

ICS 75.020
E 12
备案号: 27483—2010



中华人民共和国石油天然气行业标准

SY/T 6161—2009
代替 SY/T 6161—1995

天然气测井资料处理及解释规范

Specifications for the process and interpretation
of logging data in natural gas reservoir

2009—12—01 发布

2010—05—01 实施

国家能源局 发 布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 测井解释准备工作 1

3.1 收集相关地质资料 1

3.2 测井资料质量检查 1

4 测井资料处理与解释 2

4.1 直观解释 2

4.2 处理 2

4.3 综合解释 2

附录 A（资料性附录） 天然气层典型测井解释模型..... 3

附录 B（资料性附录） 测井解释确定天然气层的方法..... 9

附录 C（资料性附录） 测井解释成果图表..... 15

参考文献..... 18

前 言

本标准代替 SY/T 6161—1995 《天然气层测井解释规程》。

本标准与 SY/T 6161—1995 相比，主要变化如下：

- 增加了引用标准 SY/T 5691 《电缆式地层测试器测井资料解释规范》、SY/T 5945 《测井解释报告编写规范》、SY/T 6488 《电、声成像测井资料处理解释规范》、SY/T 6617 《核磁共振测井资料处理及解释规范》（本版的第 2 章和参考文献），
- 增加了电缆式地层测试、声成像、电成像、阵列声波、核磁共振等特殊测井资料处理的内容（本版的 4.2）；
- 增加了测井资料综合解释的内容（本版的 4.3）；
- 增加了核磁共振、电缆式地层测试、声成像、电成像、阵列声波等特殊测井资料解释成果图表规范（1995 年版的第 5 章；本版附录 C 中的 C.3，C.4，C.5 和 C.6）；
- “解释模型”中增加了“Archie 模型”、“SDR 模型”和“Coates 模型”（本版附录 A 中的 A.5 ~ A.7）；
- “解释方法”中增加了“ $\phi-S_w$ 交会图法”、“ $P^{1/2}$ 概率分析法”、“径向电阻率差异法”、“电阻率—孔隙度交会图法”、“时间推移电阻率测井识别法”、“套前套后中子重叠识别法”、“模糊聚类分析方法”、“标准 T_2 判别法”（本版附录 B 中的 B.14 ~ B.21）。

本标准的附录 A、附录 B、附录 C 为资料性附录。

本标准由石油测井专业标准化委员会提出并归口。

本标准负责起草单位：中国石油集团川庆钻探工程有限公司测井公司。

本标准参与起草单位：中国石油集团测井有限公司、西部钻探工程有限公司测井公司。

本标准主要起草人：齐宝权、郑小川、胡振平、殷增华、胡秀妮、李六有。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为：

- SY/T 6161—1995。

天然气测井资料处理及解释规范

1 范围

本标准规定了天然气层测井解释的准备工作和测井资料处理与解释的要求。
本标准适用于天然气层的测井资料处理解释。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

- SY/T 5132 测井原始资料质量要求
- SY/T 5360 裸眼井单井测井数据处理流程
- SY/T 5691 电缆式地层测试器测井资料解释规范
- SY/T 6488 电、声成像测井资料处理解释规范
- SY/T 6617 核磁共振测井资料处理及解释规范

3 测井解释准备工作

3.1 收集相关地质资料

3.1.1 油气田的地质、地球物理资料包括下列内容：

- a) 本井所处构造位置（X，Y坐标，补心海拔）、构造特点、储层分布、气藏类型、地质分层数据和钻探目的。
- b) 本井所处油气田各含气层系的岩性、物性、含气性及测井响应特征。

3.1.2 反映天然气层情况的单井资料包括下列内容：

- a) 钻井取心资料：通过岩心的现场描述资料了解岩性、颜色、胶结物、胶结程度、孔隙裂缝发育情况、含气级别；通过实验室分析资料了解岩石矿物成分、粒度、胶结物成分和含量、空气渗透率、有效孔隙度、含水饱和度等。
- b) 录井资料：包括岩屑录井（包括岩性、油气显示及荧光显示级别）气测录井、槽面显示、钻井液性质等。
- c) 井壁取心及其描述。
- d) 钻井过程中发生的井喷、井涌、井漏井段，喷、漏性质及喷、漏量，蹩、跳钻及放空部位，工程事故及处理情况。
- e) 目的层浸泡时间及有关钻井工程数据。
- f) 本井中途测试或邻井含气层段及试气试水情况：包括气的产量、相对密度，水的产量、含盐量和水型。

