

# 测井解释原理与方法

石油化学工业出版社

# 测井解释原理与方法

石油化学工业部石油勘探开发规划研究院勘探室编

石油化学工业出版社

## 内 容 提 要

本书主要叙述砂-泥岩剖面油、气、水层的测井解释原理与方法。内容包括测井与地层参数，油、气、水层的划分，确定岩性以及油层产能评价等。着重介绍了测井解释模型应用于数字测井解释的重叠、交会法等新技术。本书由文华川同志参加编写。并经胜利油田、大港油田及华东石油学院等有关同志审阅。

本书可供油矿测井工人、技术人员、解释人员、地质人员、科研设计人员以及有关院校师生参考。

## 测井解释原理与方法

石油化学工业部石油勘探开发规划研究院勘探室编

石油化学工业出版社 出版

(北京和平里七区十六号楼)

石油化学工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

开本 $787 \times 1092^{1/32}$  印张 $5\frac{3}{4}$

字数127千字 印数1—6,000

1977年7月第1版 1977年7月第1次印刷

书号15063·油82 定价0.41元

限国内发行

# 目 录

第一章 测井与地层参数 .....	1
第一节 纯砂岩储集层 .....	1
第二节 泥质砂岩储集层 .....	17
第三节 粉砂岩储集层 .....	37
第四节 含砾石的砂岩储集层 .....	43
第五节 钙质砂岩储集层 .....	45
第六节 非储集层——泥岩 .....	50
第二章 油、气、水层测井解释方法 .....	58
第七节 对比法 .....	58
第八节 饱和度法 .....	66
第九节 综合法 .....	73
第十节 重叠法 .....	75
第十一节 交会法 .....	111
第三章 岩性的识别 .....	132
第十二节 岩石成分的定性划分方法 .....	132
第十三节 泥质含量的估计 .....	135
第四章 油层产能的定性评价 .....	143
第十四节 油层动态特性估计 .....	143
第十五节 评价油层产能的基本考虑 .....	152
符号说明 .....	154
附录 I 岩石胶结指数与曲折度、比面的关系 .....	166
附录 II 岩石饱和度指数与曲折度、比面的关系 .....	167
附录 III 扩散离子壳层的导电性 .....	168

附录 IV	中子伽玛测井读数转换为孔隙度刻度的 简便方法.....	171
附录 V	$\frac{R_{0.45}}{R_{1L}} = \varphi \left( \frac{R_{XO}}{R_t}, d_i \right)$ 的关系.....	174
附录 VI	泥质含量重量百分数转换为体积百分数和孔隙 泥质含量.....	178

## 第一章 测井与地层参数

目前，采用的各种测井方法都是基于岩石的声、核、电、磁、化、热、光和力学原理建立起来的。这些测井方法，在井内通过间接和直接记录（或取样）获得井下地层评价的资料，在油、气田勘探与开发中，对研究油、气、水层和确定岩石孔隙度、渗透率和饱和度等参数是极为有用的。

在测井与地层参数之间，可以根据测井方法各自的物理原理，建立起其间的响应方程式，成为测井解释的基础。本书中，我们从岩石的体积模型出发，建立测井与地层参数之间的基本关系式。虽然由体积模型所导出的基本关系式是宏观近似值，但在实践中还是令人满意的。

