

文章编号: 1001-6112(2007)04-0384-07

鄂尔多斯大牛地气田上古生界储层成岩作用评价

罗月明¹, 刘伟新^{1,2}, 谭学群³, 杨琦¹

(1. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214151; 2. 中国矿业大学 资源与安全学院, 北京 100083; 3. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 天然气所, 北京 100083)

摘要:对鄂尔多斯盆地北部大牛地气田上古生界地层的成岩作用阶段进行了综合研究, 结果显示, 太原组一山一段地层煤镜质体反射率在 1.4%~1.5% 之间, 包裹体均一温度为 140 °C, 伊/蒙混层矿物中蒙脱石层含量一般小于 30%, 属晚成岩作用阶段 B 期; 下石盒子组(包括盒一、二、三段)一山二段地层中煤镜质体反射率在 1.3%~1.4% 之间, 盒一、二、三段包裹体均一温度为 126 °C, 伊/蒙混层矿物中蒙脱石层含量主要在 32%~36% 之间, 属晚成岩作用阶段 A 期; 山二段包裹体均一温度比较复杂, 认为也为晚成岩作用阶段 A 期。大牛地上古生界储集层成岩作用类型主要有压实作用、胶结作用(包括硅质胶结、碳酸盐胶结、粘土胶结)、溶解溶蚀作用以及微裂隙作用, 储集岩石的孔隙类型主要有(剩余的)原生粒间孔隙、粒间(晶间)微孔隙、粒间(粒内)溶蚀孔隙(包括铸模孔隙), 微裂隙包括切穿颗粒的和粒缘微裂隙。储层物性主要属低孔、低渗储层, 孔隙结构参数显示盒三、盒二、太一和太二平均喉道半径和中值压力评价好于盒一、山一、山二段, 排驱压力和最大连通半径也具有相似的特征; 盒三、盒二段产能高、压降慢, 与微裂隙作用造成渗透率增加有关。

关键词:成岩作用; 孔隙结构; 储层物性; 储层评价; 大牛地气田; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

DIAGENESIS AND RESERVOIR EVALUATION ON THE UPPER PALAEOZONIC RESERVOIR SANDSTONES IN DANIUDI GAS FIELD, THE ORDOS BASIN

Luo Yueming¹, Liu Weixin^{1,2}, Tan Xuequn³, Yang Qi¹

(1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China;

2. School of Resources and Safety Engineering, China University of Mining Technology, Beijing 100083, China;

3. Research Institute of Petroleum Exploration & Production, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: The diagenesis stages of the reservoir sandstones in the Upper Palaeozoic strata in Daniudi Gasfield, northern Ordos Basin, were studied. The results show that the vitrinite reflectance (R_o) of the Taiyuan Formation and the First Member of Shanxi Formation is between 1.4% and 1.5%, the inclusion homogenation temperature is 140 °C and the percentage of montmorillonite is usually less than 30% in illite-montmorillonite mixed-layer mineral, indicating the stage B of metamorphism. The Lower Shihezi Formation (including P_1x^1 , P_1x^2 and P_1x^3 Members) is in the stage A of metamorphism with the R_o being 1.3%–1.4%, the inclusion homogenation temperature being 126 °C and the percentage of montmorillonite being 32%–36% in illite-montmorillonite mixed-layer mineral. The inclusion homogenation temperature of the Second Member of Shanxi Formation is complicated, but still can be considered as in the stage A of metamorphism. The main diagenesis processes that control the reservoir properties include compaction, cementation (silicide, carbonates, clay minerals), dissolution and fracturing. The types of pores are primary intergrain pore (residual), intercrystalline micro-pore and intergrain or intragrain solution pore (including moldic pore). The reservoir generally belongs to the type of low-porosity and low-permeability. The microfractures in formation greatly improve the reservoir properties and contribute to higher gas yield in P_1x^3 and P_1x^2 than in P_1x^1 and other reservoirs.

Key Words: diagenesis; pore structure; reservoir property; reservoir evaluation; Daniudi Gasfield; the Ordos Basin

收稿日期: 2007-03-09; 修订日期: 2007-06-22。

作者简介: 罗月明(1955—), 女(汉族), 工程师, 主要从事石油地质研究及岩矿鉴定工作。

大牛地气田位于鄂尔多斯盆地东北部,塔巴庙区块西南部,构造上位于伊陕斜坡北部,区内构造、断裂不发育,总体为一东北高、西南低的平缓单斜,未形成较大的构造圈闭。在三叠系刘家沟组、二叠系石千峰组、上石盒子组、下石盒子组、山西组、石炭系太原组、本溪组、奥陶系上马家沟组中均见到油气显示,其中在二叠系下石盒子组、山西组、石炭系太原组、奥陶系上马家沟组中获得工业气流^[1,2]。大牛地气田上古生界储层主要目的层段为二叠系下石盒子组、山西组和石炭系太原组,其中盒三段盒二段单层产气最高,最高单层无阻流量达 $38.87 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;但大牛地气田上古生界储层为低孔低渗的致密碎屑岩,储层内非均质性强,横向变化大,区内多口钻井之间砂体的横向对比性较差,储集层的岩性特征及其成岩作用制约着其储集性能。本文通过对大牛地天然气田上古生界储层的成岩矿物组合、成岩作用类型、储层孔隙结构及其物性的变化分析,研究致密储层的控制因素,分析鄂尔多斯盆地大牛地气田上古生界储层天然气产能与储层砂岩成岩作用之间的关系。

