

白云岩与砂岩致密储集体质量的差异性

魏新善^{1,2}, 陈娟萍^{1,2}, 吕奇奇³, 赵小会^{1,2}, 贾亚妮^{1,2}

(1. 中国石油 长庆油田分公司 勘探开发研究院, 陕西 西安 710018; 2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西 西安 710018; 3. 长江大学 非常规油气湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430100)

摘要:白云岩与砂岩致密储集体质量参数为随机分布的连续谱系, 孔隙结构、物理参数复杂多变, 表征难度较大。基于铸体薄片、压汞、核磁共振、孔隙度和渗透率等测试技术, 结合大量天然气勘探开发实际资料, 采用统计分析对比方法, 重点讨论了储层质量宏观与微观参数特征。结果表明, 白云岩与砂岩致密储集体质量参数具有正态分布特征, 是一种金字塔数据结构, 常规储层比例一般为15%~20%, 是砂岩或白云岩致密储层的“甜点”; 致密砂岩储层微观孔隙发育, 孔、喉连通性较好, 分布比较均匀, 储层孔、渗关系较好, 表现为相对高孔和低渗; 白云岩致密储层质量尽管具有孔、喉连通性差和孔、渗关系较差的不利因素, 但也具有相对高渗、低束缚水饱和度、低排驱压力及裂缝网络发育等有利因素, 天然气渗流能力较好, 勘探开发潜力较大。我国发育碳酸盐岩沉积, 应加强致密白云岩气藏成藏条件研究与勘探。

关键词:砂岩; 白云岩; 储层质量; 致密储层; 天然气; 靖边气田; 苏里格气田; 鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Quality differences between dolomite and tight sandstone reservoirs

Wei Xinshan^{1,2}, Chen Juanping^{1,2}, Lyu Qiqi³, Zhao Xiaohui^{1,2}, Jia Ya'ni^{1,2}

(1. Exploration and Development Institute of Changqing Oilfield Branch Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 2. National Engineering Laboratory of Exploration and Development of Low Permeability Oil/Gas Fields, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 3. Hubei Cooperative Innovation Center of Unconventional Oil and Gas, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China)

Abstract: The quality parameters of dolomite and tight sandstone reservoirs are a randomly distributed continuum. Their pore structures and physical parameters are complex and changeable, and are thus hard to be characterized. With the help of techniques such as thin section casting, mercury injection, nuclear magnetic resonance (NMR), and measurements of porosity and permeability, and a large number of data for natural gas exploration and development, we focused the study on analyzing and comparing the macroscopic and microscopic characteristics of the parameters of the reservoir quality. Results show that the quality parameters of dolomite and tight sandstone reservoirs are normally distributed in a pyramidal data structure. The proportion of conventional reservoirs is generally ranging from 15% to 20%, which are the “sweet spots” of the sandstone or tight dolomite reservoirs. The microscopic pores are well developed with good pore-throat connectivity and uniform distribution in the tight sandstone reservoirs. The reservoir porosity and permeability are of good relationship, showing relatively high porosity and low permeability. The tight dolomite reservoirs, however, are characterized by unfavorable factors including poor pore-throat connectivity and poor relationship of porosity and permeability, while having certain favorable factors of its kind including relatively high permeability, low irreducible water saturation, low displacement pressure, and better development of fracture networks. These favorable factors keep the natural gases flow well in tight dolomite reservoirs, indicating great potentials for the exploration and development of hydrocarbons. Carbonate deposits are well developed in China, so the exploration of tight dolomite gas reservoirs and study on their accumulation conditions should be strengthened.

Key words: sandstone, dolomite, reservoir quality, tight reservoir, natural gas, Jingbian gas field, Sulige gas field, Ordos Basin

收稿日期:2018-01-08; 修订日期:2018-11-30。

第一作者简介:魏新善(1962—),男,博士、高级工程师,天然气勘探和地质研究。E-mail:wxs_cq@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05050, 2016ZX05046)。

致密碳酸盐岩气是非常规天然气中的一个重要类型^[1-2],目前还没有公开发表的大气田勘探开发实例,分析原因有多方面。其中,致密碳酸盐岩储层孔隙度低,一般只有3%左右,基岩基本不具备开发价值^[3],也就是说,储集体储集质量评价较差是主要原因之一。我国是碳酸盐岩发育的国家,分布面积约为 $340 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占沉积岩总面积的55%,高于全球平均比例的2倍,深入研究和评价致密碳酸盐岩储层勘探开发潜力对于开拓我国天然气勘探新领域意义重大。

大量的分析实验数据表明^[4-7],无论是致密储集体质量宏观参数,还是微观参数,在统计学上都表现为一个从大到小的随机分布,且具有连续数据谱系特征,一般符合正态分布或近正态分布。理论上,致密储集体质量表征就是在储层参数连续谱系图中找到其所对应的位置,评价其概率分布。正是基于储层质量连续数据分布谱系这一特征,选取鄂尔多斯盆地靖边低渗透白云岩型大气田和苏里格致密砂岩大气田西部区块作为样本区,获取到了大量的致密白云岩和砂岩储层样本进行储层质量对比研究。值得一提的是,选取的两类致密储集体发育在同一盆地的单斜构造背景下,构造等影响因素相对简单,许多样本对比是选取同一口探井,从而降低了储多因素干扰,这是对比两类致密储集体质量时不可多得的有利条件。通过对所取样本进行铸体薄片、压汞、核磁共振、孔隙度和渗透率等测试分析,然后对所获得的储层质量数据进行统计分析和对比,对比研究两类致密储集体质量差异性以及从常规到致密储层变化的规律性,特别是重点分析了致密白云岩储集体中储层质量分布规律,研究储集性能和渗流特征,这对于深化致密碳酸盐岩气“甜点”认识都具有重要的理论和实际意义。