3.2 测井资料质量检查

按 SY/T 5132 的规定对测井原始资料及回放资料进行检查。

4 测井资料处理与解释

4.1 直观解释

解释人员应向用户及时提供初步解释意见，包括储层划分、流体性质判别以及初步测试意见等。

4.2 处理

4.2.1 预处理

对测井曲线要求进行深度、幅度的检查与校正，在斜井中还应进行垂直深度和垂直厚度校正，此外，还应根据仪器类型，使用生产厂家提供的图版或公式，对测井资料进行环境校正。

4.2.2 处理

根据本地区的地质特点建立测井解释模型，选择解释参数和相应的解释软件，计算储层的孔隙度、渗透率和含水饱和度等参数，得出相应的成果图和结果。按 SY/T 5360, SY/T 5691, SY/T 6488 和 SY/T 6617 的规定执行。天然气层典型测井解释模型参见附录 A。

4.3 综合解释

4.3.1 方法

测井解释确定天然气层的方法，参见附录 B。

根据本地区特点研制的行之有效的天然气层解释新方法亦可选用。

4.3.2 内容

在常规测井资料处理的基础上，综合应用核磁共振测井、电缆地层测试、声电成像测井、阵列声波测井等特殊测井资料处理成果，对储层进行分析和评价。成果包括：

- a) 储层性质（岩性、储集类型及孔隙结构等）。
- b) 储层含流体性。
- c) 得到综合评价解释结论，提出试气建议。

测井解释成果图表参见附录 C。

4.3.3 结论

解释结论定名为“气层”、“水层”、“气水同层”、“干层”等。

附录 A
(资料性附录)
天然气层典型测井解释模型

A.1 平均值模型

A.1.1 应用范围

该模型可用于砂岩气藏及碳酸盐岩气藏孔隙度的计算。

A.1.2 计算方法

A.1.2.1 按式 (A.1) 计算中子测井孔隙度:

$$\phi_N = (H_b - H_{ma}) / (H_{mf} - H_{ma}) \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:
 ϕ_N ——中子测井孔隙度, 以小数表示;
 H_b ——中子测井测得的地层含氢指数, 以百分数表示;
 H_{ma} ——地层混合骨架的含氢指数, 以百分数表示;
 H_{mf} ——钻井液的含氢指数, 以百分数表示。

A.1.2.2 按式 (A.2) 计算密度测井孔隙度:

$$\phi_D = (\rho_{ma} - \rho_b) / (\rho_{ma} - \rho_{mf}) \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:
 ϕ_D ——密度测井孔隙度, 以小数表示;
 ρ_b ——密度测井测得的地层体积密度, 单位为克每立方厘米 (g/cm³);
 ρ_{ma} ——地层混合骨架的体积密度, 单位为克每立方厘米 (g/cm³);
 ρ_{mf} ——钻井液的体积密度, 单位为克每立方厘米 (g/cm³)。

A.1.2.3 按式 (A.3) 计算天然气层的粒间孔隙度 ϕ :

$$\phi = (\phi_N + \phi_D) / 4 + \sqrt{(\phi_N^2 + \phi_D^2) / 8} \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:
 ϕ ——天然气层的粒间孔隙度, 以小数表示。

A.2 最优化模型

A.2.1 应用范围

对于少于五种矿物成分 (不包括黏土) 的孔隙型碳酸盐岩气藏, 可以采用这种模型。

A.2.2 计算方法

A.2.2.1 采用补偿中子、岩性密度、声波和自然伽马四种测井方法提供的测量信息构成优化响应方程组, 见式 (A.4)。

$$\left. \begin{aligned} H_b &= \phi_g \cdot H_g + \phi_{xo} \cdot H_{mf} + V_{sh} \cdot H_{sh} + \sum_{i=1}^n (V_{mi} \cdot H_{mi}) \\ \rho_b &= \phi_g \cdot \rho_g + \phi_{xo} \cdot \rho_{mf} + V_{sh} \cdot \rho_{sh} + \sum_{i=1}^n (V_{mi} \cdot \rho_{mi}) \\ U_b &= \phi_g \cdot U_g + \phi_{xo} \cdot U_{mf} + V_{sh} \cdot U_{sh} + \sum_{i=1}^n (V_{mi} \cdot U_{mi}) \\ \Delta t &= \phi_g \cdot \Delta t_g + \phi_{xo} \cdot \Delta t_{mf} + V_{sh} \cdot \Delta t_{sh} + \sum_{i=1}^n (V_{mi} \cdot \Delta t_{mi}) \\ GR &= GR_{min} + \frac{(GR_{max} - GR_{min}) \ln [V_{sh} (2^{GCUR} - 1) + 1]}{GCUR \cdot \ln 2} \\ 1 &= \phi + V_{sh} + \sum_{i=1}^n V_{mi} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (A.4)$$

