

文章编号: 0253-9985(2007)04-0491-06

鄂尔多斯盆地北部上古生界致密砂岩储层特征及其成因探讨

丁晓琪, 张峭楠, 周文, 邓礼正, 李秀华

(成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 鄂尔多斯盆地北部上古生界致密砂岩储层具有: 1) 低孔、低渗、小孔隙、细喉道和渗透率对压力敏感; 2) 束缚水饱和度高、气水关系复杂; 3) 储集空间以溶孔和微孔为主、裂缝相对发育的特点。分析认为, 上古生界砂岩储层致密的主要原因因为古埋藏深度大、热演化程度高、晚成岩阶段的破坏性成岩作用强, 热液活动进一步使储层致密化。

关键词: 致密砂岩储层; 成岩作用; 热液活动; 鄂尔多斯盆地北部

中图分类号: TE112.2 **文献标识码:** A

Characteristics and genesis of the Upper Paleozoic tight sandstone reservoirs in the northern Ordos basin

Ding Xiaojing, Zhang Shaonan, Zhou Wen, Deng Lizheng, Li Xiuhua

(State Key Lab of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation,
Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059)

Abstract The Upper Paleozoic tight sandstone reservoirs in the northern Ordos basin have the following three characteristics: 1) low porosity and low permeability (sensitive to pressure changes), small pores and slim throats; 2) high irreducible water saturation and complex gas-water relationship; and 3) reservoir space being dominated by dissolved pores and micropores and fractures being relatively well developed. Analysis of these reservoirs suggests that the tightness of the Upper Paleozoic sandstone reservoirs is mainly caused by large palaeoburial depth, high thermal evolution, strong destructive diagenesis during its late phase, and further compaction of reservoirs evoked by hydrothermal activities.

Key words tight sandstone reservoir; diagenesis; hydrothermal activity; northern Ordos basin

近十几年来, 随着油气勘探开发理论和技术的不提高, 致密碎屑岩油气藏的巨经济价值逐渐被人们所认识。美国联邦能源管理委员会 (FERC) 在 20 世纪 80 年代曾对低渗透储集层, 特别是低渗透含气砂岩和致密性做过定量规范, 按 FERC 标准, 气藏气层段平均渗透率等于或小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的, 属于低渗透储集层, 也可称为致密含气砂岩。估计全球有致密砂岩气 $600 \times 10^{12} \sim 3\,000 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 是常规天然气资源的 1~5 倍。中国常规储层气藏数量有限, 今后将较多地面临致密砂岩含气区^[1]。

鄂尔多斯盆地北部系指纬度在 38°线以北、乌兰格尔以南、贺兰山以东、吕梁山以西的地区, 主体位于伊陕斜坡中 (图 1)。研究区上古生界地层为石炭系—二叠系, 中石炭统本溪组与下奥陶统马家沟组为平行不整合接触, 之间缺失中上奥陶统、志留系、泥盆系和下石炭统地层^[2]。石炭系包括本溪组和太原组, 为一套海相沉积。二叠系包括山西组和上、下石盒子组, 山西组为一套煤系地层, 属于三角洲平原沉积, 部分地区见海相沉积^[3], 下石盒子组盒 1 属于辫状河沉积, 盒 2 为辫状河向曲流河的过渡, 而盒 3 及上石盒子组为典型的曲流河沉积^[4]。

