

围限压力下的孔隙度、渗透率 及其在储气岩评价中的意义

孙 妥 林万象

(地质矿产部石油地质中心实验室, 无锡 214151)

作者通过实验, 研究有效上覆岩层压力对孔隙度、渗透率的影响, 提出适用于非常规储集层和储气层的有关物性参数的评价和分级, 进而探讨储集岩对应力敏感程度的控制因素。

关键词 围限压力 物性参数 储气层评价

第一作者简介 孙 妥 女 58岁 高级工程师 石油地质

非常规储层具有低孔渗、非均质、颗粒细、含水饱和度高、泥质含量高等特点。这些特点导致其对应力的敏感, 上覆岩层压力给孔隙体积及渗透率带来影响, 就不像常规储层那样可以忽略不计了。

本文着重讨论有效上覆岩层压力对储集岩孔、渗性能的影响及其控制因素, 并以此为主要依据提出评价方案。

所谓有效上覆岩层压力, 指某一深度的上覆地层压力减去相应深度处的孔隙流体压力。在实验中以围限压力(简称围压)进行模拟。

1 实验设备

围限压力下的物性参数测试, 采用自行设计研制的MQ-86型多功能物性参数测定仪。该仪器由岩心室、供气和供液系统、围压系统、真空系统、气水分离测量系统、压力控制测量系统等组成。

围限压力变化范围: 1.5~100MPa, 最大驱动压力 7MPa, 气渗透率测试范围: $1\mu\text{m}^2 \sim 10^{-9}\mu\text{m}^2$ 。

根据不同需要, 将仪器零部件进行组合, 从而可提供围限压力下的气水渗透率测定、孔隙体积变化测定、气水两相排驱实验等所需的装置。该仪器与国内外同类仪器技术性能对比, 具有功能多、测试范围宽、围限压力范围大、造价低等优点。

2 实验结果研究

用于实验的样品计有川西凹陷上三叠统须家河组、上侏罗统遂宁组、沙溪庙组, 松辽盆

地南部白垩统五家子组、登娄库组 泉头组,中原白庙气田老第三系沙河街组等不同地区、层位的常规砂岩、致密砂岩、泥质粉砂岩以及淮北煤矿二叠系煤样,用来进行围限压力下的孔、渗等物性测试实验。

2.1 围限压力对孔隙率的影响

2.1.1 围限压力与孔隙率的关系

由图1可见围压从1.5MPa增至100MPa,各样的有效孔隙率呈递减趋势,但减小的幅度普遍很小。图的右端白庙气田沙河街组样品(白-345、白-346、桥-347),松南地区泉头组样品(松-86、松-89)为孔渗好的常规砂岩。图的最左端为准北二叠系煤样及川西须家河组(川-320、川-328)、遂宁组(川-368)的泥质粉砂岩,孔渗性差。图的中间部位,处于上述两部分之间的是松南地区五家子组(松-361、松-366、松-352、松-363)、登娄库组(松-358)、川西须家河组(川-316、川-321)较粗结构的致密砂岩,孔渗性居于上述两者之间。这三部分样品,它们的孔隙率随围压的变化量略有区别,但变化幅度均较小,关系曲线的斜率大,呈陡立状。由图1可以得出这样的结论:不论岩石孔隙率的大小及其疏松致密程度,围限压力对其有效孔隙率绝对值影响不大。

