

引用格式:李鑫,肖翠,陈贞龙,等.延川南煤层气田低效井原因分析与措施优选[J].油气藏评价与开发,2020,10(4):32-38.

LI X, XIAO C, CHEN Z L, et al. Analysis of low-efficiency wells in CBM gas field of South Yanchuan and optimization of measures[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(4): 32-38.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.04.005

延川南煤层气田低效井原因分析与措施优选

李鑫,肖翠,陈贞龙,金晓波

(中国石化华东油气分公司勘探开发研究院,江苏南京210019)

摘要:针对延川南深层煤层气田低产低效井占比高,低产原因复杂,难以达到预期开发效果的问题,以延川南煤层气田低产低效井为研究对象,通过开展地质工程一体化研究分析,结合煤层气开发实践经验,认为排采速度不合理导致煤储层渗流通道堵塞,储层改造不到位导致泄流面积小,低压区地层能量不足导致煤层气解吸受限这三大问题是延川南低效井低产的主要原因。针对低效原因分别开展了可控强脉冲解堵、体积压裂实现裂缝转向、氮气扰动疏通促解吸等增产措施。现场应用评价结果显示,这些措施均能实现不同程度的增产,其中体积压裂可以达到有效改善储层物性的目的,单井日增产气1 000~4 000 m³,增产效果显著,是延川南煤层气田目前最为有效的增产措施。

关键词:延川南;煤层气;低产低效;增产措施;体积压裂

中图分类号:TE37

文献标识码:A

Analysis of low-efficiency wells in CBM gas field of South Yanchuan and optimization of measures

LI Xin, XIAO Cui, CHEN Zhenlong, JIN Xiaobo

(Research Institute of Exploration and Development, Sinopec East China Oil and Gas Company, Nanjing, Jiangsu 210031, China)

Abstract: The low-yield and low-efficiency wells in the deep coal seam gas field of South Yanchuan are of high proportion and the reasons for low-yield are complex, so that it is difficult to achieve the expected development effect. In order to solve these problems, taking the low-yield and low-efficiency wells in South Yanchuan CBM Gas Field as the research object, the integrated research and analysis of geological engineering have been carried out. Combined with the practical experience of CBM development, it is found that the unreasonable drainage rate leads to the blockage of coal reservoir seepage channels, the inadequate reservoir transformation results in a small discharge area, and the lack of formation energy in the low-pressure area leads to the limitation of coal bed methane desorption. These three problems are the main reasons for the production of low-efficiency wells in South Yanchuan. For the reasons of inefficiency, production stimulation measures such as controllable strong pulse deblocking, volume fracturing to achieve fracture steering, nitrogen disturbance dredging and desorption have been carried out. The results of field application evaluation show that these measures can achieve different degrees of production increase, among which volume fracturing can achieve the purpose of effectively improving the physical properties of the reservoir. The daily production of a single well is increased by 1 000~4 000 m³. The effect of production increase is remarkable. It is the most effective means of increasing production in South Yanchuan CBM Field currently.

Key words: South Yanchuan, CBM(coalbed methane), low-yield and low-efficiency; stimulation measure, volume fracture

延川南煤层气田是目前国内商业开发最深的煤层气田之一。气田主力煤层埋深1 000~1 600 m,平均埋深1 290 m,埋深1 000 m以上的井超过700口,

占比74%。气田属于特低孔、特低渗储层,孔隙度一般为3%~6%,渗透率普遍小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,开发难度极大^[1]。延川南煤层气田目前低产低效井较多,难

收稿日期:2020-02-25。

第一作者简介:李鑫(1984—),男,硕士,工程师,主要从事煤层气勘探开发工作。通讯地址:江苏省南京市建邺区江东中路375号金融城9号楼,邮政编码:210019。E-mail:282945654@qq.com

