

沁水盆地成庄区块煤层气成藏优势及富集 高产主控地质因素

王 勃¹,姚红星²,王红娜³,赵 洋^{4,5},李梦溪²,胡秋嘉²,樊梅荣²,杨春莉²

(1. 国家安全生产监督管理总局 信息研究院,北京,100029; 2. 中国石油 华北油田分公司,河北 任丘 062550;

3. 中国石油 东方地球物理勘探有限责任公司,河北 涿州,072750; 4. 中国矿业大学,江苏 徐州,221116;

5. 中国石油集团 科学技术研究院有限公司,河北 廊坊 065007)

摘要:成庄区块是沁水盆地煤层气开发最为成功的区块之一。为了指导相似地质条件的煤层气区块的勘探开发,基于大量的勘探开发实践数据,利用数理统计、室内实验、测井解释、构造解析、数值模拟及递减分析等方法,系统开展了该区块煤层气成因、成藏条件及产气规律等方面的研究。研究表明:该区具备构造简单、煤层展布稳定、埋藏深度浅、有机热成因气、含气量高、渗透率高等优越的成藏条件;该区高产井比例高(占总井数47%),具有单井平均产量高(介于4 000~7 000 m³/d)、采收率高(预计采收率为55.1%)等产气特征。进一步分析了富集、高产主控因素的控气作用机理,结果认为:构造热事件提高生气能力,改善了物性,封盖条件与水动力优势配置,利于煤层气富集;张性水平应力分布区及煤矿卸压应力释放区的煤储层渗透率高,利于储层高产。

关键词:采收率;煤层气;成庄区块;沁水盆地

中图分类号:TE122.3 **文献标识码:**A

Favorable and major geological controlling factors for coalbed methane accumulation and high production in the Chengzhuang Block, Qinshui Basin

Wang Bo¹, Yao Hongxing², Wang Hongna³, Zhao Yang^{4,5}, Li Mengxi², Hu Qiuji², Fan Meirong², Yang Chunli²

(1. National Institute for Occupational Safety, Beijing 100029, China; 2. Huabei Oilfield Company, PetroChina, Renqiu, Hebei 062550, China;

3. Bureau of Geophysics Prospecting Inc., PetroChina, Zhuozhou, Hebei 072750, China;

4. China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

5. Science and Technology Research Institute Ltd., PetroChina, Langfang, Hebei 065007, China)

Abstract: As one of the most successful blocks of coalbed methane (CBM) development in Qinshui Basin, the exploration and development in Chengzhuang coal block can provide useful guidance for the development of other CBM blocks with geologically similar backgrounds. In combination of plenty of practical data on exploration and development and methods such as mathematical statistics, laboratory experiment, wire line logging interpretation, structure analysis, numerical modeling, decline analysis, we analyzed the genetic mechanism, accumulation conditions of CBM, and patterns of gas production, in the Chengzhuang Block. The study indicates that: (1) the Chengzhuang Block is characterized by favorable accumulation conditions with its simple structure, extensive reservoir distribution, shallow burial depth of coal reservoir, organic thermogenic gas, high gas content and high permeability; (2) the high productivity wells account for 47% of the total wells of the block, with high average production of 4 000~7 000 m³/d per well and high expected recovery of 55.1%. Furthermore, we analyzed the controlling mechanisms for CBM gas accumulation and high production, and concluded that (1) the tectonic thermal events would boost gas generation, reservoir quality, seal-capping capacity and optimal distribution of hydrodynamic force, which would be beneficial for CBM accumulation; (2) the coal reservoirs with horizontal extensional stress and in the coal mine pressure relief zone are of high permeability, favorable for CBM production.

Key words: recovery, CBM, Chengzhuang Block, Qinshui Basin

收稿日期:2017-07-04;修订日期:2017-12-18。

第一作者简介:王勃(1979—),男,博士、高级工程师,煤层气勘探开发。E-mail: wangbo1230038@163.com。

成庄区块位于沁水盆地东南部,含气面积为 33 km^2 ,煤层气资源量为 $80 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。该区块自 2010 年投入开发,开发层位为山西组 3[#]煤层,累计钻开发直井 80 余口,水平井 2 口,无论是直井还是水平井,均见工业气流,目前日产气量约为 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。直井平均单井日产气约为 $3\ 000 \text{ m}^3$,2 口水平井日产气超过 $10\ 000 \text{ m}^3$ 。成为中国高煤阶煤层气勘探开发成效最好的区块之一。同时,前人针对沁水盆地开展了卓有成效的研究,普遍性的观点认为含气量与渗透率的耦合作用控制着煤层气的富集高产^[1];含气量受气源、构造、水动力及顶底板条件控制,渗透率受地应力控制^[2-9]。在以上研究的基础上,基于“煤层气富集不一定高产,高产区一定位于富集区”这一辩证观点^[10];孔渗性变好主要原因在于:岩浆活动的高温环境,一方面导致煤层微观、宏观孔隙的数量增多,另一方面煤层生气量大,存在于煤基质中的游离气产生向外突破的压力,促进了裂隙的形成^[11-13]。本文以前人研究为基础,利用物理模拟实验、数值模拟及大量生产实践数据,探讨了成庄区块煤层气富集、高产主控因素的控气作用机理,揭示该区富集、高产主控因素控气的特殊性,以期指导相似地质条件区块的优选及下步开发。

