

鄂尔多斯盆地乌兰格尔隆起南坡石炭-二叠系储层孔隙结构及成因*

邸世祥 卢焕勇 陈景维
(西北大学)

王希仁
(地矿部第三普查勘探大队)

本文论述了鄂尔多斯盆地北部乌兰格尔隆起南坡石炭-二叠系储层的孔隙结构特征及其成因。认为孔隙结构不太理想,主要是比较细小的填隙物内与溶蚀粒内孔隙;毛管压力曲线以比较差的4、5类,特别是5类占优势。孔隙结构级别应属比较差的IV、V两级。变差的主要原因与本区经受复杂强烈的成岩作用有关。在所划分的四个成岩阶段中,第一、二阶段的压实与充填交代使孔隙显著减小,而第三阶段的溶蚀作用并不发育,第四阶段又进一步充填。在论述孔隙结构相对较好地区与层段的同时,指出高岭石填隙物内晶间孔隙仍有可能成为有利的储集空间,应给以注意。

关键词 储集层 孔隙类型 毛管压力曲线 石炭-二叠系 鄂尔多斯盆地

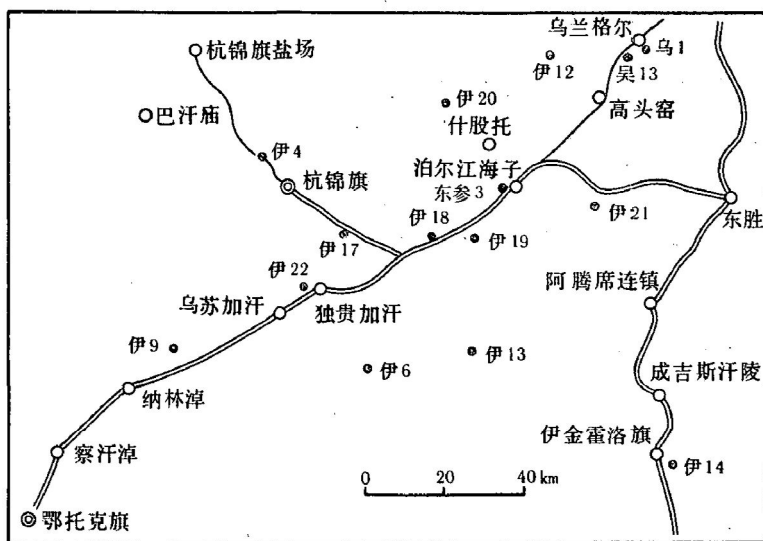


图1 研究区井位分布图

本文根据伊深1、伊20、伊21、伊17、伊18、伊19及伊22等钻孔的大量铸体薄片、压汞实验、电镜扫描及常规物性测定资料,介绍乌兰格尔隆起南坡的孔隙结构(图1)。涉及的地层有石炭系太原组、二叠系山西组、下石盒子组、上石盒子组及石千峰组。其中上、下石盒子组在伊深1井及伊17井发现工业产能的气流。据前人研究**,这些地层分别属潮坪相、三角洲相、河流相、浅湖相及滨湖相。

本文1989年12月21日收到。

* 国家自然科学基金资助及与地矿部第三普查勘探大队协作的课题。

** 地矿部第三普查勘探大队,1982,鄂尔多斯盆地北部晚古生代岩相古地理。内部资料。

一、孔隙分类和结构特征

关于孔隙类型,前人从不同角度做过划分。V. 施密特等从孔隙成因出发,把孔隙分为原生、次生和混合类型^[1];有的人则以孔隙大小为准进行分类,如超毛管孔隙(孔隙直径 $>500\mu\text{m}$)、毛管孔隙($500-0.2\mu\text{m}$)及微毛管孔隙($<0.2\mu\text{m}$);有的分类既考虑孔隙成因,又考虑孔隙大小,如E. D. 皮特曼把孔隙分为粒间孔、溶蚀孔和微孔等^[2]。我们从应用方便出发,提出以孔隙产状为主,并考虑溶蚀作用的分类方案。按产状我们将孔隙分为四种基本类型,进而又从溶蚀作用角度相应地分出了四种被改造的类型。以上八种类型的名称是:粒间孔隙、粒内孔隙、填隙物内孔隙、裂缝孔隙、溶蚀粒间孔隙、溶蚀粒内孔隙、溶蚀填隙物内孔隙及溶蚀裂缝孔隙。后四类孔隙是在前四类孔隙基础上受到溶蚀改造,并保留溶蚀痕迹的有关孔隙。

