

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

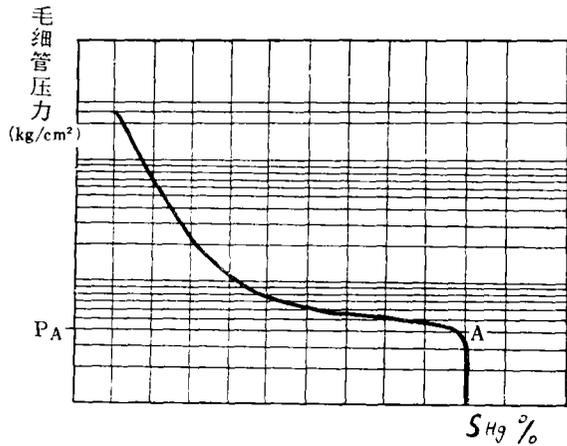


图1 毛细管压力曲线图

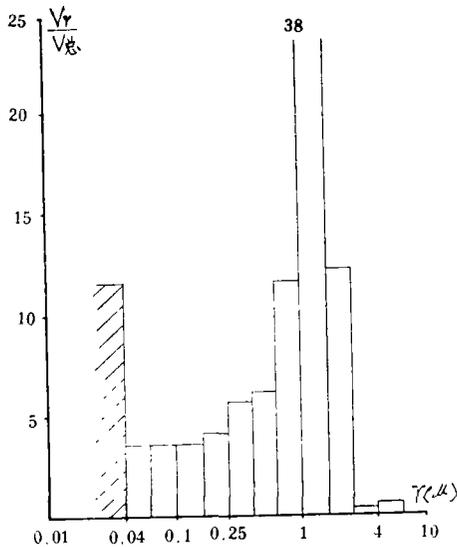


图 2 孔隙等效半径分布图

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 1 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	
	主	次	主	次	主	次	主	次	主	次	主	次	主	次	主	次
储油性能分类	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。

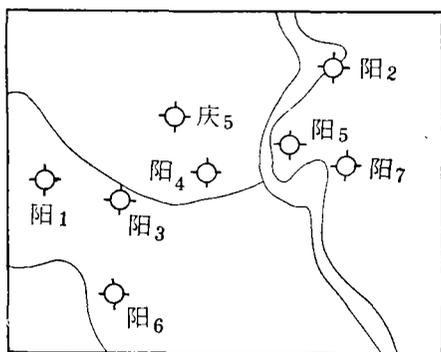


图 3 ××井组井位图

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	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 Calcilutites*, *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。