

城壕油田西 259 井区块长 3 特低渗透储层特征及综合评价

杨慧¹ 丁丽可¹ 莫建武^{1,2} 梅丽³

(1. 中国石化中原油田分公司 第五采油厂,河南 濮阳 457001;2. 大陆动力学国家重点实验室(西北大学),陕西 西安 710069;
3. 河南中原绿能高科有限责任公司,河南 濮阳 457001)

摘要:利用测井资料、铸体薄片、扫描电镜、X-衍射、粒度分析和压汞等化验分析资料,综合分析了城壕油田西 259 区块长 3 特低渗透储层的岩石学特征、微观孔隙结构特征及它们的影响因素,评价了该储层的储集性能。长 3 油藏的储层物性总体较差,粒间孔、溶蚀孔、晶间孔等孔隙发育,孔隙结构属小孔隙、微细喉道类型。长 3 油藏的特低渗透特征受沉积作用和成岩作用的共同影响,沉积微相控制着储层特征,水下分流河道和河口坝明显好于水下分流间湾,而且成分成熟度低和粒度偏细也是造成特低渗的主要因素之一;同时成岩压实、胶结作用使储层的孔隙度、渗透性进一步减小、变差,而溶蚀作用和成岩缝的产生又在很大程度上改善了储层的特低渗透特征。将长 3 油藏储集岩分为 3 类进行了综合评价,认为水下分流河道与河口坝砂体是主要储层分布相带。

关键词:储集层特征;地层评价;成岩作用;储集层;城壕油田

中图分类号:TE348 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2010)04-0112-06

Formation Characteristics and Evaluation of Extra Low-Permeability in X259 Area of Chenghao Oilfield

Yang Hui¹ Ding Like¹ Mo Jianwu^{1,2} Mei Li³

(1. No. 5 Oil Production Division, Zhongyuan Oilfield Branch Company, Sinopec, Puyang, Henan, 457001, China; 2. State Key Laboratory of Continental Dynamics/Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shanxi, 710069, China; 3. Henan Zhongyuan Green Energy Hi-Tech Co. Ltd., Puyang, Henan, 457001, China)

Abstract: In order to understand the formation characteristics and their impacts in order to evaluate the formation comprehensively, the rock characteristics and micro pore structure and its impacts were analyzed using logging data and information from thin section, electron microscope scanning, X-diffraction, grain size distribution analysis and mercury penetration etc. The formation was evaluated. The results show that formation properties are poor with developed intergranular pores, vug and intercrystal pore; the pore structure belongs to fine type with microscopic throat. Low permeability is caused by sedimentation and diagenesis with sedimentary microfacies determining the formation characteristics. The immature development and fine grain are also the reasons to cause the low permeability. In addition, compaction and cementation caused deduction of porosity and make permeability even worse, while erosion and diagenetic fractures improved permeability. The reservoir is classified into 3 classes for evaluation. Subsea river channel and river mouth sand are the main distributed facies belt.

Key words: reservoir characteristics; formation evaluation; diagenesis; Chang 3 Reservoir; Chenghao Oilfield

城壕油田西 259 区块位于鄂尔多斯盆地的西南部,面积约 300 km²,为一平缓近南北向展布的西倾单斜,倾角约 0.5°;局部区域由于差异压实作用形成了鼻状构造,这些鼻状构造与三角洲砂体匹配,对油气富集有一定的控制作用^[1-2]。该区块处于湖盆中心,具有有利的生储配置关系,沉积上位于辫状河

收稿日期:2009-11-30;改回日期:2010-06-11

基金项目:国家科技支撑计划“低(超低)渗透油田高效增产改造和提高采收率技术与产业化示范”(编号:2007BAB17B02)资助

作者简介:杨慧(1971—),女,河南开封人,1996 年毕业于石油大学(华东)油藏工程专业,工程师,主要从事油气田地质与开发方面的研究工作。

联系方式:(0393)4898372,yh4811687@163.com

三角洲前缘主体部位,可划分为水下分流河道、分流间湾和河口坝等沉积微相^[3-4]。

西259区块长3油藏由于资料缺乏,以前没有对其储层进行过系统的研究和论证,使该油藏在2008年投入开发时,出现了诸多问题。因此,急需对长3油藏的储层特征及影响因素进行研究,对储层进行综合评价,指导油藏开发。为此,笔者利用测井资料和铸体薄片、扫描电镜、X-衍射、粒度分析和压汞等化验分析资料,综合分析了城壕油田西259区块长3特低渗透储层的岩石学特征、物性特征、微观孔隙结构特征和它们的影响因素,并评价了该储层的储集性能。

