

复杂储集层分析 若干基本数学研究

杰·依尔顿·费罗什蒂 著

石油工业出版社

P631.6

16410

复杂储集层分析 若干基本数学研究

杰·依尔顿·弗罗什蒂著

谭廷栋译 王曰才校



SY66/22



石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了复杂储集层确定泥质含量、孔隙度、饱和度、渗透率、含水率的各种方法和数学公式汇编。书中不仅对计算各种参数汇集了大量的公式,而且对使用条件、参数选择与解释技术作了分析说明,并且还列举了一些实例。本书可供从事测井解释与数字处理的技术人员以及大专院校有关师生参考。

Elton Frost, Jr.
Some Basic Mathematical Considerations In
Complex Reservoir Analysis
Dresser Atlas, Dresser Industries, Inc.
Printed In USA REP. 1982

*

复杂储集层分析

若干基本数学研究

杰·依尔顿·弗罗什蒂著
谭廷栋译 王日才校

*

石油工业出版社出版
(北京安定门外外馆东后街甲36号)
煤炭出版社印刷厂排版
北京顺义燕华营印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16 开本2³/₄印张 60千字印1—3,810
1984年7月北京第1版 1984年7月北京第1次印刷
书号: 15037·2496 定价: 0.31 元

目 录

一、前言	1
二、泥质含量的确定	1
伽玛射线	1
能谱测井总计数	1
能谱测井钾	3
能谱测井钍	4
自然电位	4
电阻率	4
中子	4
中子寿命测井	5
密度-中子交会图	5
中子-声波交会图	5
密度-声波交会图	5
轻烃术语表	5
三、孔隙度的确定	7
中子	8
方程式	8
密度	10
声波	12
双孔隙度解释	13
密度-中子交会图	14
中子-声波交会图	15
密度-声波交会图	15
三孔隙度解释	19
M与N交会图	19
四、含水饱和度的确定	24
五、渗透率的确定	25
六、含水率的确定	27
七、计算机应用	28

一、前 言

前几年，写了许多关于电缆测井信息用于发现和评价复杂岩性油气层的文章^[1、2、5、12、13、14等]。混合岩性地层的测井分析过去没有而且今后大概也不会有一套固定的、在所有情况下都适用的解释指南。然而，在各地区采用复杂岩性特殊解释方法，获得很大成功。通常所谓的“复杂储集层分析”，是指各地区使用的这些特殊技术。

孔隙度、泥质含量、含水饱和度、渗透率和含水率的确定，对合理评价复杂储集层的生产能力都是重要的参数。以后的讨论，将简要地叙述确定这些参数所使用的若干解释技术。

二、泥质含量的确定

为了根据电缆测井信息（声波、密度和中子）精确计算孔隙度，必需确定泥质含量。如果没有考虑到地层泥质的存在，那么用中子或声波计算的孔隙度会偏大。除泥岩密度大于纯骨架密度外，用密度计算的孔隙度也会偏大。如果泥岩密度大于纯骨架密度，那么用密度计算的孔隙度会偏小。

不管怎样几乎每一种电缆测井仪都受地层泥质存在的影响。这种“泥质影响”提供一种确定地层泥质含量的方法。表 I 是通常采用的确定泥质含量公式的汇编。下面简要讨论泥质对表 I 中提到的每一种指示器的影响。

伽 玛 射 线

伽玛射线测井仪是对地层自然放射性的响应。在泥质含量公式推导中，假设地层中具有放射性的成分是泥质。因此，自然放射性增加，意味着泥质含量增加。其它放射性矿物的存在将引起计算的泥质体积太高。这对放射性砂岩和白云岩是特别真实的。

能 谱 测 井 总 计 数

在能谱测井图上的总计数曲线是一种灵敏的伽玛射线测量值，能谱测井总计数用计数单位而不是API（美国石油学会）单位表示。用这条曲线做为泥质指示器受到与以上讨论提到过的伽玛射线测井仪同样的限制。

