文章编号:1009-9603(2019)06-0036-10

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2019.06.005

苏里格西部致密砂岩储层不同 孔隙类型下的气水渗流规律

董鑫旭¹,冯强汉²,王 冰²,杨 勃²,张永洁²,袁嘉赓²,朱玉双¹
(1.西北大学大陆动力学国家重点实验室/地质学系,陕西西安710069;
2.中国石油长庆油田分公司第三采气厂,内蒙古鄂尔多斯017300)

摘要:为了探究苏里格西部致密砂岩储层的渗流规律,选用铸体薄片、常规压汞等资料,采取定性与定量相结合的 方法对孔隙结构进行分析,在此基础上结合气水相渗测试以及可视化真实砂岩模型进行气水驱替及泄压实验,模 拟气藏成藏及开发过程中不同孔隙类型的渗流规律和流体分布。依据不同孔隙的相对含量将孔隙组合类型分为 溶孔-粒间孔、晶间孔-溶孔、溶孔-晶间孔、晶间孔4类,并对4类孔隙类型代表样品的孔喉特征及渗流规律进行分 析。结果表明:不同孔隙类型储层的渗流规律分异明显,随着储层物性越来越好,束缚水饱和度逐渐减小,束缚水 处的气相相对渗透率逐渐增大,两相共渗区不断加宽,渗流能力增强,气水相互干扰逐渐减弱;可视化气驱水驱替 类型随孔隙类型变好逐渐由指状驱替过渡为驱替程度较大的均匀驱替,在同等生烃条件下有利于天然气充注构成 有效储层;泄压实验结果表明,孔隙类型好的样品泄压所需的时间短,压力下降的幅度大,采出程度高;孔隙类型较 差的样品残留水过多,使得气相相对渗透率减小,采出程度较低。根据压汞结合相渗测试,确定研究区储层束缚水 转变为可动水的节点生产压差为7 MPa,为苏里格西部气井降低产水风险、提高采收率提供理论依据。 关键词:孔隙类型;渗流规律;致密砂岩储层;苏里格气田 中图分类号:TE135

Gas-water percolation law of tight sandstone reservoirs with different pore types in western Sulige

DONG Xinxu¹, FENG Qianghan², WANG Bing², YANG Bo², ZHANG Yongjie², YUAN Jiageng², ZHU Yushuang¹

(1.State Key Laboratory of Continental Dynamics/Department of Geology, Northwest University, Xi'an City, Shaanxi Province, 710069, China; 2.No.3 Gas Production Plant, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Ordos, Inner Mongolia, 017300, China)

Abstracts: In order to investigate the percolation law of tight sandstone reservoirs in the western Sulige, combined qualitative and quantitative methods are applied to analyze pore structure through thin section and conventional mercury injection data. Based on gas-water relative permeability test and visualized real sandstone models, gas-water displacement and pressure relief experiments are further carried out to simulate the percolation law and fluid distribution of different pore types during the process of gas reservoir formation and development. According to the proportion of different pores, the pore assemblage types can be divided into four categories: dissolution pore-intergranular pore, intercrystalline pore-dissolution pore, dissolution pore-intercrystalline pore and intercrystalline pore. The pore-throat characteristics and percolation law of representative samples of four types of pores are analyzed. The results show that the percolation law of different pore types varies obviously, and the irreducible water saturation decreases gradually with the physical properties of reservoirs with various pore types becoming better and better. The relative permeability of gas phase at irreducible water saturation increases

收稿日期:2019-04-12。

作者简介:董鑫旭(1995—),男,陕西西安人,在读硕士研究生,从事油气田开发地质研究。联系电话:18629616221,E-mail:dxx95@163. com。

通信作者:朱玉双(1968-),女,黑龙江大庆人,教授,博士。联系电话:13571916162,E-mail:yshzhu@nwu.edu.cn。

基金项目:"十三五"国家油气重大专项"鄂尔多斯盆地致密油资源潜力、甜点预测与关键技术应用"(2016ZX05046),国家自然科学基金项目"中国非常规油气储层特征"(41390451)。

•37•

gradually, the width of the two-phase percolation area increases continuously and the percolation ability is enhanced. The interaction between gas and water is reduced gradually. The visual gas-water displacement type gradually changes from finger displacement to homogeneous displacement with larger displacement degree with the improvement of pore type, which is beneficial to the formation of effective reservoirs filled with natural gas under the same hydrocarbon generation conditions. The pressure relief experiment shows that the time required for pressure relief of samples with pore type is short, the degree of pressure drop increases, and the recovery is higher. The residual water in samples with poor pore type increases, which decreases the relative permeability of gas phase and recovery. According to mercury injection and relative permeability test, the production pressure difference of the nodal point from the irreducible water to removable water in the formation is 7 MPa, which provides a theoretical basis for reducing the risk of producing water and enhancing gas recovery in the western Sulige.