### 第一节 纯砂岩储集层

在砂-泥岩沉积中，纯砂岩是提供油、气储量和产能的主要储集层。

#### 纯砂岩水层

含水纯砂岩的体积模型如图1-1所示。图1-1a是岩石结构示意图，图1-1b是等效的体积模型。从图1-1b中可以看出，含水纯砂岩的几何关系如下：

岩石的长度

$$L = L_{m_a} + L_{\phi_c} \quad (1-1)$$

岩石的体积

$$LA = L_{m_a}A + L_{\phi_c}A \quad (1-2)$$

$$\text{或} \quad V = V_{ma} + V_{\phi c} \quad (1-3)$$

式中  $L, L_{ma}, L_{\phi c}$  和  $V, V_{ma}, V_{\phi c}$  分别表示岩石、骨架、孔隙空间的长度和体积。

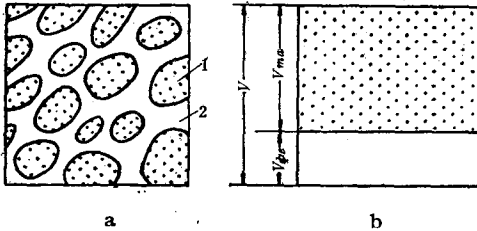


图 1-1 纯砂岩水层

a—岩石结构；b—等效体积；  
1—骨架（或颗粒）；2—孔隙空间

按孔隙度定义

$$\phi_c = \frac{V_{\phi c}}{V} \quad (1-4)$$

根据图1-1b中的体积模型，可以建立起各种测井方法与岩石孔隙度之间的基本关系式。

### 1. 声波测井

声波测井是一种普遍使用的孔隙度测井方法，它记录从发射器发出后沿井壁地层滑行（全反射），由相隔一定距离的两个接收器接收的、反映纵波经过1米地层所需的时间 $\Delta t$ 随井深变化的曲线。由曲线读出的声波间隔传播时间 $\Delta t$ ，就是声速 $v$ 的倒数。 $\Delta t$ 取决于地层的岩性和孔隙度。当地层岩性已知时，可以直接由 $\Delta t$ 确定孔隙度。在有些情况下，还可以用声波测井与其它孔隙度测井方法组合，来确定地层岩性和孔隙度。

以 $T, T_{ma}, T_f, \Delta t, \Delta t_{ma}, \Delta t_f, v, v_{ma}, v_f$ 及 $L, L_{ma}, L_{\phi c}$ 分别

表示声波在岩石、骨架、孔隙流体中行走的时间、声波间隔传播时间、速度及长度（距离）。按图1-1b所示，声波在岩石中行走的时间

$$T = T_{ma} + T_f \quad (1-5)$$

根据物理学一般原理，(1-5)式可以写成

$$\frac{L}{v} = \frac{L_{ma}}{v_{ma}} + \frac{L_{\phi c}}{v_f} = \frac{L - L_{\phi c}}{v_{ma}} + \frac{L_{\phi c}}{v_f} \quad (1-6)$$

在(1-6)式两端同乘以岩石截面积A，再除以岩石体积V，得

$$\begin{aligned} \frac{1}{v} &= \left( \frac{V - V_{\phi c}}{V} \right) \frac{1}{v_{ma}} + \frac{V_{\phi c}}{V} \frac{1}{v_f} \\ &= (1 - \phi_c) \frac{1}{v_{ma}} + \phi_c \frac{1}{v_f} \end{aligned} \quad (1-7)$$

$$\text{即} \quad \Delta t = (1 - \phi_c) \Delta t_{ma} + \phi_c \Delta t_f \quad (1-8)$$

$$\phi_c = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} = \phi_s \quad (1-9)$$

(1-9)式是用声波测井确定岩石孔隙度的基本方程式。

但是，在非固结的含水纯砂岩中，(1-9)式可根据经验的压实校正修改为：

$$\phi_c = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \cdot \frac{1}{C_p} = \frac{\phi_s}{C_p}$$

式中  $C_p$ ——压实校正系数。

由(1-9)式计算的 $\phi_s$ 与其它方法求得的真孔隙度对比，可总结出各地区 $C_p$ 与地层深度间的关系。

## 2. 中子测井

中子测井是一种通过地层含氢量来反映充满液体的孔隙度大小的孔隙度测井方法。它记录由中子源连续发射的高能



快中子与地层物质（主要是与中子质量相同的氢原子核）碰撞后很快减速成的热中子数量，这由中子测井仪器或者记录高能量的俘获伽玛射线，或者记录热中子本身来实现。

因此，中子测井仪的响应主要取决于地层的含氢量，即主要反映纯地层中充满液体的孔隙度。同时，仪器对地层中所有的氢离子，包括与泥质伴生的束缚水和岩石结晶水，都有反映。当与其它孔隙度测井资料组合使用时，可以识别和校正岩性、泥质和轻烃含量、类型的影响。

在裸眼井中采用定向地、紧贴井壁测量的或者双源距补偿的热中子测井仪，可以消除井眼对测量结果的影响。

我们在以下讨论中，暂不研究高矿化度地层水和有些岩石骨架中存在的热中子强吸收体（氯和硼）的影响，只研究被氢核减速且被俘获时处于强烈激发状态的氢核发射出的高能伽玛射线。因此，当中子源周围地层含氢量很高时，大部分中子在距离中子源不远处就被减速并俘获，使探测器能测到的计数率很低。相反，地层含氢量较低时，许多中子可扩散到离中子源较远的地方，从而使有一定源距的探测器所测量的计数率增大。我们以与单位体积内含氢量成正比并以纯水为标准度量的含氢指数来表示不同物质的中子特性，纯水的含氢指数为 1。