表 I 确定泥质体积的公式

测井仪器	计算泥质体积的公式	备 注	参考文献
伽马射线	1) $V_{SH} = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}}$ $V_{SH} = \frac{2}{2^{GCUR} - 1} - 1$	线性近似值 V_{SH} 由(1)式求得 $GCUR = 2$, 较老的岩石 $GCUR = 3.7$, 第三系岩石	— 拉里洛夫 (Larionov, 苏联)
	2) $V_{SH} = \frac{2}{2^{GCUR} - 1} - 1$	V_{SH} 由(1)式求得 $X =$ 地区校正值	—
	3) $V_{SH} = X * V_{SH}$	$A, B =$ 地质区域系数	—
	4) $V_{SH} = \frac{GR - A}{B}$	对地层密度 (ρ_B, ρ_{sh}) 作校正, 纯地层的背景读数 (B_0)	斯伦贝尔 (1969)
	5) $V_{SH} = \frac{\rho_B * GR - B_0}{\rho_{sh} * GR_{max} - B_0}$	统计方法, 考虑了泥质粉砂分量 (SI = 粉砂指数, A, B, C = 系数)	波 庞 (Poupon, 1970)
	6) $V_{SH} = \frac{(\rho_B * GR) - A}{B * \frac{SI}{(1 - SI)} + C}$	线性近似值	—
能谱测井 总计数	7) $V_{SH} = \frac{CTS - CTS_{min}}{CTS_{max} - CTS_{min}}$ $V_{SH} = \frac{2}{2^{GCUR} - 1} - 1$	V_{SH} 由(7)式求得 $GCUR = 2$, 较老的岩石 $GCUR = 3.7$, 第三系岩石	根据拉里洛夫资料 (苏联)
	8) $V_{SH} = \frac{2}{2^{GCUR} - 1} - 1$	线性近似值	—
能谱测井 钾	9) $V_{SH} = \frac{K_{40} - K_{40min}}{K_{40max} - K_{40min}}$ $V_{SH} = \frac{2}{2^{GCUR} - 1} - 1$	V_{SH} 由(9)式求得 $GCUR = 2$, 较老的岩石 $GCUR = 3.7$, 第三系岩石	福特(Fertl)等人 (根据拉里洛夫资料)
	10) $V_{SH} = \frac{2}{2^{GCUR} - 1} - 1$	线性近似值	—
能谱测井 钍	11) $V_{SH} = \frac{TH - TH_{min}}{TH_{max} - TH_{min}}$ $V_{SH} = \frac{2}{2^{GCUR} - 1} - 1$	V_{SH} 由(11)式求得 $GCUR = 2$, 较老的岩石 $GCUR = 3.7$, 第三系岩石	福特等人(根据拉里洛夫资料)
	12) $V_{SH} = \frac{2}{2^{GCUR} - 1} - 1$	线性近似值	—
自然电位	13) $V_{SH} = 1.0 - \frac{PSP}{SSP} = 1.0 - \alpha$	X 是粘土矿物类型的函数	道尔 (Doll, 1950)
	14) $V_{SH} = 1.0 - X * \frac{PSP}{SSP} = 1.0 - X * \alpha$	需要知道 α, R_t, R_{SH} 与 R_{xo}	戴斯勃朗德 (Desbrandes, 1969)
	15) $1.0 - \frac{PSP}{SSP} = \frac{\log(R_t/R_{xo})}{\log\left(\frac{R_t/R_{xo} - V_{SH} * R_t/R_{SH}}{1.0 - V_{SH} * R_t/R_{SH}}\right)}$	根据实验室资料和理论研究 W_{SH} = 每单位泥质体积含水量, K_1 = 系数	波 庞 (1954)
	16) $1.0 - \frac{PSP}{SSP} = \frac{K_1 * V_{SH} * W_{SH}}{K_1 * V_{SH} * W_{SH} + \varphi S_{xo}}$	V_{SH} 在产油层太低 V_{SH} 在产油层太高	波 庞 (1970)
电阻率	17) $V_{SH} = \left(\frac{R_{SH}}{R_{1.0}}\right)^{1/b}$ 式中 $b = 1.0 - 2.0$		格 玛 蒂 (Gaymad, 1970)

测井仪器	计算泥质体积的公式	备 注	参考文献
中 子	18) $V_{SH} = \left(\frac{R_{SH} * (R_{lim} - R_t)}{R_t * (R_{lim} - R_{SH})} \right)^{1/5}$	(17)式的改进 R_{lim} = 纯产油层中最大电阻率	格 玛 蒂 (1970)
	19) $\frac{1}{R_t} = \frac{V_{wtr}}{\Phi} * \frac{V_{SH}}{R_{SH}} + \frac{(V_{wtr})^2}{0.8 * R_w}$	在产油层中, $V_{wtr} = f$ (纯地层 + 泥质)	波 虎 (1970)
	20) $V_{SH} = \frac{\Phi_N}{\Phi_{N_{SH}}}$	适用于低孔隙度, 假设 $\Phi_{N_{clean}} = 0\%$ 假设中子孔隙度已作了骨架校正, 在多孔地层中高	格 玛 蒂 (1970)
	21) $V_{SH} = \frac{\Phi_N - \Phi_{N_{min}}}{\Phi_{N_{max}} - \Phi_{N_{min}}}$	允许 $\Phi_{N_{min}}$ 不等于0%, 有时候在气层中低, 在多孔地层中高	
中子寿命测井	22) $V_{SH} = \frac{\sum \log \rho - \sum \log \rho_{min}}{\sum \log \rho_{max} - \sum \log \rho_{min}}$	对着低孔隙度地层或气层计算的泥质体积太低, 而对着高孔隙度层段计算的泥质体积太高	
声波	23) $V_{SH} = \frac{\Phi_{Acoustic}}{(\Phi_{Acoustic})_{SH}}$	在多孔地层中高	
密度-中子交会图	24) $V_{SH} = A/B$ $A = \rho_b * (\Phi_{N_{ma}} - 1.0) - \Phi_N * (\rho_{ma} - \rho_f) - \rho_f * \Phi_{N_{ma}} + \rho_{ma}$ $B = (\rho_{sb} - \rho_f) * (\Phi_{N_{ma}} - 1.0) - (\Phi_{N_{sb}} - 1.0) * (\rho_{sb} - \rho_f)$	1. V_{SH} 可能偏小或偏大, 取决于假设的纯骨架 2. 在气层中可能太低 3. 在气层可以使用更优良的密度-中子X-交会图	
中子-声波交会图	25) $V_{SH} = A/B$ $A = \Phi_N * (\Delta t - \Delta t_f) - \Delta t * (\Phi_{N_{ma}} - 1.0) - \Delta t_{ma} + \Phi_{N_{ma}} * \Delta t_f$ $B = (\Delta t_{ma} - \Delta t_f) * (\Phi_{N_{ma}} - 1.0) - (\Phi_{N_{sb}} - 1.0) * (\Delta t_{sb} - \Delta t_f)$	1. V_{SH} 可能偏小或偏大, 取决于假设的纯骨架 2. 有效性取决于泥质对 中子和声波的相对影响 3. 声波受次生孔隙度的影响 4. 中子受气的影响	
密度-声波交会图	26) $V_{SH} = A/B$ $A = \rho_b * (\Delta t_{ma} - \Delta t_f) - \Delta t * (\rho_{ma} - \rho_f) - \rho_f * \Delta t_{ma} + \rho_{ma} * \Delta t_f$ $B = (\Delta t_{ma} - \Delta t_f) * (\rho_{sb} - \rho_f) - (\rho_{ma} - \rho_f) * (\Delta t_{sb} - \Delta t_f)$	1. V_{SH} 可能偏小或偏大, 取决于假设的纯骨架 2. 对不规则的井眼敏感 3. 声波受次生孔隙度影响	