Key words: pore type; percolation law; tight sandstone reservoir; Sulige Gasfield

致密砂岩气在天然气产量中占比较高,已成为 非常规油气勘探与开发的热点与现实领域,未来具 有良好的发展前景。"低孔、低渗透、低丰度"的三低 特性成为制约苏里格气田开发的瓶颈,而苏里格西 部高含水的特征又为天然气的合理开发增加了难 度[1-2]。苏里格气田在漫长的地质历史过程中经长 期沉积和众多成岩作用形成了复杂的孔喉特征,致 使渗流规律复杂多样。近年来,中外众多学者对致 密砂岩气的孔隙结构及渗流规律进行了不同角度、 不同层次的分析。尚婷等在岩心观察的基础上,经 扫描电镜、高压压汞等测试分析,得出致密砂岩气 储层物性差、非均质性强且影响因素众多[3];李海燕 等以非均质参数为依据,采用聚类分析的方法对苏 里格地区的致密孔喉结构进行定量表征[4];刘登科 等根据孔喉结构与流体赋存特征研究,得出细小喉 道及黏土矿物使水膜厚度增大堵塞渗流通道,从而 使可动流体饱和度降低[5]。前人研究主要借用实验 参数定量分析了孔喉特征与多相流体流动性的关 系,未能定性与定量相结合揭示孔喉特征对渗流规 律的影响。笔者以苏里格西部盒8段储层为研究对 象,以铸体薄片、高压压汞等分析测试为基础,采用 微观可视化真实砂岩模型气水驱替实验、多相渗流 实验,从微观的角度出发将定性与定量相结合,对 致密砂岩储层气水渗流规律进行剖析,以期为苏里 格西部气藏有效评价以及进一步提高采收率提供 参考资料与理论依据。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地属中生代大型沉积盆地,整体轮廓呈矩形,面积约为25×10⁴ km²,广义的总面积达到 36×10⁴ km²。苏里格西部位于鄂尔多斯盆地伊陕斜 坡西北部,是苏里格气田勘探、开发的重点区域。 区域构造为一近南北向展布的西倾单斜,平均坡降 为4~7 m/km,除少数鼻状构造外大都较为平缓,不 发育复杂微构造,因而形成大面积岩性气藏,具有 含气面积广、含气层系多、储量丰富的特点^[6-8]。

根据岩心观察结合前人研究可知,研究区盒8 段上亚段为曲流河三角洲平原沉积,盒8段下亚段 为辫状河三角洲平原沉积^[9-10]。由于上古生界盒8 段主要储层砂岩经历了漫长的地质作用,颗粒与颗 粒之间逐渐演变为线状的紧密接触,储集岩中原生 孔隙大部分遭受破坏,取而代之的是残余粒间孔、 各种可溶性矿物的次生溶孔以及高岭石晶间孔,构 成了盒8段低孔、低渗透的砂岩储集体系^[11-13]。研 究区储层物性整体较差,分析测试结果显示孔隙 度、渗透率均值分别为7.2%和0.48 mD,属典型致密 砂岩气藏。

2 岩石学特征

苏里格西部盒8段岩石多呈现灰白色、浅灰绿 色,表明目的层处于弱还原环境^[14]。岩石类型以粗 粒、中-粗粒石英砂岩和岩屑石英砂岩为主(图1a, 图1b),碎屑颗粒大多呈次棱角状,分选、磨圆中等。 铸体薄片资料分析表明,储层岩石骨架颗粒以石英 为主,岩屑次之,长石少见或未见。统计显示,盒8 段上亚段石英颗粒占骨架颗粒平均比例为88.1%, 低于下亚段的90.0%;岩屑组分盒8段上亚段高于 下亚段,分别占比为11.9%和9.8%,根据三端元图 可以看出盒8段上亚段以石英砂岩、岩屑石英砂岩 为主,下亚段以石英砂岩为主(图2)。

研究区盒8段上、下亚段填隙物体积分数差别 较小,分别为13.7%和13.0%(表1),成分主要以硅 质、高岭石、伊利石以及铁方解石为主,包含部分绿 泥石、铁白云石、硬石膏。其中硅质以孔隙充填、环 边加大(图1c)及隐晶质孔隙充填状为主,成分稳 定,对储层物性的影响具有双重作用,一方面在压



a—石英砂岩,S61井,3611.49m;b—岩屑石英砂岩,S65井,3563.7m;c—石英颗粒次生加大,S300井,3639m;d—绿泥石膜抑制自生石英,S187井,3665.17m;e—压实作用使塑性颗粒变形,M6井,3549.7m;f—强压实造成的缝合线,S139井,3628.98m;g—粒间孔,S61井,3611.49m;h—溶蚀孔,S65井,3563.7m;i—微裂缝,S187井,3654.65m

图1 苏里格西部盒8段岩石薄片及扫描电镜照片

Fig.1 Photographs of thin section and SEM of He8 reservoir in western Sulige



实致密的砂岩中充填孔隙起堵塞粒间孔的作用,另 一方面充填的硅质增加了岩石骨架颗粒强度反作 用于压实作用^[15];搭桥状的伊利石使原本致密的孔 喉变得更加复杂。绿泥石含量相对较少,呈薄膜状 胶结,通常抑制石英的次生加大,使得部分原生孔 隙得以保存(图1d)。