1 储层特征分析

1.1 物性特征

由岩心统计资料可知,西259区块长3油藏储层的孔隙度为3.89%~13.89%,平均为9.75%;渗透率为 $(0.01 \sim 5.50) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $1.28 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。与相邻区块相比^[5-6],西259井区长3油藏的储层属低孔、特低渗储层。

1.2 岩石学特征

长3储层的岩性主要为浅灰色、灰色和灰褐色细-中粒岩屑质长石砂岩,少量为长石砂岩或长石岩屑砂岩(如图1所示)。岩石薄片和铸体薄片鉴定分析表明,碎屑岩成分有石英、长石和暗色岩屑等,岩石成分的成熟度低,结构成熟度低到中等,分选性中等到好,磨圆度多为次棱角状,以加大-孔隙式胶结为主,其次为孔隙-薄膜式胶结,偶见薄膜式胶结。

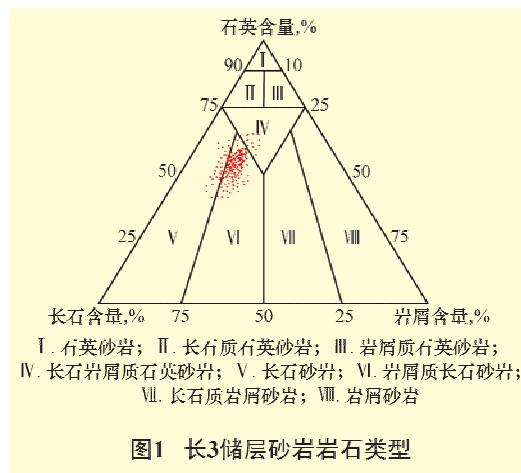


图1 长3储层砂岩岩石类型

岩石矿物主要为陆源碎屑,成分总含量一般为82.0%~94.5%,平均为90.5%,其中:石英含量为

44.5%~58.0%,平均为51.0%;长石含量为18.5%~26.5%,平均为22.0%;岩屑含量为13.0%~23.5%,平均为17.5%。岩屑成分复杂,主要为中浅变质岩,含量平均达17.5%,主要包括片岩、千枚岩、板岩和变质砂岩,其次为灰岩等沉积岩岩屑及少量云母。填隙物成分占9.5%左右,主要由黏土矿物和碳酸盐胶结物组成,其中铁方解石(3.6%)、绿泥石(2.4%)和伊利石(2.3%)的含量最大,其次为硅质(2.1%)、高岭石(1.1%)、铁白云石(0.9%)及长石质(1.0%)。

1.3 孔隙类型

岩石薄片、铸体薄片和扫描电镜分析显示,西259区块长3储层的孔隙类型以残余粒间孔为主,其次为长石溶孔和少量岩屑溶孔,偶见晶间孔及成岩微裂缝(见表1)。与相邻区对比^[6],西259区块长3储层的粒间孔、长石溶孔分布较多。从孔隙形状看,多以三角形或多边形粒间孔为主,也有一些长条形或不规则形状的次生溶蚀孔隙。

表1 长3储层孔隙类型统计

孔隙类型	最小值	最大值	平均
粒间孔	0.20	7.90	3.60
长石溶孔	0.50	4.50	1.89
岩屑溶孔	0.20	1.20	0.41
晶间孔	0.10	0.40	0.26
面孔率	1.10	9.70	5.50

1.3.1 粒间孔

粒间孔是长3储层的主要孔隙类型,存在于骨架颗粒之间,主要为未被陆源杂基和自生胶结物堵塞的残余粒间孔隙,如图2(a)所示。由于成岩压实及胶结作用改造,大部分原生粒间孔已丧失殆尽,仅有局部残余分布于杂基含量较低、岩屑颗粒较少且分选较好的中粒储层中。孔径主要集中在10~70 μm,大小不一,形态较规则,多呈近三角形、四角形和不规则形状等。

1.3.2 长石溶孔

长3储层常见长石沿不稳定节理、双晶缝发生溶蚀作用,溶孔呈不规则网格状、蜂窝状或拉长状,甚至全部被溶蚀形成铸模孔,如图2(b)所示。长石溶孔在长3储层较为发育,对储层有效孔隙贡献较

