

# 福山凹陷花场—白莲地区流沙港组 成岩作用及储层物性影响因素

刘杰<sup>1</sup>, 孙美静<sup>2</sup>, 岳绍飞<sup>2</sup>, 马丽娜<sup>2</sup>, 方舒<sup>3</sup>

(1.中海石油有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524097; 2.中国地质大学(武汉) 构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074; 3.中国石化河南油田分公司 第二采油厂, 河南 南阳 473400)

**摘要:**通过物性分析、铸体薄片、X衍射及扫描电镜等测试方法,对北部湾盆地福山凹陷花场—白莲地区流沙港组的岩石学特征、成岩作用和储层物性等影响因素进行分析。结果表明,研究区储层岩石类型以长石质岩屑砂岩和岩屑砂岩为主,孔隙类型以溶蚀孔隙为主,属中孔、低渗透储层;主要成岩作用类型有压实作用、石英次生加大、自生粘土矿物胶结作用和溶蚀作用等,其中压实作用是造成研究区砂岩原生孔隙大量丧失的主要原因,而溶蚀作用产生的次生孔隙则使储层物性得以改善;研究区储层原始孔隙度中等,后期成岩作用改造强烈,目前处于晚成岩阶段A期。通过综合构造、沉积和成岩作用等分析认为,花场—白莲地区流沙港组的有利储层主要为辫状河三角洲前缘相对较高部位的砂体。

**关键词:**流沙港组 成岩作用 储层物性 福山凹陷 北部湾盆地

**中图分类号:** TE112.221

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9603(2013)02-0021-04

碎屑岩的储层物性主要受沉积、成岩和构造作用的共同控制,在不同构造背景、沉积体系及埋藏史下,三者不同程度控制着储层物性的演化<sup>[1-12]</sup>。在涉及构造对储层物性的影响研究时,主要讨论盆地构造背景对砂岩成岩作用的控制,或裂缝、断层、不整合面与酸性水运移的关系,或构造沉降方式与孔隙演化的关系<sup>[1-4]</sup>。而沉积作用对砂岩的矿物成分、结构、粒度、分选和杂基含量等具有明显的控制作用,这些因素决定着沉积物的原始孔隙度<sup>[5-9]</sup>,是影响储层储集性能的基础。沉积物进入埋藏成岩环境后,其孔隙演化主要受各种成岩作用的控制,沉积物本身的内在特征又在不同程度上制约着成岩作用的发生和发展,进而影响孔隙的演化<sup>[9-12]</sup>。

福山凹陷古近系流沙港组是福山油田重要的油气生产层,经过几十年的勘探,福山油田的石油及天然气探明地质储量下降明显,且稳产面临着较大的压力。因此,为满足研究区增储上产的需求,笔者对福山凹陷花场—白莲地区主要目的层流沙港组的成岩作用及储层物性影响因素进行了分析,以期预测优质储层分布及下步勘探部署提供指导和依据。

## 1 区域地质概况

福山凹陷是南海大陆架北部湾盆地至海南岛的延伸部分,位于北部湾盆地南斜坡东缘,其南侧为海南隆起,北入琼州海峡,东临云龙凸起,西与临高凸起相接。继承性发育的花场次凸位于花场地区,整体为北西走向的鼻状构造,并由南部缓坡带向凹陷中心伸展,将整个福山凹陷分隔成皇桐次凹和白莲次凹(图1),且这2个次凹均为福山凹陷流沙

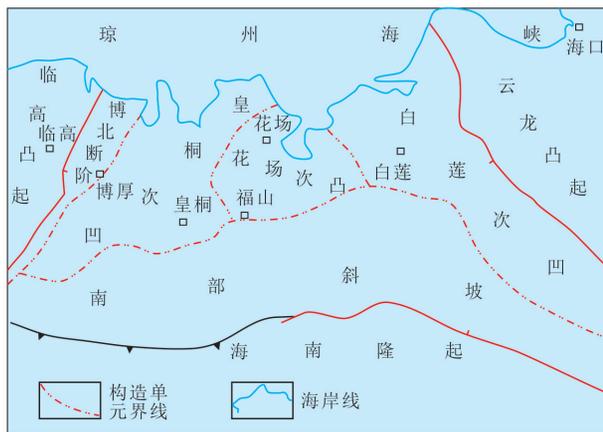


图1 福山凹陷构造单元划分

收稿日期:2013-01-11。

作者简介:刘杰,男,助理工程师,硕士,从事沉积学和层序地层学研究。联系电话:(027)67883064, E-mail:jsg893252115@163.com。  
基金项目:国家自然科学基金项目“奥陶纪—志留纪转折期扬子海氧化还原环境变化”(40903032)。