1 储层岩石学特征

大牛地气田的太原组(C_3t)、山西组(P_1s)、下石盒子组(P_{1x})储层砂岩的岩石类型及岩石学特征存在有一定的差异,其差异体现出层位性强,并有一定的矿物组成变化规律(图1)。对塔巴庙区块储层砂岩的统计显示,碎屑颗粒的组成从太原组到下石盒子组,石英含量降低,岩屑含量增加,不含或含少量长石;太原组岩性以石英砂岩为主,部分为岩屑石英砂岩;山西组与下石盒子组(照片1)以岩屑砂岩为主,少量为岩屑石英砂岩;个别井区中夹有少长石的中—粗粒长石岩屑砂岩及岩屑长石砂岩。大牛地气田下石盒子组、山西组与太原组储层砂岩结构构造上也具有一定的变化,太原组磨圆度、分选性要好于山西组和下石盒子组。胶结物类型、组成和粘土矿物也具有一定的变化规律性,太原组以较强的和明显的石英次生加大为特点,同时兼具相对弱的碳酸盐胶结,并有以伊利石及伊/蒙混层为主的粘土胶结;而下石盒子组砂岩地层具弱的石英次生加大,但碳酸盐胶结相对强;山西组砂岩具有过渡的矿物变化特征。根据薄片岩屑类型的统计和分析,研究区块的太原组、山西组、下石盒子组沉积时,物源区以沉积岩、浅副变质岩为主,其中夹有少量火山岩^[3~5]。

2 储层砂岩成岩作用阶段与成岩作用类型

2.1 成岩作用阶段

X衍射及扫描电镜/能谱分析表明,大牛地气田上古生界储层砂岩的粘土矿物组合及含量(图2)特点是主要粘土矿物为伊利石、绿泥石、高岭石及伊/蒙混层。太二段中主要为伊利石,其次为伊/蒙混层矿物,基本不含高岭石和绿泥石,其粘土矿物组合为伊利石+伊/蒙混层;山一段主要粘土矿物为伊利石,其次为高岭石和伊/蒙混层矿物,出现少量的绿泥石,其粘土矿物组合为伊利石+高岭石+伊蒙混层+绿泥石(少量);山二段的主要粘土矿物为伊利石,其次为高岭石和伊/蒙混层矿物,出现较多的绿泥石,其粘土矿物组合为伊利石+高岭石+伊/蒙混层+绿泥石(较多);下石盒子组含较多的高岭石和绿泥石,其粘土矿物组合为绿泥石+高岭石+伊/蒙混层+伊利石。伊/蒙混层均为有序混层带,伊/蒙混层矿物中蒙脱石层含量在28%~35%之间,太二段最低,蒙脱石层含量在28%,山

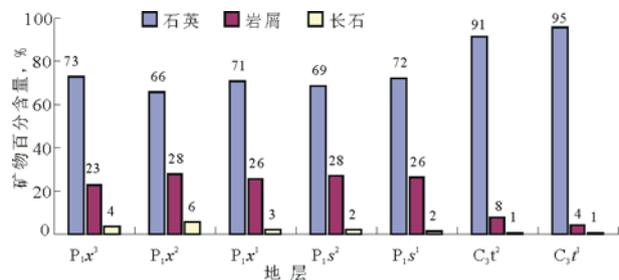


图1 鄂尔多斯盆地塔巴庙区块储层砂岩碎屑颗粒分布
1601个样品。

Fig. 1 Detrital composition of the reservoir sandstones in Tabamiao Block, the Ordos Basin

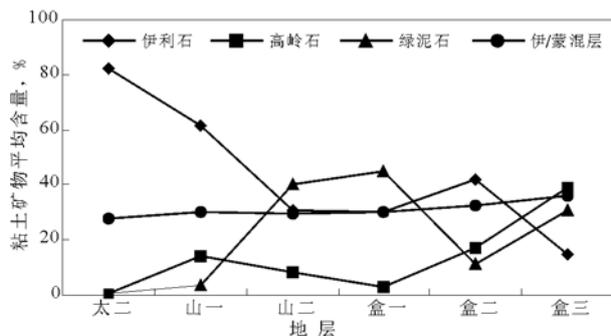


图2 鄂尔多斯盆地大牛地气田上古生界储层砂岩粘土矿物分布

Fig. 2 Distributions of clay minerals in the Upper Palaeozoic reservoir sandstones in Daniudi Gasfield, the Ordos Basin

