

山西兴县奥陶系碳酸盐岩岩溶储层特征

王宝清 徐论勋

(江汉石油学院, 湖北荆沙市 434102)

山西省兴县奥陶系马家沟组第五段一亚段位于古风化壳的顶部, 主要由泥晶石灰岩组成, 有少量泥晶白云岩, 夹层含有一定量的泥质岩。储集空间为孔洞和裂缝。原生孔隙以晶间孔为主, 次生孔隙有晶间孔、溶蚀孔(洞)、鸟眼孔和砾间孔; 裂缝为构造缝、成岩缝、岩溶缝和缝合线缝。属于低渗透的溶蚀裂缝-孔洞型储层。影响储层最重要的作用是岩溶作用。

关键词 奥陶系 古岩溶 储层

第一作者简介 王宝清 男 50岁 副教授 沉积学

在油气田的勘探过程中, 由于储层的非均质性, 使得井间流体流动的预测极为困难。收集地表露头与地下对应地层的定量储层性能资料, 是说明储层侧向变化很好的方法。地表露头能够在以 1 m、10 m、100 m 为单位的紧密空间上采样。这些详细的露头资料能阐明井间范围内储集性能的空间变化, 并能解释造成这些变化的原因。为了说明陕甘宁盆地气田的储层变化规律及其控制因素, 对山西省兴县关家崖奥陶系马家沟组第五段第一亚段的地表露头进行了详细的岩性、孔、洞、缝分布及变化的观察与描述, 并以平方米为单位采集样品进行研究。该亚段是陕甘宁盆地气田的主力气层^[1], 由四层组成, 从上至下为马五¹—马五⁴。

山西省兴县位于陕甘宁盆地东缘, 在早奥陶世时为碳酸盐台地^[2], 是一个典型的浅水、局限、低能、基底起伏小、蒸发作用强的克拉通内的陆表海。奥陶系沉积之后, 经历了长期的风化剥蚀, 形成古风化壳岩溶带。

一、储集空间

(一) 孔 洞

1. 孔(洞)径

最小的孔径小于 5 μm , 在电子显微镜下才能见到。最大的孔径达 2 m。图 1 统计了野外露头上的孔洞(不包括直径小于 0.2 cm 的孔和直径约 2 m 的洞)。从图可以看出, 平均孔径为 6.22 cm, 孔径分布的方差为 53.28。25% 的孔径小于 2.07 cm, 50% 小于 4.2 cm, 75% 小于 7.9 cm。

最大的洞和最小的孔都出现在马五¹, 表明, 风化壳最顶部的孔洞的非均质性最大。马五¹、马五²、马五³ 的孔洞直径的平均值分别为 0.2 cm、0.5 cm、0.3 cm。

