中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

移动扫码阅读

杨 刚,吴 通,孟尚志,等.绒囊钻完井流体在煤系三气合采中对储层伤害的研究[J].煤炭科学技术,2021,49(3):194-200. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.03.027

YANG Gang,WU Tong,MENG Shangzhi,*et al*.Study on damage of follicle drilling with fuzzy-ball fluid in coal measures three gas combined production[J].Coal Science and Technology,2021,49(3):194-200. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.03.027

绒囊钻完井流体在煤系三气合采中对储层伤害的研究

杨 刚[1],吴 通[2],孟尚志[1],刘 皓[2],张林强[1],时翔宇[2,3]

(1.中联煤层气有限责任公司,北京 100011;2.中国石油大学(北京) 石油工程学院,北京 102249;3.北京力会澜博能源技术有限公司,北京 102200)

摘 要:绒囊流体在单一煤层气藏和致密砂岩气藏等非常规储层的工程作业效果和储层伤害控制效果皆满足现场要求,但由于没有合适的评价方法,室内仍缺乏对合采储层的整体伤害试验评价应用于煤系合采地层。室内试验利用可分别计量单层和多层合采流量、压力的储层伤害评价系统,模拟临兴煤系储层压力及温度条件,选用下石盒子组致密砂岩及太原组煤岩共 7 枚,采用气体恒流量法,测试砂/煤单层开采模式、"砂+煤"双层合采模式及"砂+砂+煤"三层合采模式共 4 组试验。试验记录各层单采及多层合采伤害前后稳定时的流量共 7 组,稳定时的进出口压力共 14 组,利用达西定律计算得出 7 组渗透率数据,以此作为基础数据,对比流量法评价绒囊钻完井流体造成的储层整体伤害程度。试验结果表明:①砂、煤单层开采时,稳定流量损害率分别为 7.96%和 7.91%,接近渗透率损害率的 8.48%和 8.55%;②双层合采时,合采稳定流量损害率为 7.24%,整体渗透率损害率不能计算,单层渗透率损害率分别为 7.24%和 7.81%;③三层合采时,合采稳定流量损害率为 8.83%,整体渗透率损害率不能计算,单层渗透率损害率分别为 6.48%、11.97%及 9.68%。结论认为,室内用流量法评价绒囊钻完井流体多层合采储层整体伤害率满足现场控制伤害要求,且同时印证了流量法可替代渗透率法评价工作液储层伤害程度,并为现场优选技术应用提供了新的评价方法。

关键词:储层伤害;煤层气;致密砂岩气;页岩气;流量伤害;联探并采;绒囊流体;钻完井

中图分类号:P618 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-2336(2021)03-0194-07

Study on damage of follicle drilling with fuzzy-ball fluid in coal measures three gas combined production

YANG Gang[1], WU Tong[2], MENG Shangzhi[1], LIU Hao[2], ZHANG Linqiang[1], SHI Xiangyu[2,3]

(1.*China United Coalbed Methane Corporation Ltd.*, *Beijing* 100011, *China*; 2. *School of Petroleum Engineering*, *China University of Petroleum*, *Beijing* 102249, *China*; 3.*Beijing LihuiLab Energy Technology Co.*, *Ltd.*, *Beijing* 102200, *China*)

Abstract: The engineering operation effect and reservoir damage control effect of fuzzy-ball in unconventional reservoirs such as single coalbed methane reservoirs and tight sandstone gas reservoirs all meet the field requirements. However, due to the lack of appropriate evaluation methods, the laboratory still lacks the formation damage test evaluation to the combined production reservoir, which is applied to the coal-measure combined mining formation. The laboratory test uses a reservoir damage evaluation system that can separately measure the flow and pressure of single-layer and multi-layer combined mining to simulate the pressure and temperature conditions of the Linxing coal-measure reservoir. A total of seven sandstones in the Shihezi Formation and Taiyuan Formation are selected. Adopting the gas constant flow method to test four sets of tests in the sand/coal single-layer mining mode, the "sand + coal" double-layer combined mining mode, and the "sand + sand + coal" three-layer combined mining mode. The test records seven sets of stable flow rates before and after the damage of each layer of single mining and multi-layer combined mining, and 14 sets of inlet and outlet pressures when stable. seven sets of permeability data are calculated by Darcy's law. which was used as the basic data. The comparative flow method is used to evaluate the overall damage degree of the reservoir caused by the fleece drilling and completion fluid. The test results show that: ①When sand and

收稿日期:2020-10-18;**责任编辑**:王晓珍

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05066002-001)