西组、盒一段为 30%，盒二、盒三段最高，为 32%~36%，伊/蒙混层矿物中蒙脱石层含量具有一定的变化规律。

山二段与下石盒子组地层中煤的镜质体反射率在 1.3%~1.4% 之间，而山一段与太原组煤的镜质体反射率在 1.4%~1.5% 之间，相当于有机质的高成熟阶段。

包裹体分析也显示成岩作用阶段具有差异性。对大牛地气田上古生界储层砂岩的石英次生加大边的包裹体形成温度进行分析发现，硅质胶结作用延续了较长的形成时间，形成温度从盒三段的 83℃ 到太二段的 138℃，但不同地层经历了不同的成岩温度，反映出经历了不同的成岩作用过程。盒三段到山二段石英次生加大边为 2 期，包裹体均一温度显示分别形成于 83℃ 与 110℃；山一段和太二段石英次生加大边包裹体期次也可分为 2 期，分别形成于 110℃ 左右与 130~138℃ 之间（照片 2）。就包裹体均一温度而言，下石盒子组与山一段具有相类似的成岩作用过程，而山一段与太二段应具有相近的成岩作用过程。

通过以上分析，下石盒子组、山二段与山一段、太原组成岩演化阶段之间存在差异。山二段及下石盒子组地层中煤的 R_o 小于 1.4%，相应的成岩作用温度约为 110℃，下石盒子组、山二段以晚成岩 A 期为主；山一段及太原组地层中煤的 R_o 在 1.4%~1.5% 之间，成岩作用温度分别为 138~140℃，山一段与太原组以晚成岩 B 期为主。

2.2 成岩作用类型

压实作用：是大牛地气田降低或破坏储集层储集性能的一种主要成岩作用。区内下石盒子组、山西组和太原组等储集层的碎屑岩均经历中—强压实作用，表现为碎屑颗粒间已主要呈线状接触，少量呈凹凸接触，并且可见刚性碎屑颗粒发生脆性破裂，而柔性碎屑颗粒则发生塑性变形。压实作用的结果是大量原生粒间孔隙消失，是大牛地气田低孔低渗的重要原因之一。据计算该区压实作用导致原生粒间孔隙度损失率一般是 60%~70%，保留下来的原生粒间孔隙度为 8%~13%，粒间孔隙亦越来越小，孔隙喉道越来越窄。

胶结作用：大牛地上古生界储层砂岩的次生胶结作用强烈，粘土矿物胶结、碳酸盐胶结、硅质胶结的强度与先后次序存在差异，具有一定的变化规律。胶结物含量大多为 5%~12%。主要表现为石英次生加大、粘土矿物胶结以及方解石、铁白云石、菱铁矿和少量硬石膏胶结。

硅质胶结：是本区石炭—二叠系砂岩储层中较普遍和较重要的成岩作用。二氧化硅主要产出形式有石英次生加大和自形石英。石英次生加大现象在下石盒子组—山西组—太原组储层砂岩中十分普遍，其发育程度逐渐增强，石英加大边往往呈等厚环边状包裹碎屑石英颗粒，大部分为连续生长。加大后的石英呈贴面结合，或镶嵌紧密，有时可见到次生加大边的再溶解并形成港湾状。据统计，石英次生加大含量可达 5%~10%。镜下还可见石英加大边中有高岭石残余，表明石英加大形成时间晚于高岭石的形成并延续了较长的时间（照片 1,3）。自形石英生长于粒间孔或溶蚀孔内，晶粒较细，为微晶，晶体自形，此类石英含量低，呈星点状分布充填粒间或溶蚀孔隙。从下石盒子组向山西组和太原组随着深度的增加，硅质胶结作用增强。

碳酸盐胶结：也是大牛地气田上古生界储层砂岩重要的胶结类型。方解石主要呈斑状充填粒间，含量一般小于 10%；个别层段方解石含量较高，含量大于 20%；一般以连晶形式出现，充填于粒间孔隙，使孔隙大为减少（照片 1,4）。白云石呈自形程度好的菱面体状，常常数个晶体聚合在一起，生长于粒间或溶蚀孔内。菱铁矿主要呈菱面体状，少量呈球粒状，也生长于粒间或溶蚀孔内。较强的方解石胶结物主要见于下石盒子组和山西组，而在太原组相对较弱。菱铁矿和白云石胶结物主要见于山西组和太原组，形成于硅质、高岭石形成阶段之后，分布在太原、山西组 2 个层位，下石盒子组地层少见。

粘土胶结：反映不同类型粘土矿物含量的变化，据此可以很好地分析成岩作用过程。砂岩中常见的自生粘土矿物有高岭石、伊利石、绿泥石及伊/蒙混层矿物（表 1）。高岭石含量从下石盒子组向太原组逐渐降低，下石盒子组地层最高，山西组次之，太二段最低。自生高岭石常呈蠕虫状、书页状集合体，常充填粒间孔隙或溶蚀孔隙中。自生伊利石在整个大牛地上古生界地层中均有分布，数量随埋藏深度或成岩作用强度而增加，扫描电镜下常呈现丝缕状或卷曲片状（照片 5），有时呈粘土桥伸展于粒间孔隙中，对储层不利。已有的研究表明具有 2 种产状的绿泥石，一种绿泥石呈粘土环边包裹颗粒，环边薄膜状绿泥石胶结物可以增加砂岩的抗压实能力，起到保护剩余原生粒间孔隙的作用；另一种绿泥石呈自形的叶片状，充填于碎屑颗粒的表面或粒间孔隙（包括溶蚀孔隙）。本次研究发现绿泥石不但见于下石盒子组（含量 28.4%~37.9%），在山二段也非常普遍（平均为 27.7%，照片 6）。粘