能 谱 测 井 钾

能谱测井钾含量 (K_{40}) 的计算, 是以地层自然伽玛射线能谱复杂的剥谱法为基础的。除高岭土外 (高岭土缺钾), 钾含量可以直接地与地层泥质含量有关系。其它钾富集矿物存

在会引起计算的泥质含量太高。除钾沉积物富集长石的花岗岩冲积物及富集云母的地层外，纯地层对钾含量的贡献通常很小。 K_{40} 最大的好处具有不能探测地层中铀盐沉积物的能力。在这种情况下，钾曲线能够提供对这些地层泥质含量的很好估计。对于正常的碳酸盐岩和砂岩储集层，钾曲线 (K_{40}) 大概是最好的泥质指示器。

能谱测井钍

分析自然伽玛射线能谱还能确定钍 (Th) 含量。钍含量也与地层中的泥质含量有关系。其它含钍矿物的存在会引起计算的泥质含量太高。与伽玛射线或钾曲线不同，钍曲线已成功地用于确定花岗岩冲积物中的泥质含量。实现这一点是由于冲积物中钍含量相当稳定，任何偏离这个数值都可以解释为泥质含量的增加。

自然电位

自然电位 (SP) 测量^[9]，是记录固定地面电位电极与井内向上移动电极之间电位差随深度的变化。事实上，自然电位曲线通过泥岩是一条直线 (泥岩基线)，对着比较纯的渗透性地层通常出现偏离这条直线，自然电位可以用作泥质指示器。然而，几种因素^[18] (如自然电位噪音、地层水与泥浆滤液电阻率 (R_w/R_{mf}) 比值、油气含量都会使自然电位计算的泥质含量复杂化。特别是，使用高矿化度钻井泥浆妨碍了自然电位的产生，因而也妨碍了有效的确定泥质含量。

电阻率

电阻率测井装置用为泥质指示器，取决于泥岩与纯产油层电阻率响应的对比。根据孔隙度、岩性和水的矿化度，通常见到的三种电阻率对比如下：

$$RT_{clean} \leq RT_{sh} \leq RT_{pay}$$

$$S_w = 100\%$$

$$RT_{sh} \leq RT_{pay} \leq RT_{clean}$$

$$Low \phi$$

$$RT_{sh} \leq RT_{clean} \leq RT_{pay}$$

$$S_w = 100\%$$

这就意味着，根据电阻率测井装置计算的泥质体积可能是太高、太低或介于两者之间。

中子

地层的中子测井响应主要是地层氢含量的函数。因为泥质含有不同数量的水 (H_2O)，泥岩层段的中子孔隙度是泥质含量和充满流体有效孔隙度的函数。中子响应可以写成：

$$\varphi_{Nlog} = \varphi_e + (V_{ma} * \varphi_{Nma}) + (V_{sh} * \varphi_{Nsh})$$

当存在混合岩性时，由于岩石类型与中子刻度假设的岩性不同，计算的泥质含量可能偏

大或偏小。在低孔隙度地层中计算的泥质体积是精确的，而在高孔隙度地层中计算的泥质体积太高。

中子寿命测井

中子寿命对泥质的响应类似于中子测井对泥质的响应。高泥质含量相当于测井图上西格玛 (Σ) 值增加。在气层，中子寿命测井 (NLL) 计算的泥质体积太低，在孔隙度增大的地层中，中子寿命测井计算的泥质体积太高。

密度-中子交会图

密度-中子交会图依赖于泥岩密度和中子响应来计算估计的泥质体积。在气层，计算的泥质体积太低。选择纯骨架-流体线可以确定对与假设的纯矿物线不同的矿物所计算的泥质体积是偏高还是偏低。在使用这种泥质评价技术以前，中子和密度值必须是可靠的（必须考虑井眼不规则的影响）。