表1 苏里格西部盒8段填隙物体积分数统计

Table1 Statistical table of interstitial matter content of

He8 reservoir in western Sulige								
层位	高岭 石	水云 母	绿泥 石	凝灰 质	方解 石	铁方 解石	硅质	其他
盒8段上亚段	2.5	4.0	0.6	0.5	0.9	0.7	4.3	0.2
盒8段下亚段	3.1	3.6	0.3	0	0.9	0.9	4.2	0

3 微观孔隙结构特征

3.1 孔隙类型

23 口井92 块铸体薄片分析结果显示,研究区盒 8 段储集空间主要包括原生粒间孔、次生溶孔和晶 间孔,偶见微裂缝(表2),以次生溶孔为主,原生孔 隙次之。所取样品埋深平均为3623 m,较大的埋深 导致上覆压力较高,使得目的层经历了较强的压实 作用。镜下观察可见碎屑颗粒呈点、线接触,塑性 颗粒经强烈压实变形充填原生孔隙(图1e),颗粒间 接触关系由线接触向凹凸接触甚至缝合接触转变 (图1f),盒8段下亚段较高的石英含量使其抗压实

表2 苏里格西部盒8段储集空间组成统计

Table2 Statistical table of reservoir space composition of He8 reservoir in western Sulige								
层位	原生孔隙	次	生	生		隙	百百万	
	粒间孔	长石溶孔	岩屑溶孔	杂基溶孔	晶间孔	微裂缝	- 心山北平	
盒8段上亚段	0.45	0	0.35	0.04	0.28	0.02	1.14	
盒8段下亚段	0.64	0.02	0.36	0.26	0.35	0	1.63	

能力较强从而保留了较多的原生粒间孔(图1g)。 长石含量较低,因而溶蚀孔隙主要以岩屑溶孔为主 (图1h)。自生黏土矿物主要是高岭石,晶间孔主要 为高岭石晶间微孔。盒8段上亚段岩石中偶见微裂 缝,对孔隙起到进一步沟通的作用(图1i)。

孔隙、喉道不以某种特定的类型存在于储层 中,而是以优势类型相互配置形成不同的组合。孔 隙大小决定了储层储存流体空间的多少,孔隙类型 组合则控制了储层中流体渗流能力的高低^{116]}。以 溶孔、粒间孔为主要孔隙类型的储层物性较好,孔 喉较为粗大且连通性较好,该类型的配置不仅有利 于气水渗流,而且较宽的渗流通道能降低气水间流 动的干扰。研究区常见的孔隙组合类型有溶孔--粒 间孔、晶间孔--溶孔、溶孔--晶间孔、晶间孔。

3.2 孔喉结构特征

高压压汞、铸体薄片皆是衡量微观孔喉大小及 其连通性的重要技术手段。随着注入汞的压力不 断增大,汞可进入更为细小的孔隙之中^[17]。通过对 同一岩样分别制样进行压汞和铸体薄片测试发现, 铸体薄片划分孔隙组合类型与压汞曲线形态有一 定的对应关系。根据压汞品质参数与曲线形态,结 合孔隙组合类型,将研究区盒8段储层的孔隙类型 划分为Ⅰ-Ⅳ类(图3,图4,表3)。

I类——高进汞饱和度、左高右低过渡型孔喉半径分布、分选好、溶孔-粒间孔类。孔隙主要由残余粒间孔组成,少量溶孔,晶间孔所占比例小(图5a),孔隙度为12.6%(大于10%),渗透率为1.48 mD(大于1 mD)。压汞曲线相对偏于左下方并且具有宽缓的平台段,排驱压力为0.28 MPa(小于1 MPa),最大进汞饱和度为93.43%(大于90%);孔喉半径分布不具明显双峰形态(图5a),实际表现为左高右低



reservoir in western Sulige 的 主 次 过 渡 型 双 峰 形 态,主 值 区 间 为 0.006 2~

的 王 次 过 渡 型 双 峰 形 念, 王 值 区 间 为 0.006 2~ 2.642 5 μm, 峰 值 为 0.408 2~1.019 9 μm; 该 类 孔 隙

	表3	苏里格西部盒8段不同孔隙类型储层参数
Table3	Param	eters of pore structure of He8 reservoir in western Sulige

Tables Tablelets of pole structure of field reservoir in western Sunge										
孔隙 类型		层位	物	性	1 附归	压	汞 参	数	才呢平尔	
	井号		孔隙度	渗透率	合类型	排驱压力	最大进汞	分选	分布形态	
			(%)	(mD)		(MPa)	饱和度(%)	系数		
Ι	S61	盒8段上亚段	12.6	1.48	溶孔-粒间孔	0.28	93.43	1.84	左高右低过渡型	
Ш	S300	盒8段下亚段	8.2	0.81	晶间孔-溶孔	0.34	89.38	2.51	正态单峰型	
Ш	S65	盒8段上亚段	6.2	0.14	溶孔晶间孔	1.17	81.75	2.68	右高左低过渡型	
IV	S56	盒8段	3.5	0.07	晶间孔	1.80	65.78	4.43	双峰型	

