

文章编号: 1009-3850(2010)01-0044-05

长庆白豹油田低渗透储层成岩作用及成岩储集相研究

王晓杰¹, 彭仕宓¹, 赵文光²

(1. 中国石油大学 资源与信息学院, 北京 102249; 2 中国地质大学 (武汉) 资源学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 本文依据铸体薄片、电镜扫描、镜质体反射率、有机质成熟度等分析化验资料并结合岩石学特征, 研究了长庆白豹油田长 3 长 4+5 油层组的主要成岩作用, 认为主要有压实作用、胶结作用、溶蚀作用和烃类侵位作用, 而压溶作用不显著, 总体上以破坏性成岩作用为主。总结了各成岩阶段的特征, 建立了成岩演化序列。采用遗传神经网络算法求取成岩储集相参数, 确定了 A B C D 四种成岩储集相类型及其平面展布。

关键词: 白豹油田; 成岩作用; 成岩演化序列; 成岩储集相

中图分类号: TE122.2⁺1

文献标识码: A

1 研究区概况

长庆白豹油田位于陕西省吴旗县白豹乡和甘肃省华池县乔河乡之间, 属黄土塬地貌。钻井所遇地层有第四系、白垩系、侏罗系以及三叠系延长组。主要含油层系为侏罗系延安组延 10 油组、三叠系延长组长 3 长 4+5 油组。本文研究的层段为三叠系长 3 长 4+5 油组。长 3 长 4+5 油组为三角洲前缘沉积, 储层物性主要受沉积相带和成岩作用控制, 岩性细, 物性相对较差, 平均孔隙度为 13.4%, 渗透率为 $3.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 为中低孔、特低渗储层。油层多而薄, 纵向上非均质性严重、粘土矿物含量高、束缚水饱和度高。

成岩作用对储层孔隙的形成、保存和破坏起着极为重要的作用, 不同的埋深、温度、压力条件下, 岩石的成岩作用阶段不同, 从而影响储层的岩石结构、粘土矿物类型、物性好坏及孔隙结构特征, 是形成低渗透砂岩的主要控制因素, 因此, 开展本区成岩作用的研究非常必要。

2 成岩作用类型及成岩阶段的划分

2.1 储层岩石类型

白豹油田长 3 长 4+5 储层岩性以细砂岩及粉砂岩为主, 粗砂岩和中砂岩较少, 局部发育砾岩, 此外还有泥质粉砂岩、粉砂质泥岩等过渡类型。岩石类型以长石砂岩为主, 岩屑质长石砂岩次之。碎屑组分以长石为主, 含量为 19% ~ 64.2%, 其次为石英, 含量为 21.3% ~ 55.3%。岩屑含量为 8% ~ 31.5%, 由变质岩屑、火成岩屑、沉积岩屑、云母和绿泥石组成。

2.2 成岩作用类型

通过对取心井薄片的镜下观察及扫描电镜、阴极发光、煤镜质体反射率以及成岩矿物组合的分析研究, 确定白豹油田长 3 长 4+5 砂岩储层所经历的成岩作用主要有压实作用、胶结作用、溶蚀作用和烃类侵位作用, 而压溶作用不显著。总体来讲, 长 3 长 4+5 砂岩储层在成岩演化过程中, 以破坏性成岩作用为主, 这是该区形成低孔渗砂岩的主要原因。

收稿日期: 2008-04-30 改回日期: 2009-12-04

作者简介: 王晓杰 (1973—), 女, 工程师, 主要从事石油勘探开发研究

之一^[1~7]。

1. 压实作用

沉积物在埋藏过程中,在上覆沉积物的重荷下,矿物颗粒发生重新排列、排出粒间水,密度增加、孔隙度减小,即为压实作用,该过程是不可逆的^[7]。沉积物在压实过程中,表现为岩石颗粒的弯曲变形及颗粒间接触关系的变化,随着压实作用的增强,岩石颗粒间的接触关系往往由漂浮状、点接触状调整为线接触状,颗粒间接触面积增加。长 3、长 4+5 储层中压实现象普遍,主要有塑性云母碎片发生挠曲(图 1 a)、泥岩屑挤压变形等。碎屑颗粒间的接触关系以点接触和线接触为主,处于弱-中等压实阶段。

