.8	–0.12
安泽	800	7	13.8	2.1	44	16	0.1	–0.16
丰宜	800	5	15.8	3.1	44	18	0.1	–0.64
长治	300	1	6.8	1.1	29	6	0.8	2.04
古县	600	2	13.6	1.4	38	4	0.4	1.49
屯留	400	4	6.4	1.5	32	12	0.2	0.67
中村	900	10	13.4	3.1	47	16	0.07	–0.73
潞安	500	3	10	1.9	35	10	0.3	0.75
沁源	800	7	13.8	2.3	44	8	0.1	–0.33
襄垣	700	3	15.2	1.9	41	4	0.5	0.75
沁县	1100	10	18.6	2.9	53	20	0.6	–0.76

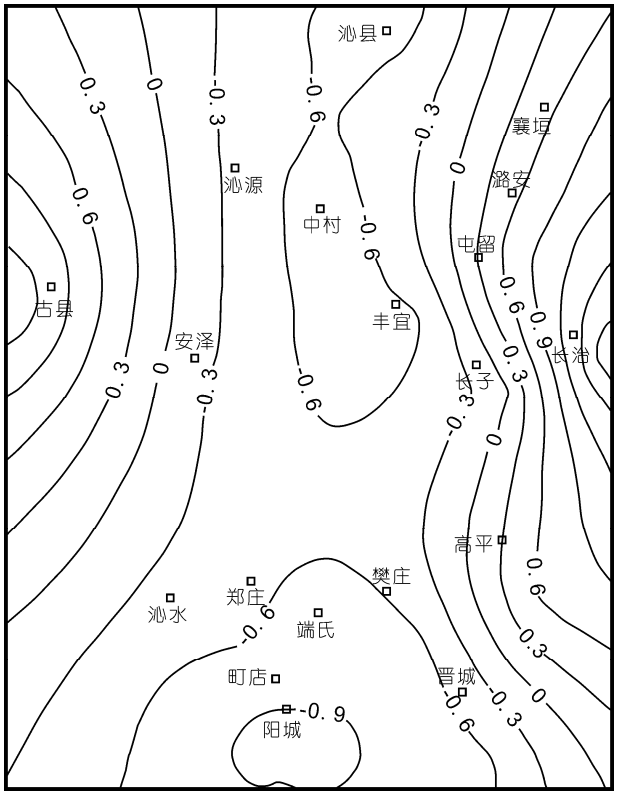

图 5　研究区煤储层裂隙开合程度参数Δ等值线图

煤储层的弹性自封闭效应变差, 解吸性能增强, 煤层气不仅会富集成藏, 而且更可能有利于其高产.

3　煤储层综合弹性能量与裂隙发育程度参数

3.1　煤储层综合弹性能量

在沁水盆地, 高构造曲率指示出煤储层变形强烈而构造裂隙相对发育的地段(秦勇等, 1999). 很显然, 煤储层变形强烈是由于不同应力综合作用的强度较大, 这种应力综合作用表现在能量方面, 就是煤储层的综合弹性能量(E). 它包含了储存于煤层中的主要系统能量, 如热力学能、宏观动能、应力应变能和地下水动力能等. 因为煤层是一种具有微弱弹性海绵体, 所以这些储存于煤层中的能量主要表现为一种综合弹性能量. 煤储层综合弹性能量(E)主要包括煤基块弹性能($E_{煤}$)、煤层中水体弹性能($E_{水}$)和气体弹性能($E_{气}$)(吴财芳等, 2007; 吴财芳和秦勇, 2012), 具体计算公式如下:

$$E=E_{煤}+E_{水}+E_{气}, \tag{2}$$

式中, 煤基块弹性能为

$$E_{煤}=\frac{C_v}{2}\left[\sigma_1^2+\sigma_2^2+\sigma_3^2-2\mu\left(\sigma_1\sigma_2+\sigma_2\sigma_3+\sigma_1\sigma_3\right)\right], \quad (3)$$

式中, C_v 为煤基块体积压缩系数; μ 为泊松比; σ_1, σ_2, σ_3 为三轴应力.