土矿物 X 衍射分析显示,山二段自生胶结的绿泥石含量非常高,局部高于下石盒子组地层,而到山一段绿泥石含量明显下降(平均为 1.5%),太原组绿泥石含量很低(平均为 0.5%),认为山二段也应该有较明显的类似于下石盒子组的绿泥石环边胶结,扫描电镜分析也显示相似的结果。总之,从下石盒子组到石炭系太原组,随着深度增加,伊利石含量增加,高岭石含量逐渐减少,伊/蒙混层减少,蒙脱石层含量减少,而山二段与下石盒子组储层砂岩中粘土矿物绿泥石含量较高。山二段绿泥石含量明显偏高可能与储层流体的性质及环境有关。山二段及其以上地层具有较强的碳酸盐岩胶结,如方解石胶结作用强,而从山一段开始,绿泥石含量明显降低,碳酸盐岩胶结作用减弱,而硅质胶结作用明显增强,认为与地层介质条件有关。

交代与蚀变作用:是铝硅酸岩矿物组成的碎屑颗粒等于埋藏作用过程中在流体的作用下蚀变为粘土矿物或其它矿物的一种成岩变化,如铝硅酸岩矿物组成的岩屑的高岭石化、伊利石化均为蚀变作用,岩屑蚀变的重要性是在矿物转化过程中因体积变化而形成次生微孔隙。蚀变成因的高岭石常保存被蚀变组分的假象,易与粒间孔隙内的淀高岭石区分。

溶解溶蚀作用:本区各套储集层中发育多期溶蚀作用,晚期溶蚀强烈并能形成有效的次生孔隙。受酸性介质的影响,这些层段的骨架颗粒溶蚀作用较强。被溶蚀组分主要是碎屑颗粒如岩屑和石英次生加大边,表现为颗粒边缘呈港湾状;其次为颗粒内部的溶解,使颗粒呈蜂窝状和骨架状,溶蚀严重的呈残骸状或铸模孔(照片 7)。在碱性介质条件下,易导致长石、石英及铝硅酸盐的溶解,能造成碱性矿物的胶结如方解石及绿泥石的形成;而在酸性介质条件下,容易造成高岭石的形成和硅质次生

加大边的形成(照片 3)。大牛地气田上古生界储层砂岩的成岩作用规律显示出不同的介质条件的变化,酸性溶解后叠加碱性溶解对次生孔隙形成最有利。

微裂隙作用:微裂隙对低孔低渗的天然气储层有重要作用。通过薄片、铸体和扫描电镜等方法对大牛地地区的微裂隙类型、性质及分布进行统计,按产状可以分为 2 类:一类是切穿颗粒的微裂隙,该类微裂隙比例较少,主要见于脆性碎屑颗粒内部,较为平直,最常见的是穿过石英的颗粒,与石英的压裂碎裂作用有关,一般不超过颗粒以外,颗粒类型以石英组分多见,是应力作用的结果,有一定连通性,但延伸距离短;另一类是粒缘微裂隙,该类微裂隙在储层砂岩中较常见,占微裂隙的 95% 以上,形态上呈弯曲折状,沿颗粒边缘分布,有时延续稍长,同时还可穿过碎屑颗粒内部,也可看到许多粒缘微裂隙沿石英次生加大边,或石英次生加大的贴面缝分布(照片 7)。产生微裂隙的因素主要与应力作用有关外,还与储层砂岩的组成与成岩作用有密切的关系。切穿颗粒的微裂隙主要见于刚性的石英颗粒,垂向上、侧向上的地应力使具脆性的石英破裂;而在盒三、盒二段较发育的微裂隙可能还与下石盒子组具有较强的碳酸盐胶结有关,碳酸盐相对于硅质胶结,具有力学与化学稳定性差的特点,同时由于储集体内部局部应力的差异,使得碎屑颗粒沿边缘发生破裂或差异性转动从而形成微裂隙。

3 孔隙结构及储层评价

通过薄片、铸体、扫描电镜、压汞等分析手段,对储层的孔隙结构及储层储集空间类型进行分析。大牛地气田储层经历了较强的成岩作用过程,原生孔隙基本消失,只有极少数的剩余粒间孔隙(照片 5),目前的孔隙是残余粒间孔隙与次生孔隙的综合反映。