基金项目:中国石化科技部项目“延川南深层煤层气稳产技术研究”(P19019-4)。

以达到预期的开发效益水平。因此,明确气井低产低效原因并制定相适应的增产措施是当务之急。

煤层气增产技术方面的研究与应用目前以国内为主。张永民、郭智栋等^[2-3]开展脉冲解堵技术提高煤层气采收率的机理研究和现场实践,取得了较好的效果;中国石油煤层气公司在韩城区块开展跨层压裂、封堵堵水、酸化解堵、加大排采强度等针对性老井挖潜技术,现场应用效果显著^[4];林英松等^[5]认为在煤储层中实施体积压裂技术是可行的,并开展了适应体积压裂的煤储层特性评价;李贵川等^[6]利用煤层气水平井注氮气改造技术,解除地层堵塞,达到了增产目的;淮北矿区探索碎软煤层开发对策,形成了紧邻碎软煤层的顶板岩层水平井开发技术,为碎软煤层的开发提供了一条新的技术途径^[7];倪晓明、李勇等^[8-9]开展低效井原因分析和治理体系的构建,为煤层气效益开发提供了新思路,但针对深层煤层气田的低产低效尚缺乏系统的分析研究和有效的增产措施,通过开展地质工程一体化研究,分析延川南煤层气田的低产低效原因,提出相适应的增产措施,现场应用取得了较好的增产效果。

1 气田概况

气田位于鄂尔多斯盆地东南缘晋西挠曲带和陕北斜坡的结合部,形态为一简单的单斜,地层走向北东,向西倾伏,倾角一般为 5° 左右,气田发育断层22条,平面分布在背斜构造翼部和缓坡构造上,走向多为北东向和北北东向,断距小,延伸短(图1)。2号煤层埋深650~1350 m,东南部浅、西北部深,煤层厚度2.3~6.7 m,平均4.5 m,横向分布稳定且连续,煤层一般含1~2层夹矸,局部发育3层夹矸,夹矸总厚0~0.80 m,平均0.35 m,煤镜质体反射率变化为1.96%~3.22%,平均2.45%,整体处于贫煤、无烟煤阶段,煤层煤体结构主要为原生结构—碎裂煤为主,孔隙度3%~6%,渗透率 $(0.01\sim 0.99)\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于特低孔、特低渗储层。含气量6~20 m^3/d ,一般 $> 12 \text{m}^3/\text{d}$,浅部以及断层附近含气量 $< 12 \text{m}^3/\text{d}$,煤层顶底板以泥岩为主,封盖能力强,水文地质特征平面差异大,在气田东部浅层为弱径流区,受埋深和断层封堵的作用,深部地层矿化度急剧升高,pH值降低,为滞留环境,局部断层发育区为垂直渗流区,气田平面非均质性较强。

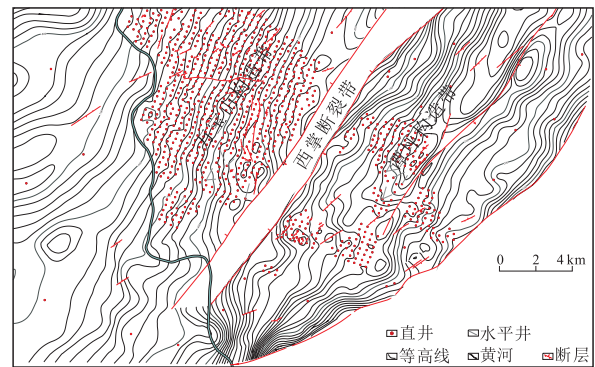


图1 延川南煤层气田构造

Fig. 1 Structure of South Yanchuan CBM Gas Field

2 低效原因分析

2.1 开发现状

延川南煤层气田总井数908口,开井数796口,平均单井日产气1020 m^3 。单井日产气 $< 500 \text{m}^3$ 的低产低效井368口,占总开井数的46%。

2.2 低效原因分析

国内外煤层气开发实践表明,煤层气的资源基础和采出条件是气产量的主控因素。对于延川南深层煤层气田,保存条件较好,含气量较高,资源基础落实,造成低产低效的原因主要在于采出条件。结合气田实际分析^[10-15],气田开发存在排采速度不合理导致煤储层渗流通道堵塞,储层改造不到位导致泄流面积小,低压区地层能量不足导致煤层气解吸受限三大问题。

2.2.1 排采速度不合理,渗流通道堵塞

煤储层在排采过程中,易发生3种储层敏感性效应,即压敏效应、速敏效应和贾敏效应^[16-18],对气井产能造成较大影响。当排采速度过快,煤岩所受应力变化过快导致脆性变形,同时煤基质表面产生的细微煤粉易堵塞渗流通道,气田煤岩样品应力敏感室内实验显示,压力降至5 MPa时,渗透率损害率达到20%。

