

大庆徐深气田致密气藏间歇开井增产机理

范学君

中国石油大庆油田有限责任公司试油试采分公司 黑龙江大庆 163412

通讯作者:Email:fanxuejun01@petrochina.cn

项目支持:中国石油天然气股份有限公司“十三五”重大科技项目“松北深层天然气富集规律、勘探技术研究与规模增储”(2016E-0203)

引用:范学君. 大庆徐深气田致密气藏间歇开井增产机理[J]. 油气井测试,2020,29(5):14-20.

Cite: FAN Xuejun. Production stimulation mechanism of intermittent well opening in tight gas reservoirs in Daqing Xushen gas field [J]. Well Testing, 2020,29(5): 14-20.

摘要 大庆致密气藏储层物性差,自然测试产能较低,采用大规模多段压裂以实现储量动用和提高单井产能的方法,难以确定本类储层增产原因。对徐家围子致密气区块气藏岩心的微观渗吸置换室内实验进行研究,优化出 3 种类型储层:Ⅰ类储层渗吸效果好,产能增加明显;Ⅱ类储层渗吸效果一般,产能增加不多;Ⅲ类储层几乎无渗吸,产能无增加;根据储层类别,确定间歇开井时机、优化及完善求产技术。经对Ⅰ类储层 Y9 井进行间歇开井增产实验,关井 16 d 渗吸置换,重新开井测气,产量增加 83%。该研究结果提高了对徐家围子区域总体认识,指导了区域间歇开井后试气求产,为求产工艺提供了技术指导。

关键词 徐深气田;致密气藏;储层分类;间歇开井;试气;产能;岩心实验

中图分类号:TE353 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.05.003

Production stimulation mechanism of intermittent well opening in tight gas reservoirs in Daqing Xushen gas field

FAN Xuejun

Oil and Production Testing Branch, PetroChina Daqing Oil Field Co. Ltd., Daqing, Heilongjiang 163412, China

Abstract: The physical properties of Daqing tight gas reservoirs are poor, and its productivity of natural testing is low. Large-scale multi-stage fracturing can be used to enhance reserve utilization and increase single-well productivity, but it is difficult to determine the reasons for the increase in production of the fractured reservoir. Through laboratory experiments of microscopic imbibition and displacement on cores from tight gas reservoirs in Xujiaweizi block, three types of reservoirs are optimized: Type I reservoirs have a good imbibition effect with an obvious productivity increase; Type II reservoirs have a general imbibition effect, and the productivity increase is not that much; Type III reservoirs have almost no imbibition and no productivity increase. According to the reservoir classification, determine the timing for intermittent well opening, optimize and perfect the production calculation technology. After performing a stimulation experiment with intermittent well opening for Well Y9 in type I reservoir, reopen the well for gas testing after imbibition and replacement during shut-in for 16 days well, the production increased by 83%. The study improves overall understanding of the Xujiaweizi region, can guide production calculation with gas testing after regional intermittent well opening, and can provide technical guidance for the production calculation process.

Keywords: Xushen gas field; tight gas reservoir; reservoir classification; intermittent well opening; gas testing; productivity; core experiment

近年来,大庆勘探重点领域主要围绕安达凹陷沙河子组致密储层砂砾岩,该储层绝大多数是陆相沉积产物,具有孔隙度细小,低孔低渗($\phi < (3\% \sim 8\%)$ 、 $K < 0.01 \text{ mD}$),孔喉结构复杂,束缚水饱和度高,微裂缝发育,孔隙压力小,压后产能差异大等特点。沙河子组致密气通过大规模套管压裂,在不同区块均取得了一定产能突破(36 口井,15 口井工

业),但总体效果不佳。本次进行致密储层压裂后增产机理的深入分析,为求产工艺提供技术指导。

康莉霞等^[1]针对复杂气藏不稳定渗流机理,建立了同时考虑二者影响的碳酸盐岩气藏渗流模型,分析了应力敏感性和非达西效应对产量的影响,为气藏的产量规律提供了理论支持。师煜涵^[2]、王牧邦等^[3]、吴润桐等^[4]针对压裂后关井过程,结合现