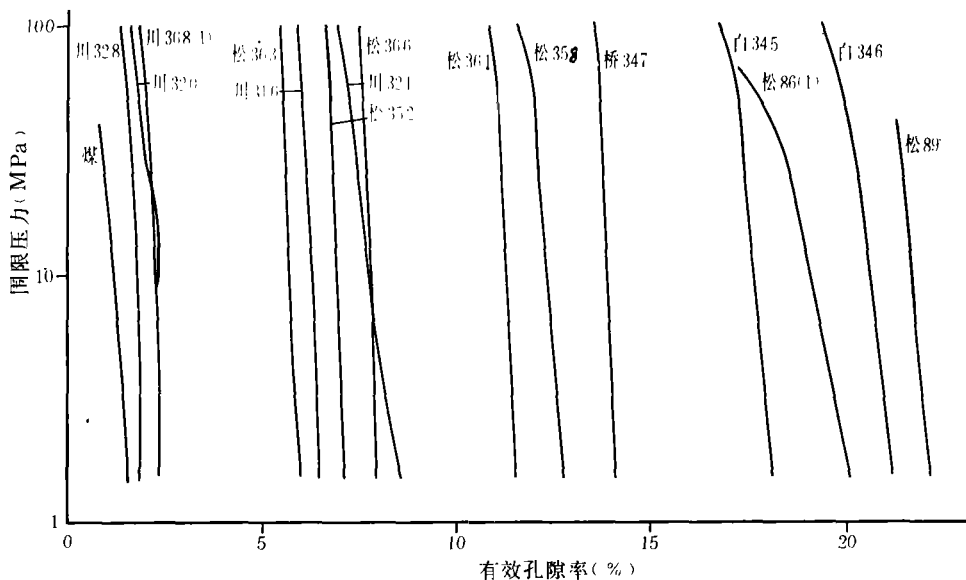


图1 围限压力与有效孔隙率的关系曲线

2.1.2 围限压力与孔隙率剩余系数的关系

(1)孔隙率剩余系数的概念:为了有效地表达围限压力对孔隙率的影响程度,提出孔隙率剩余系数,该参数的定义以计算式表示为:

$$\text{孔隙率剩余系数} = \frac{\text{某围限压力下的有效孔隙率}}{\text{常压条件下的有效孔隙率}} \times 100\%$$

上述参数说明了某一围限压力下的有效孔隙率占常压条件下的有效孔隙率的比例。从而表现了围压对孔隙率的影响程度。用地表常压有效孔隙率乘以相当于某一埋深压力下的

孔隙率剩余系数,即可获知该地层埋深条件下的有效孔隙率。

(2)围压与孔隙率剩余系数的关系:由图 2 可以看出围限压力对孔隙率剩余系数的影响是明显的,这可由关系曲线的特征和围压最终加至 100MPa 时,孔隙率剩余系数的大小来看出。对不同岩性的岩石,其影响程度有所区别。由图的右端向左依次来看,煤样的孔隙率剩余系数随围压的变化最大,其次为泥质粉砂岩(包括须家河组川-320、川-328,遂宁组川-368),再次为中-粗粒结构、孔渗并不很坏的致密砂岩(包括须家河组川-321、川-316 和泉头组松-86)。受围压影响最小的是图的最左端,沙河街组的常规砂岩(白-345、白-346、桥-347)和孔渗相对较好的粗结构砂岩(包括登娄库组松-358,五家子组松-363、松-361、松-366、松-352)。总的趋势是:泥质含量越高,孔渗性愈差,围压对其孔隙率剩余系数的影响愈大,反之愈小。

利用围限压力下孔隙率剩余系数的变化作为评价储气岩的参数之一,依据实验结果以围压加至 100MPa 时的孔隙率剩余系数为准划分为 5 个级别:a 级 >90%,b 级 >80~90%,c 级 70~80%,d 级 60~70%,e 级 <60%。