延川南煤层气田主体区含气量高,煤体结构好,合理的排采制度是高产稳产的保障,单向流生产阶段流压降幅以及见气后上产速度直接影响气井的产气效果。根据气田生产井见气前压降速度与日产气量关系(图2)可知,当见气前流压日降幅 $> 0.03 \text{MPa}$ 时,日产气量不超过1600 m^3 ,气井在单向流阶段压降速度偏快容易造成裂缝闭合,同时,见气后产量上

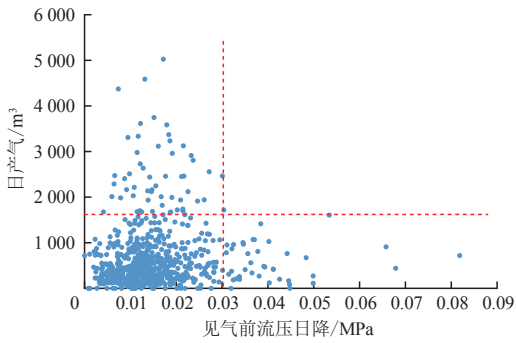


图2 见气前流压降幅与日产气量关系

Fig. 2 Relation of flowing pressure drop and daily gas production before gas breakthrough

升过快极易使煤粉产生和运移,最终导致煤粉堵塞煤层渗流通道,对产气效果造成极大影响。

Y17井煤层埋深1 497.20 ~ 1 501.1 m,厚度3.9 m,含气量12.5 m³/t,该井2012年3月26日启抽,2012年10月13日解吸见气,解吸压力6.95 MPa,显示出较好的产气潜力。由于早期经验不足,产气初期产量上涨过快的情况下,没有合理地控制排采速度,动液面快速降至煤层顶板后日产气量由高峰3 600 m³很快降至1 000 m³以下,直至完全不产气,由于排采制度不合理,对储层造成了不可逆的伤害(图3)。

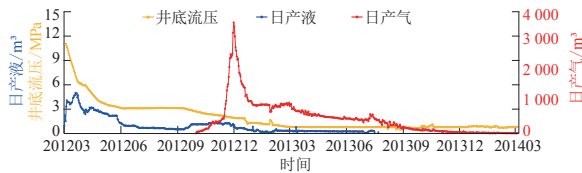


图3 延川南Y17井排采生产曲线

Fig. 3 Drainage and production curves of well-Y17 in South Yanchuan

2.2.2 压裂改造不到位,泄流面积小

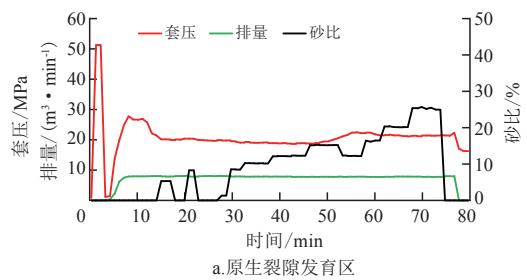
压裂改造效果决定了单井泄流面积^[19],延川南煤层气田谭坪、万宝山地质特征差异大。气田前期普遍采用常规水力加砂压裂施工,压裂施工规模和压裂方式基本相同,单井注入液量600 ~ 800 m³为主,加砂量40 ~ 60 m³,施工排量一般6 ~ 8 m³,但是不同的地质条件呈现出的压裂特征不一致。

谭坪构造带埋深浅,地应力偏低,天然裂缝发育,压裂施工压力低,压裂液滤失严重,造成主裂缝缝长受限,生产特征表现为稳产产量偏低,采出程度不足;而万宝山构造带深部为高应力特低渗储层,原生裂隙不发育,压裂特征显示为破裂压力高、施工压力逐步上升、加砂困难,产生的人工裂缝短小狭窄,无法形成主裂缝,最终泄压半径小,压降空间无法有效拓展,排采呈现出尖峰型产气曲线,稳产期短、产水量极低,产气效果差,达不到预期效果(表1)。

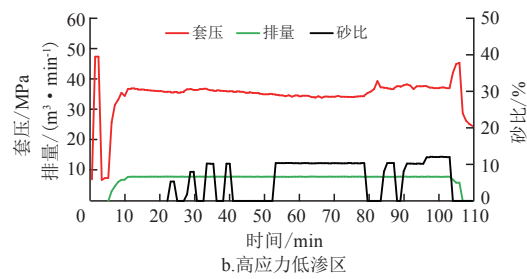
通过工区煤矿井下观测早期储层压裂改造特征发现,压裂支撑剂充填于煤层裂隙之间,延伸不连续,支撑剂主要集中于井筒8 m范围内,纵向改造不均匀,主缝延伸 < 30 m。气田微地震监测裂缝半长达到130 ~ 170 m,分析认为该缝长反映的是液体压力波及的距离,并不能真实反映压裂有效支撑距离,由于液体的滤失作用以及高地应力特征导致常规水力加砂压裂改造支撑范围有限,实际压裂难以达到微地震监测的裂缝半长,观测结果也佐证了常规压裂施工支撑效果的局限性。