2. 胶结作用

胶结作用是指孔隙流体中某种物质含量达到过饱和而在孔隙中发生沉淀,致使岩石固结的作用,是储层孔隙度降低的重要因素。长 3、长 4+5 油组储层中胶结物有碳酸盐矿物和自生粘土矿物。碳酸盐胶结物主要以粒间胶结物、交代物或次生孔隙内填充物形式出现,有明显的多期次形成特征。在成岩作用早期,碳酸盐胶结物较发育,有效地增强了岩石的抗压实能力,从而保存较大的粒间体积。碳酸盐胶结物被溶蚀后,可形成次生孔隙。成岩作用中期,含铁碳酸盐交代及充填作用严重破坏了长 3、长 4+5 储层中期砂岩的孔渗体系。粘土矿物主要有绿泥石、高岭石、伊利石等。其中,绿泥石以粘土膜形式产出(图 1 b)。电镜和探针分析表明,靠近碎屑颗粒处,绿泥石铁含量高,自形程度较低;靠近孔隙处,绿

泥石铁含量低,自形程度较高。这表明本区在同生成岩作用阶段,陆源绿泥石沿孔隙环边沉淀后,在成岩阶段又继续生长,覆盖了颗粒表面,抑制了长石和石英的再生长,因此,绿泥石膜的出现意味着砂岩中保存有较多的原生粒间孔,孔隙度较高,是有利的储集相带。但同时储层粒间孔隙和喉道中又存在大量自生高岭石,造成砂岩的总孔隙度较高,但渗透率较低。由长石蚀变而成的伊利石在研究区储层中普遍存在,其以片状或丝缕状存在于矿物颗粒表面或充填在孔隙中。

3. 溶解作用

通过薄片观察,长 3、长 4+5 地层的石英颗粒均不同程度地发生过溶蚀现象,并形成了次生溶蚀孔隙,而长石颗粒却完好无损,说明溶解作用主要发生在中成岩 I 期的碱性环境。由于白豹油田长 3、长 4+5 油层组属于三角洲沉积物,砂岩中的流体渗流的孔隙体系连通性较差,溶解作用使地层孔隙度局部增大,但渗透性没有得到改善。

4. 烃类侵位作用

烃类进入砂岩孔隙系统中,可以将原来的水岩两相系统改变为水、油、岩三相系统,进而改变原来岩石的水润湿性,导致储层地球化学环境发生较大的变化,抑制了自生矿物的形成以及矿物的交代和转化,石英次生加大、伊利石和铁白云石形成作用均趋向于停止,镜下可见粒间孔中充填沥青。

