

文章编号:0253-9993(2012)01-0091-05

煤层气水平井钻井过程储层损害机理

岳前升¹, 邹来方², 蒋光忠¹, 田中兰², 胡友林³, 黄志强³

(1. 长江大学 化学与环境工程学院, 湖北 荆州 434023; 2. 中国石油集团钻井工程技术研究院, 北京 100195; 3. 长江大学 石油工程学院, 湖北 荆州 434023)

摘要:以山西沁水盆地山西组 3 号煤层为研究对象, 对羽状水平井钻井过程可能发生损害煤储层因素如钻井液固相、水敏损害、应力敏感性、毛细现象、结垢和聚合物堵塞等进行了实验研究。结果表明, 山西沁水盆地 3 号煤层孔隙度和渗透率均较低, 煤层黏土矿物含量较高, 水敏损害、结垢、钻井液固相侵入和聚合物堵塞是水平井钻井过程中造成煤储层损害的主要因素。使用合适矿化度、密度和具有防垢功能的钻井液以及可解除的钻井液处理剂是煤层气水平井钻井过程保护煤储层的有效措施。

关键词:煤层气; 沁水盆地; 羽状水平井; 钻井液; 地层损害; 敏感性

中图分类号:P618.11 **文献标志码:**A

Lab investigation on damage mechanism of coal reservoir for pinnate horizontal well based on coalbed methane

YUE Qian-sheng¹, ZOU Lai-fang², JIANG Guang-zhong¹, TIAN Zhong-lan², HU You-lin³, HUANG Zhi-qiang³

(1. College of Chemistry and Environmental Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434023, China; 2. CNPC Drilling Engineering Technology Research Institute, Beijing 100195, China; 3. Petroleum Engineering College, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

Abstract: Taking No. 3 coal in Qinshui Basin as research object, factors such as solid phase of drilling fluid, water sensitivity, stress sensitivity, scaling, capillarity and polymer plugging which maybe damage coal reservoir were researched during coalbed methane drilling. Sample results analyzed show that No. 3 coal reservoir has low porosity and low permeability, high content of clay mineral. Lab evaluation results show water sensitivity, scaling, solid phase invasion of drilling fluid and polymer plugging are factors which induce the coal reservoir damage. Drilling fluid which has suitable salinity, suitable density, anti-scaling, and removable drilling fluid agents can protect coal reservoir from damage during drilling for pinnate horizontal wells.

Key words: coalbed methane; Qinshui Basin; pinnate horizontal well; drilling fluid; formation damage; formation sensitivity

我国煤层气开发已经进入蓬勃发展阶段, 据统计, 至 2010 年底, 我国已钻煤层气井超过 4 000 口, 年增加新井超过 1 000 口, 已发现 2 个千亿立方米大型煤层气田。我国煤层气资源非常丰富, 但煤储层基岩渗透率普遍较低^[1-3], 单井产量相对较低, 直井开采时一般都进行压裂作业以提高产能。而羽状水平井象羽毛或鱼骨刺一样分布于煤储层中, 能极大地增加煤层气的供给范围并提高了裂缝的导流能力, 因而

在煤层气开采中的应用越来越广泛^[4-13]。但实践证明, 并非所有羽状水平井产量都达到了配产设计要求, 而且有些水平井产量甚至不如直井, 除地质方面原因外, 水平井钻井过程中煤储层受到损害是一个不容忽视的重要原因。相对于油气储层而言, 煤储层有其自身特殊性, 因而不能将油气储层的损害机理完全照搬应用于煤储层, 针对煤储层在钻井过程中的损害因素和机理问题, 目前国内的研究比较单一和分

收稿日期: 2011-02-15 责任编辑: 王婉洁

基金项目: 大型油气田及煤层气开发国家科技重大专项资助项目(2011ZX05036-001)

作者简介: 岳前升(1973—), 男, 河南信阳人, 副教授, 博士。Tel: 0716-8060933, E-mail: yueqiansheng@163.com

散^[14-18],本文针对山西沁水盆地山西组3号煤层较系统地研究了煤层气水平井钻井过程中煤储层发生损害的原因及机理,从而为煤层气水平井钻井过程最大程度地保护煤储层提供依据。

1 煤储层特性

1.1 储层物性特征

山西沁水盆地郑庄3号煤层属微孔-特低渗煤层,孔隙度多在5%以下,空气渗透率多在 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下。煤层稳定、埋藏浅、厚度大、煤层气储量丰富,顶、底板多为封闭性较好的致密泥岩,煤层厚度一般为5~6 m,区内地层平缓,平面分布稳定,埋深多为350~750 m。3号煤层整体较破碎,构造裂隙发育,部分被方解石充填,如图1所示。由于煤层致密、大中孔不发育,上覆连续沉积地层厚度较大,部分裂隙被方解石充填,降低了裂隙的导流能力,因而渗透率较低。该区煤层埋藏浅,煤层温度低。

