

文章编号:0253-9985(2012)04-0552-09

煤层气成藏条件及开采特征

赵庆波¹,孔祥文²,赵 奇³

(1. 中国石油 勘探开发研究院 廊坊分院,河北 廊坊 065007; 中国石油 勘探开发研究院,北京 100083;

3. 中国地质大学,北京 100083)

摘要:根据煤层气的存储状态及煤层所处的构造位置,将煤层气划分为自生自储吸附型、自生自储游离型和内生外储型3种成藏模式,不同成藏模式的富集高产机制不同。基于沁水盆地、鄂尔多斯盆地东缘、阜新及铁法盆地不同层位煤层气甲烷含量及甲烷碳同位素分布研究,煤层气成藏期可划分为早期成藏、后期构造改造成藏和开采中二次成藏3个时期,特别指出了开采中窜位和窜层引发二次成藏的条件。利用沉积相分析厚煤层的层内微旋回,细划分出优质煤层富含气段;进一步利用沉积相探索成煤母质类型及其对煤层气高产富集的控制作用,阐述了构造应力场及水动力对煤层气成藏的作用机理。最后,总结了煤层气的开采特征,指出煤层气井开采中包含阻碍、畅通和欠饱和3个开采阶段,欠饱和阶段可划分为多个阶梯状递减阶段;并认为由构造部位和层内非均质性的差异形成了自给型、外输型和输入型3类开采特征。

关键词:成煤母质;高产富集;成藏模式;开采特征;煤层气

中图分类号:TE132.2

文献标识码:A

Coalbed methane accumulation conditions and production characteristics

Zhao Qingbo¹, Kong Xiangwen² and Zhao Qi³

(1. Langfang Branch Department, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang, Hebei

065007, China; 2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China;

3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the occurrence status of coalbed methane and structure setting of coal beds, the accumulation models of coalbed methane are divided into three types: self-source and self-reservoir adsorbed gas, self-source and self-reservoir free gas, and inside-source outside-reservoir gas. Coalbed methane enrichment and production mechanisms vary with various accumulation models. According to methane content and $\delta^{13}\text{C}_1$ distribution in different coalbed methane accumulation in Qinshui Basin, eastern margin of Ordos Basin, Fuxin Basin and Tiefa Basin, three coalbed methane accumulation stages are indicated as early accumulation stage, late structural-reworking accumulation stage and secondary accumulation stage during production. The secondary accumulation is induced by inter-zone and inner-zone flow during production. Micro-cycles within thick coal beds are analyzed based on sedimentary facies and the coal bed intervals with high coalbed methane content are identified. Furthermore, the types of coal-forming parent materials and their control on coalbed methane enrichment and productivity are studied based on analysis of sedimentary facies. This paper also discusses tectonic stress field and hydrodynamic force influencing coalbed methane accumulation. Finally, this paper summarizes the production characteristics of coalbed methane. The production of methane well can be divided into three stages including blocked, unblocked, and unsaturated stages. The unsaturated stage is subdivided into several step-like declining stages. Structural positions and inner-layer heterogeneity result in three types of self-supporting, exporting and importing production characteristics.

收稿日期:2011-03-15;修订日期:2012-07-05。

第一作者简介:赵庆波(1950—),男,教授级高级工程师,煤层气勘探开发。

基金项目:国家科技重大专项(2008ZX05033);中国石油天然气集团公司重大专项(2009B0506)。

Key words: coal-forming source, high production and enrichment, accumulation model, production characteristics, coalbed methane

1 煤层气成藏条件

1.1 煤层气成藏模式和成藏期

1.1.1 煤层气成藏模式

煤层气成藏模式划分为3类:自生自储吸附型、自生自储游离型和内生外储型。

1) 自生自储吸附型

该成藏模式中煤层气大部分以吸附态存在于煤层中,于构造相对稳定的斜坡带富集^[1]。如沁水盆地南部潘庄水平井单井平均日产气 $3 \times 10^4 \text{ m}^3$;郑试60井3#煤埋深1 337 m,日产气 $2\,000 \text{ m}^3$ (图1)。

2) 自生自储游离型

该成藏模式中煤层吸附气与游离气多少是相对的,多为同源共生互动。煤层气一部分以游离态存在于煤层中,有的局部构造高点占主体,早期煤层埋藏深、生气量高,后期抬升、煤层变浅、压实弱,次生割理发育、渗透性好,两翼又是烃类供给指向区,在有利封盖层条件下于局部高点形成高渗透的高产富集区^[2-3]。准噶尔盆地彩南地区彩

504井,构造发育的断块高点煤层次生割理裂隙发育、物性好,游离气与吸附气同源共储,煤层深2 575 m,日产气 $6\,500 \text{ m}^3$ 。

3) 内生外储型

该成藏模式中煤层作为烃源岩,生成的气体向上部或围岩运移,在有利的圈闭条件下在砂岩和灰岩中形成游离气藏,使吸附气、游离气具有同源共生性、伴生性、转换性和叠置性,可在平面上叠加成大面积分布^[4]。鄂尔多斯盆地东缘韩城地区WL2-015井山西组煤层顶板砂岩厚14.1 m,压裂后井口压力为2.32 MPa,日产气 $2\,400 \text{ m}^3$ 。