式中：

ϕ_g, ϕ_{xo} ——冲洗带残余气孔隙度和冲洗带孔隙度，以小数表示；

V_{sh} ——地层中泥质含量，以小数表示；

V_{mi} ——地层中第*i*种矿物成分的含量， $i \leq 4$ ，以小数表示；

$H_b, H_g, H_{mf}, H_{sh}, H_{mi}$ ——地层、天然气、钻井液、泥质、第*i*种矿物的含氢指数，以百分数表示；

$\rho_b, \rho_g, \rho_{mf}, \rho_{sh}, \rho_{mi}$ ——地层、天然气、钻井液、泥质、第*i*种矿物的体积密度，单位为克每立方厘米 (g/cm³)；

$U_b, U_g, U_{mf}, U_{sh}, U_{mi}$ ——地层、天然气、钻井液、泥质、第*i*种矿物的体积光电吸收截面，单位为靶恩每立方厘米 (b/cm³)；

$\Delta t, \Delta t_g, \Delta t_{mf}, \Delta t_{sh}, \Delta t_{mi}$ ——地层、天然气、钻井液、泥质、第*i*种矿物的纵波时差，单位为微秒每米 (μs/m)；

GR ——地层的自然伽马测井读数，单位为 API；

GR_{max}, GR_{min} ——纯泥岩的测井值和纯砂岩（或纯白云岩、纯灰岩）的测井值，单位为 API；

$GCUR$ ——经验系数，老地层取 2，第三纪地层取 3.7。

A.2.2.2 按式 (A.5) 计算地层体积光电吸收截面 U_b ：

$$U_b = P_e \cdot \rho_e = \frac{P_e(\rho_b + 0.1883)}{1.0704} \dots\dots\dots (A.5)$$

式中：

U_b ——地层体积光电吸收截面，单位为靶恩每立方厘米 (b/cm³)；

P_e ——地层光电吸收截面指数，单位为靶恩每电子 (b/e)；

ρ_e ——光电子密度指数，单位为电子数每立方厘米 (e/cm³)。

A.2.2.3 建立如式 (A.6) 目标函数：

$$\begin{aligned} f(X) = & (H_b - H_b^*)^2 / \mu_{H_b}^2 + (\rho_b - \rho_b^*)^2 / \mu_{\rho_b}^2 + (U_b - U_b^*)^2 / \mu_{U_b}^2 \\ & + (\Delta t - \Delta t^*)^2 / \mu_{\Delta t}^2 + (GR - GR^*)^2 / \mu_{GR}^2 \end{aligned} \dots\dots (A.6)$$

式中：

$H_b^*, \rho_b^*, U_b^*, \Delta t^*, GR^*$ ——上述响应方程组求出的 $H_b, \rho_b, U_b, \Delta t, GR$ 的理论值；

$\mu_{H_b}, \mu_{\rho_b}, \mu_{U_b}, \mu_{\Delta t}, \mu_{GR}$ ——响应误差和测量误差构成的总误差。

A.2.2.4 根据目标函数式 (A.6), 结合式 (A.4) 的优化响应方程组, 给出约束条件。选择适当的数学算法进行优化计算, 得到 $\phi_g, \phi_{xo}, V_{sh}, V_{mi} (i = 1 \sim n)$, 并按式 (A.7) 计算冲洗带含水饱和度。

$$S_{xo} = \phi_{xo} / \phi \quad \dots\dots\dots (A.7)$$

式中:

S_{xo} ——冲洗带含水饱和度, 以百分数表示。

A.2.2.5 由电阻率测井响应方程求解其相应探测区域的含水饱和度。

A.2.2.6 浅侧向测井:

$$1/R_{LLS} = (V_{sh}^{m_{sh}} / R_{sh}^{0.5} + \phi_{ws}^{0.5m} / R_{zs}^{0.5})^2 \quad \dots\dots\dots (A.8)$$