2.2.3 深层低压煤层气解吸受限

兰氏体积反映了煤的最大吸附能力^[20],以等温吸



a.原生裂隙发育区



b.高应力低渗区

图4 典型压裂施工曲线

Fig. 4 Typical fracturing curves

表1 压裂改造不合理原因及特征分析

Table 1 Analysis on the unreasonable reasons and characteristics of fracture reconstruction

压裂特征	主控地质因素	储层改造效果	生产特征	典型压裂曲线
排量小,施工压力偏低	原生裂隙较发育,滤失严重	裂缝缝长受限	稳产产量低,采出程度不足	图4a
破裂压力高,施工压力上升,停泵压力高,加砂困难	地应力高、渗透率低	支撑剂在近井地带堆积,储层未有效改造	单峰型排采曲线,稳产期短或者无稳产期,产水量低级	图4b

附实验为基础,通过建立煤层气解吸效率方程,推导出转折压力和敏感压力,将见气后阶段定量划分为3个阶段:缓慢解吸、快速解吸和敏感解吸阶段。根据万宝山、谭坪不同的等温吸附曲线特征以及解吸压力特征分析(图5),谭坪构造带压力系数低,解吸压力低,解吸点位于快速解吸阶段,万宝山构造带埋藏深度大,地层压力系数高,解吸压力高,解吸点位于缓慢解吸阶段,因此,在解吸初期万宝山深层煤层解吸效率低于谭坪构造带,但是万宝山构造带后期解吸效率优于谭坪。随着压力进一步降低,万宝山构造带煤层解吸效率逐步提高,在实际生产中表现为万宝山构造带排采上产时间长,初期增产速度慢,但是随着连续降压达到敏感解吸阶段后,万宝山深部煤层气增产速度明显高于谭坪,后期上产空间大。

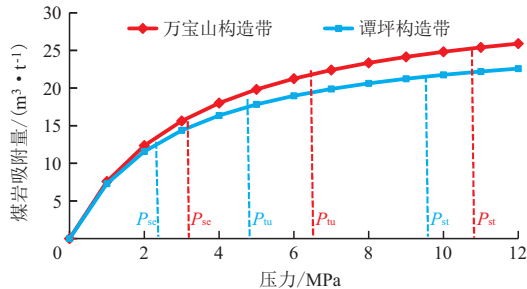


图5 万宝山/谭坪等温吸附特征对比

Fig. 5 Comparison of isothermal adsorption characteristics between Manbaoshan and Tanping area

万宝山北部为深层低压区,其含气量与南部含气量基本相同,但其煤层埋深超过1 400 m,压力梯度偏低,仅为0.43左右,低于万宝山南部压力梯度0.7~0.86。实际生产特征显示,万宝山北部与南部地区在井底流压 >2.2 MPa时,即敏感解吸压力之前,二者解吸速率基本一致。单井累产气量约为 60×10^4 m³,当压力进一步下降至2.2 MPa以下时,万宝山南部进入敏感解吸阶段,气体解吸速率明显增强,目前累产气量将近 200×10^4 m³,而万宝山北部生产井的敏感解吸特征不明显,气体解吸速率基本不变,目前累产气量仅 120×10^4 m³左右(图6),实际生产规律与等温吸附曲线特征不一致。北区在地层压力梯度偏低的影响下,地层能量不足,进入敏感解吸阶段后,煤层气解吸困难。

3 增产措施

针对不同地质条件下的低效原因分析,围绕解

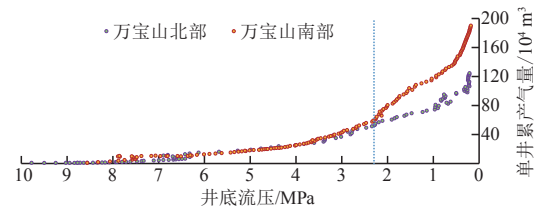


图6 万宝山北部单位压降累产气量曲线

Fig. 6 Gas production per unit pressure drop in the north of Wanbaoshan

除堵塞、疏导促解吸、储层体积压裂重复改造的思路,制定相应的增产措施。采用可控强脉冲解堵增透,治理主体区近井筒堵塞问题造成的低产井,采用注氮气扰动疏导促解吸治理深部低压低产气井;采用体积压裂重复改造治理储层前期改造不到位的问题,均取得了不同程度的增产效果。