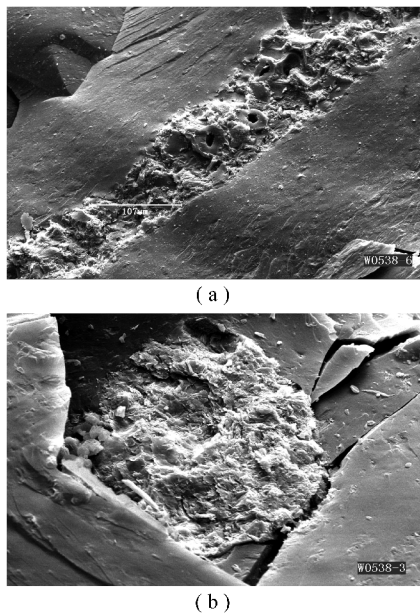


图1 郑庄3号煤扫描电镜

Fig. 1 SEM of No. 3 coal in Zhengzhuang

1.2 黏土矿物种类

采用X射线衍射分析方法,对郑庄和樊庄主煤层的煤岩进行了黏土矿物分析。樊庄3号煤黏土矿物的含量为21.0%~25.7%,其中伊利石相对含量为32%~66%,高岭石为8%~15%,绿泥石为6%~20%,伊蒙混层为18%~40%。

1.3 煤层水质

沁水盆地樊庄部分生产井产出水分析数据表明,该区块煤层水矿化度较低,在2000 mg/L左右,水型为 NaHCO_3 型水,水质呈弱碱性,pH值为8.69~8.95。

2 钻井过程中煤储层损害机理

2.1 钻井液中固相侵入

目前,煤层气羽状水平井多以清水作为钻井液,并严格控制钻井液密度,由于煤屑以及泥岩地层钻屑会不可避免地分散进入钻井液,因此实际钻井过程中无法做到真正清水钻进,图2是某口煤层气水平井清水钻井液用激光粒度仪分析的结果。虽然煤储层孔隙微细,但钻井液中仍有部分细小固相颗粒(如小于 $1 \mu\text{m}$)在正压差下侵入储层并使煤储层受到损害。

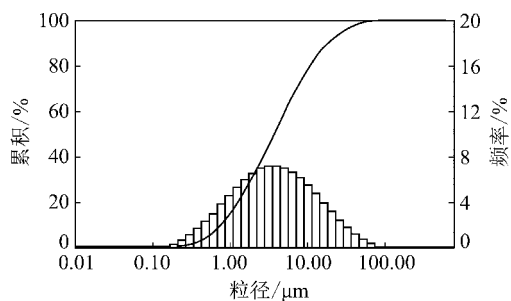


图2 现场钻井液粒度分布

Fig. 2 Particle size distribution of field mud

2.2 水敏损害

水敏是指当入井流体矿化度低于地层流体矿化度时因地层黏土矿物水化膨胀而造成的地层渗透率下降现象^[19]。如前所述,沁水盆地煤层水矿化度在2000 mg/L左右,而实际钻井使用的河水(地表水)矿化度较低(多数低于500 mg/L),当较低矿化度流体进入煤储层后会不可避免地引起黏土矿物水化膨胀,从而造成渗流通道堵塞。如图3所示,因入井流体矿化度降低造成的储层损害程度是非常严重的。

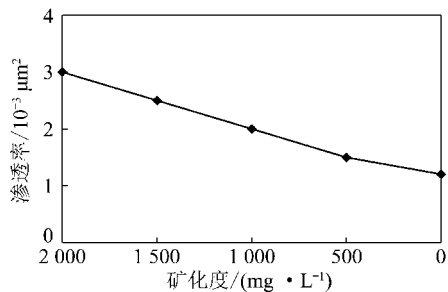


图3 煤储层岩芯水敏性曲线

Fig. 3 Water sensitivity curve of NO. 3 coal core

2.3 应力敏感性损害

应力敏感性是指岩石所受净应力发生改变时造成孔隙通道发生变形或裂缝开启或闭合从而导致岩石渗透率发生变化的现象,应力敏感性按成因主要有净围压应力敏感性和回压应力敏感性,净围压应力敏感性主要模拟开采过程中因地层流体能量亏空造成的应力变化;而回压应力敏感性主要模拟井筒流体密