中子-声波交会图

中子-声波技术与以上叙述的密度-中子交会图类似，其中纯骨架-流体线和泥岩-流体线必须选择使得泥质含量在两条线之间可以刻度。在低含水饱和度气层中，这种交会图特别地有用。然而因为泥质对中子和密度值有大的影响，应小心使用这种交会图。

密度-声波交会图

密度-声波交会图具有以下好处：岩性线最接近，而且变化的岩性只会稍稍改变计算的泥质体积。密度-声波交会图对“强”放射性地层是很有用的。与以上交会图一样，不规则的井眼能大大地影响这种交会图技术的精度。对于未压实、未固结的地层，应小心使用这种技术。

轻烃术语表

轻烃最常用实际天然气的比重来描述。按定义

$$\gamma_g = \frac{\rho_{\text{gas STP}}}{\rho_{\text{air STP}}}$$

式中： γ_g = 天然气的比重；

$\rho_{\text{gas STP}}$ = 在标准温度、压力下天然气的密度；

$\rho_{\text{air STP}}$ = 在标准温度、压力下空气的密度；

STP = 标准温度 15.6°C (60°F) 和标准压力 14.7 磅/英寸²。

在任何特定温度和压力下天然气的实际密度由下式给出

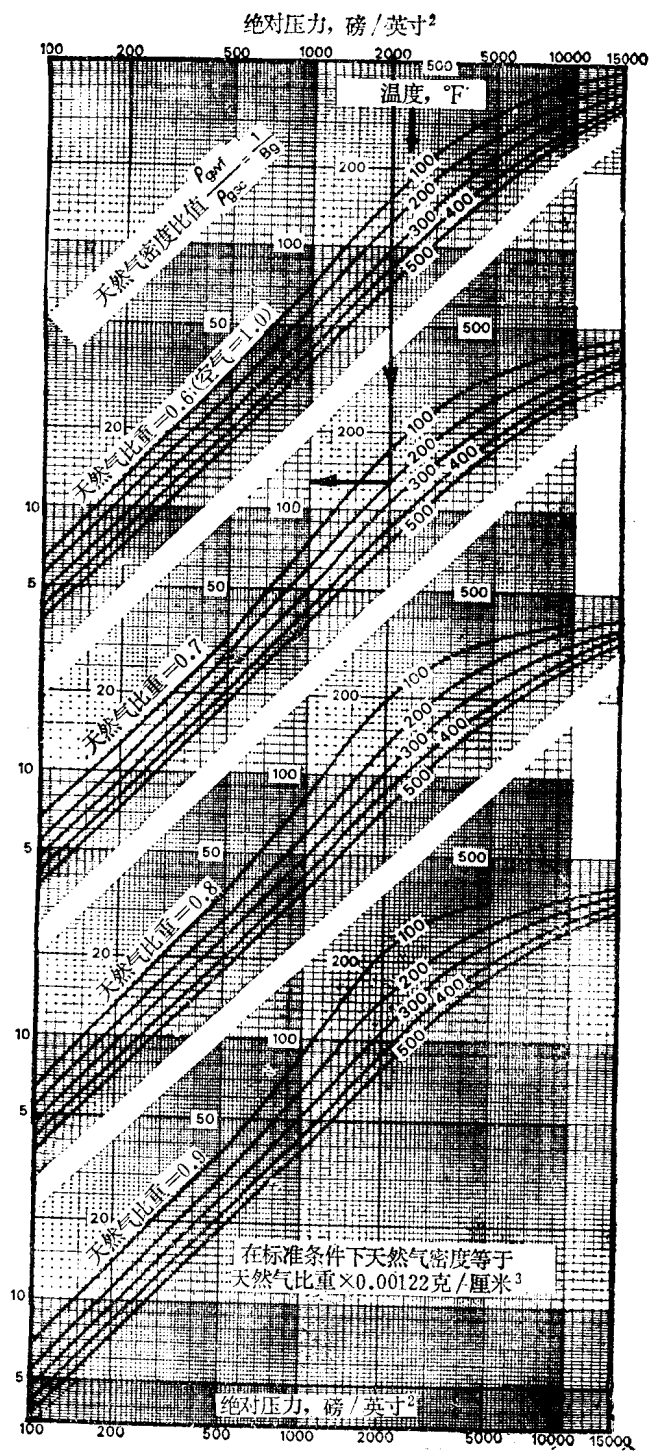


图 1

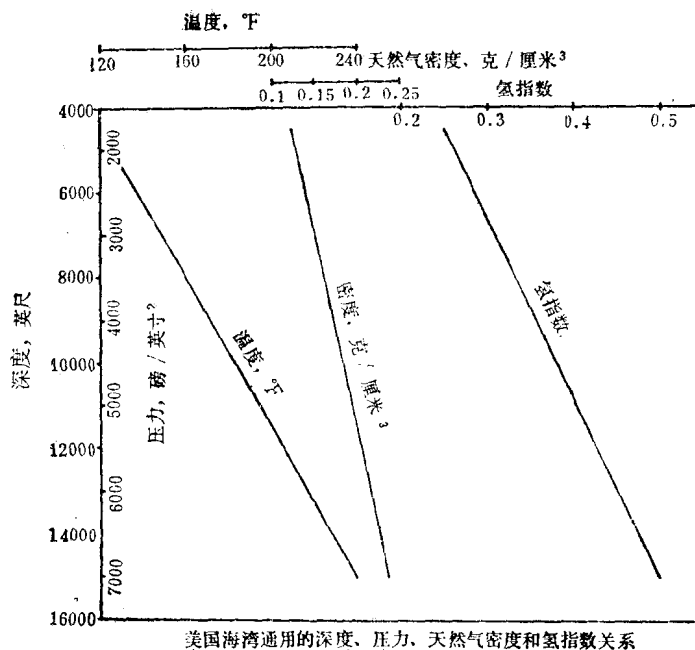


图 2

$$\rho_{gas T_1 P_1} = \frac{\rho_{gas STP}}{B_g}$$

式中: $T_1 P_1$ = 天然气希望的温度 (T_1) 和压力 (P_1);

B_g = 地层体积因素 (无单位)。

在任何特定的温度 (T_1) 和压力 (P_1) 下天然气的密度可以写成组合公式

$$\rho_{gas T_1 P_1} = \frac{\rho_g \cdot \rho_{air STP}}{B_g}$$

根据图 1 中的图版^[4]估计 B_g 。这就意味着, 如果已知天然气密度, 那么用数学方法能够确定在地层条件下天然气的真密度 ($\rho_{gas T_1 P_1}$)。美国海湾地区更通用的方法是根据图 2 中的图版确定天然气密度的估算值 ($\rho_{gas T_1 P_1}$)。

三、孔隙度的确定^①