港组沉积厚度最大的地区。此次研究的花场—白莲地区主要包括会场次凸和白莲次凹。福山凹陷古近系自下而上可分为长流组、流沙港组和濠洲组。研究区流沙港组发育辫状河三角洲相、扇三角洲相和湖泊相沉积,其中以辫状河三角洲相为主,主要分布于南部,而扇三角洲相仅在东北部分布。

## 2 岩石学特征

岩心和薄片观察表明,会场—白莲地区流沙港组岩石碎屑颗粒的粒级变化较大,从细砂到砾石均有发育,以中、细砂岩为主。岩石成分以灰、灰褐色长石质岩屑砂岩和岩屑砂岩为主,含少量岩屑质长石砂岩。石英含量为52%~63%,平均为55%;岩屑主要为变质岩岩屑,含量为23%~40%,平均为26.7%;长石以钾长石为主,偶见斜长石,钾长石含量为5%~15%,平均为8.9%;填隙物含量为5.5%~12%,平均为9.4%,且以自生粘土矿物为主;碳酸盐主要为方解石及少量铁方解石、铁白云石。成分成熟度指数平均为1.54,为中等成熟度,颗粒以次圆—次棱角状为主,分选中等,结构成熟度中等。

X衍射分析表明,研究区流沙港组的粘土矿物包括高岭石、伊/蒙混层、伊利石和绿泥石。其中高岭石含量为33%~64%,平均为36.8%;伊/蒙混层含量为13.1%~56.9%,平均为31.9%;伊利石含量为6.9%~34.6%,平均为25.1%;绿泥石含量为1.9%~16.5%,平均为6.4%。

## 3 储层物性特征

研究区流沙港组储层的主要孔隙类型为溶蚀粒间孔、溶蚀粒内孔、剩余粒间孔、填隙物内溶孔和微孔隙,分别占总孔隙的71%,16%,5.8%,4.5%和2.7%;总面孔率为4.2%~16.5%,平均为9.8%。毛管压力曲线测定结果表明,砂岩排驱压力为0.04~2.96 MPa,平均为0.67 MPa;中值压力为0.28~32.79 MPa,平均为7.38 MPa;孔隙喉道半径为0.023~2.68  $\mu\text{m}$ ,平均为0.061  $\mu\text{m}$ ;退汞效率为15.6%~36.5%,平均为29.2%;孔喉类型以中—细喉道、小孔型为主。

对研究区56口井的实测岩心资料进行统计表明,其孔隙度为6%~20%,平均为12.7%;渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \sim 100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均为 $11.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;属于中孔、中低渗透储层,且二者呈现良好的相关性,其

关系式为

$$K=0.0036e^{0.469\phi} \quad (1)$$

式中:  $K$  为渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $\phi$  为孔隙度, %。

## 4 成岩作用及成岩阶段

### 4.1 成岩作用

#### 4.1.1 压实作用

研究区流沙港组储层的顶、底面平均埋深分别为2100和3768 m。颗粒间以线接触为主,其次为点—线接触,缝合线接触少见。砂岩以长石质岩屑砂岩和岩屑砂岩为主,塑性颗粒含量较高,因此压实作用较强。砂岩的压实特征表现为:①碎屑颗粒间由点接触到线接触;②长石和石英等刚性颗粒重新定向排列;③云母和伊利石等塑性颗粒遭受压实发生形变(图2a)。