1 储集体质量宏观参数差异性

致密储集体共同特点是非均质性强,表现为单井储层质量特征很难复制到邻井。也就是说,从单井得到的个别样本储层质量特征不一定具有代表性。因此,需以储集体为代表样本,采用统计分析对比方法研究致密储层质量宏观参数差异性。

苏里格大气田含气面积超过 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$,探明储量超过 $18\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。选取苏里格西一区致密砂岩储集体作为样本区(图1)。区块面积 $2\,845 \text{ km}^2$,共有2 357块的孔隙度和渗透率实测分析样品,样品深度3 442.14~3 934.84 m。孔隙度谱系值分布在

0.3%~31.1%,其中4%~10%之间占总数的73.6%(图2a),孔隙度大于10%的常规储层占22.5%。储层孔隙度数据谱系值具有正态分布特征,数据峰值具有靠近谱系右端、谱系峰值右偏特征,说明储集性能具有向常规储层谱系方向过渡发展的趋势。从渗透率数值谱系分析(图2b),苏里格气田致密砂岩渗透率主要分布在 $(0.1 \sim 1.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,占67.5%,处于谱系右端渗透率大于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的谱系值占到16.1%,低于孔隙度谱系中常规储层所占比重。正态分布的渗透率数据峰值靠近谱系左端,谱系峰值左偏,说明渗流能力具有向更致密储层谱系方向发展的趋势。数值谱系变化特征对比表明,相对来说,致密砂岩储层储集性能优于渗流能力。孔隙度与渗透率连续数据链分布具有金字塔结构特征^[7],金字塔结构是一种稳定的数据分布结构,说明经过长期的沉积成岩地质演化,储集体中孔隙度和渗透率分布是一种地质稳定分布结构。从孔隙度和渗透率数据谱系稳定分布特征分析,苏里格低渗透致密砂岩储集体中发育16.1%~22.5%的常规储层,应是勘探开发储层地质“甜点”目标。

靖边气田含气面积超过 $11\,000 \text{ km}^2$,探明储量超过 $6\,900 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。选取靖边气田西部致密白云岩储集体作为样本区,区块面积 $5\,875 \text{ km}^2$,共有1 401块孔隙度和渗透率实测分析样品,样品深度3 291.59~3 897.47 m。孔隙度谱系值分布在6.3%~32.5%,其中2%~8%之间占总数的77.5%(图2a)。储层孔隙度数据谱系也具有正态分布特征,但是数据峰值具有靠近谱系左端、谱系峰值左偏特征,说明储集性能具有向更致密储层谱系方向过渡发展的趋势。若以孔隙度作为储层质量宏观参数进行对比分析,谱系分布特征表明致密砂岩储集性能优于低渗透致密白云岩储层。靖边气田白云岩储层的渗透率谱系值分布在 $(5.8 \sim 28.4) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $(0.01 \sim 10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间占总数的77.0%,大于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的谱系值分布占总数的26.6%,小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的致密储层谱系值分布占总数的35%。渗透率谱系峰值宽缓,显示出白云岩储层渗透率谱系值分布区间较分散,且渗透率较高的区间分布谱系值比砂岩高,说明白云岩储层表现为相对低的孔隙度和相对高的渗透率的储层质量特征,而砂岩表现出相对高的孔隙度和相对较低的渗透率的储层质量特征。综合上述孔隙度与渗透率数值谱系分布,结合致密砂岩和致密碳酸盐岩储层定义^[1,6],靖边大气田实质上属于致密低渗透白云岩大气田,而苏里格大气田实质上属于低渗透致密砂岩大气田。由此进一步推断分析,靖边大气田年产 $55 \times 10^8 \text{ m}^3$ 天然