3.1 可控强脉冲解堵

可控强脉冲以脉冲功率技术为基础,利用水中高压放电的脉冲大电流或金属丝电爆炸,在局部范围内形成能量的快速沉积,产生等离子体,使放电通道剧烈膨胀扩张,从而推动水介质形成冲击波,达到撕裂煤层的目的,同时对于对长期生产的煤储层可剥离渗流通道表面的附着煤粉,疏通渗流通道。试验结果表明,在一个区域通过多次重复作业加强增透效果,随冲击波作业次数的增加,煤层裂隙条数和长度不断发展,裂隙连通性不断增强,最终形成了裂隙网络。

该措施具有作业周期短、成本相对低的优势,通过开展措施增产机理研究和适应性分析,开展了3个阶段先导试验:第一阶段针对煤层气富集区低产井开展先导试验,证实技术可行;第二阶段开展工艺优化试验,通过开展冲击的强度和冲击次数调整,确定冲击强度采用增强型,单层冲击次数为5次左右,是最经济有效的工艺技术方案;第三阶段明确针对保存条件好,煤体结构为原生一碎裂煤,储层压裂改造到位,后期排采导致的近井筒堵塞井,措施适应性较好。2019年推广实施24口井,增产20口,单井日增产气 $105 \sim 4\,069$ m³,平均单井日增产气约 $1\,000$ m³,日增产气 2.0×10^4 m³,累计增产气 400×10^4 m³(图7)。

3.2 体积压裂实现裂缝转向

原生裂隙发育区,液体滤失强,以及高应力特低渗区初次压裂施工压力高,易砂堵,加砂困难,难形

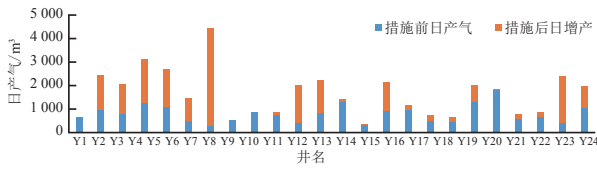


图7 冲击波实施前后日产气对比

Fig. 7 Comparison of daily gas production before and after shockwave implementation

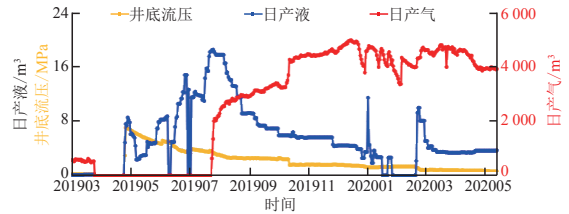


图8 Y25井生产曲线

Fig. 8 Production curve of well-Y25

成有效的导流裂缝。针对此类井,通过加大压裂规模、增大排量、提高加砂强度和注液强度,来实现多裂缝开启、长距离延伸、增大支撑半径的压裂效果。气田先导试验井Y25井通过实施重复压裂,区域支撑导流能力明显提升,日产液达到8 m³,累计产液2 800 m³,泄压面积明显扩大,日产气量由550 m³增长至5 000 m³,措施后生产390 d,产气300 d,累计增产达110×10⁴ m³/d,目前稳产生产(图8),通过生产历史拟合和产量预测,该井预计稳产期超过2 a,EUR (Estimated Ultimate Recovery, 估算最终采收量)达到600×10⁴ m³。在先导试验的基础上,2019年推广实施13口井,目前10口井日增产超过1 000 m³,措施效果显现。

3.3 氮气扰动疏通促解吸

受储层压力相对较低、煤粉堵塞影响,气田低压区气井在生产特征表现为早期高产,后期产气产液同步下降,产量快速递减。氮气扰动通过地面增压系统实施小排量氮气吞吐作业,提高煤层压力,然后逐渐释放压力,当压力降到一定数值时,再进行增压,以此反复作业,打通由于煤粉堵塞的渗流通道,疏通导流通道,同时压力扰动作用降低远端煤层中甲烷的有效分压,促进煤层气的解吸,持续向低浓度井眼方向流动,当煤层中的压力达到平衡后,渗透性