大,孔径一般为 $10\sim30\text{ }\mu\text{m}$,常与溶蚀粒间孔隙伴生分布,但分布很不均匀。

1.3.3 岩屑溶孔

岩屑溶孔在长3油层较为常见,主要是岩屑中可溶性组分被选择性溶蚀成蜂窝状溶孔,岩屑颗粒多为部分溶蚀,如图2(c)所示。孔径一般为 $5\sim20\text{ }\mu\text{m}$,局部具有肉眼可见的大溶孔,分布很不均匀。

1.3.4 晶间孔

长3储层晶间孔较为发育,主要为高岭石和石盐晶间孔隙(见图2(d)),孔径一般为 $1\sim5\text{ }\mu\text{m}$,虽对储层的储集能力贡献不大,但其分选较好,对储层渗流能力有一定的贡献。

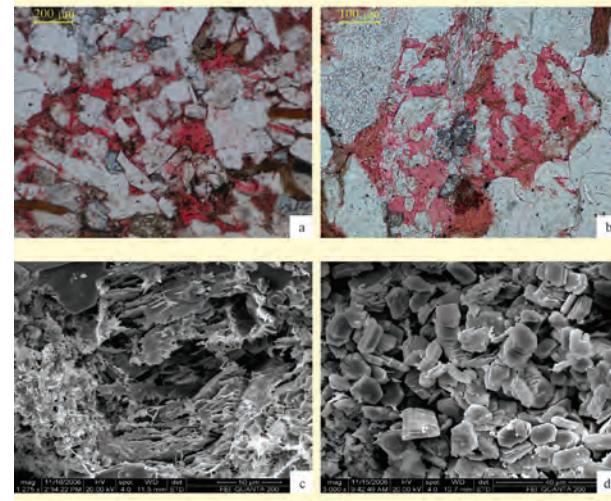


图2 长3储层铸体薄片和扫描电镜下孔隙结构照片

1.3.5 微裂隙

长3储层有2类微裂隙,一类沿颗粒与填隙物接触面断开,一类切穿石英及其他颗粒,使分隔的孔隙连通起来,大大改善了储层的连通性和渗透性。两类微裂隙主要都是由于压实作用形成的细小成岩缝,其含量最多为1%。

1.4 孔隙结构特征

从西259区块12口井59块样品的压汞图像来看,长3储层毛管压力曲线平缓段不明显,以陡斜型为主;孔喉分选好到中等,歪度偏细,正负偏态都有。喉道中值半径一般为 $0.020\sim0.416\text{ }\mu\text{m}$,平均为 $0.1435\text{ }\mu\text{m}$,分选系数平均1.76,变异系数平均0.34;排驱压力平均为1.9701 MPa,中值压力平均为7.8420 MPa,最大进汞饱和度平均为

82.563%,退汞效率平均为31.54%。依据前人对延长组储层孔喉的分级标准^[4,7-9],该储层孔隙结构类型属小孔隙、微细喉道型。而通过铸体薄片、扫描电镜观察与数理统计,长3储层喉道类型以片状喉道及弯片状喉道为主,其次为缩颈型喉道和管束状喉道,喉道配位数很低,仅以2~3为主,孔隙之间连通性较差,局部孔隙之间无喉道连通。

2 特低渗透形成及其影响因素分析

2.1 沉积作用的影响

沉积环境影响沉积相,而沉积相带的变化又直接影响储层物性。不同沉积相带砂体的厚度、粒度、分选和杂质含量等均存在差异,即使在同一沉积相带中,由于水动力条件的变化,沉积物成分也有所不同,导致储层孔隙度、孔隙结构及渗透率也会有差异^[3,8,10]。研究结果表明,西259区块长3储层为一套辫状河三角洲前缘相沉积,主要发育水下分流河道、河口坝和分流间湾沉积。结合沉积微相平面图,根据物性统计分析(见表2)发现,分流河道砂层的物性好于河口坝及分流间湾,河口坝砂层的物性好于分流间湾,可见沉积微相直接影响特低渗透储层的分布。

表2 长3储层沉积微相物性分布

沉积微相	孔隙度, %		渗透率/ $10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$	
	范围	平均值	范围	平均值
水下分流河道	10.50~19.65	13.22	0.58~31.94	1.92
河口坝	9.20~14.70	11.13	0.43~11.12	1.49
分流间湾	3.54~11.21	5.20	0.01~2.54	0.34
研究区	3.54~19.65	9.65	0.01~31.94	1.39