3.1 孔隙类型

剩余原生粒间孔:由于受后期强烈的成岩作用如压实、胶结等几乎损失殆尽。大牛地气田储层砂岩剩余原生粒间孔隙形态主要为不规则状,常见部分剩余原生粒间孔隙被晶粒石英、加大边石英、含铁方解石部分充填,以未充填为主但分布不均。下石盒子组和山西组常见叶片状绿泥石的胶结充填,盒二、盒三段较常见;硅质胶结物形成之后被保存下来的剩余原生粒间孔隙极少,在太原组极不发育,原因为太原组较强的硅质胶结作用,常驱使石英次生加大边聚合在一起而使原生孔隙基本消失。

表 1 鄂尔多斯盆地大牛地气田上古生界储层砂岩粘土矿物(平均)含量

Table 1 Average contents of clay minerals in the Upper Palaeozoic reservoir sandstones in Daniudi Gasfield, the Ordos Basin

层位	伊利石 (I), %	高岭石 (K), %	绿泥石 (C), %	伊/蒙混层 (I/S), %	间层比, %
C ₃ t ¹	67.5	28.5	0.0	4.0	2.5
C ₃ t ²	90.9	1.3	0.5	7.3	12.1
P ₁ s ¹	79.7	10.9	1.5	7.9	9.9
P ₁ s ²	45.8	15.5	27.7	10.9	13.0
P ₁ x ¹	31.5	21.1	37.9	9.5	10.5
P ₁ x ²	36.7	14.6	28.4	20.0	24.9
P ₁ x ³	21.6	28.4	36.2	13.6	22.2

剩余原生粒间孔在储层中呈孤立状,连通性较差。

次生粒间、粒内溶孔:由泥质杂基、假杂基和碎屑颗粒如岩屑和石英颗粒边缘被溶形成的粒间次生孔隙,在研究区 3 个层位均有分布。溶解作用较强的主要在盒三,二,一段和山一,二段(照片 7),尤其在山二段溶解作用较明显。粒内溶孔主要见于易溶的岩屑内部和泥质杂基,岩屑不同程度溶蚀形成粒内孤立溶孔、粒内蜂窝状溶孔及微孔,溶解完全时形成铸模孔隙,在下石盒子组及山西组较常见,而在太原组主要见石英颗粒及次生加大边溶蚀成港湾状。

晶间微孔:由泥质杂基、假杂基被溶或蚀变成粘土矿物如高岭石之后形成的晶间微孔隙,也可以是粒间二代淀高岭石晶间微孔、淀高岭石晶片间微孔以及伊利石晶间微孔,一般较发育。

微裂隙:在上古生界地层中具有重要的作用,它的意义在于能改善孔隙的连通性,尤其是在低孔低渗的储层砂岩,是一种重要的储集空间类型。主要有切穿颗粒的与沿颗粒边缘分布的微裂隙,但以粒间分布为主,连通性较好,常与铸模孔、次生溶孔及残余孔隙组成连通网络,较好地改善了储层结构,在盒二段和盒三段较为重要(照片 7,8)。

3.2 孔隙度、渗透率特征

对大牛地气田上古生界储层砂岩 40 口井的 7 842 个样品物性数据进行分析,并分别对不同层位盒三段、盒二段、盒一段、山二段、山一段、太原组的孔隙度和渗透率进行比较(图 3,4),可以看出,各层段孔隙度比较接近,变化不大,而渗透率变化相对较大。山一段和盒二段渗透率高,太一段、太二段和盒三段次之,且渗透率比较接近,山二段和盒一段最低。渗透率最高的山一段为 $1.26 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其次为盒二段达 $1.00 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,向后依次为太一段 $0.80 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,太二段 $0.79 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,盒三段 $0.75 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,山二段和盒一段渗透率最低,分别为 $0.46 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.39 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

为进一步了解各储层砂岩孔隙度与渗透率的关系,选取渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品进行孔隙度渗透率的统计分析,结果表明,渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品,不仅各层段的孔隙度比较接近,而且渗透率值也趋于接近。盒三、盒二和山二段孔隙度非常接近,在 5.7%~5.9% 之间,盒一段相对要高一些,为 6.7%,太一、太二段最高,分别为 7.0% 和 8.0%。统计分析还显示,下石盒子组中各地层的渗透率值也比较接近,盒三、二、一段分别为 0.238×10^{-3} , 0.294×10^{-3} , $0.248 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,因

此盒三、二、一段基质孔隙结构较为相似,孔隙度与渗透率特征相近。盒一段相对低产能和压降快的原因主要是缺少连通性较好微裂隙的存在,盒三、盒二段的高产能可能与大渗透率微裂隙和粒缘缝的发育相关,这与前述的成岩作用类型和储层砂岩储集空间分析的结果一致,关键是微裂隙和粒缘缝的发育导致渗透率增加而提高产能。