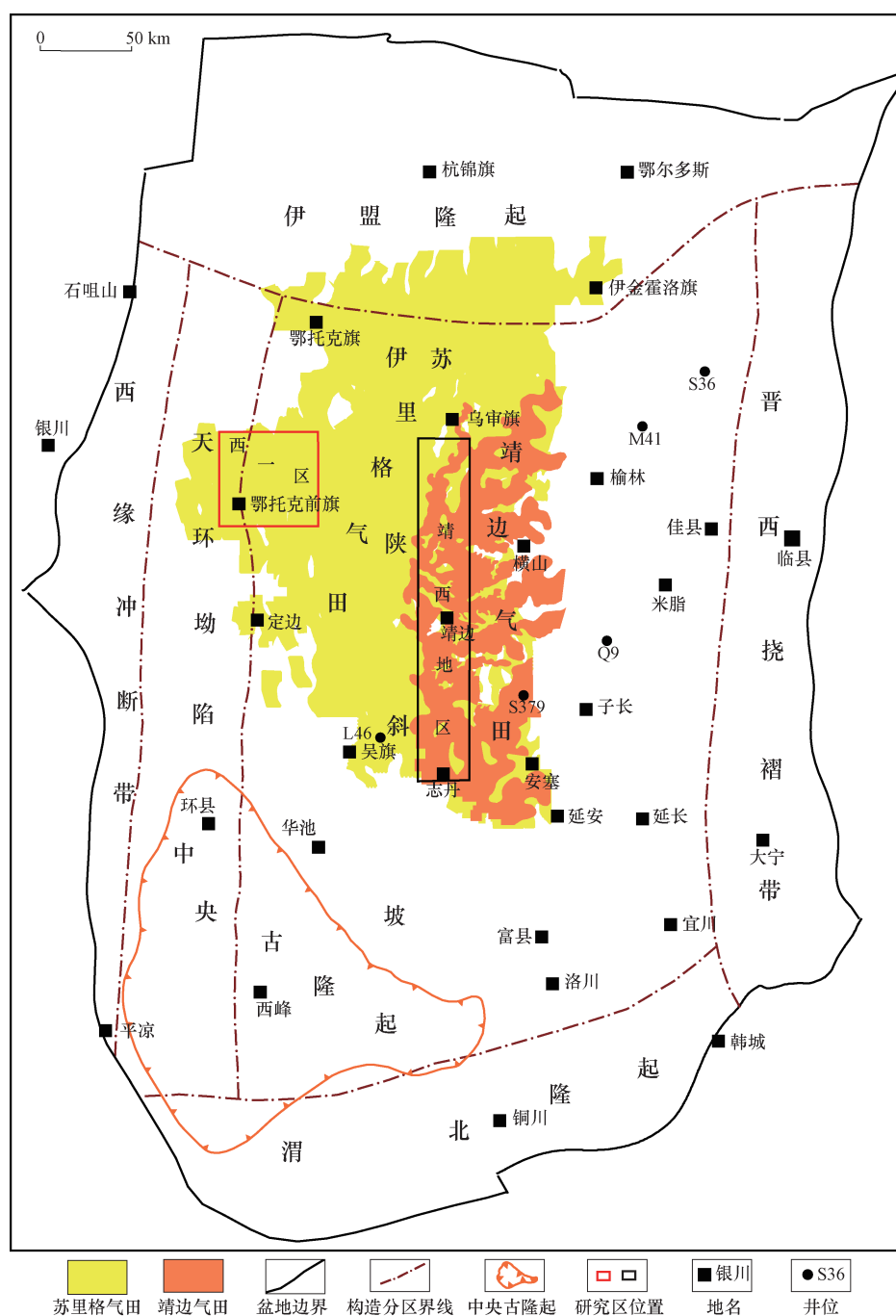


图1 研究区块分布地理位置和构造区划(图中注明的西一区 and 靖边气田西部)

Fig. 1 Geographical location and structural division of the studied blocks (Western 1 block of Sulige gas field and western Jingbian gas field as shown in the figure)

气中,致密储层产层大约占 35%;苏里格大气田常规产层占 16.1%~22.5%。

从孔隙度与渗透率的散点关系图(图3)分析,苏里格西一区致密砂岩储层的孔隙度与渗透率之间呈现出良好的线性相关关系(图3a),即随着孔隙度的增大渗透率也在增大,反映了研究区块致密砂岩储集体以孔隙性储层为主,高孔隙度储层渗流能力也相对较好,孔隙度增高可提高储层储集和渗流能力。但值得一提

的是,致密砂岩孔隙度增加在 10%以内并不改变储层致密的渗流特征,这也进一步验证了致密储层一般是实验室渗透率为 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、对应的孔隙度为 10% 的统计规律。靖边气田西部区块致密低渗透白云岩的孔隙度和渗透率的相关性差(图3b),在孔隙度较低的情况下,渗透率却较高,显示出裂缝对储层渗透能力贡献较大,渗透率不受孔隙度控制。因此,致密白云岩储层,只有叠加裂缝网络,才能提高储层渗流能力。

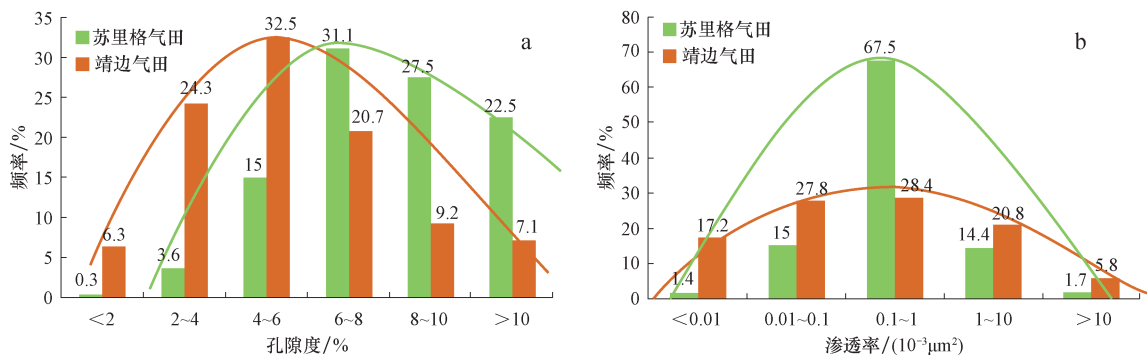


图2 苏里格气田和靖边气田致密砂岩与白云岩储集体质量谱系特征

Fig. 2 Characteristics of quality continuums of tight sandstone and dolomite reservoirs in Sulige and Jingbian gas fields