考虑溶蚀作用这一因素,是因为它对原生或早期形成的孔隙有改造作用,而改造后的溶蚀类型孔隙,不仅使储层孔隙结构明显改善,而且由于其形成时期往往与有机质向油气转化的时期能协调配合,对油气运移和聚集十分有利。我们并不认为四种基本类型孔隙都是原生的。事实上,其中的多数填隙物内孔隙(如自生矿物晶间孔)与裂缝孔隙(如构造裂缝)主要还是次生的。后四类孔隙虽都受过溶蚀改造,但把它们都叫次生孔隙也并不准确。因为它们中的很大一部分是在原生孔隙基础上发展起来的,溶蚀孔隙中,往往包含有原生孔隙的残留部分。确切地说,它们应是原生和次生孔隙的组合。

我们所提孔隙分类的优点是:第一,在实际工作中比较容易识别,如有些粒间孔隙早期被方解石充填或部分充填,到后期,仅填隙物被溶掉,而颗粒并未受任何损害,目前孔隙中也看不到任何溶蚀痕迹时,从成因角度看,虽应将其归于溶蚀次生孔隙(施密特所称的正常次生粒间孔),但在实际工作中却很难把它与一般原生粒间孔隙区分开来。若按新分类则很容易地将其归入粒间孔隙一类。第二,在储层评价中比较适用,即从储层发育的主要孔隙类型即可大致进行储层评价。如八类中的粒间孔隙与溶蚀粒间孔隙,一般个体都比较大,彼此连通性也比较好,好的储层一般都主要发育着这两类孔隙。粒内与溶蚀粒内孔隙,比较常见的是后者,如沿长石解理及岩屑易溶矿物溶蚀所形成的蜂窝状溶蚀粒内孔隙等。这类孔隙虽然个体直径比较大,但由于受溶蚀颗粒零星分布的制约,在岩石中常呈团粒状散布,连通性较差。因此,以这类孔隙为主的储层,其储集条件一般比较差。填隙物内和溶蚀填隙物内孔隙,常见者是前者,充填在粒间及溶蚀粒间孔隙中的自生粘土矿物晶间孔隙与杂基内孔隙即属此类。这类孔隙的特点是,因填隙物成团块状分布而成块状群体出现,孔隙个体十分细小,连通性很差。以这类孔隙为主的储层,显然储集条件最差。裂缝及溶蚀裂缝孔隙,往往起沟通孔隙的作用。

根据上述八类孔隙类型的划分方案,本区石炭-二叠系储层最发育的孔隙是填隙物内和溶蚀粒内孔隙(图版 I-1-4, 7, 8, 图版 II-1, 2),另外含少量溶蚀填隙物内孔隙与裂缝孔隙(图版 I-5, 6, 图版 II-3, 4),而粒间孔隙与溶蚀粒间孔隙只在局部地区和某些层段的少数样品中才比较发育(图版 II-5-8)。

由于上述八类孔隙在样品中的不同组合,形成不同的孔隙结构。综合本区资料,除无孔隙或只含个别细小孔隙的非储层结构类型外,大致有五种孔隙组合类型:1类组合指普遍发育着粒间孔隙或(和)溶蚀粒间孔隙,孔隙个体大,连通性好;2类组合以粒间孔隙或(和)溶蚀粒间孔隙为主,另含一定量其他类型孔隙,前者个体大,后者个体小,从总体看,这一组

合类型的孔隙连通性比前一类稍差；3类组合除含有一些粒间孔隙或（和）溶蚀粒间孔隙外，尚发育比较多的填隙物内孔隙，并含有一些其他类型孔隙，孔隙个体大小混杂，连通性比较差；4类组合普遍发育填隙物内孔隙，孔隙个体小，连通性差；5类组合一般只存在少量填隙物内孔隙或（和）个别有一些其他类型的孔隙，孔隙不仅数量大减，而且个体都很小，连通性很差。

上述五种孔隙组合本区均有，但最发育的是4、5两种组合，尤以后者为最。表明本区储层孔隙结构是比较差的。总的变化趋势是：平面上由南向北，由西向东；剖面上自下而上，孔隙组合类型略有变好。例如处于东北方向上的伊20、伊深1及伊21等井，除富含具较多高岭石填隙物内晶间孔隙及溶蚀岩屑粒内孔隙外，尚含有较多粒间孔隙或（和）溶蚀粒间孔隙，而西南方向的伊18、伊17及伊22等井的样品中，除个别井在石千峰组底部有少量粒间孔隙外（伊22井），一般均无粒间孔隙和溶蚀粒间孔隙，几乎全为高岭石填隙物内晶间孔隙或（和）微裂缝孔隙。剖面上的变化，由表1不同层位储层所含粒间孔隙或（和）溶蚀粒间孔隙的样品统计数据可以看出：向下孔隙组合大致有变差的趋势。