作者简介:杨 刚(1986—),男,山东青州人,工程师,博士。Tel:010-84520262,E-mail:610132806@qq.com

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

coal are mined in a single layer, the steady flow damage rates are 7.96% and 7.91% respectively, which are close to 8.48% and 8.55% in the permeability damage rate. ②In the case of double-layer mining, the stable overall flow damage rate is 7.24%. The overall permeability damage rate cannot be calculated, and the single-layer permeability damage rates are 7.24% and 7.81%, respectively. ③When three layers are mined together, the overall flow damage rate is 8.83%, and the overall permeability damage rate cannot be calculated. The single layer permeability damage rate was 6.48%, 11.97%, and 9.68% respectively. The results show that the indoor evaluation of formation damage results of Fuzzy-ball drilling and completion fluids in multi-layer co-production meets the requirements of of on-site damage control, and at the same time confirms that the flow method can replace the permeability method to evaluate the damage degree of working fluid reservoirs. The application of on-site optimization technology provides a new evaluation method.

Key words: reservoir damage; coalbed methane; tight sandstone gas; shale gas; flow damage; combined exploration and production; fleece fluid; drilling and completion

0　引　　言

中国煤系天然气藏具有低压、低渗及低饱和的特点[1],要求在钻完井作业时防治工作液及滤液对储层造成伤害。基于储层特殊的储集特点,国内外研发及应用了较多关于煤系地层成熟的钻完井技术,如现有欠平衡钻井技术[2]、屏蔽暂堵技术[3]、无固相钻井液技术[4]、空气钻井技术[5]及仿生绒囊钻完井液技术[6]。其中,绒囊钻完井流体针对煤系等破碎性储层,利用其可以改变岩石力学特征参数的特点[7],在非常规油气藏的钻完井、修井[8]及储层改造[9]等领域得以应用。

研究表明,随着非常规油气藏的开发模式转向多层联探并采[10],在层间干扰等因素存在的情况下,煤系“三气”合采仍是具体可行的[11],但绒囊钻完井流体是否满足“三气”合采煤系地层的储层保护要求仍有待讨论。室内仅评价过绒囊钻完井流体对于单储层的伤害程度[12],并未开展多储层整体伤害程度评价。这是由于室内整体评价 2 个以上的储层时,由于不同类型岩心柱塞的长度、直径和渗流能力不同,导致无法计算渗透率评价合采储层伤害。

因此,广大学者改进了测试方法,郑力会等[13]利用恒流量法、柱塞脉冲衰减法及核磁共振法等 6 种评价方法的实测数据,通过“剥茧寻根”算法提出认为恒流量法最适合整体评价工作液储层伤害。其他学者也利用流量定性评价层间干扰损害程度及利用流量替代渗透率评价储层伤害程度[14-15]。

在煤系地层的钻完井过程中[16],绒囊流体通过低密度、无固相[17]及原位降解[18],实现储层伤害控制。以柳林地区 26 口煤层气井为例,钻遇石盒子组致密砂岩和山西组 3、4、5 号等合采煤系储层,发现采用绒囊流体钻完井后除见气时间略长于其他类型的钻井液以外,其他的工程效果较优于邻井效果,其性能满足临兴-神府现场的钻完井液要求,且多储层作业的储层保护效果也满足现场伤害控制要求。

为此,笔者利用临兴地区煤系地层煤岩、砂岩共 7 枚岩心,采用恒流量法开展单层、整体试验共 4 组,评价绒囊钻完井流体造成的储层整体伤害程度,并为现场优选技术应用提供室内理论依据。

1　绒囊钻完井流体伤害储层测试过程

室内利用自研制的多层合采储层伤害评价仪进行试验。装置能够任意并联多个岩心柱塞,模拟单个或多储层开采情况,并装有单个或整体记录流量和压力的测试仪器,如图 1 所示。