式中:

- R_{LLS} ——浅侧向测井测得的地层电阻率, 单位为欧[姆]米 ($\Omega \cdot m$);
- R_{sh} ——泥岩电阻率, 单位为欧[姆]米 ($\Omega \cdot m$);
- R_{zs} ——浅侧向探测范围内, 地层水和钻井液混合流体的电阻率, 单位为欧[姆]米 ($\Omega \cdot m$);
- m_{sh} ——泥岩的胶结指数;
- ϕ_{ws} ——浅侧向探测区域的地层含水孔隙度, 以小数表示;
- m ——骨架胶结指数。

$$1/R_{zs} = Z_s / R_w + (1 - Z_s) / R_{mf} \quad \dots\dots\dots (A.9)$$

式中:

- Z_s ——浅侧向探测范围内的混合流体的比例因子;
- R_w ——地层水电阻率, 单位为欧[姆]米 ($\Omega \cdot m$);
- R_{mf} ——钻井液电阻率, 单位为欧[姆]米 ($\Omega \cdot m$)。

由式 (A.8)、式 (A.9) 求出浅侧向探测区域的地层含水孔隙度 ϕ_{ws} , 则按式 (A.10) 计算浅侧向探测范围内的含水饱和度。

$$S_{ws} = \phi_{ws} / \phi \quad \dots\dots\dots (A.10)$$

式中:

S_{ws} ——浅侧向探测范围内的含水饱和度, 以百分数表示。

A.2.2.7 深侧向测井:

$$1/R_{LLD} = (V_{sh}^{m_{sh}} / R_{sh}^{0.5} + \phi_{wd}^{0.5m} / R_{zd}^{0.5})^2 \quad \dots\dots\dots (A.11)$$

$$1/R_{zd} = Z_D / R_w + (1 - Z_D) / R_{mf} \quad \dots\dots\dots (A.12)$$

式中:

- R_{LLD} ——深侧向测井测得的地层电阻率, 单位为欧[姆]米 ($\Omega \cdot m$);
- ϕ_{wd} ——深侧向探测区域的地层含水孔隙度, 以小数表示;
- R_{zd} ——深侧向探测范围内, 地层水和钻井液混合流体的电阻率, 单位为欧[姆]米 ($\Omega \cdot m$);
- Z_D ——深侧向探测范围内混合流体的比例因子。

由式 (A.11)、式 (A.12) 求出深侧向探测范围的地层含水孔隙度 ϕ_{wd} , 则按式 (A.13) 计算深侧向探测范围内的地层含水饱和度 S_{wd} :

$$S_{wd} = \phi_{wd} / \phi \quad \dots\dots\dots (A.13)$$

式中:

S_{wd} ——深侧向探测范围内的地层含水饱和度, 以百分数表示。

A.3 Kukal 模型

A.3.1 应用范围

建议在致密砂岩气藏或低孔低渗碳酸盐岩气藏使用 Kukal 模型，中子测井的挖掘效应校正可以不计。

A.3.2 计算方法

A.3.2.1 当地层中黏土矿物以伊利石为主时，采用自然伽马曲线计算黏土含量，计算方法见式 (A.14) 和式 (A.15)。

$$V_{cl} = (GR - GR_{min}) / (GR_{clay} - GR_{min}) \dots\dots\dots (A.14)$$

$$GR_{clay} = [GR_{max} - (1 - V_{clk})GR_{min}] / V_{clk} \dots\dots\dots (A.15)$$

式中：
 GR_{max} , GR_{min} , GR_{clay} ——纯泥岩、纯砂岩（或纯白云岩、纯灰岩）、黏土的自然伽马测井响应值，单位为 API；
 V_{clk} ——泥岩中黏土的含量，单位为小数；
 V_{cl} ——地层中黏土的含量，单位为小数。

A.3.2.2 按式 (A.16) 计算中子测井与密度测井探测范围内的地层平均含水饱和度。

$$S_{dn} = \frac{H_g(\rho_b - \rho_{ma}) - (\rho_g - \rho_{ma})[H_b - V_{cl} \cdot H_{cl} + (\Delta H)ex]}{(\rho_{mf} - \rho_g)[H_b - V_{cl} \cdot H_{cl} + (\Delta H)ex] - (H_{mf} - H_g)(\rho_b - \rho_{ma})} \dots\dots\dots (A.16)$$