表1 石炭-二叠系储层粒间孔隙和溶蚀粒间孔隙发育程度统计表

井号	层位	样品数	具粒间孔和溶蚀粒间孔的样品数	具粒间孔和溶蚀粒间孔样品所占百分数
伊21	石千峰组底	10	7	70.0
伊21	盒9—10	9	4	44.4
伊深1	盒6	13	6	46.1
伊20	盒4—6	20	4	20.0
伊1	盒2	24	13	54.1
伊21	盒1	11	1	9.09
伊18	山西组	14	0	0
伊19	太原组	7	1	14.2

二、毛管压力曲线类型和特征

压汞实验主要测定的是孔隙连通部位，即喉道的大小、分选及与各类喉道所连通的孔隙总体积的大小。一般喉道越粗，所连通的孔隙体积越大，孔隙结构越好。

本区石炭-二叠系储层岩性的非均质性很明显，如前所述，孔隙类型也比较复杂，这就决定了储层的毛管压力曲线各式各样。概括起来大致有五种曲线类型（图2），各曲线特征列于表2。其中具第1类曲线的储层，一般都具前述1类孔隙组合。它们往往只出现在本区东北部一些井的石千峰组底砂岩和上石盒子组某些储层中，如伊深1井S-8、伊21井S-39等。第2类曲线常为前述2类孔隙组合所反映的特征，它出现的地区和层位大致同第1类，如伊21井S-40、S-41，伊20井P-66，伊深1井S-5等。1、2类曲线的储集层，在整个石炭-二叠系剖面上所占比例很小。它们的出现常与所在地区所在层段所处的有利沉积相带和中成岩中晚期的溶蚀作用有关。第3类曲线所代表的储集岩，一般发育3类孔隙组合，其分布地区和出现的层段均较前两类有明显地增加。第4类曲线反映的储集层属4类孔隙组合。具这类曲线特征的样品在本区分布较普遍，特别是在布尔江海子断层附近下石盒子组及其以下储层，如伊17、18及19井的盒1段、山西组和太原组及伊22井盒1段的多数样品都属这种类型。第5

类曲线与前述5类孔隙组合均系差的储集层所具特征。具这类曲线特征的样品在各剖面中均有出现。

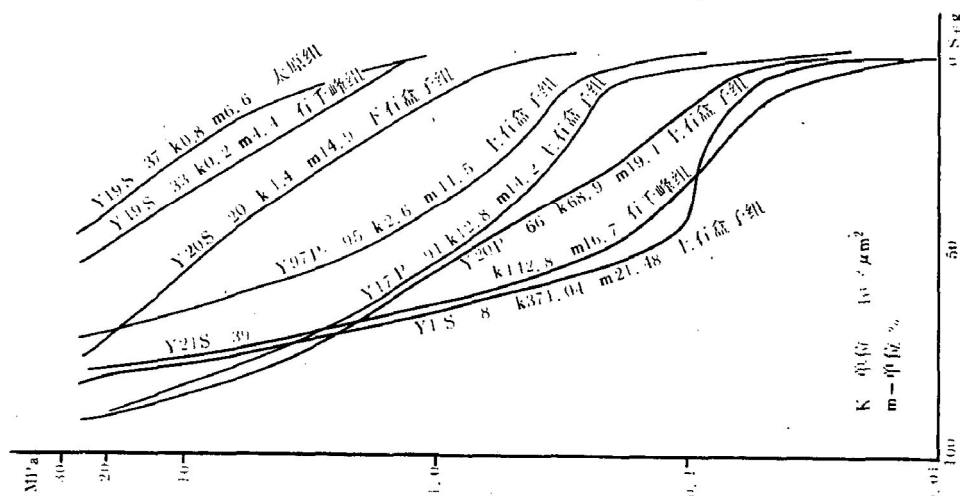


图2 毛管压力曲线类型及其特征

表2 不同类型毛管压力曲线特征

类 型	P_d (MPa)	P_{50} (MPa)	S_{250} (%)	m_{1070} (%)	毛管压力曲线特征
1	<0.05	<0.5	>80	>13	平台清楚、粗歪度
2	$0.05-0.1$	$0.5-2.0$	>80	$10-16$	有平台、偏粗歪度
3	$0.1-0.3$	$1.0-3.0$	$60-90$	$7-11$	略有平台、稍偏粗歪度
4	$0.3-1.0$	$2.0-10.0$	$50-70$	$3-8$	无平台略偏细歪度
5	>1.0	>10.0	<60	<3	无平台，细歪度

