

付玉通,原俊红,崔彬,等. 延川南区块深部煤层气与致密砂岩气合采关键技术[J]. 煤炭学报,2018,43(6):1747-1753. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.4023

FU Yutong, YUAN Junhong, CUI Bin, et al. Key technology on co-exploitation of coalbed methane and tight sandstone in south area of Yanchuan[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6):1747-1753. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.4023

延川南区块深部煤层气与致密砂岩气合采关键技术

付玉通^{1,2},原俊红^{1,3},崔彬²,许祖伟²

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院,江苏 徐州 221116; 2. 中国石油化工股份有限公司 华东油气分公司,江苏 南京 210011; 3. 内蒙古大学 交通学院,内蒙古 呼和浩特 010070)

摘要:测试资料显示延川南区块具有丰富的致密砂岩气资源,为提高研究区单井产气量和非常规天然气资源开发效益,在分析煤层气-砂岩气赋存特征及开发条件基础上总结出了砂岩气层识别特征,然后从地层压力的角度论证了深部煤层气和致密砂岩气合采地质可行性,探讨了煤系气合采的适配性技术工艺。研究表明:砂岩气层主要位于上古生界山西组和下石盒子组,岩性以长石岩屑质石英砂岩为主,具有低孔-低渗的特征;高产气层具有低 GR、低 DEN、低 CNL、高 R_T 、高 AC 的测井响应特征,位于 R_T -AC 交汇图版右上部;砂岩气与煤层气合采层间跨度上限值位于 155~180 m,当层间跨度 < 20 m 时适合采用合压合采方式,当层间跨度在 20~50 m 时,应采用限流法分层压裂工艺,当层间跨度大于 50 m 时,应采用下分割器分层压裂法。该技术在现场得到广泛应用,大幅提高了单井产气量。

关键词:延川南;致密气;砂岩气;阿尔奇公式;合采

中图分类号:P618.11 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2018)06-1747-07

Key technology on co-exploitation of coalbed methane and tight sandstone in south area of Yanchuan

FU Yutong^{1,2}, YUAN Junhong^{1,3}, CUI Bin², XU Zuwei²

(1. School of Resource and Geosciences, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2. East China Company, SINOPEC, Nanjing 210011, China; 3. Transportation Institute, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China)

Abstract: The test data show that the southern block of Yanchuan is rich in tight sandstone gas resources. In order to increase gas production in single well and exploit the benefit of unconventional natural gas resources in the study area, based on the analysis of the characteristics and development conditions of the coalbed gas-sandstone gas, the identification characteristics of the sandstone gas are summarized. Then, from the perspective of formation pressure, the geological feasibility of deep coalbed methane and tight sandstone gas production is demonstrated, and the suitability production technology of coal series gas is discussed. The results show that the sandstone gas is mainly located in the Upper Paleozoic Shanxi formation and Lower Shihezi Formation, characterized by long lithic quartz sandstone with low porosity and low permeability. The high yield gas area has the logging response characteristics of low GR, low DEN, low CNL, high R_T and high AC, which is located on the upper right part of R_T -AC intersection diagram. The upper limit of interlayer span for sandstone gas and coalbed methane combined mining is between 155-180 m. The co-exploitation is suitable for the interlayer span is < 20 m. When the interlayer span is between 20-50 m, the lamination fracturing

收稿日期:2018-02-21 修回日期:2018-04-18 责任编辑:常明然

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2011ZX05035-006)

作者简介:付玉通(1986—),男,山东曹县人,博士研究生。E-mail: fytzuzhidan@163.com

通讯作者:原俊红(1981—),男,山西清徐人,讲师。E-mail: yuanjunhong@cumt.edu.cn

process should be adopted. When the interlayer span is more than 50 m, the stratified fracturing method of the lower divider should be used. The technology has been widely applied in the field, and has greatly improved the gas production rate of single well.

Key words: Yanchuan south; tight gas; sandstone gas; Archie formula; co-exploitation

