

低渗透性砂岩的储油性能评价

张文达 肖无然

目前,我国已普查勘探的陆相油气田,其储油岩绝大部分为碎屑岩的砂岩。由于沉积环境复杂,岩性岩相多变,成岩后生作用不一,形成的各类砂岩的储集性能差异很大。对于渗透性高的储油砂岩,只需根据孔隙度、渗透率、含油水饱和度等参数,就能对储油性能作出评价。而我国有一些低渗透性储油砂岩,孔隙度仅在10%左右,渗透率一般小于1毫达西,对于这类储油砂岩,单凭孔隙度、渗透率、含油饱和度参数就无法全面说明它们的储油性能。因为,这些参数是一个宏观统计值,只表示砂岩的孔隙总量、油水比例;同时,由于渗透率测定精度的关系,小于1毫达西的渗透率对储油岩渗透性能好坏不起指示作用。因此,我们在一九六五年试制了压汞法孔隙结构仪,借助测定砂岩内孔隙的大小与分布,有效流动孔隙的含量,油水在孔隙中的分布状态,获得砂岩内部结构特征的定量参数,评价低渗透性砂岩的储油性能。

储油砂岩中的岩石孔隙结构,是由许多直径大小不同形态不一的毛细管网所组成,当两种互不相溶的流体(油和水、油和气、水和气)共存或通过储油岩的孔隙中时,必然产生毛细管现象。这样在两相流体界面即液相与固相(岩石)界面上存在作用力,所有作用力的合力称为毛细管压力。毛细管压力(P_c)的大小与毛细管半径(r_c)及表面张力(σ)、润湿角(θ)有关,简单的数学表示式为:

$$P_c = \frac{2\sigma\cos\theta}{r_c}$$

当界面压差大于其毛细管压力时,一种流体就能驱动另一种流体流动。储油层中的油气运移和聚集,就是依靠这种毛细管现象的机理进行的。压汞法孔隙结构仪,就是应用毛细管压力原理,利用汞对岩石的非浸润性,在不同的压力下,把汞压入岩石孔隙中,根据压力与进入岩石的汞量,绘出压力与汞饱和度关系曲线,即毛细管压力曲线(图1)。依据上述公式计算可作出岩石孔隙等效半径分布图(图2)。然后利用这两张图,就可对砂岩的储油性进行分类评价。

在进行分类评价时,采用下列几个参数:

1. 突变压力:

在实验中,当压力上升到某一值时,水银开始较大量地进入岩石孔隙,这个压力值

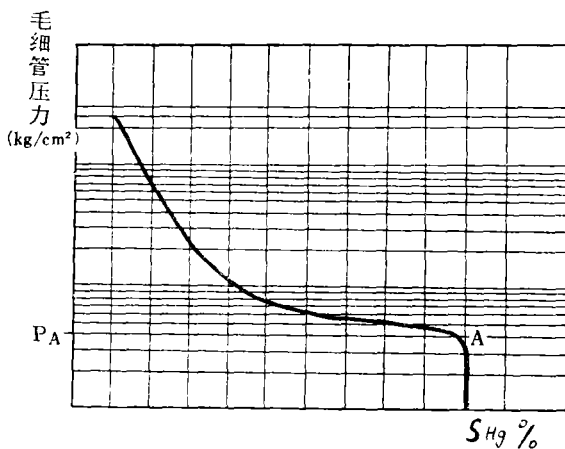


图1 毛细管压力曲线图

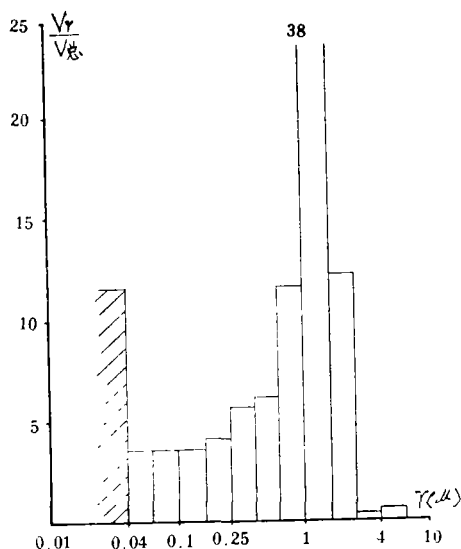


图 2 孔隙等效半径分布图

称为突变压力，它在毛细管压力曲线上为最低下拐点（A），此点称突变点。

2. 孔隙半径集中范围与百分数：

根据孔隙半径分布图，选取集中的孔隙半径范围，并计算出它们的百分含量。如图 2 中半径为 0.63—2.5（微米）范围内的孔隙百分含量。孔隙半径越集中，说明孔隙大小分选性好，孔隙半径集中范围越向大孔隙偏移，渗透性能变好。它是石油在地层中最有利的运移通道和储存空间。

3. 束缚孔隙：

暂时把孔隙半径小于 0.04 微米的孔隙空间总称为束缚空间（ S_{wi} ）。因为粘土矿物的晶层间隔量大的是 0.04 微米。一般各区域可按渗透率分布曲线确定束缚孔隙上限。