式中：
 S_{dn} ——中子测井与密度测井探测范围内的地层平均含水饱和度，用百分数表示；
 H_b , H_g , H_{mf} , H_{cl} ——地层、天然气、钻井液、黏土泥质的含氢指数，用百分数表示；
 ρ_b , ρ_g , ρ_{mf} , ρ_{ma} ——地层、天然气、钻井液、岩石骨架的体积密度，单位为克每立方厘米 (g/cm³)；
 $(\Delta H)ex$ ——中子测井的挖掘效应校正，用百分数表示。

A.3.2.3 将求得的 S_{dn} 代入式 (A.17)，得到地层粒间孔隙度：

$$\phi = \frac{\rho_b - \rho_{ma}}{S_{dn} \cdot \rho_{mf} + (1 - S_{dn})\rho_g - \rho_{ma}} \dots\dots\dots (A.17)$$

A.4 Roberto 模型

A.4.1 应用范围

该模型适用于定量评价裂缝性碳酸盐岩气藏。

A.4.2 计算方法

这是一种双重孔隙结构模型，它把充满流体的骨架孔隙和裂缝系统看做是并联导体，导出式 (A.18)、式 (A.19)、式 (A.20)、式 (A.21)、式 (A.22) 和式 (A.23)。

裂缝孔隙度：

$$\phi_f = \frac{[\phi_t + \phi_b(1 - \phi_t)]^m - \phi_b^{m_b}}{1 - \phi_b^{m_b}} \dots\dots\dots (A.18)$$

总孔隙度：

$$\phi_t = \sqrt[m]{\nu \cdot \phi_t + (1 - \nu)\phi_b^{m_b}} \dots\dots\dots (A.19)$$

分配系数:

$$\nu = (\phi_t - \phi_b) / [\phi_t (1 - \phi_b)] \dots\dots\dots (A.20)$$

裂缝含水饱和度:

$$S_{wf} = \mu_w \cdot WGR / (B_g \cdot \mu_g + \mu_w \cdot WGR) \dots\dots\dots (A.21)$$

基质含水饱和度:

$$S_{wb} = (S_w - S_{wf} \cdot \nu) / (1 - \nu) \dots\dots\dots (A.22)$$

总含水饱和度:

$$S_w = (R_{wa} / R_w)^{-1/n} \dots\dots\dots (A.23)$$

式中:

- ϕ_t ——裂缝孔隙度, 单位为小数;
- ϕ_b ——基质孔隙度, 单位为小数;
- m_b ——基质孔隙指数;
- m ——双孔隙指数;
- ϕ_t ——总孔隙度, 单位为小数;
- ν ——分配系数;
- S_{wf} ——裂缝含水饱和度, 用百分数表示;
- μ_w ——地层水黏度;
- μ_g ——油气黏度;
- WGR ——水油气比;
- B_g ——油气层体积系数;
- S_{wb} ——基质含水饱和度, 用百分数表示;
- S_w ——总含水饱和度, 用百分数表示;
- n ——饱和度指数;
- R_{wa}, R_w ——油气层的视地层水电阻率和地层水电阻率, 单位为欧[姆]米 ($\Omega \cdot m$)。

A.5 Archie 模型

A.5.1 应用范围

该模型适用于具有颗粒孔隙的纯地层和泥质含量较少的地层。

A.5.2 计算方法

根据实验分别得出含水纯岩石和含油气纯岩石的电阻率测井解释的关系式统称为 Archie 公式, 其一般形式归结如式 (A.24) 和式 (A.25)。

$$F = R_o / R_w = a / \phi^m \dots\dots\dots (A.24)$$

$$I = R_t / R_o = R_t / (F \cdot R_w) = b / S_w^n = b / (1 - S_h)^n \dots\dots\dots (A.25)$$

式中:

- R_o ——100% 饱和地层水的岩石电阻率, 单位为欧[姆]米 ($\Omega \cdot m$);
- R_w ——地层水电阻率, 单位为欧[姆]米 ($\Omega \cdot m$);
- ϕ ——岩石有效孔隙度, 用小数表示;
- a ——与岩石有关的岩性系数, 一般为 0.6 ~ 1.5;
- m ——胶结指数, 与岩石胶结情况和孔隙结构有关的指数, 一般为 1.5 ~ 3, 常取 $m = 2$;
- F ——地层因素, 它是 100% 饱和地层水的岩石电阻率 R_o 与所含地层水电阻率 R_w 的比值, 其大小主要取决于地层孔隙度 ϕ , 且与岩石性质、胶结情况和孔隙结构等有关, 但与地层水电阻