确定混合岩性地层孔隙度是一个困难的问题。中子、密度和声波信息都能用来寻求精确的地层孔隙度值。每一种孔隙度测井仪 (在使用范围内) 能够提供复杂岩性精确的孔隙度信息。

① 仪器响应和轻烃对中子与密度测井影响的讨论主要依据格玛蒂和波虎的文章“油气层中子和地层密度测井的响应”获得的数据。

中 子

中子测井提供与地层氢含量成正比的测量值^[1]。在纯水层，大量氢在地层水中。因之，中子测井响应与地层孔隙度成正比。对纯水层刻度的中子响应给出：

$$\varphi_N = \varphi$$

$$\varphi = \text{总孔隙度}$$

$$\varphi_N = \text{已刻度的中子孔隙度}$$

它假设，中子测井曲线是对适当的岩性刻度的，如图 3 所示的图版把用石灰岩单位表示的中子测井曲线转换成适当的岩性响应。响应一旦如以上那样刻度，那么在纯油气层中子响应可以写成：

$$\varphi_N = \varphi \left[1 - S_{hr} \left(1 - \frac{\alpha}{\beta} \right) \right]$$

式中： φ = 总孔隙度；

φ_N = 已刻度的中子孔隙度；

S_{hr} = 由中子测井仪所探测的含油气的孔隙度部分；

α = 油气的氢指数；

β = 泥浆滤液的氢指数。

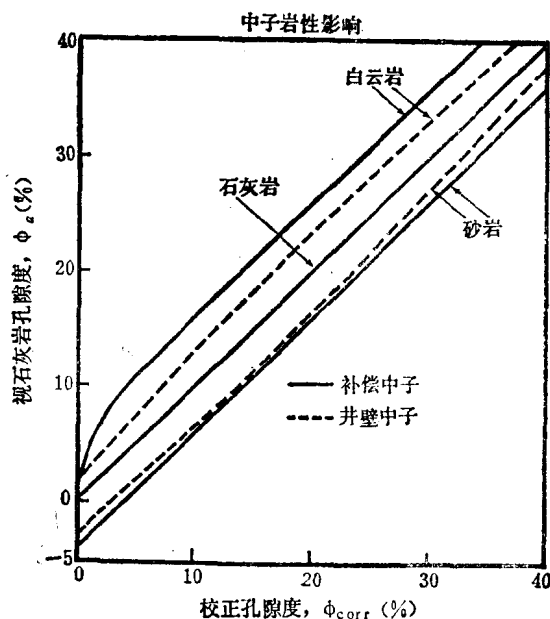


图 3

方 程 式

补偿中子

白云岩 $\varphi_{corr} = 0.0311\varphi_a^2 + 0.102\varphi_a - 0.1331$, 当 $\varphi_a < 10$ 时；

$$\varphi_{\text{corr}} = \varphi_a - 6, \text{ 当 } \varphi_a \geq 10 \text{ 时}$$

$$\text{砂岩 } \varphi_{\text{corr}} = \varphi_a + 4$$

井壁中子

$$\text{白云岩 } \varphi_{\text{corr}} = 0.0034\varphi_a^2 + 0.8278\varphi_a - 1.2494$$

$$\text{砂岩 } \varphi_{\text{corr}} = -0.0014\varphi_a^2 + 1.074\varphi_a + 3.0482$$