得到改善,煤层气甲烷得到有效置换。该措施操作简单、成本低、不需要井下作业。气田2019年共实施21口井,全部见效,平均单井日增气400 m³,措施成本低,产气稳定,有效率100%。从产气的分析化验结果看,注氮气后产气井的气体组分甲烷含量达80%以上,置换效果显著。

3.4 增产措施综合评价

通过先导试验和应用推广,从技术适用范围、储层改造效果、气井增产效果、技术成本等方面对3类增产措施进行综合评价(表2)。认为体积压裂针对前期储层改造不到位的低产井可以有效实现裂缝转向,达到储层体积改造的目的,增产效果显著,技术适应性强,是目前最为有效的增产手段。可控强脉冲解堵技术成本较低,作业时间短,区块前期经过多轮次试验明确了措施的适应条件,对气藏保存条件好、煤体结构为原生一碎裂煤、储层改造到位、有高产历史、近井筒堵塞导致的低产井适应性较好。但该技术对选井条件要求较高,气田符合技术增产条件的井相对较少,而且技术成功与否受地质、工程、排采综合因素的影响大,成功率总体偏低。氮气扰动对低压储层,煤层气解吸受限的低产井效果较好,该技术成本低,井口操作即可,不需要作业施工,应用便捷,但是措施增产气量相对有限。综合以上,各

表2 延川南煤层气田增产措施综合评价

Table 2 Comprehensive evaluation of CBM stimulation measures in South Yanchuan

增产技术	低产条件	储层改造效果	日增产/m ³	措施有效期	成功率/%	成本	综合评价
体积压裂	初次压裂改造效果不佳	好	1 000 ~ 4 000	超过2年	81	高	成本高,增产效果好
可控强脉冲解堵	保存条件好 原生结构煤 有高产生产历史 近井筒堵塞	较好	1 000	6个月	50	低	技术适应性不高
氮气扰动	低压储层 近井筒堵塞 煤层气解吸受限	一般	400	持续有效	90	低	成本低,操作简单, 增产效果一般

类增产技术各有优劣,均能不同程度提高单井产能,综合评价体积压裂是目前延川南煤层气田最为有效的增产措施手段。

4 结论

1) 随着开发实践的深入,对延川南煤层气田低效井原因的认识逐渐清晰,认为排采制度不合理导致储层渗流通道堵塞,储层改造不到位导致泄流面积小,低压区地层能量不足导致煤层气解吸受限是造成延川南煤层气田低产低效井的主要原因。

2) 针对低产低效原因,提出相对应的增产措施,结合现场应用效果,认为体积压裂可以达到有效改善储层物性的目的,单井日增产气1 000~4 000 m³,增产效果显著,是延川南煤层气田目前最为有效的增产措施。可控强脉冲解堵成本较低,作业时间短,但是适用范围有限,而且成功率受地质、工程、排采等综合因素的影响大。氮气扰动成本低,应用便捷,但是措施增产气量有限。