收稿日期: 2007-06-11

第一作者简介: 丁晓琪 (1981—), 男, 助教, 矿产普查与勘探

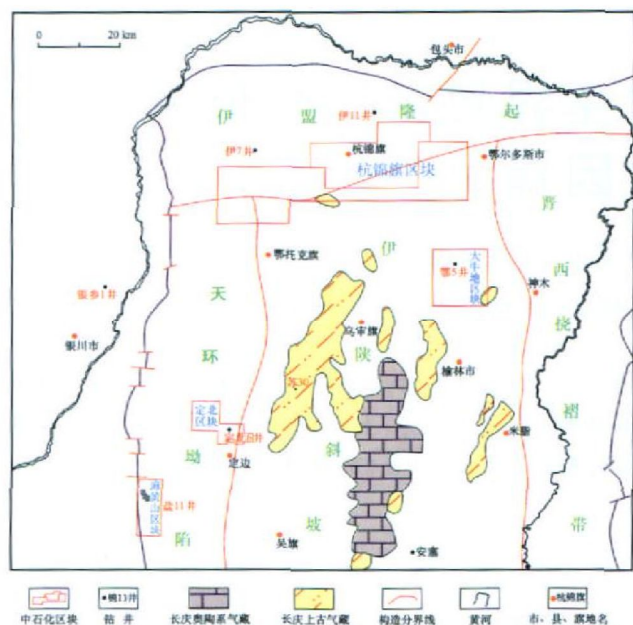


图 1 研究区地理位置图

Fig. 1 Location of the study area

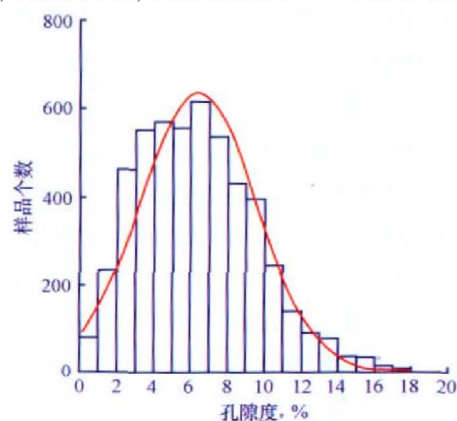
近几年来,中国石油长庆油田分公司在伊陕斜坡中南部发现了陕 141 气田和苏里格庙大气田,中国石化华北分公司在伊陕斜坡东北部发现了大牛地气田,并在杭锦旗一带发现含油气构造。已有的勘探成果表明,鄂尔多斯盆地北部上古生界具有良好的天然气勘探潜力。

1 致密砂岩储层特征

1.1 储层物性

1.1.1 孔隙度和渗透率

通过对鄂尔多斯盆地北部上古生界 5 091 个样品的分析,结果表明,孔隙度低于 12% 的样品有



4 822 个, 占总样品数的 94.7%, 孔隙度主要集中在 2% ~ 10%。渗透率低于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品有 4 610 个, 占总样品数的 90.6%。渗透率主要集中在 $0 \sim 0.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 2)。属于典型的低孔低渗致密砂岩储层。

1.1.2 渗透率对应力敏感

致密砂岩不仅渗透率低, 而且渗透率对应力极为敏感。通过对上古生界 10 个样品进行围限压力下的渗透率测定, 发现随着上覆压力的增加, 渗透率迅速减小, 当压力增加至 25 MPa 时, 渗透率可降至 $0.584 \times 10^{-3} \sim 0.181 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均 $0.359 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。通过对样品薄片的观察, 发现致密砂岩对应力敏感是由于扁平的细喉道在应力下易于闭合造成的。

1.1.3 束缚水饱和度

将 $0.05 \mu\text{m}$ 的喉道作为天然气能够进入储层的下限, 即大于 $0.05 \mu\text{m}$ 孔隙体积可视为能够储集天然气的最大体积。因此, 可将岩石孔喉体积中大于 $0.05 \mu\text{m}$ 的孔喉体积视为岩石中最大的含气饱和度。通过 487 个样品的压汞资料分析, 发现太原组的束缚水饱和度平均为 45.11%, 山西组为 60.07%, 石盒子组为 57.85%。可以看出, 致密砂岩具有相当高的束缚水饱和度和低的含气饱和度。

1.1.4 气水关系

受储层物性差及天然气二次运移动力不足的影响, 含气饱和度低, 气水分异不彻底, 没有统一的气水界面, 气水同层、差气层、气层交替分布, 甚

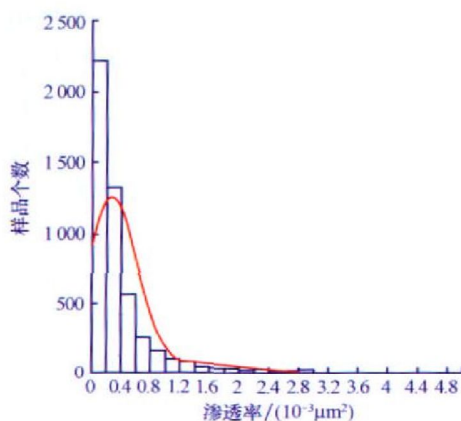


图 2 鄂尔多斯盆地北部孔隙度、渗透率分布图

Fig. 2 Histogram of porosity and permeability in the northern Ordos basin

至出现气水倒置现象^[5]。气层与构造没有严格的对应关系, 构造高部位可能产水, 而构造低部位可能产气(图 3), 由于储集层物性较差, 饱和水的致密砂岩可阻止天然气向上运移, 而形成典型的岩性气藏。