水体弹性能为

$$E_{水}=RT_0\phi\left[\frac{P_1}{P_0}\left(1+\alpha\Delta T\right)\left(1-\beta\Delta P\right)\right], \quad (4)$$

式中, P_1 为变化后的流体压力; P_0 为原始水体压力; T_0 为原始水体温度; 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/(mol k); φ为 1 m^3 煤基块中束缚水饱和度.

气体弹性能包括游离态和吸附态气体两部分, 即

$$E_{气}=E_{游}+E_{吸}=E_{游}\left[1+\frac{a}{\upsilon}\left(\sqrt{P_0}-\sqrt{P}\right)\right], \quad (5)$$

式中, α为温度从 T_0 到 T 时甲烷的热膨胀系数.

游离态甲烷弹性能为

$$E_{游}=\frac{\beta RT_0\phi\left(1+\alpha\Delta T\right)\left(1-\beta\Delta P\right)}{k-1}\frac{P}{P_0}\frac{\Delta T}{T}, \quad (6)$$

式中, β为压力从 P_0 到 P 时甲烷的压缩系数; 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气体压力; P 为气体状态变化后的气体压力; $\Delta T=T-T_0$ 为温度变化量; $\Delta P=P-P_0$ 为压力变化量; $k=C_p/C_V$ 为多变指数, 其中 C_p 为甲烷气体定压热容(甲烷的 k=1.30); φ 为 1 m^3 煤基块中的游离气含量.

吸附态甲烷弹性能为

$$E_{吸}=\int_P^{P_0}E_{游}\frac{a}{2\upsilon\sqrt{P}}dP=E_{游}\frac{a}{\upsilon}\left(\sqrt{P_0}-\sqrt{P}\right), \quad (7)$$

式中, P 为煤储层流体压力; α为甲烷含量系数, 其值为 3.16×10^{-3} m^3/(t $Pa^{0.5}$); υ 为标准状态下甲烷的摩尔体积, 22.4×10^{-3} m^3/mol; $E_{游}$为游离态甲烷弹性能.

3.2　煤储层裂隙发育程度参数 ξ

显而易见, 只有煤储层综合弹性能量大到足以使煤岩体破裂产生裂隙, 裂隙系统才有可能形成并进一步发展. 而构造裂隙发育地段正是储层综合弹性能破裂煤体造成裂隙系统大幅度发育的部位. 因此, 煤储层裂隙发育程度可用某一点储层综合弹性能与煤岩体破裂能量的比值来表示(吴财芳, 2004; 吴财芳等, 2007), 即

$$\xi=E/E_{破}, \quad (8)$$

$$E_{破}=3P_0^2(1-2\mu)/2E_m, \quad (9)$$

式中, ξ 为煤储层裂隙发育程度; E 为煤储层综合弹性能量; $E_{破}$为煤岩体破裂所需的能量; P_0 为围压; μ 为泊松比; E_m 为弹性模量.

ξ>1 时, 表示储层综合弹性能足以使煤岩破裂产生裂隙, 其值越大, 裂隙发育程度越高; ξ<1 时, 表示储层综合弹性能不能使煤岩破裂产生裂隙, 其值越小, 裂隙发育程度越低.

在晚侏罗世~早白垩世阶段, ξ 的高值区位于盆地南部郑庄-端氏-樊庄一带(图 6), 说明在此阶段由于成烃增压、盖层突破以及构造应力等作用, ξ>1 的地区, 煤岩容易破裂产生裂隙, 其值越大, 裂隙越密集, 储层的有效运移系统就越发育, 有利于煤层气藏高产; 在现今阶段, ξ 的高值区位于盆地中部丰宜-沁源-沁县-屯留一带(图 7), 其值比晚侏罗世至早白垩世阶段降低, 基本都小于 1, 这是因为在现今阶段煤层埋深较浅, 作用于储层的构造应力强度不大, 致使 ξ 值降低. 换言之, 现今阶段的储层综合弹性能不足