率 R_w 无关;

R_t ——岩石真电阻率, 单位为欧[姆]米 ($\Omega \cdot m$);

b ——与岩性有关的系数, 一般接近于 1, 常取 $b = 1$;

n ——饱和度指数, 与油、气、水在孔隙中的分布状况有关, 其值在 1.0 ~ 4.3 间, 以 1.5 ~ 2.2 者居多, 常取 $n = 2$;

S_w ——岩石含水饱和度, 用小数表示;

S_h ——岩石含油气饱和度, 用小数表示;

I ——电阻增大系数, 它是含油气岩石真电阻率 R_t 与该岩石 100% 饱含地层水电阻率 R_o 的比值, 其大小主要取决于 S_w (或 S_h), 但与地层的孔隙度 ϕ 和地层水电阻率 R_w 无关。

A.6 SDR 模型

A.6.1 应用范围

该模型适用于核磁共振测井测得的信息计算地层渗透率, 此模型为核磁共振渗透率模型的其中之一。

A.6.2 计算方法

按式 (A.26) 计算 SDR 模型渗透率。

$$KSDR = SDR A \cdot CMRP^{SDRB} \cdot T_{2g}^{SDRC} \dots\dots\dots (A.26)$$

式中:

$KSDR$ ——SDR 模型渗透率, 单位为毫达西 (mD 或 $10^{-3} \mu m^2$);

$CMRP$ ——储层总孔隙度, 用百分数表示;

T_{2g} —— T_2 几何平均值, 单位为毫秒 (ms);

$SDRA$ ——SDR 渗透率模型参数, 默认为 4;

$SDRB$ ——SDR 渗透率模型参数, 默认为 4;

$SDRC$ ——SDR 渗透率模型参数, 默认为 2。

A.7 Coates 模型

A.7.1 应用范围

该模型适用于核磁共振测井测得的信息计算地层渗透率, 此模型为核磁共振渗透率模型的其中之一。

A.7.2 计算方法

按式 (A.27) 计算 Coates 模型渗透率。

$$KCOA = \left(\frac{CMRP}{A} \right)^B \cdot \left(\frac{CMRP - BVIT}{BVIT} \right)^C \dots\dots\dots (A.27)$$

式中:

$KCOA$ ——Coates 模型渗透率, 单位为毫达西 (mD 或 $10^{-3} \mu m^2$);

$CMRP$ ——储层总孔隙度, 用百分数表示;

$BVIT$ ——储层束缚流孔隙度, 用百分数表示;

A ——Coates 渗透率模型参数, 默认为 10;

B ——Coates 渗透率模型参数, 默认为 4;

C ——Coates 渗透率模型参数, 默认为 2。

附录 B
(资料性附录)
测井解释确定天然气层的方法

B.1 双孔隙度重叠法

地层含气引起中子测井孔隙度 ϕ_N 减小以及密度测井孔隙度 ϕ_D 增大,故 $\phi_D > \phi_N$ 表明地层含气。

B.2 双含氢指数重叠法

以密度测井孔隙度 ϕ_D 代替中子测井孔隙度 ϕ_N 刻度中子测井读数,得到由密度测井转换的地层含氢指数,见式 (B.1)。

$$H_d = H_{ma} (1 - \phi_D) + H_{mf} \cdot \phi_D \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:
 H_d, H_{ma}, H_{mf} ——地层、骨架和钻井液的含氢指数,用百分数表示;
若地层含气,则 $\phi_D > \phi_N$,因此,计算的地层含氢指数 H_d 远远大于中子测井测量的地层含氢指数 H_b 。这种方法找气比传统的 $\phi_D - \phi_N$ 方法的分辨率高得多。
该方法对砂岩气藏和碳酸盐岩气藏均适用。

B.3 天然气标记法

在中子测井和密度测井的径向探测范围内,只要侵入带的含气饱和度大于 20%,可以直观指示为天然气层,这是天然气标记法找气的基本原则。

在砂泥岩剖面,由中子和密度测井信息按 A.1 的平均值模型计算的储层粒间孔隙度 ϕ 大于本地区粒间孔隙度下限值时,计算孔隙度差值 $\phi_D - \phi_N$,只要该值大于 $\phi/5$,则天然气标记输出值等于 1,直观指示为天然气层;反之,天然气标记输出值等于零,直观指示为非天然气层。