1.1.2 煤层气成藏期

煤层气成藏期划分为3类:早期成藏、后期构造改造成藏和开采中二次成藏。

1) 早期成藏

随着沉积作用的进行,煤层埋深逐渐增加,大量气体持续生成。充分的生气环境,良好的运聚势能,足够的的吸附作用,有利的可封闭、高饱和、高渗透成藏条件,为早期成藏奠定了基础^[5]。这类气藏 $\delta^{13}\text{C}_1$ (甲烷碳同位素)相对重(表1),表现为原生气藏特征。

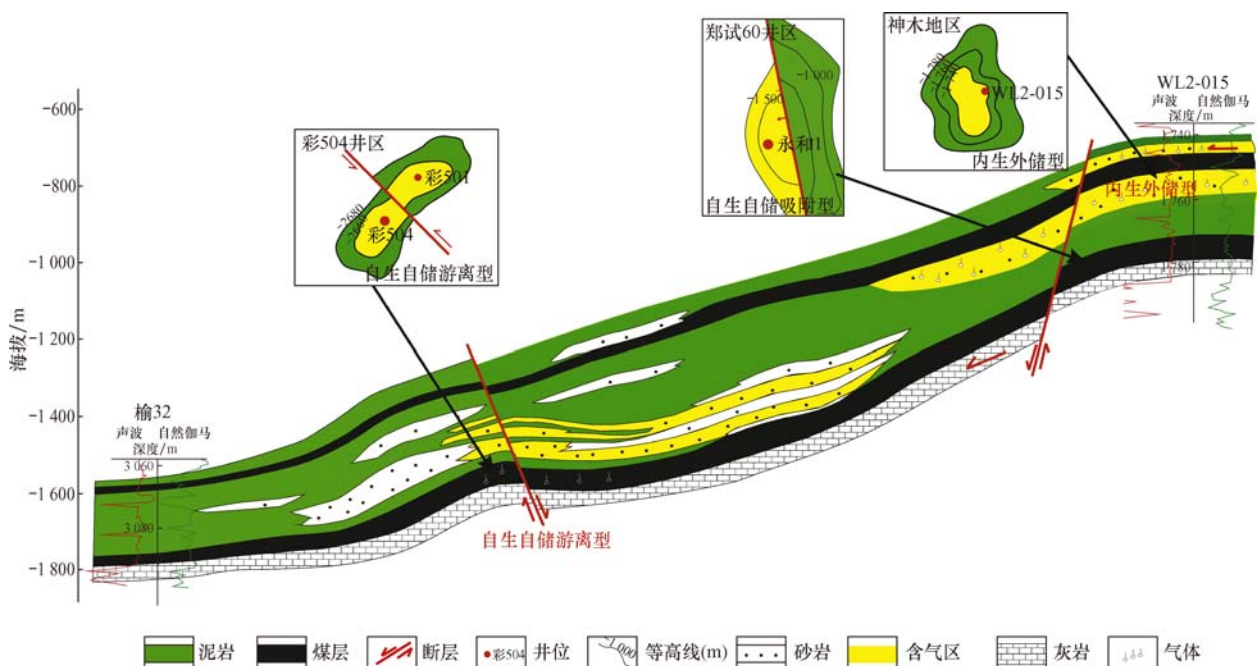


图1 煤层气成藏模式
Fig. 1 Coalbed methane accumulation model

表 1 不同类型气藏 CH₄ 含量及 δ¹³C₁ 分布

Table 1 CH₄ content and δ¹³C₁ distribution of different coalbed gas reservoirs

成藏类型	地区	井号	层位	CH ₄ 含量/%	δ ¹³ C ₁ /‰
早期成藏	吉县	吉试 5	P _{1s}	96.70	-31.20
	合阳	合试 2	P _{1s}	87.78	-32.70
	韩城	韩 14	P _{1s}	95.70	-32.20
	韩城	韩试 2		96.70	-31.80
构造改造后期成藏	保德	保 2	C _{2t}	83.80	-55.52
	昌吉	昌试 1	J _{1b}	88.49	-64.60
	沙尔湖	沙试 2	J _{2x}	50.92	-62.00
	临汾	吉试 12	C _{2t}	95.03	-56.30
开采中二次成藏	铁法	DT3	K	60.00	
	阜新	五龙	K	48.00	
	阳泉	五矿	P _{1s}	60.50	

注:P_{1s} 为下二叠统山西组;C_{2t} 为上石炭统太原组;J_{1b} 为下侏罗统八道湾组;J_{2x} 为中侏罗统西山窑组;K 为白垩系。

2) 后期成藏构造改造

系统的动态平衡一旦被构造断裂活动打破,即煤层气藏将被水打开,煤层割理被方解石脉充填,则能量将再调整、烃类再分配,古煤层气藏遭受破坏,新的高产富集区块开始形成(图 2)。

构造抬升后在局部出现断裂背斜构造,抬升使煤层压力降低,气体发生解吸,构造运动产生的裂隙又沟通了低部位的气体,使之向局部构造高点运移聚集。当盆地沉降接受沉积时,压力逐渐增大,再次生气,背斜翼部气体再吸附聚集。这类气藏多为次生型,δ¹³C₁ 相对轻(表 1)^[6]。