煤层气是一种重要的非常规能源,随着国家对环境保护的重视,非常规天然气开采对缓解我国能源供给紧张具有十分重要的意义^[1],国内外学者对开发中存在的问题做了详细研究^[2-3]。延川南位于鄂尔多斯盆地东南部晋西扰褶带和渭北隆起带交汇处,截至2017年12月,已建成国内目前开发层位最深的煤层气田。在煤层气勘探开发过程中,发现上古生界石盒子组和山西组致密砂岩具有含气显示特征^[4]。这些致密砂岩气层具有埋藏浅、资源丰度低、呈点状分布、渗透性差等特点,如果仅开采致密砂岩气,经济效益较差,因而考虑煤层气和致密砂岩气的合采。砂岩气主要以游离态赋存于砂岩孔隙中,煤层气主要以吸附态赋存在煤基质颗粒表面,二者赋存形式和储层的性质存在巨大差异。煤层气和致密砂岩气合采是否可行?如何确定合采可行性技术界限?合采效果受哪些参数制约?针对这些问题,国内外学者进行了大量理论研究,并取得了丰硕成果:秦勇等^[5]认为流体能量系统、层序地层格架和岩石力学性质3个关键地质要素必须具有兼容性,才能充分释放叠置含气系统产能;申建等^[6]在建立煤层气与煤系致密砂岩气共采综合指数评价模型基础上,指出砂岩气和煤层气共采综合指数在 $8 \times 10^{-7} \sim 4.44$;刘鹏等^[7]从煤层厚度、烃源岩热演化程度、生气强度以及致密储层厚度4个方面建立了鄂尔多斯盆地上古生界煤层气与致密砂岩气联合优选区评价体系;冯其红等^[8]通过数值模拟发现砂岩层含水饱和度对合采效果影响最大,相邻砂岩储气层不含水或微含水时合采效果最好。此外,已有部分国内外区块煤层气和致密砂岩气合采试验取得突破^[9-10]。然而,以上工程在实施过程中,理论和实践存在差异,煤系气共采效果仍然不明确。国内现有少量生产井开展了煤系气多层合采和分层分采,实际中多层合采的产量往往低于分层分采的产量之和,甚至单层分采量,且层间距对产能具有重要影响。因此针对性地分析了不同层间跨度所特有的合层压裂方式,优选出不同叠置关系下的合采方案,对该类地区的合采具有借鉴意义。

在综合考虑延川南区块深部煤层气与致密砂岩气储层地质特征的基础上,结合测井曲线与气层识别图版进行关键含气层位识别,继而通过砂岩初始产气压力和煤层解吸压力进行砂岩与煤层合采地质可行

性评价,最后提出了在不同层间跨度的基础上的合采压裂方法。

1 合采地质基础

1.1 煤层气地质特征

区内构造平缓稳定,整体呈西倾单斜构造,中部为白鹤—中荆断裂带,东部为漳坪构造带,西部为万宝山构造带^[11]。区块主力开发煤层为山西组2号煤,煤层埋深650~1 510 m,平均1 150 m(图1);煤层厚度2.8~8.3 m,平均厚4.6 m;煤储层压力3.8~13.2 MPa,储层压力系数0.31~0.91;含气量5.0~21.8 m³/t,平均12.5 m³/t;含气饱和度11%~93%,平均55%;煤层渗透率 $0.05 \times 10^{-15} \sim 0.95 \times 10^{-15} \text{ m}^2$,平均 $0.32 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ ^[12]。2号煤层镜质体反射率1.9%~3.4%,平均2.3%,以贫煤、无烟煤为主;显微组分以镜质组为主,体积分数40.8%~87.6%,平均68.8%;其次为惰质组,体积分数4.8%~48.7%,平均27.2%^[13]。综上,2号煤层具有埋藏深度大、含气量高、渗透率低、含气饱和度低的地质特点。