以  $H, H_{m_a}, H_f, \overline{\Phi}_N, \overline{\Phi}_{N_{m_a}}, \overline{\Phi}_{N_f}$  及  $V, V_{m_a}, V_{\phi_c}$  分别表示岩石、骨架、孔隙流体的含氢量、含氢指数和体积。从图 1-1b 中可知，岩石的含氢量

$$H = H_{m_a} + H_f \quad (1-10)$$

即

$$\begin{aligned} V\overline{\Phi}_N &= V_{m_a}\overline{\Phi}_{N_{m_a}} + V_{\phi_c}\overline{\Phi}_{N_f} \\ &= (V - V_{\phi_c})\overline{\Phi}_{N_{m_a}} + V_{\phi_c}\overline{\Phi}_{N_f} \end{aligned} \quad (1-11)$$

$$\begin{aligned}\bar{\Phi}_N &= \left( \frac{V - V_{\phi_c}}{V} \right) \bar{\Phi}_{Nm_a} + \frac{V_{\phi_c}}{V} \bar{\Phi}_{Nf} \\ &= (1 - \phi_c) \bar{\Phi}_{Nm_a} + \phi_c \bar{\Phi}_{Nf}\end{aligned}\quad (1-12)$$

$$\phi_c = \frac{\bar{\Phi}_N - \bar{\Phi}_{Nm_a}}{\bar{\Phi}_{Nf} - \bar{\Phi}_{Nm_a}} = \phi_N \quad (1-13)$$

(1-13) 式是用中子测井确定岩石孔隙度的基本方程式。

一般地，当岩石颗粒不含氢时，可近似地认为  $\bar{\Phi}_{Nm_a} = 0$ ，则有

$$\phi_c = \frac{\bar{\Phi}_N}{\bar{\Phi}_{Nf}} = \phi_N \quad (1-14)$$

如果在这种特定岩石的孔隙内充满100%的低矿化水(小于40000毫克/升)，则  $\bar{\Phi}_{Nf} \rightarrow 1$ ，因而

$$\phi_c = \bar{\Phi}_N = \phi_N \quad (1-15)$$

这时，中子测井确定的孔隙度等于岩石的含氢指数。

在讨论中，没有涉及由氯和硼等热中子强吸收体所引起的干扰影响，但在实际矿化水条件下总是存在这种影响的。只有在使用超热中子测量的中子测井仪时，才会把这种干扰影响减到最小程度。测量超热中子的计数管是只测量0.4电子伏特以上中子的加屏蔽正比计数管。

### 3. 密度测井

密度测井是一种有效的孔隙度测井方法。因为泥质的密度常常与砂岩骨架的密度接近，所以在泥质砂岩中可以认为密度测井所测的是有效孔隙度，这就大大提高了密度测井在解释中的作用。

现代的密度测井仪器是由加屏蔽的、紧贴井壁的伽玛源和两个有一定距离的短源距探测器及长源距探测器所组成。由伽玛源发射出来的中等能量的伽玛射线（高速粒子）与地

层中的电子碰撞时，把损失的一部分能量传递给电子，产生康普顿散射。仪器所记录的是到达探测器的散射伽玛射线强度，因而密度测井仪读数决定于与地层电子密度直接相关的地层真实体积密度 $\rho_b$ （单位用克/厘米<sup>3</sup>表示）。

以 $G, G_{ma}, G_f, \rho_b, \rho_{ma}, \rho_f$ 及 $V, V_{ma}, V_{\phi c}$ 分别表示岩石、骨架、孔隙流体的重量、密度及体积。从图1-1b中可知，岩石的重量为

$$G = G_{ma} + G_f \quad (1-16)$$

即

$$\begin{aligned} V\rho_b &= V_m\rho_{ma} + V_{\phi c}\rho_f \\ &= (V - V_{\phi c})\rho_{ma} + V_{\phi c}\rho_f \end{aligned} \quad (1-17)$$

$$\begin{aligned} \rho_b &= \left( \frac{V - V_{\phi c}}{V} \right) \rho_{ma} + \frac{V_{\phi c}}{V} \rho_f \\ &= (1 - \phi_c)\rho_{ma} + \phi_c\rho_f \end{aligned} \quad (1-18)$$

$$\phi_c = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} = \phi_D \quad (1-19)$$