地层内油气的含氢量用油气密度（即油气类型以及在地层内的温度和压力状态）来确定。在一给定油气体积内的含氢量从近似与其体积相同的水的含氢量变到接近于零的数值。在油气层这就意味着，视中子孔隙度小于真孔隙度，如

$$\varphi_N \leq \varphi$$

地层内泥质的存在引起计算中子孔隙度太高。泥质的影响是这样的，当有轻烃时，泥质可以完全模糊油气的存在。表 II 提供泥质和轻烃对中子孔隙度影响的概述。

表 II 地层中子响应

纯水层	油 气 影 响	泥质影响	备 注	参考文献
$\varphi_N = \varphi_e$	油： $\Delta\varphi_{hyd} = \varphi_{rh} \frac{\rho_h - 0.7 + 0.4P}{1 - 0.4P}$ 气： $\Delta\varphi_{hyd} = \varphi_{rh} * \frac{2.2\rho_h - 1 + 0.4P}{1 - 0.4P}$	$\Delta\varphi_{SH} = A * V_{SH}$	A: GNT = 0.5 SNP = 0.35 ~ 0.5 P = ppm * 10 ⁻⁶ 作了岩性校正的中子测井	1
	$\Delta\varphi_{HC} = 0.7\varphi_e S_{rh}$	$\Delta\varphi_{SH} = q\varphi_z$	通常用于美国海湾砂岩气层： φ_z = 砂岩骨架总孔隙度，包括被流体和分散粘土占有的空间 φ_e = 有效孔隙度（仅仅被流体充满部分） q = 被分散粘土占有的部分	10, 11, 15
	油： $\Delta\varphi_{HC} = \varphi * S_{rh} (\rho_h - 0.7)$ 气： $\Delta\varphi_{hyd} = \varphi * S_{rh} (2.2\rho_h - 1)$ $\Delta\varphi_{Nhyd} = 9 * \rho_h \left(\frac{8 - 5\rho_h}{32 - 5\rho_h} \right)$		表中第一项的简化	15
	$\Delta\varphi_{Nhyd} = -\varphi * B * S_{rh} - \Delta\varphi_{Nex}$ 油： $B = \frac{\rho_{mf}(1 - P_{mf}) - \rho_h - 0.30}{\rho_{mf}(1 - P)} = 1 - \frac{\rho_h + 0.30}{\rho_{mf}(1 - P)}$ 气： $B = \frac{\rho_{mf}(1 - P_{mf}) - 2.2\rho_h}{\rho_{mf}(1 - P)} = 1 - \frac{2.2\rho_h}{\rho_{mf}(1 - P)}$ 或 $\Delta\varphi_{Nhyd} = -B * E * \varphi * S_{rh}$ $E = 1.3 \text{ 经验选用值代替附加项 } \Delta\varphi_{Nex}$		假设 $HI_{mf} = \rho_{mf}(1 - P)$	1, 12
	总响应 $\varphi_N = \varphi + \Delta\varphi_{HC} + \Delta\varphi_{SH}$			

密 度

标准的密度测量值是由密度探测器系统测量的伽玛放射性计量，它与地层电子密度 (ρ_e) 成正比。电子密度与地层体积密度有关，用公式表示：

$$\rho_e = C\rho_B$$

式中： ρ_B = 真体积密度；

ρ_e = 电子密度；

$$C = \left(2 \sum_{k=1}^n Z_k \right) / \left(\sum_{k=1}^n A_k \right);$$

Z = 原子数；

A = 原子量。

此时，实际测井响应是对纯石灰岩水层刻度的，公式是：

$$\rho_{\log} = 1.07\rho_e - 0.188$$

式中： $\rho_{\log}$ = 石灰岩刻度的密度响应。

对于正常的地层成分

$$\rho_{\log} = \rho_B$$

因为 $C_{\text{矿物}} = 0.9991$ ($C_{\text{石灰岩}}$) (参看表Ⅲ及Ⅳ)^[8,9]。然而，当有轻烃存在时， C 值与石灰岩值有很大差别。这就意味着，油气的密度测井响应从真体积密度值变到比真体积密度更低的数值。为了观察这点，我们研究下列实例：

已知 $\rho_{B_{\text{甲烷}}} = 0.150$ 克/厘米³

$$C_{\text{甲烷}} = 1.2466$$

则 $\rho_{e_{\text{甲烷}}} = 0.150 \times 1.2466 = 0.18699$ 克/厘米³

与 $\rho_{\log_{\text{甲烷}}} = 1.07 \times 0.18699 - 0.188 = 0.0121$ 克/厘米³

表 Ⅲ 普通元素的 $2*Z/A$ 值

元 素	符 号	A	Z	$2*Z/A$
氧	O	16.00	8	1.0000
氮	N	14.007	7	0.9995
碳	C	12.011	6	0.9991
钙	Ca	40.08	20	0.9980
硫	S	32.06	16	0.9981
硅	Si	28.086	14	0.9968
镁	Mg	24.312	12	0.9872
钾	K	39.102	19	0.9718
铝	Al	26.98	13	0.9537
钠	Na	22.99	11	0.9509
氯	Cl	35.45	17	0.9582
铁	Fe	55.85	26	0.9311
钡	Ba	137.34	56	0.8155
氢	H	1.0008	1	1.9841

