

民和盆地巴州坳陷储集层成岩作用

刘林玉 邸世祥 薛祥煦

(西北大学地质学系, 陕西西安 710069)

民和盆地巴州坳陷储集层的成岩作用强烈。河口组-大通河组上段机械压实作用较强, 主要为方解石胶结, 粘土矿物虽分布普遍但含量较低, 大通河组下段、窑街组机械压实作用较弱, 自生粘土矿物和硅质胶结为主, 破裂作用较为强烈, 有效裂缝发育, 是主要的原油产层和高压气层。

关键词 民和盆地 储集层 成岩作用 破裂作用

第一作者简介 刘林玉 男 33岁 副教授 沉积学和储层地质学

民和盆地位于甘肃省和青海省的交汇地带, 面积约为 $11\ 300\text{ km}^2$, 是祁连褶皱系东端的一个断拗山间盆地^[1]。巴州坳陷位于民和盆地西南部, 属于盆地的次级构造单元, 自上而下分为下白垩统河口组、下白垩-上侏罗统大通河组、中侏罗统享堂组和窑街组。下白垩-中侏罗统沉积形成的碎屑岩构成了巴州坳陷主要的油气储集岩, 见到很好的油气显示。碎屑岩储集层在埋藏期后的成岩过程中发生了一系列成岩变化, 强烈的成岩作用严重破坏了储集的原生孔隙结构。

1 主要的成岩作用

1.1 机械压实作用

下白垩-中侏罗统储集层在埋藏成岩过程中发生了较为强烈的机械压实作用。机械压实作用的强度主要取决于碎屑岩的原始组分。据本区 BC-1井 238 个砂岩铸体薄片鉴定资料分析, 下白垩-中侏罗统储集层可分为两个岩性段。第一岩性段储集层包括下白垩统河口组和大通河组上段砂岩, 砂岩的岩石类型主要为岩屑砂岩和长石质岩屑砂岩, 岩屑的相对含量为 $10\% \sim 51\%$, 平均超过 30% , 主要为凝灰岩、泥岩和少量千枚岩、粉砂岩及碳酸盐岩屑, 其中多数岩屑的抗压强度较差, 受力后非常容易发生塑性变形。该段储集层机械压实作用非常强烈主要表现为: 一方面, 碎屑颗粒之间多呈线-凹凸状接触, 多数碎屑发生定向-半定向排列; 另一方面, 部分软性岩屑被挤入刚性碎屑之间,

发生强烈的假杂基化。第二岩性段储集层包括中上侏罗统大通河组下段、享堂组和窑街组砂岩, 砂岩的岩石类型主要为长石岩屑质石英砂岩, 砂岩中岩屑的含量较低, 平均低于 18% , 砂岩组分主要为石英碎屑, 石英的相对含量为 $50\% \sim 97\%$, 平均超过 65% , 石英碎屑对机械压实具有较强的抵抗作用, 因而该段储集层机械压实作用相对较弱, 碎屑颗粒之间多呈线状接触, 岩屑的假杂基化现象较为少见。

1.2 胶结作用

巴州坳陷储集层中的自生矿物胶结物主要为碳酸盐、粘土矿物和硅质胶结物。各种自生矿物在储集层中的分布是很不均一的。

1.2.1 碳酸盐胶结

碳酸盐胶结物主要分布于下白垩统河口组-大通河组上段(第一岩性段)储集层中, 主要为方解石(图版 I-1)和少量铁方解石, 平均含量为 8.6% 。在中上侏罗统大通河组下段-窑街组(第二岩性段)储集层中, 碳酸盐胶结物的含量相对较低, 平均为 3.9% , 其中大通河组下段-享堂组储集层的碳酸盐矿物为方解石和铁方解石, 窑街组储集层的碳酸盐矿物主要为铁方解石和少量(低于 2%)铁白云石。碳酸盐矿物呈他形晶充填粒间孔隙, 或呈连晶式胶结, 并交代石英和长石碎屑。随着埋深的增加, 碳酸盐矿物发生由方解石向铁方解石的转变。