(1-19)式是用密度测井确定岩石孔隙度的基本方程式。

#### 4. 中子寿命测井

中子寿命测井或热中子衰减时间测井的读数主要取决于地层中存在的最强的中子吸收体——氯的含量，所以，一般说它是在套管井中划分油、气、水层的有效方法。但在高矿化度水的条件下，由于热中子俘获截面主要由矿化水提供，所以它可以作为反映高矿化水的含水孔隙度的量度；而在淡水条件下，由于油和水的俘获截面相近，所以它可以作为液体孔隙度的量度。

中子寿命测井由井下脉冲中子发生器断续地发射高能中子脉冲，然后在不同的两至三个时间间隔里，由离源不远的

伽玛射线探测器或中子探测器，探测其周围介质中热中子密度的相对变化。在整个测量期间，热中子的密度按指数规律减小，因而，我们可以利用在不同时间间隔里（几条测井曲线所记录的）中子密度的减小变化，求得不同地层各自固有的寿命值 $\tau$ ，从而求得不同地层的宏观的中子俘获截面 $\Sigma$ 。因为测井所测得的宏观俘获截面等于单位体积中各种成分的俘获截面与所占体积乘积之总和，所以我们很容易利用俘获截面来进行测井解释。

以 $\Sigma, \Sigma_{ma}, \Sigma_f$ 及 $V, V_{ma}, V_{\phi c}$ 分别表示岩石、骨架、孔隙流体的中子俘获截面及体积。可以认为，岩石的总俘获截面等于组成岩石的各部分相对体积与其俘获截面乘积之和。从图1-1b,有

$$V\Sigma = V_{ma}\Sigma_{ma} + V_{\phi c}\Sigma_f \tag{1-20}$$

或

$$\begin{aligned} \Sigma &= \frac{V_{ma}}{V} \Sigma_{ma} + \frac{V_{\phi c}}{V} \Sigma_f \\ &= (1 - \phi_c) \Sigma_{ma} + \phi_c \Sigma_f \end{aligned} \tag{1-21}$$

$$\phi_c = \frac{\Sigma - \Sigma_{ma}}{\Sigma_f - \Sigma_{ma}} = \phi_\Sigma \tag{1-22}$$

(1-22) 式是用中子寿命测井确定岩石孔隙度的基本关系式。

### 5. 电阻率（或电导率）测井

由于岩石孔隙结构存在着弯曲程度，因此，应将电流流经岩石的模型等效地画成如图1-2形状。图1-2a是电流通过的岩石等效结构，图1-2b是等效电阻。以 $R', R'_{ma}, R'_w, R_o, R_{ma}, R_w, L, L_{ma}, L_w, A, A_{ma}, A_w$ 及 $V, V_{ma}, V_w$ 分别表示岩石、骨架、孔隙水的电阻、电阻率、电流通过的长度、截面积及体积。按照欧姆定律和并联电路基本原理，可以写出岩石的

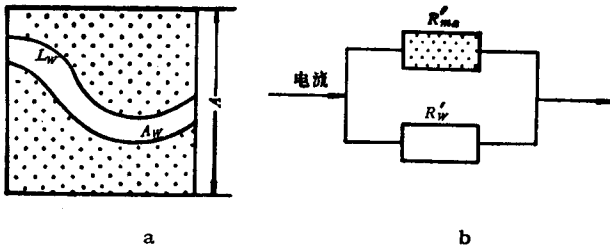


图 1-2 电流通过纯砂岩的模型  
a—岩石等效结构；b—等效电阻

电导

$$\frac{1}{R_o'} = \frac{1}{R_{ma}'} + \frac{1}{R_w'} \quad (1-23)$$

或

$$\frac{1}{R_o} \frac{L}{A} = \frac{1}{R_{ma}} \frac{L_{ma}}{A_{ma}} + \frac{1}{R_w} \frac{L_w}{A_w} \quad (1-24)$$

