

油藏岩芯多相饱和度微波测定仪

吴 群 邓绍范

(哈尔滨工业大学无线电工程系, 哈尔滨)

摘要 油藏岩芯的含油、含气、含水饱和度数据是开发油田进行分析与计算的重要资料。由于岩芯中的水对微波能量传输产生极大的衰减效应,而岩芯中的其他成分(砂岩、油、气体等)对微波信号衰减较小,根据这一原理,本文论述了微波衰减法测定岩芯多相饱和度仪器的工作原理。该仪器利用微波衰减测试系统首先确定岩芯中油、气、水混合状态下的水的含量,然后利用岩芯的其他参数完成含油、含气、含水多相饱和度的测定与显示。该仪器体积小,结构简单,适用于圆柱状砂岩岩芯多相饱和度的快速测定。测量误差小于 $\pm 3.0\%$ 。

关键词 微波测量;油藏岩芯;饱和度

1. 微波测试原理

当微波在含有油、气、水的岩芯中传播时,传播常数为

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \sqrt{\epsilon_t^*} \quad (1)$$

式中, ϵ_t^* 为含有油、气、水的岩芯的复合介电常数,它是由砂岩、气体、油和水多元介质构成的混合物,由下式近似表示为

$$V_t \sqrt{\epsilon_t^*} = V_s \sqrt{\epsilon_s^*} + V_g \sqrt{\epsilon_g^*} + V_o \sqrt{\epsilon_o^*} + V_w \sqrt{\epsilon_w^*} \quad (2)$$

式中, V_t 为岩芯的总体积; V_s 、 V_g 、 V_o 和 V_w 分别代表岩芯中的砂岩(不计砂岩中的孔隙)、气体、油和水各自所占据的体积; ϵ_s^* 、 ϵ_g^* 、 ϵ_o^* 和 ϵ_w^* 分别代表砂岩、气体、油和水的复介电常数。由油藏物理基础可知, $\phi = V_p/V_t$ 定义为岩芯的孔隙度。而

$$V_p = V_t - V_s$$

为岩芯中的孔隙所占据的体积(油、气、水的混合体就在这 V_p 之中)。于是得到

$$\epsilon_t^* = [(1 - \phi) \sqrt{\epsilon_s^*} + (1 - S_o - S_w) \phi \sqrt{\epsilon_a^*} + S_o \phi \sqrt{\epsilon_o^*} + S_w \phi \sqrt{\epsilon_w^*}]^2 \quad (3)$$

式中, $S_o = V_o/V_p$, $S_w = V_w/V_p$ 和 $S_a = V_a/V_p$ 分别定义为含油、含水和含气饱和度。而 $S_o + S_w + S_a = 1$ (各相饱和度如用百分数表示时,此处应为 100)。对于水的复介电常数可表示为

$$\epsilon_w^* = \epsilon'_w - j\epsilon''_w \quad (4)$$

式中, ϵ'_w 为水的介电常数, ϵ''_w 为水的损耗因子。利用 $\epsilon''_w/\epsilon'_w = \tan\delta$ 的关系,对(4)式取平方根后可表示成

$$\sqrt{\epsilon_w^*} = \sqrt{\epsilon'_w/[1 - \tan^2(\delta/2)]} - j\tan(\delta/2) \sqrt{\epsilon'_w/[1 - \tan^2(\delta/2)]} \quad (5)$$

对于纯净的砂岩、油和气体, ε_s^* 、 ε_o^* 和 ε_g^* 的虚部数值远小于各自的实部, 为简化分析, 可分别用实数 ε_s 、 ε_o 和 1 来代替。于是, 将 (5) 式代入 (3) 式后再代入 (1) 式, 先分离出实部和虚部, 令其等式两端对应的实、虚部相等, 再同乘以传播路径距离 T , 则分别得到

$$\alpha_T = \alpha \cdot T = TS_w \phi \omega \sqrt{\varepsilon_o \mu_o} \sqrt{\varepsilon'_w / [1 - \tan^2(\delta/2)]} \tan(\delta/2) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \beta_T = \beta \cdot T = T\omega \sqrt{\varepsilon_o \mu_o} \{ & (1 - \phi) \sqrt{\varepsilon_s} + (1 - S_o - S_w) \phi \\ & + S_o \phi \sqrt{\varepsilon_o} + S_w \phi \sqrt{\varepsilon'_w / [1 - \tan^2(\delta/2)]} \} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, α_T 和 β_T 分别表示电磁波在含有油、气、水的岩芯中传播, 传播路径距离为 T 时所产生的衰减和相移。比较 (6)、(7) 两式可知, 衰减量 α_T 仅是水的函数, 而相移量包含砂、气、油、和水各自产生的相移的线性相加。只要 ω 、 ϕ 和 T 确定, 用衰减法测含水量最为简便。经过对检波器输出与岩芯含水量关系进行定标, 便可求得含水饱和度为

$$S_w = V_w / V = G_w / (\gamma_w V_p) \quad (8)$$

和含油饱和度为

$$S_o = V_o / V = G_o / (\gamma_o \cdot V_p) = (G_t - G_d - G_w) / (\gamma_o V_p) \quad (9)$$