B.4 等效弹性模量差比法

等效弹性模量等于声阻抗与声波速度的函数,见式 (B.2)。

$$E_c = \rho_b \times 10^{16} A / \Delta t_c^2 \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:
 E_c ——等效弹性模量,单位为 0.1 帕 [斯卡] (0.1Pa);
 ρ_b ——密度测井测量值,单位为克每立方厘米 (g/cm³);
 Δt_c ——声波测井测量值,单位为微秒每米 (μ s/m);
 A ——单位换算系数。

在储层岩性和孔隙度都相同的条件下,天然气层的等效弹性模量小于水层的等效弹性模量。
等效弹性模量差比值定义见式 (B.3)。

$$DR = (E_{cw} - E_c) / E_c \dots\dots\dots (B.3)$$

式中:
 DR ——等效弹性模量差比值,用小数表示;
 E_{cw} ——水层等效弹性模量,单位为 0.1 帕 [斯卡] (0.1Pa)。

用等效弹性模量差比值找气，目的在于消除等效弹性模量的量纲和岩性的影响，突出测井找气的直观性。

B.5 声波差值法

声波差值是指测量的地层纵波时差减去合成的地层纵波时差。在储层岩性和孔隙度相同的条件下，如果测量的地层纵波时差大于合成的地层纵波时差，那么声波差值大于零，直观指示为天然气层；如果测量的地层纵波时差等于或接近于合成的纵波时差，那么声波差值等于或接近于零，直观指示为非天然气层；泥岩声波差值为负值。非天然气层的声波差值可以作为直观指示天然气层的背景值。

在声波差值法中，地层纵波时差是井眼补偿声波测井测得的，合成的纵波时差是由中子伽马测井信息转换的，转换公式见式 (B.4)。

$$\Delta t_{c,syn} = \phi_{NG} \cdot \Delta t_{mf} + (1 - \phi_{NG}) \Delta t_{ma} \dots\dots\dots (B.4)$$

式中：

- $\Delta t_{c,syn}$ ——合成纵波时差，单位为微秒每米 ($\mu s/m$)；
- ϕ_{NG} ——中子伽马测井计算的孔隙度，用小数表示；
- Δt_{mf} , Δt_{ma} ——钻井液与骨架的纵波时差，单位为微秒每米 ($\mu s/m$)。

声波差值法直观指示气层的分辨率高，而且统一了两种测井读数的量纲，突出了测井找气的直观性。

B.6 双纵波时差法

长源距声波测井能同时测量短源距纵波时差和长源距纵波时差。短源距纵波时差受冲洗带含气饱和度影响小，长源距纵波时差受冲洗带含气饱和度影响大。当长源距纵波时差大于短源距纵波时差时，指示是天然气层，反之为非天然气层。

B.7 双横波时差法

岩石孔隙中的天然气引起横波时差减小和纵波时差增大。如果把测量的纵波时差转换成合成的横波时差，再与测量的横波时差重叠，当合成横波时差大于测量横波时差时，指示是天然气层。

按式 (B.5) 计算合成横波时差。

$$\Delta t_{s,syn} = \left(\frac{\Delta t_c - \Delta t_{ma}}{\Delta t_{mf} - \Delta t_{ma}} \right) \Delta t_{smf} + \left(1 - \frac{\Delta t_c - \Delta t_{ma}}{\Delta t_{mf} - \Delta t_{ma}} \right) \Delta t_{sma} \dots\dots\dots (B.5)$$

式中：

- $\Delta t_{s,syn}$ ——合成横波时差，单位为微秒每米 ($\mu s/m$)；
- Δt_c ——测量纵波时差，单位为微秒每米 ($\mu s/m$)；
- Δt_{sma} ——骨架横波时差，单位为微秒每米 ($\mu s/m$)；
- Δt_{smf} ——钻井液的等效横波时差，单位为微秒每米 ($\mu s/m$)。

B.8 纵横波速度比重叠法

在储层孔隙度和围岩压力相同条件下，天然气层的纵横波速度比小于水层的纵横波速度比。纵横波速度比值是从长源距声波测井的全波波信息中提取的，纵横波速度比测量值与纵横波速度比背景值重叠，称为纵横波速度比重叠法。背景值是指地层孔隙空间完全为饱和水时的纵横波速度比。当纵横波速度比测量值小于背景值时，指示为天然气层。由于引入了背景值，从而提高了直观指示天然气