长3储层软组织成分含量、粒度和成分成熟度及填隙物也对该储层特低渗透成因造成了一定的影响。其中软组织成分云母类矿物含量较多,使孔隙度和渗透率变小。长3储层砂岩在整体上颗粒较细,以细砂为主,80%以上粒级分布为细砂岩,粉砂岩分布为9.25%,而中、粗砂岩与泥质含量非常少。通过对长3储层不同粒径岩性样品面孔率的比较发现,粒度越细,其面孔率越低,如图3所示。可见其粒度与特低渗透成因关系密切,粒度细小是造成该储层低孔特低渗的原因之一。

长3储层砂岩石英含量远低于长石含量,表现

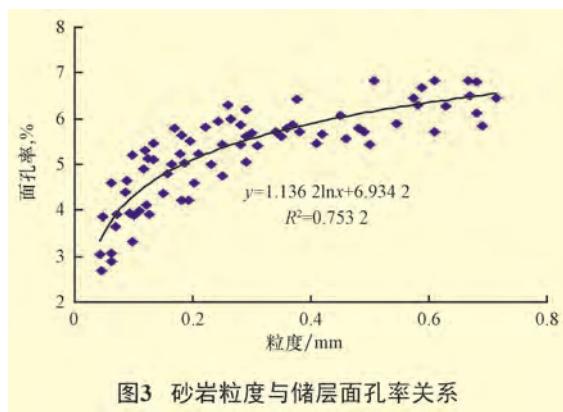


图3 砂岩粒度与储层面孔率关系

为成分成熟度较低。而石英颗粒骨架有较强的抗压实作用,使原生孔隙能得以很好地保留。可见,该储层的特低渗成因也与其石英含量低有着不可分割的关系。

2.2 成岩作用的影响

长3储集层主要经历了压实作用、胶结作用及晚成岩期的溶蚀作用等成岩作用。压实作用使砂岩储集层原始孔隙损失;胶结作用不仅破坏了部分原生孔隙,而且进一步破坏次生溶孔,粒间各种自生矿物的充填和胶结作用堵塞了孔喉使渗透性变差;晚成岩期强烈的溶蚀作用形成次生溶孔,使砂岩的储集空间有所增加。

2.2.1 压实作用

镜下观察发现,长3储集层经历了中等强度的压实作用,导致岩石结构发生变化,塑性颗粒受压变形,刚性颗粒受压破裂、错断;颗粒趋于定向排列,呈点一线状、凹凸接触(见图4(a))。长3储层千枚岩、片岩和云母等塑性岩屑含量较高,由于受力被挤压呈假杂基出现,充分表现出岩屑砂岩强烈的压实、压溶作用。因此,压实作用所导致的塑性颗粒变形及碎屑颗粒排列方式变致密,是长3储层物性和储集性能变差的主要原因之一。

2.2.2 胶结作用

长3储层的胶结物主要为黏土矿物胶结物、碳酸盐岩胶结物、硅质胶结物及少量长石质胶结物。

1) 黏土矿物的胶结作用

从扫描电镜观察和X-衍射分析可知,西259区块长3储层黏土矿物的种类主要有绿泥石(2.4%)、伊利石(2.3%)、高岭石(1.1%)和伊/蒙混层(0.2%)。绿泥石是砂岩内最主要的自生黏土矿物,镜下观察