表 IV 普通储集层成分测井获得的视密度

化 合 物	分 子 式	ρ_B	2Z/A	ρ_o	$\rho_{\text{air Daren}}$
石 英	SiO_2	2.654	0.9985	2.65	2.643
方 解 石	CaCO_3	2.710	0.9991	2.708	2.710
白 云 岩	$\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$	2.870	0.9977	2.863	2.876
无水石膏	CaSO_4	2.960	0.9990	2.957	2.977
淡 水	H_2O	1.000	1.1101	1.110	1.00
盐 水	200000ppm	1.146	1.0797	1.237	1.135
原 油	$n(\text{CH}_2)$	0.850	1.1407	0.970	0.850
甲 烷	CH_4	ρ_{meth}	1.247	$1.247\rho_{\text{meth}}$	$1.335\rho_{\text{meth}} - 0.188$

如果对着油气层测量的密度值太低,则在油气层计算的视孔隙度太高。表 V 概述了油气对测量密度和计算孔隙度影响大小的估计。在表 V 中还考虑了泥质的存在也会引起计算孔隙度的误差。

表 V 地 层 密 度 响 应

纯 水 层	油气对孔隙度和测量体积密度的影响	泥 质 影 响	备 注	参考文献
$\varphi_v = \frac{\rho_{ma} - \rho_h}{\rho_{ma} - \rho_f}$	油: $\Delta\varphi_{HC} = \frac{1.07\varphi S_{rh}(1.11(1 - \rho_h) + 0.65P - 0.03)}{\rho_{ma} - 1 - 0.7P}$ 气: $\Delta\varphi_{HC} = \frac{1.07\varphi S_{rh}(1.11 + 0.65P - 1.24\rho_h)}{\rho_{ma} - 1 - 0.7P}$	$\Delta\varphi_{SH} = V_{SH} * \frac{\rho_{ma} - \rho_{SH}}{\rho_{ma} - \rho_f}$	$P = \text{ppm} * 10^{-6}$ P在淡水泥浆中可以忽略不计	1
	$\Delta\varphi_{HC} = B\varphi_e S_{rh}$ $B = \frac{\rho_{ma} - \rho_{HC}}{\rho_{ma} - 1} - 1$		主要用于美国海湾砂岩 B从0.5到0.6 ρ_{HC} = 在储集层条件下视油气密度	10, 11, 15
	$\Delta\varphi_{HC} = \left(1 + \frac{5}{7} \left(1 - 9\rho_h \left(\frac{4 - \rho_h}{32 - 5\rho_h}\right)\right)\right) \varphi S_{rh}$		砂岩、淡水泥浆滤液, 油气成分为 C_nH_n , 其中 $X = 4 - 2.4\rho_h$	16
	$\Delta\rho_{HC} = -\varphi A S_{hr}$ 油: $A = 1.07(1.11 - 0.15P_{mf})\rho_{mf} - 1.11\rho_h - 0.03$ 气: $A = 1.07 \left((1.11 - 0.15P_{mf}) \rho_{mf} - 1.24\rho_h \right)$		ρ_{mf} = 泥浆滤液矿化度 用 克NaCl/克滤液 表示	12
	油: $\varphi = 0.9\varphi_c$ 气: $\varphi = 0.7\varphi_c$ 其中: $\varphi_c = \frac{\rho_{ma} - \rho_{log}}{\rho_{ma} - 1.0}$		无侵入的气层或油层 纯地层	13

续表

纯 水 层	油气对孔隙度和测量体积密度的影响	泥 质 影 响	备 注	参考文献
	$\varphi = \frac{\rho_{ma} - \rho_{log}}{\rho_{log} - 0.9}$		当地层被油基泥浆或逆乳化泥浆侵入时 $\rho_f = 0.9 \text{ 克/厘米}^3$	13
	$\varphi = \frac{\rho_{ma} - \rho_{log} + \sqrt{\frac{R_w}{R_t}}(1 - \rho_h)}{\rho_{ma} - \rho_h}$		无冲洗油气层 $\rho_h = \text{视油气密度}$ $S_w = \sqrt{\frac{R_w}{\varphi^2 R_t}}$	13
	$\varphi = \frac{\rho_{ma} - \rho_{log} + \sqrt{R_w/R_t}}{\rho_{ma}}$		空气钻井	14
	总响应: $\varphi_D = \varphi_e + \Delta\varphi_{HC} + \Delta\varphi_{SH}$			

声 波

声波测井测量在一固定距离内声波通过地层的传播时间（微秒/英尺）。在未固结地层和溶洞或裂缝地层中，没有很好地建立起传播时间和孔隙度之间的关系^[19]。研究出几种方法根据传播时间确定孔隙度。在纯的压实良好的固结地层中，通常使用怀利（Wyllie）时间平均公式：

$$\Delta t_{log} = \Delta t_f \cdot \varphi + (1 - \varphi) \cdot \Delta t_{ma}$$

根据声波测井仪确定孔隙度的另一种方法使用一般形式的公式：

$$\Delta t_{log} = A + B \cdot \varphi$$

式中，A，B是一特定地层和岩石类型的常数。

怀利公式可以按这种形式重新写成

$$\Delta t_{log} = \Delta t_{ma} + (\Delta t_f - \Delta t_{ma}) \cdot \varphi$$

对于纯的固结砂岩特别适合使用 $B = \Delta t_f - \Delta t_{ma}$ 的怀利公式，在碳酸盐岩甚至在固结差或泥质砂岩地层中，有时候B值的变化很大。