下面，以我国西部地区一个低渗透性油田为例，介绍应用岩石孔隙结构资料，评价低渗透性砂岩的储油性能。

××油田××井组范围内的延长统，8、9 油层，是主要生油井、储油层段。然而它们的储油岩孔隙度一般在 10% 左右，渗透率一般小于 1 毫达西。单凭孔、渗参数，则无法确定试采层位，压裂试采时，只好将所

有的油层全部打开压裂，再分层试采，增加了很多工作量。因此，对××井组中 8 口井内的 8、9 储油砂岩，进行了压汞法孔隙结构测定，并根据上述三个参数对储油岩的孔隙结构资料进行统计、分类、对比，可获得该区储油性能的分类标准（表 1）：

表 1 ××油田××井组 8、9 油层储油性能分类表

渗透性能分类	突 变 点		孔隙半径集中范围与百分含量		束缚孔隙含量(%)
	$P_D(kg/cm^2)$	$r_D(\mu M)$	范 围 (μM)	含量 (%)	
I	<6	>1.25	>1	>40	<25
II	6—16±	1.25—0.47±	>0.5	>32	10±—30
III	16±—36±	0.47—0.21±	>0.25	>40	一般 15—30 少数 30—40
IV	36±—50±	0.21—0.15±	>0.125	>40	20±—45
V	>50	<0.15	>0.1	>32	>45

根据这个分类标准，对比 8、9 油层的岩石孔隙结构，8 油层孔隙结构以 II—III 类为主，还有 I 类；9 油层孔隙结构以 III—IV 类为主。压裂试采结果，阳 1 井 8 油层日产油 7.2 立方米，无水，9 油层压裂试采后产量较低，一般日产油小于一立方米。

8 油层分 8₁，8₂，8₃ 三个油层，孔隙结构差异性较大，对比结果，以 8₂ 油层为最佳。8₂ 油层孔隙结构以 I—II 类为主，少数 III 类，孔隙分选性好，集中孔隙向大孔隙方向偏移。而 8₁、8₃ 油层，则以 III 类为主，它们的集中孔隙偏移在小于 0.4 微米的范围内，孔隙分选性差。上述这种分类，与压裂试采结果完全吻合（表 2）。

由上述分析可知，××井组中，延长统内，纵向，以 8₂ 油层的储油性能较好，但该层在横向展布上，储油性能的变化较明显。通过井组中各井间岩石孔隙结构资料的综合对比分析，8₂ 油层在各井中的孔隙结构分类如表 3 所示：

由此看出，8₂ 油层的孔隙结构以阳 4 井为最佳，其次是阳 3 井，阳 1 井，阳 6 井，

表 2 储油性能分类与压裂试采结果表

井 号	油 层	储油性能 分 类	压裂试采结果	
			日 产 水 量 (M ³)	日 产 油 量 (米 ³)
阳4	8 ₂	I—II	0.6	6.83
阳3	8 ₂	II	0	2.494
庆5	8 ₂	III	0	0.840
阳1	9	III—IV	0.122	0.405

表 3 8₂油层在各井中的孔隙结构分类

井号	阳1		阳2		阳3		阳4		阳5		阳6		阳7		庆5	
储油性能分类	主	次	主	次	主	次	主	次	主	次	主	次	主	次	主	次
	Ⅱ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ、Ⅴ	Ⅱ	Ⅳ	Ⅰ—Ⅱ		Ⅲ		Ⅴ	Ⅱ	Ⅴ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ

阳7井，再其次是阳5井，阳2井，庆5井。从表3、图3也可看出，本层岩石孔隙结构以阳1井、阳4井、阳7井为一线，此线南部8₂油层孔隙结构比北部好。从而可以圈出有利的储集与开采地区。

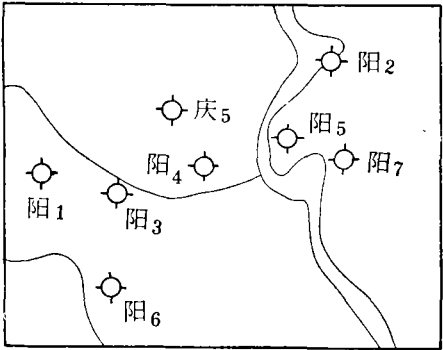


图 3 ××井组井位图

由以上分析可以看出，岩石孔隙结构测定，是研究低渗透性砂岩储油性的有效方法。此外，通过岩石孔隙结构资料研究，还可解决一些储油岩研究中的异常现象。例如，西北某一油田，M油层为一高含水饱和度，低含油饱和度的地层，然而在开采中却获得了工业性油流。本层孔隙度在10%以上，有的高达21%，渗透率为30—5毫达