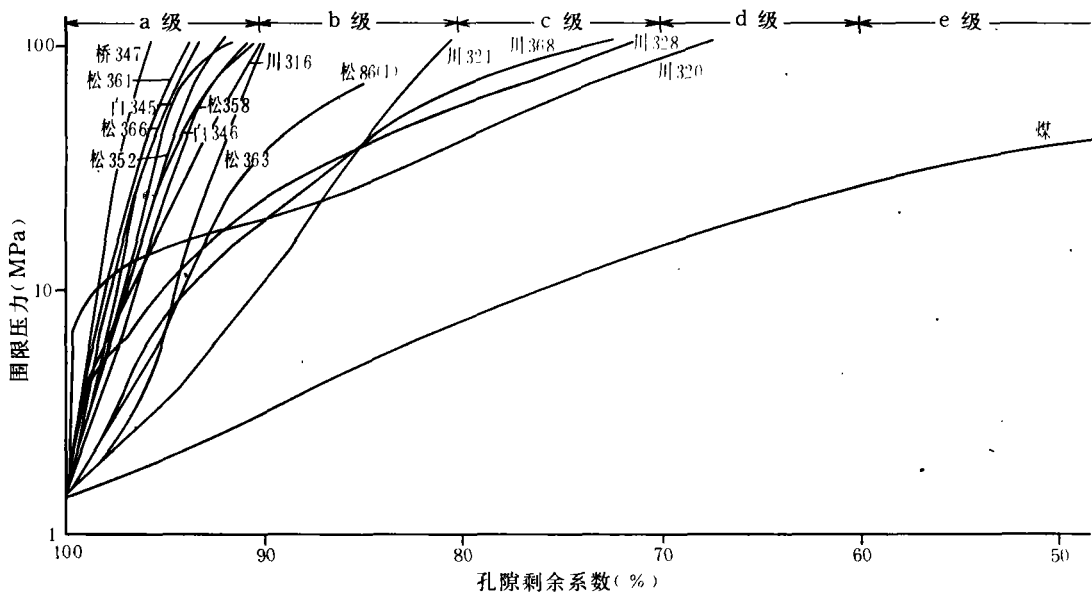


图 2 围限压力与孔隙率剩余系数的关系曲线

2.2 围限压力对气渗透率的影响

2.2.1 围限压力与气渗透率的关系

由图 3 可以看出,随着围限压力的增加气渗透率相应降低,降低的幅度有所不同。图的右半边的样品,气渗透率随围压的加大降低的幅度小,气渗透率在一个数量级内变化。它们包括沙河街组(白-345、白-346、桥-347)、泉头组(松-82、松-86、松-89)、登娄库组(松-90、松-93、松-358)孔渗好的常规砂岩,五家子组(松-361、松-366)粗结构砂岩。

图的最左端关系曲线斜率较大,气渗透率随围压的加大降低幅度大,变化范围可达三个

数量级。它们包括遂宁组(川-368)、沙溪庙组(川-369、川-370)、须家河组(川-328)的泥质粉砂岩和二叠系煤样。

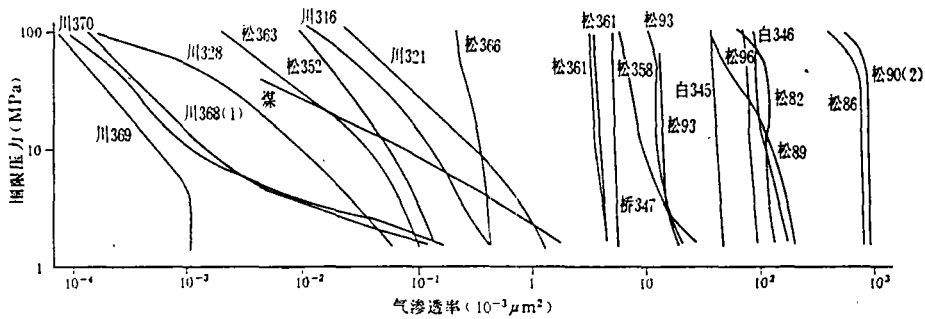


图3 围限压力与气渗透率的关系曲线

图中居于上述两部分之间的样品,其气渗透率变化范围在两个数量级内,包括须家河组中粒致密砂岩(川-321、川-316),五家子组粗结构砂岩(松-352、松-363)。

显然低孔渗透岩石的渗透率随围压的变化远比孔隙率明显。泥质含量愈高,渗透率随围压加大而下降的幅度愈大。常规砂岩的气渗透率受围压影响很小。

2.2.2 围限压力与气渗透率剩余系数的关系

(1)渗透率剩余系数的概念:由于各样品在岩石结构、孔隙结构等方面存在差别,受围压后渗透率绝对值的变化,不能说明围压对其影响的大小,为了有一个统一的对比标准,而提出渗透率剩余系数,其定义以计算式表示为:

$$\text{渗透率剩余系数} = \frac{\text{某围限压力下的渗透率}}{1.5\text{MPa(仪器的最低围压)下的渗透率}} \times 100\%$$

由上式可以看出:各样均以1.5MPa为对比基点,1.5MPa时的渗透率剩余系数为100%,围压加大渗透率降低,渗透率剩余系数必然低于100%,其渗透率剩余系数百分比愈高,说明与1.5MPa时的渗透率差值小,受围压影响小,反之则受围压影响大。用地表常压下的渗透率乘以相当于某一埋深压力下的渗透率剩余系数,即可获知该地层埋深条件下的渗透率值。