a. 孔隙度谱系; b. 渗透率谱系

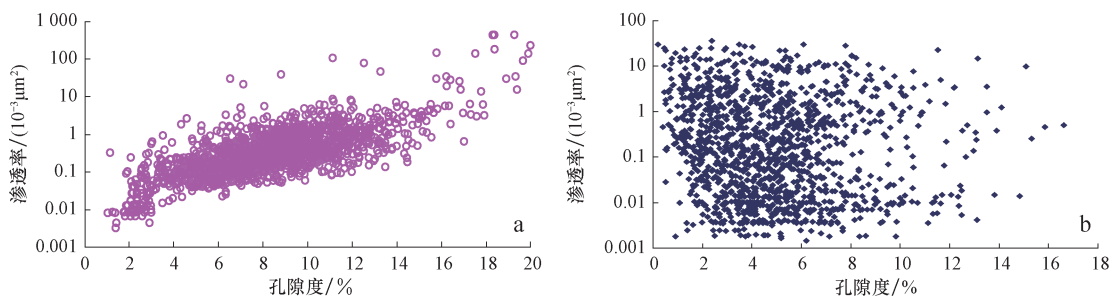


图3 苏里格气田和靖边气田低渗透致密砂岩与白云岩储层孔-渗关系

Fig. 3 Porosity-permeability relationship between low permeability tight sandstone and dolomite reservoirs in Sulige and Jingbian gas fields

a. 致密砂岩孔隙度-渗透率关系; b. 低渗透致密白云岩孔隙度-渗透率关系

2 储集体质量微观参数差异性

宏观物性的差异性是由储层微观孔隙结构差异性所决定。以渗透率 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右的白云岩与砂岩致密储层的差异性为代表进行重点讨论。

2.1 孔隙类型差异性

为了减少其他地质因素的影响,在盆地伊陕构造斜坡中西部,挑选都发育石英砂岩与白云岩致密储层的 L46 井(图 4)进行分析。石英砂岩致密储层孔隙度为 6.4%,渗透率为 $0.116 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,以火山岩的岩屑溶蚀大孔隙和小孔隙为主,孔隙直径一般在 $10 \sim 200 \mu\text{m}$,具有大孔隙和小孔隙形成的双孔隙结构,这一孔隙结构是致密砂岩储层典型的结构特征。白云岩储层孔隙度为 2.9%,渗透率 $0.066 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,以晶间孔为主,次为晶间溶孔,孔隙直径一般小于 $50 \mu\text{m}$ 。在这一渗透率级别下,酸性溶蚀作用使石英砂岩一般发育较大溶孔^[8],使得孔隙度高出白云岩两倍多。而白云岩储层往往发育晶间孔或晶间溶孔,储集性能相对较差。

2.2 孔隙结构分析与对比

毛管压力曲线是研究孔隙结构经常采用的方法,特别是退汞曲线和退汞效率在研究储层孔隙结构方面具有独特的作用。退汞效率不仅反映非润湿相的毛细管效应采收率,也反映油气储层产能的大小^[9]。从图 5 可以看出,白云岩与砂岩致密储层的压汞曲线特征差别较大,特别是退汞曲线特征上,致密白云岩储层退汞曲线接近于直线而陡直下降,退汞效率几乎为零,反映了储层微观非均质性强,孔隙连通性差,孔隙体积主要由微、小喉道控制。从曲线特征分析,白云岩储层大孔喉(孔喉半径: $7.354 \mu\text{m} < r < 73.54 \mu\text{m}$)及其控制的孔隙体积几乎没有,中喉道(喉道半径: $0.7354 \mu\text{m} < r < 7.354 \mu\text{m}$)及其控制的孔隙体积和小喉道控制的孔隙体积各约 10%,微喉道及其控制的孔隙体积最多,总进汞饱和度偏低。与致密砂岩储层相比,致密白云岩储层在进汞压力为 0.1 MPa 时就开始进汞,而致密砂岩在进汞压力为 1 MPa 时才开始进汞,说明致密白云岩储层更易于进汞,门槛比较低。

图 6 是致密砂岩和白云岩储层岩样的典型核磁共振曲线。一般情况下,弛豫时间(T_2)小于 1 ms 的孔隙

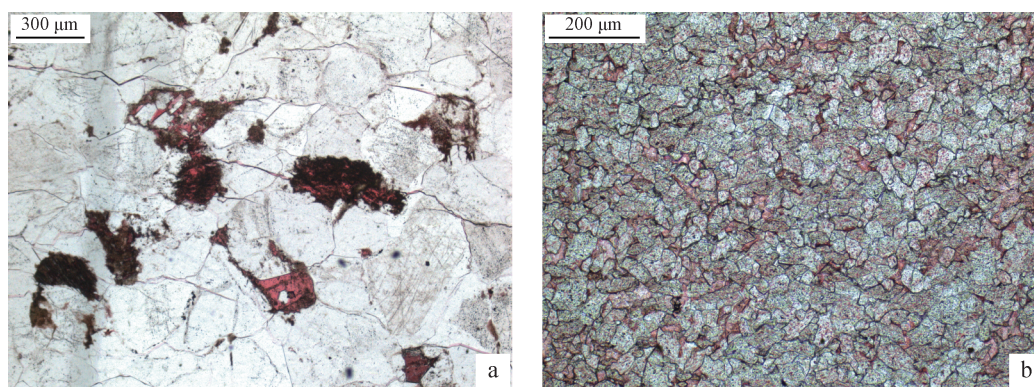


图4 鄂尔多斯盆地L46井致密砂岩和白云岩孔隙类型对比

Fig. 4 Comparison of pore types between tight sandstones and dolomites in Well L46, Ordos Basin