1 煤层气成藏优势

1.1 煤层气以有机热成因为主,含气量高

煤层气组分及同位素测试结果表明(表 1),成庄

表 1 成庄区块煤层气组分及同位素测试结果
Table 1 CBM composition and isotope test results of the Chengzhuang Block

井号	天然气组分相对含量/%			甲烷同位素/%	
	N ₂	CO ₂	CH ₄	δ ¹³ C	δD
X-1	2.56	1.01	96.35	-29.8	-171
X-2	20.71	0.78	78.47	-29.8	-171
X-3	11.84	1.26	86.88	-30.4	-173
X-4	15.65	1.68	82.60	-29.6	-170
X-5	4.76	0.22	94.94	-31.4	-178
X-6	73.16	3.46	23.34	-29.4	-173
X-7	16.59	0.70	82.67	-32.7	-183
X-8	6.62	0.42	92.92	-30.1	-176
X-9	16.44	0.85	82.69	-33.0	-180
X-10	5.19	0.68	94.10	-32.8	-181
X-11	36.48	3.77	59.71	-33.7	-180
X-12	8.64	0.56	90.78	-29.1	-164
X-13	15.36	0.52	84.08	-35.6	-183
X-14	4.18	0.82	94.95	-33.3	-183

区块煤层气以烃类气体为主,其中甲烷体积分数最高,为 23.34%~96.35%;非烃含量主要为 N₂ 和 CO₂,其中 N₂ 体积分数在 2.56%~73.16%,CO₂ 体积分数在 0.22%~3.77%;重烃体积分数低,为 0~0.04%,为典型的干气。

实验室实测数据表明,甲烷碳同位素值(δ¹³C)介于 -35.6‰~-29.1‰,集中在 -33‰~-29‰;甲烷氢同位素(δD)介于 -183‰~-164‰,集中在 -180‰~-170‰(表 1)。根据 W. J. Whiticar 等^[14-15]提出的利用甲烷碳、氢同位素值鉴别不同类型生物气的图版,该区块煤层气成因为有机热成因气。

现今的煤层含气量分布来看,3[#]煤层含气量介于 9.61~27.42 m³/t,平均为 19.82 m³/t,含气量呈现中部高、西部及东部低的特点。

1.2 煤层构造简单,单层厚度大,展布稳定

成庄区块位于沁水盆地东南部晋城斜坡带,与相邻的郑庄、樊庄区块比较,构造简单,总体呈东高西低的单斜构造,地层倾角平均为 5.13°~5.62°,中部发育宽缓向斜,断层不发育,适合于规模开发。

该区煤层展布具有华北地区高煤阶煤储层展布的典型特点,即“煤层单层厚度大、横向分布稳定”。该区 3[#]和 15[#]煤层全区分布稳定,煤层厚度分别介于 5.0~6.0 m 和 3.0~4.0 m,为煤层气勘探开发的有利储层。

1.3 煤层埋深浅,孔渗性好,裂隙系统发育,且连通性好,利于煤层气的产出

成庄区块 3[#]和 15[#]煤层埋深较浅,总体小于 700 m,受区域构造和地形地貌的综合控制,埋深呈现出“中部深、东西部浅”的分布规律。以 3[#]煤层为例,其埋深分布为 240~610 m,平均为 440 m;中部相对较深,为 500~610 m,西部和东部埋深较浅,为 240~500 m。

煤层气作为非常规油气资源之一,具有与页岩、致密砂岩等储层致密低渗的共性^[16-18]。通过试井渗透率与埋深相关性分析发现,埋深 300 m 以浅的区域渗透率可达 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上,300~500 m 的区块渗透率约为 $(1 \sim 2) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,埋深 500 m 以深的区块渗透率约为 $(0.6 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[19]。

实验室测试、现场试井解释及岩心描述数据统计分析表明,该区 3[#]煤层孔隙度介于 4.07%~6.66%,平均为 5.80%,渗透率介于 $(0.61 \sim 6.31) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $2.67 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,渗透率较高(表 2)。主裂缝密度介于 1.8~15.4 条/cm,次裂隙密度介于 2.5~10.6 条/cm,表明煤层裂隙系统发育,且连通性好。