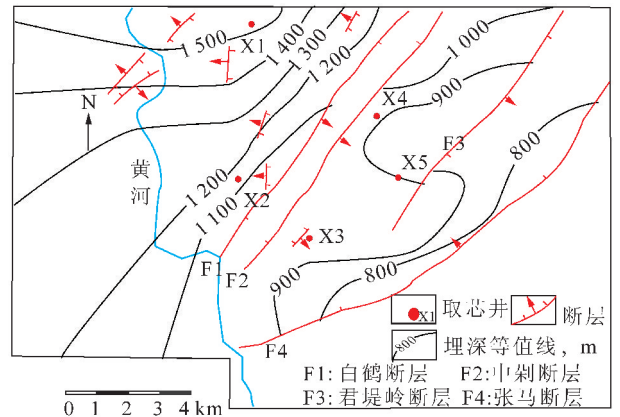


图1 延川南区块2号煤层埋深等值线

Fig. 1 Cover depth chart of No. 2 coal in Yanchuan south

1.2 砂岩气地质特征

气测资料显示研究区砂岩气层主要位于上古生界山西组和下石盒子组,且两套地层内砂岩气层距主开发煤层距离最近,因而仅研究这两套地层内砂岩气地质特征。

1.2.1 砂体发育情况

山西组地层厚62~105 m,平均84 m,自上而下分为山一段和山二段,山一段以灰黑色泥岩与浅灰色

细砂岩互层为主,山二段以灰黑色泥与灰岩砂岩互层为主。山西组砂岩层厚2~49 m,平均21 m,其中山一段砂体厚1~25 m,平均9 m;山二段砂体厚1~34 m,平均15 m。下石盒子组地层厚65~140 m,平均94 m,岩性以灰色、灰白色砂岩与灰色泥岩互层为主。下石盒子组分为盒六、盒七与盒八三段,其中盒六段砂岩层厚1~22 m,平均6 m;盒七段砂岩层厚1~12 m,平均3 m;盒八段砂岩层厚5~40 m,平均17 m。

1.2.2 砂岩层评价

薄片观察显示山西组和下石盒子组储层岩石类型以长石岩屑质石英砂岩为主,其次为长石质岩屑砂岩、岩屑砂岩、岩屑质石英砂岩,而上石盒子组储层岩石类型以长石质石英砂岩为主,其次为长石岩屑质石英砂岩^[14](图2)。砂岩颗粒分选中-好,磨圆度次棱-次圆,颗粒支撑结构。胶结物以硅质、钙质为主,颗粒支撑结构,胶结类型以孔隙胶结和镶嵌胶结为主。孔隙类型以粒间孔和次生溶蚀孔隙为主(图3)。

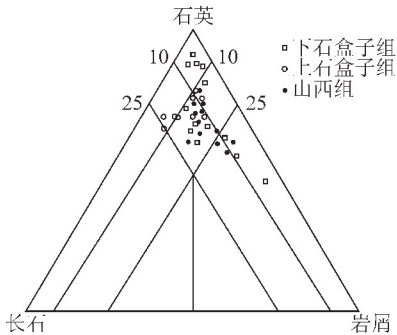
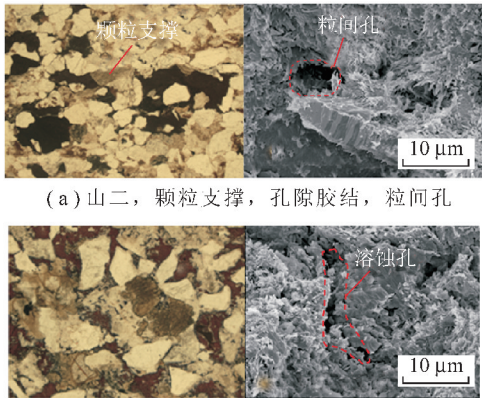


图2 山西组与石盒子组砂岩组分三角图版

Fig.2 Triangle diagram of sandstone of the Shanxi and Shihezi Formation



(a) 山二, 颗粒支撑, 孔隙胶结, 粒间孔

(b) 下石盒子, 颗粒支撑, 孔隙和镶嵌式胶结

图3 山西组与石盒子组砂岩薄片与扫描电镜

Fig.3 Thinsliceand SEM of Shanxi and Shihezi Formation

岩芯测试资料显示山西组砂岩孔隙度2.76%~9.85%,渗透率 $0.04 \times 10^{-15} \sim 1.26 \times 10^{-15} \text{ m}^2$;下石盒

子组孔隙度3.45%~9.54%,渗透率 $0.03 \times 10^{-15} \sim 1.34 \times 10^{-15} \text{ m}^2$;孔隙度1.8%~14.1%,渗透率分布 $0.031 \times 10^{-15} \sim 9.23 \times 10^{-15} \text{ m}^2$,均为低孔、低渗储层。

1.3 气层识别技术

1.3.1 测井曲线特征

结合前期试气结果,总结高产气层、低产气层和干层测井响应特征,建立气层交汇图识别图版。文中将日产气量 $>5000 \text{ m}^3/\text{d}$ 砂岩层定义为高产气层,日产气量 $<1000 \text{ m}^3/\text{d}$ 的砂岩层定义为低产气层。高产气层自然伽马(GR)值28~45 API,深侧向电阻率(R_T)值95~280 $\Omega \cdot \text{m}$,声波时差(AC)值225~257 $\mu\text{s}/\text{m}$,补偿密度(DEN)值2.41~2.42 g/cm^3 ,补偿中(CNL)值6.78%~14.2%,即低GR、低DEN、低CNL、高 R_T 、高AC的特征^[15]。低产气层GR值27~65 API,RT值45~150 $\Omega \cdot \text{m}$,声波时差(AC)值215~247 $\mu\text{s}/\text{m}$,DEN值2.43~2.49 g/cm^3 ,与高产气层相比,具有低 R_T 、低AC、高DEN和高GR的特征^[16]。干层具有高GR(59~67 API)和低 R_T (43~103 $\Omega \cdot \text{m}$)的特点。