西。经压汞法孔隙结构测定，其岩石孔隙结构特征为：小于0.1微米的孔隙占总孔隙体积的30%。按一般理论，在亲水地层中这30%的孔隙内被水所饱和，加上颗粒的薄膜水，含水量必然高于40%。不过M层中大于0.1微米的孔隙，数量也不少，这些孔隙为该层的石油有效流动孔隙。把这30%的小于0.1微米的孔隙，从总孔隙体积中扣除，重新计算含油、水饱和度，得到的结论，M层就不是高含水饱和度地层了（见表4）。

表 4 含油饱和度与有效流动孔隙含油饱和度比较表

试 样	含油饱和度 %	流动孔隙含油饱和度 %	试 样	含油饱和度 %	流动孔隙含油饱和度 %
516—518	61.2	90.0	688—692	43.9	82.0
519—522	52.2	83.0	815—821	44.1	75.0

由此可知，从岩石孔隙结构分析，我们可确定有效流动孔隙的含量，从而更正确地计算含油水饱和度，弥补由于束缚孔隙的大量存在，导致油水饱和度计算不准，把油层错判成水层。

又如：当储油砂岩的孔、渗不大时，往往根据孔、渗的大小，就去判断储油性的好坏，一般说来是可行的。但也有例外，如我国西部某油田，A、B二个储油层，A层的孔渗较B层好，但产能B层比A层好。我们对岩层作了岩石孔隙结构测定，发现B层的孔隙结构比A层好（见表5）。

表 5 A、B油层储油特征对比表

层号	参 数 号	孔隙度 m (%)	渗透率 K (mD)	产量 (方/天)	孔隙结构参数	
					突变压力 P _A (kg/cm ²)	束缚孔隙 (%)
A	1	14.84	27.83	3.5	3.00	14.50
	2	16.83	52.05		1.35	26.50
B	3	12.83	4.22	4.6	0.84	10.30
	4	16.74	17.17		0.78	15.50

（下转第63页）

参考文献

〔1〕 马丁, 温特斯, 威廉姆斯: 1963, 应用气体色谱分析原油组成与烃分布的地质意义, 第六届世界石油会议报告论文集, 第五卷第一分册, 中国工业出版社。

〔2〕 维诺格拉多夫, 加里莫夫: 1970, 碳同位素和石油起源问题, 石油地质学译文集, 第三集, 283—298页, 科学出版社。

〔3〕 利靳巴奇: 1975, 论石油成因, 石油地质, 1977年第二期, 185—198页, 甘肃省石油地质研究所。

〔4〕 刘崇禧: 1978, 我国油田水的离子组合特征, 地球化学, 1978年第二期, 124—134页。

〔5〕 Philipp, W.: 1963, Zur Geschichte der Migration im Gifhorner Trog, Erdöl und Kohle, Vol. 16, No. 6, p. 456—468。

〔6〕 Philippi, G. T.: 1977, On the depth, time and mechanism of origin of the heavy to medium gravity naphthenic crude oils, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 41, No. 1, p. 33—52。

〔7〕 平塚隆治: 1976, 石油の生成および進化の地化学の考察, 石油技术协会志, 41卷, 6期, 329—350页。

〔8〕 Rieke, H. H. III and Chilingarian, G. V.: 1974, Compaction of Argillaceous Sediments, Elsevier Scientific Publishing Co.。

〔9〕 Hudson, J. D.: 1977, Stable isotopes

and limestone lithification, Journal of Geological Society, Vol. 133, part 6, p. 638—660。

〔10〕 吉门: 1962, 灰岩中的有机质, 石油地质学译文集, 第三集, 175—183页, 科学出版社。

〔11〕 罗宾·巴瑟斯特: 1971, 碳酸盐沉积物及其成岩作用, 科学出版社。

〔12〕 Perry, D.: 1970, Early diagenesis of sediments and their interstitial fluids from the continental slope, Northern Gulf of Mexico, Transactions G. C. A. G. S., Vol. 20, p. 219—227。

〔13〕 Pray, L. C.: 1960, Compaction in Calclutites, Bulletin of the Geological Society of America, Vol. 71, No. 12, p. 1946。

〔14〕 Vest, E. L. Jr.: 1970, Oil Field of Pennsylvanian—Permian Horseshoe Atoll, West Texas, Geology of Giant Petroleum Fields, p. 185—203。

〔15〕 Gould, K. W. and Smith, J. W.: 1978, Isotopic Evidence for Microbiologic Role in Genesis of Crude Oil from Barrow Island, AAPG Bulletin, Vol. 62, No. 3, p. 455—462。

〔16〕 Deuser, W. G., Degens, E. T. and Harvey, G. R.: 1973, Methane in Lake Kivu, new data bearing on its origin, Science, Vol. 181, p. 51—54。

〔17〕 Соколов, В. А.: 1966, Геохимия газов земной коры и атмосферы, НЕЛРА。

(上接第66页)

由表5看出, A层的孔、渗虽比B层好, 但B层的大孔隙比A层多, 孔隙分选性也比A层好。岩石的孔隙结构差异, 导致油

层的产能不同。所以B层的产油量比A层高。

综上所述, 岩石孔隙结构反映了储油岩内部的储集特征, 除孔、渗参数之外, 它也是深入研究储油岩的基本参数。