3) 开采中二次成藏

煤层气原始状态为吸附态,开采中压力降至临界点后打破原平衡状态转变为游离态,气、水将重新分配,解吸气窜层或窜位,从而形成煤层气开采中的二次成藏。这是常规油气不具备的条件。煤矿区这类气藏由于邻近采空区,CH₄ 含量较低。

a) 煤层气二次成藏中的窜位

窜位是指煤层气开采中气向高处或高渗区运

移,水向低部位运移,形成煤粉、气、水三相流,再开发几年进入残余态,微小孔隙、深部气大量产出。煤层气开采过程中,在同一地区,有些井高产,有些井低产,这与他们所处的构造部位有关。解吸气向构造顶部或高渗通道差异流向或“游离成藏”,煤层气发生窜位,使得高点气大、水少,甚至后期自喷,向斜水大、气少。如蒲池背斜煤层气的开发实例(图 3;表 2)。

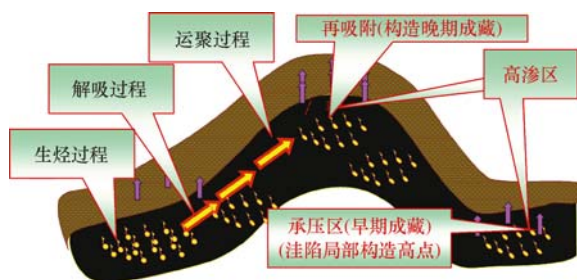


图 2 煤层气运聚成藏过程

Fig. 2 Process of coalbed methane migration and accumulation

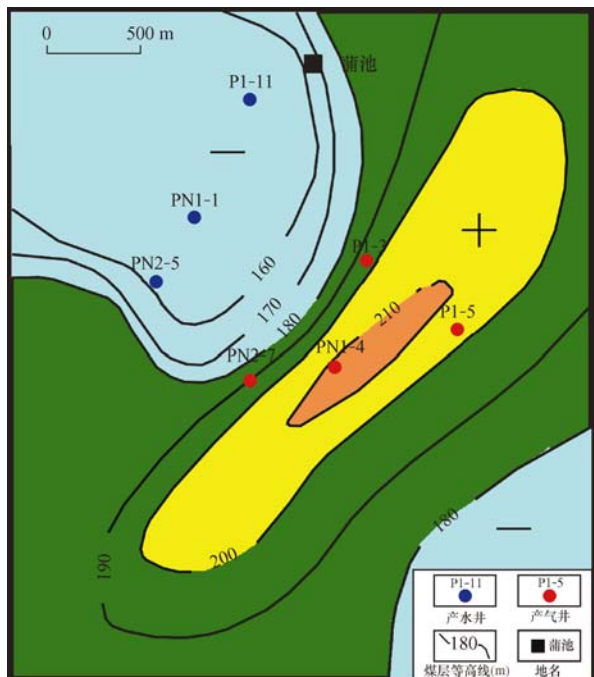


图 3 蒲池背斜煤层气开发特征

Fig. 3 Coalbed methane production profile of Puchi anticline

表2 蒲池背斜开发井开采情况

Table 2 Production well performance on Puchi anticline

井号	煤顶海拔/m	日产气*/m ³	日产水*/m ³	累计采气/(10 ⁴ m ³)	累计产水/m ³
PN1-4	210	2 208/2 091	0/0	323	440.5
P1-3	195	4 731/4 378	0.5/0	618	812.6
PN2-7	186	4 452/3 860	0.3/0	564	1 831
P1-5	204	2 933/2 353	0.2/0.3	412	926
P1-11	146	0/100	24/18	1.3	29 312
PN1-1	141	130/0	12/24	12.1	23 215
PN2-5	147	0/0	6.1/3.3	2.2	11 006
HP1-10	172	144/375	3.2/1.7	20.8	6 730.5
HP2-11-3	174	0/4	2.6/3.1	67.4	4 835.3

* 列中数据为4年前产量/目前产量。

该地区早期整体排水降压单相流,中期气、水、煤粉三相流,后期低部位降压、高部位自喷高产气井单相流,4年后基本保持现状。区块中477口直井和57口水平井已开采4年多,目前直井、水平井产气不产水的分别为29%和11%,产水不产气的分别为12%和19%。

b) 煤层气二次成藏中的窜层

窜层是指煤层气开采中或煤层采空区上部塌陷中解吸气沿断层裂隙或后期开发中形成的通道等向上再聚集到其他层位,主要有5种情况:①原断层早期是封闭的,压力下降到临界点后是开启的;②水平井穿透顶、底板和断层;③压裂压开顶、底板;④开采应力释放产生裂缝使解吸气穿透顶底、板进入砂岩、灰岩形成游离气;⑤煤层采空后顶板坍塌应力释放,底部出现裂隙带。

以下是窜层的几个典型实例分析。

① 阜新煤矿区开采应力释放导致二次成藏

阜新钻井7口,采空区坍塌后在煤层顶部砂岩裂隙带单井日产气 $(1.50 \sim 2.15) \times 10^4 \text{ m}^3$,CH₄含量大于50%。生产1年,单井累计产气折纯最高 $260 \times 10^4 \text{ m}^3$;阳泉年产气 $7.16 \times 10^8 \text{ m}^3$,90%是邻层抽采;铁法70%煤层气是采动区采出。

② 直井压裂窜层

蒲南3-8井压裂显示超低破裂压力,为9.6 MPa,比邻井低10 MPa以上,压开水层,初期日产水62 m³,4年后目前为54.8 m³,累计产气仅

有 $3.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

③ 水平井窜层

FZP03-1井煤层进尺4 084 m,钻遇率81%,主、分支共钻遇断层4条,明显钻入下部水层,开发效果差:最高间歇日产气1 366 m³,累计产气 $29 \times 10^4 \text{ m}^3$,累计产水 $4.3 \times 10^4 \text{ m}^3$,目前日产气392 m³,日产水28 m³;原水层的构造高点被解吸气占据。而比该井浅75 m的FZP03-3井日产气3 783 m³,日产水5 m³[7-8]。