1.3.2 气层识别图版

砂岩层物性参数包括孔隙度、含气饱和度和渗透率3个方面,由于研究区砂岩层裂隙不发育,渗透率与孔隙度正相关,因而只需评价孔隙度和含气饱和度这两个独立参数即可^[17]。

AC受岩层孔隙度影响巨大,AC的变化能够较好地反映孔隙度变化^[18]。利用AC拟合岩芯实测孔隙度(图4),拟合公式为

$$\Phi = 0.167AC - 31.3 \quad (1)$$

式中, Φ 为孔隙度,%。

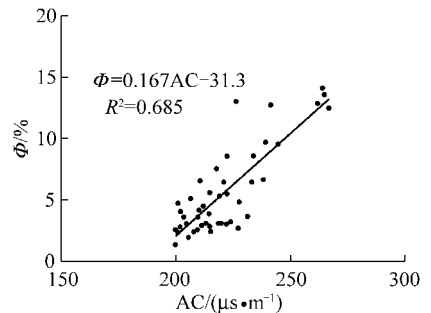


图4 砂岩孔隙度拟合

Fig.4 Fitting diagram of sandstone porosity

砂岩层含气饱和度 S_g 可根据阿尔奇公式计算:

$$S_w = \sqrt{\frac{abR_w}{\Phi^m R_T}} \quad (2)$$

$$I = \frac{R_T}{R_w} \quad (3)$$

$$S_g = 1 - S_w \quad (4)$$

式中, S_w 为含水饱和度, %; S_g 为含气饱和度, %; R_w 为地层水电阻率, $\Omega \cdot m$; a, b 为岩性指数, 砂岩取 1; m 为胶结指数; n 为饱和度指数; I 为电阻增大系数。

根据实验测试资料回归电阻增大系数 I 与含水饱和度 S_w 之间关系如下(图 5):

$$S_w = 1.045I^{-0.72} \quad (5)$$

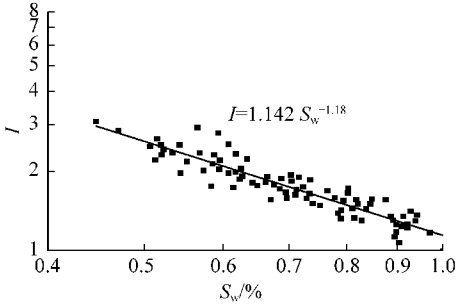


图 5 S_w-I 拟合

Fig. 5 Fitting diagram between S_w and I

从式(5)可以看出, 含水饱和度 S_w 与电阻率增大指数 I 负相关, 在地层水电阻率 R_w 一定情况下, 砂岩电阻率 R_T 越高, 电阻增大指数 I 越大, 砂岩含水饱和度 S_w 越低, 含气饱和度 S_g 则越高^[19]。

综合式(1)~(5)可得, 砂岩孔隙度、含气饱和度分别与 AC 和 R_T 相关, 为方便快速识别气层, 本文以阿尔奇公式为基础建立 $AC-R_T$ 半对数交汇图(图 6), 从图中可以看出, 高产气层位于交汇图右上部, AC 一般大于 $210 \mu s/m$, R_T 大于 $98 \Omega \cdot m$; 低产气层位于交汇图版左下部。

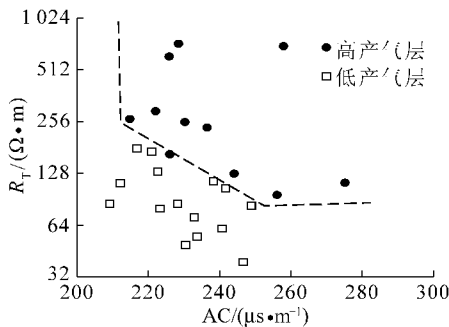


图 6 $AC-R_T$ 高产气层识别

Fig. 6 $AC-R_T$ recognition chart for high yield gas reservoir

2 合采关键技术

2.1 砂岩与煤层合采地质可行性评价

砂岩层与煤层合采过程中压力传导相对速度决定着两层能否充分发挥产气能力, 只有两套储层压力传递速度趋于一致, 才能收到 $1+1>2$ 的效果^[20]。当两套地层储层压力梯度不同, 差异较大时, 高流压梯