含气饱和度可由平衡方程式求得:

$$S_g = 1 - S_o - S_w \quad (10)$$

其中 G_t 为含有油、气、水时岩芯的总重量; G_w 和 G_o 分别为岩芯中的水和油各自所占的重量(气体所占重量可忽略); G_d 为干岩芯的重量; γ_w 和 γ_o 分别为测定条件下水和油的比重。 G_t 、 G_d 、 γ_w 、 γ_o 和 V_p 都是已知数。要测定油、气、水多相饱和度, 首先要测定 G_w 。

2. 测试系统

(1) 微波系统 微波系统全部采用 3cm 波段微波元器件。微波源输出功率大于 80mW。传感元件由一对角锥形喇叭天线构成, 天线口径面积为 9.2cm²。微波沿圆柱岩芯径向入射。校准元件用介质材料制作, 与岩芯测试基座一起做成滑轨式连动机构, 使得岩芯放入仪器之前必先经过校准微波功率电平这一步骤, 同时配合调整可变衰减器, 使入射到岩芯上的微波功率很方便地调整在预定的恒定值上。晶体检波器将岩芯含水量变换成直流信号输出, 经 A/D 变换电路送入信号处理单元。

(2) 信号处理单元 信号处理单元以 TP 801A 单板微机为核心组成。键盘已改为十进制输入, 并与 6 位 LED 显示器一起安放在仪器正面板上, 构成了人机对话管理。有关的参数可随时由键盘输入。晶体检波器的非线性由软件予以修正。由于各个岩芯的物理参数不尽相同, 对每个岩芯都单独进行定标。利用最小二乘法多项式曲线拟合将定标的曲线以多项式公式形式编程, 并按岩芯编号分别固化于 EPROM 2716 之中。软件除采用一些标准运算符程序外, 还设置了数据采集与处理、输入参数校验、微波入射功率电平校准, 输出结果十进制(百分数)显示等程序。整个测试系统方框图如图 1 所示

3. 结论

经实际使用表明, 本方法测定含水饱和度具有极好的测量重现性, 测量含水饱和度上限可达 80%。由于测试环境温度的变化、A/D 变换器的量化误差、数据处理中的曲线

拟合与运算等影响,使得仪器的测量精度(折合成饱和度的百分数)不大于 $\pm 3\%$ 。用于测定圆柱状岩芯的多相饱和度,该仪器可替代国外采用的X射线、核磁共振等方法,已被

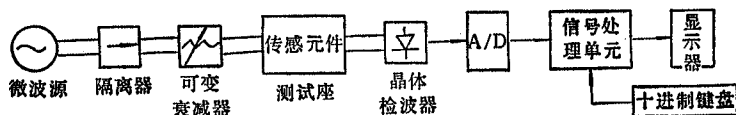


图 1 测试系统方框图

用于大庆勘探开发研究院的油、气、水三相相对渗透率研究专题中。

参 考 文 献

- [1] J. R. Birchak, et al., *Proc. IEEE*, **62** (1974)1, 93—98.
- [2] S. K. Aggarwal, et al., Measurement of Water in Sandstone Cores, 1983 Int. Geoscience and Remote Sensing Symp. U. S. A. pp. 1.1—1.5.
- [3] 周显民,大庆石油地质与开发, 1988年,第2期,第29—36页.
- [4] 洪世铎,油藏物理基础,石油工业出版社,1985年.
- [5] 吴群等,微波衰减法测定岩芯含水饱和度的研究,第四届全国微波应用学术会议论文集,四川成都,1989年5月,第46—50页.

A MICROWAVE INSTRUMENT FOR MEASURING MULTI-PHASE SATURATIONS IN RESERVOIR CORES

Wu Qun Deng Shaofan

(Harbin Institute of Technology, Harbin)

Abstract The three-phase saturations of oil, gas and water system in cores are important data for analyses and calculations of oil-field. According to the principle that microwave energy through a core is strongly absorbed by water content, while oil, gas and sandstone are relatively transparent, the microwave instrument for determining multi-phase saturations in cores with oil, gas and water is introduced. The attenuated signals proportional to water content are promptly processed, calculated and displayed by a signal processing unit. Results of measurements are displayed in digits in terms of percentage. The instrument is featured by its small size, simple structure and low cost. It has been used for measuring multi-phase saturations of cylindrical cores with oil, gas and water. The measuring error is within $\pm 3.0\%$.

Key words Microwave measurement; Reservoir cores; Saturations