类型储层的孔喉较粗,分选好或中等一好,储渗能 力较强。

II 类——高-较高进汞饱和度、正态单峰型孔 喉半径分布、分选中等—好、晶间孔-溶孔类。孔隙 主要由岩屑溶孔组成,溶孔占60%(图5b),孔隙度 为8.2%,渗透率为0.81 mD。曲线位置同样略偏于 左下方,平台长度与 I 类相比较短,最大进汞饱和 度为89.38%(介于85%~90%);孔喉半径分布呈现 为接近于正态分布的单峰形态(图5b),主值区间为 0.009 9~0.629 9 μm,峰值为0.099 5~0.253 μm。该 类孔隙类型储层物性较好,具有较好的储渗能力。 Ⅱ类——中进汞饱和度、右高左低过渡型孔喉 半径分布、分选中等、溶孔-晶间孔类。孔隙中晶间 孔占60%~80%,有一定数量的粒间溶孔(图5c),砂 岩即使有较高孔隙度,但由于溶蚀程度较弱且有蚀 变高岭石充填,渗流能力受到限制;曲线位于压汞 图的正中央区域,平台较短,最大进汞饱和度为 81.75%(介于80%~85%);孔喉半径分布呈现出右高 左低的高低不等的双峰(图5c),主值区间为 0.0062~0.6301μm,峰值为0.0252~0.0405μm;孔 喉细小,连通性较差,气水受到的渗流阻力较高,储 渗能力较弱。



图 5 苏里格西部盒 8 段不同孔隙类型储层铸体薄片、孔喉分布曲线 Fig.5 Pictures of thin section and pore throat distribution curves of He8 reservoirs with different pore types in western Sulige

•41·

Ⅳ类——低进汞饱和度、双峰型孔喉半径分 布、分选差、晶间孔类。该类样品孔隙以晶间孔为 主,常呈孤立状存在(图5d),孤立的晶间孔孔隙细 小、连通性差,缺少其他孔隙类型组合时渗流能力 较弱;压汞曲线形态较窄,缺少明显的宽缓平台段, 最大进汞饱和度为65.78%(普遍小于80%);孔喉半 径分布呈现明显的双峰形态(图5d),孔喉半径低值 为0.0062~0.0161 μm,孔喉半径高值为0.1635~ 0.6315 μm;该类孔隙类型储层颗粒之间紧密接触, 含有较多的变形强烈的软组分,孔喉致密,储渗能 力较差,一般不构成有效储层。

4 渗流特征

4.1 多相渗流特征

在孔喉结构表征的基础上,选取代表4类孔隙 类型的样品进行分析测试。结果显示,I类孔隙类 型储层的相渗曲线两相共渗区范围较大,束缚水时 气相相对渗透率最高(表4),等渗点也处于较高的 位置,表明I类储层储渗能力较强,气水扰动较弱。 由I类一IV类,相渗曲线的两相共渗区变得狭窄, 束缚水饱和度逐渐增大,等渗点降低,曲线整体向

表4 苏里格西部盒8段不同孔隙类型储层相渗曲线特征参数 Table4 Characteristic parameters of relative permeability curve of He8 reservoir with different pore types in western Sulige

- more than the second se								
孔隙	气测渗透	孔隙	束 缚	水 时	等 渗	点	残 余	气 时
类型	率(mD)	度(%)	含水饱和度(%)	气相相对渗透率	含水饱和度(%)	相对渗透率	含水饱和度(%)	水相相对渗透率
Ι	0.81	8.29	40.39	0.64	64.83	0.17	87.28	0.73
II	0.57	8.56	43.64	0.58	66.02	0.12	88.28	0.61
Ш	0.44	6.86	45.72	0.38	68.53	0.06	89.28	0.46
IV	0.29	4.41	49.82	0.28	70.95	0.04	90.11	0.27

右下方偏移(图6)。孔隙结构变差造成储层储集天 然气的能力变差,在同等生烃条件下不利于天然气 充注构成有效储层^[18];另外渗流通道变窄增强了气 水渗流的干扰,气藏开采后期含水率上升使得气体 流动能力变弱,不利于气田采收率的提高。



with different pore types in western Sulige

4.2 微观可视化渗流实验

采取西北大学国家专利技术——真实砂岩模型结合相渗分析进行模拟实验研究,与过往激光雕刻的模型相比,该模型经原始岩心制片后粘连在两片玻璃之间,保留了储层的原始物理性质,使模拟实验尽可能接近真实地层情况。其采用显微装置与图像采集装置,解决了相渗、核磁等手段只能定