度地层水必然倒灌到低流压梯度地层中, 失去合采意义, 因而两套地层流压梯度差异不能过大^[21]。

合采过程中砂岩与煤层压力分别为 P_1 和 P_2 , 砂岩初始产气压力 P_{10} , 煤层解吸压力为 P_{20} , 砂岩和煤层间跨度为 h (砂岩位于煤层上部), 存在以下关系:

$$P_2 = P_1 + \frac{h}{100} \quad (6)$$

当煤层先解吸产气情况下, P_{10} 和 P_{20} 满足式(7), 随着液面下降, 砂岩层压力逐渐降低至 0, 这一过程中砂岩肯定能够产气, 能够达到合采目的。

$$P_{20} > P_{10} + \frac{h}{100} \quad (7)$$

当砂岩层先产气情况下, P_{10} 和 P_{20} 满足:

$$P_{20} \leq P_{10} + \frac{h}{100} \quad (8)$$

若 $P_{20} < h/100$, 则砂岩层已裸露情况下, 煤层气尚未解吸, 完全起不到合采效果, 因此 $P_{20} > h/100$ 是合采可行性下限。实际生产过程中, 为取得良好的合采效果, 砂岩气层压力降为 $P_{10}/2$ 时煤层气开始解吸, 此时满足:

$$P_{20} > \frac{h}{100} + \frac{P_{10}}{2} \quad (9)$$

研究区煤层兰氏体积 $V_L = 20.8 \sim 38.2 \text{ m}^3/\text{t}$, 兰氏压力 $P_L = 1.9 \sim 4.2 \text{ MPa}$, 含气量 $V = 10.8 \sim 20.4 \text{ m}^3/\text{t}$, 根据朗格缪尔方程可以计算出理论解吸压力, 计算公式为

$$V = \frac{V_L P}{P + P_L} \quad (10)$$

计算结果表明理论解吸压力 $P_{20} = 2.8 \sim 4.5 \text{ MPa}$ 。前期砂岩层测试显示砂岩层产气初始压力 $2.5 \sim 5.4 \text{ MPa}$, 结合式(6)可以计算出合采层间跨度 h 上限值分布区间为 $155 \sim 180 \text{ m}$ 。

2.2 砂岩与煤层合压合采技术

砂岩与煤层岩石力学性质存在较大差异, 在进行合层压裂时, 同一泵注程序如何能同时有效使裂缝在两层进行延伸是关键。若层间跨度大, 储层岩石力学、渗透率等储层物性相差较大时需采用分层压裂^[22]。在此情况, 合压就会出现层间干扰, 致使煤层或者砂岩层出现破裂压力不同, 砂岩层压开, 煤层未破压, 达不到合压效果。

砂岩气层、煤层纵向间距较小、破裂压力相近、单砂体太薄, 资源量有限的特点, 如果进行分层压裂, 裂缝不仅可能会串层, 而且下分层压裂工具也存在困难。因此, 地应力差在 3 MPa 以内, 层间隔层厚度小

于 50 m 的,适宜采用多层合压工艺,此工艺具有施工工序简单、动用井下工具少、施工难度小、施工成本低等优点^[23]。

砂岩层和煤层层间跨度在 20 ~ 50 m 时,应采用限流法分层压裂工艺,该方法可以一次施工压开多层段;当层间跨度超过 50 m 时,应采用下分割器分层压裂法^[24-25]。

3 现场应用

如图 7 所示, S16 井 2 号煤层上部 1 240.0 ~ 1 253.6 m 段,录井显示:该井段岩性为浅灰色细砂岩,全烃背景值 1.16,异常值 4.88, C₁ 为 3.05,岩芯出筒时有大量鱼子状气;测井解释孔隙度 7.4%,含气饱和度 57.7%,综合解释为气层。