- a. L46井,埋深3 863.29 m,盒8^下,石英砂岩,溶孔,孔隙度6.4%,渗透率 $0.116 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; b. L46井,埋深4 088.62 m,马五⁵,白云岩,晶间孔,孔隙度2.9%,渗透率 $0.066 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$

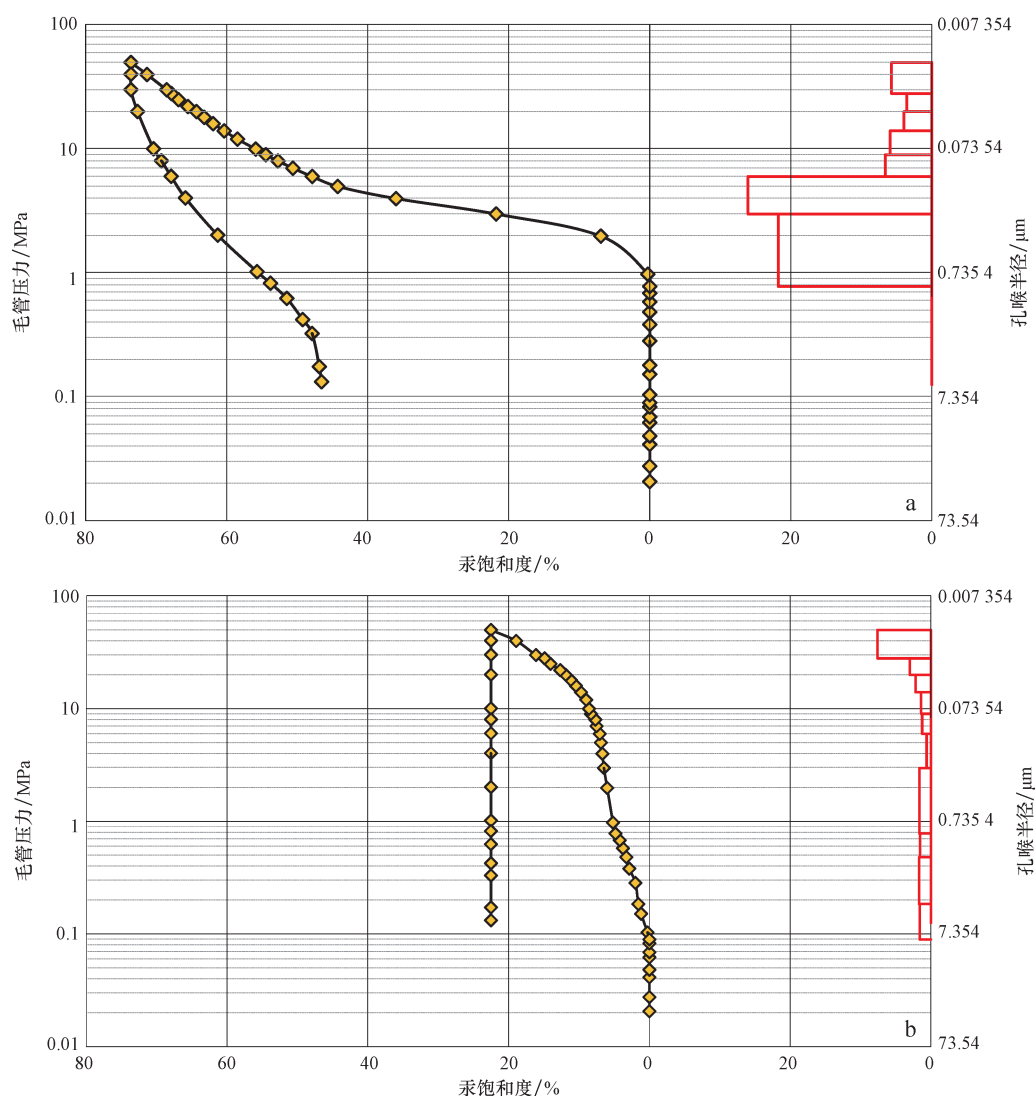


图5 鄂尔多斯盆地苏里格气田和靖边气田致密砂岩与白云岩毛管压力曲线对比

Fig. 5 Comparison of capillary pressure curves between tight sandstones and dolomites in Sulige and Jingbian gas fields, Ordos Basin

- a. S36井,埋深2 175.24 m,太原组,孔隙度6.4%,渗透率 $0.083 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; b. Q9井,埋深2 959.32 m,马五¹⁽³⁾,孔隙度2.0%,渗透率 $0.078 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$

属于微孔,介于1~10 ms的孔隙属于小孔,10~100 ms的孔隙属于中孔,100~1 000 ms的孔隙属于大孔,大于1 000 ms的孔隙属于洞^[10-13]。从图6a可以发现,致密砂岩储层主要由中、小孔隙构成,并具有双峰特征,代表了发育双孔隙结构,与铸体薄片分析结果相一致,进一步验证了双孔隙结构的存在。图6b是白云岩致密储层岩样典型的核磁共振曲线,其分布具有幅度小、多峰且集中靠右的显著特征,表明储层微观孔喉数量少,晶间溶孔缝相对发育,非均质性严重,与砂岩的储层特征完全不同。致密白云岩储层的微观孔隙主要由大孔喉组成,且含有少量的溶蚀孔洞,此外还有一定数量的中、小、微孔隙,所占比例较少。

