

运用生产测井直接估算渗透率的方法

徐海春（中海石油（中国）有限公司海南分公司，海南 海口 570311）

摘要：寻求一种渗透率估算方法，且计算结果能准确反映储层非均质性，是石油行业最具挑战性的任务之一。目前，测量储层渗透率方法和工具其测量范围从几立方厘米到 100 立方米不等，包括核磁共振（立方厘米），岩芯实验（立方厘米），电缆预测试（几立方厘米），电缆测试（立方分米）和试井（数十到数百立方米）。由于测量尺度的局限性，这些技术很少能获得对未来生产有影响的储层非均质性所有特征。本文提出基于在水平井试井作业期间获得的生产测井数据估算渗透率剖面的方法。该方法是在油藏条件下对渗透率进行估算，估算环境与油藏生产阶段相似，计算结果可直接应用于油气藏数值模拟。本文有两个目的：①与其他渗透率估算方法进行定量对比；②讨论代表性的渗透率计算方法，及其适用条件。

关键词：生产测井；估算渗透率；储层非均质性；油气藏数值模拟

0 简介

对于油气藏数值模拟，渗透率是最重要的参数之一。因此，寻找一种测量渗透率的技术是石油工业领域的焦点。目前，有许多储层岩石渗透率估算方法，主要分为两类，一类是通过多孔介质流动直接获得，如岩芯实验、电缆预测试，电缆测试和试井；另一类是通过储层的其他物理性质间接获得。由于以上方法测量尺度的局限性，这些技术很少能获得对未来生产有影响的储层非均质性所有特征。本文提出的估算渗透率方法是基于在水平井试井作业期间获得的生产测井数据，该方法估算条件与储层生产阶段极为相似，因此其结果可直接应用于油气藏数值模拟。本文有两个目的：①与其他渗透率估算方法进行定量对比；②讨论代表性的渗透率计算方法，及其适用条件。

1 工具及原理

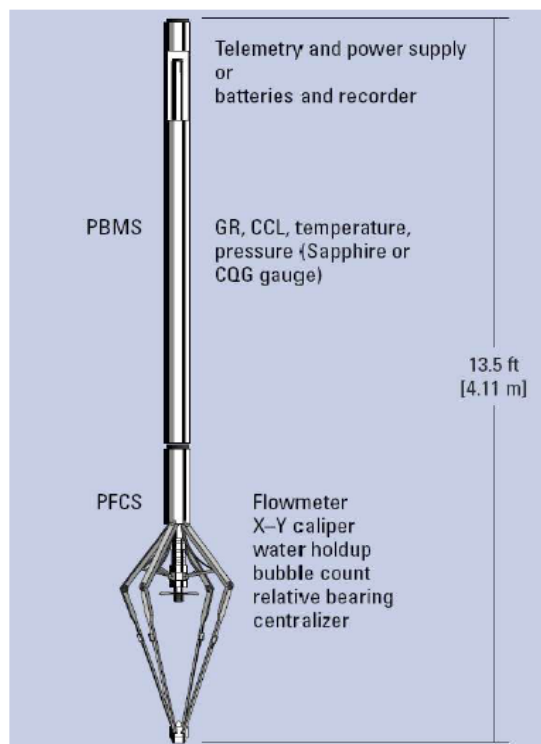


图 1 斯伦贝谢公司流量计（本文分析方法数据来源）

生产测井通常是在试井期间进行的，包括流体识别和流入深度测量。典型的生产测井工具组合如图 1 所示，流量计位于工具的下端。本文提出的渗透率剖面计算方法，结合了旋转器速度导数、试井分析和裸眼测井曲线。

旋转速度导数的测井曲线（这里称为井眼速度梯度）显示了与储层渗透率的相互关系。在不失一般性的前提下，假设在生产测井作业期间，流体在有效储层中的流动是稳态流，如公式 1 所示。

$$p_e - p_{wf} = \frac{QB\mu}{2\pi k_m h} \left\{ \ln \left(\frac{r_e}{r_w} \right) + S \right\} \quad (1)$$

其中：

K_m —有效储层段平均渗透率（通过电缆测试估算）；

h —有效厚度；

Q —总流量；

B —地层体积系数；

μ —储层流体粘度；

p_e —储层压力；

p_{wf} —井底流动压力；

r_e —储层外边界；

r_w —井筒半径；

S —表皮系数。

假设其中一个子储层段其厚度为 h_j ，渗透率为 k_j ，流量为 q_j ，则公式（1）变为：

$$p_e - p_{wf} = \frac{q_j B \mu}{2\pi k_j h_j} \left\{ \ln \left(\frac{r_e}{r_w} \right) + S \right\} \quad (2)$$

忽略井筒中的摩擦损失，则由公式（1）、（2）可获得：

$$k_j = \frac{k_m h q_j}{Q h_j} \quad (3)$$

若公式（3）应用于一组离散的生产子储层段，则公式（3）可表示为：

$$k(z) = \frac{k_m h}{Q} \tilde{q}(z) \quad (4)$$

其中：

$K(z)$ —深度 z 的渗透率；

$\tilde{q}(z)$ – 深度 z 处, 单位厚度流量。

由于 K_m , h 和 Q 是已知量, 如果从生产测井获得流速和深度剖面后, 则可由公式 (4) 计算出渗透率与深度的剖面。

某深度处的流量 $Q(z)$ 和流量计转子读数关系, 如公式 (5) 所示:

$$Q(z) = C_1 r(z) + C_2 \quad (5)$$

其中, C_1 和 C_2 为转子校准常数, 它是井眼直径, 井眼流体流态 (层流或湍流) 等因素的函数。 $Q(z)$ 代表深度 z 以下所有子区间的累积贡献:

$$Q(z) = \int_{z=0}^{z=h} \tilde{q}(z) dz \quad (6)$$

在公式 (6) 中, $z=0$ 和 $z=h$ 分别代表储层顶部和底部深度。将公式 (6) 代入公式 (5), 并取关于深度 z 的导数, 可得:

$$\tilde{q}(z) = C_1 \frac{dr(z)}{dz} \quad (7)$$

其中, $dr(z)/dz$ 为转子在深度 z 处得速度导数。

图 2 展示了在实际案例中获得的转子转速曲线, 原始 (绿色) 和过滤后 (红色) 数据显示在左侧。通常, 在计算速度梯度之前, 有必要对转速数据进行过滤, 因为井眼流体流动引起的噪声大于层间流量变化引起的噪声。图 2 的右侧展示了井眼速度梯度曲线, 该测井曲线与有效储层渗透率有直接关系, 如公式 (8) 所示。

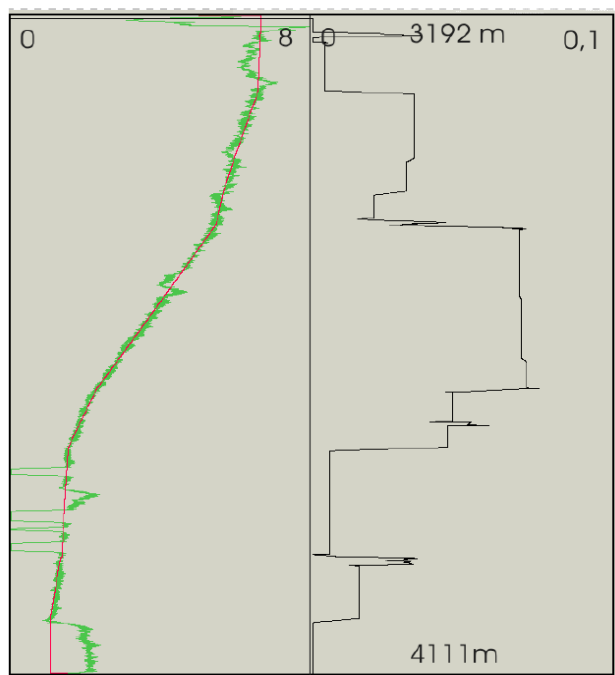


图 2 转子转速曲线 (绿色代表原始数据, 红色代表过滤后数据) 和井筒流速梯度图
将公式 (7) 带入公式 (4), 可得:

$$k(z) = \frac{k_m h}{Q} C_1 \frac{dr(z)}{dz} \quad (8)$$

应用公式 (8) 时, 需要注意渗透率 K_m 和总流量 Q 是从试井作业获得的, 有效厚度是从生产测井中获得。因此, 运用井筒速度梯度曲线, 可以计算出渗透率与深

度关系曲线。

将公式 (8) 写成更通用的形式, 如公式 (9) 所示。因此它不仅可以用于试井数据, 还可以将生产测井曲线与岩心数据, 核磁共振或其他孔隙度测井曲线相关联。

$$k(z) = A * G(z) + B \quad (9)$$

其中, $G(z)$ 是深度 z 处的流量计速度导数; A 和 B 是通过相关性分析获得的常数。

2 案例分析 1

此案例为一个稠油油藏, 且具有高渗透率和孔隙度值, 目的是为了推导出整个油藏面积内的渗透率值。目前, 已钻有 3 口水平井, 其中 2 口已获得试井和生产测井数据, 且发现没有做生产测井数据的这口井其生产指数高于其他两口井。

为了研究这些差异背后的原因, 运用生产测井数据, 利用方程 9 推导渗透率。将其推导结果与电阻率曲线、声波、密度、中子孔隙度和伽马曲线绘制在一个图中, 可发现渗透率与密度和中子测井有更好地相关性。

而密度与中子测井曲线的线性组合与储层岩石孔隙空间的构造有关。从物理上讲, 该相关性可通过该线性组合具有识别粘土矿物的能力来解释, 粘土矿物通常减小或堵塞孔喉, 从而降低岩石的渗透率。

由数据点组成的云状图表明数据的高度分散, 这主要是由于工具分辨率的差异。流量测井曲线对由密度测井和中子测井获得的孔隙度的微小变化不敏感。然而, 可以观察到这两个变量之间的明显相关性。

通过公式 9 计算出的渗透率值与试井分析结果具有一致性, 如表 1 所示。

表 1

Well	K DST (mD)	K log (mD)	Error (%)
1	784	870	-11
2	719	600	17
3	1354	1316	3

同时, 还将公式 9 计算出的渗透率与取芯井岩芯测量结果进行对比, 如图 6 所示。通常情况下, 通过岩芯分析获得的渗透率值低于通过测井曲线获得的渗透率, 原因在于岩芯测试过程围岩过高所致。岩芯测量结果范围为 50~1000mD, 而公式估算结果为 500~1000mD, 且公式估算结果与试井分析结果更匹配。

3 结论

①使用生产测井数据进行渗透率估算应在石油工业中广泛推广; ②通过该方法获得的渗透率相较于通过常规测井曲线推导出的结果更为可靠; ③估算结果应用于数值模拟时, 可获得更好的历史拟合和产能预测结果。

作者简介:

徐海春 (1984-), 女, 汉族, 山东人, 大学本科, 工程师, 研究方向: 油气藏开发研究、油田生产管理、科技管理。