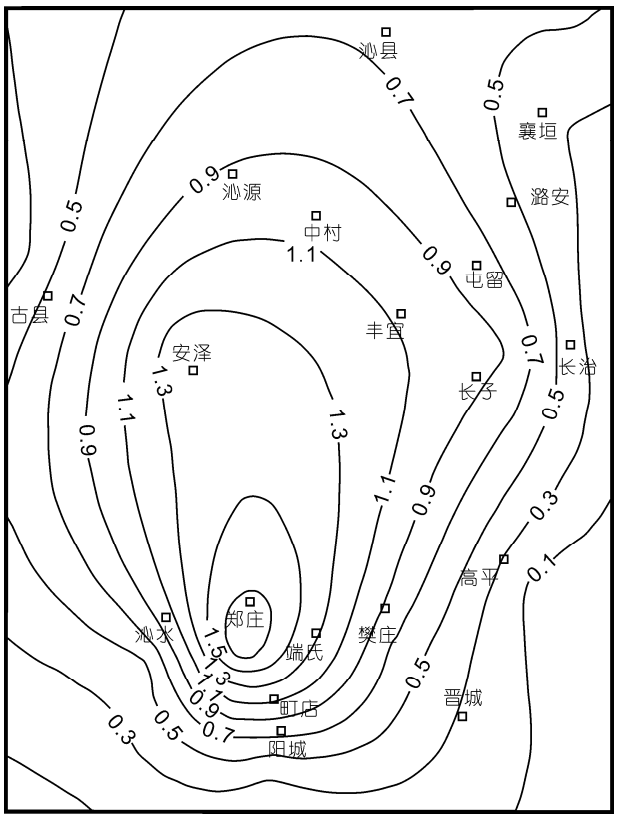

图 6　晚侏罗世-早白垩世 ξ 等值线图

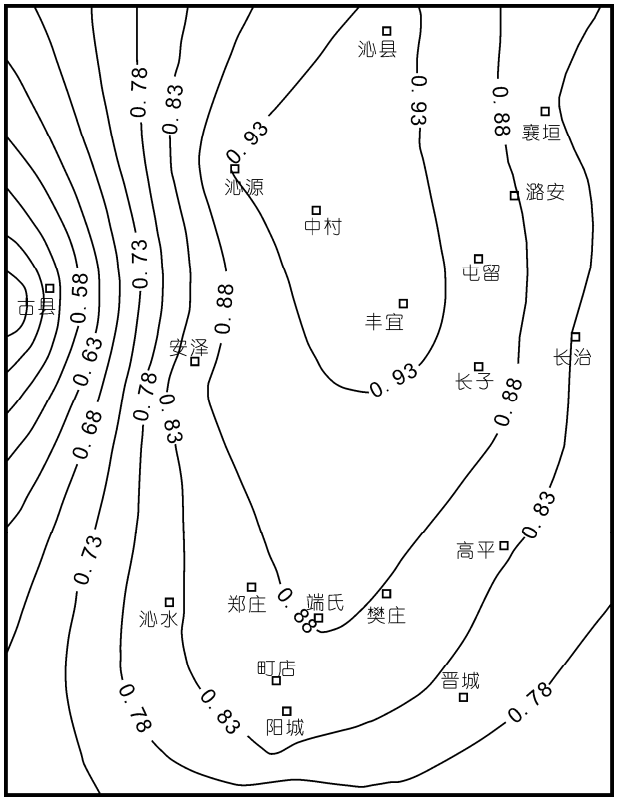

图 7　现今阶段 ξ 等值线图

以破裂煤体, 储层裂隙系统不可能得到进一步发展和完善.

4　结论

(1) 参数Δ表示煤储层裂隙开合程度, 与现代构造应力场、煤化程度以及现代埋深密切相关, 是煤基块弹性自调节综合效应的体现. Δ值越大, 裂隙开合程度越大, 储层渗透率的变化就会趋于增大. Δ>0, 说明煤基块自调节正效应占优势, 裂隙处于张开状态, 随着流体压力的降低, 渗透率将逐渐得到改善. 但是, 这种改变是有条件的, 当煤储层的 $R_{o,max}$ 超过2.8%时, 在埋深及构造应力产生的有效应力作用下, 无论流体压力怎么变化, 煤基块自调节综合效应始终是负值. 因此, 现今地层能量场是控制有效运移系统的关键因素之一.