表 2 成庄区块煤储层孔渗测试成果

Table 2 The porosity and permeability test results of the Chengzhuang Block

样品号	孔隙度/%	试井渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	主裂隙密度/ (条· cm^{-1})	次裂隙密度/ (条· cm^{-1})
C-1	5.26	1.79	3.0~6.4	4.2~5.8
C-2	6.66	6.31	6.2~15.4	7.8~10.6
C-3	6.33	5.13	2.6~12.6	5.6~8.3
C-4	6.54	4.68	2.2~7.4	4.7~8.6
C-5	4.37	0.85	3.4~5.0	4.4~7.7
C-6	5.21	1.71	8.0~11.6	8.3~10.1
C-7	4.29	0.77	2.2~6.6	5.3~7.2
C-8	5.97	2.14	7.6~9.0	6.3~7.9
C-9	4.07	0.61	1.8~4.5	2.5~5.7

综合分析表明,成庄区块平均渗透率可达 $1.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,同时裂隙系统发育较好,利于煤层气的产出。

1.4 直接顶底板泥岩发育,利于煤层气保存

成庄区块 3[#]煤层之上发育稳定、连续的区域性泥岩盖层,厚度为 20~40 m,封盖能力强^[20-23]。3[#]煤层直接顶底板以灰黑色、深灰色泥岩和碳质泥岩为主,局部为粉-细砂岩,厚度为 2.10~18.80 m,直接顶底板含水性差,为良好的封盖层^[24-25],利于煤层气保存(表 3)。

表 3 3[#]煤层顶底板岩性及含气量统计

Table 3 The roof and floor lithology and gas content of 3[#] coal reservoir, Chengzhuang Block

井号	层位	岩性	视厚度/m	封盖性	含水性	含气量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)
Y-1	顶板	泥岩、砂质泥岩	18.80	强	差	27.1
	底板	泥岩、砂质泥岩	9.50	强	差	
Y-2	顶板	泥岩	5.22	强	差	20.1
	底板	砂质泥岩	11.72	强	差	
Y-3	顶板	泥岩	2.30	强	差	20.5
	底板	泥岩	1.60	强	差	
Y-4	顶板	泥岩、致密砂岩	10.20	强	差	25.8
	底板	泥岩、致密砂岩	5.50	强	差	
Y-5	顶板	泥岩	5.40	强	差	22.0
	底板	泥岩	1.70	强	差	
Y-6	顶板	泥岩	9.25	强	差	25.6
	底板	砂质泥岩	1.00	强	差	
Y-7	顶板	泥岩	2.10	强	差	21.7
	底板	泥岩	0.75	强	差	
C-2	顶板	砂质泥岩	0.68	较强	差	17.6
	底板	砂质泥岩	1.05	较强	差	
C-3	顶板	泥质砂岩	0.97	弱	差	11.3
	底板	泥质砂岩	0.88	弱	差	

2 煤层产气特征

为了查明该区高产主控因素,首先需分析该区的煤层产气特征。鉴于成庄区块煤层气开发方式以直井为主,本文着重讨论该区块煤层气直井的产气特征。通过对 80 余口煤层气井生产数据的统计分析,将煤层气井分为高产井(平均日产气量 $>3\,000 \text{ m}^3$)、中产井($1\,500 \sim 3\,000 \text{ m}^3$)、低产井($<1\,500 \text{ m}^3$)等 3 种类型,其中高、中、低产气井分别占 47%,29% 及 24%。

2.1 高产气井生产特征

高产气井的生产特征为:见气早,平均见气时间 53 d;达产时间短,平均 700 d 以内可达到产量峰值,峰值产量高,介于 $4\,000 \sim 15\,000 \text{ m}^3/\text{d}$,平均为 $9\,000 \text{ m}^3/\text{d}$;之后稳产,气量平均可达 $3\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上,气量平均值介于 $4\,000 \sim 7\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 的井占高产井总井数的 90%,稳产时间较短,一般在 1~2 a 左右;之后出现递减,年递减率约 14%。整体上采收率高,平均为 44%,预计最终采收率可达 71%。以 C-7 井为例,该井 2009 年 12 月投产,49 d 后见气,160 d 产量达到 $2\,000 \text{ m}^3/\text{d}$,产量峰值 $8\,691 \text{ m}^3/\text{d}$,之后产量稳定在 $7\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右,稳产 550 d 之后开始递减(图 1a),年递减率为 13.4%,累产气 $12.56 \times 10^6 \text{ m}^3$,采出程度高,达到 49.4%,预计该井的最终采收率为 75%(图 2)。

2.2 中产气井生产特征

中产气井与高产气井生产特征的差异性为:达产时间较长,达到产量峰值的时间平均为 860 d;峰值产气量较低,多介于 $2\,000 \sim 4\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右;稳产时间较长,可达 3~4 a,稳产气量介于 $1\,500 \sim 3\,000 \text{ m}^3/\text{d}$;采收率较低,目前平均为 20%,预计最终采收率可达 42%。以 C-2 井为例,该井于 2009 年 11 月投产,2d 后见气,722 d 达到产量高峰 $2\,210 \text{ m}^3/\text{d}$,之后进入稳产阶段,产量稳定在 $1\,700 \sim 1\,900 \text{ m}^3/\text{d}$,稳产 900 d 之后开始缓慢递减(图 1b),目前累产气达到 $1.95 \times 10^6 \text{ m}^3$,采出程度达到 13.6%,预计最终采收率为 44.2%(图 2)。