即

$$\begin{aligned} \frac{LA}{R_o L^2} &= \frac{L_{ma} A_{ma}}{R_{ma} L_{ma}^2} + \frac{L_w A_w}{R_w L_w^2} \\ \frac{V}{R_o L^2} &= \frac{V_{ma}}{R_{ma} L_{ma}^2} + \frac{V_w}{R_w L_w^2} \\ &= \frac{V - V_{\phi c}}{R_{ma} L_{ma}^2} + \frac{V_{\phi c}}{R_w L_w^2} \end{aligned} \quad (1-25)$$

两端分别乘以  $\frac{L^2}{V}$ ，变成

$$\frac{1}{R_o} = \left( \frac{V - V_{\phi c}}{V} \right) \frac{1}{\left( \frac{L_{ma}}{L} \right)^2 R_{ma}} + \frac{V_{\phi c}}{V} \frac{1}{\left( \frac{L_w}{L} \right)^2 R_w}$$

$$\begin{aligned}
 &= (1 - \phi_c) \frac{1}{t_{ma}^2 R_{ms}} + \phi_c \frac{1}{t^2 R_w} \\
 &= \frac{1}{R_w} \left( \frac{1 - \phi_c}{t_{ma}^2} \cdot \frac{R_w}{R_{ms}} + \frac{\phi_c}{t^2} \right) \quad (1-26)
 \end{aligned}$$

$$\text{即} \quad \frac{R_o}{R_w} = \frac{1}{\frac{\phi_c}{t^2} + \frac{1 - \phi_c}{t_{ma}^2} \frac{R_w}{R_{ms}}} \quad (1-27)$$

式中  $t = \frac{L_w}{L}$  定义为孔隙导电通道的曲折度，岩石骨架的

曲折度  $t_{ma} = \frac{L_{ma}}{L} \approx 1$ ，因此，(1-27) 式又可写成

$$\frac{R_o}{R_w} = \frac{1}{\frac{\phi_c}{t^2} + (1 - \phi_c) \frac{R_w}{R_{ms}}} \quad (1-28)$$

当  $\frac{R_w}{R_{ms}} \rightarrow 0$  时，(1-28) 式变为

$$\frac{R_o}{R_w} = \frac{t^2}{\phi_c} \quad (1-29)$$

$$\text{或} \quad \phi_c = \phi_R = \frac{t^2}{\frac{R_o}{R_w}} \quad (1-30)$$

地层因素为

$$F = \frac{R_o}{R_w} = \frac{a}{\phi_c^m} = \frac{t^2}{\phi_c} \quad (1-31)$$

还可写成电导率比值的形式

$$\frac{\sigma_w}{\sigma_o} = \frac{t^2}{\phi_c} = \frac{a}{\phi_c^m} \quad (1-32)$$

(1-31) 式及 (1-32) 式是用电阻率 (或电导率) 测井确定岩石孔隙度的基本方程式。

从 (1-31) 式可见, 地层因素 (又称相对电阻率)  $F$  是孔隙度和孔隙通道的曲折度的函数, 而且, 它与孔隙导电通道曲折度的关系更为密切。这一点, 在电阻率测井理论中, 是值得注意的一个新概念, 它把孔隙导电通道的影响归结为孔道弯曲程度的作用。同时可以指出, 岩石的胶结指数  $m$  是孔隙通道曲折度  $t$  和比面的函数 (参看附录 I)。

### 纯砂岩油、气层

含油、气纯砂岩的体积模型如图 1-3 所示。我们着重研究岩石孔隙中含油、气、水的情形。

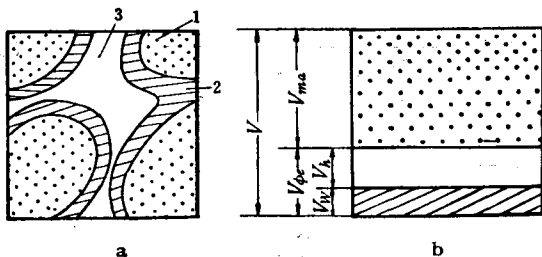


图 1-3 纯砂岩油、气层

a—岩石结构; b—等效体积;