(2)围压与气渗透率剩余系数的关系:气渗透率剩余系数随围压的变化与上述气渗透率变化规律是相对应的。由图4从右端至左端依次来看,气渗透率剩余系数随围压的变化最大的是煤样以及遂宁组(川-368)、沙溪庙组(川-370)、须家河组(川-328)的泥质粉砂岩。围压在1.5~100MPa变化时其渗透率剩余系数可在3~4个数量级内变化。其次是须家河组中粒致密砂岩(川-321、川-316)、五家子组粗结构砂岩(松-352、松-363),渗透率剩余系数在两个数量级内变化。再次是登娄库组粗结构砂岩(松-358、松-89)渗透率剩余系数在一个数量级内变化。渗透率剩余系数随围压变化最小的是图的最左端的一组样品,它们包括沙河街组(白-345、白-346、桥-347)、泉头组(松-82、松-86)、登娄库组(松-90、松-93、松-96)的常规砂岩,五家子组粗结构致密砂岩(松-361、松-366),其渗透率剩余系数变化范围很小,关系曲线

呈陡立状。

利用围压下气渗透率剩余系数的变化,作为评价储气岩的参数之一,依据实验结果以围压加至 100MPa 的气渗透率剩余系数为准,划分 5 个级别:A 级 >60%,B 级 40~60%,C 级 10~40%,D 级 1~10%,E 级 <1%。

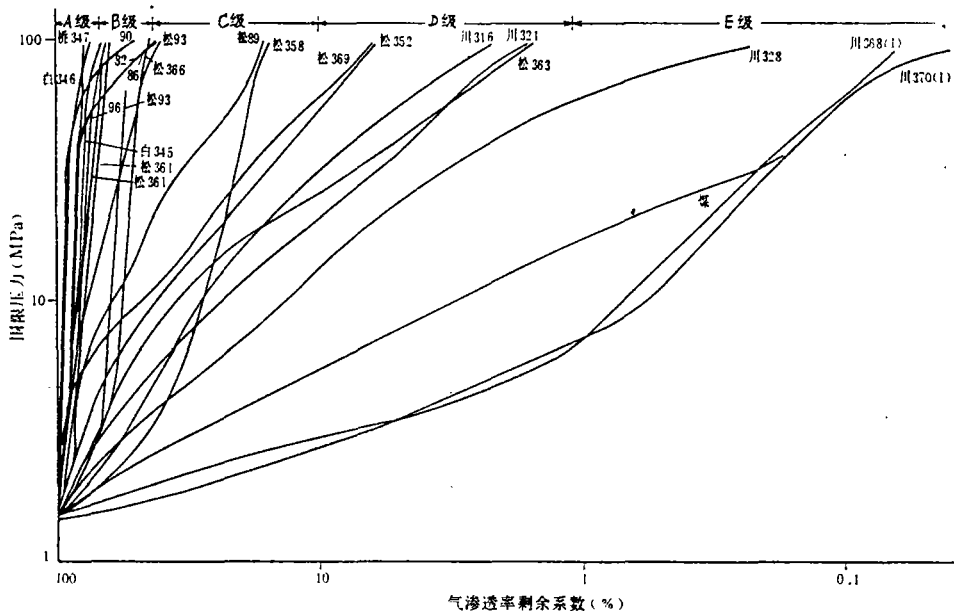


图 4 围限压力与气渗透率剩余系数的关系曲线

2.2.3 用渗透率应力系数反映储集岩对应力的敏感性

(1)渗透率应力系数的概念:为了寻求渗透率与围压之间的线性关系;使资料处理和相
关关系得到简化,便于储集岩之间的对比评价,而提出渗透率应力系数。根据前人经验以渗
透率的立方根与围限压力的对数值作图可成线性关系。表达这一关系的方程式如下:

$$\sqrt[3]{\frac{K_p}{K_0}} = 1 - \bar{S} \log \frac{p}{p_0}$$

定义 S 为渗透率应力系数

$$S_p = \frac{1 - \sqrt[3]{\frac{K_p}{K_0}}}{\log \frac{p}{p_0}} \quad \bar{S} = \frac{\sum S_p}{n}$$

式中: K_p 围压为 P 时的渗透率, K_0 仪器最低围压下的渗透率, p 围压, p_0 仪器的最低围压。

(2) 图 5 反映了各样品的 $\sqrt[3]{\frac{K_p}{K_0}}$ 与 $\frac{p}{p_0}$ 对数值的线性关系; 可以看出不同地区、不同层位的储集岩其 \bar{S} 系数的数值有所不同。 \bar{S} 值愈大者 (即斜率愈大者) 其渗透率受应力的影响愈大。