2.3 低产气井生产特征

低产气井的显著特征为:早期产气量上升到峰值后下降到某一产量,峰值产量低,介于 $1\,500 \sim 3\,500 \text{ m}^3/\text{d}$;

之后长期处于低水平稳产,稳产气量平均为 $1\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$ 左右,一般稳产时间在 4 a 以上,目前未出现递减;达产率较低,占 36%,采收率低,目前平均 12%,预计最终采收率可达 27%。以 C-3 井为例,该井 2010 年 1 月投产,56 d 后见气,120 d 达到峰值产量 $3\ 200\ \text{m}^3/\text{d}$,之后产量下降并稳定在 $950\ \text{m}^3/\text{d}$ (图 1c),已持续 4.5 a,并具有长期低产稳产趋势,目前累产气达到 $1.79 \times 10^6\ \text{m}^3$,采出程度达到 12.5%,预计最终采收率为 29.3%(图 2)。

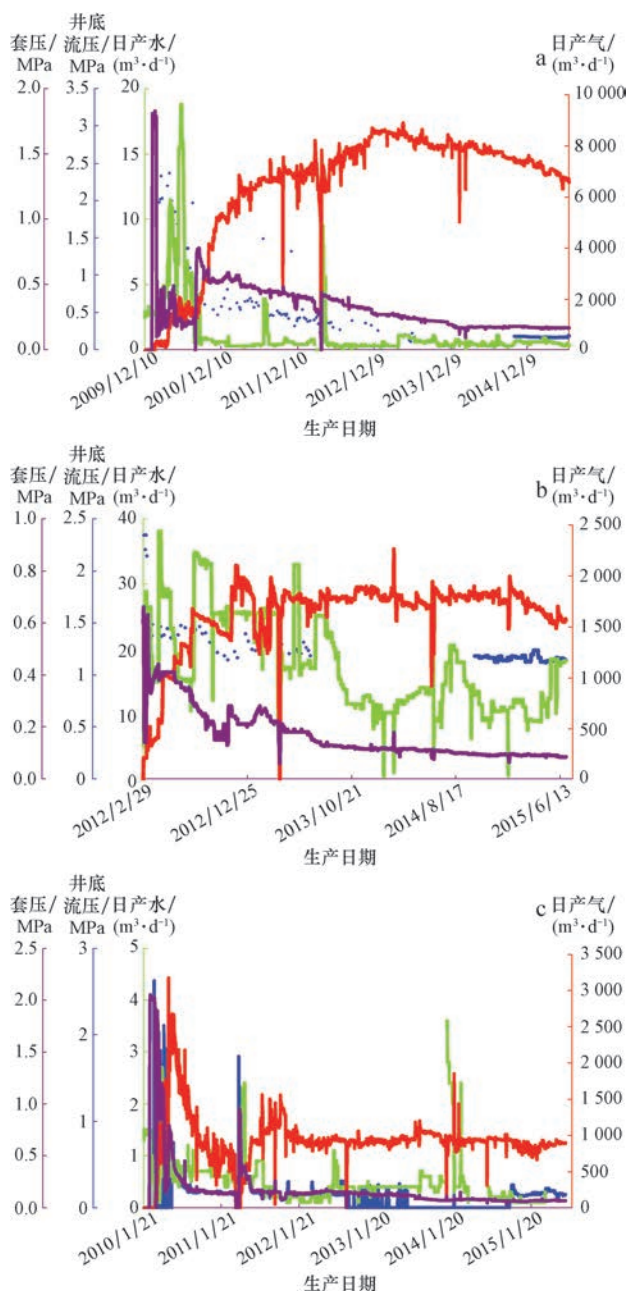


图1 成庄区典型井排采曲线

Fig. 1 Draining and production curve for typical wells in the Chengzhuang Block
a. C-7 井; b. C-2 井; c. C-3 井

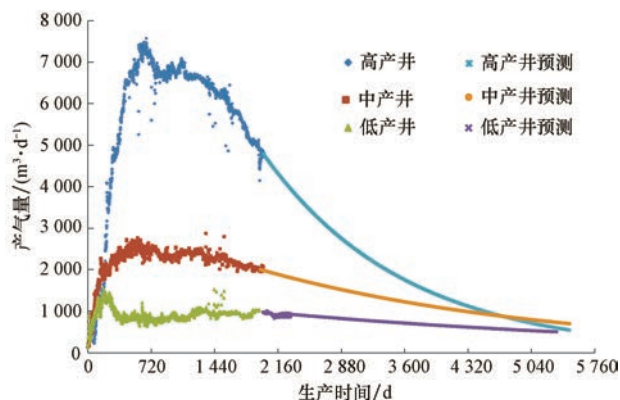


图2 成庄区块典型井生产曲线及产气量预测

Fig. 2 The production curve and prediction of typical wells in the Chengzhuang Block

