

基于恒速压汞的特低—超低渗透储层孔隙结构特征

——以鄂尔多斯盆地富县探区长3油层组为例

蔡 玥¹, 赵 乐², 肖淑萍³, 张 磊⁴, 龚嘉顺⁴, 孙 磊⁵, 孙 阳¹, 康丽芳¹

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 延长油田股份有限公司 定边采油厂, 陕西 定边 718600;
3. 中国石化江汉油田分公司 清河采油厂, 山东 寿光 262714; 4. 延长油田股份有限公司 下寺湾采油厂,
陕西 甘泉 716100; 5. 中国石油长庆油田分公司 勘探开发研究院, 陕西 西安 710021)

摘要:为明确特低—超低渗透储层渗流能力与孔隙结构之间的关系,首次采用恒速压汞技术,结合常规铸体薄片、扫描电镜、常规恒压压汞分析等多种测试分析手段对鄂尔多斯盆地富县探区长3组超、特低渗透储层的孔隙结构特征进行综合研究。结果表明,研究区长3组储层孔隙以残余粒间孔和溶蚀粒间孔为主,发育低排驱压力—粗喉道型、较低排驱压力—较粗喉道型、中排驱压力—中喉道型、较高排驱压力—较细喉道型、高排驱压力—细喉道型5种孔隙结构类型。恒速压汞测试结果表明:储层的平均孔隙半径为100~200 μm,为中孔—小孔型,个别为大孔型,孔隙分布曲线偏粗态;平均喉道半径为0.2~0.7 μm,主要为微细喉道,喉道分布曲线偏细态。延长组特低渗透储层渗流能力与孔隙半径关联性较差,主要受平均喉道半径及其分布形态的控制,并进而影响特低—超低渗透储层的开发效果。

关键词:恒速压汞 特低—超低渗透储层 孔隙结构 长3油层组 富县探区 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE112.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2013)01-0032-04

储集岩的孔隙结构是指岩石所具有的孔隙和喉道的几何形状、大小、分布及其相互连通关系^[1]。与中、高渗透储层不同,特低—超低渗透储层孔隙结构复杂,具有较高的启动压力梯度和较强的压力敏感性,在开采过程中储层易受伤害,从而直接影响开发效果,因此应制定与其相适应的开发措施,以提高开发效益^[2-3]。许多学者对特低渗透储层孔隙结构进行了研究,杨正明等^[4-5]在常规铸体薄片、图像分析、常规恒压压汞、扫描电镜和常规薄片观测的基础上,引入核磁共振测试孔隙结构及可动流体饱和度。马文国等^[6]采用CT扫描技术直观表征微裂隙、微孔隙的分布。贺承祖等^[7]应用分形几何理论对储层岩石孔隙进行分形结构描述,建立孔隙结构模式。石京平等^[8]对特低渗透储层原油的吸附边界层厚度及其对渗流的影响进行分析,认为吸附层厚度平均为0.194 μm,其与孔隙半径的比值达0.29~0.36;对于特低渗透储层来说,原油恒速流过储层孔隙喉道,随着沥青质在孔壁上的吸附,形成一层油膜,使实际孔喉半径减小。以上研究均主要集中在根据孔隙、喉道等进行分类,并未建立微观

孔隙结构同渗流能力的联系,同时应用常规恒压压汞测试也不能有效区分喉道和孔隙及其分布。笔者以鄂尔多斯盆地富县探区长3组超、特低渗透储层为例,采用恒速压汞测试技术分析超、特低渗透储层的孔隙、喉道和孔喉比等,对该类储层微观孔隙结构进行精细表征,并在此基础上探讨了延长组特低渗透储层渗流能力与孔隙结构之间的关系,以为该类储层的高效开发提供理论基础。

1 地质概况

富县探区位于鄂尔多斯盆地陕北斜坡的东南部,主力油层为长3油层组,储层主要为三角洲平原及前缘分流河道砂体,岩性为细粒长石砂岩以及少量的岩屑长石砂岩,杂基含量一般小于1%,胶结物含量平均为13.9%,主要包括方解石、铁方解石、绿泥石、浊沸石及伊利石和高岭石等,含少量自生石英及长石,碎屑分选中等—好,次棱角状,点—线接触,颗粒支撑,薄膜—孔隙式胶结,砂岩成熟度较

