

# 疏松砂体渗透率测定方法研究

张春生 赖志云 柴巧英 谭国华

(江汉石油学院, 湖北江陵 434102)

本文介绍了一种现代疏松沉积砂体的渗透率测定方法,它的最大特点是对砂体渗透率进行实测。当考虑了成岩作用对储层性质的影响之后,该方法所获得的渗透率可以较好地与油田砂岩样品渗透率相对比。该方法装置简单,操作方便,结果可靠。是现代砂体储层性质研究值得借鉴的方法之一

关键词 渗透率 储层 现代沉积 油层物理

第一作者简介 张春生 男 30岁 讲师 沉积学

在现代沉积砂体储层特征研究中,渗透率参数是必不可少的,但疏松砂体渗透率的获得却是比较困难的。国内外有关文献报导甚少,W. J. E. Van de Graaff and P. J. Ealey(1989)曾强调要加强现代砂体储层研究,以指导油田的勘探开发,但研究方法尚未完全解决,尤其是渗透率的测定。就国内目前研究成果而言,在涉及到这一概念时,或者用其它参数代替(如渗透性系数),或者另辟蹊径,用间接方法获得(如图像分析法)。上述方法的共同特征是没有对砂体实测渗透率。

由于渗透率是反映储层性质最敏感的参数之一,影响因素很多,不同方法获得的渗透率参数相差比较悬殊。因此,用其它方法替代或用间接方法获得的渗透率无法与油田开发中所用方法——对岩芯样品实测渗透率进行对比,不能有效地与油田储层研究工作相协调,从而削弱了现代砂体储层研究的实际意义。本文是在对大庆油田喇、萨、杏曲流河三角洲沉积模拟实验的基础上,针对疏松砂体的储层性质而探索的一种渗透率测定方法。

## 1 测定原理及条件

为了与大庆油田岩芯渗透率具有较好的可比性,作者仍然从渗透率度量的基本原理达西定律出发,深入分析现代砂体渗透率测定存在的根本问题。达西定律指出:单位时间内通过岩芯的流体体积与岩芯两端所加的压差  $\Delta p$  和岩芯的截面积  $A$  成正比,而与岩芯的长度  $L$  和流体粘度  $\mu$  成反比。即

$$Q \propto A \cdot \Delta p / \mu L \quad \text{或} \quad K = \frac{Q \mu L}{A \Delta p} \quad (1)$$

式中  $K$  为渗透率。由上式可知,对于特定的岩芯和给定的流体,参数  $A$ 、 $L$ 、 $\mu$  都是确定的,因而在实测过某一样品的渗透率时,只需压差  $\Delta p$  和流量  $Q$  即可。必须说明的是:

(2) 用(1)式计算渗透率应满足二个条件,才能使计算结果准确可靠。a. 流体与样品不发生反应; b. 流速缓慢,保持水流状态为层流;c. 流量要小,保持渗透率与单位时间内的流量是直线关系。本实验中所用流体为水,流速很小,通过图版发现,实验过程基本满足上述三个条件。

(2) 疏松样品渗透率测定存在两个主要问题,其一是在不破坏原始结构的情况下取样;

其二是保持原始结构状态下测定。只有基本解决这两个问题,才能使测定结果更符合实际。

## 2 取样容器及测定装置

取样容器用柱状不锈钢圆筒,分为大小两类,小直径样品取样器长 65.0mm,内半径 12.5mm;大直径样品取样器长 220.0mm,内半径 45.0mm。由于长度大,所以该取样器外形是圆锥形,内部为一圆柱体(图 1),两种取样器都满足筒壁极薄(壁厚 0.1~0.3mm)、硬度很高、取样端锋利、易于进入地层、内壁光洁程度高、永久不变形等条件,以保证取样过程中沉积结构不受影响或尽量少受影响,采用上述功能的取样器,基本解决了取样问题。