量表征流体的渗流特征,未能直观观测多相流体渗 流规律的缺陷^[19-21]。

4.2.1 气驱水渗流特征

油气未进入储层前,地层为饱和原始地层水的 状态,因此对模型先进行抽真空饱和水,之后进行 气驱水,模拟天然气充注储层并观察气水运动的渗 流特征:①指状驱替,该类型的渗流发生在气体 进入储层的初始阶段,气体总是选择渗流阻力较小 的优势通道进行驱替,呈现多条线性交织的渗流路 线(图7a)。②网状驱替,随着气体不断增多,压力 增大,气体进入更为细小的孔喉,指状渗流不断形 成分支,形成局部连片的网状渗流路线(图7b)。③ 均匀驱替,该类型的驱替最为彻底,渗流通道不断 加宽、连片,气体均匀向前推进,仅在局部地区绕 流,最终气体充满大多数孔隙(图7c)。

不同孔隙类型储层具有不同的渗流规律, I 类 以驱替较完全的均匀驱替为主, Ⅱ 类表现为网状、 网状-均匀驱替, Ⅲ类表现为指状驱替, Ⅳ类较为致 密未能完成驱替实验。

I 类孔隙类型储层孔隙度较高,液测渗透率为 0.254 mD,驱替方式以均匀驱替为主。气体沿孔道 中央不断将原始地层水驱走,由于岩石成分中石英 占比较高,储层表现为亲水性,因而水体未能被完 全驱出,在孔道壁上附着一层薄水膜而形成膜状残



指状驱替(S61井, 3611.49 m) b—网状驱替(S300井, 3639 m) c—均匀驱替(S65井, 3563.7 m) 图 7 苏里格西部盒 8 段不同孔隙类型储层真实砂岩模型气驱水照片

Fig.7 Photographs of gas flooding in real sandstone model of He8 reservoir with different pore types in western Sulige

余水。一般情况下,气流产生的拖拽力不足以推动 水膜水流动,因而水膜水对气体的渗流影响较小。

Ⅱ类孔隙类型储层较Ⅰ类物性较差,驱替类型 以网状、网状-均匀驱替为主。气体先以指状驱替进 行气驱水,随后主渗流通道不断加宽形成多条分支 过渡为网状或网状-均匀驱替。Ⅱ类孔隙存在部分 盲端孔隙及缩颈状喉道,气体克服贾敏效应后以卡 断的气泡存在于盲端孔隙中。该类样品驱替结束 后,水体除膜状残余水外还存在较多的角隅残余水。

Ⅲ类孔隙类型储层非均质性较强,气体沿局部 高渗带指状驱替,随着压力增大,渗流通道未见明 显的加宽,气、水流动达到稳定状态后,在模型局部 地区形成了片状的绕流残余水。绕流残余水的水 量较多,结合相渗分析,含水饱和度越高,气相渗透 率下降越多,因而气体的渗流能力最弱。

Ⅳ类孔隙类型储层经强烈压实、胶结作用,颗 粒之间呈紧密线接触,物性较差。实验初期无法对 其进行抽真空饱和水。即使经长时间抽真空饱和 水,由于模型承受的压力有限,加之存在较多的水 敏矿物无法进行实验。

气驱水过程中气体能否进入细小的孔喉取决 于气体的充注压力与毛管阻力^[24]。当充注压力大 于毛管阻力,气体以串珠状的气泡不断进入细小的 孔喉,随着气泡不断增多将细小孔隙中的水体驱出 形成次一级的渗流通道。当气体的充注压力不足 以推进气体继续运移,会在狭窄喉道处卡断气体, 卡断的气体以水包气的形式赋存,阻碍了气体的流 动,不仅不利于气体的产出,同样使水相渗流受阻, 使得致密储层气水相渗曲线的等渗点普遍较低。

气驱水达稳定状态后,流体形成固定的渗流通 道,达到了通常意义的束缚水状态,束缚水饱和度、 束缚水饱和度下的气相相对渗透率均受孔隙结构 控制^[25]。束缚水饱和度与气测渗透率成负相关(图 8),束缚水饱和度下的气相相对渗透率则与之相反 (图9)。即孔隙类型越好,束缚水饱和度越低,在同 等生烃条件下有利于天然气充注构成有效储层。



Fig.8 Relationship between irreducible water saturation and gas permeability of He8 reservoir in western Sulige





4.2.2 泄压开采渗流特征

以往的研究中,中外学者均采取水驱气的方式 模拟气藏开采,一定程度上能研究气水间的干扰程 度,但与矿场实践过程中采取衰竭式的开采方式不 符,不能模拟开采时的产水情况以及水体对气体渗 流的影响。

由于气体无色难以观察其流动的多少,因此根 据压力下降程度反映模型气体的采出程度。气驱 水结束后,关闭模型进出口的阀门,使气体进入样品的有效孔隙,模拟地层的原始压力;打开模型出口处的阀门使模型中的压力释放,从而模拟开采时的地层能量亏损,期间观察压力下降程度以及气水渗流规律。