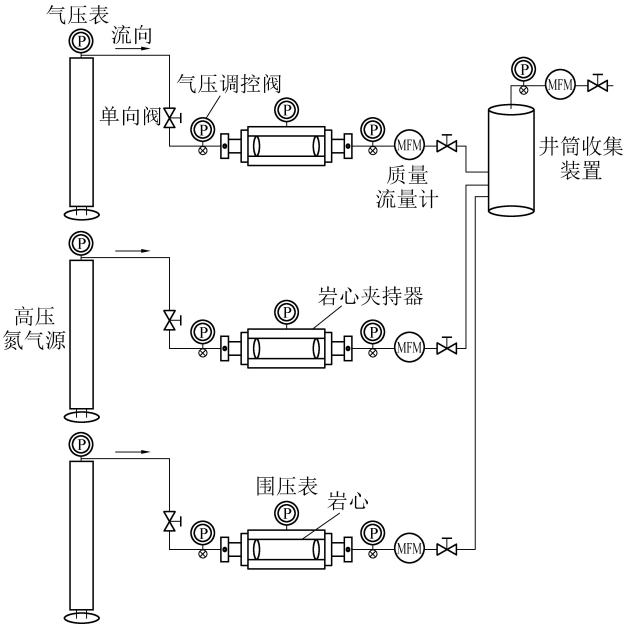


图 1　多层合采储层伤害评价仪器示意

Fig.1　Schematic of multi-layer co-production formation damage testing instrument

试验时高压气瓶为提供稳定进口压力的高压氮气源。上、中、下 3 层岩心加持器可以模拟三轴状态下的地层压力情况,同时可以加热模拟地层温度。通过调节岩心夹持器出口的阀门和井筒收集装置,可以模拟不同的现场开采状态。

绒囊钻完井流体按照临兴煤系地层研制的1.5%

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

囊层剂+1%绒毛剂+0.075%囊膜剂+0.075%囊核剂质量分数配制,密度为 0.93 g/cm^3,pH 值为 10,表观黏度为 39.0 mPa·s,塑性黏度为 22.0 mPa·s。

岩心柱塞选取鄂尔多斯盆地下石盒子组致密砂岩与太原组煤岩,钻切制备成直径约为 2.540 cm,长度 4.176~6.060 cm 的样品柱塞 7 枚,用于开展砂岩、煤岩单层开采,砂岩+煤岩双层合采,以及砂岩+砂岩+煤岩 3 层合采条件下的绒囊流体伤害评价试验。试验测试前,参考岩心分析方法标准,清洗和烘干岩心,根据现场地层水矿化度配制饱和柱塞所用的模拟地层水,并计算每块柱塞的孔隙度。

岩心柱塞的组合模式、柱塞直径、柱塞长度和孔隙度,见表 1。

表 1　试验岩心基础数据

Table 1　Basic data of experimental core

组合模式		样品编号	柱塞直径/cm	柱塞长度/cm	孔隙度/%
单层开采	砂	ZS-2-24	2.474	5.996	7.32
	煤	M-4-31	2.544	6.020	4.62
双层合采	砂+煤	ZS-2-34	2.540	4.612	7.15
		M-4-35	2.542	5.350	3.74
三层合采	砂+砂+煤	ZS-2-21	2.538	5.120	6.13
		ZS-2-25	2.540	5.834	6.38
		M-4-38	2.524	4.866	3.15

由表 1 可知,岩心柱塞的物性参数与现场关于描述储层物性的相关资料[19-20]基本符合,可较为真实地反映现场产层的环境和参数。

将已饱和完毕的岩样装入岩心夹持器。设定砂岩层的试验温度为真实地层温度 43.0 ℃,煤岩层温度为真实地层温度 49.0 ℃,并缓慢增大围压至 2.0 MPa,排除管线内的空气。

根据现场提供的钻井、测井及试气资料得到:致密砂岩储层的地层压力约为 11.0 MPa,煤储层的地层压力约为 14.0 MPa。以此为依据调节增加岩心入口端压力,并逐步增大围压,调节过程中始终保持围压大于进口压力 1.5~2.0 MPa,直至砂岩样品进口压力达到 11.0 MPa,煤岩样品进口压力达到 14.0 MPa。注意试验所用的下部致密砂岩深度比上部致密砂岩深约 100 m,煤岩较下部致密砂岩深约 200 m。参照岩石孔隙体积压缩系数测定方法标准中压力梯度以 0.023 MPa/m 计算,取下部砂岩上覆岩层压力高于上部 2.0 MPa,煤岩上覆岩层压力分别高于上、下部致密砂岩 6.0、4.0 MPa。

室内模拟试验时观察单/合层开采砂岩、煤岩流量情况,并与现场产量折算到的室内基准流量(3.083~9.434 cm^3/s)进行对比。

1)若单/合层开采流量低于 3.083 cm^3/s,则认为所用岩心样品过于致密,不具备表征真实地层渗流情况,更换样品按照上述步骤继续测定。

2)若单/合层开采流量为 3.083~9.434 cm^3/s,则判定此时的围压可以作为试验围压进行下步测试。

3)若单/合层开采流量大于 9.434 cm^3/s,保持进口压力恒定,缓慢增加围压。当流量降至该区间内,且围压不超过岩心所在深度压力(0.023 MPa/m)时,则选择此时的围压作为室内测试的围压。这是为了消除岩心在取心过程中由于应力释放导致的误差。若围压超过岩心所在深度压力,且单/合层开采流量仍大于 9.434 cm^3/s,则更换岩心直至符合区间要求。