根据 \bar{S} 数值的大小反映出实验样品受应力影响由小到大的顺序是: 白庙气田沙河街组、松南地区泉头组、登娄库组的常规砂岩 (\bar{S} 值范围 0.01~0.03), 其次为松南地区五家子组致密砂岩 (\bar{S} 值范围 0.02~0.2), 再次为川西凹陷须家河组致密砂岩、泥质粉砂岩 (\bar{S} 值范围 0.2~0.3)。这与用渗透率剩余系数反映的规律是一致的。

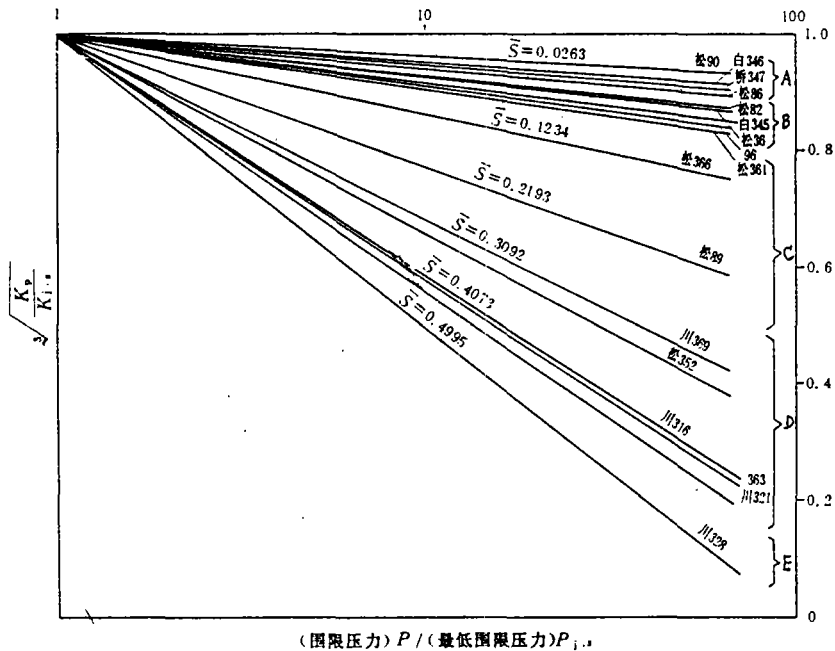


图 5 各种岩样的平均渗透率应力系数 (\bar{S})

将 \bar{S} 值作为评价储气岩的标准之一, 按 \bar{S} 值大小划分出 5 个等级: A 级 < 0.02 , B 级 $0.02 \sim 0.03$, C 级 $0.03 \sim 0.1$, D 级 $0.1 \sim 0.3$, E 级 > 0.3 。

3 储气岩物性参数的评价分级

3.1 对非常规储气岩的物性参数必须进行压力校正

通常进行储集层评价时多以地表测试的物性参数为准, 这对常规储集岩来讲是可以的,

而对致密砂岩及含泥质较高的非常规储集岩来讲误差则较大,见表1实例。

由表1可以看出,地表和地下渗透率值有明显差异。含泥质砂岩和低孔渗致密砂岩,地表和地下相差可达3~4个数量级。如果在评价非常规储层时,不考虑上覆地层压力的影响,势必造成错误的判断。这一问题在天然气普查勘探中尤其要引起重视。

表1 地表和地下渗透率对比表

样品号	埋深(m)及岩性	地表条件下的气渗透率 ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	相当埋深的 地层压力 (MPa)	埋藏深度条件下(围压力)	
				气渗透率 ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	渗透率剩 余系数(%)
松-358	1087.78 致密砂砾岩	34.8	21.8	8.02	23.0
松-368	1549.0 泥质粉砂岩	0.175	31.0	0.000392	0.211
松-321	2798.0 致密砂岩	1.38	56.0	0.042	3.4

3.2 储气岩物性参数的评价分级

本文提出的物性参数的评价分级,是从非常规储层的特点出发,考虑上覆岩层所产生的影响,以围限压力下的渗透率及渗透率应力系数为主要依据,次为围限压力下的孔隙度、孔隙率剩余系数。根据上述实验成果并参照前人划分意见初步提出以下分级标准(表2)。