3.3 孔隙结构特征

储集岩的孔隙结构参数如排驱压力(P_d)、最大连通半径(R_d)等可用于评价储层的质量^[6]。对 16 口井 388 个样品的毛细管压力资料(其中盒三段 19 个,盒二段 24 个,盒一段 115 个,山二段 80 个,山一段 113 个,太二段 25 个,太一段 12 个)的分析统计(表 2)显示,盒三、盒二段平均排驱压力(P_d)分别为 0.88 MPa 和 0.74 MPa,在各储层砂岩段中是最低的,盒一段、山二、山一、太一段在 1.0~1.2 MPa 之间,比较接近,太二段最高,为 1.86 MPa,说明盒三、盒二段的启动压力低。最大连通孔喉半径(R_{10})在盒二、盒三、山二和太一的比较接近,山一段和盒一段相对较大,太二段最小。

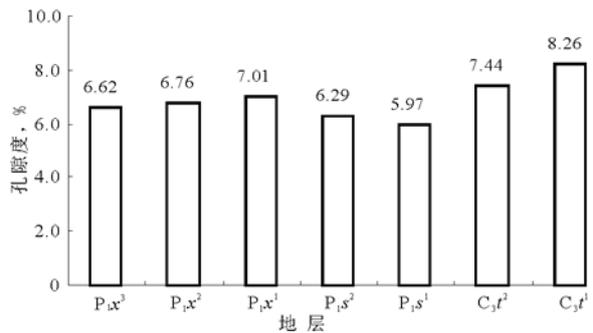


图 3 鄂尔多斯盆地大牛地气田上古生界储层砂岩孔隙度

Fig. 3 Porosities of the Upper Palaeozoic reservoir sandstones in Daniudi Gasfield, the Ordos Basin

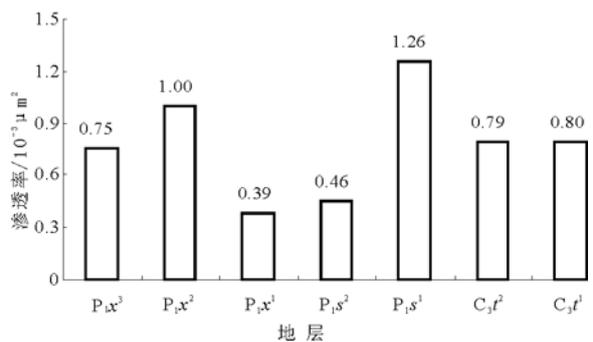


图 4 鄂尔多斯盆地大牛地气田上古生界储层砂岩渗透率

Fig. 4 Permeability of the Upper Palaeozoic reservoir sandstones in Daniudi Gasfield, the Ordos Basin

表2 鄂尔多斯盆地大牛地气田上古生界储层砂岩孔隙结构参数

Table 2 Pore structure parameters of the Upper Palaeozoic reservoir sandstones in Daniudi Gasfield, the Ordos Basin

地层	压力中值/MPa			最大孔喉半径/ μm			压力中值/MPa			喉道中值半径/ μm			平均喉道 分选系数(歪度)	偏度
	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均		
太一段	2.50	0.25	1.02	2.940	0.293	1.17	24.02	1.63	6.71	0.045	0.030	0.20	2.9	1.6
太二段	8.64	0.38	1.86	1.410	0.163	0.73	89.20	1.75	14.00	0.421	0.008	0.17	2.7	0.8
山一段	40.00	0.08	1.07	9.234	0.018	1.98	106.16	1.89	26.88	0.390	0.007	0.07	3.5	1.9
山二段	12.00	0.10	1.16	7.355	0.061	1.46	112.17	3.46	39.03	0.213	0.008	0.06	3.9	1.6
盒一段	10.53	0.01	1.01	74.243	0.070	2.22	102.60	1.05	37.07	0.700	0.007	0.04	3.6	1.7
盒二段	1.93	0.25	0.74	2.940	0.381	1.29	73.86	1.05	20.63	0.693	0.010	0.11	2.8	1.5
盒三段	1.80	0.30	0.88	2.454	0.408	1.03	105.84	0.92	14.48	0.796	0.007	0.19	2.6	1.8

喉道中值半径(R_{50})可以近似地代表样品平均孔喉半径,是储层评价的重要参数。盒三段、盒二段平均喉道中值半径(R_{50})分别为 $0.19 \mu\text{m}$ 和 $0.11 \mu\text{m}$,太一、太二段分别为 $0.20 \mu\text{m}$ 和 $0.17 \mu\text{m}$,山二、山一段比较接近,分别为 $0.06, 0.07 \mu\text{m}$,盒一段最小,为 $0.04 \mu\text{m}$ 。

从喉道分选系数(S_p)来看,下石盒子组盒三、盒二段为 2.6 和 2.8,比较接近,太一、太二段分别为 2.9 和 2.7,也非常接近,山一、山二段分别为 3.5 和 3.9,相对较高,盒一段为 3.6,也比较高。孔喉分选系数是反映孔喉大小分布集中程度的参数,表示孔喉大小分布的均一程度,一般而言 S_p 大于 3,则孔喉分布极差。因此从孔喉分选系数的分布来看,以盒三、盒二段及太一、太二段较好,孔喉分布较为均匀,而盒一段和山二、山一段相对较差。