3 煤层气富集高产控制因素

3.1 富集控制因素

3.1.1 构造热事件提高生气能力,改善了物性,利于气藏富集

前人研究表明,沁水盆地晚侏罗世-早白垩世发生构造热事件,引起二次生烃,即“叠加生烃”或“叠加成气”^[26],其累计生气量达 $359.10\ \text{m}^3/\text{t}$ ^[27],为成庄区块提供了丰富的气源。同时,构造热事件产生的高温、高压的环境提高了煤层的吸附能力,改善了储层物性^[11],利于煤层气后期成藏富集。为了进一步评价构造热事件控气作用,笔者开展了生烃模拟实验,其原理是通过温度来补偿时间对生烃过程的影响。根据成庄区块煤层演化史分析,确定实验温度从 $250\ ^\circ\text{C}$ 逐渐升到 $500\ ^\circ\text{C}$ 。并利用核磁共振来测试样品的孔隙度和渗透率。实验结果表明,随模拟温度的升高,孔隙度和渗透率整体呈上升趋势,温度上升到 $500\ ^\circ\text{C}$ 时,孔隙度从最初的 1.33% 达到 8%,渗透率从最初的 0 达到 $4.5 \times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ (图 3)。核磁测试结果也是这一观点的很好例证,即“随着温度的升高, T_2 谱始终保持三峰特征,微孔峰下降,逐渐以中-大孔为主峰。温度升高,会使得煤岩中孔比例逐渐增加,大孔比例微降,可动流体饱和度呈波动增大趋势”(图 4)。

3.1.2 封盖条件与水动力共同控制富集程度

结合大量的钻井资料及产出水资料分析,并借鉴前人的研究方法^[8-9],认为研究区区域性泥岩盖层发育,而且直接顶、底板岩性组合均为厚层泥岩,属于最优势组合;利用本文 1.4 中直接顶板泥岩厚度与 3# 煤

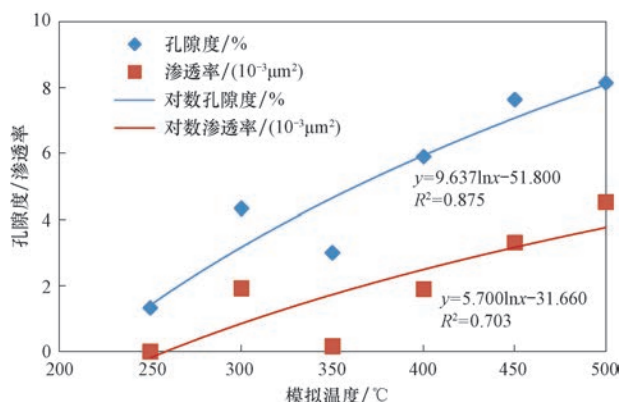


图3 成庄区块煤层孔隙度、渗透率随温度变化曲线

Fig. 3 The porosity and permeability vs. temperature curve in the Chengzhuang Block

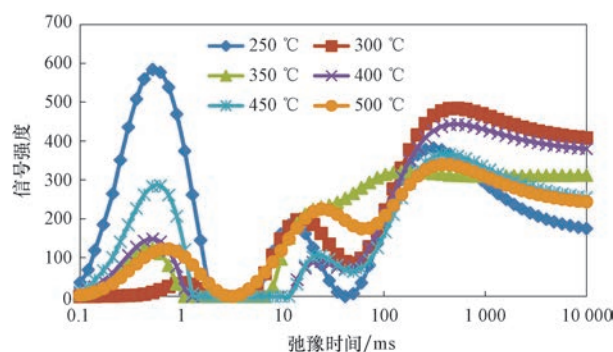


图4 成庄区块不同模拟温度下煤岩 T_2 谱分布

Fig. 4 The coal T_2 spectrum distribution at various simulation temperatures in the Chengzhuang Block

层含气量的统计分析,表明直接顶板泥岩厚度与含气量有较为明显的正相关性:直接顶板厚度小于6m的

区域含气量一般小于 $22 \text{ m}^3/\text{t}$,直接顶板厚度大于10m的区域含气量一般大于 $25 \text{ m}^3/\text{t}$ (表3)。通过对煤层产出水的分析,认为成庄区块折算等水位高差小,水动力径流强度弱,为滞流区或弱径流区,从水动力分区与3#煤层含气量综合评价图可以看出(图5),总体上,封盖条件与水动力处于最优配置,十分有利于煤层气的保存与富集。

3.2 高产控制因素

通过对高产控制因素的分析,认为该区高产受构造、煤层厚度、射孔厚度、增产措施及排采技术等因素影响^[28]外,最为显著的地质控制因素为地应力分布与煤矿卸压的控制,为此,笔者着重讨论这两个因素对高产的控制作用。