模拟泄压前,镜下观察水体以3种形式赋存,即 主渗流通道壁上的膜状残余水、盲端的角隅残余水 以及绕流形成的簇状残余水,气体则存在于主渗流 通道以及被细小孔喉处的残余水封闭的水包气中。 模拟开采过程中,初始压力下降幅度及速率较低, 气体流速较小,产生的拖拽力较小,对残余水的影 响较小。泄压速率(采气速度)较小时,产生的推挤 力有限,因而膜状残余水表面波动,但整体未发生 流动,盲端封闭的气体膨胀,但膨胀力有限未能突 破喉道流动。随着泄压时间增长,地层压力不断下 降,被水封存的气体膨胀产生的推挤力大于颗粒和 水体的阻力,一部分被束缚的水体转变为可动水进 而流动。与此同时,气体流速增大,产生大的拖拽 力使得主渗流通道上的膜状残余水转变为可动水。

I 类孔隙类型代表样品泄压时间为400 s,压力 由 180 kPa下降至 20 kPa, 含水饱和度由 42% 降低 至13%时泄压结束;Ⅱ类孔隙类型代表样品经 1300 s, 压力由 180 kPa下降至 30 kPa, 含水饱和度 由 42%降低至 22% 时泄压结束;Ⅲ类孔隙类型代表 样品经2600 s, 压力由180 kPa下降至50 kPa, 含水 饱和度由42%降至31%时泄压结束。相渗曲线分 析可知,残余气状态下3类孔隙类型储层的气相渗 透率下降较多,渗流能力减弱,由Ⅰ类过渡至Ⅲ类, 残余水体逐渐增多,随之封闭的残余气也较多,泄 压结束后压力保持较高。通过3类代表性样品的泄 压实验可以看出,孔隙类型越好的储层泄压的时间 越短,压力下降的程度越高(图10)。现场表现为储 层类型越好采出程度越高,储层类型越差则被水包 束的残余气越多,而这一部分气体往往很难被开采, 因而生产后期气井表现为产水严重甚至纯产水^[24]。

5 气水渗流特征对气藏开采的意义

对于常规储层,孔喉较粗,连通性较好,气驱水 较为彻底,束缚水饱和度较低,产出的可动水水量 较少,对生产影响有限。而对于致密储层,存在较 多盲端孔隙与缩颈状喉道,因而束缚水饱和度较 高,随着生产压差增大,束缚水转化的可动水量较 高^[26]。钟韬等通过对致密砂岩气藏高含水特征及 产水机理研究认为,合理控制生产压差可以降低气



in western Sulige

井的产水风险,从而使气井实现长期稳产[27]。

确定束缚水转化为可动水的生产压差,从而降 低可动水的产出,对于提高气藏采收率具有重要意 义。压汞测试反映的是压力与可动流体饱和度之 间的关系^[21]。对于压汞实验来讲,汞为非润湿相, 气体为润湿相,气水相渗中,气体为非润湿相,水为 润湿相,因此可将相渗与压汞相结合,将压汞曲线 与相渗曲线平均化处理,以压汞测试中的排驱压力 代表实际生产中的生产压差,对压汞曲线坐标进行 转换,将横坐标转化为润湿相饱和度,将平均的束 缚水饱和度投影至压汞曲线即可得储层束缚水转 变为可动水的节点生产压差。综合以上研究,确定 研究区储层束缚水转变为可动水的节点生产压差 为7 MPa(图11)。矿场实践表明,生产压差大于7 MPa时,产水量明显增加,因此生产过程中应适当减 小生产压差以降低可动水产出的风险,减少气井出 水所产生的储层伤害,从而提高气田的采收率。

6 结论

苏里格西部盒8段储层岩石类型以石英砂岩、 岩屑石英砂岩为主;孔隙类型组合主要有溶孔-粒 间孔、晶间孔-溶孔、溶孔-晶间孔、晶间孔4种类型; 孔隙类型对应的孔喉分布分别呈现左高右低过渡 型、正态单峰型、右高左低过渡型以及双峰型。由 I类过渡至Ⅳ类,孔隙类型越来越差,相渗曲线的 两相共渗区变得狭窄,束缚水饱和度逐渐增大,等 渗点降低,曲线整体向右下方偏移,气水干扰逐渐 增强。由Ⅲ类至Ⅰ类,可视化气驱水驱替类型逐渐





由指状驱替过渡为均匀驱替,孔隙类型越好驱替启 动压力越小,最终驱替更为彻底,表明在同等生烃 条件下孔隙类型越好越有利于天然气充注构成有 效储层。泄压实验显示,由Ⅲ类至Ⅰ类孔隙类型储 层泄压的时间缩短,压力下降的程度增高,表明储 层类型越好采出程度越高。根据压汞结合相渗确 定研究区储层束缚水转变为可动水的节点生产压 差为7 MPa,生产过程中应适当减小生产压差以降 低可动水产出的风险,减少气井出水所产生的储层 伤害从而提高气田的采收率。

参考文献

[1] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等.常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J].石油学报,2012,33(2):173-187.

ZOU Caineng, ZHU Rukai, WU Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance[J].Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2):173–187.