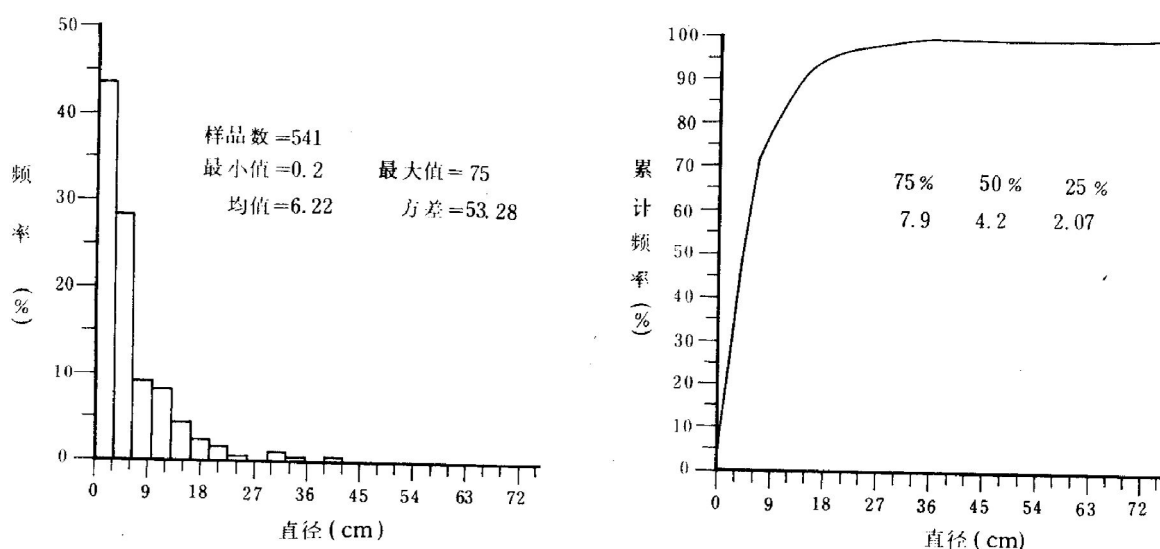


图1 孔洞分布直方图和累计频率曲线图

2. 分类

孔洞按成因可分为原生孔隙和次生孔隙(孔洞)。小者为孔隙,大者为洞穴,二者之间的为孔洞。洞穴往往是在孔隙或小的裂缝基础上发展起来的。

(1) 原生孔隙

有两种类型的原生孔隙,即粒间孔隙和晶间孔隙。由于兴县地区马五段一亚段的颗粒碳酸盐岩很少,且其粒间孔隙又被亮晶方解石充填,故粒间孔隙不发育。绝大部分原生孔隙为晶间孔,见于泥晶灰岩和准同生泥晶白云岩中,孔径 $0.05\sim 0.15\mu\text{m}$ 。在电子扫描背散射图像上可以看到这类孔隙形状不规则,分布不均匀。这类孔隙在后来的成岩作用和岩溶作用下,可以发生不同程度的溶蚀。原始沉积的灰泥,准同生白云石化形成的泥晶白云石沉积物具有大量的原生孔隙。由于压实、胶结作用的改造,大部分孔隙消失。现存的原生孔隙是经过改造后残存的孔隙。由于这些改造作用的非均一性,造成原生孔隙分布不均匀。

(2) 次生孔隙(孔洞)

次生孔隙往往是在原生孔隙的基础上进一步发展起来的。

1) 晶间孔

严格地说,应称为次生晶间孔,以区别于原生晶间孔。晶间孔出现在成岩白云石中。成岩期所形成的白云石晶体较准同生期的规则,孔径为 $0.1\sim 200\mu\text{m}$ 。这类孔隙如后来不被方解石等矿物充填,孔隙度和渗透率较高。兴县地区白云岩不发育,因此这类孔隙较少。

还有少量的晶间孔发育在孔、洞、缝间充填的晶粒较大的(中晶以上,常为粗—巨晶)方解石中,或孔、洞、缝充填物白云化后的白云石晶粒间。这类晶间孔较大,最大孔径可达 $0.5\sim 1\text{mm}$ 。

2) 溶蚀孔隙(孔洞)

溶蚀孔隙是马五段一亚段的主要孔隙类型,可分为:

i. 晶间溶孔

晶间溶孔是在晶间孔的基础上发展起来的。溶蚀作用不仅扩大了原来的晶间孔,还可使原来互不相连的孔连结起来,甚至多个小的晶间孔完全连通,大大提高了岩石的孔隙度和渗

透率。晶间缝也可使晶间孔连在一起,这种晶间孔更容易溶蚀。大部分晶间溶孔发育于泥晶灰岩、泥—细晶白云岩和由这些岩石重结晶的岩石中。也有些晶间溶孔发育在中晶以上的方解石充填物中或孔、洞、缝充填物白云石化的白云石晶粒间。

ii. 铸模孔

铸模孔主要是石膏、石盐等易溶的盐类矿物溶解后形成的孔洞,彼此往往互不连通,呈石膏或石盐的晶形。在断面上呈正方形、三角形、矩形或长条形。正方形的边长一般为0.1—2 mm;矩形的长边一般为0.1—2 mm,短边一般为0.005—0.04 mm。经强烈溶蚀作用改造的铸模孔,其特有的形态也随之消失。

iii. 非组构选择溶蚀孔洞

发育于各种类型的岩石中,是规模最大、发育最为普遍的一类孔洞。溶蚀孔洞的大小,形状都不规则,分布也不均一,表现出极大的非均质性,这也是古岩溶储层最显著的特点之一。

被裂缝连接起来的一些小孔隙,容易进一步被溶蚀成为较大的溶孔、溶洞。有些溶孔就是沿裂缝发育的。决定溶蚀孔洞发育程度最有意义的因素,是沉积后接受淡水淋滤的强度及持续时间。强度越大,持续时间越长,所形成的孔洞越大、越多。