度变化造成的应力变化。目前羽状水平井仍以正压差钻井为主,钻井阶段净围压应力敏感性无需考虑,主要是回压应力敏感性,这种应力敏感性实质上是因井筒流体当量密度波动造成的与孔隙流体的净压差。图 4 和图 5 是 3 号煤样模拟两种应力敏感性按照有关行业标准^[19]的实验结果,结果表明,净围压应力敏感性损害程度要大于回压。

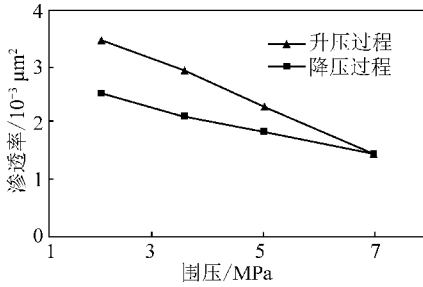


图 4 煤芯样品净围压应力敏感性

Fig. 4 Net confining stress sensitivity curves of coal core

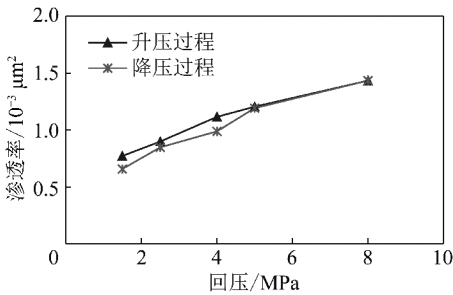


图 5 煤芯样品回压应力敏感性

Fig. 5 Back pressure stress sensitivity curves of coal core

2.4 自吸作用

研究了干煤芯在端面接触盐水自吸一定时间后的气测渗透率变化,结果如图 6 所示。由于煤储层渗流通道微细,其毛细现象比较突出。煤芯的气测渗透率随煤芯含水饱和度的上升而下降,但超过 20 min 后其气测有效渗透率趋于稳定,这也说明干煤芯的自吸速度比较快。

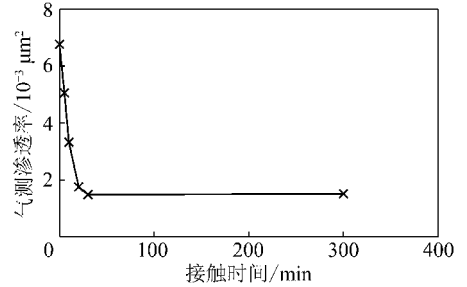


图 6 干煤芯样品气测渗透率随吸水时间变化关系

Fig. 6 Gas log permeability-water adsorption time of coal core

2.5 结垢现象

山西沁水樊庄、郑庄煤储层水分析资料和配制钻井液的地表水分析资料见表 1 和表 2。表中数据表明,两区块地表水矿化度都低于煤层水矿化度。煤层水矿化度在 2 000 mg/L 左右,水型为 NaHCO₃ 型水,水质呈弱碱性,pH 值为 8.69 ~ 8.95。而地表水矿化度仅有 300 ~ 700 mg/L,郑庄水型为 Na₂SO₄ 型,樊庄水型为 CaCl₂ 型。

表 1 地表水分析数据

Table 1 Surface water data

mg/L

区块	总矿化度	各种离子含量								
		K ⁺ +Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Ba ²⁺	I ⁻
郑庄	396.82	33.18	13.5	65.14	40.00	80.00	165.00	0	0	0
樊庄	618.51	68.10	22.0	109.66	188.75	140.00	90.00	0	0	0

表 2 煤层水分析数据

Table 2 Coal reservoir water data

mg/L

区块	井号	总矿化度	各种离子含量								
			K ⁺ +Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Ba ²⁺	I ⁻
樊庄	固县 1 号井	2 093.00	618.00	0.6	2.80	161.00	2.40	1 244.00	63.00	1.00	0.60
	樊庄 1 号井	1 523.00	440.00	0.6	1.80	83.00	2.40	1 106.00	92.40	1.00	0.60
	G8-8	2 026.04	616.25	1.5	2.47	102.5	70.00	1 132.50	100.82	0	0
郑庄	东 30-4	1 937.17	579.54	2.5	4.12	75.00	0.40	1 162.50	113.11	0	0
	郑平 01-1	2 643.19	723.57	4.0	12.37	41.25	2.00	1 860.00	0	0	0
	D19-3	1 878.09	537.56	3.0	5.77	82.50	50.00	1 155.00	44.26	0	0
	东 19-2	2 019.43	603.08	4.0	4.12	181.25	136.00	1 000.00	90.98	0	0