伊陕斜坡为相对稳定区, 致密砂岩气藏广布于烃源岩丰富的盆地或向斜中心, 形成“深盆地”^[6-7], 原始都为超高压。盆地后期抬升, 边缘无水活跃, 形成水高气低之势^[8-9]。深盆地使该区的气水关系进一步复杂化。

1.2 储层孔隙结构

鄂尔多斯盆地北部上古生界储层的主要储集空间有次生粒间孔、粒间微孔、粒内溶孔、剩余原

生粒间孔和少量破裂缝。次生粒间孔由泥质杂基、假杂基、长石和岩屑等碎屑边缘被溶形成的孔直径 > 0.01 mm 的粒间孔隙, 而微孔隙是由泥质杂基, 假杂基被弱溶或两者蚀变成高岭石之后形成的孔直径 < 0.01 mm 粒间微孔隙, 或是粒间二世代淀高岭石晶间微孔, 淀高岭石晶片间微孔一般较发育。微孔隙可以单独构成孔隙度、渗透率均达储层下限的微孔型储集岩, 上古生界致密砂岩储层具有小-微孔、细喉的特点。

对鄂尔多斯盆地北部近 100 余件毛管压力曲线研究后发现, 上古生界储集层具有小孔隙、细喉道的特点, R_{10} 在 0.48~3.49 μm 之间, 平均 0.6 μm , R_{50} 在 0.04~0.64 μm 之间, 平均 0.12 μm , 图 4 为典型样品的毛细管压力曲线。