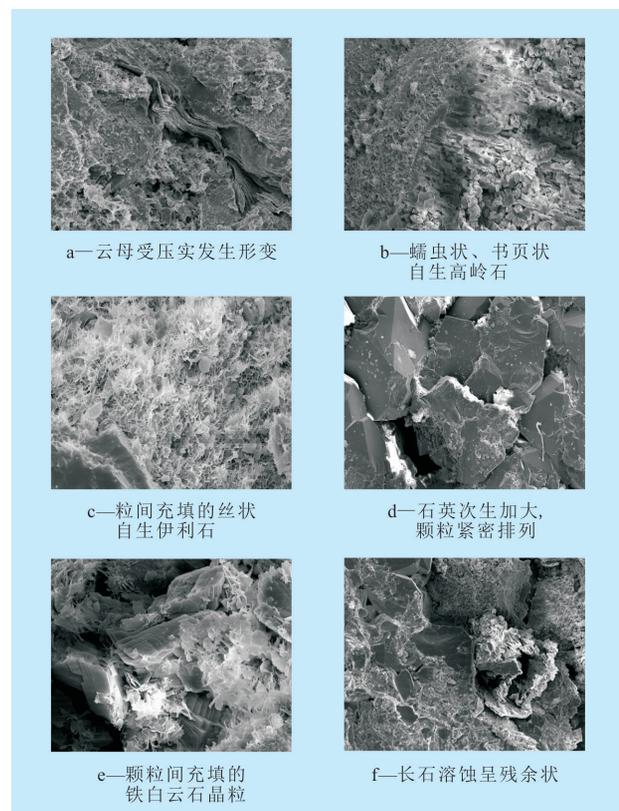


图2 福山凹陷会场—白莲地区流沙港组成岩作用特征

#### 4.1.2 胶结作用

粘土矿物胶结作用 高岭石是研究区最主要的自生粘土矿物之一。在酸性环境下长石和云母极易发生溶蚀,形成自生高岭石,扫描电镜下观察其集合体通常呈书页状或蠕虫状(图2b)。虽然高岭石的存在可形成一定量的晶间微孔隙,增加储集空间,但其常生长于粒间孔隙内,将单个大孔隙分

割成若干个小孔隙且堵塞喉道,从而使有效孔隙急剧减少,不利于储层物性的改善<sup>[13]</sup>。研究区伊/蒙混层和伊利石的含量较高。扫描电镜下观察,伊/蒙混层多为蜂窝状充填于颗粒之间,随着成岩强度的加大,伊/蒙混层逐渐向伊利石转化。自生和蚀变伊利石多表现为叶片状或丝状充填于孔隙空间(图2c),且随着埋深的增加,伊利石含量呈现逐渐增大的趋势。

**硅质胶结作用** 研究区硅质胶结作用主要为石英次生加大,少见长石次生加大,且石英次生加大多为Ⅱ级,偶见Ⅰ级和Ⅲ级。在扫描电镜下可观察到石英次生加大趋向自形,充填残余孔隙,同时与高岭石共生的自生石英小晶体充填于粒间孔中(图2d),从而进一步降低砂岩的孔隙度,使储层物性变差。

**碳酸盐胶结作用** 研究区的碳酸盐胶结物主要有铁白云石、铁方解石及方解石(图2e),其多以孔隙充填的形式存在,铁白云石常呈粉晶填充于粒间孔隙内。碳酸盐胶结作用对孔隙的充填导致粒间孔隙减少,造成储层致密,对储层物性起到破坏作用。

#### 4.1.3 交代作用

研究区流沙港组常见的交代作用有粘土矿物交代碎屑颗粒以及自生矿物之间的相互交代,其中粘土矿物交代碎屑颗粒常见高岭石交代长石,使长石颗粒边缘模糊不清。一般认为交代作用对孔隙度和渗透率的影响较小。

#### 4.1.4 溶蚀作用

砂岩储层常经受不同程度的溶蚀作用,形成多种类型的次生孔隙。研究区的溶蚀作用较强,至少有1/3的砂岩孔隙为次生孔隙,使储层物性得以改善。而不稳定的颗粒如长石、岩屑及少量方解石胶结物是砂岩中被溶蚀的主要组分,溶蚀作用导致颗粒边缘呈不规则状或港湾状,从而形成粒间溶孔,

且溶蚀作用强烈时整个颗粒全部被溶蚀形成残余铸模孔或铸模孔(图2f)。

## 4.2 成岩阶段

研究区流沙港组储集砂岩的成岩阶段主要为晚成岩阶段A期。主要划分依据为:①流沙港组的镜煤反射率一般为0.5%~1.1%;②砂岩普遍遭受了较强的压实作用改造,碎屑颗粒多以线接触为主,砂岩中原生孔隙大量丧失,次生孔隙普遍发育;③铁方解石、铁白云石等晚期碳酸盐胶结物大量出现,泥岩中粘土矿物主要以高岭石、伊利石和伊/蒙混层为主,伊/蒙混层比为15%~30%,石英次生加大普遍,多为Ⅱ级,偶见Ⅲ级,长石、岩屑及碳酸盐碎屑等常发生明显的溶蚀作用。