- [2] 李奇,高树生,叶礼友,等.致密砂岩气藏渗流机理及开发技术
 [J].科学技术与工程,2014,14(34):79-87.
 LI Qi, GAO Shusheng, YE Liyou, et al. The research of percolation mechanism and technical countermeasures of tight sandstone gas reservoirs[J].Science Technology and Engineering, 2014, 14 (34):79-87.
- [3] 尚婷,曹红霞,郭艳琴,等.致密砂岩储层微观孔隙结构特征及物性影响因素分析——以延长探区上古生界山西组为例[J]. 西北大学学报:自然科学版,2017,47(6):877-886.
 SHANG Ting, CAO Hongxia, GUO Yanqin, et al. Microscopic pore structure characteristics and its effects on reservoirs quality: A case study from Shanxi Formation of upper Paleozoic in Yanchang exploration area in Ordos Basin [J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition,2017,47(6):877-886.
- [4] 李海燕,岳大力,张秀娟.苏里格气田低渗透储层微观孔隙结构特征及其分类评价方法[J].地学前缘,2012,19(2):133-140.

LI Haiyan, YUE Dali, ZHANG Xiujuan. Characteristics of pore structure and reservoir evaluation of low permeability reservoir in Sulige gas field [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 133– 140.

- [5] 刘登科,孙卫,任大忠,等.致密砂岩气藏孔喉结构与可动流体 赋存规律——以鄂尔多斯盆地苏里格气田西区盒8段、山1段 储层为例[J].天然气地球科学,2016,27(12):2136-2146. LIU Dengke, SUN Wei, REN Dazhong, et al. Feature of porethroat structures and movable fluid in tight gas reservoir: A case from the 8th member of Permian Xiashihezi Formation and the 1st member of Permian Shanxi Formation in the western area of Sulige Gasfield, Ordos Basin[J].Natural Gas Geoscience, 2016, 27 (12):2136-2146.
- [6] 孟德伟,贾爱林,冀光,等.大型致密砂岩气田气水分布规律及 控制因素——以鄂尔多斯盆地苏里格气田西区为例[J].石油 勘探与开发,2016,43(4):607-614,635.
 MENG Dewei, JIA Ailin, JI Guang, et al. Water and gas distribution and its controlling factors of large scale tight sand gas: A case study of western Sulige gas field, Ordos Basin, NW China[J].Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4):607-614, 635.
- [7] 党犇.鄂尔多斯盆地构造沉积演化与下古生界天然气聚集关系研究[D].西安:西北大学,2003.
 DANG Ben. The tectonic and sedimentary evolution and its relationship to gas accumulation of Lower Paleozoic in Ordos Basin
 [D].Xi'an:Northwest University,2003.
- [8] 窦伟坦,刘新社,王涛.鄂尔多斯盆地苏里格气田地层水成因 及气水分布规律[J].石油学报,2010,31(5):767-773. DOU Weitan,LIU Xinshe,WANG Tao.The origin of formation water and the regularity of gas and water distribution for the Sulige gas field,Ordos Basin[J].Acta Petrolei Sinica,2010,31(5):767-773.
- [9] 刘畅,王琪,王应斌.鄂尔多斯盆地临兴中区块上古生界盒8段 储层发育控制因素[J].中国海上油气,2018,30(1):50-61. LIU Chang, WANG Qi, WANG Yingbin. Research on controlling factors of reservoir development in Upper Paleozoic He8 Member in Linxing Middle Block, Ordos Basin[J]. China Offshore Oil and Gas,2018,30(1):50-61.

- 第26卷 第6期
- [10] 王璇,罗顺社,王睿,等.鄂尔多斯盆地三角洲沉积体系及演化 规律——以西南部二叠系山1、盒8段为例[J].科学技术与工 程,2014,14(31):25-31.

WANG Xuan, LUO Shunshe, WANG Rui, et al.Delta sedimentary system and evolution of Ordos Basin-with the example of the southwest region of Shan1 and He8 members, Permian [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(31):25-31.

- [11] 段晓文,赵会涛,王宏娥.岩性气藏评价勘探与储量计算方法 研究[J].天然气工业,2002,22(6):22-26. DUAN Xiaowen, ZHAO Huitao, WANG Hong' e. Research on evaluation exploration and reserve calculation methods of lithologic gas reservoirs[J].Natural Gas Industry,2002,22(6):22-26.
- [12] 高阳,王志章,易士威,等.鄂尔多斯盆地天环地区盒8段致密 砂岩岩石矿物特征及其对储层质量的影响[J].天然气地球科 学,2019,30(3):344-352.

GAO Yang, WANG Zhizhang, YI Shiwei, et al.Mineral characteristic of rocks and its impact on the reservoir quality of He8 tight sandstone of Tianhuan area, Ordos Basin[J].Natural Gas Geoscience, 2019, 30(3): 344–352.