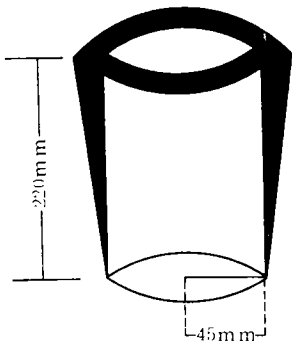


图 1 取样容器

测定装置(微压差渗透率测定仪)主要由压力指示系统、样品夹持器、流体供给装置、流量计或秒表及精密量筒等四部分组成(图 2)。

(1)压力指示系统的核心是一个倒置的“U”型微压差计。考虑到疏松砂体渗透性能较好的特点,该压差计的设计测量范围为 101.3~10132.5Pa,实验表明,上述范围基本能满足要求。倒置“U”型压差计由两支内径 8.0mm,外径 11.9mm,长 1500mm 的玻璃管弯成,里面装有水和煤油,下水上油,二者比例约为 1:1。用比重瓶测得煤油比重为 0.877g/cm<sup>3</sup>,上端用乳胶管与三通相连,排空管内空气,拧紧旋塞,使玻璃管内压力系统与外界大气压隔开,下部两出口分别用乳胶管通过三通与样品夹持器的出水口和进水口相连。实验开始后,由于样品两端的压力不等(出口压与进口压),可造成玻璃管内油水界面的上下移动。从而指示压力的变化,此时的压差为

$$\Delta p(\text{大气压}) = (\rho_w - \rho_o)g \cdot \Delta h \times 10^{-6} \quad (2)$$

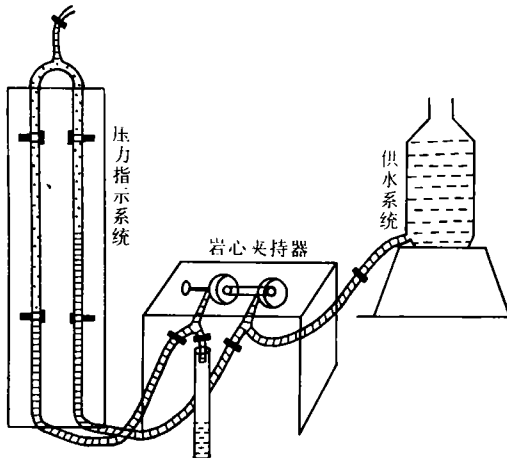


图 2 微压差渗透率测定仪

其中  $\rho_w$  为水的密度,  $\rho_o$  为煤油的密度,  $g$  为重力加速度,  $\Delta h$  为玻璃管内油水界面高差。应该指出的是玻璃管内盛装的液体(不一定为水和煤油),应满足三个条件。a. 两种液体密度差尽可能小,密度差越小,微小的压力变化可造成两玻璃管内界面变幅较大,从而减小测量误差,提高测量精度;b. 两种液体的颜色反差应比较大,以便容易观察界面位置,并准确读取数据;c. 两种液体应互不相溶。

(2)样品夹持器是一个不锈钢的气、液体渗透装置,测定渗透率时既可用液体作介质,也可用气体作介质。它取材于低渗透性的不锈钢材,

夹持器的交接部位用氩弧焊接,上、下端分别加工成锥形,锥形上部焊有出水管,下部焊有

进水管,各长 100.0mm,以便把容器中的空气排净。平顶的出水口则很难把残留在容器拐角处的空气排净。在容器的出水口和进水口上接有直径 8mm、壁厚 1.0mm、长约 40.0mm 的无氧铜管,无氧铜管经高温退火后,再经化学处理,使其内壁光洁。锥形内垫 320 目的铜丝滤网,并固定一与取样器外径相匹配的密封圈,使之具有密封好、不易漏水、夹取样品方便、倒置不受影响等特点。

(3)流体供给装置可用一个供水箱代替,底部开口并装有旋钮开关,以控制出水量大小。供水箱应当具有较大的容积,不因排出水而导致水箱内液面的明显降低,进而影响倒置“U”型压差计内的界面变化。换句话说,每次实验时,供水箱内的液面应尽量保持一固定高度,使得压差计内界面的变化只与进口压和出口压有关。另外供水箱容量大,还可起到稳流作用,保证排出水为层流状态。

(4)流量计量系统可用一个微流量计或 10mL 精密量筒(要求刻度精确到 0.1mL)和秒表来实现。作者在测量过程中是用量筒和秒表计量大时间内通过样品的总流量  $Q_g$ ,进而计算单位时间内通过样品的流体体积

$$Q = Q_g / t \quad (3)$$

对于上述规格的取样容器,样品的长度  $L$  可用取样器长度代替,样品的截面积  $A$  可用取样器截面积代替,于是将式(2)、(3)代入(1),对于小直径样品取样器:

$$K = \frac{Q_{\mu} L}{A \cdot \Delta p} = \frac{1 \times 6.5}{(1 - 0.877) \times 980 \times 3.14 \times 1.25^2 \times 10^{-6}} \cdot \frac{Q_g}{t \Delta h} = 1.10 \times 10^4 \frac{Q_g}{t \Delta h} \quad (4)$$