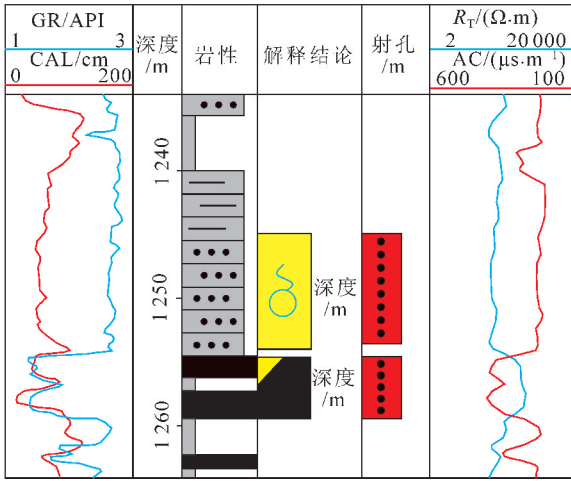


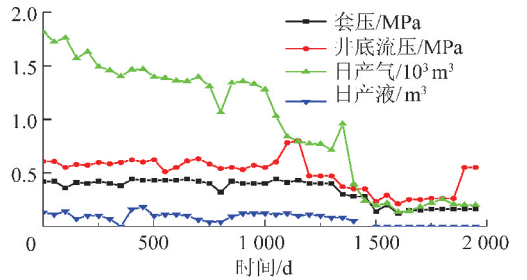
图 7 S16 井测井综合解释

Fig. 7 Comprehensive log interpretation diagram of S16

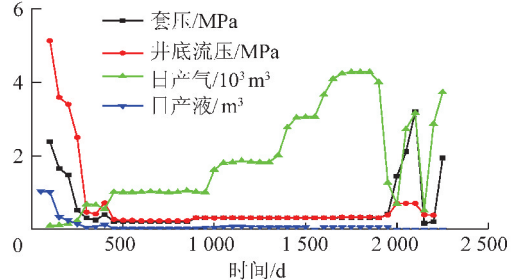
该致密砂岩层与 2 号煤层层间距仅 1 m,储层物性相差不大,属于同一个压力系统,射孔时同时射开砂岩层(1 245 ~ 1 253.6 m)和 2 号煤层(1 254.6 ~ 1 259.4 m),然后进行合采压裂。压裂过程中破裂压力 15.03 MPa,施工压力 14.8 MPa,施工压力平直,表明施工过程中形成了主裂缝,达到了压裂改造目的。

压裂改造完成后,按照三段式排采制度进行降压生产,投产 200 d 后开始产气,产气压力 6.2 MPa;投产 451 d 后,日产气量达到 2 200 m³;然后按照稳压模式生产,日产气量 > 1 500 m³/d 累计生产 1 800 d,稳产效果非常好(图 8(a));投产 2 500 d 后,因作业停抽影响,产气量降至 1 000 m³/d。S16 井生产曲线表明研究区砂岩气与煤层气合采完全可行。

如图 9 所示, S1 井 2 号煤层上部 991.0 ~ 993.2 m 段,录井显示:该井段岩性为浅灰色细砂岩,全烃背景值 1.26,异常值 4.98, C₁ 为 3.45,测井解释



(a) S16 井生产曲线



(b) S1 井生产曲线

图 8 S16 和 S1 生产曲线

Fig. 8 Production curves of S16 and S1 well

计算孔隙度 6.5%,含气饱和度 54.7%,综合解释为气层。

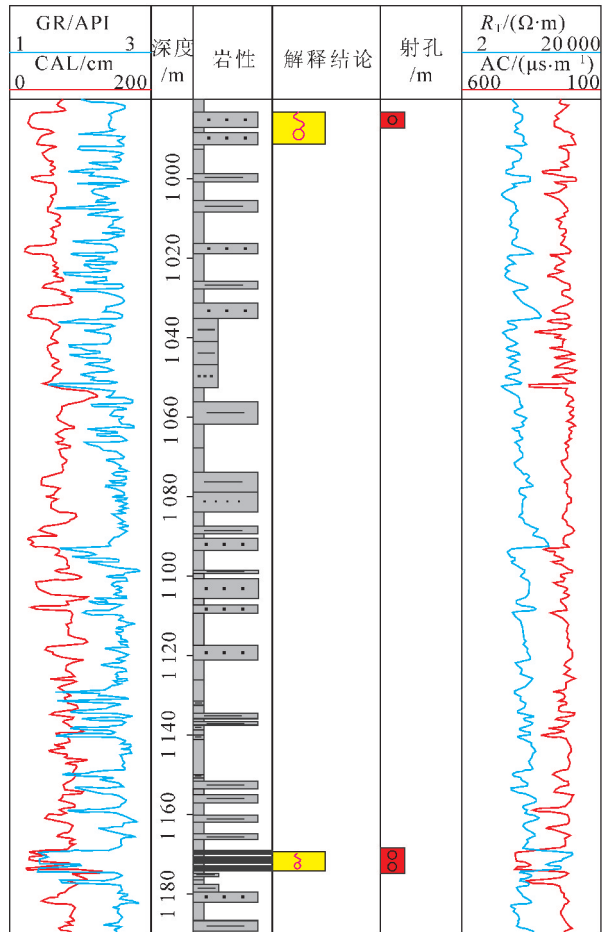


图 9 S1 井测井综合解释

Fig. 9 Comprehensive log interpretation diagram of S1

该致密砂岩层与2号煤层间距178 m,射孔时先射开砂岩层(988.5~991.2 m)进行压裂,然后射开2号煤层(1 169.2~1 174.3 m)进行压裂,压裂改造完成后进行合采。投产93 d后开始产气,产气压力6.0 MPa;投产1 653 d后,日产气量达到4 093 m³;然后按照稳压模式生产,日产气量>4 000 m³/d 累计生产超过300 d,稳产效果非常好(图8(b))。S1井生产曲线表明研究区砂岩气与煤层气分压合采完全可行。