表2 储气岩物性参数的评价分级表

物性参数	分 级 界 线					备注
	I级	II级	III级	IV级	V级	
有效上覆岩层压力 下的气渗透率 ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	>1 渗透层	0.1~1 近致密层	0.005~0.1 致密层	0.001~0.005 很致密层	10^{-3} ~ 10^{-5} 超致密度	参照美国 Elkins 对 地下渗透 率的分级
平均气渗透率 应力系数	A级 <0.02	B级 0.02~0.03	C级 0.03~0.1	D级 0.1~0.3	E级 >0.3	
有效上覆岩层压力下的 有效孔隙率(%)	1级 >20	2级 15~20	3级 10~15	4级 5~10	5级 <5	
孔隙率剩余系数(%)	a级>90	b级 80~90	c级 70~80	d级 60~70	e级 <60	

储气岩的评价分级可用这4项参数按次序排列表明。例如某一储气岩的评价分级为III D4b,这样便于横向对比。

4 决定储集岩对应力敏感程度的几个因素

4.1 孔径分布是重要的控制因素

取10个不同层位的储集岩实验样品,用其围压下有关的物性参数,按上述标准予以分级评价,结果可见其级别优劣与其孔隙结构有明显的相关性。

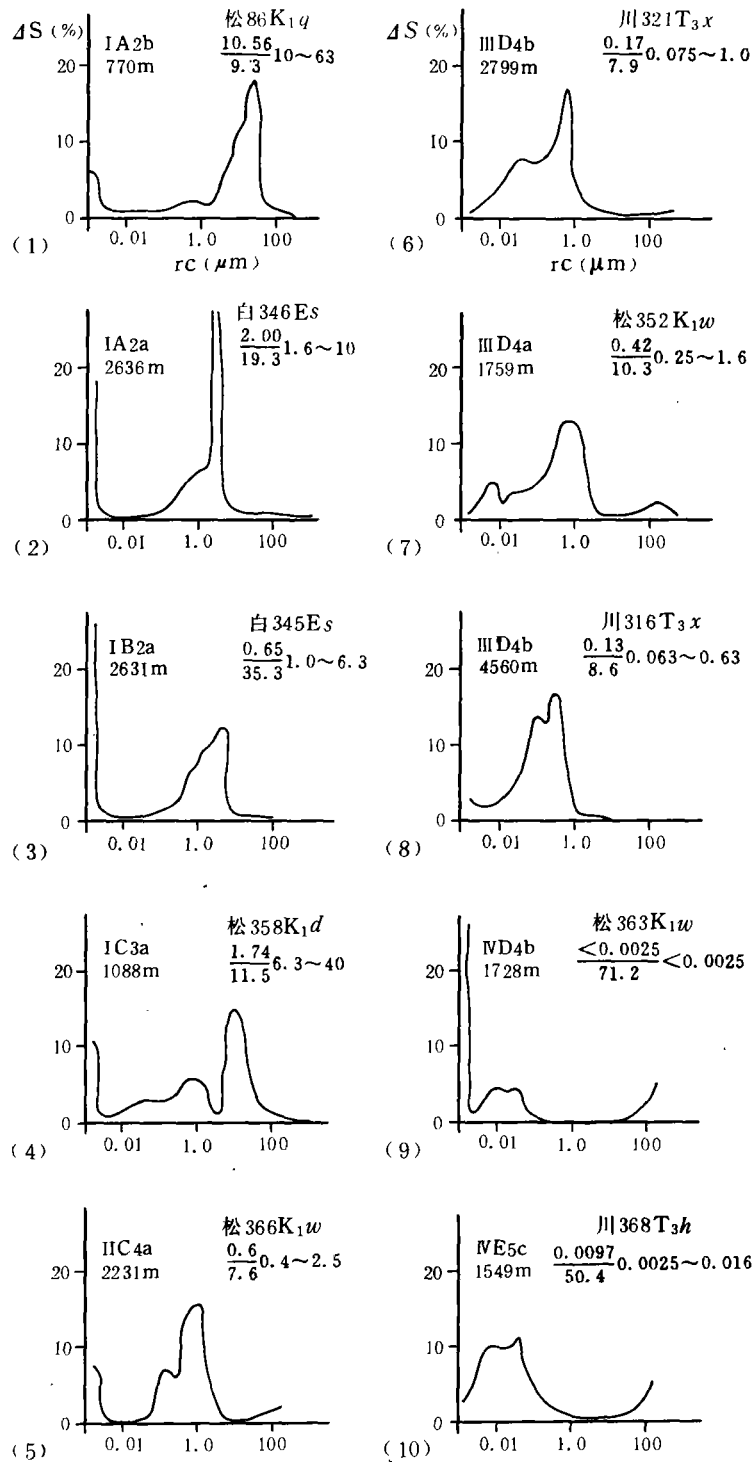


图 6 储气岩物性参数分级与孔径分布关系

左上角, 框内为物性参数分级, 框下数据为采样井深; 右上角数据为 $\frac{\text{平均孔隙半径}}{\text{平均孔隙半径}} < 0.01\mu\text{m}$ 孔隙半径所占百分数
 孔隙半径的主峰分布