参考文献

- [1] 方志雄.延川南煤层气田勘探开发关键技术及应用[M].北京:地质出版社,2017.
FANG Z X. Key technologies and applications of exploration and development in south Yanchuan CBM Field[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017.
- [2] 张永民,邱爱慈,秦勇.电脉冲可控冲击波储层增透原理与工程实践[J].煤炭科学技术,2017,45(9):79-85.
ZHANG Y M, QIU A C, QIN Y. Principle and engineering practices on coal reservoir permeability improved with electric pulse controllable shock waves[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(9): 79-85.
- [3] 郭智栋,曾雯婷,方惠军,等.重复脉冲强冲击波技术在煤储层改造中的初步应用[J].中国石油勘探,2019,24(3):397-402.
GUO Z D, ZENG W T, FANG H J, et al. Initial application of intense repeated pulse wave for stimulating CBM reservoirs[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(3): 397-402.
- [4] 王成旺,冯延青,杨海星,等.鄂尔多斯盆地韩城区块煤层气老井挖潜技术及应用[J].煤田地质与勘探,2018,46(5):212-218.
WANG C W, FENG Y Q, YANG H X, et al. Potential-tapping technology and its application in old CBM wells in Hancheng block of Ordos basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(5): 212-218.
- [5] 林英松,韩帅,周雪,等.体积压裂技术在煤层气开采中的适应性研究[J].西部探矿工程,2015,27(4):59-61.
LIN Y S, HAN S, ZHOU X, et al. Research on the adaptability of volume fracturing technology in coal bed methane exploitation[J]. West-China Exploration Engineering, 2015, 27(4): 59-61.
- [6] 李贵川,张锦虎,邓拓,等.煤层气水平井注氮增产改造技术[J].煤炭科学技术,2016,44(5):54-58.
LI G C, ZHANG J H, DENG T, et al. Gas output improvement and reconstruction technology of coalbed methane horizontal well by nitrogen injection[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(5): 54-58.
- [7] 许耀波,朱玉双,张培河.紧邻碎软煤层的顶板岩层水平井开发煤层气技术[J].天然气工业,2018,38(9):70-75.
XU Y B, ZHU Y S, ZHANG P H. Application of CBM horizontal well development technology in the roof strata close to broken-soft coal seams[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(9): 70-75.
- [8] 倪小明,赵政,刘度,等.柿庄南区块煤层气低产井原因分析及增产技术对策研究[J].煤炭科学技术,2020,48(2):176-184.
NI X M, ZHAO Z, LIU D, et al. Study on causes of low coalbed methane wells and countermeasures of increasing production technology in Shizhuang South Block[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(2): 176-184.
- [9] 李勇,王延斌,倪小明,等.煤层气低效井成因判识及治理体系构建研究[J].煤炭科学技术,2020,48(2):185-193
LI Y, WANG Y B, NI X M, et al. Study on identification and control system construction of low efficiency coalbed methane wells[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(2): 185-193.
- [10] 陈贞龙,王烽,陈刚,等.延川南深部煤层气富集规律及开发特征研究[J].煤炭科学技术,2018,46(6):80-84.
CHEN Z L, WANG F, CHEN G, et al. Study on enrichment law and development features of deep coalbed methane in South Yanchuan Field[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6): 80-84.
- [11] 李勇,汤达祯,孟尚志,等.鄂尔多斯盆地东缘煤储层地应力状态及其对煤层气勘探开发的影响[J].矿业科学学报,2017,2(5):416-424.
LI Y, TANG D Z, MENG S Z, et al. The in-situ stress of coal reservoirs in east margin of Ordos Basin and its influence on coalbed methane development[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2017, 2(5): 416-424.
- [12] 付玉通,张伟,李永臣,等.鄂东南地区深部煤层气气体结构测井评价研究[J].中国煤炭,2017,43(9):31-34.
FU Y T, ZHANG W, LI Y C, et al. Logging evaluation research on the structure of deep coalbody with CBM in the southeast of Hubei province[J]. China Coal, 2017, 43(9): 31-34.
- [13] 余林.延川南地区水文地质条件及煤层气成藏[J].煤田地质与勘探,2017,45(2):69-74.
YU L. Groundwater conditions and relative CBM accumulation feature in Yanchuannan area[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(2): 69-74.
- [14] 陈刚,胡宗全.鄂尔多斯盆地东南缘延川南深层煤层气富集高产模式探讨[J].煤炭学报,2018,43(6):1572-1579.
CHEN G, HU Z Q. Discussion on the model of enrichment and high yield of deep coalbed methane in Yanchuannan area at Southeastern Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1572-1579.
- [15] 王丹.临汾区块煤层气富集及产能影响因素研究[D].北京:中国矿业大学(北京)博士学位论文.2015.
WANG D. The research of affective facts of production and enrichment of CBM in Linfen Block[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2016.
- [16] 贾慧敏,胡秋嘉,刘忠,等.裂缝应力敏感性对煤层气井单相流段产水影响及排采对策[J].中国煤层气,2017,14(5):31-34.
JIA H M, HU Q J, LIU Z, et al. Influence of fractures stress sensitivity on water production law for the single-phase flow of CBM wells and drainage countermeasures[J]. China Coalbed Methane, 2017, 14(5): 31-34.