3) 鸟眼孔

发育于泥晶灰岩和泥晶白云岩中,断面近椭圆形,长轴直径0.1—2 mm,短轴直径0.05—1 mm,近平行层面,孤立分布。常被方解石、石英部分或完全充填。由于孤立出现,储集意义不大,但溶蚀孔洞可在此基础上发育。

4) 砾间孔

岩溶砾岩砾石之间形成的孔洞。孔径变化较大,小于1 mm至5—6 mm,孔洞形状很不规则。

(二) 裂 缝

1. 宽 度

根据野外宏观能观察到的宽度不小于0.05 cm裂缝的统计,宽度为0.05—25 cm,平均1 cm。裂缝宽度分布的离散程度较小,其分布方差为0.044。25%的裂缝宽度小于0.5 cm,50%的小于0.9 cm,75%的小于1.5 cm(图2)。马五₁、马五₂、马五₃的平均裂缝宽度分别为1.5 cm, 0.7 cm, 1 cm。

2. 长 度

裂缝长度的统计不包括长度分别为10.7 m和56.3 m的两条裂缝及长度小于0.05 m的裂缝。从图3可以看出,裂缝长度为0.05—8.8 m,平均0.97 m。裂缝长度分布的离散程度较大,其分布方差为89.6。25%的裂缝长度小于0.47 m,50%的小于0.75 cm,75%的小于1.1 m。

3. 分 类

(1) 构造裂缝

研究的露头位于龙泉弧形褶皱带南部的一个轴向近北西—南东向的开阔背斜的南西翼^[3]。一组裂缝与背斜轴向基本一致,延伸不长,裂隙面不平直应为张裂缝(图4)。垂直和平行于层面的两组裂缝十分普遍。系薄层岩石在褶皱形成时受水平挤压力产生层间滑动,形成的水平裂缝和伴随的一组垂直裂缝。