3.2.1 处于浅部张性低地应力发育区,储层可改造性好引起高产

现今地应力场分析主要基于水力压裂法,即分析压裂过程中破坏压力、闭合压力,计算和确定岩体内各主应力的大小,最后结合侧压系数分析应力环境。侧压系数的计算公式^[29]如下:

$$\lambda = \frac{\sigma_{h\max} + \sigma_{h\min}}{2\sigma_v} \quad (1)$$

式中: λ 为侧压系数; $\sigma_{h\max}$ 为最大水平主应力,MPa; $\sigma_{h\min}$ 为最小水平主应力,MPa; σ_v 为垂向应力,MPa。

经笔者计算,成庄区块侧压系数介于0.60~0.98,平均值为0.84,呈现伸张带应力的特征,整体上

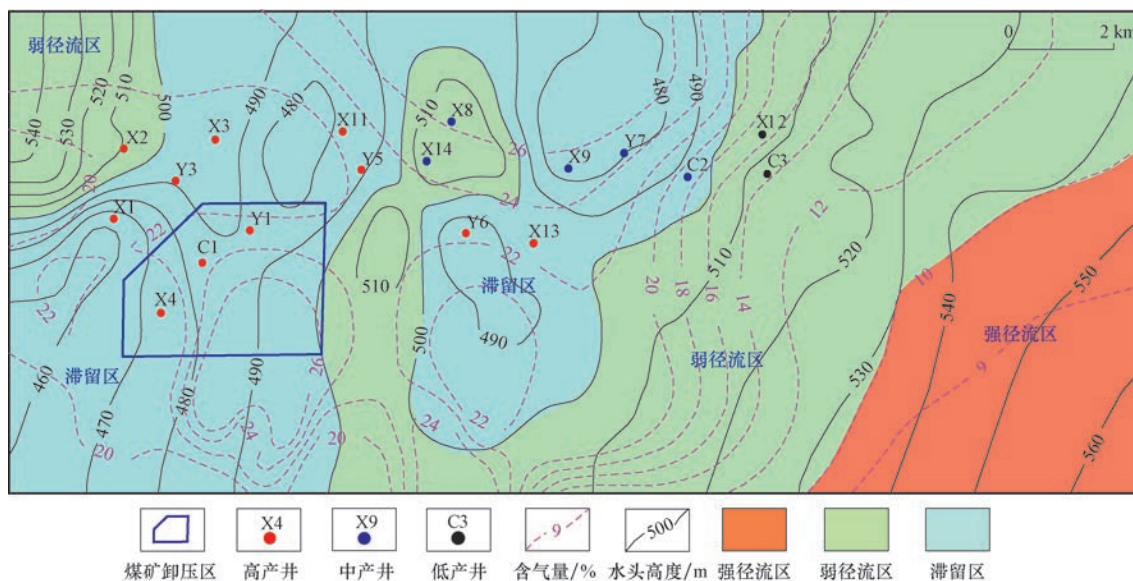


图5 成庄区块水动力分区与3#煤含气量综合评价

Fig. 5 The comprehensive evaluation of hydrodynamic zonation and coal reservoir 3# gas content in the Chengzhuang Block

表4 成庄区块3[#]煤层产气量、应力与裂缝半长计算Table 4 The calculation of CBM production, stress, and crack half-length of coal reservoir 3[#] in the Chengzhuang Block

井号	深度/m	破裂压力/ MPa	闭合压力/ MPa	最大水平 主应力/MPa	最小水平 主应力/MPa	垂向应力/ MPa	侧压系数	裂缝半长/ m	产气量/(m ³ ·d ⁻¹)
C7	311.35	5.56	5.11	7.67	5.11	8.41	0.76	78.2	7 330
C33	289.10	8.95	6.49	8.64	6.49	7.81	0.97	76.5	5 429
C79	441.50	9.11	8.02	11.52	8.02	11.92	0.82	73.4	2 765
C12	457.65	12.29	9.58	12.86	9.58	12.36	0.91	67.9	3 003
C40	568.98	13.52	10.49	13.25	10.49	15.36	0.77	63.1	982
C70	547.83	11.74	9.98	13.72	9.98	14.79	0.80	65.6	1 575
C76	573.88	14.27	11.74	16.21	11.74	15.49	0.90	62.3	1 210
C97	562.25	17.81	12.28	14.40	12.28	15.18	0.88	57.6	1 481
C23	267.00	4.34	3.67	5.01	3.67	7.21	0.60	76.3	2 226
C46	535.15	15.58	12.07	16.29	12.07	14.45	0.98	64.5	890

地应力水平较低,有利于压裂裂缝的延伸。根据压裂模拟分析和产气特征分析显示,裂缝半长一般在57.6~78.2 m(表4),裂缝半长越长越容易高产,裂缝半长超过70 m的井平均日产气量可达4 438 m³/d。

3.2.1 处于煤矿卸压区,地应力得以释放引起高产

成庄区块浅部煤矿的开采煤层气储层物性有一定的改造作用,煤矿采空区应力释放效应可以有效改善区域应力环境,减小储层有效应力,改善渗透性。根据ABAQUS软件应力场模拟结果,认为地应力在距采空区1 000 m左右水平应力开始有明显变化;距采空区700 m时下降5%,400 m时下降10%,200 m时下降15%。