注： m_{1070} ——可用孔隙度，即由半径 $\geq 0.1\mu m$ 喉道所连通的孔隙体积占岩样总体积的百分数。

同孔隙组合类型一样，石炭-二叠系储层毛管压力曲线以4、5，特别是5类曲线占优势。从剖面上看，4、5两类曲线在石千峰组与上石盒子组各占50—55%，在下石盒子组占85%，山西组几乎所有样品都属这两类，太原组碎屑岩储层虽较山西组稍好，但4、5两类曲线仍在90%左右。毛管曲线类型在平面上的变化大体表现为在伊1、伊20和伊21井，以第3类曲线为主，而在布尔江海子断层附近的伊18、伊19和伊22井一带几乎未见到第3类曲线，而普遍出现的是4、5两类曲线。这与前述孔隙组合类型的变化规律基本一致。

三、储层孔隙级别和成因

综合上述资料，并参考常规物性数据，可将本区石炭-二叠系储层孔隙结构分为5个级别。每个级别的特征列于表3。

本区石炭-二叠系岩样，主要属Ⅳ、Ⅴ两级尤以Ⅴ级最多，另外尚有一部分储层样品实际具非储层结构。这说明本区储层总的特征是孔隙结构比较差，一般 $K < 2 \times 10^{-3} \mu m^2$ 、 $m < 14\%$ ， $P_d > 0.3 MPa$ 、 $P_{50} > 2.0 MPa$ 、 $S_{250} < 70\%$ 、 $m_{1070} < 8\%$ ，主要是填隙物内细小孔隙，连通性差。

表 3 储层孔隙结构分级表

参 数 级 别	K ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	m (%)	Pd (MPa)	P ₅₀ (MPa)	m ₁₀₇₀ (%)	主要孔隙类型及连通情况
I	>100	>18	<0.05	<0.5	>13	普遍发育粒间孔隙或(和)溶蚀粒间孔隙、孔隙个体大(>50 μm), 连通性好
II	100—20	16—20	0.05—0.10	0.5—2.0	10—13	以粒间孔隙或(和)溶蚀粒间孔隙为主, 另含一定量其他类型孔隙, 孔隙个体有大有小, 连通性稍差
III	20—2	12—18	0.10—0.3	1.0—3.0	7—11	除含有一些粒间孔隙或(和)溶蚀粒间孔隙外发育比较多的填隙物内孔隙, 并含一些其他类型孔隙、孔隙个体大小混杂, 连通性比较差
IV	2—1	8—14	0.3—1.0	2.0—1.0	3—8	普遍发育填隙物内孔隙, 孔隙个体小, 连通性差
V	<1	<10	1.0—	>10.0	<3	只含少量填隙物内孔隙或个别含一些其他类型孔隙, 孔隙数量大减, 个体很小, 连通性很差

因此,就总体来说,本区石炭-二叠系储层对油气的运移和聚集是不太有利的。但正如前述,在比较差的背景上,也有相对比较好的地区和层段,如本区东北部和较新层位,从伊深1井盒6、盒2发现工业产能气流即可得到证明。

孔隙结构主要受沉积环境与成岩作用两方面的控制。大量事实说明,储层时代越老,成岩作用对其孔隙结构的影响越明显,但他的影响在一定程度上又与沉积环境有密切联系。一般溶蚀孔隙发育的地区或层段,往往都是储集砂岩体发育的沉积相带。如本区东北部太原组下部潮坪相砂岩、下石盒子组河流相砂岩及上石盒子组以浅湖相为主的砂岩等,溶蚀孔隙相对比较发育,孔隙结构相对也比较好。因此,找寻有利的孔隙结构储集带时,研究岩相分布规律是十分必要的。