4 结论

1)大牛地气田上古生界储层太原组主要是中一粗粒石英砂岩,其次为岩屑石英砂岩;山西组主要是中一粗粒岩屑砂岩,其次是中一细粒岩屑石英砂岩;下石盒子组以中一粗粒岩屑砂岩为主。从石炭系太原组到二叠系下石盒子组,石英含量减少,岩屑含量增加,含极少量或不含长石。

2)成岩作用存在差异。太原组一山一段地层中煤镜质体反射率在 $1.4\% \sim 1.5\%$ 之间,包裹体均一温度最高为 140°C ,伊/蒙混层矿物中蒙脱石层含量在 $28\% \sim 30\%$ 之间,太原组一山一段储层砂岩以晚成岩作用 B 期为主。下石盒子组(包括盒一、二、三段)一山二段地层中煤的镜质体反射率在 $1.3\% \sim 1.4\%$ 之间,下石盒子组包裹体均一温度最高为 126°C ,伊/蒙混层矿物中蒙脱石层含量一般大于 30% ,主要在 $32\% \sim 36\%$ 之间,属于晚成岩作用阶段 A 期;山二段的包裹体均一温度变化范围大,但综合考虑认为其成岩作用阶段与下石盒

子组地层相近,也为晚成岩作用 A 期阶段。

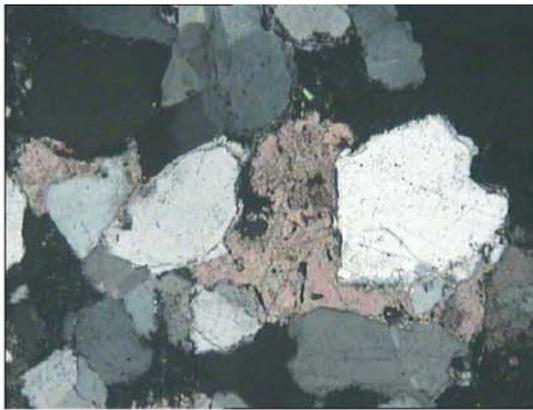
3)成岩作用类型主要有压实作用、胶结作用(硅质胶结、碳酸盐胶结、粘土胶结)、溶解溶蚀作用、交代与蚀变作用以及微裂隙作用。胶结作用的类型与强度在不同地层存在差异,石炭系太原组硅质胶结作用强,向下石盒子组硅质胶结作用减弱,而方解石胶结作用正好相反。微裂隙的作用在低孔低渗致密砂岩储层中起重要作用,盒三、盒二段的产能高于盒一段,与大渗透率值有关,与盒三、盒二段微裂隙较发育有关。

4)储集岩石的孔隙类型主要有(剩余的)原生粒间孔隙、粒间(晶间)微孔隙、粒间(粒内)溶蚀孔隙(包括铸模孔隙)及微裂隙(包括切穿颗粒的和粒缘微裂隙)。

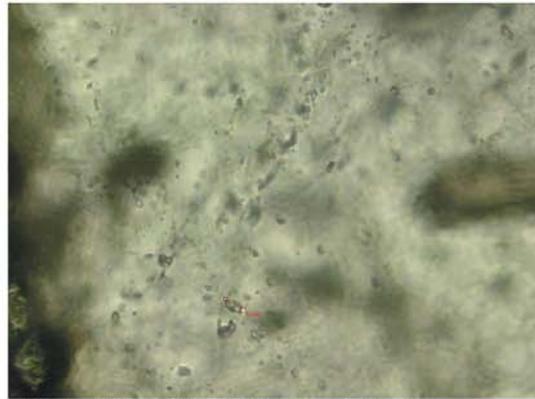
5)储层物性主要属低孔、低渗储层,孔隙结构参数显示盒三、盒二、太一和太二段平均喉道半径和中值压力评价好于盒一、山一、山二段,排驱压力和最大连通半径也具有相似的特征,盒三、盒二段产能高,盒一段产能低、压降快与盒三、盒二段微裂隙作用造成渗透率增加有关。

参考文献:

- 1 孟军田,贾会冲. 鄂尔多斯盆地北部塔巴庙地区上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):708~711
- 2 周锋德,姚光庆,赵彦超. 鄂尔多斯北部大牛地气田储层特低渗成因分析[J]. 海洋石油,2003,23(2):26~31
- 3 季峻峰,Browne P R L,刘英俊. 285°C 条件下伊/蒙混层矿物的存在及其意义[J]. 科学通报,1997,42(4):398~401
- 4 惠宽洋,张哨楠,李德敏等. 鄂尔多斯盆地北部下石盒子组一山西组储层岩石学和成岩作用[J]. 成都理工学院学报,2002,29(3):272~277
- 5 胡江森,张哨楠,李德敏. 鄂尔多斯盆地北部下石盒子组一山西组成岩作用与储层的关系[J]. 成都理工学院学报,2001,28(2):169~173
- 6 刘伟新,承秋泉,王延斌等. 油气储层特征微观分析技术及其应用[J]. 石油实验地质,2006,28(5):489~492