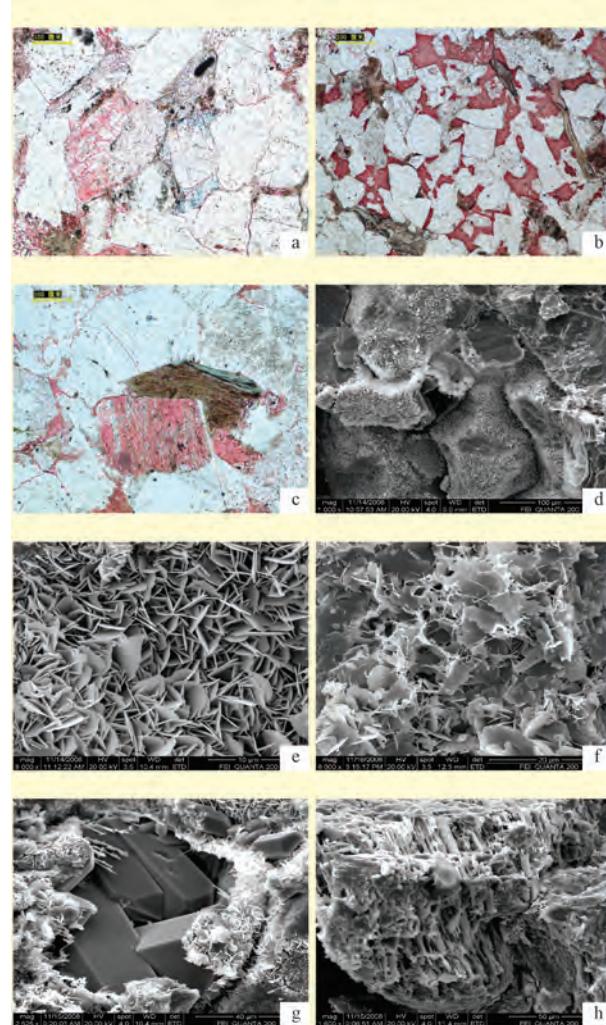


图4 长3储层铸体薄片和扫描电镜下成岩作用照片

发现其主要以2种状态赋存:一为孔隙衬边方式产出的黏土膜(见图4(d)),是成岩早期从偏碱性孔隙水中沉淀下来的绿泥石,沿孔隙壁发育,在颗粒表面形成一层环状薄膜;另一种为充填于孔隙中的填隙物(见图4(e)),为针叶状或玫瑰花状集合体,充填于孔隙中间。伊/蒙混层在长3储层分布比较稳定,电镜下多为蜂窝状或卷片状,充填在颗粒之间;随着成岩强度的加大,伊/蒙混层逐渐向伊利石转化。该储层伊利石的含量较高,仅次于绿泥石,通常形成于晚成岩阶段,常呈丝状、弯曲片状包围颗粒或填充孔隙(见图4(f))。

随埋深的加深,绿泥石和伊利石含量逐渐增大。绿泥石一般向孔隙中生长,使孔隙空间减小,且局部绿泥石部分向伊利石转化^[11]。伊利石不断发育生长,可由孔隙空间的一端达到彼岸,呈现搭桥式生长,从而分割大孔隙而使其变成微孔隙,粒间网状、丝状伊利石造成流体流动通道的曲折多变,大大降

低了储层的孔隙度和渗流能力。总之,黏土矿物的增加,使储层孔隙变细,连通性变差(见图5),是形成低渗透储层的主要因素之一。

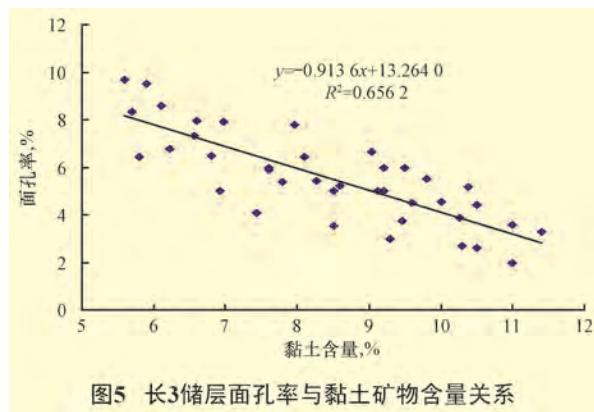


图5 长3储层面孔率与黏土矿物含量关系

2) 碳酸盐胶结作用

碳酸盐胶结物在长3储层中非常普遍,主要成分为铁方解石和铁白云石。常见微晶状、晶粒状或连晶状产出,以嵌晶式、薄膜式和栉壳状充填于原生和次生孔隙之间(见图4(b));可见,碳酸盐胶结作用可持续到溶蚀作用之后,在不同成岩阶段均有产出,只是在晶体大小和成分上有较大差异。据统计,碳酸盐胶结物造成长3储层砂岩孔隙损失20%~50%。碳酸盐质量分数与储层物性之间呈明显的反比例关系,且相关性显著好于其他胶结物含量与储层物性关系。因此,长3储层的储集性能随碳酸盐岩胶结物含量的增大而显著变差(如图6所示),且碳酸盐岩胶结物对储集性能的控制作用较其他胶结物更为明显;碳酸盐胶结是低渗透储层形成的最为重要的原因^[12]。