代科学技术,从定性和定量两个方面研究了渗吸理论和渗吸规律,加强实验和现场应用的结合,对渗吸研究工作具有指导和借鉴意义。韦青等^[5]、李晓骁等^[6]、刘秀婵等^[7]针对不同的低渗透砂岩储层进行了渗吸研究,指出适合渗吸增产的孔吼类型及其它作用力,得出了中孔隙更有利于致密砂岩储层渗吸的进行。林潼等^[8]、高陪^[9]、张争^[10]、耳闯等^[11]则针对页岩等压裂后影响因素,用相关实验的方法研究,发现低渗气井普遍具有低孔、低渗的特点,气、水及少量的油赖以流动的通道很窄,渗流阻力很大,存在着相应的毛细管力及表面张力,并定性分析了长关井与产能的关系。徐兵威等^[12]、任凯等^[13]、张寅等^[14]针对致密砂岩储层自然产能低,不易返排,在压裂过程中,压裂液不可避免地进入储层,造成储层损害从而影响压裂效果的情况,开展了不同闷井时间、压裂液与储层的配伍性、返排率等因素对储层损害的影响,对于优化压裂液具有重要的指导意义。吕诗阳^[15]、周德胜等^[16]在储层精细地质建模的基础上开展渗吸实验的表征、数值模拟研究,并且针对实际研究区块讨论了压力敏感性、裂缝导流能力和完井方式对生产动态的影响,评价了低渗透气井产能的影响因素。张志强等^[17]、黄小亮等^[18]通过岩心、岩石薄片、扫描电镜、全岩 X 射线衍射分析及压汞实验,对致密储集层应力敏感性进行了综合分析,评价了不同应力下致密储层的渗吸效果。

1 数理模型分析

通过研究复杂力学作用下压裂液入侵-返排微观渗流数理模型,分析渗吸机理的微观力学行为,可以进一步评价压裂液在储层中的动态分布特征。

1.1 致密储层数理模型的建立

建立模型的整体思路主要是基于渗吸过程中的裂缝压力、孔隙压力、黏滞力、毛管压降和渗透压的力学平衡,即

$$\sum (p_f - p_p - p_u + p_c + p_{\pi}) = 0 \tag{1}$$

式中: p_f 为裂缝压力,MPa; p_p 为孔隙压力,MPa; p_u 为黏滞阻力,MPa; p_c 为毛管压降,MPa; p_{π} 为渗透压,MPa。

气相排出过程中,主要受到黏滞阻力 p_u 、孔隙压力 p_p ,其中动力来源于毛管力 p_c 、渗透压力 p_{π} 、裂缝压力 p_f 。模型的主要影响参数为:不同储层组分

及含量,不同孔隙尺度及孔径分布,不同工作制度(压裂或关井)。通过分析上述影响机理,对模型进行求解(图 1)。

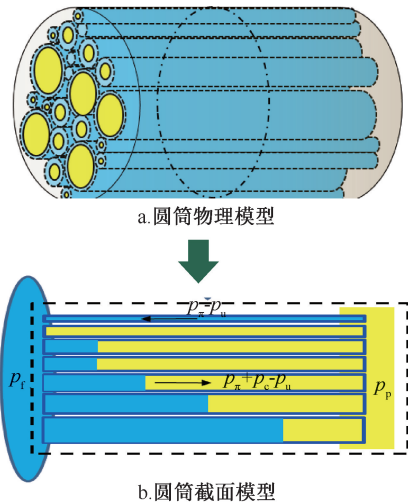


图 1 压裂液返排过程中的物理模型
Fig. 1 Physical model in the flowback process of fracturing fluid

分析认为,入侵-返排过程中,压裂液在不同储层组分中受力特征存在差异,见表 1。影响机理如图 2 所示。

表 1 压裂液在不同储层组分中受力特征
Table 1 Force carrying characteristics of fracturing fluid in different reservoir components

入侵特征	致密砂岩组分	
	石英等亲水矿物	黏土矿物(蒙、伊、高)
动力	驱替压差、毛管压降	驱替压差、毛管压降、渗透压
阻力	黏滞力	黏滞力
流动方式	小孔隙沿水相流动;中孔隙沿水膜流动;大孔隙驱替气相流动	小孔隙沿水相流动;中孔隙沿水膜流动;大孔隙驱替气相流动

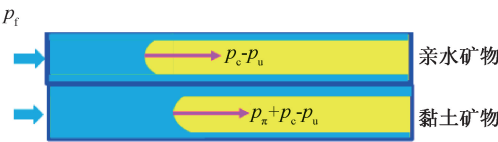


图 2 不同储层组分压裂液入侵过程示意图
Fig. 2 Intrusion process of fracturing fluids in different reservoir components

图 2 中分析了压裂液在亲水矿物储层中入侵过程,提供动力毛管压降 p_c 需要克服黏滞阻力 p_u ;另外,压裂液在黏土矿物储层中入侵过程,动力毛管压降 p_c 、渗透压 p_{π} 需要克服黏滞阻力 p_u ,流体才能入侵到储层内部驱替天然气。