模拟伤害时,参考钻井液完井液损害油层室内评价方法标准,将配置好的绒囊钻完井流体作为伤害液,伤害试验所用岩心。试验时需要注意,岩心的污染方向和采气方向为岩心柱塞两端不同端面。

1.1　单层开采绒囊钻完井流体伤害试验测试过程

单层开采储层伤害评价时,试验流程参考上述流程进行操作,测试并记录单层开采绒囊钻完井流体伤害试验数据,见表 2 和表 3。

表 2　砂岩单层开采绒囊钻完井流体伤害评价试验数据

Table 2　Experimental data for evaluation of working fluid damage in sandstone single layer mining

伤害前后	围压/MPa	进口压力/MPa	出口压力/MPa	渗透率/10^{-3} μm^2	稳定流量/(cm^3·s^{-1})
伤害前	18	11.05	0.04	0.034	9.217
伤害后	18	11.09	0.03	0.031	8.483

表 3　煤岩单层开采绒囊钻完井流体伤害评价试验数据

Table 3　Experimental data for evaluation of working fluid damage in coalbed single layer mining

伤害前后	围压/MPa	进口压力/MPa	出口压力/MPa	渗透率/10^{-3} μm^2	稳定流量/(cm^3·s^{-1})
伤害前	20	14.01	0.03	0.015	6.950
伤害后	20	14.07	0.03	0.014	6.400

由表 2、表 3 可知,砂岩及煤岩单层开采的进口压力已经分别为 11.0、14.0 MPa,试验时的围压分别为 18.0、20.0 MPa,伤害前通过砂岩及煤岩柱塞岩心的单层流量为 3.083~9.434 cm^3/s,表明该模拟试验能够反映现场单层开发状况。

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

1.2　双层合采绒囊钻完井流体伤害试验测试过程

双层开采储层伤害评价时,试验流程参考上述流程进行操作,测试并记录双层合采绒囊钻完井流体伤害试验数据,见表 4。试验时需要注意下部砂岩围压比煤岩低。

表 4　"砂+煤"双层合采绒囊钻完井流体伤害评价试验数据

Table 4　Statistical data of "sandstone + coalbed" double-layer co-production working fluid damage evaluation experiment

伤害前后	围压/MPa	进口压力/MPa	出口压力/MPa	单层渗透率/$10^{-3}\mu m^2$	单层稳定流量/($cm^3 \cdot s^{-1}$)	合采稳定流量/($cm^3 \cdot s^{-1}$)
伤害前	29.0	10.94	0.06	0.015	5.500	9.217
	32.5	14.11	0.07	0.006	3.300	
伤害后	29.0	11.01	0.06	0.014	5.167	8.550
	32.5	14.07	0.06	0.006	3.050	

由表 4 可知,砂岩+煤岩双层合采组合符合现场实际产层开发组合模式,各自单层进口压力分别约为 11.0、14.0 MPa,与实际地层压力接近。砂岩围压 29.0 MPa 和煤岩围压 32.5 MPa,是实际产层所受上覆岩层压力的等效模拟。伤害前的合采流量为 9.217 cm^3/s,介于 3.083~9.434 cm^3/s,表明该模拟试验能够反映现场开发状况。

1.3　三层合采绒囊钻完井流体伤害试验测试过程

三层开采储层伤害评价时,试验流程参考上述流程进行操作,测定并记录三层合采绒囊钻完井流体伤害试验数据,见表 5。

由表 5 可知,砂岩+砂岩+煤岩三层合采组合符合现场实际产层开发组合模式,各自单层进口压力分别为 11.07、11.03、14.05 MPa,与实际地层压力接近。上部致密砂岩围压 18.0 MPa、下部致密砂岩围压 19.0 MPa 和煤岩围压 20.5 MPa,且下部致密砂岩较上部围压高 1.0 MPa,煤岩又较下部致密砂岩高 1.5 MPa,反映了砂岩层和煤层受力情况,且伤害前的合采流量为 9.432 cm^3/s,介于 3.083~9.434 cm^3/s,表明该模拟试验能够反映现场开发状况。

表 5　"砂+砂+煤"三层合采工作流体伤害评价试验数据

Table 5　Statistical data of "sandstone+sandstone+coalbed" three-layer co-production working fluid damage evaluation experiment