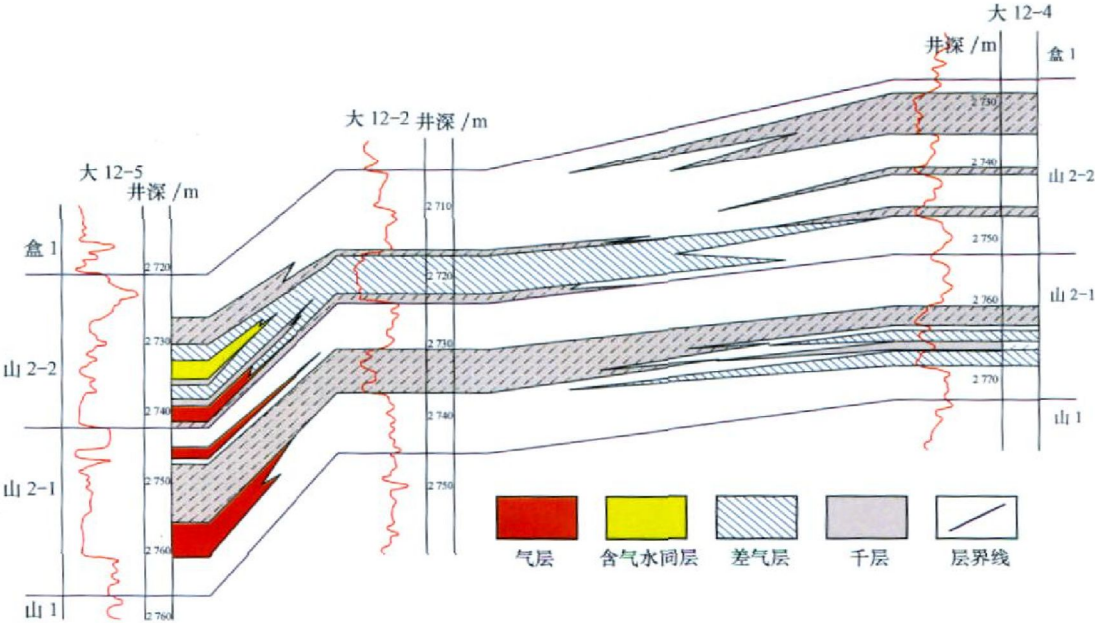


图 3 鄂尔多斯盆地北部某井区气藏剖面

Fig. 3 Gas reservoir section crossing a well block in the northern Ordos basin

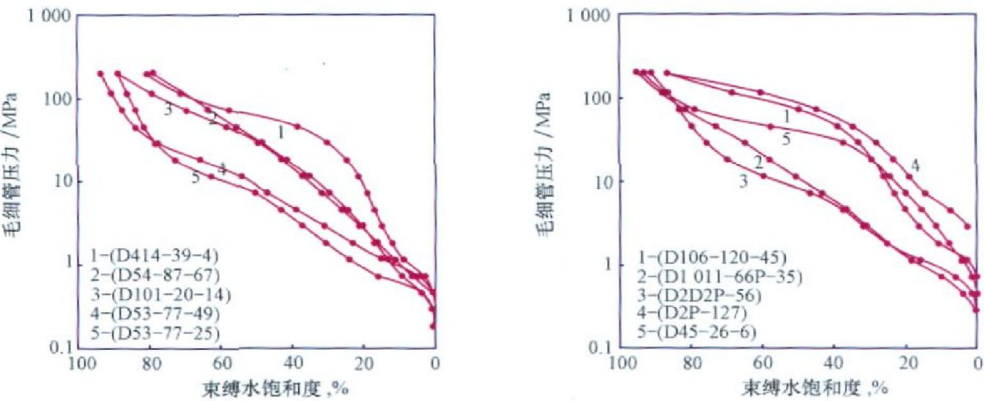


图 4 典型样品的毛管压力曲线

Fig. 4 Capillary pressure curves of typical samples

1.3 裂缝

鄂尔多斯盆地北部上古生界砂岩储层主要发育高角度的垂直缝,裂缝缝面一般比较平直,成组出现,偶见方解石充填,裂缝发育向下或向上延伸常受泥岩限制。以大牛地气田为例,裂缝主要分布在山西组,太 2 盒 1 段次之,其他层位相对较少。岩层裂缝发育密度(裂缝条数/岩层厚度),砾岩类为 0.11 条/m、粗砂岩 0.13 条/m、中砂岩 0.23 条/m、细砂岩 0.19 条/m、粉砂岩类 0.16 条/m、泥岩 0.09 条/m。根据井眼扩径方向和 FM I 测井,编制出扩径方位频率图,表明研究区的现今最小水平地应力方向为 NE 10°~30°,平均 NE 20°左右。

裂缝充填物稳定同位素分析结果表明,无论是砂岩中还是煤层中的垂直裂缝,其充填的方解石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ (‰) 值相差较小, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (‰) 也相近,说明充填物是同期产物,反映出该类垂直裂缝是同一期构造运动形成的。根据充填物计算得到的平均形成温度约为 90℃ 左右,考虑到年地面平均温度为 20℃,按目前地温梯度每百米 2.65℃ 估算得到形成时埋深仅约 2 650 m 左右,分析应为燕山期构造运动的产物。

2 致密砂岩的成因探讨

2.1 热演化程度

鄂尔多斯盆地于中三叠世末发生快速沉降,虽然之后经历了三叠纪末的印支运动和中侏罗世燕山 I 幕和晚侏罗世的燕山 II 幕,但均属于构造整体抬升,剥蚀量均不大,到中白垩世末期,埋深达到最大值,在鄂尔多斯盆地北部,石炭-二叠纪地层普遍埋深在 4 200 m 左右,而目前其埋深主要集中在 2 500~3 700 m (图 5),白垩纪末期的剥蚀量自西向东依次增加,剥蚀量在西部普遍为 800 m,而东部普遍可达 1 600 m^[19]。所以说鄂尔多斯盆地北部石炭-二叠纪致密砂岩储层的现今埋深较最大埋深至少浅 800 m。每百米古地温梯度取 2.65℃,则白垩纪末期,其古地温超过 130℃。该区的镜质体反射率普遍为 1.2%~1.8%,也表明其热演化程度已处于过成熟期。