- [17] 王凤林,袁玉,张遂安,等.不同含水及负压条件下煤层气等温吸附解吸规律[J].煤炭科学技术,2019,47(6):158-163.
WANG F L, YUAN Y, ZHANG S A, et al. Isothermal adsorption and desorption of coalbed methane under different water saturation and negative pressure[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(6): 158-163.
- [18] 郑力会,李秀云,苏关东,等.煤层气工作流体储层伤害评价方法的适宜性研究[J].天然气工业,2018,38(9):28-39.
ZHENG L H, LI X Y, SU G D, et al. Applicability of working fluid damage assessment methods for coalbed methane reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(9): 28-39.
- [19] 吴信波,王谦,张俊.彬长矿区煤层气井水力压裂效果影响因素分析[J].非常规油气,2017,4(6):100-104.
WU X B, WANG Q, ZHANG J. Analysis on influencing factors of hydraulic fracturing effect of coalbed methane wells in Binchang mining area[J]. Unconventional Oil & Gas, 2017, 4(6): 100-104.
- [20] 秦勇,郑长东,王博洋,等.基于等温吸附曲线的煤储层产气潜力定量评价——以黔北地区长岗矿区为例[J].天然气工业,2018,38(9):40-47.
QIN Y, ZHENG C D, WANG B Y, et al. Quantitative evaluation on the gas production potential of coal reservoirs based on isothermal adsorption curves: A case study of the Changgang Field, northern Guizhou, China[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(9): 40-47.

(编辑 尹淑容)

(上接第24页)

- [14] 马东民,张遂安,蒯亚兵.煤的等温吸附-解吸实验及其精确拟合[J].煤炭学报,2011,36(3):477-480.
MA D M, ZHANG S A, LIAN Y B. Isothermal adsorption and desorption experiment of coal and experimental results accuracy fitting[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 477-480.
- [15] 高晨,鄢晓忠,许龙泉.富氧条件下温度对煤焦结构中官能团和孔隙结构变化影响的实验研究[J].煤炭技术,2018,37(7):301-304.
GAO C, YAN X Z, XU L Q. Experimental study on effect of temperature on change of functional groups and pore structure in coal char structure under oxygen-enriched condition[J]. Coal Technology, 2018, 37(7): 301-304.
- [16] 李希建,尹鑫,李维维,等.页岩对甲烷高温高压等温吸附的热力学特性[J].煤炭学报,2018,43(S1):229-235.
LI X J, YIN X, LI W W, et al. Thermodynamic characteristics of isothermal adsorption of methane at high temperature and pressure in shale[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S1): 229-235.
- [17] 马东民,李沛,张辉,等.长焰煤中镜煤与暗煤吸附/解吸特征对比[J].天然气地球科学,2017,28(6):852-862.
MA D M, LI P, ZHANG H, et al. Comparison on characteristics of adsorption/desorption of vitrain and durain in long-flame coal[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(6): 852-862.
- [18] SONG W, YAO J, MA J, et al. Grand canonical Monte Carlo simulations of pore structure influence on methane adsorption in micro-porous carbons with applications to coal and shale systems[J]. Fuel, 2018, 215: 196-203.
- [19] 傅学海,秦勇,韦重韬.煤层气地质学[M].徐州:中国矿业大学出版社,2007.
FU X H, QIN Y, WEI C T. Coalbed methane geology[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2007.
- [20] XIN F, XU H, TANG D, et al. Pore structure evolution of low-rank coal in China[J]. International Journal of Coal Geology, 2019, 205: 126-139.
- [21] 徐海飞.河南省中高煤级构造煤吸附/解吸特征研究[D].焦作:河南理工大学,2015.
XU H F. Study on characteristics of adsorption/desorption of medium and high rank tectonically deformed coals in Henan province[D]. Jiaozuo: Henan University of Science and Technology, 2015.
- [22] 林海飞,卜婧婷,严敏,等.中低阶煤孔隙结构特征的氮吸附法和压汞法联合分析[J].西安科技大学学报,2019,39(1):1-8.
LIN H F, BU J T, YAN M, et al. Joint analysis of pore structure characteristics of middle and low rank coal with nitrogen adsorption and mercury intrusion method[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2019, 39(1): 1-8.
- [23] 解北京,王广宇,严正.粉煤吸附甲烷温度变化规律试验研究[J].煤炭科学技术,2019,47(8):123-128.
XIE B J, WANG G Y, YAN Z. Experimental study on temperature change law of pulverized coal during adsorbing methane[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 123-128.
- [24] 杨涛,聂百胜.煤粒吸附瓦斯过程中的温度变化研究[J].煤炭学报,2015,40(S2):380-385.
YANG T, NIE B S. Temperature variation tests during the gas adsorption process[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S2): 380-385.
- [25] 安江飞.煤样吸附/解吸过程中表面各点温度变化特征研究[D].太原:太原理工大学,2017.
AN J F. Study on temperature variation characteristics in adsorption and desorption at different points on coal sample surface[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.

(编辑 柳超超)