4 结 论

(1) 研究区砂岩气层具有低GR、低DEN、低CNL、高R_T、高AC的特征,砂岩层孔隙度 Φ 与AC正相关,含气饱和度与R_T正相关,因此可用AC-R_T交汇图版识别高产气层和低产气层:高产气层一般位于交汇图版右上部,低产气层位于交汇图版左下部。

(2) 为克服不同压力系统地层合采时产生的层间干扰现象,砂岩层和煤层合采时层间跨度不能超过155~180 m。

(3) 砂岩层和煤层层间跨度小于20 m时,采用合压合采方式比较合适;当层间跨度在20~50 m之间时,应采用限流法分层压裂工艺;当层间跨度大于50 m时,应采用下分割器分层压裂法。

参考文献(References):

- LIANG Y. Theory and practice of integrated coal production and gas extraction[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2015, 2(1): 1-9.
- LEI G, HAMILTON C, FEBRINA R T, et al. A phase inversion polymer coating to prevent swelling and spalling of clay fines in coal seam gas wells[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2018; 1-12.
- ROMANOV V N, GRAESER L C, JIKICH S A, et al. Coal - gas interaction; Implications of changes in texture and porosity[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2016, 3(1): 10-19.
- 程翠. 延川南气田下石盒子组致密砂岩气产能影响因素分析[J]. 地质学刊, 2015, 39(1): 133-137.
CHENG Cui. Influencing factors of productivity of tight sandstone gas in the Xiashihezi Formation of the Yanchuannan gas field[J]. Journal of Geology, 2015, 39(1): 133-137.
- 秦勇, 申建, 沈玉林. 叠置含气系统共采兼容性-煤系“三气”及深部煤层气开采中的共性地质问题[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 14-23.
QIN Yong, SHEN Jian, SHEN Yulin. Joint mining compatibility of superposed gas-bearing systems; A general geological problem for extraction of three natural gases and deep CBM in coal series[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 14-23.
- 申建, 张春杰, 秦勇, 等. 鄂尔多斯盆地临兴地区煤系砂岩气与煤层气共采影响因素和参数门限[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(3): 479-487.
SHEN Jian, ZHANG Chunjie, QIN Yong, et al. Effect factors on and coalbed methane in coal series and threshold of parameter in Linxing block, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(3): 479-487.
- 刘鹏, 王伟锋, 孟蕾, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界煤层气与致密气联合优选区评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(3): 692-701.
LIU Peng, WANG Weifeng, MENG Lei, et al. Joint optimization of coal-bed methane and tight gas in the Upper Paleozoic of the Ordos basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(3): 692-701.
- 冯其红, 张先敏, 张纪远, 等. 煤层气与相邻砂岩气藏合采数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(S1): 169-173.
FENG Qihong, ZHANG Xianmin, ZHANG Jiyuan, et al. Numerical simulation of commingling production for coalbed methane and adjoining sandstone gas reservoirs[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S1): 169-173.
- 谢英刚, 秦勇, 叶建平, 等. 临兴地区上古生界煤系致密砂岩气成藏条件分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 181-191.
XIE Yinggang, QIN Yong, YE Jianping, et al. Accumulation conditions of tight gas in the Upper Paleozoic of Linxing Block[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 181-191.
- 李辛子, 王运海, 姜昭琛, 陈贞龙, 王立志, 吴群. 深部煤层气勘探开发进展与研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 24-31.
LI Xinzi, WANG Yunhai, JIANG Zhaochen, et al. Progress and study on exploration and production for deep coalbed methane[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 24-31.
- 郭伟. 延川南煤层气田基本特征与成藏关键因素[J]. 石油实验地质, 2015, 37(3): 341-346.
GUO Wei. Basic characteristics and key factors of gas accumulation in Yanchuannan coalbed gas field[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(3): 341-346.
- 陈刚, 秦勇, 李五忠, 等. 鄂尔多斯盆地东部深层煤层气成藏地质条件分析[J]. 高校地质学报, 2012, 18(3): 465-473.
CHEN Gang, QIN Yong, LI Wuzhong, et al. Analysis of geological conditions of deep coalbed methane reservoiring in the eastern Ordos Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(3): 465-473.
- 陈刚, 胡宗全, 苏坤, 等. 鄂东南延川南深煤层煤体结构与产气量关系分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(12): 107-112.
CHEN Gang, HU Zongquan, SU Kun, et al. Analysis on relationship between coal structure and gas production quantity in deep coal seam of Yanchuannan Area at Southeast Ordos[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(12): 107-112.
- 楚翠金, 夏志林, 杨志强. 延川南区块致密砂岩气测井识别与评价技术[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(2): 131-138.
CHU Cuijin, XIA Zhilin, YANG Zhiqiang. Logging identification and evaluation of tight sandstone gas in the southern Yanchuan block[J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(2): 131-138.
- THOMAS GAN, BRENDAN BALMAIN, ARTEMSIGBATULLIN. Formation evaluation logoff results comparing new generation Logging-style logging tools to conventional oil and gas logging tools