根据裂缝的方向和自身的特征,构造作用对裂缝的影响不大,只可能产生一些微裂缝。这

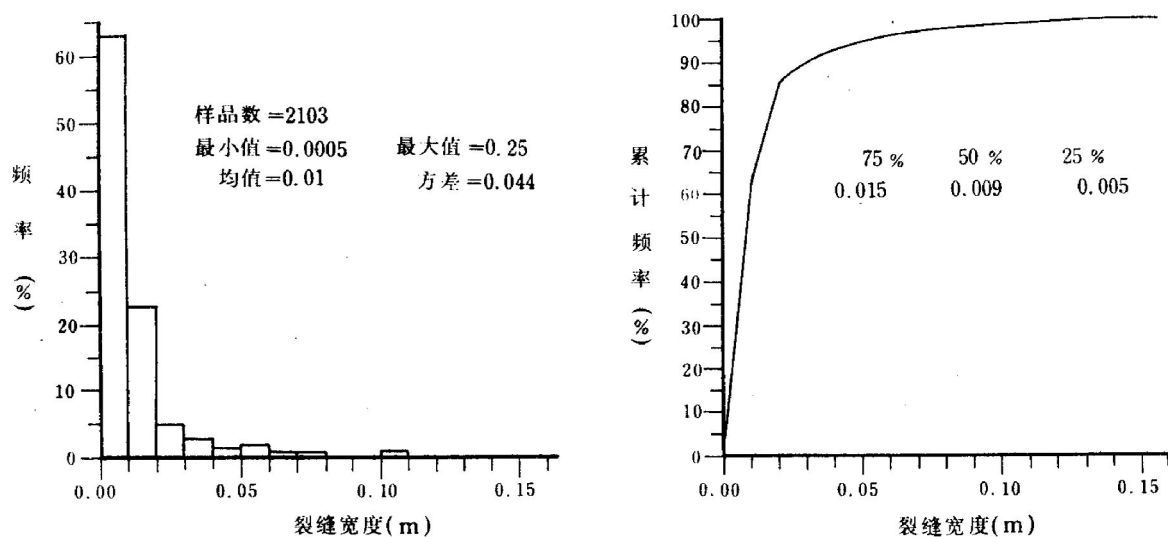


图2 裂缝宽度分布直方图和累计频率曲线图

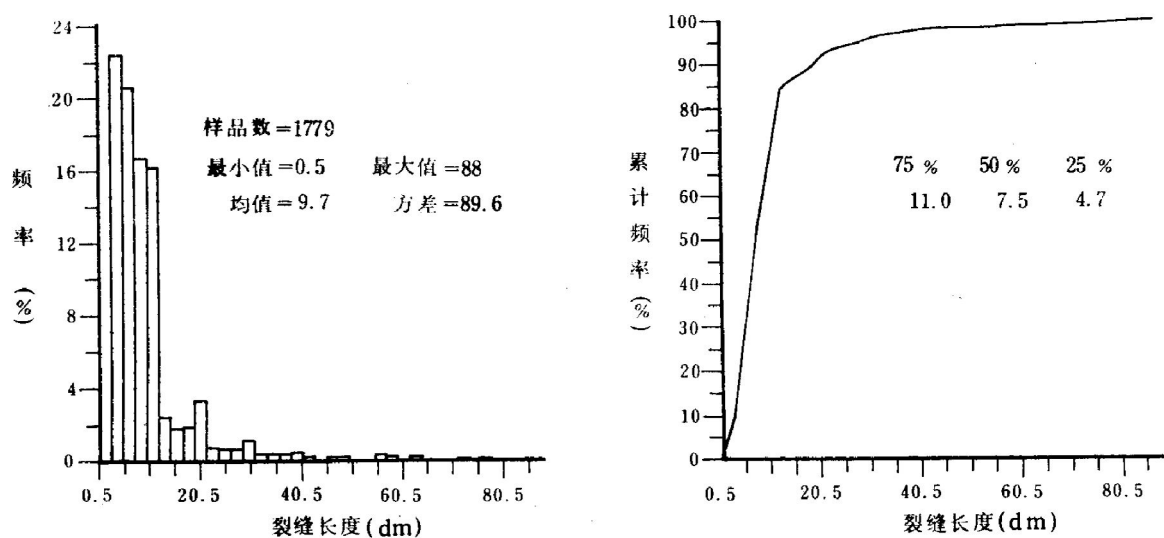


图3 裂缝长度分布直方图和累计频率曲线图

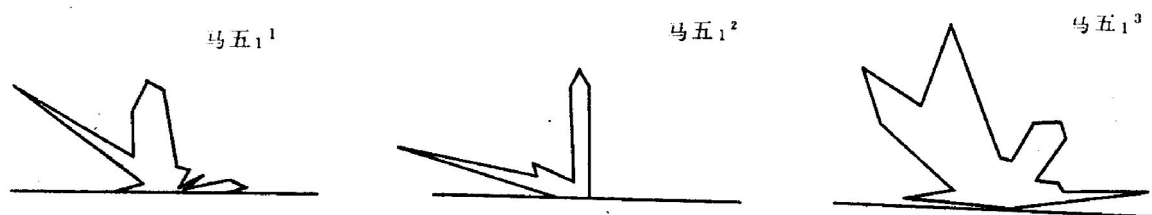


图4 裂缝走向玫瑰图

些微裂缝经岩溶作用进一步改造成了较大的裂缝。

(2) 成岩裂缝

1) 晶间缝

发育在粉-细晶白云岩、石灰岩,或后期充填的中晶以上的方解石中,沿白云石或方解石

晶体边界发育。规模一般较小，缝宽小于 0.01 mm。缝与缝之间可以相互连接成为较长的缝，可达 2 mm 以上。晶间缝可进一步溶蚀，成为晶间溶缝。白云岩中的晶间缝发生在白云石化作用期间。重结晶石灰岩中的晶间缝是由于重结晶作用发生的。对于储层来说，这两种晶间缝的形成都有建设性作用。孔、洞、缝中的方解石充填物的晶间缝，发生在较晚的充填作用过程中，对储层来说，是破坏性作用中的建设性因素。