在煤层气的勘探开发中应形成一次开发井网找煤层吸附气,二次开发井网找生产中由于开采中压力下降,烃类由吸附态变游离态使气、水重新分配,打破原始平衡状态,解吸气窜层或窜位形成二次成藏的游离气藏的勘探开发思路。

1.2 有利的成煤环境和煤层气高产富集旋回段

以往油气勘探上用沉积相分析砂体变化特征,通过对大量煤层进行粘土矿物分析、植物鉴定、测井特征分析,特别是全煤层取心观察,以及煤质和含气性分析认为:沉积环境对煤层气的生成、储集、保存和渗透性能的影响是通过控制储层物质组成来实现的,层内的非均质性和煤质的微旋回性受控于沉积环境,并控制层内含气性和渗透性的非均质变化[9]。

平面上,河间湾相煤层厚、煤质好、含气量高、单井产量高,河边高地和湖洼潟湖相相反(表3)。

表3 鄂东气田石炭系-二叠系不同煤岩相带煤质与产量数据

Table 3 Coal quality and production data of different coal facies in the Permo-Carboniferous in East Ordos gas field

沉积相	典型井	(煤层厚度/m)/(层数/层)	灰分/%	镜质组含量/%	含气量/(m ³ ·t ⁻¹)	日产气/m ³
河间湾	吉试1	20/2	6.1~9.7	80~84	21	2 847
河边高地	合1-1	3~5/2	27.7~28.1	50.1~60	2~5	50
湖洼沼泽	楼1	2~4/1	26.4~30.1	36.7	5~8	200

纵向上,受沉积环境影响,厚煤层往往形成夹矸、暗煤、亮煤几个沉积旋回,亮煤镜质组含量高、渗透率高、含气量高。不同的煤岩组分受成煤母质类型的控制。高等植物丰富、经凝胶化作用形成的亮煤灰分低、镜质组含量高、割理发育、含气量高;而碎屑物质、水溶解离子携入或草本成煤环境的暗煤则相反^[10]。

武试1井9#煤可划分为4个层内微旋回。灰分含量:暗煤14%~15%,亮煤3.7%~5.1%;镜质组含量:暗煤23%~49%,亮煤66%~79%。

1.3 构造应力场对煤层气成藏的控制作用

古应力场高值区断裂发育,水动力活跃,煤层矿化严重,含气量低;低值区则煤层割理发育,处于承压水封闭环境,煤层气保存条件好,含气量高^[11]。局部构造高点也往往是应力场相对低值区,并且煤层渗透率高、单井产量高,煤层气保存条件好,煤层没被水洗刷,含气量高^[12]。

1.4 热演化作用对煤层孔隙结构的控制作用

高煤阶以小于0.01 μm 的微孔和0.01~1 μm 的中孔为主,一般占80%以上,中、微孔是煤层气的主要吸附空间,靠次生割理、裂隙疏通运移;低煤阶以小于1 μm 大孔和中孔为主,演化程度低,裂隙不发育,大孔是吸附气、游离气的主要储集空间和扩散、渗流、产出通道;中煤阶以中、大孔为主,中、大孔是煤层气扩散、渗流通道^[13]。

在核磁测井中,煤层气藏储层的 T_2 (横向)弛豫时间谱为特征的双峰结构。与常规低渗透储层 T_2 弛豫时间谱相对照,煤层气储层的两个峰之间有明显的间隔,这说明对于煤层气储层,束缚水与可动流体并不能有效沟通^[14]。然而,不同煤阶煤储层 T_2 谱的结构不同,这源于不同的孔隙结构。低煤阶以大孔为主,高煤阶以微孔、小孔为主。高煤阶煤层曲线峰值左峰高、右峰低,峰值中间为零值;低煤阶煤层则相反。左峰为不可流动孔隙,右峰为可流动的次生割理裂隙储集体。高煤阶煤层曲线峰值右峰可流动峰值越高(割理发育),气井产量越高(图4)。