1.2.2 自生粘土矿物胶结

自生粘土矿物是储集层主要的胶结物之一。据扫描电镜观察和 X-射线衍射分析, 自生粘土矿物主要为伊利石(图版 I-2), 次为绿泥石(图版 I

3) (表 1), 河口组上段有少量伊/蒙混层(图版 I-4)。伊利石呈不规则的片状, 绿泥石呈树叶状或花朵状, 伊/蒙混层呈弯曲的片状。自生伊利石粘土矿物主要为成岩早期火山岩岩屑水化水解作用产生的蒙脱石转化形成的^[2]。蒙脱石向伊利石的转化为绿泥石的析出提供了丰富的 Fe^{3+} 和 Mg^{2+} , 也为碳酸盐和硅质胶结物的析出提供了部分 Ca^{2+} 和 Si^{4+} 。下白垩统河口组-大通河组上段(第一岩性段)储集层中自生粘土矿物分布较普遍, 但含量较低, 一般为微量到 2%, 平均为 0.4%, 中上侏罗统大通河下段-窑街组(第二岩性段)储集层中自生粘土矿物分布很普遍, 并且含量较高, 一般为微量到 16%, 平均为 1.6%, 其中窑街组下段储集层中自生粘土矿物的含量平均为 3.2%。自生粘土矿物主要有孔隙衬垫式、孔隙充填式和裂缝充填式 3 种胶结方式。

表 1 BC-1 井粘土矿物的 X-射线衍射数据
Table 1 The X-ray diffraction data of clay minerals in BG-1 well

层位	井深/m	伊利石/%	绿泥石/%	伊/蒙混层/%	伊/蒙混层中的蒙脱石/%
河口组	1 665~ 1 680	47	14	39	60
	2 084~ 2060	53	26	21	48
	2 334~ 2 326	54	25	21	< 10
	2 618~ 2 830	56	22	22	< 10
大通河组	2 914~ 2 926	59	25	16	< 10
	3 207. 40	57	16	27	< 10
享堂组	3 310. 45	51	22	27	< 10
	3 313. 46	61	14	25	< 10
窑街组	3 788~ 3 800	65	27	8	< 10

1.2.3 硅质胶结

硅质胶结物主要分布于中上侏罗统大通河组下段-窑街组(第二岩性段)储集层中, 主要为石英次生加大形成的再生石英(图版 I-5)和充填粒间孔隙的自生石英, 其含量为微量到 10%, 平均为 1.8%。在下白垩统大通河组上段-河口组储集层中, 硅质胶结物主要为极少量充填粒间孔隙的微晶自生石英, 含量很低, 石英次生加大现象很少见。

1.3 破裂作用

破裂作用是成岩后生阶段岩石在外力作用下发生脆性破裂而产生裂缝的作用, 构造运动是导致岩石裂缝大规模发育的主要因素。民和盆地在发育过程中经历了燕山期和喜山期的构造运动^[1], 巴州拗陷储集层在构造应力作用下产生了许多裂缝。依据成岩矿物的充填作用和溶蚀作用对裂缝的改造特征, 本区储集层的裂缝可分为未充填裂缝、半

充填裂缝、全充填裂缝和溶蚀裂缝(图版 I-6) 4 种类型。本区砂岩储集层的溶蚀作用微弱, 裂缝类型以未充填裂缝、半充填裂缝和全充填裂缝为主。据 BC-1 井砂岩裂缝的观察大通河组下段-窑街组储集层中, 有效裂缝较为发育。储集层裂缝的充填矿物主要为方解石、铁方解石、自生粘土矿物和石英, 其中方解石充填较早, 自生粘土矿物次之, 铁方解石充填较晚。依据裂缝的切割穿插关系和裂缝中成岩矿物的充填方式与充填顺序, 本区裂缝形成于四个期次, 其中第一期裂缝宽度一般大于 2 mm, 延伸长, 形状规则, 为方解石全充填裂缝; 第二期裂缝宽度一般为 0.1~ 0.3 mm, 常呈“X”状、“Y”状或羽状分布, 为未充填-半充填裂缝, 裂缝充填物为自生粘土矿物; 第三期裂缝宽度一般大于 2 mm, 延伸长, 形状规则平直, 为铁方解石全充填裂缝; 第四期为未充填-半充填裂缝经过孔隙介质溶蚀改造后形成的溶蚀裂缝, 裂缝宽度变化较大。全充填裂缝和未充填-半充填裂缝的形态和发育特征显示出裂缝的形成属于压扭性应力作用的产物。BC-1 井测井裂缝识别结果显示, 裂缝发育方位分为两组, 其中一组裂缝的方位在 35°~ 7°之间, 主要方位为 1°; 另一组裂缝的方位在 51°~ 79°之间, 主要方位为 64°。在燕山运动早期(侏罗纪-早白垩世), 民和盆地经历了盆地断陷发育阶段; 在燕山运动晚期-喜山运动早期(晚白垩世-第三纪), 在区域挤压应力作用下经历了拗陷发育阶段^[1]。据盆地的构造活动和巴州拗陷裂缝发育特征分析, 大通河组下段-窑街组储层裂缝形成于晚白垩世-第三纪, 是在构造压应力作用下岩石破裂作用的产物。