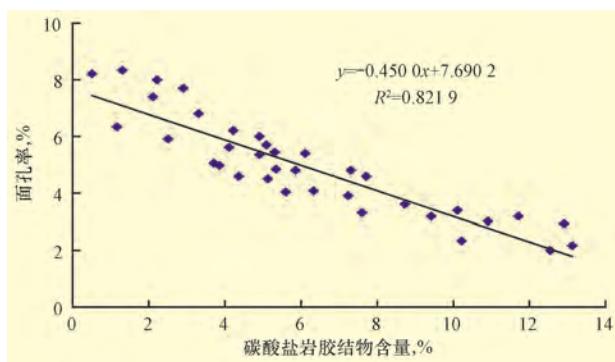


图6 碳酸盐岩胶结物含量与面孔率关系曲线

3) 硅质胶结作用

硅质胶结物在长3储层砂岩中分布普遍,但比例不大,主要以石英次生加大和自形石英晶体产出在碎屑石英颗粒表面、粒间孔壁和粒内溶孔中(见图4(g))。铸体薄片及扫描电镜分析表明,在酸性环境中不稳定矿物如斜长石、钾长石及由其组成

的凝灰岩屑、花岗岩屑中普遍发生过溶蚀作用,形成了高岭石。在该反应中,1单位体积钾长石可产生0.43单位体积SiO₂,为硅质胶结物的形成提供了主要物质来源。石英胶结物占据孔隙空间,降低了储层的孔隙度。

2.2.3 溶蚀作用

长3储层溶蚀作用非常发育,其中最主要的是长石和岩屑溶蚀作用,形成长石溶孔(见图4(c)、图4(h))、长石溶缝及岩屑溶孔,它是储层次生孔隙形成的最主要因素^[13-14]。早期的溶孔(薄片)中常见到与光性方位一致的长石残晶,可为后来的胶结物充填。一些厚的砂坝砂体,由于地层水循环良好,溶孔较发育。正是由于溶蚀作用的多次发生,使砂岩孔隙结构发生变化,次生孔隙发育。目的层段镜下薄片鉴定表明,砂岩孔隙中至少有1/3~2/3是次生孔隙,部分样品的次生孔隙含量接近或低于原生孔隙,次生孔隙的发育状况对该储层低孔、特低渗透砂岩物性条件的改善起到了举足轻重的作用。

2.2.4 成岩微裂缝

铸体薄片镜下观察发现,西259区块的成岩微裂缝比较发育,改善了储层的渗流能力。成岩作用期间,由于压实和矿物的结晶作用,发生收缩和膨胀以及矿物间的重新组合与排列,产生了微裂缝(见图4(c))。一方面,能够改善孔隙的连通性,沟通孤立的孔隙和微孔;另一方面,为酸性水的流动提供渗流通道,改善了溶蚀环境,有利于溶蚀孔形成。

3 储层综合评价

根据西259区块长3储层岩性、物性及孔隙类型及孔隙结构特征,对该储层进行分类评价(见表3)。评价类别主要为Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类,从表3可以看出,Ⅰ类储层的物性好于Ⅱ类储层,Ⅱ类储层的物性好于Ⅲ类储层。分类评价结果见表4。由表4可知,西259区块长3储层中Ⅰ类储层物性最好,总体分布较多;Ⅱ类储层物性较好,分布最为广泛;Ⅲ类储层物性较差,分布较少。综合储层分布来看,长3₂—长3₃小层中,Ⅰ类储层所占百分比最多,Ⅱ类储层次之,Ⅲ类储层最少;其他小层Ⅰ类储层分布相对较少,Ⅲ类储层分布相对较多。这是由于长3₂

层形成时期属于三角洲发育的鼎盛时期与快速推进生长时期,水下网状分流河道、河口砂坝等沉积微相较为发育,储层石英含量较高,软组分、杂基

含量较少;成岩压实作用较弱,碳酸盐矿物胶结较少,后期溶蚀作用明显,粒间孔、溶蚀孔发育,形成了物性较好的储集层。

表3 储层分类评价

储层类别	砂体厚度/m	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	孔隙度,%	排驱压力/MPa	中值压力/MPa	中值半径/ μm	孔隙类型	评价结果
I类	>8.0	>1.6	>12.0	<0.8	<5.5	>0.142	粒间孔和溶孔	好
II类	4.0~8.0	1.6~0.4	6.0~12.0	0.8~2.4	5.5~8.8	0.080~0.142	溶孔和粒间孔	较好
III类	<4.0	<0.4	6.0	>2.4	>8.8	<0.08	粒内溶孔	差