收稿日期:2012-11-27。

作者简介:蔡玥,女,在读博士研究生,从事油气地质开发研究。联系电话:13659248743, E-mail: caiyue110687@126.com。

基金项目:国家重点基础研究发展计划“973”项目“多种能源矿产共存成藏(矿)机理与富集分布规律(2003CB214601)。

低,结构成熟度中等^[9]。

富县探区长3储层平均孔隙度为10.76%,平均渗透率为 $1.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,主要为 $0.1 \times 10^{-3} \sim 0.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,是典型的超低渗透储层。成岩早期强烈的压实作用及胶结作用使得储集砂体中原生孔隙几乎丧失殆尽,而成岩晚期的溶蚀作用对储层物性有所改善。其中较厚的绿泥石薄膜、较高的铁方解石和浊沸石含量及其弱溶蚀是储层物性较差的主导因素^[10-18]。

2 孔隙类型和孔隙结构

2.1 孔隙类型

富县探区长3储层面孔率较低,仅为6.9%,其中以残余粒间孔为主,含量为4.25%,占总孔隙的61.61%;其次是长石溶孔、浊沸石溶孔和岩屑溶孔,含量分别为1.25%,0.82%和0.33%,分别占总孔隙的18.12%,11.88%和4.78%。

2.1.1 原生孔隙

研究区长3储层砂岩原生孔隙主要包括残余粒间孔和填隙物内微孔隙。残余粒间孔在储层中占主导地位,孔隙直径一般为 $10 \sim 50 \mu\text{m}$,分布很不均匀,具有强烈的非均质性。从薄片上看,多呈三角形或多边形,边缘整齐平直,充填孔隙的多为薄膜式胶结的绿泥石和孔隙式充填的方解石、高岭石、浊沸石以及再生式胶结的石英与长石加大边。填

隙物内微孔隙经过压实作用改造后大部分消失,仅有一部分分布于泥质含量较高的粉细砂岩中,孔隙小,分布不均匀且连通性差。

2.1.2 次生孔隙

富县探区长3储层砂岩次生孔隙以溶蚀型为主,局部发育自生矿物晶间微孔隙和微裂隙。溶蚀粒间孔隙的溶解组分主要为长石、浊沸石和方解石,被溶蚀的颗粒边缘极不规则,呈港湾状,孔隙连通性好;溶蚀粒内孔隙多见于长石、云母和部分岩屑内,长石溶蚀粒内孔隙相对发育,一般沿长石的解理缝溶蚀,常与溶蚀粒间孔隙伴生分布,且互相连通,但分布很不均匀;浊沸石胶结物发生溶解形成的溶蚀孔隙,也是长3储层砂岩的主要孔隙类型之一,分布较广,此外尚有少量方解石溶蚀孔隙。

2.2 孔隙结构

根据117块样品的毛管压力曲线形态和参数特征分析,可将研究区孔隙结构划分为低排驱压力—粗喉道型(I类)、较低排驱压力—较粗喉道型(II类)、中排驱压力—中喉道型(III类)、较高排驱压力—较细喉道型(IV类)和高排驱压力—细喉道型(V类)5种类型(表1)。前4种类型在研究区多出现在三角洲水(上)下分流河道砂体中,也可在河口坝砂体中分布,出现频率依次为20.5%,23.1%,19.7%和20.5%。第5种类型在研究区多出现在三角洲水下(上)分流河道边缘砂体和溢岸砂体中,出现频率为16.2%。