伤害前后	围压/MPa	进口压力/MPa	出口压力/MPa	单层渗透率/$10^{-3}\mu m^2$	单层稳定流量/($cm^3 \cdot s^{-1}$)	合采稳定流量/($cm^3 \cdot s^{-1}$)
伤害前	18.0	11.07	0.05	0.011	3.600	9.432
	19.0	11.03	0.06	0.014	4.116	
	20.5	14.05	0.03	0.003	1.715	
伤害后	18.0	10.99	0.04	0.010	3.317	8.600
	19.0	11.06	0.06	0.013	3.650	
	20.5	14.03	0.03	0.003	1.533	

2　测试结果与讨论

单层伤害评价结果既参考稳定流量的变化结果,也考虑渗透率的变化结果。其中,稳定流量是指在连续 4 个相邻时刻(每个时刻相隔 3 min),通过岩样的气体体积误差均在 5%以内的稳定实时流量。

按公式(1)和公式(2)计算绒囊钻完井流体伤害储层前后的渗透率,按公式(3)计算储层渗透率的伤害程度。

$$K_{oi} = \frac{2p_0 Q_{oi}\mu L}{(p_1^2 - p_2^2)A} \times 10^2 \quad (1)$$

$$K_{di} = \frac{2p_0 Q_{di}\mu L}{(p'^2_1 - p'^2_2)A} \times 10^2 \quad (2)$$

$$D_K = \frac{K_{oi} - K_{di}}{K_{oi}} \times 100\% \quad (3)$$

式中:K_{oi}为岩样初始渗透率,$10^{-3}\mu m^2$;p_0为测试条件下的标准大气压,MPa;Q_{oi}为初始某一时刻气体通过岩样的体积,cm^3/s;μ 为测试条件下的流体黏度,mPa·s;L 为岩样长度,cm;p_1为伤害前岩样进口压力,MPa;p_2为伤害前岩样出口压力,MPa;A 为岩样横截面积,cm^2;K_{di}为接触工作流体后岩样渗透率,$10^{-3}\mu m^2$;Q_{di}为接触工作流体后某一时刻气体通过岩样的体积,cm^3/s;p'_1为伤害后岩样进口压力,

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

MPa；p'_2为伤害后岩样出口压力，MPa；D_k为渗透率损害率，%。

按公式(4)计算绒囊钻完井流体伤害储层流量的伤害程度

$$D_s = (\overline{Q}_{oi} - \overline{Q}_{di}) / \overline{Q}_{oi} \times 100\% \quad (4)$$

式中：D_s为稳定流量损害率，%；$\overline{Q}_{di}$为接触工作流体后气体通过岩样的稳定流量，cm^3/s；$\overline{Q}_{oi}$为初始气体通过岩样的稳定流量，cm^3/s。

2.1　单层开采绒囊钻完井流体储层伤害程度

将表 2 和表 3 的数据代入式(3)和式(4)，分别计算渗透率损害率和稳定流量损害率。

砂岩柱塞单层开采渗透率损害率 8.48%，流量损害率 7.96%。煤岩柱塞单层开采渗透率损害率 8.55%，流量损害率 7.91%。由达西定律可知，在单层开采时，流量和渗透率呈线性关系。渗透率损害率与稳定流量损害率大小相近，两者相差小于 1%，在砂岩及煤岩单层开采绒囊钻井流体伤害评价试验中，利用流量评价储层伤害更直观，同时也揭示现场利用流量完全可以替代渗透率对绒囊地层伤害评价。

因此可知，绒囊钻井流体单层开采时，伤害渗透率及流量伤害程度都小于 10%，试验结果满足现场对钻井液储层保护要求，且单层开采时，用流量法可替代渗透率法评价绒囊钻完井流体对储层的伤害。

2.2　双层合采绒囊钻完井流体储层伤害程度

将表 4 数据代入式(3)和式(4)，计算各个单层开采时的渗透率损害率、流量损害率及合采时的流量损害率，如图 2 所示。

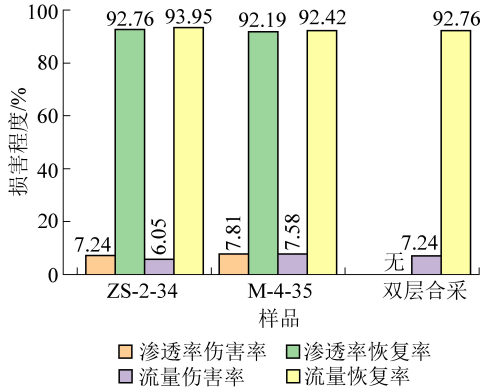


图 2　“砂+煤”双层合采工作流体伤害程度评价指标对比

Fig.2　Evaluation index comparison of damage degree of “sandstone+coalbed” double-layer co-production