图6从(1)至(10)评价级别总的趋势由优到劣,即受围限压力的影响由小到大。而相应的孔隙结构变化趋势是:平均孔隙半径(r_{50})由大而小,孔隙半径主峰分布由大而小, $<0.01\mu\text{m}$ 的孔隙所占比例由小而大。说明孔隙愈大孔径分布愈集中,受围限压力影响愈小。孔径愈小、孔径分布分散,则受围限压力影响愈大。储集岩对应力的敏感性明显地受控于孔径分布。

4.2 受孔隙形态特征控制

K. R. Brower、Keighin 和 Sampath 等作了如下实验:将大气压下做成的岩石孔隙铸体和同一岩石承受静压负荷三天后做成的孔隙铸体相比较,进行镜下观察,发现片状孔隙大量消失。

Sneddon 和 Lowengrub 以含片状缝隙的人工样品作压缩试验,同样证实了片状缝隙对应力有特殊的敏感。

笔者在实验中所选用的煤样经电镜扫描见原生微裂隙极发育,该样是实验样品中受围限压力影响最大的一个,围压 40MPa 条件下孔隙率剩余系数仅 48%,渗透率剩余系数低到 0.17%。不难看出也是由于片状微裂隙对应力极敏感所致。

三维形态上呈两向大一向小的孔隙,在围压下易于变窄、闭合、消失,从而影响渗透率急剧下降。三个轴长相近的孔隙,对围压的敏感程度远不如片状孔隙。

4.3 泥质含量的影响

泥质含量愈高,受围压影响愈大,在同一围压作用下其孔隙率剩余系数和渗透率剩余系数愈低。其原因是:(1)泥质组份较刚性碎屑的可压缩性大;(2)泥质含量高微小孔隙的比例增大,平均孔隙半径趋小。例如川西凹陷川孝 108 井上侏罗统 3 个泥质粉砂岩样品,泥质含量依次为 20%、35%、45%, $<0.01\mu\text{m}$ 孔隙半径所占比例依次对应为 25.6%、31.1%、50.4%。

以上因素不是单一存在的,在某一控制因素为主的情况下,总会或多或少伴有其它因素的控制作用。

5 结 语

非常规储集层具有的特点决定了它对应力的敏感性,因之在评价时,有效上覆岩层压力给物性参数带来的影响必须考虑。

埋藏深度对储集岩物性的影响,可通过孔隙率剩余系数、渗透率剩余系数、渗透率应力系数来表达。其对物性参数的影响程度,主要取决于储集岩的孔隙结构和泥质含量。

本文样品为西南石油地质局、吉林石油普查指挥部等单位提供。实验研究过程中承蒙张义纲教授指正。对以上单位和个人致谢。

(收稿日期:1991年7月19日)

参 考 文 献

- 1 罗骥潭,王允诚. 油气储集层的孔隙结构. 北京:科学出版社,1986
- 2 袁庆峰,孙庆和. 砂岩储层弹性压缩及其对物性参数的影响. 大庆石油地质与开发,1988,7(4)
- 3 袁政文等. 东濮凹陷沙河街组天然气储层特征及分类. 天然气工业,1990,(3)

POROSITY AND PERMEABILITY UNDER CONFINING PRESSURE CONDITION AND THEIR IMPORTANCE FOR GAS-RESERVOIR EVALUATION

Sun Tuo Lin Wanxiang

(*Central Lab of Petroleum Geology, MGMR*)

Abstract

By experiments the authors studied the pressure effects of rock formation on the development of porosity and permeability and suggested the evaluating and grading methods of relative physical property parameters suitable to unconventional reservoirs and gas-reservoirs. Furthermore, the sensitive extent of stress to reservoir was also discussed in the paper.