2) 收缩缝

发育在泥晶灰岩或白云岩中，层面上近多边形，剖面上呈 V 字形，缝宽小于 0.1 mm。在平行于层面方向上可延伸数毫米至数厘米，垂直于层面方向延伸不超过 1 cm。系成岩期，含有大量水分的碳酸盐泥脱水收缩而成。

3) 岩溶缝

也叫溶蚀缝，是最主要的一种裂缝，无论规模，还是普遍性都是其它裂缝无法相比的。岩溶缝的宽度可小于 1 mm 也可大到 25 cm，长度可小于 1 cm 大到 56.3 m。岩溶缝的特点在于裂缝方向杂乱，宽度、长度多变，缝壁极不平整，有明显的溶蚀现象。岩溶缝可发育在各种类型的岩石中，往往沿早已存在的，规模较小的构造缝、晶间缝、或缝合线缝发育、发展。不饱和碳酸盐的水溶液沿着这些已经存在的裂缝淋滤、渗透对岩溶缝的形成极为有利。

溶蚀缝可形成于沉积的各个阶段，最有利的因素是不同时期沉积物（岩）的暴露和淡水淋滤。

4) 缝合线缝

缝合线呈锯齿状，长度通常不超过 0.5 m，振幅为 0.5—10 cm。沿缝合线发育的缝宽 0.01—0.3 mm，可以发育在泥晶灰岩、白云岩中，也可发育在充填于孔、洞、缝的粗-巨晶方解石中。缝中常充填粘土、泥晶方解石或沥青。缝合线为压溶作用产物，发育不普遍，储集意义不大。

二、储层的物性特征

（一）孔隙度

兴县马五段一亚段的孔隙度为 0.5%—12.5%，平均 1.99%。孔隙度分布的方差为 3.09。25%的孔隙度小于 1.05%，50%的孔隙度小于 1.55%，75%的孔隙度小于 2.04%（图 5）。

一亚段各小层的平均孔隙度由大到小依次为马五₁、马五₂、马五₃。兴县马五段一亚段的孔隙主要为溶蚀孔隙。剖面上，孔隙度由上往下减小反映了淋滤、溶蚀作用的影响逐渐减弱。

（二）裂缝孔隙度

裂缝孔隙度是根据野外测量的裂缝的长度和宽度及孔洞的直径计算出的面孔率。

兴县马五段一亚段的裂缝孔隙度为 0.06%—43%，平均 3.2%。裂缝孔隙度分布的方差为 18.4。25%的裂缝孔隙度小于 0.93%，50%的裂缝孔隙度小于 2.0%，75%的裂缝孔隙度小于 4.8%（图 6）。

与孔隙度一样，一亚段各小层的平均裂缝孔隙度在剖面上由上往下减小。裂缝与大的孔洞主要属溶蚀成因，在剖面上的变化趋势也反映了淋滤、溶蚀作用的影响由上往下减弱。

（三）渗透率

渗透率为 0.00003×10^{-3} — $1.82 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均为 $0.11 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。最大渗透率是最小渗