在有溶洞孔隙度的地层中，使用怀利公式根据声波测量计算的孔隙度可能太小。牛更特（Nugent）等人^[29]使用中子-密度求得的孔隙度来计算溶洞或鲕状碳酸盐岩的生产指数。

线性法如怀利公式是非常有用的，还使用了对数法^[60]。当研究非均匀碳酸盐岩（如溶洞石灰岩和白云岩）时，使用对数分布岩石性质的假设，获得某种程度的成功。对于通过连续骨架随机分布的孔隙度情况，公式形式为：

$$\Delta t_{log} = (\Delta t_f)^\varphi (\Delta t_{ma})^{(1-\varphi)}$$

或

$$\varphi = \frac{\log \Delta t_{log} - \log \Delta t_{ma}}{\log \Delta t_f - \log \Delta t_{ma}}$$

能够提供测井信息与孔隙度变化更好的拟合。

泥质存在通常的趋势是增加传播时间, 因此, 计算的视孔隙度增大。当存在泥质时, 可以使用下列关系式计算校正过的孔隙度:

$$\varphi_{AC} = \varphi + \Delta\varphi_{SH}$$

其中

$$\Delta\varphi_{SH} = V_{SH} * \frac{\Delta t_{SH} - \Delta t_{ma}}{\Delta t_t - \Delta t_{ma}}$$

在未固结、未压实的地层中, 由怀利时间平均公式获得的孔隙度也要作压实校正。

没有明确定义的声波测井信息的油气校正^[20、21、22、23]。曾经提出过油气对声波信号影响的各种数学解法, 然而, 一般说来, 轻烃引起通过地层的视传播时间太高, 在固结和未固结未压实地层中可能出现传播时间的增大。

双孔隙度解释

使用双孔隙度测井仪意思是说, 为了求解每种矿物总体积的百分数和孔隙度, 可以假设两种矿物储集层模型, 通常用解下列联立方程实现这一点:

$$\Delta t = \varphi \Delta t_t + V_1 \Delta t_{ma1} + V_2 \Delta t_{ma2} \quad (1)$$

$$\varphi_N = \varphi(\varphi_N)_t + V_1(\varphi_N)_{ma1} + V_2(\varphi_N)_{ma2} \quad (2)$$

$$\rho_b = \varphi \rho_t + V_1 \rho_{ma1} + V_2 \rho_{ma2} \quad (3)$$

$$1.0 = \varphi + V_1 + V_2 \quad (4)$$

式中: φ = 分数孔隙度,

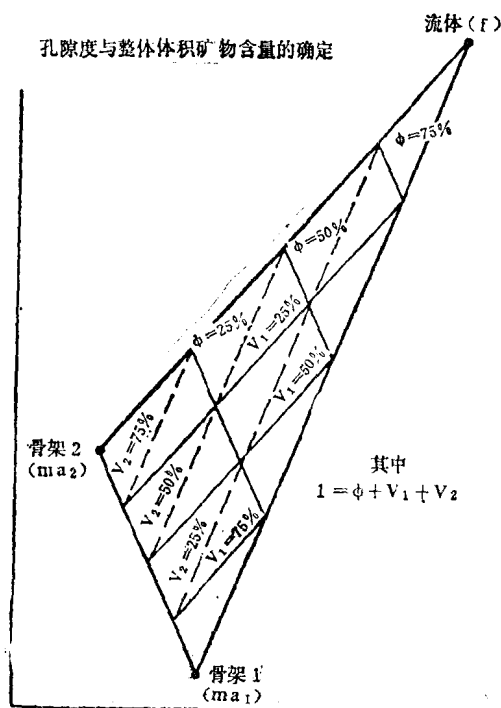


图 4

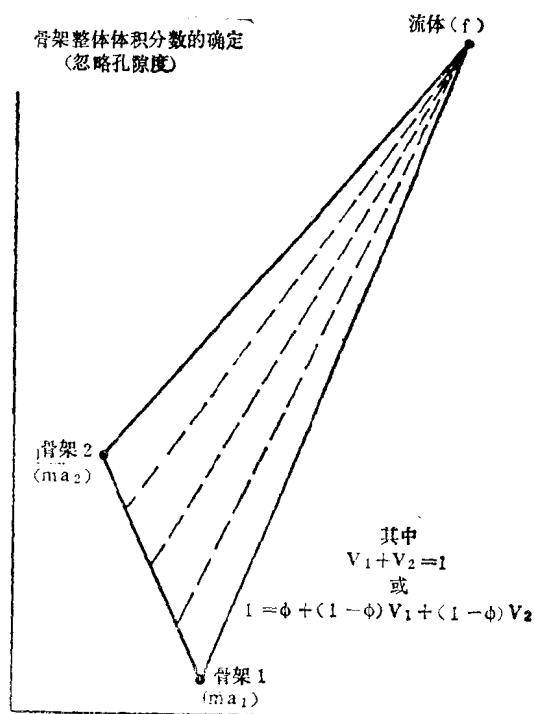


图 5