表4 长3储层分类评价结果

分类	长3 ₁ ¹ 层	长3 ₁ ² 层	长3 ₁ ³ 层	长3 ₂ ¹ 层	长3 ₂ ² 层	长3 ₂ ³ 层	长3 ₃ ¹ 层	长3 ₃ ² 层	长3 ₃ ³ 层	%
I类		30.5	25.6	35.5	51.2	47.6	18.2	22.6	17.7	
II类	26.7	36.5	46.3	64.5	48.8	46.7	45.6	57.9	42.3	
III类	73.3	33.0	28.1			5.7	36.2	19.5	40.0	

(4):365~370.

4 结论与认识

1) 西259区块长3储层属辫状河三角洲前缘亚相沉积,主要发育水下分流河道、河口坝和分流间湾微相。岩石类型主要为细—中粒岩屑质长石砂岩;砂岩软组分较多,具有成分成熟度较低、磨圆度较差、结构成熟度低到中等的特点。

2) 长3储层孔隙类型以残余粒间孔、溶蚀孔为主,溶蚀孔主要为长石溶孔与岩屑溶孔。孔隙结构主要为小孔隙、微细喉道;喉道配位数低,孔隙之间连通性差。

3) 成岩压实作用使粒间孔隙大量损失,胶结作用使储层孔隙和渗透性进一步减小、变差;然而,后期成岩溶蚀作用产生的次生孔隙及少量的成岩微裂缝在很大程度上改善了长3储层的特低渗透特征。

4) 储层综合评价结果表明,沉积微相对储层物性、孔隙结构影响较大;水下分流河道和河口坝由于成岩压实作用较弱、碳酸盐矿物胶结较少、后期溶蚀作用明显,物性和孔隙结构参数明显好于分流间湾,是长3储层的主要储集空间。

参 考 文 献

- [1] 何自新.鄂尔多斯盆地演化与油气[M].北京:石油工业出版社,2003:95~97.
- [2] 李凤杰,王多云,徐旭辉.鄂尔多斯盆地陇东地区三叠系延长组储层特征及影响因素分析[J].石油实验地质,2005,27

- [3] 李凤杰,王多云,郑希民,等.陕甘宁盆地华池地区延长组缓坡带三角洲前缘的微相构成[J].沉积学报,2002,20(4):582~587.
- [4] 李凤杰,王多云,张庆龙,等.鄂尔多斯盆地陇东地区延长组沉积相特征与层序地层分析[J].沉积学报,2006,24(4):549~554.
- [5] 李群,郭建华,郭宇航.华池油田华152区块油层组砂岩的成岩作用与孔隙演化[J].沉积与特提斯地质,2008,28(2):40~45.
- [6] 高剑波,庞雄奇,王志欣,等.鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组碎屑岩储层低渗特征及含油性主控因素[J].中国石油大学学报:自然科学版,2007,31(1):5~12,18.
- [7] 宋子齐,王静,路向伟,等.特低渗透油气藏成岩储集相的定量评价方法[J].油气地质与采收率,2006,13(2):21~23.
- [8] 尹昕,应文敏.鄂尔多斯盆地大牛地气田上古生界低孔渗砂岩储层评价[J].矿物岩石,2005,25(2):104~109.
- [9] 王瑞飞,沈平平,宋子齐,等.特低渗透砂岩油藏储层微观孔喉特征[J].石油学报,2009,30(4):560~563,569.
- [10] Houseknecht D W. Assessing the relative importance of compaction processes and cementation to reduction of porosity in sandstones[J]. AAPG Bulletin,1987,71(6):633~642.
- [11] 黄思静,谢连文,张萌,等.中国三叠系陆相砂岩中自生绿泥石的形成机制及其与储层孔隙保存的关系[J].成都理工大学学报:自然科学版,2004,31(3):273~281.
- [12] 傅强.成岩作用对储层孔隙的影响[J].沉积学报,1998,16(3):92~96.
- [13] 赵澄林,朱筱敏.沉积岩石学[M].3版.北京:石油工业出版社,2005:125~137.
- [14] 史基安,王金鹏,毛明陆,等.鄂尔多斯盆地西峰油田三叠系延长组长6—8段储层砂岩成岩作用研究[J].沉积学报,2003,21(3):373~380.

[审稿 侯加根]