对比铸体薄片、压汞和核磁共振分析结果,致密白云岩储层不但发育晶间孔,也发育溶蚀孔,储层非均质性强,孔隙连通性差、孔隙度较低是其基本特征。

3 储层相对渗透率特征对比

相对渗透率曲线及其参数是反映储层渗流质量的重要指标。致密砂岩和白云岩储层气-水相对渗透率

曲线差异较大,尽管都是随着含水饱和度的增加,气相的相对渗透率在减小,水的相对渗透率在增加,符合一般变化规律,但是在具体变化特征上还是具有差异性。致密砂岩的气-水相对渗透率等渗点含水饱和度(S_w)为90%,渗透率小于致密砂岩3倍的致密白云岩储层气-水相对渗透率等渗点 S_w 为73%(图7),说明致密砂岩比致密白云岩储层亲水性较强,岩石表面水的润湿性高于白云岩;白云岩致密储层束缚水饱和度低,只有40%,而致密砂岩储层束缚水饱和度高达65%。致密白云岩储层的两相渗流区间大于致密砂岩储层,表明致密白云岩储层天然气更容易渗流,渗流能力较强。

4 讨论

碳酸盐岩是易于聚集油气的岩石类型。据统计^[14],全球碳酸盐岩占沉积岩总面积约20%,在389个含油气盆地中,有208个发育碳酸盐岩油气藏,占比57%,全球碳酸盐岩层系中可采油气当量占比超过37%。由此统计资料分析,无论是含油气盆地方面还

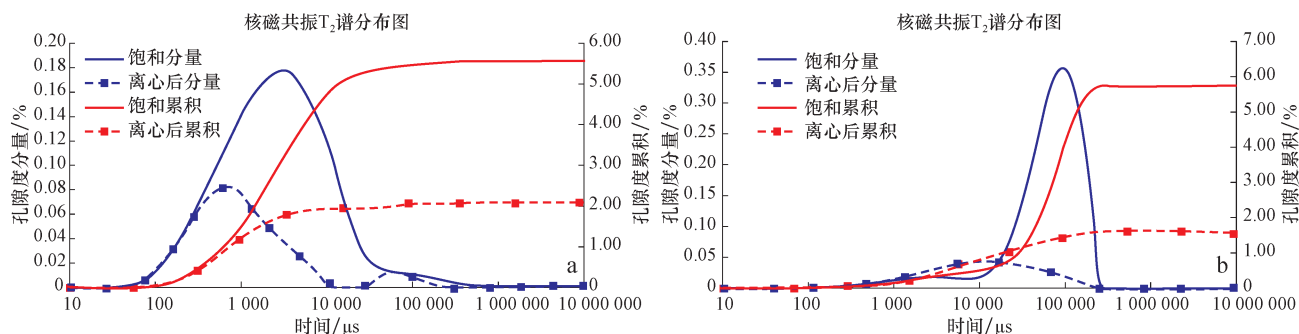


图6 鄂尔多斯盆地苏里格气田和靖边气田致密砂岩和白云岩核磁共振曲线对比

Fig. 6 Comparison of NMR curves between tight sandstones and dolomites in Sulige and Jingbian gas fields, Ordos Basin

a. 砂岩核磁共振曲线,渗透率 $0.080 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; b. 白云岩核磁共振曲线,渗透率 $0.083 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$

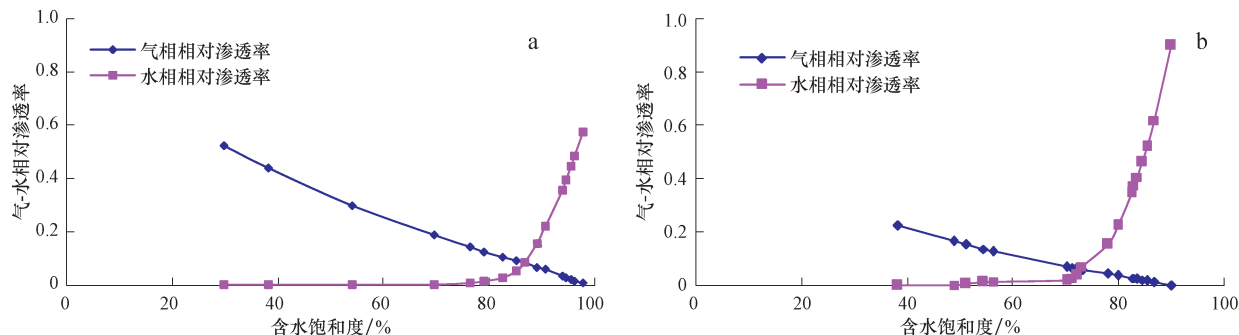


图7 鄂尔多斯盆地苏里格气田和靖边气田砂岩和白云岩致密储层气-水相对渗透率特征对比

Fig. 7 Comparison of gas-water relative permeability characteristics of tight sandstone and dolomite reservoirs in Sulige and Jingbian gas fields, Ordos Basin

a. M41井,埋深2 458.7 m,盒8,石英砂岩,渗透率 $0.114 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; b. S379井,埋深3 461.42 m,马五²⁽²⁾,白云岩,渗透率 $0.033 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$