利用饱和度指数法 SI 值对地表水和煤层水不同比例混合后进行计算,计算结果表明,在 20 ℃、不考虑 CO₂ 分压情况下,碳酸钙 SI 值均大于 0,硫酸钙 SI 值均小于 0。SI 值 > 0,有结垢倾向;SI 值 < 0,无结垢倾向;SI 值 = 0,处于临界状态。这说明当使用地表水(如河水)作为钻井液时,在煤层条件下与煤层水混合后会生成碳酸钙垢。结垢作用对低渗煤层渗透率损害将是非常严重的。

2.6 聚合物堵塞

研究了两种常用水溶性聚合物 HEC(羟乙基纤维素)和 CMC(羧甲基纤维素)对煤层岩芯的污染损害程度,聚合物浓度为 0.5%,污染压力为 1.0 MPa,结果见表 3。聚合物大分子对煤储层造成的损害程度比较严重,两块煤芯渗透率损害率近 30%。

表 3 聚合物侵入对煤芯渗透率影响

Table 3 Influence of polymer invasion on permeability of coal core

煤样号	煤芯孔隙度/%	K_a	污染介质	K_1	K_2	(K_2/K_1)
ZZ-2	5.2	6.85	0.3% HEC	1.35	0.94	69.6
FZ-2	5.0	6.53	0.3% CMC	1.28	0.90	70.3

注: K_a 为煤芯空气渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_1 为煤芯污染前初始渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_2 为煤芯污染后渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_2/K_1 为煤芯污染后的渗透率恢复值, %。

2.7 损害程度分析

目前煤层气羽状水平井所用钻井液体系以清水为主,为保持井壁稳定有时会使用部分聚合物段塞,钻井过程中严格控制密度,一般密度不超过 1.08 g/cm³,再者煤储层埋藏较浅,因此这种回压应力敏感性影响程度有限。煤层气实际上多以吸附气为主,即煤储层原始状态下含水饱和度较高,因此,钻井过程中钻井液与煤层水之间并无明显相界面,这种因毛细现象发生的自吸作用和程度也有限。对于低渗煤储层而言,低矿化度流体造成的水敏、流体间混合后结垢、聚合物堵塞和微固相颗粒侵入是煤层气水平井钻井过程发生储层损害的最主要因素。

3 结 论

(1)沁水盆地煤储层孔隙度和渗透率较低,黏土矿物含量高,钻井过程中易受外来固相和液相污染而发生储层损害。

(2)水敏性损害、结垢、钻井液固相污染和聚合物堵塞是煤储层水平井钻井过程中发生储层损害的主要因素。

(3)使用合适矿化度、密度和具有防垢功能的钻井液以及可解除的钻井液处理剂是煤层气水平井钻井过程保护煤储层的有效措施。

参考文献:

- [1] 刘洪林,王红岩,张建博. 中国煤层气资源潜力及其勘探方向[J]. 石油勘探与开发,2001,28(1):9-11.
Liu Honglin, Wang Hongyan, Zhang Jianbo. Coal bed methane resource and its exploration direction in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(1):9-11.
- [2] 濮洪九. 洁净煤技术产业化与我国能源结构优化[J]. 煤炭学报,2002,27(1):1-5.
Pu Hongjiu. Industrialization of clean coal technology and optimization of China energy structure[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(1):1-5.
- [3] 张 群,冯三利,杨锡禄. 试论我国煤层气的基本储层特点及开发策略[J]. 煤炭学报,2001,26(3):230-235.
Zhang Qun, Feng Sanli, Yang Xilu. Basic reservoir characteristics and development strategy of coalbed methane resource in China[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(3):230-235.
- [4] 刘洪林,李景明,王红岩,等. 浅议我国低煤阶地区的煤层气勘探思路[J]. 煤炭学报,2006,31(1):50-53.
Liu Honglin, Li Jingming, Wang Hongyan, et al. Discussion on finding coalbed methane in low rank coal in China[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(1):50-53.
- [5] 张 义,鲜保安,周卫东,等. 羽状水平井欠平衡钻井环空流动特性研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2010,32(3):117-121.
Zhang Yi, Xian Baoan, Zhou Weidong, et al. Study on annular flow performance of pinnate horizontal well by under balanced drilling [J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 2010, 32(3):117-121.
- [6] 黄洪春,卢 明,申瑞臣. 煤层气定向羽状水平井钻井技术研究[J]. 天然气工业,2004,24(5):76-78.
Huang Hongchun, Lu Ming, Shen Ruichen. Study on pinnate horizontal directional drilling technique of coalbed gas[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(5):76-78.
- [7] 张 义,鲜保安,赵庆波,等. 煤层气欠平衡钻井环空注气工艺优化[J]. 石油勘探与开发,2009,36(3):398-402.
Zhang Yi, Xian Baoan, Zhao Qingbo, et al. Optimization of annular gas injection technology in coalbed methane aerated under-balanced drilling[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(3):398-402.
- [8] 董建辉,张宁生,李天太,等. 樊庄区块煤层气羽状水平井钻井实践[J]. 天然气工业,2007,27(3):55-57.
Dong Jianhui, Zhang Ningsheng, Li Tiantai, et al. Study on plume-like horizontal wells drilled in methane coalbeds in Fanzhuang block, Qinshui, Shanxi Province[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(3):55-57.
- [9] 江 山,王新海,张晓红,等. 定向羽状分支水平井开发煤层气现状及发展趋势[J]. 钻采工艺,2004,27(2):4-6.
Jiang Shan, Wang Xinhai, Zhang Xiaohong, et al. Development status