(2) 参数 ξ 表示煤储层储层裂隙发育程度, 是储层综合弹性能量破碎煤岩能力的体现, 与古构造应力场密切相关. ξ>1, 说明储层综合弹性能可以突破煤岩束缚, ξ 越大, 储层综合弹性能破碎煤岩能力越高, 裂隙系统发育程度就越高, 有效运移系统越可能存在. 因此, 古地层能量场, 特别是关键时期的储层地层能量是控制有效运移系统的另一个关键因素.

(3) 以沁水盆地中南部为例, 现今阶段, ξ高值区(ξ>0.9)位于安泽、沁源一带, 郑庄、樊庄次之, 说明在这两个区域内, 煤储层裂隙发育程度较高; Δ低值位于盆地中部阳城-丰宜-中村一线, 区域内煤基块弹性自调节负效应占优势, 裂隙趋于闭合, 煤储层渗透率可能较低. Δ高值区位于郑庄、樊庄一带, 安泽、沁源次之, 区域内煤基块弹性自调节正效应占优势, 裂隙趋于张开, 煤储层可能具有较高的渗透率. 综合分析 ξ 和Δ可以发现, 二者的最佳匹配区域位于研究区郑庄、樊庄一带, 说明此区域内煤层裂隙相对较发育, 裂隙张开程度较高, 可能具有较高的流体压力和较好的渗透性, 有利于煤层气藏高产. 研究区正在进行的煤层气开发实践也证实了这一点.

致谢　审稿专家对本文进行了认真的审阅, 提出了宝贵的修改建议, 在此表示真诚的感谢.

参考文献

陈金刚. 2003. 高煤级煤储层渗透率的构造——排采控制规律与机理. 博士学位论文. 徐州: 中国矿业大学. 72–115
傅雪海. 2001. 多相介质煤岩体物性的物理模拟与数值模拟. 博士学位论文. 徐州: 中国矿业大学. 66–78
姜玮, 吴财芳. 2011. 织纳煤田煤储层弹性能及其对有利选区的控制作用. 煤炭学报, 36: 1474–1678
秦勇. 2003. 中国煤层气地质研究进展与述评. 高校地质学报, 9: 339–358
秦勇, 傅学海, 吴财芳, 等. 2005. 高煤级煤储层弹性自调节作用及其成藏效应. 科学通报, 50(增刊Ⅰ): 82–86
秦勇, 张德民, 傅学海, 等. 1999. 山西沁水盆地中、南部现代构造应力场与煤储层物性关系之探讨. 地质论评, 45: 576–583
吴财芳. 2004. 煤层气成藏能量动态平衡及其地质选择过程. 博士学位论文. 徐州: 中国矿业大学. 31–119
吴财芳, 秦勇. 2012. 煤储层弹性能及其控藏效应: 以沁水盆地为例. 地学前缘, 19: 248–255
吴财芳, 秦勇, 傅雪海. 2007. 煤储层弹性能及其对煤层气成藏的控制作用. 中国科学 D 辑: 地球科学, 37: 1163–1168

Abdullah M, Al Q, Saudi A. 2001. A new technique and field application for determining reservoir characteristics from well performance data. In: SPE Middle East Oil Show. Bahrain: Society of Petroleum Engineers. 68–77

Amyx J M, Bass D M, Whiting R. 1960. Petroleum Reservoir Engineering-physical Properties. New York: Mc-Graw-Hill Book Company. 8–97

Gash B H, Volz R F, Potler G, et al. 1993. The effect of cleat orientation and confining pressure on cleat porosity, permeability and relative permeability in coal. In: Proceedings of the 1993 International Coalbed Methane Symposium. 221–230

Geonge J D, Barakat M A. 2001. The change in effective stress associated with shrinkage from gas desorption in coal. Int J Coal Geol, 45: 105–113

Harpalani S, Shraufnagel R A. 1990. Shrinkage of coal matrix with release of gas and its impact on permeability of coal. Fuel, 69: 551–556

Puri R, Evanoff F C, Brugler M L. 1991. Measurement of coal cleat porosity and relative permeability characteristics. In: SPE Gas Technology Symposium. Texas: Society of Petroleum Engineers. 21–33