2 成岩作用阶段的划分

2.1 砂岩胶结物形成温度的测定

选取了 BC-1 井河口组-享堂组 5 个取芯砂岩样品进行了胶结物包裹体均一温度的测定, 其中砂岩取样深度为 2 482~ 3 541 m, 砂岩胶结物为方解石和石英加大形成的次生石英, 包裹体分布于方解石胶结物和石英加大边中, 包裹体类型为液态烃和 $\text{CO}_2(\text{气})-\text{H}_2\text{O}(\text{液})$ 两相包体。经过包体测温分析, 得到 BC-1 井 3 213 m(大通河组)砂岩方解石胶结物中 $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 包体均一温度为 71~ 82℃, 方解石胶结物形成温度为 75℃; 3 540 m(享堂组)砂岩石英加大边中 $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 包体均一温度为 103~ 110℃, 石英胶结物形成温度为 160℃。其它样品胶

结物的包裹体被破坏,未能获得均一温度。CO₂与H₂O包裹体的均一温度是在包体测温加热过程中CO₂和H₂O相变成完全混溶状态所需的温度。形成温度是依据均一温度经过盐水校正后确定的胶结物的形成温度。

2.2 储集层成岩阶段的划分

根据包体测温分析并结合铸体薄片、扫描电镜、有机质镜煤反射率和其他分析资料研究,巴州坳陷下白垩-中侏罗统储集层处于早成岩阶段B期-晚成岩阶段B期:

(1) 下白垩纪-中侏罗统河口组-大通河组储集层处于早成岩阶段B期。碎屑岩中机械压实作用和碳酸盐的胶结作用很强烈。碳酸盐胶结物主要为亮晶方解石,次为亮晶含铁方解石。据X-射线衍射分析,下白垩统河口组砂岩中伊/蒙混层的蒙脱石含量由60%降低到10%(表1)。在大通河组砂岩中测得方解石胶结物的形成温度为75°。

(2) 中侏罗统享堂组和窑街组中上段处于晚成岩阶段A期。碎屑岩中机械压实作用和铁方解石、自生粘土矿物的胶结作用较为明显,常见片状伊利石和树叶状绿泥石,石英次生加大为Ⅱ级,有机质最大热解温度为449~454℃,镜煤反射率为0.655~1.256。在享堂组砂岩中测得石英胶结物形成的古地温为106℃。

(3) 中侏罗统窑街组下段储集层处于晚成岩阶段B期。碎屑储集层中自生粘土矿物的胶结作用非常普遍,石英次生加大为Ⅱ级。碳酸盐胶结物以铁方解石为主,并且出现铁白云石,自生粘土矿物主要为片状伊利石。有机质最大热解温度在460℃以上,镜煤反射率超过1.3,最高为1.337。

3 成岩作用对储集层的改造

巴州坳陷碎屑岩沉积形成的大量原生孔隙体系,经过埋藏成岩过程中的机械压实作用、胶结作用和破裂作用改造之后,形成原生孔隙很不发育的裂缝性致密储集层。

3.1 压实作用和胶结作用对储集层的破坏

在巴州坳陷下白垩-中侏罗统碎屑岩的埋藏成岩过程中,强烈的机械压实作用导致软性碎屑颗粒变形强烈,并挤入原生粒间孔隙,特别是富岩屑碎屑岩的碎屑之间呈紧密的线-凹凸状接触,导致碎屑岩储集层原生孔隙大幅度缩小或者消失。碎屑岩中残留的原生粒间孔隙经过自生粘土矿物、碳

酸盐和石英的充填胶结作用进一步改造绝大部分消失。在后期成岩过程中,由于孔隙水很难在其中流动,因此碎屑岩的溶解作用微弱,溶蚀型次生孔隙也很不发育。根据BC-1井取芯砂岩的铸体薄片观察,绝大部分非裂缝砂岩的面孔率一般为0~4%,孔隙类型为极少量的缝状残余粒间孔隙和充填物内孔隙,仅在局部砂岩中分布有比较发育的残余粒间孔隙。因此,巴州坳陷储集层的物性普遍很差,孔隙度和渗透率很低(表2)。

表 2 BC-1 井非裂缝砂岩物性

Table 2 Petrophysical property of unfracture sandstone in BG-1 well

层位	河口组	大通河组	享堂组
孔隙度/%	3.40~8.10	4.01~8.90	3.10~6.30
渗透率/10 ⁻³ μm ²	0.04~0.40	0.35~1.22	0.05~0.06
排驱压力/MPa	2.80~3.00	0.62~1.25	0.80~3.05