1.2 压裂后返排机理分析

考虑储层原始气水赋存特征,分析了压裂液的

入侵-返排模式(图3),结果表明压裂液可沿三种途径侵入地层:饱含水小孔隙流动,沿水膜流动,驱动大孔隙气体流动;前两者对于补充地层能力起积极作用,而驱替气相则阻塞流动通道,不利于产能;压后关井过程会导致气水的重新分布:小孔隙气体“置换”到大孔隙或裂缝,关井可能不利于压裂液返排,但有利于气体采出。

1.2.1 直接返排

直接返排过程中,压裂液直接返排,主要驱替大孔隙压裂液,解放部分流动通道,残余在小孔隙的压裂液不能返排。如图4所示, T_0 至 T_1 时刻压裂液入侵储层主要占据大孔隙,直接返排后, T_1 至 T_2 时刻大孔隙的气体直接替挤排出,中小孔隙的气体不能排出,表现为:①部分压裂液通过原始饱和水的小孔隙入侵,该压裂液无法返排;②侵入中孔隙的压裂液由于毛管阻力较大无法返排;③侵入大孔隙的压裂液容易返排。压裂液返排率相对较高,但小孔隙的残余气基本很难采出。

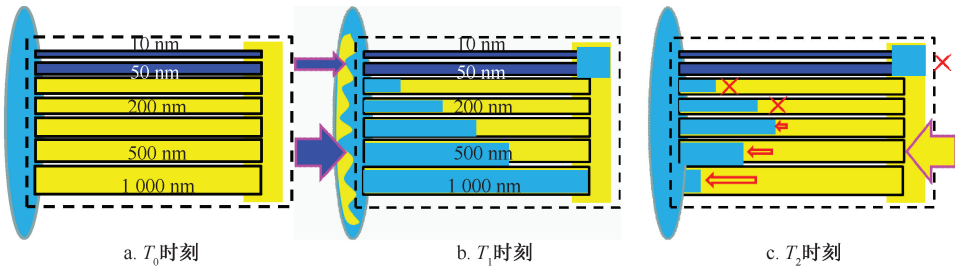


图4 直接返排时不同时刻压裂液赋存状态示意图
Fig.4 Occurrence state of fracturing fluid at different times during direct flowback

1.2.2 压裂后间歇返排机理分析

含水饱和度微观分布特征:由于关井后不存在流体注入及驱替压差,裂缝周围的压裂液在渗吸作

用下进一步渗入储层,流体进行了再分布(图5),从“水芯”转化为“水膜”(气-液作用力小于液-液作用力)。

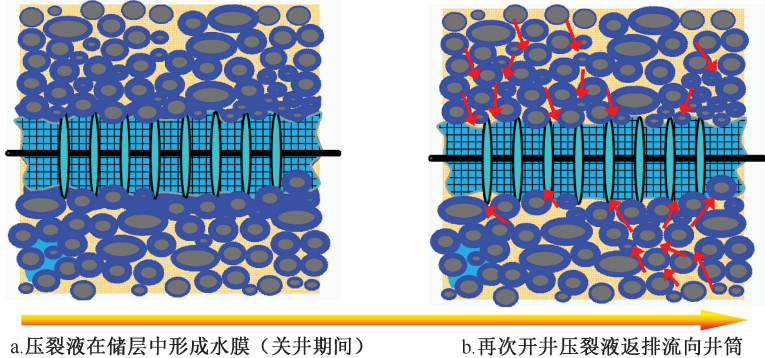


图5 关井后返排压裂液渗吸进入近裂缝面示意图
Fig.5 Backflow fracturing fluid seeps into the near-fracture surface after shut-in

间歇关井过程中,近裂缝面的压裂液渗吸入储层深部,解放近井地带的流动通道,对产能有利。

图6中所示 T_0 至 T_1 时刻压裂液入侵储层主要占据大孔隙。当关井后,储层发生置换作用, T_3 至 T_4 时

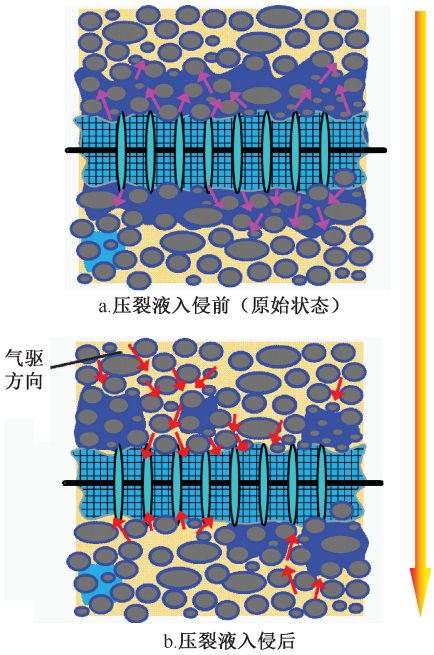


图3 压裂液入侵前后方向孔道示意图
Fig.3 Directional holes before and after fracturing fluid intrusion