由图 2 可知，双层合采绒囊流体伤害评价试验中，渗透率损害率无法定量表征双层合采整体伤害程度，但流量损害率则能够有效呈现，双层整体流量损害率为 7.24%。

通过横向对比砂岩和煤岩，砂岩渗透率损害率 7.24%和稳定流量损害率 6.05%，低于煤岩的相应指标 7.81%和 7.58%，表明不同岩性储层工作流体伤害程度确有差别，煤岩在伤害之后所需更长的时间进行恢复，但流量指标与渗透率指标的对应分布关系具有高度一致性。

同时，通过纵向对比砂岩单层开采、煤岩单层开采以及双层合采发现，砂岩和煤岩单层的流量损害率都与渗透率损害率区别不大，且流量损害率更简单直观地计算整体伤害程度，更有利于现场情况的表述。

因此可知，评价绒囊钻完井流体双层合采伤害时，各层渗透率及流量伤害程度都小于 10%，试验结果满足现场对钻井液的储层保护要求，且双层合采时，用流量法可替代渗透率法评价绒囊钻完井流体对储层的整体伤害。

2.3　三层合采绒囊钻完井流体储层伤害程度

将表 5 数据代入式(3)和式(4)，计算各个单层开采时的渗透率损害率及流量损害率和三层合采时的流量损害率，如图 3 所示。

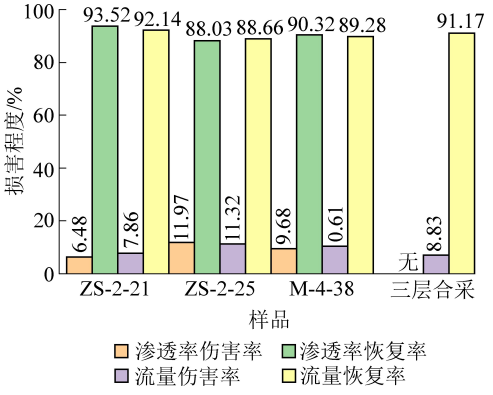


图 3　“砂+砂+煤”三层合采工作流体伤害程度评价指标对比

Fig.3　Evaluation index comparison of damage degree of “sandstone+sandstone+coalbed” three layers co-production

由图 3 可知，与双层合采工作流体伤害评价试验数据分析结果类似，三层合采绒囊流体伤害评价试验中，渗透率损害率同样无法定量表征三层合采整体伤害程度，但流量损害率则依然能够有效呈现，三层整体流量损害率为 8.83%。

通过横向对比上层砂岩、中层砂岩以及下层煤岩发现，上层砂岩渗透率损害率为 6.48%和稳定流量损害率为 7.86%，低于中层砂岩相应指标11.97%、11.32%，低于煤岩相应指标 9.68%、10.61%，且上下层砂岩各指标的平均伤害率小于 10%。砂岩与煤

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

岩的伤害数值不一样,表明绒囊流体伤害储层的程度会因储层深度和岩性不同而有所差异,但流量指标与渗透率指标的差值很小,三层岩心具有高度的相似性。

同时,通过纵向对比上层砂岩单层开采、中层砂岩单层开采、下层煤岩单层开采以及三层合采发现,各单层的流量损害率也都与渗透率损害率差值较小,且流量损害率更简单直观地计算整体伤害程度,更有利于现场情况的表述。

因此可知,评价绒囊钻完井流体三层合采伤害时,砂岩的平均伤害程度和煤岩的伤害程度都小于10%,试验结果满足现场对钻井液的储层保护要求,且三层合采时,用流量法可替代渗透率法评价绒囊钻完井流体对储层的整体伤害。

为探究单层伤害与多层伤害之间的内在规律,对致密砂岩及煤岩各自的流量伤害率进行线性拟合分析。

$$\Delta D_{ss} = -141.02 + 0.04Q_s + 14.49\Delta P_s \quad (5)$$

$$\Delta D_{sc} = 987.41 - 1.04Q_c - 32.35\Delta P_c \quad (6)$$

式中:ΔD_{ss}和 ΔD_{sc}分别为单块砂岩及单块煤岩的流量损害率,%;Q_s和 Q_c分别为砂岩及煤岩各自的稳定流量,cm^3/s;ΔP_s和 ΔP_c分别为砂岩及煤岩岩心进出口的压差,MPa。

由式(5)、式(6)可以发现,致密砂岩的流量损害率与其通过的流量呈正相关,即通过流量越高,流量损害率越高。煤岩的流量损害率与其通过的流量呈负相关,即通过流量越高,流量损害率越低。分析认为,致密砂岩的孔喉连通性相比于煤岩较好,绒囊钻完井流体侵入封堵效果较好于煤岩。煤岩的割理层理及微裂缝发育,当通过流量越高时,孔喉的流动通道恢复得越好。