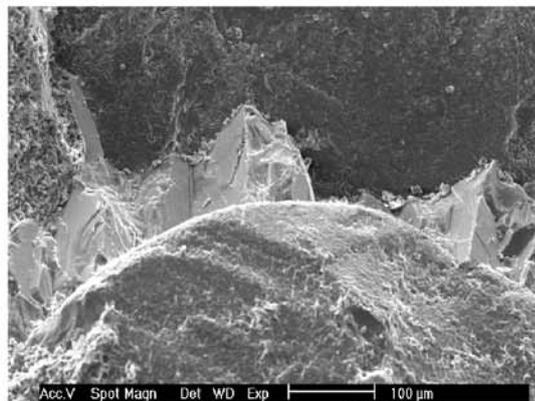
照片1 岩屑中粗砂岩, DK3井-1, 盒三段2 859.3 m, (正)×4, 硅质胶结, 见次生加大边及溶蚀, 强的钙质胶结



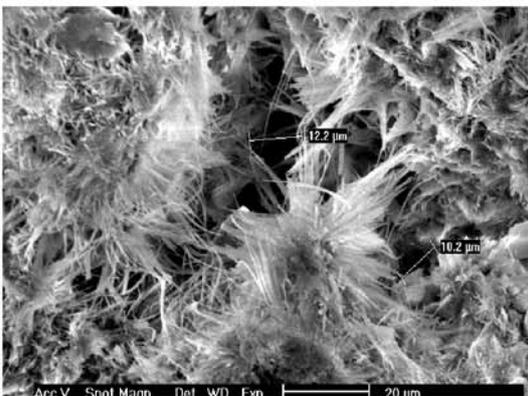
照片2 岩屑石英粗砂岩, 大16井-9, 山一段, 2 856.2 m, 气液包裹体, 均一温度138 °C, 石英次生加大边



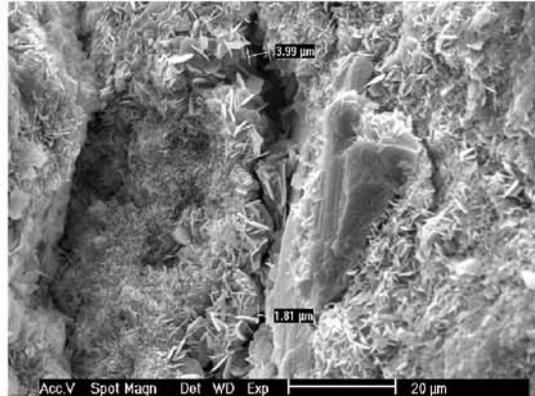
照片3 岩屑中粗砂岩, 大13井-4, 山一段2 785.2 m, (正)×10, 相对强的硅质胶结作用, 见溶蚀作用



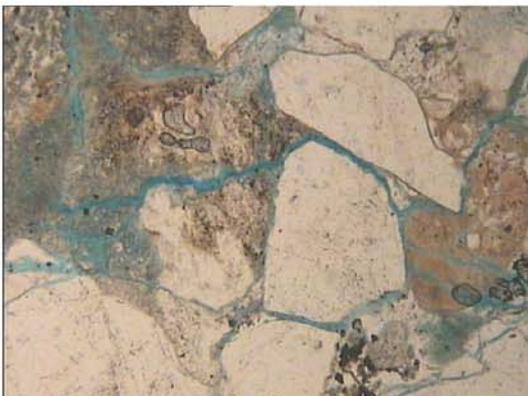
照片4 含钙质岩屑粗砂岩, 大30井-2, 盒二段, 2 737.2 m, 扫描电镜, ×400, 方解石胶结作用



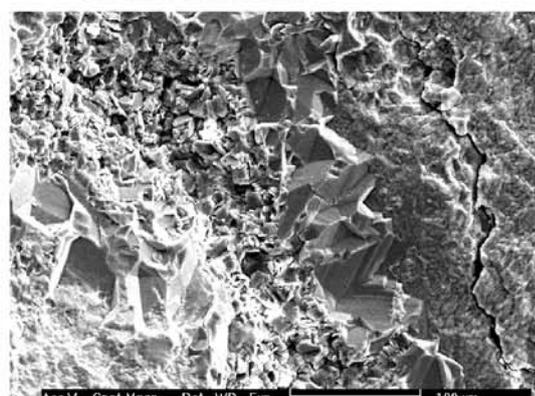
照片5 岩屑石英中砂岩, 大18井-7, 太二段, 2 772.6 m, 扫描电镜, ×2000, 丝缕状伊利石充填孔隙



照片6 岩屑粗砂岩 大13井-2, 山二段, 2 705.3 m, 扫描电镜, ×1500, 针叶片状绿泥石生长于颗粒表面



照片7 岩屑含砾粗砂岩, 大13井-1 盒二段, 2 627.9 m, 铸体薄片, ×4, 溶蚀作用, 颗粒边缘微裂隙



照片8 砂砾岩, 大16井-2, 盒二段, 2 703.8 m, 扫描电镜, ×600, 粒间微裂隙及其硅质胶结充填作用