表1 富县探区长3储层孔隙结构分类

孔隙结构类型	样品数	孔隙度, %	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	排驱压力/MPa	中值压力/MPa	孔喉半径/ μm	中值半径/ μm	变异系数	最大进汞量, %	退汞效率, %
I	24	9.5~17.7	0.053~5.250	0.2915~0.6922	0.87~7.38	0.9858~4.935	0.0167~0.8448	0.1434~0.3842	72.414~93.0293	15.1~40.6894
II	27	2.4~15.4	0.0727~2.3	0.5312~1.1267	3.9576~54.7332	0.4024~0.6493	0.0365~0.1857	0.1235~0.6298	55.8501~94.2243	16.4624~31.2679
III	23	5.9~12.8	0.0504~0.576	1.0169~3.2451	7.2385~87.6915	0.251~0.367	0.013~0.1015	0.0715~1.7224	21.2525~88.0639	13.3858~35.8987
IV	24	2.2~11.7	0.0212~0.371	4.5438~8.7425	17.0047~136.6143	0.1001~0.359	0.0054~0.0432	0.0468~1.912	41.816~90.0029	0~35.5515
V	19	0.8~10.2	0.009~0.0888	8.7756~73.415		0.01~0.245		0.0192~3.6984	6.4194~49	0~73.2175

3 恒速压汞测试分析

恒速压汞与常规压汞的原理相同,其优势主要在于能够给出准确的孔隙、喉道、孔喉比及含量分

布,提供孔隙和喉道的毛管压力曲线,更适用于孔喉性质差别很大的特低、超低渗透储层^[19-20]。从研究区4块岩心恒速压汞测试结果(表2)可知,研究区长3储层平均孔隙半径为 $100 \sim 200 \mu\text{m}$,主要为中孔—小孔型,个别为大孔型;平均喉道半径为 $0.2 \sim$

表2 富县探区长3储层恒速压汞测试结果

井号	孔隙度, %	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	平均喉道 半径/ μm	平均孔隙 半径/ μm	平均孔喉 半径比	中值压 力/MPa	中值喉道 半径/ μm
中富浅50	11.2	0.59	0.65	144.43	442.09	6.19	0.12
中富浅50	11.3	0.392	0.54	145.11	452.99	6.20	0.11
中富3	12.6	0.38	0.45	143.37	479.42	6.20	0.12
中富3	11.5	0.21	0.37	150.14	588.89	6.30	0.12

0.7 μm , 主要为微细喉道。喉道分布曲线偏细态, 孔隙分布曲线偏粗态, 皆为近正态单峰态(图1)。根据碎屑岩孔喉分类标准, 长3储层孔隙结构为大孔隙细喉道, 喉道的连通性及迂曲度对渗透率影响至关重要。从研究区长3储层渗透率与孔隙半径和喉道半径的相关关系(图2)可见, 储层性质受喉道而不是受孔隙控制。

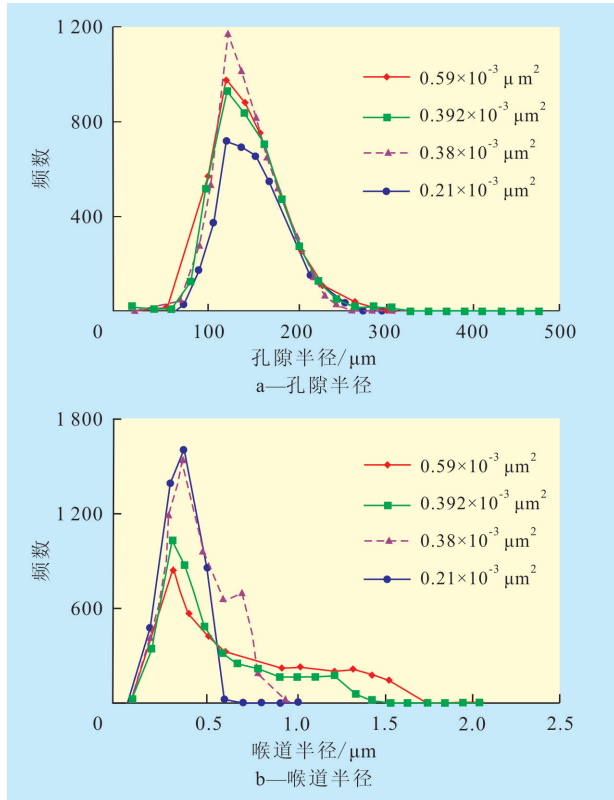


图1 富县探区长3储层孔隙半径和喉道半径分布

此外, 根据为延长组所做恒速压汞的孔隙结构特征数据(图3)分析可知, 延长组特低渗透储层不同渗透率岩样具有相近的孔隙分布特征, 孔隙半径为100~200 μm , 多为150 μm 左右, 喉道半径分布特征却差别很大。延长组特低渗透储层喉道半径分布具有3个较为显著的特点: ①曲线峰值较小, 喉道半径分布分散; ②小于峰值喉道半径的喉道数量少; ③大于峰值喉道半径的喉道数量多。这样的分布特点表明, 不仅喉道半径决定油藏的渗流能力,