是油气可采储量方面,碳酸盐岩油气所占比重明显高于分布面积所占比重。目前,我国已经在鄂尔多斯、四川和塔里木等盆地发现和探明了多个大型碳酸盐岩油气田。同时,也在这3个盆地探明了以苏里格为代表的致密砂岩气大气田,但是还未见到碳酸盐岩致密气大气田的发现报道,这与我国发育碳酸盐岩特征不相匹配。究其原因,一是致密碳酸盐岩储层非均质极强,无裂缝储层孔隙度低,储渗空间有限,渗流能力较差,基本不具开发价值;二是研究程度较低;三是没有给予足够的重视。

实质上,我国已经在四川盆地川东北渠县地区发现了下侏罗统自流井组大安寨段、川中磨溪三叠系和安岳气田龙王庙组致密碳酸盐岩含气储层^[15],只是没有发现规模工业天然气储量。如果对靖边大气田西部区块渗透率谱系分布特征分析,渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 占比大于73.4%,应属于白云岩致密气定义范畴^[1],现已经投入工业开发。随着勘探开发技术的进步,靖边大气田探明储量孔隙度下限也由发现之初的3.5%下降到目前的1.5%,因此致密白云岩储层具有一定的天然气勘探开发潜力。需要说明的是,由于储层孔隙度较低,靖边气田天然气丰度只有 $0.7 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,大气田需要大面积储层来弥补低孔隙度所带来的储集质量偏低的不足。

由于油气储集体储层质量参数具有连续分布的特点,对于致密白云岩储集体,也存在常规储层“甜点”区。实例有鄂尔多斯盆地东部马家沟组五段^[1-2],储层以泥粉晶-粗粉晶白云岩致密储层为主,渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的致密储层占80%以上,但发育孔隙度大于5%、渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的常规储层,占10%~20%,一般分布于岩溶残丘上,单井产量超过 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

致密白云岩储层束缚水饱和度低,排驱压力低,天然气更容易渗流。从储集体质量分析,致密砂岩储层优于致密白云岩储层;但从渗流能力分析,致密白云岩储层要优于致密砂岩储层。更重要的是,由于致密白云岩储层一般为泥晶或粉晶级颗粒,抗拉、抗压和抗剪强度低^[16],在地质应力作用下易于产生裂缝,特别是处于不整合面附近的泥粉晶白云岩储层,风化作用形成的裂缝叠加时,可以形成裂缝网络,储层渗流质量会得到进一步提高。鄂尔多斯盆地东部及靖边气田发育大面积这种具有裂缝网络的致密白云岩含气储层^[1-2,17-18]。因此,很有可能致密碳酸盐岩储层无裂缝发育时开发价值不大,但如果发育裂缝网络,致密碳酸盐岩储层就具有很大的天然气勘探开发潜力。值得

一提的是,由于压汞和核磁共振分析制样时很难保留裂缝,裂缝网络特征对储层质量的贡献也很难在相应的分析结果中得到充分体现。因此,采用岩心、测井和生产动态资料等评价裂缝网络是致密白云岩储层综合评价的关键。

5 结论

1) 白云岩与砂岩致密储集体质量参数均为随机分布的连续谱系,符合正态分布,具有金字塔数据结构。处于谱系末端或金字塔底部的致密储层质量品质变差,非均质性增强;而处于谱系前端或金字塔顶部的储层为常规储层,所占比例一般为15%~20%,是致密砂岩或致密白云岩储层的地质“甜点”。

2) 相对于致密白云岩储层,致密砂岩储层微观孔隙发育,孔、喉连通性较好,分布比较均匀,储层孔、渗关系较好,表现为相对高孔和低渗。

3) 尽管致密白云岩储层质量具有孔、喉连通性差和孔、渗关系较差等不利因素,但是它却具有相对高渗、低束缚水饱和度、低排驱压力及裂缝网络发育等有利因素,天然气渗流能力较强,易于进行开发。

4) 致密白云岩气藏由于储层孔隙度较低,气藏丰度一般较低,大气田需要大面积储层来弥补低孔隙度所带来的储集质量偏低的不足。我国发育碳酸盐岩沉积,应进一步加强致密白云岩气藏成藏条件研究与勘探。

参 考 文 献

- [1] 魏新善,陈洪德,张道锋,等. 致密碳酸盐岩储集体特征与天然气勘探潜力——以鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东部奥陶系马家沟组为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(3): 319-329.
Wei Xinshan, Chen Hongde, Zhang Daofeng, et al. Gas exploration potential of tight carbonate reservoirs: A case study of Ordovician Majiagou Formation in the eastern Yi-Shan slope, Ordos Basin, NW, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(3): 319-329.
- [2] 魏新善,陈娟萍,张道锋,等. 鄂尔多斯盆地东部大面积致密碳酸盐岩气地质特征及成藏条件分析[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(5): 677-686.
Wei Xinshan, Chen Juanping, Zhang Daofeng, et al. Geological characteristics and reservoir forming conditions of large area tight carbonate gas in eastern Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(5): 677-686.
- [3] 高树生,胡志明,刘华勋,等. 不同岩性储层的微观孔隙特征[J]. 石油学报, 2016, 37(2): 248-256.
Gao Shusheng, Hu Zhiming, Liu Huaxun, et al. Microscopic pore characteristics of different lithological reservoirs[J]. Acta Petrolei