2.3 成岩阶段的划分

依据薄片、铸体薄片、扫描电镜、镜质体反射率、有机质成熟度等分析化验资料,结合储层岩石学特

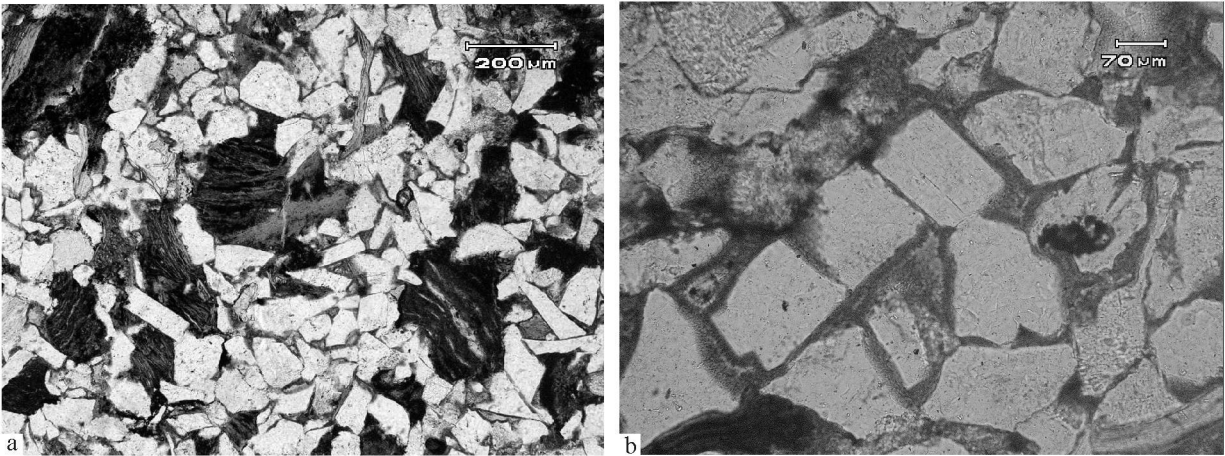


图 1 成岩作用类型显微照片

a 长 3、长 4+5 储层 铸体薄片(塑性的云母碎片发生挠曲); b 绿泥石膜胶结

Fig 1 Microphotographs of diagenesis types

a Bending of the plastic mica flakes; b Cementation of chlorite coating

征、自生矿物类型、产状、形成顺序及共生组合关系等,将长 3 长 4+5 储层成岩作用阶段划分为同生期、早成岩 A 期和 B 期、中成岩 A 期,其中,长 3 地层埋深 1557~2105m,目前主要处于中成岩 A 期,埋深较浅处处于早成岩 B 期;长 4+5 地层埋深 1657~2193m,目前主要处于中成岩 A 期。

1. 早成岩阶段 B 期

颗粒间以点接触为主,由于压实作用和胶结作用增强,岩石由半固结到固结。镜煤反射率为 0.4%~0.5%,有机质半成熟,成岩环境为酸性,开始出现混层粘土矿物,蒙脱石层含量为 50%~70%,属无序混层带。部分石英出现次生加大,局部亮晶方解石呈中细晶或它形粒状充填于粒间孔中。溶蚀作用弱,形成少量粒间和粒内溶孔,孔隙组合以粒间孔隙为主,少量次生溶孔,随着埋深的增加,溶蚀孔隙增加。

2 中成岩阶段 A 期

颗粒间以点线接触为主,压实作用较强,岩石多已固结,开始出现少量粉晶铁白云石。石英和长石自生加大普遍,多围绕碎屑颗粒形成单一晶面。原生孔隙基本定型,次生孔隙大量出现,多由碳酸盐胶结物、长石或岩屑溶蚀而成,形成混合孔隙组合特征。伊蒙混层矿物普遍出现,蒙脱石层含量达 50%~20%,为有序混层带。处于中成岩 A 期上部的地层镜煤反射率达 0.5%~1.3%,有机质处于低成熟阶段,开始生成热解烃,大量有机酸生成,并与粘土矿物演化过程中析出的层间水混合,进入孔隙水体中,对化学性质不稳定的长石、火山岩屑和碳酸盐矿物等易溶组分进行溶蚀,并生成大量次生溶蚀孔隙。

2.4 成岩序列

根据对成岩作用及自生矿物成因分析,结合镜下的各类成岩现象,白豹油田成岩事件和成岩序列可总结为:早期粘土膜形成→机械压实→石英次生加大→方解石沉淀→长石颗粒溶解→自生高岭石形成→方解石溶解→石油侵位→晚期铁方解石充填→晚期白云石充填或交代碎屑颗粒(图 3)。由于自生矿物的形成需要一定时间,因此上述各成岩作用必然会出现重叠的情况。

3 成岩储集相研究

为了更精确地预测有效储集层的分布及储集性质的差异,研究低渗透储集层发育的主控因素之间的相关关系及低渗透储集层综合成因机理,本文在

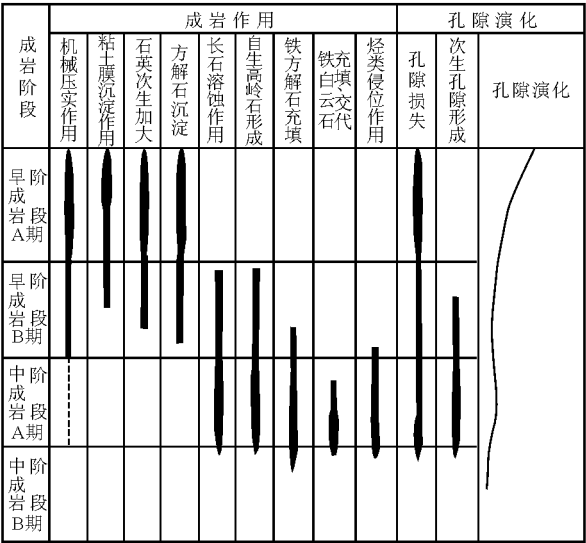


图 2 白豹油田长 3 长 4+5 砂岩成岩作用及成岩演化序列

Fig 2 Diagenesis and diagenetic sequences of the Chang3 and Chang4+5 sandstones in the Babao Oil Field