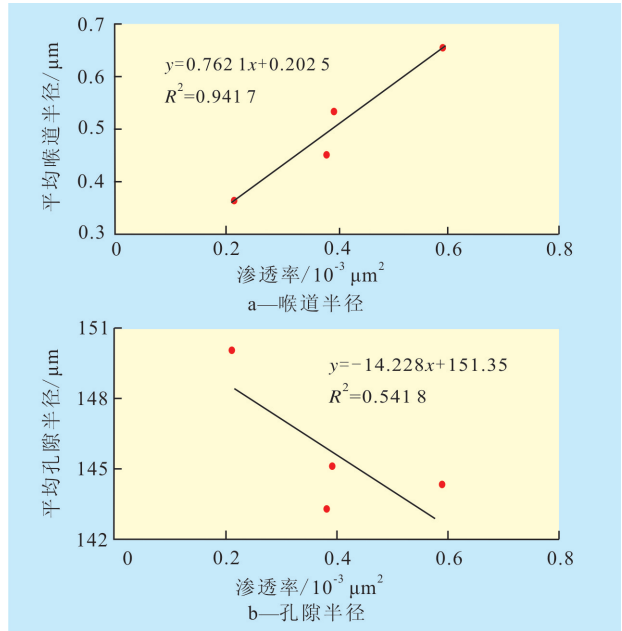


图2 富县探区长3储层渗透率与孔隙半径和喉道半径的相关关系

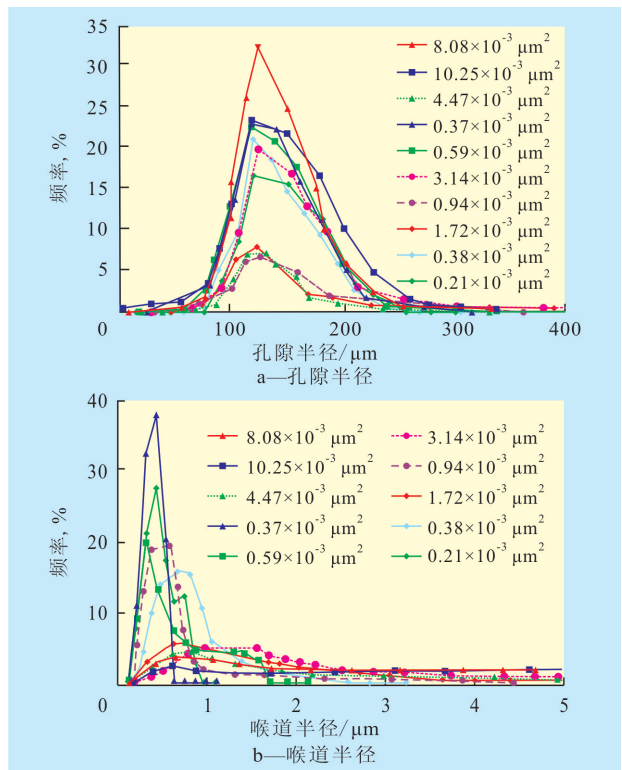


图3 富县探区延长组孔隙半径和喉道半径分布

喉道尺寸的分布形态也影响渗流能力,较大尺寸的喉道数量越多,对储层的渗流能力贡献就越大。不同渗透级别的岩心其孔隙半径及其分布性质差别并不大,差别主要体现在喉道半径及其分布上。特低渗透储层性质主要受喉道控制,喉道半径及其分布决定了储层性质的好坏,并进而影响开发效果。