卸压区生产井产气动态统计分析发现,受有效应力降低影响,单井日产气量升高约5 000~10 000 m³/d。以C1井为例,该井距离煤矿工作面600 m,投产60 d后初产约6 000 m³/d,后不断升高至15 674 m³/d,产气效果良好,现仍稳产在6 000 m³/d,说明地应力释放引起渗透改善,利于煤层气取得高产,同时也具有本文2.1中论述的高产井的产气特征。

4 结论

1) 成庄区块煤层气藏以有机热成因气为主,具有煤层构造简单、展布稳定、含气量高、埋深浅、裂隙连通性好且渗透率较高、顶底板封盖性能好等成藏优势。

2) 高、中、低产气井分别占47%,29%及24%,其中,高产气井具有“见气早、达产时间短、峰值产量高、稳产时间较短及整体上采收率高”等生产特征。

3) 构造热事件一方面引起的二次生烃是成庄煤层气藏的主要气源;另一方面异常高温导致煤层微观、宏观孔隙的数量增多,同时存在于煤基质中的游离气产生向外突破的压力,促进了裂隙的形成,改善了煤储层物性;加之水动力与封盖条件的有效匹配,利于煤层气富集。

4) 浅部张性低地应力发育区的储层可改造性好与煤矿卸压区应力释放区改善渗透性的有效叠加,使得成庄区块储层改造效果好,煤层气易高产。

参 考 文 献

- [1] 宋岩,柳少波,琚宜文,等.含气量和渗透率耦合作用对高丰度煤层气富集区的控制[J].石油学报,2013,34(3):417-426.
Song Yan, Liu Shaobo, Ju Yiwen, et al. Coupling between gas content and permeability controlling enrichment zones of high abundance coalbed methane[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(3): 417-426.
- [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] 王勃,孙粉锦,李贵中,等.基于模糊物元的煤层气高产富集区预测—以沁水盆地为例[J].天然气工业,2010,30(11):22-27.
Wang Bo, Sun Fenjin, Li Guizhong, et al. Prediction of prolific CBM zones with the fuzzy matter element method: A case study of the Qinshui Basin[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(11): 22-27.
- [4] 金振奎,王春生,张响响.沁水盆地石炭—二叠系优质煤储层发育的沉积条件[J].科学通报,2005,50(增刊1):32-37.
Jin Zhenkui, Wang Chunsheng, Zhang Xiangxiang. Sedimentary condition of premium coal reservoir for carboniferous-permian in Qinshui Basin[J]. Science Bulletin, 2005, 50(Supplement 1): 32-37.
- [5] 宋岩,赵孟军,柳少波,等.构造演化对煤层气富集程度的影响[J].科学通报,2005,50(增刊1):1-5.
Song Yan, Zhao Mengjun, Liu Shaobo, et al. Influence of structural evolution to coalbed methane accumulation[J]. Science Bulletin, 2005, 50(supplement 1): 1-5.
- [6] 高波,马玉贞,陶明信,等.煤层气富集高产的主控因素[J].沉积学报,2003,21(2):345-349.
Gao Bo, Ma Yuzhen, Tao Mingxin, et al. Main controlling factors analysis of enrichment condition of coalbed methane[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(2): 345-349.
- [7] 秦勇,姜波,王继尧,等.沁水盆地煤层气构造动力条件耦合控藏效应[J].地质学报,2008,82(10):1355-1362.
Qin Yong, Jiang Bo, Wang Jiyao, et al. Coupling control of tectonic