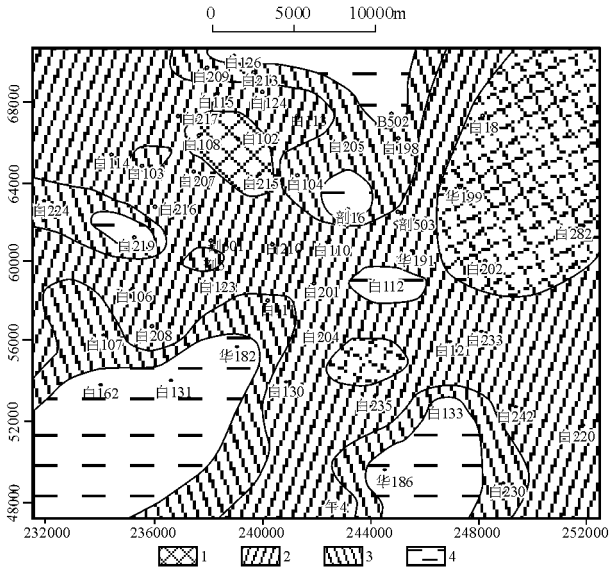


图 3 长 4+5 砂组成岩储集相平面展布图
1 A 相; 2 B 相; 3 C 相; 4 D 相

Fig 3 Planar distribution of the diagenetic reservoir facies in the Chang4+5 reservoir sandstones
1=A facies; 2=B facies; 3=C facies; 4=D facies

综合分析成岩作用、成岩阶段、成岩序列的基础上,应用遗传神经网络模式识别方法,开展了成岩储集相研究。

3.1 成岩储集相

综合考虑岩石类型、粒度和分选性、砂岩中碎屑组分(石英、长石和岩屑)特征及含量、杂基含量、胶

结物类型及含量、储集空间类型、储集物性(孔隙度和渗透率)、压实作用、胶结作用和溶解作用强弱等因素,将白豹油田长3长4+5储层分为A B C D四类成岩储集相,每种储集相的岩性特征、主要成岩作用及储集空间类型见表1。

3.2 成岩储集相参数的确定

由于成岩储集相主要由成岩作用、储层岩石物性特征以及微观孔隙结构等多方面因素共同控制,通过反复优选,结合油藏资料的实际情况,本次成岩储集相研究选用以下七个参数进行成岩储集相的定量划分:①反映孔隙的大小和连通性的孔隙度(Φ);②反映储集层渗流能力的渗透率(K);③反映储层岩性特征的泥质含量(V_{sh});④反映储集层微观喉道大小的排驱压力(P_d);⑤最大孔喉半径(R_d);⑥反映孔喉分选程度的变异系数(C_g);⑦结合岩石结构和矿物地质特征判定不同孔隙几何相的流动层带指标(FZI)。

流动层带指标 FZI 是划分成岩储集相的一个重要参数^[8~10]。一般根据 Kozeny-Carmen关系式来确定:

$$FZI=\frac{1-\varphi}{\varphi}\sqrt{\frac{K}{\Phi}}$$

式中: FZI —流动层带指标; K —渗透率; Φ —孔隙度。

3.3 成岩储集相的识别

统计上述成岩储集相中各项参数值,建立遗传神经网络进行成岩储集相识别的学习样本(表2)。然后输入给定的样本对网络进行训练,此过程需要反复调试,直至满足误差要求,达到收敛条件,样本集的学习识别率达到90%以上,从而对研究区各井各砂组和小层进行成岩储集相的识别。

3.4 成岩储集相的平面展布

通过白豹油田长3、长4+5砂岩储集相的研究,对各砂组进行了储集相的平面展布规律研究。以长4+5砂组为例,该砂组成岩储集相主要以B A相为主,A相发育在主河道近物源区的B118、B202井区及主河道中部的B122井区和B102井区,B相主要发育在沿主河道的H191、B210、B11井及B106井区,C相主要发育在河道侧缘的H198、B213、B111、B230及剖5井区,而D相主要发育在支流间湾微相

表1 白豹油田长3长4+5储层各类成岩储集相划分方案
Table 1 Classification of the diagenetic reservoir facies in the Chang3 and Chang4+5 sandstones in the Baibao Oil Field