- for application in coalbed methane (CBM) field development [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 34: 1237-1250.
- [16] 王永辉, 卢拥军, 李永平, 等. 非常规储层压裂改造技术进展及应用 [J]. *石油学报*, 2012, 33(S1): 149-158.
WANG Yonghui, LU Yongjun, LI Yongping, et al. Progress and application of hydraulic fracturing technology in unconventional reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(S1): 149-158.
- [17] 胡勇, 李熙喆, 万玉金, 等. 致密砂岩气渗流特征物理模拟 [J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(5): 580-584.
HU Yong, LI Xizhe, WAN Yujin, et al. Physical simulation on gas percolation in tight sandstone [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(5): 580-584.
- [18] 刘之的, 杨秀春, 张继坤, 等. 鄂东气田煤层含气量测井预测 [J]. *地质科技情报*, 2014, 33(1): 95-99.
LIU Zhidi, YANG Xiuchun, ZHANG Jikun, et al. Logging Predicting for Coalbed Gas content in Eastern Block of Ordos Basin [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2014, 33(1): 95-99.
- [19] 刘之的, 赵靖舟, 时保宏, 等. 煤层气储层“三品质”测井定量评价方法研究—以鄂尔多斯盆地东缘韩城矿区为例 [J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(5): 966-978.
LIU Zhidi, ZHAO Jingzhou, SHI Baohong, et al. Study on the method of quantitative evaluation for three qualities of CBM reservoir using logging data: A case study from the Hancheng mine at the eastern edge of the Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(5): 966-978.
- [20] PENG Cheng, ZOU Changchun, ZHOU Tianning, et al. Factors affecting coalbed methane (CBM) well productivity in the Shizhuangnan block of southern Qinshui Basin, North China: Investigation by geophysical log, experiment and production data [J]. *Fuel*, 2017, 191: 427-441.
- [21] 王蕊, 石军太, 王天驹, 等. 煤层气与致密气合采敏感性因素的数值模拟 [J]. *断块油气田*, 2016, 23(6): 812-817.
WANG Rui, SHI Juntao, WANG Tianju, et al. Numerical simulation of sensitive factors of commingled production of coalbed methane and tight gas [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2016, 23(6): 812-817.
- [22] 黄炳香, 陈树亮, 程庆迎. 煤层压裂开采与治理区域瓦斯的基本问题 [J]. *煤炭学报*, 2016, 41(1): 128-137.
HUANG Bingxiang, CHEN Shuliang, CHENG Qingying. Basic problems of hydraulic fracturing for mining and control zone gas in coal seams [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 128-137.
- [23] 周成香, 谢先平, 胡圆圆. 延川南致密砂岩压裂关键技术应用 [J]. *油气藏评价与开发*, 2014, 4(1): 66-68.
ZHOU Chengxiang, XIE Xianping, HU Yuanyuan. Application of key fracturing technology in tight sandstone of South Yanchuan Block [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2014, 4(1): 66-68.
- [24] 程远方, 吴百烈, 李娜, 等. 应力敏感条件下煤层压裂裂缝延伸模拟研究 [J]. *煤炭学报*, 2013, 38(9): 1634-1639.
CHENG Yuanfang, WU Bailie, LI Na, et al. Research on the propagation of hydraulic fracture under coalbed stress sensitivity [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(9): 1634-1639.
- [25] GUO Tiankui, ZHANG Shicheng, QU Zhanqing, et al. Experimental study of hydraulic fracturing for shale by stimulated reservoir volume [J]. *Fuel*, 2014: 373-380.