## 5 储层物性影响因素

### 5.1 沉积作用

沉积作用对砂岩的矿物成分、结构、粒度、分选、磨圆和杂基含量等起到明显的控制作用,而这些因素又决定着沉积物的原始孔隙度。研究区多口井的粒度分析结果表明,其流沙港组储层砂岩的分选系数为1.74~4.78,平均为3,分选中等; $\phi$ 值为1.03~4.95,平均为2.1,粒度较粗,以中砂岩为主。当 $\phi$ 值一定时,分选越好则孔隙度越高(图3a);当分选系数一定时,粒度越粗则孔隙度越高(图3b);粒度较粗、分选较好及基质含量较少的砂体储层物性较好。因此,辫状河三角洲前缘砂体较平原砂体的搬运距离长,基质含量少,分选好,储层物性也较好,且整体上辫状河三角洲相比扇三角洲相的储层物性要好。对不同沉积环境、埋深相当的砂体物性进行统计表明,花场—白莲地区流沙港组的储层物性由好到差依次为:辫状河三角洲前缘砂体—辫状河三角洲平原砂体—扇三角洲前缘砂体—扇三角洲平原砂体,辫状河三角洲前缘是研究区最为有利

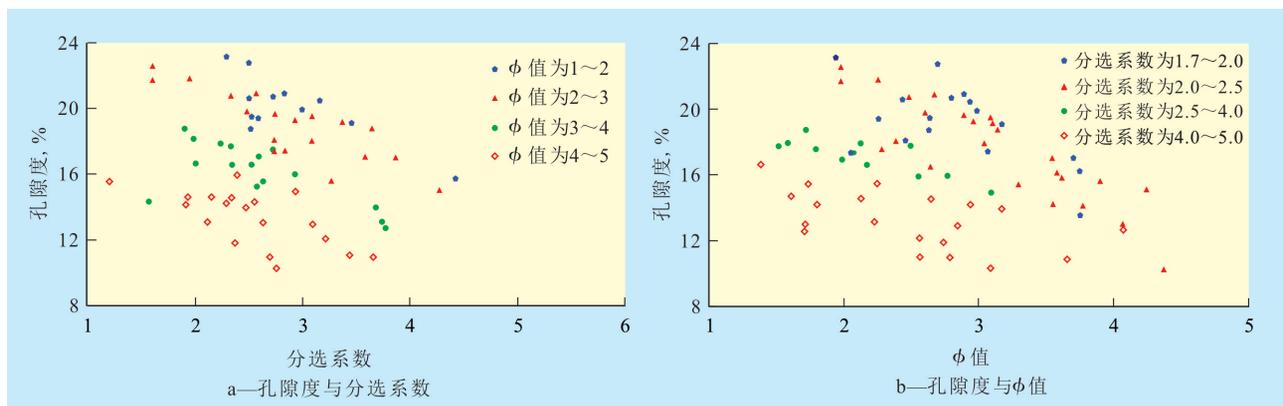


图3 福山凹陷花场—白莲地区流沙港组孔隙度与分选系数和 $\phi$ 值的关系

的沉积相带。

## 5.2 成岩作用

### 5.2.1 压实作用

研究表明,压实作用可使砂岩的孔隙结构变差,由大孔隙、粗喉道逐渐向小孔隙、细喉道变化,因而导致孔隙度迅速减小<sup>[13-15]</sup>;由于压实作用等因素,孔隙度和渗透率具有随埋深增加而呈指数减小的趋势。研究区流沙港组埋深大于3 200 m储层的孔隙度多低于20%,研究区压实作用较强的地区,例如白莲次凹附近砂岩的减孔量可高达30%,致使孔隙流体在砂体中的流动能力大大减弱,从而影响砂体的储集物性。根据Beard提出的湿砂在地表条件下的分选与孔隙度的关系<sup>[16]</sup>来恢复研究区砂岩的原始孔隙度,结果表明,研究区沉积物原始孔隙度约为30.2%~38.3%,平均为35.1%;而现今孔隙度仅为6%~20.1%,平均为12.7%;从而得出成岩作用的减孔量约为10.1%~32.3%,其中压实作用的减孔量为10%~23%,一般大于15%,而胶结作用的减孔量为3%~13%,大部分小于10%;因此压实作用是造成研究区储层孔隙度损失的主要因素,其次为胶结作用。