类 型 特 征	A相	B相	C相	D相
	绿泥石胶结残余粒间孔成岩储集相	不稳定组分溶解次生孔隙成岩储集相	压实压溶成岩储集相	碳酸盐胶结成岩储集相
岩性	细砂岩	细砂岩、粉砂岩	细砂岩、粉砂岩	钙质砂岩、细砂岩
砂岩成分及结构成熟度	较高	中等	较低	中等 较低
杂基含量	低	中	高	低
主要成岩作用	烃类侵位和粘土膜胶结作用	溶蚀作用	压实作用	胶结作用
储集空间类型	以残余粒间孔和粒间溶蚀扩大孔为主	粒间和粒内溶蚀孔隙为主	粘土杂基和自生粘土晶间微孔为主	粒间和粒内残余孔隙为主
储层类型	中孔特低渗储层	中孔特低渗储层 低孔特低渗储层	低孔超低渗储层	低孔超低渗储层

表2 白豹油田长3长4+5成岩储集相划分统计
Table 2 Statistics of the diagenetic reservoir facies in the Chang3 and Chang4+5 sandstones in the Baibao Oil Field

成 岩 储集相	孔隙度 /%	渗透率 / $10^{-3}\mu\text{m}^2$	泥质含量 /%	排驱压力 /MPa	最大孔喉半径 / μm	变异系数	流动层带指标 / μm
A相	13~20	1~10	< 14	0.12~0.32	3.12~4.56	0.21~0.63	> 0.9
B相	10~17	0.3~1	10~21	0.28~0.57	1.69~3.86	0.57~0.91	0.52~0.9
C相	5~11	0.1~0.3	18~32	0.49~1.02	0.89~1.83	0.85~1.36	0.2~0.55
D相	<5	<0.1	> 30	0.93~1.81	0.32~0.97	1.22~1.78	< 0.2

中(图 4)。同过本区成岩储集相的研究,为储层的预测提供了可靠的约束条件。

4 结 论

(1)长庆白豹油田长 3 长 4+5 油层组成岩作用主要有压实作用、胶结作用、溶蚀作用和烃类侵位作用,而压溶作用不显著。成岩演化过程以破坏性成岩作用为主,这是该区形成低孔渗砂岩的主要原因之一。

(2)在早期成岩作用阶段,以压实作用、胶结作用为主,孔隙逐渐减小,以粒间孔为主;成岩作用中期,交代和溶解作用并存,是次生孔隙主要形成时期。

(3)成岩储集相的研究表明, A B相储层发育在主河道近物源区,是主要产层; C相储层泥质含量相对较高,渗透性差,主要发育在河道侧缘; D相主要发育在支流间湾微相中,储层不发育。

参考文献:

- [1] 赵文光. 低渗透油藏随机建模及开发潜力评价[D]. 中国石油大学工学博士学位论文, 2006 64—100.
- [2] 孙凤华, 陈祥, 王振平. 泌阳凹陷安棚深层系成岩作用与成岩阶段划分[J]. 西安石油大学学报, 2004. 19 24—37.
- [3] 曾大乾, 李淑贞. 中国低渗透砂岩储层类型及其地质特征[J]. 石油学报, 1994 15(1): 38—45
- [4] 李道品, 罗迪强. 低渗透油田开发的特殊规律[J]. 断块油气藏, 1994 4 30—35.
- [5] 蒋凌志, 顾家裕, 郭彬程. 中国含油气盆地碎屑岩低渗透储层的特征及形成机理[J]. 沉积学报, 2004. 22(1): 13—18
- [6] 裘亦楠. 石油开发地质方法论(一)[J]. 石油勘探与开发, 1996 23(2): 43—48
- [7] 赵澄林, 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001. 17—19
- [8] 李海燕, 彭仕宓. 应用遗传神经网络研究低渗透储层成岩储集相[J]. 石油与天然气地质, 2006 27(1): 111—116
- [9] 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
- [10] 杨宇, 郭春华, 袁显华. 改进遗传神经网络在洛带气田测井解释中的应用[J]. 天然气工业, 2005. 25(8): 47—49

Diagenesis and diagenetic reservoir facies of the low-permeability reservoirs in the Baibao Oil Field, Changqing

WANG Xiao-jie, PENG Shimí, ZHAO Wen-guang

(1. College of Resources and Information, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Faculty of Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract The diagenesis of the Chang3 and Chang4+5 oil measures in the Baibao Oil Field, Changqing is treated on the basis of the integration of thin section analysis, electron microprobe scanning, vitrinite reflectance and organic matter maturity. The diagenetic stages comprise compaction, cementation, dissolution and hydrocarbon emplacement. Four diagenetic reservoir facies types and their planar distribution have been ascertained with the aid of the genetic artificial neural network.

Key words Baibao Oil Field; diagenesis; diagenetic sequence; diagenetic reservoir facies