刻中小孔隙的气体被置换出来。表现为:①压裂液返排率相对较低;②小孔隙的气相被压裂液置换至

大孔隙,小孔隙残余气程度较低。相比于直接返排,导致采收率更高。

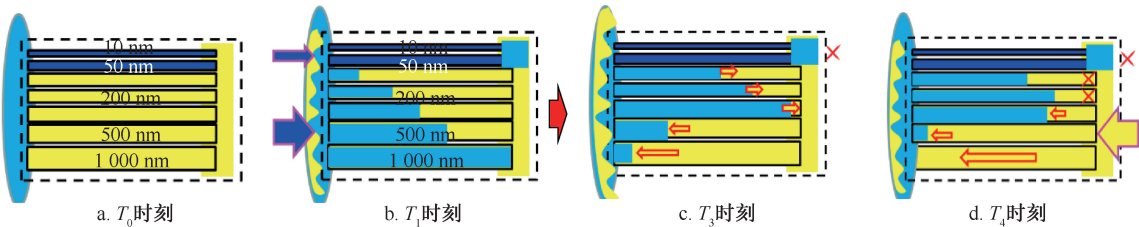


图 6 间歇返排时不同时刻压裂液赋存状态示意图
Fig. 6 Occurrence state of fracturing fluid at different times during intermittent flowback

2 致密气增产实验分析

开展了大庆徐家围子致密气 70 组岩心实验,包括岩心表征处理,孔渗测量,岩土矿物 X 射线衍射分析及黏土矿物分析,岩心压汞实验测试不同参数对渗吸采油效率的影响程度,电镜扫描实验测定岩心孔喉结构特征,测定压裂液与岩心样品之间的接触角等,进而判断岩心润湿性及研究目标储集层不同参数对渗吸置换率的影响程度。

2.1 致密气岩心室内测定实验评价

通过实验,测定了沙河子组岩心孔隙度为 1%~5%、渗透率小于 0.54%,该类储层均属于低孔致密类型;润湿性实验测定接触角主要分布于 20°~25°之间,较强的亲水性;黏土矿物测定,沙河子组部分储层石英和黏土含量都较高;观察了微观孔吼结构、裂缝发育状态,孔喉半径主要分布在 50~200 nm,普遍发育成岩裂缝,是渗吸和渗流的主要通道(表 2)。

表 2 致密气储层岩石压汞实验测定孔隙、裂缝发育情况

Table 2 Development of pores and fractures measured by mercury intrusion experiments using tight gas reservoir rocks

储气或渗流空间		特征	对应井号
孔隙	原生粒间孔	储气和渗流最重要通道	X2,X16,X17,X1,Y1,X10,X32
	石英粒内孔	裂缝孤立与其它孔隙和裂缝不相连通	X10,X16,X1,Y2
	粒间溶蚀孔	储气渗流主通道	X10,X1,X32,X17
	基质溶蚀孔	黏土基质溶蚀而成,彼此有一定连通性,主要储气和渗吸空间	X1,X2,X20
裂缝	黏土基质溶蚀裂缝	成岩裂缝,单条存在,渗流重要通道	X17,X1
	长石颗粒粒间裂缝	成岩裂缝单条存在,渗流渗吸通道	X16,X17
	石英颗粒边缘溶蚀裂缝	连接粒间孔和粒内孔主要渗流通道,大量存在,开度长度大	X10,X16,X1,X20
	长石颗粒内部平行节理缝	裂缝彼此连通呈现网状	X17

2.2 致密气室内岩心增产实验分类

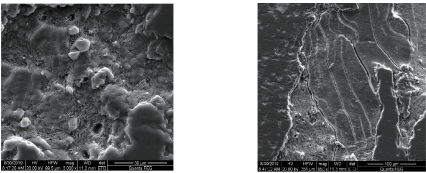
通过对 50 组致密气岩石物性、孔喉连通性等参数跟渗吸量进行关联分析,岩心渗吸效果可以分三类:

I 类储层黏土含量大于 30%,石英含量大于 30%,长石和碳酸盐岩含量大于 30%,孔喉粒径 20~1 000 nm,排替压力小于 10 MPa,束缚水饱和度小于 10%,最大孔喉半径大于 1 μm、中值半径、平均半径孔隙大于 0.1 μm,中值压力小于平均孔隙压力。退汞效率大于 50%,连通性极好。含有大量的粒间原生孔隙,溶蚀孔隙,具有多条石英边缘溶蚀缝、方解石节理缝,喉道类型以孔隙缩小型为主。沙河子组部分储层,既有利于渗吸,储气和渗流同时有利,产量较高。I 类储层大部分为中孔、岩石节理裂缝发育(图 7a1),进汞曲线平缓,连通好,渗吸效率高(图 7a2),适合渗吸后求产。

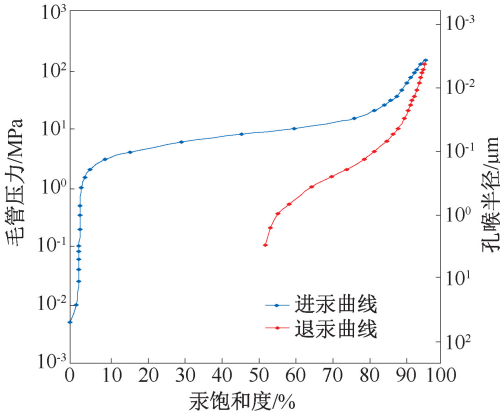
Ⅱ类储层黏土含量大于 60%,石英含量小于 30%,长石和碳酸盐岩含量小于 10%,孔喉粒径 10~250 nm,排替压力介于 10~30 MPa,束缚水饱和度介于 10%~30%,最大孔喉半径大于 1 μm、中值半径、平均半径孔隙大于 0.1 μm,退汞效率在 50%左右,含有部分粒间原生孔隙、溶蚀孔隙,含大量石英粒内孔,具有石英边缘溶蚀缝,喉道类型以片状和弯片状为主,沙河子组部分储层,较有利于渗吸,但渗流采气能力弱于 I 类储层,有一定储气能力。Ⅱ类储层有少量大孔,微孔、裂缝较少(图 7b1),进汞曲线较陡,连通一般,渗吸效率较低(图 7b2),不适合渗吸。

Ⅲ类储层黏土含量小于 10%,石英含量大于 30%,长石和碳酸盐岩含量小于 20%,孔喉粒径 10~250 nm,排替压力大于 30 MPa,束缚水饱和度大于

30%,最大孔喉半径小于 $1\text{ }\mu\text{m}$,中值半径、平均半径孔隙小于 $0.1\text{ }\mu\text{m}$,退汞效率小于 50%,连通性极差。有溶蚀孔隙和石英粒内孔,缺少连通裂缝,如石英颗粒边缘裂缝和粒间裂缝,喉道类型以弯片状为主,以基底储层为代表,物性较差,缺乏黏土矿物,渗吸不利,具有一定渗流能力,储气能力一般。Ⅲ类储层孔、渗均较差,天然裂缝不发育(图 7c1),进汞曲线陡,连通不好,渗吸效率差(图 7c2),不适合渗吸。