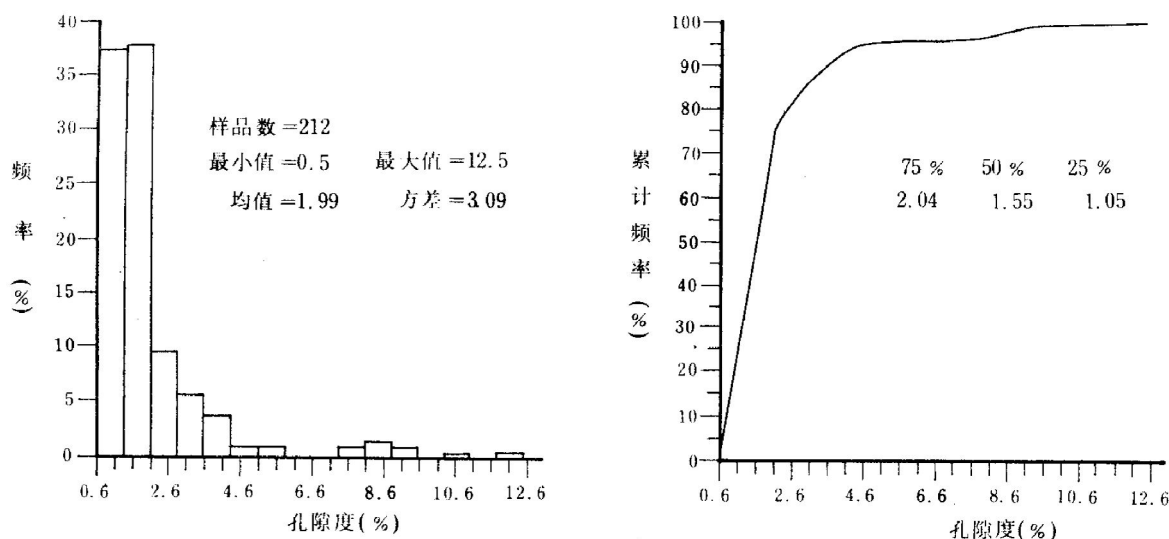


图5 孔隙度分布直方图和累计频率曲线图

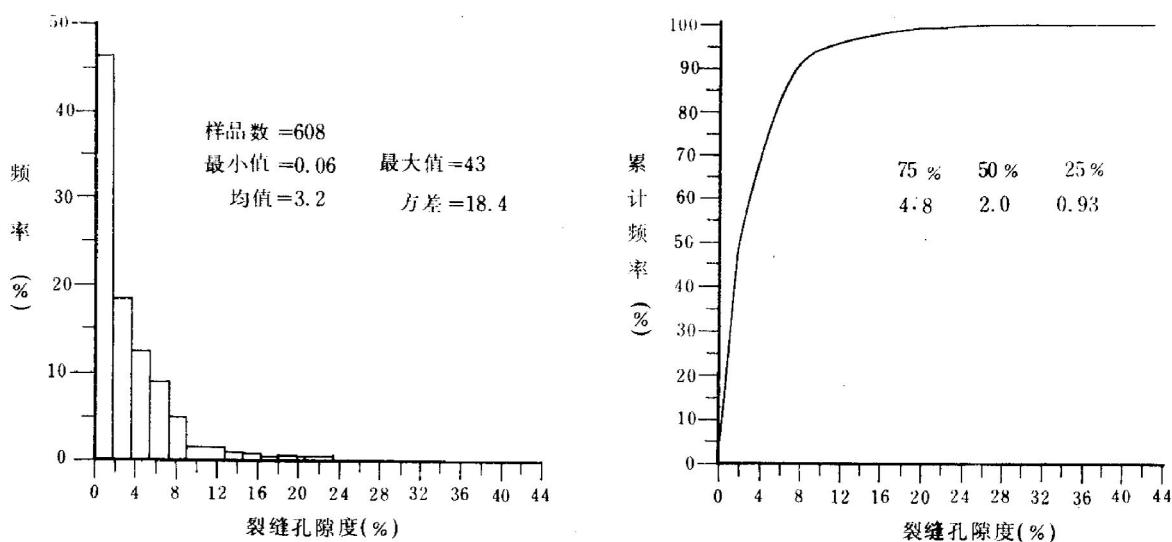


图6 裂缝孔隙度分布直方图和累计频率曲线图

透率的 60666 倍。渗透率比孔隙度非均质性更为明显。各小层的平均渗透率依次为马五₁¹ > 马五₃¹ > 马五₂¹, 与孔隙度的分布顺序不一。说明影响渗透率的因素除孔隙度外, 还有其它因素。

(四) 孔隙度与渗透率的关系

兴县马五段一亚段孔隙度和渗透率均表现出了明显的非均质性, 在不到 1m 的距离内, 可以产生很大的变化。其中渗透率的变化远大于孔隙度。一般说来, 孔隙度大, 渗透率也高, 但二者的变化并不呈严格的正相关, 在少数情况下, 会出现孔隙度增加而渗透率降低的现象 (图 7)。