3.2 破裂作用对储集层的改造

本区砂岩储集层的溶蚀作用微弱,改造储集层的主要因素为破裂作用。破裂作用产生的未充填-半充填裂缝在一定程度上改善了本区致密储集层的孔隙结构。裂缝对储集层孔隙度的影响较小,它的主要作用是有效地提高了平行于裂缝方向上的渗透率。据BC-1井分析,本区有效裂缝主要分布于中上侏罗统大通河组下段-窑街组(第二岩性段)砂岩中,宽度大于0.1mm的裂缝线密度最高可达7.23条/m。根据裂缝宽度和裂缝间距,我们可以计算裂缝渗透率^[3]

$$K_f = \frac{e_1^3}{12D_1} \cos^2 \alpha_1 + \frac{e_2^3}{12D_2} \cos^2 \alpha_2 + \dots + \frac{e_i^3}{12D_i} \cos^2 \alpha_i$$

式中 K_f 为裂缝渗透率; e_1, e_2, e_i 为第1、2、 i 组裂缝平均间距; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_i$ 为第1、2、 i 组的压力梯度轴与裂缝面之间的夹角。经过计算,砂岩的裂缝渗透率一般为 $0.5 \times 10^{-3} \sim 260 \times 10^{-3} \mu m^2$ (表3)。由此表3 BC-1井大通河组下段-窑街组裂缝性砂岩的渗透率

Table 3 The permeability of fractured sandstone of the lower section of Datonghe and Yiaojie Formations in BG-1 well

层位	大通河组下段	享堂组	窑街组
裂缝渗透率/10 ⁻³ μm ²	1~133	2~260	0.5~56

可见,裂缝型次生孔隙能够较大幅度地改善砂岩的渗透性。油气勘探资料显示,巴州坳陷主要的原油产层和高压气层分布于中上侏罗统大通河组下段-窑街组(第二岩性段)的裂缝性砂岩中,在河口组-大通河组上段(第一岩性段)致密砂岩中很少见。

4 结论

(1) 巴州坳陷储集层主要的成岩作用为机械压

实作用、胶结作用和破裂作用。其中下白垩统河口组-大通河组上段储集层的机械压实作用和方解石的胶结作用较为强烈; 中上侏罗统大通河组下段-窑街组储集层自生粘土与石英的胶结作用和破裂作用较为强烈。

(2) 巴州坳陷下白垩-中侏罗统储集层处于早成岩阶段 B 期—晚成岩阶段 B 期。其中河口组-大通河组储集层处于早成岩阶段 B 期, 享堂组-窑街组中上段储集层处于晚成岩阶段 A 期, 窑街组下段储集层处于晚成岩阶段 B 期。

(3) 强烈的机械压实作用和胶结作用导致下白

垩-中侏罗统砂岩成为物性很差的致密集层; 破裂作用在一定程度上改善了中上侏罗统大通河组下段-窑街组储集层的孔隙结构, 使其成为裂缝性致密储集层。

参 考 文 献

1 张虎权, 杨中轩. 民和盆地的构造特征. 石油实验地质, 1996, 18(3) : 283~ 288
2 郑浚茂, 庞明. 碎屑储集岩的成岩作用研究. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989. 65~ 76
3 裴泽楠, 薛叔浩. 油气储层评价技术. 北京: 石油工业出版社, 1997. 216~ 217

DIAGENESIS OF RESERVOIRS IN BAZHOU DEPRESSION,
MINHE BASIN

Liu Linyu Di Shixiang Xue Xiangxi

(*Geology Department, Northwest University, Xi'an, Shaanxi*)

Abstract

The reservoir diagenesis of Bazhou Depression, Minhe Basin was intense. The major diagenesis of clastic rocks in the Hekou Formation and the upper section of the Datonghe Formation was mechanical compaction and calcite cementation. The major diagenesis of the lower section of the Datonghe Formation and the Yaojie Formtion was authigenic clay and quartz mineral cementation and fracturing. The primary pore texture of the reservoirs was destroyed by diagenesis. The fracturing transformed the reservoirs of the lower section of Datonghe Formgtion and the Yaojie Formation into dense fracture reservoirs.

Key Words: Minhe Basin reservoir diagenesis fractoring

(上接第 57 页)

shows generally transgressive filling sequences. The basin underwent three deposition processes since Eocene. Tg~ T₇₀ (before 28 Ma) was rapid subsidence period, the total rate of descent was 600 m/ Ma; the total descent rate of T₇₀~ T₃₀ (28 Ma~ 5. 2 Ma) period was 500 m/ Ma; that of T₃₀~ present day (5. 2 Ma~ present) is 600 m/ Ma. The amount of subsidence caused by tectonics is about 1/2~ 1/4 of the total amount; the rest is mainly related to isostatic subsidence. It is proposed that deltaic, beach and turbidite sandbodies are the main medium-deep reservoirs in the basin; the distributary channel sandbodies deposited during Huangliu Formation may be favourable reservoirs.

Key Words: filling sequence subsiding period descent rate reservoir Yinggehai Basin