- Sinica, 2016, 37(2): 248–256.
- [4] 席胜利, 李文厚, 魏新善, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界两大气田不同石英砂岩储层特征对比研究[J]. 沉积学报, 2009, 27(2): 221–229.
- Xi Shengli, Li Wenhou, Wei Xinshan, et al. Study on characteristics of quartz sandstone reservoirs of the Neopaleozoic of two gas field in Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(2): 221–229.
- [5] 魏伟, 罗顺社, 魏新善, 等. 苏里格气田致密砂岩储层孔渗分布及地质意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014, 41(3): 293–301.
- Wei Wei, Luo Shunshu, Wei Xinshan, et al. Porosity and permeability distribution of tight sandstone reservoir and its geological significance in Sulige gas field, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 2014, 41(3): 293–301.
- [6] 杨华, 席胜利, 魏新善, 等. 鄂尔多斯盆地大面积致密砂岩气成藏理论[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 45–56.
- Yang Hua, Xi Shengli, Wei Xinshan, et al. Geological theory of tight sandstone gas reservoir formation in large area Ordos Basin[M]. Beijing: Science Press, 2016: 45–56.
- [7] 魏新善, 彭宇慧, 罗顺社, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩储层金字塔结构[J]. 非常规油气, 2016, 3(5): 1–7.
- Wei Xinshan, Peng Yuhui, Luo Shunshu, et al. Pyramid structure of tight sandstone reservoirs in the Upper Paleozoic in Ordos Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2016, 3(5): 1–7.
- [8] 魏新善, 肖红平, 刘锐娥, 等. 热异常酸洗作用与鄂尔多斯盆地上古生界长石消失事件[J]. 地质学报, 2017, 91(9): 2139–2149.
- Wei Xinshan, Xiao Hongping, Liu Rui'e, et al. Pickling effect of abnormal heat and its relation to disappearance of feldspar of the Upper Paleozoic in the Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(9): 2139–2149.
- [9] 罗蛰潭, 王允诚. 水银退出效率与岩石孔隙结构的关系[J]. 石油实验地质, 1980, 2(2): 21–29.
- Luo Zhetan, Wang Yuncheng. The relationship between the return efficiency of mercury and the pore structure of rock[J]. Petroleum Experimental Geology, 1980, 2(2): 21–29.
- [10] 谢然红, 肖立志. 储层流体及其在岩石孔隙中的核磁共振弛豫温度特性[J]. 地质学报, 2007, 81(2): 280–284.
- Xie Ranhong, Xiao Lizhi. Temperature effect on NMR relaxation time for bulk fluids and fluids in rocks[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(2): 280–284.
- [11] 吴小斌, 张永平, 侯加根, 等. 核磁共振技术在苏里格致密气层识别中的应用[J]. 新疆地质, 2011, 29(2): 238–241.
- Wu Xiaobin, Zhang Yongping, Hou Jiagen, et al. Application of nuclear magnetic resonance technique in recognition of compact-gas reservoir of Shulige area[J]. Xinjiang Geology, 2011, 29(2): 238–241.
- [12] 王振华, 陈刚, 李书恒, 等. 核磁共振岩心实验分析在低孔渗储层评价中的应用[J]. 石油实验地质, 2014, 36(6): 773–779.
- Wang Zhenhua, Chen Gang, Li Shuhen, et al. Application of NMR core experimental analysis in evaluation of low-porosity and low-permeability sandstone reservoirs[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(6): 773–779.
- [13] 刘宴宴, 马在田, 傅容珊. 核磁共振谱的岩石孔喉结构分析[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(4): 737–742.
- Liu Tangyan, Ma Zaitian, Fu Rongshan. Analysis of rock pore structure with NMR spectra[J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(4): 737–742.
- [14] 王大鹏, 陆红梅, 陈小亮, 等. 海相碳酸盐岩大中型油气田成藏体系及分布特征[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(3): 363–371.
- Wang Dapeng, Lu Hongmei, Chen Xiaoliang, et al. Petroleum accumulation systems and distribution of medium to large marine carbonate fields[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(3): 363–371.
- [15] 赵从俊. 弯曲形变层内应力分布与四川致密碳酸盐岩气藏富集规律[J]. 石油勘探与开发, 1986, 13(2): 9–18.
- Zhao Congjun. A discussion on the relation of between the distribution of formation stress due to curved strain of the formation and the gas accumulation in tight carbonate reservoirs in Sichuan Province[J]. Petroleum Exploration and Development, 1986, 13(2): 9–18.
- [16] 侯方浩, 方少仙, 沈照国, 等. 白云岩体表生成岩裸露期古风化壳岩溶的规模[J]. 海相油气地质, 2005, 10(1): 19–30.
- Hou Fanghao, Fang Shaoxian, Shen Zhaoguo, et al. The scale of paleoweathering crust karst in the epiphytogenic rocks of dolomite during the exposed period[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2005, 10(1): 19–30.
- [17] 熊鹰, 李凌, 文彩霞, 等. 鄂尔多斯盆地东北部奥陶系马五¹⁺²储层特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(5): 691–701.
- Xiong Ying, Li Ling, Wen Caixia, et al. Characteristics and genesis of Ordovician Ma⁵₁₊₂ sub-member reservoir in northeastern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 691–701.
- [18] 王国亭, 程立华, 孟德伟, 等. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系古岩溶型碳酸盐岩致密储层特征、形成机理与天然气富集潜力[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(4): 685–695.
- Wang Guoting, Cheng Lihua, Meng Dewei, et al. Characterization and formation of the Ordovician tight paleokarst carbonates in the eastern Ordos Basin and its gas accumulation[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(4): 685–695.

(编辑 李 军)