有关本区成岩作用的详细论述,已在另文中阐述。据研究,本区石炭-二叠系储层成岩作用可划分为以下四个阶段,即:沉积物机械压实和早期的胶结阶段;碳酸盐的胶结和交代阶段;溶蚀作用阶段;晚期自生粘土矿物的形成及早期粘土矿物的重结晶阶段。在这四个阶段中,第一、二两个阶段,即压实和充填胶结作用,是储层孔隙减小的主要因素。沉积物经受这些作用后,原始孔隙基本消失。之后如果没有溶蚀作用发生,或强度微弱,则该储层的孔隙结构一般都很差,即使处在好的相带的砂岩,同样也是如此,如伊19井太原组砂岩属潮坪相,岩石成分也比较纯,属石英砂岩类(岩屑石英砂岩),但由于强烈压实,特别是钙质充填胶结,孔隙结构仍然很差,大都属V级。第三阶段的溶蚀作用,是改善砂岩物性的重要因素,如伊20井,虽然压实作用明显,铁泥质假杂基化与绿泥石薄膜胶结普遍,但后期的溶蚀作用比较强烈,因而产生了较多的溶蚀孔隙,再加上晚期自生粘土矿物的再充填又不严重,所以孔隙结构比较好。m15%左右, $K > 2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 有些样品 $m > 20\%$, K可达 $15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 孔隙结构级别大都为III或III—IV级,少数样品在III级以上,是本区孔隙结构最好的一口井。第四阶段是使孔隙,特别是使溶蚀孔隙充填减小的阶段。由于晚期自生粘土矿物的发育,孔隙结构又趋于变差。需要注意的是,该阶段形成的填隙物若主要为高岭石时,则比其他粘土矿物充填的孔隙结构要好。本区石炭-二叠系储集层中,这种高岭石填隙物内晶间孔隙是比较发育的。已钻几口井的天然气显示,主要也都与这类孔隙有关。有的井已形成天然气的工业产能(伊17井下石盒子组),说明在找油,特别是找气中,不能忽视这类孔隙。

综上所述,可见本区石炭-二叠系储层的孔隙结构是不太理想的。大多数样品属Ⅳ、Ⅴ两级,其中尤以Ⅴ级为最多。铸体薄片和电镜扫描观察表明,最发育的孔隙类型是填隙物内孔隙和溶蚀粒内孔隙,特别是前者,另含少量溶蚀填隙物内孔隙和裂缝孔隙,而粒间孔隙和溶蚀粒间孔隙只在局部地区和某些层段才比较发育。压汞实验证明,主要是 $P_d > 0.3 \text{ MPa}$, $P_{50} > 2.0 \text{ MPa}$, $S_{250} < 70\%$, $m_{1070} < 8\%$ 的毛管曲线类型。造成本区储层孔隙结构差的主要原因是,地层经受了上述四个阶段复杂、强烈的成岩作用,使得粒间、溶蚀粒间等大孔隙基本消失。目前孔隙结构比较好的储层,一般都与中成岩晚期一定程度的溶蚀作用,以及之后自生粘土矿物等的充填交代作用又不甚发育有关。由于溶蚀作用常在储集砂体发育的沉积相带产生,因此,岩相在形成现孔隙结构方面也起一定作用。值得注意的是,在伊17井的高岭石填隙物内晶间孔隙比较发育的下石盒子储层中,已试出工业产能的气,这说明:此类储层虽然对石油储集不利,但在成气等其他条件的有利配合下,对形成气藏仍会是有效的,研究中应给以注意。

参 考 文 献

- [1] V. 施密特和 D. A. 麦克唐纳, 1980, 砂岩成岩过程中的次生储集孔隙。陈荷立、汤锡元译, 1982, 石油工业出版社。
[2] E. D. 皮特曼, 1979, 砂岩储集层的孔隙、成岩作用和生产能力。杨宝星译, 1981, 国外地质, 第1期。

PORE TEXTURE AND ORIGIN OF CARBONIFEROUS-PERMIAN RESERVOIRS IN SOUTH SLOPE OF WULANGAR RISE IN ORDOS BASIN

Di Shixiang Lu Huanyong Chen Jingwei

(Department of Geology, Northwest University)

Wang Xiren

(3rd Petroleum Prospecting and Exploration Brigade, Ministry of Geology and Mineral Resources)

Abstract

The pore texture and origin of the Carboniferous-Permian reservoirs in the south slope of wulangar rise in the north part of Ordos Basin is studied by casting thin section, injecting mercury, SEM, etc.. The result indicates that pore texture is not so good and the pores are mainly very small intra-interstitial materials and dissolved intragranular ones. The capillary pressure curves show dominantly type-4 and -5, especially type-5. The pore texture therefore should be defined as grade 4 or grade 5. The reason caused the poor pore texture is related to the complicated and intensive diagenesis. Within 4 diagenesis stages, the compaction, filling and replacement in the first two stages greatly decreased the pore spaces, though there was dissolution in the third stage, they did not develop well and were filled again in the last stage. According to the fact that well No. Y17 has produced gas, the pores of the intra-interstitial kaolinite may still be available reserving spaces.