(五) 孔隙结构参数

兴县马五段一亚段及各小层的孔隙结构参数示于表 1。

1. 汞饱和度

汞饱和度为 40.02%—100%, 平均 73.56%, 各小层依次为马五₁¹ > 马五₃¹ > 马五₂¹。

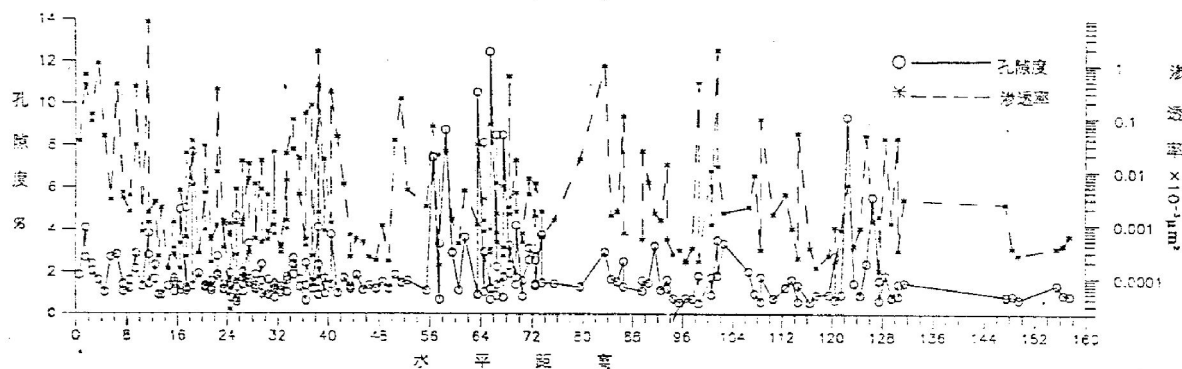


图7 孔隙度和渗透率沿水平方向变化图

2. 排驱压力

排驱压力 0.25—99.51MPa, 平均 9.16MPa。各小层依次为马五₁²>马五₁¹>马五₁³。

3. 孔喉均值

孔喉均值 9.40—15.53φ, 平均 13.08φ。各小层依次为马五₁²>马五₁¹>马五₁³。

4. 结构难度指数

结构难度指数是既考虑孔隙大小, 又考虑了喉道大小的综合评价因子。一般说来, 结构难度指数越低, 储集性能越好。结构难度指数 11.0—111.7, 平均 61.6。马五₁²>马五₁³>马五₁¹。

表1 孔隙结构特征

层 位	采饱和度 (%)	排驱压力 (MPa)	孔喉均值 (φ)	结构难度指数 (10 ³ mm ⁻¹)
马五 ₁ ¹	$\frac{49.88-100.00}{78.84}$	$\frac{0.25-59.92}{5.33}$	$\frac{9.67-14.2}{12.52}$	$\frac{16.5-98.0}{50.6}$
马五 ₁ ²	$\frac{40.02-90.40}{68.89}$	$\frac{1.00-99.51}{15.50}$	$\frac{12.63-15.53}{13.98}$	$\frac{30.6-113.0}{74.4}$
马五 ₁ ³	$\frac{50.81-98.52}{72.91}$	$\frac{0.27-14.01}{3.99}$	$\frac{9.40-14.77}{12.37}$	$\frac{11.0-111.7}{56.0}$
马五 ₁	$\frac{40.02-100.00}{73.56}$	$\frac{0.25-99.51}{9.16}$	$\frac{9.40-15.53}{13.08}$	$\frac{11.0-111.7}{61.6}$

三、储层评价

根据气田勘探的需要, 把储层分为四类(表2)。总的说来, 兴县马五段一亚段储层属于低渗透的溶蚀裂缝—孔洞型储层。2/4 以上的储层为Ⅳ类储层, 近 1/4 的属Ⅲ类储层, Ⅰ、Ⅱ类之和不到 1/4。

Ⅰ、Ⅱ类储层多为粉晶白云岩、粉—细晶灰岩、砾状、角砾状灰岩或白云岩。储集空间主要为晶间溶孔、溶蚀孔、缝、砾间孔。

Ⅲ类储层多为泥—粉晶白云岩、粉晶灰岩。储集空间主要为晶间孔、晶间溶孔、溶蚀缝。

Ⅳ类储层以泥晶灰岩为主。储集空间主要为晶间孔。

储层经历的淋滤溶蚀作用,是白云石化作用之后的对储层最重要的建设性作用。39个泥晶方解石样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -10.473‰ — -2.436‰ PDB 范围内,平均为 -6.103‰ PDB,明显低于现代非生物海相碳酸盐和多数古代碳酸盐台地的碳酸盐沉积物。原因在于沉积物(岩)沉积时和沉积后受到溶有有机质氧化形成的 CO_2 的淡水淋滤作用。