1.5 水动力场对煤层气藏的控制作用

局部构造高点滞留水区低产水、高产气,向斜

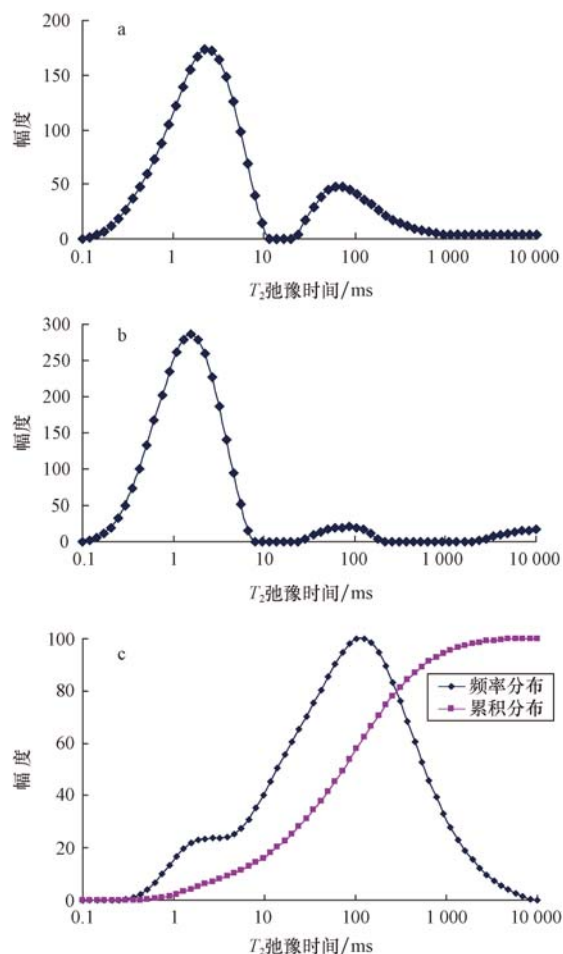


图4 不同煤阶煤储层 T_2 弛豫时间谱

Fig. 4 T_2 relaxation time spectrum of coal reservoir with different coal ranks

- a. 晋试7井3#(高煤阶),日产气3 583 m^3 ;
- b. 晋试11井3#煤(高煤阶),日产气1 185 m^3 ;
- c. 阜康区块(低煤阶),日产气2 000 m^3

承压区高产水。地下水一般在斜坡沟谷活跃,符合水往低处流、气向高处运移的机理。樊庄区块滞流-弱径流区域多为产量大于2 500 m^3/d 的高产井;东部地下水补给区含气量小于10 m^3/t ,含气饱和度为55%,见气慢,单井产量在200~500 m^3/d (图5)。

2 煤层气开采特征

对于中国中、低渗透性煤层,煤层气井一般为300 m $\times$ 300 m井距,单井产量稳产期4~6年,水平井更短,开采中划分为上升期、稳产期和递减期3个阶段,递减期又可划分为多个阶梯状递减阶段^[15-16]。

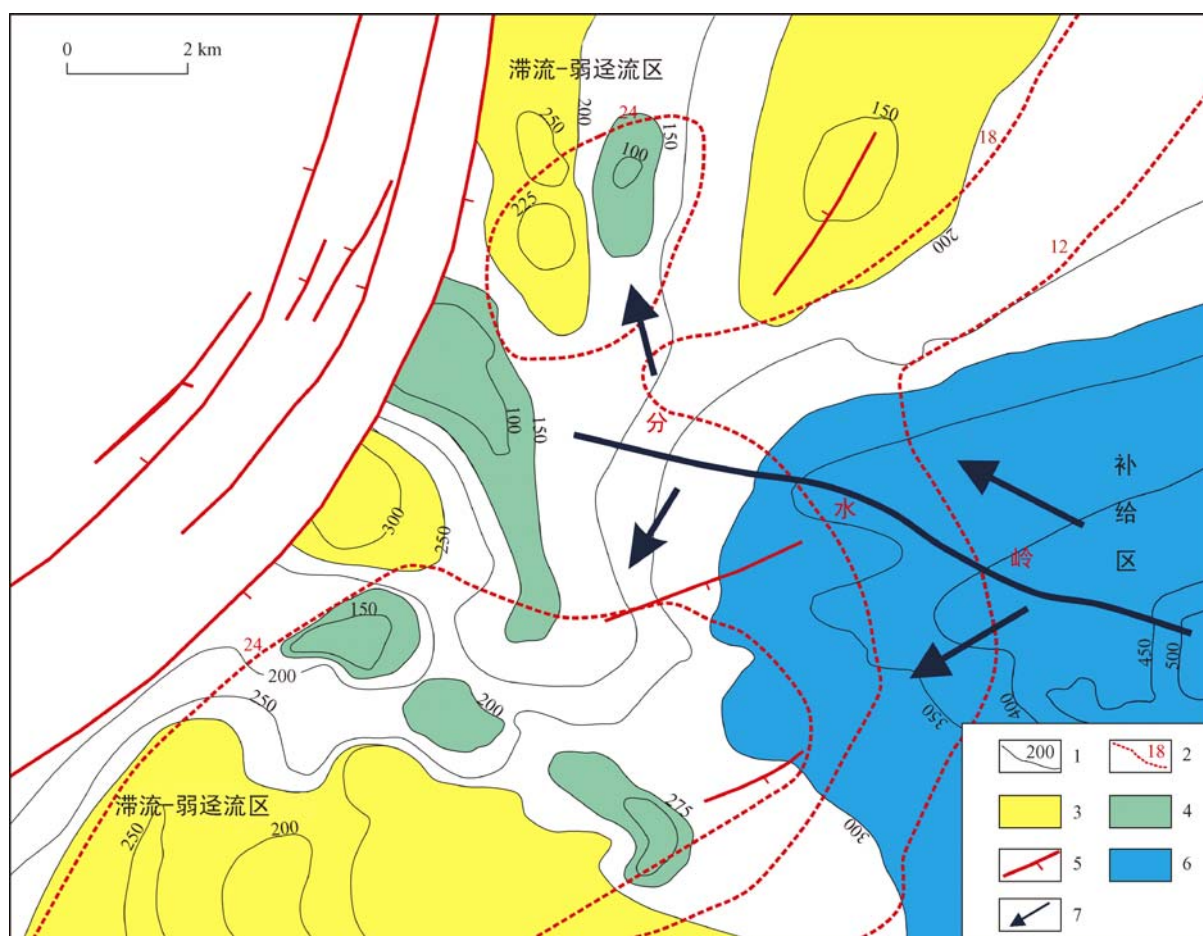


图5 樊庄区块地下水与含气量、煤层气高产区关系

Fig. 5 Relationship among groundwater, gas content and high production zones in Fanzhuang block