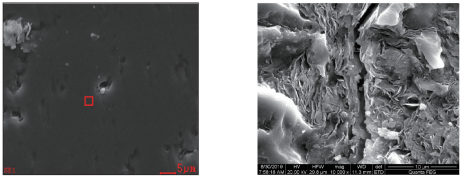


a1. 岩心微观电镜扫描图片

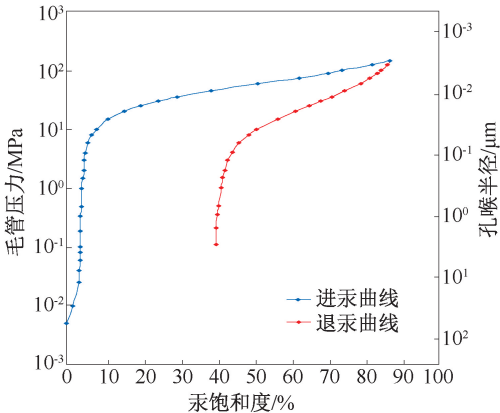


a2. 毛管压力曲线

a. I 类储层

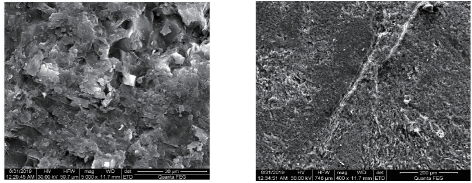


b1. 岩心微观电镜扫描图片

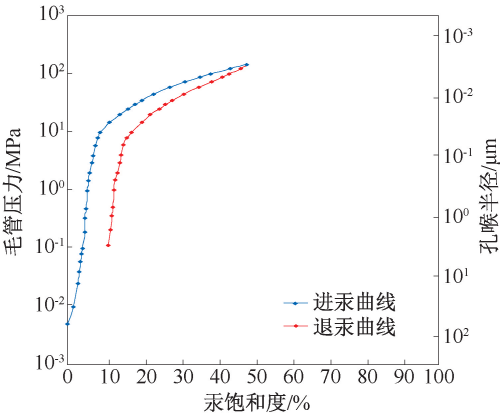


b2. 毛管压力曲线

b. II 类储层



c1. 岩心微观电镜扫描图片



c2. 毛管压力曲线

c. III 类储层

图 7 不同类别储层渗吸划分

Fig. 7 Imbibition division of different types of reservoirs

3 应用实例

Y9 井沙河子组压裂 13 段,取实验岩心为第 6~7 段,孔隙度 3.44%,渗透率 0.028 mD。亲水性强,矿物构成以石英和黏土为主,发育原生粒间孔、石英粒内孔。压汞实验孔喉分布范围 4~1 000 nm,喉道连通性好,中等-中孔为主。孔隙连通性好有利于渗吸,同时缝网裂缝沟通较好,对储气,渗吸和渗流极为有利,实验渗吸效率 62%(图 8),评价该岩心属于 I 类储层。因此,对本井进行了间歇开井增产(图 9)。

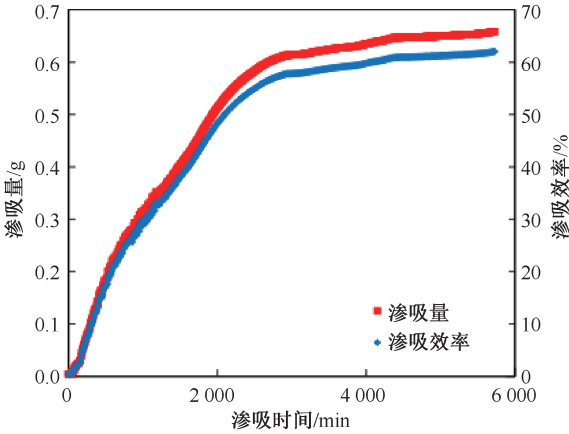


图 8 Y9 井岩心渗吸实验数据曲线

Fig. 8 Data curve of core imbibition experiment for Well X9

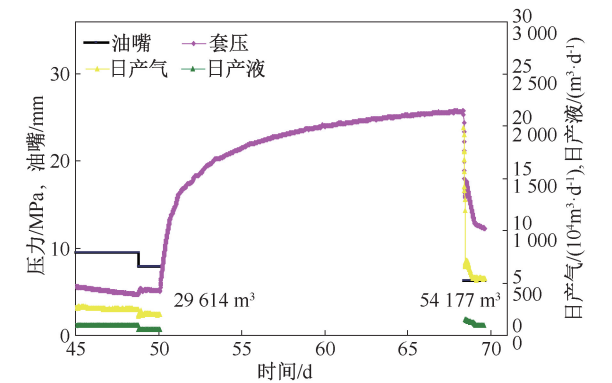


图 9 Y9 井试气排液求产曲线

Fig. 9 Production calculation curve with gas testing and liquid discharge of Well Y9

表 3 不同类别储层间歇关井后再开井产能对比

Table 3 Comparison of productivity in different types of reservoirs after intermittent well shut-in and reopening											
储层分类	井号	静态物性参数		压力系数	关井前求产			关井后求产			产能增加/%
		孔隙度/%	渗透率/mD		油压/MPa	日产气/(m³·d⁻¹)	日排液/(m³·d⁻¹)	油压/MPa	日产气/(m³·d⁻¹)	日排液/(m³·d⁻¹)	
II	Y1	3.80	0.15	1.10	4.62	25 177	64.8	5.11	20 557	23.52	8.23
II	Y2	5.86	0.11	1.49	9.87	40 201	91.2	34.72	62 036	4.60	54.30
I	Y3	7.65	0.19	1.08	8.34	29 614	192.0	13.74	54 177	120.48	82.94
II	Y4	7.80	0.15	1.37	8.97	74 507	76.8	14.56	91 025	48.00	35.00
II	Y5	2.98	0.18	1.10	14.88	48 563	345.6	15.71	115 236	374.40	137.30
I	Y6	6.20	0.08	1.38	22.90	134 166	28.8	35.69	185 000	0.00	102.80
I	Y7	4.83	0.07	1.31	18.93	87 249	201.6	29.51	201 637	9.60	131.10
I	Y8	7.71	0.51	1.34	7.05	41 930	14.4	16.03	94 831	11.40	126.20