- [13] 吉海龙.鄂尔多斯苏里格地区上古生界储层沉积相与砂体分布研究[D].北京:中国地质大学(北京),2007.
 JI Hailong.Study on sedimentary facies and sandbody distribution of upper Paleozoic reservoir in Sulige area, Ordos [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing),2007.
- [14] 曹忠辉,王建淮,郭建民.鄂尔多斯盆地大牛地气田上古生界 储层特征[J].断块油气田,2006,13(2):11-13.
 CAO Zhonghui, WANG Jianhuai, GUO Jianmin.Upper Paleozoic reservoir characteristics of Daniudi gas field in Ordos Basin[J].
 Fault-Block Oil & Gas Field,2006,13(2):11-13.
- [15] 许丽丽,国景星,张健,等.饶阳凹陷古近系成岩作用特征[J]. 沉积与特提斯地质,2010,30(2):26-31.
 XU Lili,GUO Jingxing,ZHANG Jian, et al.Diagenesis of the Palaeogene clastic rocks in the Raoyang depression[J].Sedimentary Geology and Tethyan Geology,2010,30(2):26-31.
- [16] 白雪见,罗静兰,赵天林,等.苏里格气田南区上古生界盒8段、 山1段储层储集空间类型研究[J].长江大学学报:自科版, 2014,11(31):53-55.

BAI Xuejian, LUO Jinglan, ZHAO Tianlin, et al.Reservoir space types of Upper Paleozoic He8 and Shan1 in southern Sulige gas field [J].Journal of Yangtz University: Natural Science Edition, 2014,11(31):53–55.

- [17] ROMERO Enrique, SIMMS Paul H. Microstructure investigation in unsaturated soils: A review with special attention to contribution of mercury intrusion porosimetry and environmental scanning electron microscopy[J].Geotechnical and Geological Engineering, 2008,26(6):705-727.
- [18] 朱玉双,王震亮,高红,等.油气水物化性质与油气运移及保存
 [J].西北大学学报:自然科学版,2000,30(5):415-418.
 ZHU Yushuang, WANG Zhenliang, GAO Hong, et al. The relations between the fluid features in reservoir and the migration and preservation of oil and gas [J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition,2000,30(5):415-418.
- [19] 李士祥,楚美娟,王腾飞,等.鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组长

6油层组地层水特征与油藏聚集关系[J].中国石油勘探, 2017,22(5):43-53.

LI Shixiang, CHU Meijuan, WANG Tengfei, et al.Features of formation water and implications for hydrocarbon accumulation in Chang6 pay zone, Jiyuan area, Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(5):43–53.

 [20] 朱玉双,孔令荣,曲志浩,等.利用真实砂岩微观孔隙模型研究 粘性不稳定指进[J].西北大学学报:自然科学版,1998,28(2): 77-79.

ZHU Yushuang, KONG Lingrong, QU Zhihao, et al. Using the natural sandstone micromodel to study viscous instability fingering [J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 1998, 28(2):77-79.

- [21] 张章,朱玉双,陈朝兵,等.合水地区长6油层微观渗流特征及 驱油效率影响因素研究[J].地学前缘,2012,19(2):176-182. ZHANG Zhang, ZHU Yushuang, CHEN Chaobing, et al. Microflow characteristics and influencing factors of oil displacement efficiency of Chang-6 reservoir in Heshui area [J]. Earth Science Frontiers,2012,19(2):176-182.
- [22] 全洪慧,朱玉双,张洪军,等.储层孔隙结构与水驱油微观渗流 特征——以安塞油田王窑区长6油层组为例[J].石油与天然 气地质,2011,32(6):952-960.
 QUAN Honghui, ZHU Yushuang, ZHANG Hongjun, et al. Reservoir pore structure and micro-flow characteristics of waterflooding: a case study from Chang-6 reservoir of Wangyao block in Ansai oilfield[J].0il & Gas Geology, 2011, 32(6):952-960.
- [23] 汤小燕.基于微观模型模拟气体成藏过程中气水运动机理及 分布规律[J].科学技术与工程,2014,14(34):13-17,43. TANG Xiaoyan. A simulation experimental study on gas-water movement mechanism and distribution regular in the process of gas accumulation based on the microscopic model [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(34):13-17,43.
- [24] 司马立强,王超,王亮,等.致密砂岩储层孔隙结构对渗流特征的影响——以四川盆地川西地区上侏罗统蓬莱镇组储层为例
 [J].天然气工业,2016,36(12):18-25.
 SIMA Liqiang, WANG Chao, WANG Liang, et al. Effect of pore structure on the seepage characteristics of tight sandstone reservoirs; A case study of Upper Jurassic Penglaizhen Fm reservoirs in the western Sichuan Basin[J].Natural Gas Industry, 2016, 36 (12):18-25.
- [25] 桂婷婷,魏东,王继平,等. 气藏束缚水饱和度实验测试与机理
 [J].大庆石油地质与开发,2017,36(1):81-84.
 GUI Tingting, WEI Dong, WANG Jiping, et al. Experimental test and mechanism of the irreducible water saturation for gas reservoirs
 [J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2017,36(1):81-84.
- [26] 周迅,蒋瑛,陈龙,等.苏西致密砂岩气藏产水机理与渗流规律研究[J].石油化工应用,2016,35(12):76-83. ZHOU Xun, JIANG Ying, CHEN Long, et al.Study on water production mechanism and seepage law of tight sandstone gas reservoirs in Western Jiangsu[J].Petrochemical Industry Application,

2016,35(12):76-83.