1. 煤层底板等高线(m); 2. 煤层含气量等值线(m^3/t); 3. 背斜; 4. 向斜; 5. 断层; 6. 补给区; 7. 水流动方向

2.1 构造部位和层内非均质性差异形成3类开采特征

2.1.1 自给型

该类开采往往位于构造平缓、均质性强的地区。气产量为本井降压半径之内解吸的气从本井产出。排采井一般处于构造平缓区,层内均质性强。日产气呈上升—稳产—递减3个阶段。这类井多低产(图6a)。

2.1.2 外输型

该类开采位于构造翼部、非均质性强的地区。气产量一部分通过本井降压解吸半径内从本井产出,而大部分通过高渗通道或沿上倾部位扩散到其他井内产出。排采井一般处于构造翼部、非均质性强地区。日产气从低产或不产—上升—缓慢递减。这类井多低产,并且产量递减快(图6b)。

蒲池背斜的P1-11, PN1-1, PN2-5, HP1-10和HP2-11-3井位于背斜的翼部,属于构造相对低部位,基本上没有气产出,而产水量较大,经分析是由于降压而解吸出来的气体向构造高部位运移而没有产出,具有输出型的开采特征。

2.1.3 输入型

该类开采多位于构造高点。初期本井降压解吸气随降压漏斗从本井产出,后期构造下倾部位解吸气又运移到本井产出。排采井处于构造高点。这类井一般高产,稳产期长。日产气从上升—稳产—上升—递减^[17](图6c)。

蒲池背斜中位于构造高点的PN1-4, P1-3, PN2-7和P1-5井产气量高而产水量低,这与低部位气体的扩散输入有关,具有典型的输入型开采特征。

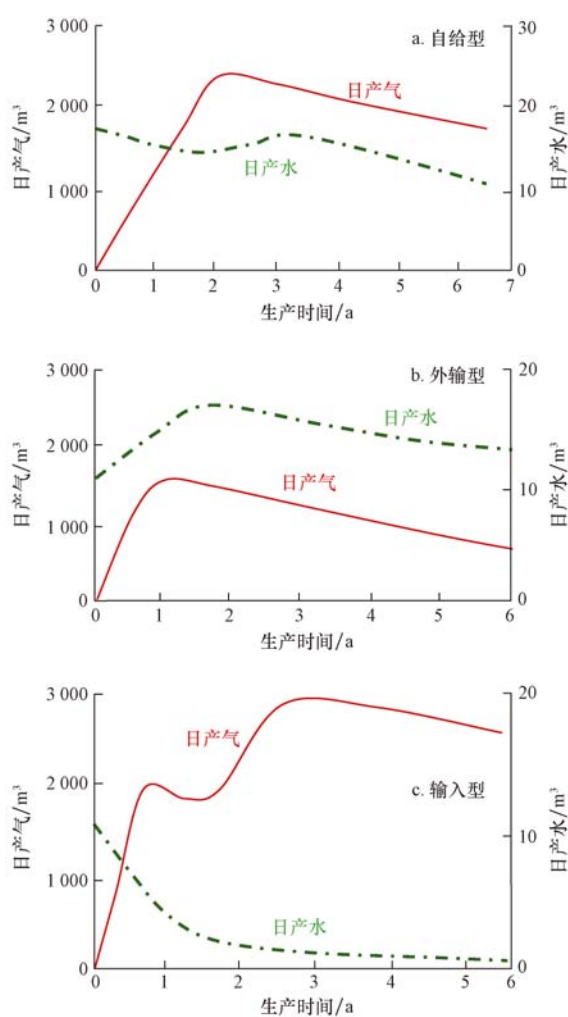


图6 煤层气单井开采特征

Fig. 6 Coalbed methane production characteristics of single wells

2.2 降压速率不同形成3类开采效果

2.2.1 畅通型解吸

该类解吸抽排液面控制合理,降压速率接近解吸速率,有效应力引起的负效应小于基质收缩引起的正效应,渗透率随开采的束缚水、气产出上升—稳定,气泡带出部分束缚水,产量理想(图7a)^[18]。以固X-1井为例,该井排采制度合理,经半年的排水降压后液面基本保持稳定,日产气稳定在4 320 m³以上,目前还保持稳产、高产。