将式(5)和式(6)进行加和得双层流量损害率 ΔD_{s+c}及三层流量损害率 $\Delta D_{s_1+s_2+c}$分别为

$$\Delta D_{s+c} = 846.39 + 0.04Q_s - 1.04Q_c + 13.50\Delta P_s - 68.90\Delta P_c \quad (7)$$

$$\Delta D_{s_1+s_2+c} = 705.37 + 0.04(Q_{s_1} + Q_{s_2}) - 1.04Q_c + 13.50(\Delta P_{s_1} + \Delta P_{s_2}) - 68.90\Delta P_c \quad (8)$$

式中:Q_{s_1}和 Q_{s_2}分别为上层砂岩和下层砂岩各自的稳定流量,cm^3/s;ΔP_{s_1}和 ΔP_{s_2}分别为上层砂岩和下层砂岩岩心进出口的压差,MPa。

将双/三层合采时各岩心的数据代入公式(7)和公式(8),得致密砂岩和煤岩组合条件下,双层合采流量损害率为 22.70%,三层合采流量损害率为34.78%,皆大于试验所测得的具体数据。原因分析认为,试验时各层间气体存在层间干扰,但试验时井口模拟压力为大气压强,气体汇集于井筒模拟装置,体积发生膨胀。同时可得出,试验所用流量法评价储层伤害时,其伤害值还包括层间干扰及气体滑脱效应等造成的损伤。

综上可知,室内评价绒囊钻完井流体在单层开采、双层及三层合采时的结果满足现场对钻井液的储层保护要求,且印证了流量法测定储层整体伤害程度的可行性。

3　结　　论

1)运用流量法可以定量评价在多气合采时绒囊钻井液造成的储层伤害,通过对照储层渗透率伤害程度的相关标准及现场要求,其伤害程度小于12%的试验结果满足现场多气合采的储层保护要求。

2)利用流量法在实际的多气合采作业时,具有更为简单直观的特点,但由于无法剥除层间干扰及滑脱效应等因素,现场在利用该方法优选钻完井流体时需要注意。

3)采用流量法评价绒囊钻完井流体对多气合采储层的伤害,仅从数值上给予评价。但储层伤害程度的弱强由于没有划分依据没有给出定性评价,也是未来研究的主攻方向。

参考文献(References):

[1] 杨陆武,孙茂远.中国煤层气藏的特殊性及其开发技术要求[J].天然气工业,2001(6):17-19,112.
YANG Luwu,SUN Maoyuan.The particularity of China's coalbed methane reservoirs and its development technology requirements[J].Natural Gas Industry,2001(6):17-19,112.

[2] 韩宝山.欠平衡钻井技术与煤层气开发[J].煤田地质与勘探,2002,30(4):61-62.
HAN Baoshan.Under balance pressure drilling technology and coalbed gas development[J].Coal Geology & Exploration,2002,30(4):61-62.

[3] 彭　旭,郝世俊,陈姣妮.小庄井田煤层气钻井液与完井液应用研究[J].煤矿安全,2017,48(7):20-24.
PENG XU,HAO Shijun,CHEN Jiaoni.Application of coal bed methane drilling fluid & completion fluid in Xiaozhuang coal field[J].Safety in Coal Mines,2017,48(7):20-24.

[4] 张振华.辽河盆地小龙湾地区煤层气井钻井液技术探讨[J].特种油气藏,2005(5):68-71,108.
ZHANG Zhenhua.Discussion on drilling fluid for coal-bed gas well of Xiaolongwan area in Liaohe Basin[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2005(5):68-71,108.

[5] 黄洪春,卢　红.用空气钻井开发晋城煤层气技术研究[J].煤田地质与勘探,2003,31(4):61-64.
HUANG Hongchun,LU Hong.Study of development coalbed methane using air drilling technology in Jincheng area[J].Coal Ge-

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

ology & Exploration,2003,31(4):61-64.

[6] 郑力会,孔令琛,曹　园,等.绒囊工作液防漏堵漏机理[J].科学通报,2010,55(15):1522-1530.
ZHENG Lihui,KONG Lingchen,CAO Yuan,*et al*.The mechanism for fuzzy - ball working fluids for controlling & killing lost circulation [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55 (15): 1520-1528.

[7] ZHENG Lihui,SU Guandong,LI Zhonghui,*et al*.The wellbore instability control mechanism of fuzzy ball drilling fluids for coal bed methane wells via bonding formation[J].Journal of Natural Gas Science and Engineering,2018,56:107-120.