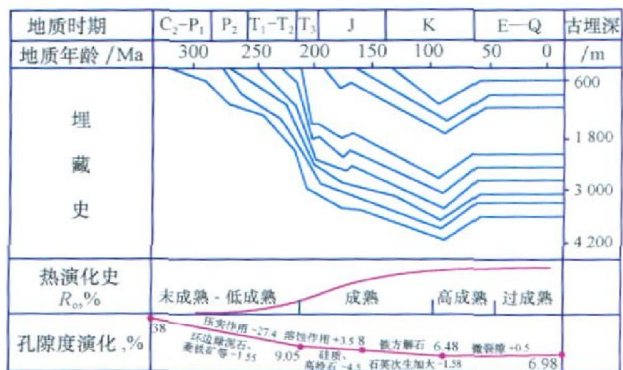


图 5 鄂尔多斯盆地北部埋藏史及孔隙度演化

Fig. 5 Burial history and porosity evolution in the northern Ordos basin

2.2 破坏性成岩作用

2.2.1 机械压实作用

机械压实作用主要是缩小、减少碎屑岩储层中的原生粒间孔隙,研究区最强的压实作用可使原生粒间孔隙减少为零,形成压实型致密层。该区的压实作用使原生粒间孔隙度损失量可达 38%~25%,一般为 25%~30%。保留下来的原生粒间孔隙度为 8%~13%。局部层段甚至被完全压实,形成无缝、无孔、无胶结物的压实致密层。岩石学特征表现为碎屑粒间孔隙小、少,构成大颗粒、小孔隙的孔隙组合特点(图 6 A),胶结物少,无胶结物式胶结类型易见。刚性碎屑(石英、硅质岩屑等)嵌入塑性碎屑中。

2.2.2 压溶作用

在压力作用下,碎屑接触点上所发生溶解作用,或在压应力作用下沿裂缝发生的溶蚀作用。随上覆沉积物厚度不断增大,对下伏沉积物压溶作用亦随之增强。随着压溶作用增强,碎屑物间的接触强度发生点-线-凹凸-缝合线接触变化,粒间孔隙亦越来越小,粒间孔隙喉道越来越窄;后者则常在岩石内形成缝合线构造和叠锥构造(图 6 B)。

2.2.3 胶结作用

胶结物的形成过程是缩小原生粒间孔隙的过程,对原生粒间孔隙起的是破坏作用,但早期形成的环边薄膜的胶结物将松散沉积物胶结成岩,则具抗上覆沉积物重压,起到保护剩余原生粒间孔