对于大直径样品取样器:

$$K = \frac{Q_{\mu} L}{A \cdot \Delta p} = \frac{1 \times 22}{(1 - 0.877) \times 980 \times 3.14 \times 4.5^2 \times 10^{-6}} \cdot \frac{Q_g}{t \Delta h} = 2.87 \times 10^3 \frac{Q_g}{t \Delta h} \quad (5)$$

因此,测量过程中,只要读取  $Q_g$ 、 $t$ 、 $\Delta h$  即可求出  $K$  值。

### 3 操作方法及注意事项

(1)测定前,在预先挖好的探槽内取样。探槽应将四壁修饰光滑,使各种层理清晰显现出来,取样时应注意下列两点。a. 取样器取样端对准欲取样部位,小心谨慎一次施力使取样器取满样品,若再次用力,容易对原始沉积结构造成影响;b. 取样时禁止将取样器旋转进入地层,否则对渗透率有较大影响。作者曾做过实验,旋转取样时,渗透率比实际值增大或减小 60% 以上。

(2)检查夹持器顶、底锥形封盖内,滤网是否有破损,密封圈是否起密封作用,达不到要求及时更换。

(3)把盛满样品的取样器小心谨慎地放进夹持器中并拧紧螺钉,严防夹持器两端漏水,否则  $Q_g$  的计量是不准确的。特别应注意的是样品应盛满取样器,因为在(4)、(5)式中,样品截面积  $A$  和长度  $L$  就是用取样器的截面积和长度替代的。

(4)实验开始后,打开各个开关,由于夹持器两端出口压与进口压不同,油水界面将会

上、下移动,随着实验的进行(一般需4~7min),它们会稳定在某一位置,此时应准确读取并记录两管中油水界面的高差 $\Delta h$ ,它们代表的压差就是样品两端的压差。

(5)实验过程中,夹持器应平放在桌面上,以免由于取样器本身的高度所产生的压差在压力指示板上显示出来,造成测量误差。

(6)通过实验发现,供水箱中水面高度以高于夹持器位置5~10cm为宜。若水面高度低于夹持器位置,不可能有水渗流通过样品;若水面太高,则压力较大,此时供水箱中的水不通过样品而直接由玻璃管进入量筒,使实验无法进行。另行,压力高、流速急,容易破坏样品原始结构,在夹持器两端滤网上形成阻隔层,从而使渗透率的测定值低于实际值。

(7)打开各开关后,水并不能迅速从样品通过进入量筒,所以不应立即计时,要等水流稳定地进入量筒后才能计时和计算流量,这个滞后的时间差在某些渗透率较小的样品中可达60~200s,若不注意,渗透率测定值将大大低于实际值。为了减小操作误差,可对同一样品测量三次,每次测量约8~12min,当计量误差小于10%时,可取三次测量之平均值作为该样品的实际渗透充。

通过以上方法和步骤,基本可以保证测定过程是在不破坏原始结构的状态下进行。

本文介绍的渗透率测定是基于以下的假设:原始样品中孔隙已被水充满,颗粒由孔隙水支撑,实验过程只需排替孔隙水,而不需要补充孔隙水。根据样品湿润的实际情况,这种假设是合理的。

## 4 测定结果及误差范围

用上述渗透率测定方法,结合大庆油田曲流河三角洲沉积模拟实验,对现代曲流河疏松砂体渗透率进行了研究。由于水槽中实验砂体的厚度有限,所以此项研究选择长江的一个分支河道,该河流长约8km,宽300~500m,属季节性河流,洪、枯水期水位变化明显,各种底形丰富多彩,沙波、沙纹、沙垄、沙浪常见,沉积构造典型,有大型槽状交错层、板状交错层、平行层理、沙纹层理、波状层理及透镜状层理等。对不同剖面位置、不同韵律段、不同层理构造、不同粒度、不同泥质含量的层系共取小直径渗透率样品314个,大直径样品78个,部分测定成果见表1。