### 5.2.2 胶结作用

粘土矿物胶结、硅质胶结和碳酸盐胶结是研究区最主要的胶结作用。高岭石、石英和碳酸盐等原生矿物的形成,主要是在粒间孔和粒内孔中结晶沉淀析出,从而使孔隙度减小,储层的储集性能降低。

### 5.2.3 溶蚀作用

溶蚀作用对研究区流沙港组储层物性的改善具有积极意义。晚成岩阶段形成的酸性孔隙流体是导致储层碎屑组分被溶蚀,形成溶蚀孔隙的主要动力和介质<sup>[17]</sup>。研究区流沙港组基本以长石颗粒或含长石的碎屑颗粒的溶解作用为主,溶蚀面孔率为4.2%~13.5%,平均为7.3%,使储层的孔隙度增大;但溶蚀过程中伴生高岭石等粘土矿物的沉淀,增加了孔隙和喉道的曲折程度和表面粗糙程度,从而使渗透率下降,这也是研究区储层孔隙度中等,而渗透率较低的原因之一。

## 5.3 构造作用

研究区流沙港组砂岩在埋藏过程中的孔隙演化始终受构造作用控制。花场地区的构造变换带为长期继承性发育的局部构造高部位,其埋深相对较浅,受压实作用影响较小,同时位于白莲次凹下伏烃源岩热演化产生的酸性水运移的优势通道和方向上,溶蚀作用较强,次生孔隙发育,最终使研究

区的储层物性得到改善。

## 6 结论

福山凹陷花场—白莲地区流沙港组的岩石类型主要为长石岩屑砂岩和岩屑砂岩,孔隙类型主要以粒间溶孔和粒内溶孔为主,孔隙类型以中—细喉道、小孔型为主,属于中孔、中低渗透储层。流沙港组储层主要处于晚成岩阶段A期,主要的成岩作用包括压实、胶结和溶蚀作用等,少见压溶作用。沉积、成岩和构造作用共同影响着研究区的储层物性,其中沉积作用对储层物性的影响主要表现为,辫状河三角洲前缘砂体由于搬运距离长、基质含量少、分选好,因而储层物性较好;成岩作用对储层物性的影响主要表现为,压实作用是造成研究区砂岩原生孔隙大量丧失的主要原因,而溶蚀作用产生的次生孔隙则改善了储层物性;构造作用对储层物性的影响主要表现为,花场地区的构造变换带为长期继承性发育的局部构造高部位,白莲次凹烃源岩热演化产生的酸性水向花场地区运移,造成该地区溶蚀孔隙发育,储层物性得到改善。综上所述,研究区流沙港组储层的原始孔隙度中等,后期成岩作用改造强烈,成岩作用是其储层物性的主要影响因素;有利储层主要为花场地区辫状河三角洲前缘相对较高部位的砂体。

### 参考文献:

- [1] 孙永传,李忠,李惠生.中国东部含油气断陷盆地的成岩作用[M].北京:科学出版社,1996:46-72.
- [2] 蔡春芳,梅博文,马亭,等.塔里木盆地有机酸来源、分布及对成岩作用的影响[J].沉积学报,1997,15(3):103-108.
- [3] 寿建峰,朱国华.砂岩储层孔隙保存的定量预测研究[J].地质科学,1998,33(2):244-250.
- [4] 钟大康,朱筱敏,周新源,等.构造对砂岩孔隙演化的控制——以塔里木中部地区东河砂岩为例[J].地质科学,2004,39(2):214-222.
- [5] 史基安,王琪.影响碎屑岩天然气储层物性的主要控制因素[J].沉积学报,1995,13(2):128-138.
- [6] 陈纯芳,赵澄林,李会军.板桥和歧北凹陷沙河街组深层碎屑岩储层物性特征及其影响因素[J].石油大学学报:自然科学版,2002,26(1):4-7.
- [7] 张琴,朱筱敏,钟大康,等.山东东营凹陷古近系碎屑岩储层特征及控制因素[J].古地理学报,2004,6(4):493-502.
- [8] 冯娟萍,李文厚,欧阳征健,等.陕北青化砭油田长2砂岩储层物性的控制因素[J].吉林大学学报:地球科学版,2008,38(3):417-424.

(下转第29页)