4 结论

(1)大庆徐家围子致密气岩心孔隙实验研究表明,研究区储气孔隙主要是中孔和小孔,孔径较小,毛管力大,气孔隙主要类型为原生粒间孔、粒间溶孔,并与粒间和颗粒边缘溶蚀裂缝构成孔缝网络,发生渗吸增产几率较大。

(2)大庆徐家围子致密气岩心进行裂缝实验研究表明,研究区储层渗流空间包括大量成岩裂缝,有颗粒边缘溶蚀裂缝,粒间溶蚀裂缝,方解石解理缝,类型多样,且彼此沟通,其中以石英边缘溶蚀缝最为重要,一是其极为常见,几乎在每块岩芯样品都发现;二是其较大尺寸,长度和开度都大,达到微米级别,延伸范围较广;三是其经常与其它裂缝类型连接构成缝网系统。因此,石英和黏土含量高是该区渗吸的一个重要前提。

(3)本次针对徐家围子致密储层徐东、安达及徐中区块,从储层渗流理论数学模型出发,结合大量室内实验,分析了致密气增产机理,对该类储层优化选择间歇开井具有较强的指导性。

压裂后,采用 7.94 mm 油嘴试气求产 2.5 d,产气 29 614 m³。试验数据说明,本类储层适合关井后气液置换。地面关井 16 d 渗吸置换后,重新开井测气。6.35 mm 油嘴试气求产 2.5 d,产气 54 177 m³。产气量增加 83%,增产效果明显,说明 I 类储层较适合间歇开井增产。

依据储层类别,指导了 8 口致密气井间歇开井实验(表 3),不同类别储层间歇开井产能增幅差异较大,I 类储层产能增加较为明显。同时,水平井由于缝网体积压裂后沟通大量的天然裂缝,储层渗流能力高,属于 I 类储层,间歇开井产能增加较大,好于直井。

致谢:感谢大庆油田试油试采分公司程晓刚、黄小云两位专家的悉心指导与帮助;感谢中国石油大学石军太、张洪老师的指导。

参考文献

[1] 康莉霞,叶礼友,刘华勋,等. 碳酸盐岩气藏的渗流模型和产量递减分析方法[J]. 油气井测试, 2019, 28(5):8-15.

KANG Lixia, YE Liyou, LIU Huaxun, et al. Percolation model and production decline analysis method for carbonate gas reservoirs [J]. Well Testing, 2019. 28(5):8-15.

[2] 师煜涵. 压裂关井后产量增加原因探究[J]. 石油化工应用, 2017, 36(1):1-2,6.

SHI Yuhan. The reason of production increases after fracturing shut-in [J]. Petrochemical Industry Application, 2017, 36(1):1-2,6.

[3] 王敦邦,杨胜来,吴润桐,等. 渗吸研究中的典型问题与研究方法概述[J]. 石油化工应用, 2016, 35(7):1-4.

WANG Mibang, YANG Shenglai, WU Runtong, et al. Typical problems and research methods in the study of imbibition [J]. Petrochemical Industry Application, 2016, 35(7):1-4.