[8] 魏攀峰,臧　勇,陈现军,等.绒囊钻井液处理煤层气钻井上漏下塌地层的施工工艺[J].天然气工业,2018,38(9):95-102.
WEI Panfeng, ZANG Yong, CHEN Xianjun, *et al*. Application of fuzzy-ball drilling fluid technology to CBM gas wells through the strata with lost circulation in the upper parts and collapse in the lower parts[J].Natural Gas Industry,2018,38(9):95-102.

[9] 郑力会,翁定为.绒囊暂堵液原缝无损重复压裂技术[J].钻井液与完井液,2015,32(3):76-78,108.
ZHENG Lihui,WENG Dingwei.Study on repeating fracturing while causing no damage to original fractures[J].Drilling Fluid & Completion Fluid,2015,32(3):76-78,108.

[10] 郑力会,魏攀峰,张　峥,等.联探并采:非常规油气资源勘探开发持续发展自我救赎之路[J].天然气工业,2017,37(5):126-140.
ZHENG Lihui, WEI Panfeng, ZHANG Zheng, *et al*. Joint exploration and development:A self-salvation road to sustainable development of unconventionaloil and gas resources[J].Natural Gas Industry,2017,37(5):126-140.

[11] 孟尚志,李　勇,王建中,等.煤系“三气”单井筒合采可行性分析——基于现场试验井的讨论[J].煤炭学报,2018,43(1):168-174.
MENG Shangzhi,LI Yong,WANG Jianzhong,*et al*.Co-production feasibility of “Three gases”in coal measures:discussion based on field test well[J].Journal of China Coal Society,2018,43(1):168-174.

[12] 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):439-442.
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),439-442.

[13] 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 Lihui, LI Xiuyun, SU Guandong, *et al*. Applicability of working fluid damage assessment methods for coalbed methane reservoirs[J].Natural Gas Industry,2018,38(9):28-39.

[14] 冯　毅,魏攀峰,段长江,等.室内定量试验评价临兴地区致密砂岩气两层合采产量变化[J].非常规油气,2017,4(6):40-44.
FENG Yi,WEI Panfeng,DUAN Changjiang,*et al*.Quantitative evaluation on the change of dual reservoir commingled production of tight sandstone gas in Linxing Area through indoor experiment [J].Unconventional Oil & Gas,2017,4(6):40-44.

[15] 郑力会,刘　皓,曾　浩,等.流量替代渗透率评价破碎性储层工作流体伤害程度[J].天然气工业,2019,39(12):74-80.
ZHENG Lihui,LIU Hao,ZENG Hao,*et al*.Evaluation of working fluid damage in fractured reservoirs using flow rate instead of permeability[J].Natural Gas Industry,2019,39(12):74-80.

[16] 魏攀峰,臧　勇,陈现军,等.绒囊钻井液处理煤层气钻井上漏下塌地层的施工工艺[J].天然气工业,2018,38(9):95-102.
WEI Panfeng,ZANG Yong,CHEN Xianjun,*et al*.Application of fuzzy-ball drilling fluid technology to CBM gas wells through the strata with lost circulation in the upper parts and collapse in the lower parts[J].Natural Gas Industry,2018,38(9):95-102.

[17] 吕帅锋,王生维,乌效鸣,等.沁水盆地煤层气井钻井液技术现状和发展方向[J].中国煤层气,2016,13(5):44-47.
LYU Shuaifeng, WANG Shengwei, WU Xiaoming, *et al*. Current situation and development direction of drilling fluid technology for CBM wells in Qinshui basin[J].China Coalbed Methane,2016,13(5):44-47.

[18] ZHANG Yan,SU Guandong,ZHENG Lihui,*et al*.The environmental friendliness of fuzzy-ball drilling fluids during their entire life-cycles for fragile ecosystems in coalbed methane well plants [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 364 (FEB. 15): 396-405.

[19] 郭本广,许　浩,孟尚志,等.临兴地区非常规天然气合探共采地质条件分析[J].洁净煤技术,2012,18(5):110-112,115.
GUO Benguang, XU Hao, MENG Shangzhi, *et al*. Geology condition analysis for unconventional gas co-exploration and concurrent production in Linxing area[J].Clean Coal Technology,2012,18(5):110-112,115.

[20] 吴　蒙,朱　超,秦云虎,等.临兴地区山西组致密砂岩气开采潜力地质评价方法[J].吉林大学学报(地球科学版),2020,50(4):991-1002.
WU Meng,ZHU Chao,QIN Yunhu,*et al*.Geological evaluation method of tight sandstone gas exploitation potential in shanxi formation in Linxing area[J].Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2020,50(4):991-1002.