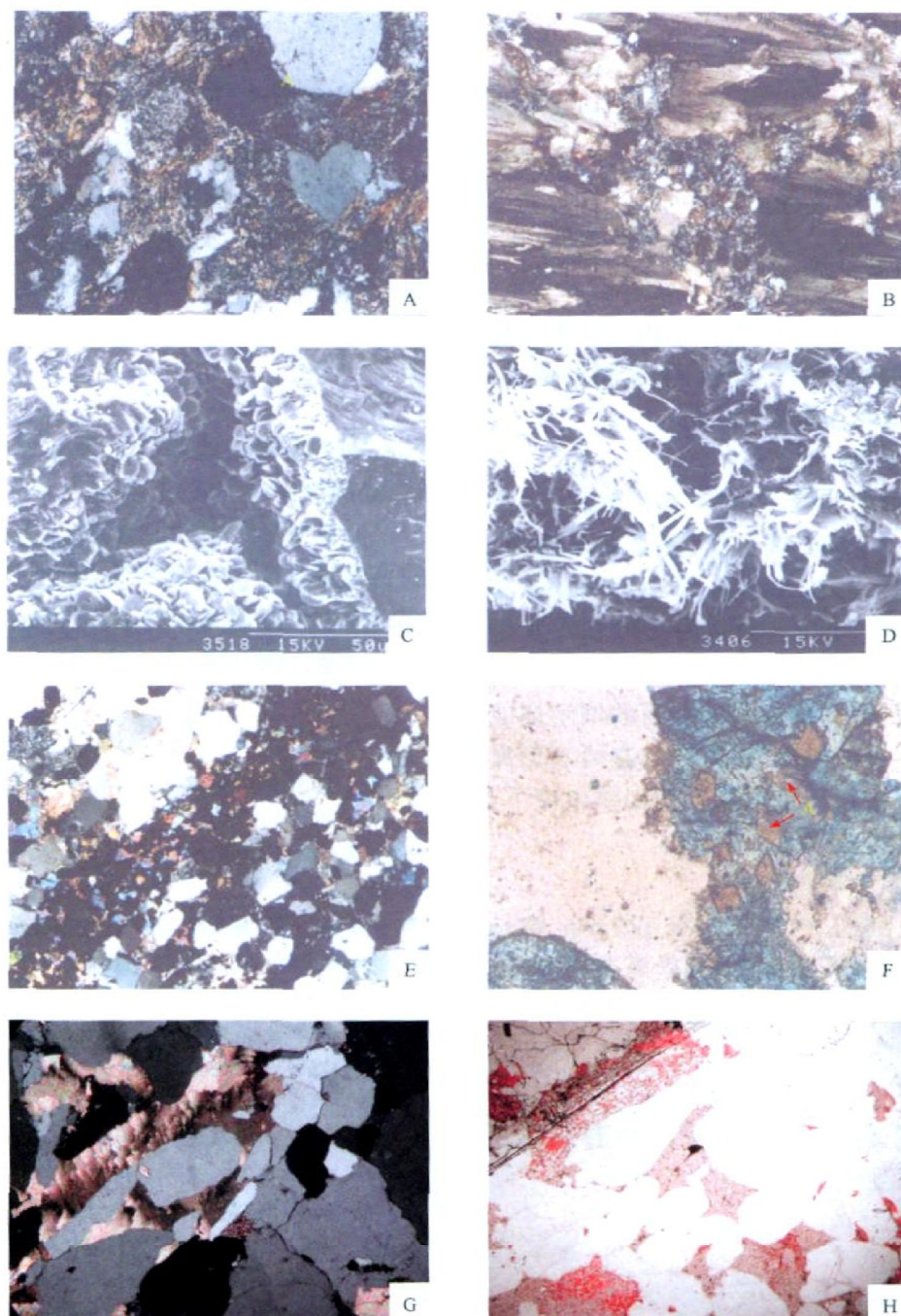


图 6 鄂尔多斯盆地北部上古生界典型成岩作用图版

Fig. 6 Chart board showing the typical diagenesis of the Upper Paleozoic, northern Ordos basin

A. 千枚岩岩屑、变粉砂岩岩屑压实强, 形成无胶结物式胶结类型, 石英间形成凹凸接触, 山 1 段, $10 \times 5(+)$; B. 细砂质泥岩中的叠锥构造, 山 2 段, $10 \times 2(+)$; C. 细粒石英砂岩中的粒间淀高岭石, 呈蠕虫状集合体, 山 1 段; D. 粗粒岩屑砂岩中的伊利石杂基, 呈毛发状、纤维状, 山 2 段; E. 细-中粒岩屑石英砂岩中的金红石纹层, 山 1 段, $10 \times 2(+)$; F. 粗粒岩屑砂岩, 铁白云石交代包裹早先形成的粉晶菱铁矿, 山 1 段, $10 \times 2(-)$; G. 中-粗粒岩屑石英砂岩中异形白云石交代碎屑物及充填硅质加大边; H. 剩余原生粒间孔 (石英加大边形成之后余下的原生粒间孔隙), 粒内、粒间高岭石 (地开石) 晶间孔

隙的作用。在下石盒子组储层中, 由第一世代环边胶结物保护下来的剩余的原生粒间孔隙易见, 面孔率可达 0~10%。另一方面, 如早期胶结物属易溶矿物, 则被溶后还可形成喉道。但原生粒间

孔隙如被胶结物完全充填则形成胶结成因的致密层。研究表明: 太原组硅质胶结作用强, 山西组碳酸盐胶结作用强, 下石盒子组环边绿泥石-硅质-含铁方解石胶结强。

2.2.4 次生加大作用

仅见石英碎屑的加大,无长石加大现象。石英加大在太原组中最强,山西组中等,下石盒子组较弱,石英加大强度呈递减趋势。

2.2.5 自生矿物的形成

狭义的自生矿物是表征成岩微物化环境的标志,研究区具有这种指示作用的自生矿物有两类:自生粘土矿物与非粘土矿物。

1) 自生粘土矿物

呈二世代产出的高岭石(图 6 C)、伊利石(少量),均具显微鳞片结构,蠕虫状、书页状集合体,晶片为六边形片状,晶体大小 0.01~0.07 mm,对保留高岭石晶形的伊利石,分析为高岭石在富钾水溶液中重结晶形成。