2.2.2 超临界型解吸

该类解吸解吸速率小于降压速率,降压液面下降速度太快,煤层裂缝、割理产生应力闭合,日

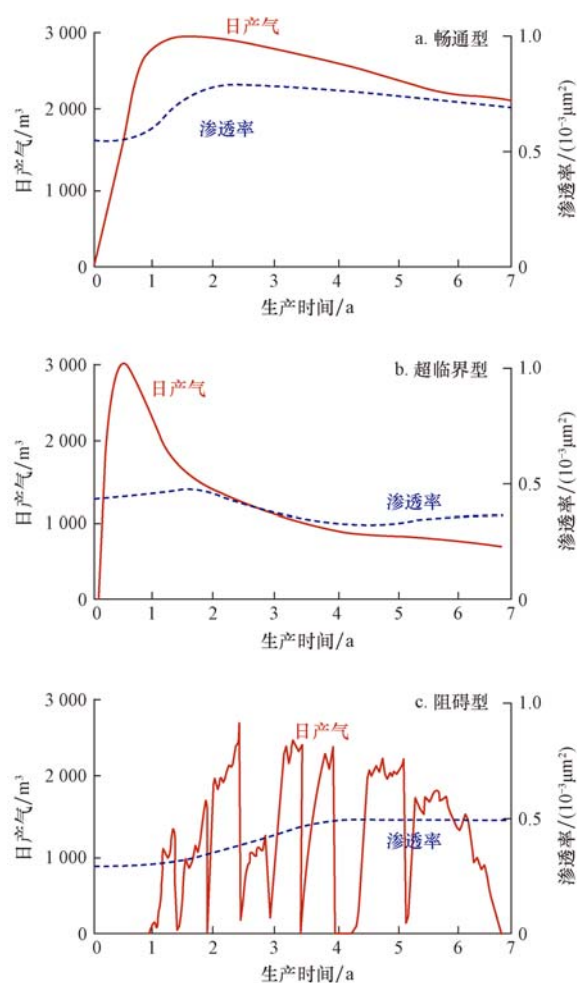


图7 不同排采制度煤层气井产气特征曲线

Fig. 7 Production curves of coalbed methane under different depletion conditions

产气急剧上升—急剧下降,渗透率下降—稳定,产气效果差(图7b)。以固Y-2井为例,该井经30余天的排水降压,液面降至煤层以下,由于抽排速度过快,前期产气效果差,2010年7月二次压裂及排采制度调整后,日产气量最高达4 000 m³,后期稳定在1 600 m³以上;PzP03井在产气高峰期日降液面63~87 m,造成该井初期曾是全国单井产量最高(10.5×10^4 m³)、而目前则是该区单井产量最低的井。

2.2.3 阻碍型解吸

该类解吸降压速率过慢,解吸速率大于降压速率,有效应力引起的负效应大于基质收缩的正效应,气泡变形解吸困难,降压早期受煤粉堵塞,因液面阻力作用解吸不畅通,日产气不稳定,开发效果差(图7c)。FzP03-3井开采770天关井26

次以上,开发效果很差。

2.3 煤层水类型及其开采特征

煤层水可划分为层内水、层间水和外源水。高产气区为层内水和层间水,有外源水区为低产气区^[19-20]。

2.3.1 层内水

层内水为煤层割理、裂隙中的水,日产水小,开采中、后期高部位几乎不产,低部位递减。层内水又可进一步划分为可动水(洞缝)、吸附水(煤粒面)、湿存水($<10^{-5}$ cm 毛管内)和结晶水(碳酸钙)4类。

2.3.2 层间水

层间水为薄夹层水渗入煤层而成,开采中产水量明显递减,可控制。

有层间水的气井连续降压可控制水产量、提高开发效果。沁水樊庄 FzP11-1 井煤层总进尺 4 710 m。2009 年 4 月投产,最高日产水 175 m³,目前日产气 21 436 m³,日产水 20.7 m³,套压 0.15 MPa,液面 4 m,累计产水 3.7×10^4 m³,累计采气 814×10^4 m³。可以看出,对有层间水进入煤层气井的情况,短期加大排水量,后期日产气持续上升,开发效果较好。

2.3.3 外源水

外源水为断层或裂缝沟通高渗奥陶系灰岩水层及其他水层而成,产水大、难控制。

3 结论

1) 根据中国煤层气勘探开发实践认识,将煤层气成藏模式划分为自生自储吸附型、自生自储游离型和内生外储型 3 类。同时认为,煤层气成藏期划分早期成藏、后期构造改造成藏和开采中二次成藏 3 类。开采中二次成藏将是煤层气开发二次并网的主要产量接替领域。

2) 利用沉积相分析厚煤层、优质煤层和高产富集区,分析厚煤层的层内微旋回。成煤母质控制煤岩组分和单井产量。高等植物丰富、经凝胶化作用形成的亮煤,灰分低、镜质组含量高、割理发育、含气量高,是高产富集段;碎屑物质、水溶解

离子携入或草本成煤环境的暗煤则相反。

3) 古应力场低值区煤层割理发育,处于承压水封闭环境,煤层气保存条件好,含气量高;滞留水区低产水、高产气,向斜承压区高产水。

4) 由构造部位和层内非均质性的差异形成自给型、外输型和输入型 3 类开采特征。由降压速率不同形成畅通型、阻碍型和超临界型 3 类开采效果。

致谢:本文得到了华北油田研究院、长庆油田研究院、中国煤炭地质总局地球物理勘探研究院、辽宁宏地勘煤层气公司、铁法能源有限公司等科研院所和公司的大力支持和帮助,在此谨向他们表示感谢!