1—骨架或颗粒; 2—油、气; 3—水

若在岩石孔隙体积内只饱含油和水, 则有

$$V_{\phi c} = V_o + V_w \quad (1-33)$$

式中  $V_o$ ——孔隙中油的体积。

按饱和度定义

$$1 = \frac{V_o}{V_{\phi c}} + \frac{V_w}{V_{\phi c}} = S_o + S_w \quad (1-34)$$

$$\text{即} \quad S_o = 1 - S_w \quad (1-35)$$

若在岩石孔隙内只饱含气和水，则有

$$V_{\phi c} = V_g + V_w \quad (1-36)$$

式中  $V_g$ ——孔隙中气的体积。

同样有

$$S_g = 1 - S_w \quad (1-37)$$

若在岩石孔隙体积内饱含着油、气和水，则有

$$V_{\phi c} = V_o + V_g + V_w \quad (1-38)$$

$$1 = S_o + S_g + S_w \quad (1-39)$$

令  $S_h = S_o + S_g$ ，代入 (1-39) 式为

$$S_h = 1 - S_w \quad (1-40)$$

当岩石孔隙内饱含的原始流体或气体受到钻井泥浆滤液冲洗或侵入时，原始饱和度发生了变化，这时泥浆滤液冲洗带部分相应表达式为

$$V_{\phi c} = V_{hr} + V_{x_o} \quad (1-41)$$

$$1 = \frac{V_{hr}}{V_{\phi c}} + \frac{V_{x_o}}{V_{\phi c}} = S_{hr} + S_{x_o} \quad (1-42)$$

$$\text{即} \quad S_{hr} = 1 - S_{x_o} \quad (1-43)$$

式中  $S_{hr}$  及  $S_{x_o}$  分别是冲洗带的残余油气饱和度及冲洗带含水饱和度。

根据图1-3b和 (1-33)~(1-43) 式，我们可以建立起各种测井与岩石孔隙内含流体饱和度的关系。对于非电法测井来说，特别应当研究孔隙空间含轻质油和天然气所引起的效应，这对于区分油层和气层将提供有益的依据。

### 1. 声波测井

以  $\Delta t_f$ 、 $\Delta t_h$ 、 $\Delta t_w$ 、 $\Delta t_{hr}$  及  $\Delta t_{mf}$  分别表示孔隙流体（油、气、水之总和）、油气、水、残余油气及泥浆滤液的声波间隔



传播时间。

在地层未受侵入影响部分

$$\Delta t_r = S_h \Delta t_h + (1 - S_h) \Delta t_w \quad (1-44)$$

在冲洗带部分

$$\Delta t_r = S_{hr} \Delta t_{hr} + (1 - S_{hr}) \Delta t_{mf} \quad (1-45)$$

将 (1-44) 式代入 (1-8) 式, 得到

$$\Delta t = (1 - \phi_c) \Delta t_{ma} + \phi_c [S_h \Delta t_h + (1 - S_h) \Delta t_w] \quad (1-46)$$

解出地层部分孔隙度

$$\phi_c = \frac{\phi_s}{1 + S_h \frac{\Delta t_h - \Delta t_w}{\Delta t_w - \Delta t_{ma}}} \quad (1-47)$$

或 
$$\phi_s = \phi_c + \phi_c S_h (\phi_{s,h} - 1) \quad (1-48)$$

式中 
$$\phi_{s,h} = \frac{\Delta t_h - \Delta t_{ma}}{\Delta t_w - \Delta t_{ma}}$$

将 (1-45) 式代入 (1-8) 式, 得到

$$\Delta t = (1 - \phi_c) \Delta t_{ma} + \phi_c [S_{hr} \Delta t_{hr} + (1 - S_{hr}) \Delta t_{mf}] \quad (1-49)$$

解出地层冲洗带部分孔隙度

$$\phi_c = \frac{\phi_s}{1 + S_{hr} \frac{\Delta t_{hr} - \Delta t_{mf}}{\Delta t_{mf} - \Delta t_{ma}}} \quad (1-50)$$

或 
$$\phi_s = \phi_c + \phi_c S_{hr} (\phi_{s,hr} - 1) \quad (1-51)$$

式中 
$$\phi_{s,hr} = \frac{\Delta t_{hr} - \Delta t_{ma}}{\Delta t_{mf} - \Delta t_{ma}} > 1$$

(1-47) 式及 (1-50) 式指出含轻质油及天然气对声波测井确定孔隙度的影响, 它与含烃饱和度及轻烃的声波间隔传播时间有关。从 (1-48) 式及 (1-51) 式中可以看出, 在仪器探测范围内, 轻质油和天然气的存在使声波测井确定的