表2 储集层类型与分类特征

类 别 项目	I (好储集层)	Ⅱ (较好储集层)	Ⅲ (中等储集层)	Ⅳ (差储集层)
孔隙度 %	>8	5—8	2—5	<2
渗透率 $10^{-3}\mu\text{m}^2$	>1	0.5—1.0	0.1—0.5	<0.1
裂缝孔隙度 %	>6	4—6	2—4	<2
汞饱和度 %	>85	60—85	30—60	<30
排驱压力 Mpa	<0.1	0.1—1.0	1.0—10	>10
孔喉均值 ϕ	8—12	12—14	14—16	>16
结构难度指数 10^3mm^{-1}	0.2—4	4—22	22—80	>80
歪 度	粗歪度	较粗歪度	较细歪度	细歪度

泥晶方解石的 Na_2O 含量为 0.01% — 0.04% , 平均为 0.02% , Sr 含量为 5×10^{-6} — 98×10^{-6} , 平均为 31×10^{-6} , 远远低于现代碳酸盐沉积物中的含量,亦表明淋滤作用对储层的控制作用。因此钠锶含量的低值分布在某种程度上与优质储层有联系。

淋滤作用与古岩溶的地貌有关。马五段一亚段沉积于浅的潮汐环境,早期暴露可以形成层间岩溶;位于古岩溶的顶部,有利于形成风化壳岩溶;在地质历史中曾被埋藏,可以形成缝洞系岩溶。三种岩溶在马五段一亚段中都有发育,但以风化壳岩溶最为重要。尽管奥陶系古岩溶已发展到成熟的准平原阶段,但仍然存在着残丘。在马五₁较厚的地方中石炭统本溪组较薄甚至缺失,这是古岩溶高地;反之,马五₁较薄的地方本溪组较厚则是古岩溶洼地。古岩溶高地的潜水面附近水的交替作用、溶蚀作用强,形成以层状溶孔(洞)为主的裂缝—溶洞型储层,是最有利的储集空间。

感谢贺自爱教授级高级工程师详细审阅初稿,提出宝贵的修改意见。

参 考 文 献

- 1 郑聪斌,谢庆邦. 陕甘宁盆地中部奥陶系风化壳储层特征. 天然气工业, 1993, 13 (5): 26—30
- 2 张锦泉等. 鄂尔多斯盆地奥陶系沉积. 古岩溶及储集特征. 成都科技大学出版社, 1993. 12—32
- 3 山西省地质矿产局. 山西省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1989. 614—615
- 4 Land L S. The isotopic and trace element geochemistry of dolomite; the state of the art. In: Zenger D H, Dunham J B, Ethington R L, ed. Concepts and models of dolomitization. Soc. Econ. Paleontologists and Mineralogists Spec. Pub., 1980, 28. 87—100

CHARACTERISTICS OF ORDOVICIAN CARBONATE KARST RESERVOIR IN XINGXIAN, SHANXI

Wang Baoqing Xu Lunxun

(*Jiangnan Petroleum Institute, Jingsha, Hubei*)

Abstract

The first submember of the fifth member of the Lower Ordovician Majiagou Formation in Xingxian, Shanxi Province is located at the top of a paleo-weathered crust and consists mainly of micrite and small amount of micritic dolomite. The intercalations in it contain some amountes of argillaceous rocks. The reservoir spaces are pores, caves and fractures. The primary pores are dominantly intercrystal pores; the secondary pores include intercrystal pores, solution pores and caves, bird's eye pores, intergravel pores; the fractures consist of structural fratures, diagenetic fractures, karst fractures and suture fractures. It is suggested that the reservoir should belong to low permeable solution fracture-cave reservoir. The fundamental factor to effect the reservoir property is karstification.