参 考 文 献

- [1] 赵庆波,李贵中,孙粉锦,等.煤层气地质选区评价理论与勘探技术[M].北京:石油工业出版社,2009:5-14.
Zhao Qingbo, Li Guizhong, Sun Fenjin, et al. Geologic zoning evaluation theory and exploration technology of coalbed methane [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 5-14.
- [2] 赵庆波,陈刚,李贵中.中国煤层气富集高产规律、开采特点及勘探开发适用技术[J].天然气工业,2009,29(9):13-19.
Zhao Qingbo, Chen Gang, Li Guizhong. The regular patterns of highly-produced CBM, its production performance and the progress of prospecting technologies in China [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(9): 13-19.
- [3] 孔祥文,赵庆波,孙粉锦,等.煤层气高产富集规律及开采特征新进展[J].天然气地球科学,2011,22(4):738-746.
Kong Xiangwen, Zhao Qingbo, Sun Fenjin, et al. Recent advances of productive & enriching patterns and production characteristics of coalbed methane in China [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(4): 738-746.
- [4] 桑树勋,范炳恒,秦勇,等.煤层气的封存与富集条件[J].石油与天然气地质,1999,20(2):104-107.
Sang Shuxun, Fan Bingheng, Qin Yong, et al. Conditions of sealing and accumulation in coalbed gas [J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(2): 104-107.
- [5] 孙万禄,陈召佑,陈霞,等.中国煤层气盆地地质特征与资源前景[J].石油与天然气地质,2005,26(2):141-146.
Sun Wanlu, Chen Zhaoyou, Chen Xia, et al. Geological features and resource potentials of coalbed methane basins in China [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(2): 141-146.
- [6] 胡国艺,刘顺生,李景明,等.沁水盆地晋城地区煤层气成因[J].石油与天然气地质,2001,22(4):319-321.
Hu Guoyi, Liu Shunsheng, Li Jingming, et al. Origin of coal-bed gases in Jincheng area of Qinshui Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(4): 319-321.

- [7] 鲜保安,高德利,李安启,等.煤层气定向羽状水平井开采机理与应用分析[J].天然气工业,2005,25(1):114-117.
Xian Bao'an, Gao Deli, Li Anqi, et al. Analysis on exploration mechanism and application of coal-bed gas with directional pinate horizontal wells[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(1): 114-117.
- [8] 乔磊,申瑞臣,黄洪春,等.煤层气多分支水平井钻井工艺研究[J].石油学报,2007,28(3):112-115.
Qiao Lei, Shen Ruichen, Huang Hongchun, et al. Drilling technology of multi-branch horizontal well[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(3): 112-115.
- [9] 魏永佩,王毅.鄂尔多斯盆地多种能源矿产富集规律的比较[J].石油与天然气地质,2004,25(4):385-392.
Wei Yongpei, Wang Yi. Comparison of enrichment patterns of various energy resources in Ordos basin[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(4): 385-392.
- [10] Diessel C F K. Coal-bearing depositional systems-coal facies and depositional environments[J]. New York: Springer-Verlag, 1992: 19-22.
- [11] 陈刚,赵庆波,李五忠,等.大宁-吉县地区地应力场对高渗区的控制[J].中国煤层气,2009,6(3):15-20.
Chen Gang, Zhao Qingbo, Li Wuzhong, et al. Control of high permeability zone by ground stress field in Daning-Jixian area[J]. China Coalbed Methane, 2009, 6(3): 15-20.
- [12] 姚艳斌,刘大锰,汤达祯,等.沁水盆地煤储层微裂隙发育的煤岩学控制机理[J].中国矿业大学学报,2010,39(1):6-13.
Yao Yanbin, Liu Dameng, Tang Dazhen, et al. Influence and control of coal petrological composition on the development of microfracture of coal reservoir in the Qinshui Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(1): 6-13.
- [13] 陈振宏,贾承造,宋岩,等.构造抬升对高、低煤阶煤层气藏储集层物性的影响[J].石油勘探与开发,2007,34(4):461-464.
Chen Zhenhong, Jia Chengzao, Song Yan, et al. Effects of tectonic uplift on physical properties of high and low rank coal reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4): 461-464.
- [14] Zhang Songhang, Tang Shuheng, Tang Dazhen, et al. The characteristics of coal reservoir pores and coal facies in Liulin district, Hedong coal field of China[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 81: 117-127.
- [15] 邓泽,康永尚,刘洪林,等.开发过程中煤储层渗透率动态变化特征[J].煤炭学报,2009,34(7):947-951.
Deng Ze, Kang Yongshang, Liu Honglin, et al. Dynamic variation character of coal bed methane reservoir permeability during depletion[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(7): 947-951.
- [16] 龙胜祥,陈纯芳,李辛子,等.中国石化煤层气资源发展前景[J].石油与天然气地质,2011,31(3):481-488.
Long Shengxiang, Chen Chunfang, Li Xinzi, et al. SINOPEC's coal-bed methane development potential[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 31(3): 481-488.
- [17] 李金海,苏现波,林晓英,等.煤层气井排采速率与产能的关系[J].煤炭学报,2009,34(3):376-380.
Li Jinhai, Su Xianbo, Lin Xiaoying, et al. Relationship between discharge rate and productivity of coalbed methane well[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(3): 376-380.
- [18] 杜志敏,付玉,伍勇.低渗透煤层气产能影响因素评价[J].石油与天然气地质,2007,28(4):516-519.
Du Zhimin, Fu Yu, Wu Yong. Evaluation of factors affecting productivity of low-permeability coalbed methane reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(4): 516-519.
- [19] 康永尚,邓泽,刘洪林.我国煤层气井排采工作制度探讨[J].天然气地球科学,2008,19(3):423-426.
Kang Yongshang, Deng Ze, Liu Honglin. Discussion about the CBM well draining technology[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(3): 423-426.
- [20] 陈振宏,王一兵,杨焦生,等.影响煤层气井产量的关键因素分析——以沁水盆地南部樊庄区块为例[J].石油学报,2009,30(3):409-412.
Chen Zhenhong, Wang Yibing, Yang Jiaosheng, et al. Influencing factors on coal-bed methane production of single well: a case of Fanzhuang Block in the south part of Qinshui Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(3): 409-412.

(编辑 李 军)