4 结论

鄂尔多斯盆地富县探区长3特低—超低渗透储层面孔率较低,孔隙类型复杂多样,以残余粒间孔和溶蚀粒间孔为主,占总孔隙的96%以上。根据毛管压力曲线将研究区孔隙结构划分为低排驱压力—粗喉道型、较低排驱压力—较粗喉道型、中排驱压力—中喉道型、较高排驱压力—较细喉道型和高排驱压力—细喉道型5种类型。恒速压汞测试结果表明,储层的平均孔隙半径主要为100~200 μm,为中孔—小孔型,个别为大孔型,孔隙分布曲线偏粗态;平均喉道半径为0.2~0.7 μm,主要为微细喉道,喉道分布曲线偏细态,储层性质受喉道而不是受孔隙控制。

富县探区延长组特低渗透储层存在较强的微观非均质现象,渗流能力与孔隙半径关联性较差,主要受喉道半径及其分布形态控制,并进而影响特低—超低渗透储层的开发效果。

参考文献:

- [1] 罗蛰潭,王允诚.油气储集层的孔隙结构[M].北京:科学技术出版社,1986.
- [2] 林景晔.砂岩储集层孔隙结构与油气运移的关系[J].石油学报,2004,25(1):44-47.
- [3] 胡志明.低渗透储层的微观孔隙结构特征研究及应用[D].北京:中国科学院研究生院,2006.
- [4] 杨正明,张英芝,郝明强,等.低渗透储层综合评价方法[J].石油学报,2006,27(2):64-67.
- [5] 杨正明,姜汉桥,周学荣,等.用核磁共振技术测量低渗含水气

- 藏中的束缚水饱和度[J].石油钻采工艺,2008,30(3):56-59.
- [6] 马文国,刘敖雄.CT扫描技术对岩石孔隙结构的研究[J].中外能源,2011,16(7):54-56.
- [7] 贺承祖,华明琪.储层孔隙结构的分形几何描述[J].石油与天然气地质,1998,19(7):15-23.
- [8] 石京平,付国民,张晓雷,等.低渗透储层原油吸附对渗流的影响[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2009,28(增刊):70-72.
- [9] 付国民,赵俊兴,张志升,等.鄂尔多斯盆地东南缘三叠系延长组物源及沉积体系特征[J].矿物岩石,2010,30(1):99-105.
- [10] 付国民,董满仓,张志升,等.浊沸石形成与分布及其对优质储层的控制作用:以陕北富县探区延长组长3储层为例[J].地球科学—中国地质大学学报,2010,35(1):107-114.
- [11] 蒲秀刚,黄志龙,周建生,等.孔隙结构对碎屑储集岩物性控制作用的定量描述[J].西安石油大学学报:自然科学版,2006,21(2):15-17.
- [12] 肖玲,田景春,魏钦廉,等.鄂尔多斯盆地吴旗地区长6储层孔隙结构特征[J].新疆地质,2007,25(1):101-104.
- [13] 高辉,孙卫,陆勇,等.特低渗透砂岩储层油水微观渗流通道与驱替特征实验研究——以鄂尔多斯盆地延长组为例[J].油气地质与采收率,2011,18(1):58-62.
- [14] 王学军,王志欣,陈杰,等.鄂尔多斯盆地镇北油田延长组低渗透储层成因及油气运移特征[J].油气地质与采收率,2010,17(1):15-18.
- [15] 谢武仁,杨威,杨光,等.川中地区上三叠统须家河组砂岩储层孔隙结构[J].天然气地球科学,2010,21(3):435-440.
- [16] 王瑞飞,沈平平,宋子齐,等.低渗透砂岩油藏储层微观孔喉特征[J].石油学报,2009,30(4):560-563.
- [17] 冯一波,张哨楠,丁晓琪,等.镇泾油田延9、长6、长8段砂体孔隙结构特征及影响因素分析[J].新疆地质,2009,27(1):66-69.
- [18] 陈安清,陈洪德,林良彪,等.岩性油气藏储层非均质性成因模式——以鄂尔多斯盆地榆林—米脂地区盒8段为例[J].油气地质与采收率,2010,17(3):19-23.
- [19] 何顺利,焦春艳,王建国,等.恒速压汞与常规压汞[J].断块油气田,2011,18(2):235-237.
- [20] 高辉,解伟,杨建鹏,等.基于恒速压汞技术的特低—超低渗透砂岩储层微观孔喉特征[J].石油实验地质,2011,33(2):206-211.

编辑 经雅丽

欢迎投稿 欢迎订阅