- and trend of directional pinnate horizontal well for coalbed gas[J]. *Drilling and Production Technology*, 2004, 27(2):4-6.
- [10] 闫相祯, 张衍涛, 王同涛, 等. 煤层气多分支水平井完井管柱许可造斜率设计[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(5):787-791.
Yan Xiangzhen, Zhang Yantao, Wang Tongtao, et al. Permitted build-up rate of completion strings in multi-branch CBM well[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(5):787-791.
- [11] Samuel O Osisanya, Robert F Schaffitzel. A review of horizontal drilling and completion techniques for recovery of coalbed methane [A]. *International Conference on Horizontal Well Technology* [C]. Society of Petroleum Engineers, 1996.
- [12] 屈平, 申瑞臣, 付利, 等. 煤层井壁稳定的时间延迟效应探讨[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(2):255-260.
Qu Ping, Shen Ruichen, Fu Li, et al. Time delay effect on wellbore stability in coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(2):255-260.
- [13] 乔磊, 孟国营, 范迅, 等. 煤层气水平井组远距离连通机理模型研究[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(2):199-202.
Qiao Lei, Meng Guoying, Fan Xun, et al. Mechanism model of remoteintersection between horizontal well and vertical well for development of coal-bed methane[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(2):199-202.
- [14] 郑力会, 孟尚志, 曹园, 等. 绒囊钻井液控制煤层气储层伤害室内研究[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(3):339-442.
Zheng Lihui, Meng Shangzhi, Cao Yuan, et al. Laboratory studies on control coal bed methane formation damage by fuzzy-ball based drilling fluids[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(3):339-442.
- [15] 秦建强, 刘小康. 煤层气钻井中煤储层的保护措施[J]. *中国煤炭地质*, 2008, 20(3):67-68.
Qin Jianqiang, Liu Xiaokang. Coal reservoir protective measures during CBM drilling[J]. *Coal Geology of China*, 2008, 20(3):67-68.
- [16] 汪伟英, 陶杉, 黄磊, 等. 煤层气储层钻井液结垢伤害实验研究[J]. *石油钻采工艺*, 2010, 32(5):36-38.
Wang Weiying, Tao Shan, Huang Lei, et al. Experimental research on the scaling damage in coalbed methane reservoir caused by drilling fluid[J]. *Oil Drilling and Production Technology*, 2010, 32(5):35-38.
- [17] 黄志强, 蒋光忠, 郑双进, 等. 煤层气储层保护钻井关键技术研究[J]. *石油天然气学报*, 2010, 32(6):116-118.
Huang Zhiqiang, Jiang Guangzhong, Zheng Shuangjin, et al. The key drilling technique of formation protection for coalbed methane[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2010, 32(6):116-118.
- [18] 陶树, 汤达祯, 许浩, 等. 沁南煤层气井产能影响因素分析及开发建议[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(2):194-198.
Tao Shu, Tang Dazhen, Xu Hao, et al. Analysis on influence factors of coalbed methane wells productivity and development proposals in southern Qinshui Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(2):194-198.
- [19] SY/T 5358—2002, 储层敏感性流动实验评价方法[S].
SY/T 5358—2002, Formation damage evaluation by flow test[S].

《煤炭学报》再次荣获“中国精品科技期刊”称号

2011-12, “精品科技期刊服务与保障系统项目组”通过中国精品科技期刊遴选指标体系综合评价, 《煤炭学报》被评选为“2011年度中国精品科技期刊”。