毛发状伊利石多呈鳞片状伊利石的增生体或长石岩屑的溶孔、溶缝中产出,可能与高岭石形成同一阶段,只是微物化环境不同。在扫描电镜下,毛发状的伊利石极为常见(图 6 D)。

2) 非粘土类自生矿物

金红石:粒度细小,约 0.001~0.120 mm,粒径粗的呈红色,金刚光泽,极高突起,呈斑点状、星散状、纹层状产出,在山西组、下石盒子组中易见(图 6 E)。

菱铁矿:主要呈菱面体状(图 6 F),少量呈球粒状;菱面体状粉晶级菱铁矿以贴碎屑磨蚀边分布为特征,球粒状菱铁矿呈纹层状产出。

2.3 热液活动

2.3.1 异形白云石化

成因矿物学将具波状消光的铁白云石定名为异形白云石,异形白云石属热水成因矿物。说明该砂体经历过碱性热水改造,根据异形白云石交代蚀变成因高岭石及充填铸模孔分析,异形白云石形成于晚成岩阶段中晚期(图 6 G)。

2.3.2 绿帘石化

泥微晶级它形-半自形粒状绿帘石交代云母及粘土矿物杂基产出,鉴定为绿帘石是其具极似绿帘石异常干涉色和正高突起,绿帘石亦是热水

成因矿物。

2.3.3 地开石化

地开石为晚成岩阶段中晚期与热水作用有关的自生矿物。这类矿物存在两种产状,一类是充填铸模孔的晶粒石英(图 6 H)、针状绿泥石、铁白云石;另一类是充填粒间孔的地开石、重晶石、绿帘石。

3 结论

鄂尔多斯盆地北部上古生界储层具有低孔低渗、渗透率对压力敏感、裂缝发育、束缚水饱和度高、气水关系复杂等特点。笔者认为造成其储层致密的主要原因为古埋藏深度较大,热演化程度较高,晚期成岩作用对储层的破坏性较大,热液活动又进一步堵塞孔隙空间,造成该区砂岩储层致密。

参 考 文 献

- 1 王金琪. 中国大型致密砂岩含气区展望 [J]. 天然气工业, 2000 20(1): 10~16
- 2 长庆油田石油地质编写组. 长庆油田 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1987
- 3 刘家铎, 田景, 春张翔, 等. 鄂尔多斯盆地北部塔巴庙地区山西组一段海相、过渡相沉积标志研究及环境演化分析 [J]. 沉积学报, 2006 24(1): 36~43
- 4 孟军田, 贾会冲. 鄂尔多斯盆地北部塔巴庙地区古生界天然气地质特征与勘探前景 [J]. 石油实验地质, 2003 25(6): 708~782
- 5 Masters J A. Deep basin gas trap Western Canada [J]. AAPG Bulletin 1979 63(2): 152~181
- 6 马新华. 鄂尔多斯盆地上古生界深盆气特点与成藏机理探讨 [J]. 石油与天然气地质, 2005 26(2): 30~37
- 7 Ma X in hua. Exploration experience and problem concerning deep basin gas in the Ordos basin [J]. Petroleum Science 2004 1(2): 62~68
- 8 Law B E. Basin-centered gas systems [J]. AAPG Bulletin, 2002 86 1 891~1 919
- 9 Law B E, Curtis J B. Introduction to unconventional petroleum systems [J]. AAPG Bulletin 2002 86 1 851~1 852
- 10 陈瑞银, 罗晓容, 陈占坤. 鄂尔多斯盆地埋藏演化史恢复 [J]. 石油学报, 2006 27(2): 42~48
- 11 郝蜀民, 惠宽洋, 李良. 鄂尔多斯盆地大牛地大型低渗气田成藏特征及其勘探开发技术 [J]. 石油与天然气地质, 2006 27(6): 762~768

(编辑 高 岩)