- dynamical conditions to coalbed methane reservoir formation in the Qinshui basin, Shanxi, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(10):1355-1362.
- [8] 赵贤正, 杨延辉, 孙粉锦, 等. 沁水盆地南部高阶煤层气成藏与勘探开发技术[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(2):1-6.
Zhao Xianzheng, Yang Yanhui, Sun Fenjin, et al. Enrichment mechanism and exploration and development technologies of high rank coal in south Qinshui Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(2):1-6.
- [9] Wang Bo, Sun Fenjin, Tang Dazhen, et al. Hydrological control rule on coalbed methane enrichment and high yield in FZ Block of Qinshui Basin [J]. *Fuel*, 2015, 140(5):568-577.
- [10] 孙粉锦, 王勃, 李梦溪, 等. 沁水盆地南部煤层气富集高产主控地质因素[J]. *石油学报*, 2014, 35(6):1070-1078.
Sun Fengjin, Wang Bo, Li Mengxi, et al. Major geological factors controlling the enrichment and high yield of coalbed methane in the southern Qinshui Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 35(6):1070-1078.
- [11] 王红岩, 万天丰, 李景明, 等. 区域构造热事件对高煤阶煤层气富集的控制[J]. *地学前缘*, 2008, 15(5):364-369.
Wang Hongyan, Wan Tianfeng, Li Jingming, et al. The control of tectonic thermal events on the concentration of high coal-rank coalbed methane [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(5):364-369.
- [12] Yao Y B, Liu D M. Effects of igneous intrusions on coal petrology, pore-fracture and coalbed methane characteristics in Hongyang, Handan and Huaibei coalfields, North China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 96-97, 72-81.
- [13] Yao Y B, Liu D M, Huang W H. Influences of igneous intrusions on coal rank, coal quality and adsorption capacity in Hongyang, Handan and Huaibei coalfields, North China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2011, 88, 2-3, 135-146.
- [14] Whiticar M J, Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane [J]. *Chemical Geology*, 1999, 161:291-314.
- [15] Whiticar, M J, Faber E, Schoell M. Biogenic methane formation in marine and fresh-water environments- CO_2 reduction vs acetate fermentation isotope evidence [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1986, 50:693-709.
- [16] 邹才能, 张国生, 杨智, 等. 非常规油气概念、特征、潜力及技术——兼论非常规油气地质学[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(4):385-454.
Zou Caineng, Zhang Guosheng, Yang Zhi, et al. Geological concepts, characteristics, resource potential and key techniques of unconventional hydrocarbon; On unconventional petroleum geology [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(4):385-454.
- [17] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J]. *岩石学报*, 2011, 27(6):1857-1864.
Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, et al. First discovery of nano-pore throat in oil and gas reservoir in china and its scientific value [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(6):1857-1864.
- [18] 杜金虎, 刘合, 马德胜, 等. 试论中国陆相致密油有效开发技术[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(2):198-205.
Du Jinhu, Liu He, Ma Desheng, et al. Discussion on effective development techniques for continental tight oil in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(2):198-205.
- [19] Bo Wang, Fengyin Xu, Bo Jiang, et al. Studies on main factor coupling and its control on coalbed methane accumulation in the Qinshui Basin [J]. *Energy Exploration and Exploitation*, 2013, 31(2):167-186.
- [20] 傅广, 陈章明, 姜振学. 盖层封堵能力评价方法及其应用[J]. *石油勘探与开发*, 1995, 22(3):47-48.
Fu Guang, Chen Zhangming, Jiang Zhenxue. Evaluation of the sealing ability of caprock and its application [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1995, 22(3):47-48.
- [21] 鲁青青. 乌尔逊凹陷油气保存条件及成藏作用研究[D]. 大庆石油学院, 2006:40.
Lu Qingqing. Research on preservation conditions of oil and gas and reservoir-forming process in Wuerxun depression [D]. Daqing Petroleum Institute, 2006:40.
- [22] 冯赫青. 徐深气田营城组一段盖层封气有效性研究[D]. 东北石油大学, 2013:40.
Feng Heqing. Research on sealing gas effectiveness of cap rock of the first member of the Yingcheng Formation in Xusheng gasfield [D]. Northeast Petroleum University, 2013:40.
- [23] 马永生, 楼章华, 郭彤楼, 等. 中国海相地层油气保存条件综合评价技术体系探讨[J]. *地质学报*, 2006, 80(3):406-417.
Ma Yongsheng, Lou Zhanghua, Guo Tonglou, et al. An exploration on a technological system of petroleum preservation evaluation for marine strata in South China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(3):406-417.
- [24] 李国平, 郑德文, 欧阳永林, 等. 天然气封盖层研究与评价[M]. 北京:石油工业出版社, 1996, 99-106.
Li Guoping, Zheng Dewen, Ouyang Yonglin, et al. Study and evaluation of natural gas seals [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996, 99-106.
- [25] 陈荣书. 天然气地质学[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1989. 53-57.
Chen Rongshu. Natural gas geology [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1989, 53-57.
- [26] 杨起, 汤达祯. 华北煤变质作用对煤层含气量和渗透率的影响[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2000, 25(3):273-278.
Yang Qi, Tang Dazhen. Effect of coal methane orphism on methane content and permeability of coal in north China [J]. *Earth science-Journal of China University of Geosciences*, 2000, 25(3):273-278.
- [27] 孙万禄. 中国煤层气盆地[M]. 北京:地质出版社. 2005:1-3.
Sun Wanlu. China coal basin [M]. Beijing: Geological publishing house. 2003:1-3.
- [28] 康园园, 邵先杰, 王彩凤. 高-中煤阶煤层气生产特征及影响因素分析——以樊庄、韩城矿区为例[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(6):728-732.
Kang Yuanyuan, Shao Xianjie, Wang Caifeng. Production characteristics and affecting factors of high-mid rank coalbed methane wells: Taking Fanzhuang and Hancheng mining areas as examples [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(6):728-732.
- [29] 孟召平, 田永东, 李国富. 沁水盆地南部地应力场特征及其研究意义[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(6):975-981.
Meng Zhaoping, Tian Yongdong, Li Guofu. Characteristics of insitu stress field in southern Qinshui Basin and its research significance [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(6):975-981.