从表1可以看出:a.现代沉积砂体渗透率很高,一般都在 $1\mu\text{m}^2$ 以上,而且变化幅度也较大,用前述的测定方法可以明显将其区分开,说明该方法具有较高的分辨性;b.影响渗透率的因素很多,表1中列出了5条,任意改变一个因素,测定的渗透率都将发生明显变化,说明测定方法具有较高的灵敏度;c.对同一块样品重复测定三次,算出的渗透率的变幅比较小,说明该方法具有较可靠的稳定性;d.渗透率的误差范围与其大小有密切关系,当 $K \leq 5\mu\text{m}^2$ 时,误差在10%~20%范围内;当 $5\mu\text{m}^2 < K \leq 10\mu\text{m}^2$ 时,误差为5%~10%;当 $K > 10\mu\text{m}^2$ 时,误差小于5%。说明此方法具有较高的准确性;e.从表1还可以看出一般大直径样品比小直径样品测得的渗透率精度高,误差小,而且由于样品大,因而更具有代表性。

通过以上分析,作者认为,微压差渗透率仪对于测定现代砂体的渗透率是可行的,测定结果是可靠的,可以用于疏松砂体储层特征的研究。

衷心感谢江汉石油学院开发系周克厚讲师在工作中给予的大力支持和热情帮助!

表1 部分样品渗透率测定

序号	剖面位置	韵律	构造	粒度 中值	泥质 含量 (%)	渗透率 ( $\mu\text{m}^2$ )				最大 误差 (%)
						$K_1$	$K_2$	$K_3$	平均值	
1	上游河道	1	板状交错层理	0.37	3.0	27.21	28.33	28.12	27.89	2.4
2		3	板状交错层理	0.31	2.7	28.40	27.60	28.11	28.00	1.4
3		3	槽状交错层理	0.33	5.1	25.20	25.10	25.60	25.30	1.2
4	中游曲流边滩	2	槽状交错层理	0.30	4.3	19.60	22.10	20.02	20.57	7.4
5		1	槽状交错层理	0.24	6.3	14.10	14.70	13.90	14.20	3.5
6		2	板状交错层理	0.21	5.7	12.80	14.10	14.30	13.73	6.8
7		3	板状交错层理	0.32	7.1	10.10	12.00	11.90	11.33	10.9
8		2	槽状交错层理	0.29	6.8	13.20	12.70	12.70	12.87	2.6
9		1	槽状交错层理	0.24	1.2	23.34	21.60	21.41	22.12	5.5
10		3	平行层理	0.33	2.6	27.20	26.71	28.11	27.33	2.9
11		1	平行层理	0.28	2.2	26.70	25.40	25.10	25.73	3.9
12		2	平行层理	0.23	6.6	14.51	13.71	15.10	14.43	5.0
13		3	波状层理	0.19	2.1	9.30	8.71	10.21	9.41	8.5
14	下游曲流边滩	2	槽状交错层理	0.21	13.0	6.43	7.60	7.12	7.05	8.8
15		2	槽状交错层理	0.23	15.2	7.46	8.70	8.20	8.12	8.1
16		3	板状交错层理	0.18	17.2	4.25	3.62	4.40	4.09	11.5
17		1	板状交错层理	0.21	14.7	1.90	1.90	5.77	5.56	13.4
18		3	波状层理	0.13	12.4	2.31	3.24	3.11	2.89	20.1
19		3	波状层理	0.17	11.3	3.30	2.90	2.60	2.93	12.6

(收稿日期:1993年7月5日)

参 考 文 献

1 W. J. E. Van de Graaff and P. J. Ealey. Geological Modeling for Simulation Studies. AAPG, 1989, 73(11): 1436~1444

AN APPROACH TO PERMEABILITY MEASUREMENT  
ON LOOSE SANDBODIES

Zhang Chunsheng    Lai Zhiyun    Cai Qiaoying    Tan Guohua

(Jiangnan Petroleum Institute)

Abstract

This paper presents a method available for measuring permeability of modern sedimentary loose sandbodies with advantages of its direct measurement on field samples. The permeability of reservoir sandbodies obtained by this way could be fairly correlated with that measured on oilfield sandstone samples as the influence of diagenesis on reservoir is considered. Since the method can be carried out on simply equipped device with easy operation and reliable results, it is one of available techniques for the study of modern reservoir sandbodies.