[4] 吴润桐,杨胜来,王敦邦,等. 致密砂岩静态渗吸实验研

- 究[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2017, 37(3): 24-29.
WU Runtong, YANG Shenglai, WANG Mibang, et al. Experimental study on static imbibition of tight sandstone [J]. Journal of Liaoning Shihua University, 2017, 37(3): 24-29.
- [5] 韦青, 李治平, 白瑞婷, 等. 微观孔隙结构对致密砂岩渗吸影响的试验研究[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(5): 109-116.
WEI Qing, LI Zhiping, BAI Ruiting, et al. An experimental study on the effect of microscopic pore structure on spontaneous imbibition in tight sandstones [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(5): 109-116.
- [6] 李晓晓, 任晓娟, 罗向荣. 低渗透致密砂岩储层孔隙结构对渗吸特征的影响[J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(4): 115-120.
LI Xiaoxiao, REN Xiaojuan, LUO Xiangrong. Influence of pore structures on the characteristic of spontaneous imbibition in low-permeability tight sandstone reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(4): 115-120.
- [7] 刘秀婵, 陈西洋, 刘伟, 等. 致密砂岩油藏动态渗吸驱油效果影响因素及应用[J]. 岩性油气藏, 2019, 31(5): 114-120.
LIU Xiuchan, CHEN Xiyang, LIU Wei, et al. Influencing factors of dynamic imbibition displacement effect in tight sandstone reservoir and application [J]. Lithologic Reservoirs, 2019, 31(5): 114-120.
- [8] 林潼, 冉启贵, 魏红兴, 等. 库车坳陷迪北地区致密砂岩孔喉形态特征及其对储层的影响[J]. 石油实验地质, 2015, 37(6): 696-703.
LIN Tong, RAN Qigui, WEI Hongxing, et al. Pore-throat characteristics of tight sandstones and its influence on reservoirs in Dibe area of the Kuqa Depression [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(6): 696-703.
- [9] 高陪. 致密砂岩储层渗吸特征实验研究——以 Y 致密气藏和 H 致密油藏为例[D]. 西安: 西安石油大学, 2016.
GAO Pei. Experimental study on permeability and absorption characteristics of tight sandstone reservoir——In Y tight gas reservoir and H tight reservoir as an example [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2016.
- [10] 张争. 延长西部气区山西组砂岩储层微观孔喉结构特征研究[J]. 石化技术, 2016, 23(12): 141.
ZHANG Zheng. Micro pore throat characteristics of sandstone reservoir in Shanxi formation of west Yanchang gas field [J]. Petrochemical Industry Technology, 2016, 23(12): 141.
- [11] 耳闯, 赵靖舟, 姚泾利, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长 7 油层组页岩-致密砂岩储层孔缝特征[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(3): 341-353.
ER Chuang, ZHAO Jingzhou, YAO Jingli, et al. Characterization of pores and fracture networks in organic-rich shale and tight sandstone of the Chang-7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(3): 341-353.
- [12] 徐兵威, 李雷, 何青, 等. 致密砂岩储层压裂液损害机理探讨[J]. 断块油气田, 2013, 20(5): 639-643.
XU Bingwei, LI Lei, HE Qing, et al. Discussion on damage mechanism of fracturing fluid in tight sandstone reservoir [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013, 20(5): 639-643.
- [13] 任凯, 葛洪魁, 杨柳, 等. 页岩自吸实验及其在返排分析中的应用[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(30): 106-109, 123.
REN Kai, GE Hongkui, YANG Liu, et al. Imbibition experiment of shale and its application in flowback analysis [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(30): 106-109, 123.
- [14] 张寅, 李世恩. 涪陵页岩气井焖井时间与产能关系分析[J]. 江汉石油职工大学学报, 2017, 30(5): 49-51.
ZHANG Yin, LI Shi'en. Relation analysis of shut-in time and capacity of Fuling shale gas wells [J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2017, 30(5): 49-51.
- [15] 吕诗阳. 致密气储层地球物理表征方法研究[D]. 荆州: 长江大学, 2014.
ZHE Shiyang. Research on geophysical characterization method of tight gas reservoir [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2014.
- [16] 周德胜, 师煜涵, 李鸣, 等. 基于核磁共振实验研究致密砂岩渗吸特征[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2018, 33(2): 51-57.
ZHOU Desheng, SHI Yuhan, LI Ming, et al. Study on spontaneous imbibition feature of tight sandstone based on NMR experiment [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2018, 33(2): 51-57.
- [17] 张志强, 师永民, 李鹤. 致密储集层应力敏感性分类评价[J]. 新疆石油地质, 2016, 37(1): 62-68.
ZHANG Zhiqiang, SHI Yongmin, LI He. Classified evaluation of stress sensitivity in tight reservoir rocks [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2016, 37(1): 62-68.
- [18] 黄小亮, 李继强, 雷登生, 等. 应力敏感性对低渗透气井产能的影响[J]. 断块油气田, 2014, 21(6): 786-789.
HUANG Xiaoliang, LI Jiqiang, LEI Dengsheng, et al. Influence of stress sensitivity on gas well productivity for low permeability gas reservoir [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(6): 786-789.

编辑 王 军

第一作者简介: 范学君, 男, 1968 年出生, 高级工程师, 1991 年毕业于东北石油大学采油工程专业, 现从事试气地质管理及解释评价工作。电话: 0459-5693996, 13039880501; Email: fanxuejun01@petrochina.com.cn。通信地址: 黑龙江省大庆市让胡路区乘南十八街铁人大道大庆油田试油试采分公司地质大队, 邮政编码: 163412。