层的能力。

此外，纵波与横波速度都是从长源距声波测井信息中提取的，两者探测空间匹配，利于消除地层非均质的影响。采用这种方法可以寻找砂岩储层的天然气。

B.9 电磁波—声波结合法

声波测井测量纵波在地层中传播的速度（或时差），电磁波测井测量电磁波在地层中传播的时间，通过测井数据处理，获得地层声波孔隙度和地层电磁波孔隙度，计算方法见式（B.6）和式（B.7）。

$$\phi_s = (\Delta t_c - \Delta t_{ma}) / (\Delta t_{mf} - \Delta t_{ma}) \dots\dots\dots (B.6)$$

$$\phi_{EPT} = (t_{po} - t_{pma}) / (t_{pmf} - t_{pma}) \dots\dots\dots (B.7)$$

式中：

- ϕ_s ——声波孔隙度，用小数表示；
- ϕ_{EPT} ——电磁波孔隙度，用小数表示；
- t_{po} ——地层中无损耗的电磁波传播时间，单位为毫秒（ms）；
- t_{pma} ——骨架中无损耗的电磁波传播时间，单位为毫秒（ms）；
- t_{pmf} ——钻井液中无损耗的电磁波传播时间，单位为毫秒（ms）。

岩石孔隙中的天然气引起声波孔隙度增大和电磁波孔隙度减小。油层中电磁波孔隙度也减小，但不如天然气层显著。使用声波与电磁波测井组合，能够有效区分水层、油层与天然气层。

B.10 介电—密度测井组合法

介电测井孔隙度的计算见式（B.8）。

$$\phi_E = (P - P_{ma}) / (P_{mf} - P_{ma}) \dots\dots\dots (B.8)$$

式中：

- ϕ_E ——介电孔隙度，用小数表示；
- P ——介电测井测得的地层相移角，单位为度（°）；
- P_{ma} ——骨架相移角，单位为度（°）；
- P_{mf} ——钻井液相移角，单位为度（°）。

相移角受地层孔隙空间中天然气的影响而变小，孔隙度 ϕ_E 随之减小，而密度测井孔隙度 ϕ_D 因地层含气而变大。两者对比可以鉴别天然气层。

B.11 双饱和度对比法

双饱和度是指在同一地层分别从电阻率测井和碳氧比测井信息中提取的含水饱和度。当电阻率含水饱和度小于碳氧比含水饱和度时，直观指示为天然气层；反之为非天然气层。据此，采用双饱和度对比法可以寻找已下套管井内地层的天然气，尤其对高孔隙砂岩地层，直观性特别好。

双饱和度对比法解决了油层与天然气层的划分问题，对合理开采油气井具有指导意义。

B.12 压力—深度交会法

气的密度小于油和水的密度，根据孔隙流体密度可以寻找天然气。孔隙流体密度是从电缆式地层测试器测量的井内地层压力与埋藏深度所做的交会图中获得的。根据压力—深度交会法，能够确定储层流体性质，准确划分气藏的气—水分界面或油气藏的气—油—水分界面。

压力—深度交会法找气，不受储层岩性的影响，而且能够确定气藏（油藏）底界深度。

B.13 液体压缩系数法

由长源距声波测井信息导出孔隙空间液体压缩系数，天然气层液体压缩系数最大，油层液体压缩系数次之，因而可以判别天然气层。

B.14 $\phi - S_w$ 交会图法

实验表明：如果地层只含束缚水，孔隙度 ϕ 与 S_{wi} 的乘积趋于一个常数，在 $\phi - S_w$ 交会图中交会点呈近双曲线分布；当储层含可动水时， $S_w > S_{wi}$ ，意味着对应同一个孔隙度值，交会点必然跳离 $\phi - S_w$ 的双曲线，分布无规律性，因此可通过 $\phi - S_w$ 交会图中数据点的分布特征来判断储层是否含有可动水，从而判别储层流体性质。对于气层：地层只含束缚水，交会点表现为单边双曲线分布特征，且高孔段孔隙度均落于气区；对于水层，点子分布散乱，且多落于含水饱和度大于 50% 的水区。

B.15 $P^{1/2}$ 概率分析法

根据阿尔奇公式 $F=R_o/R_w=1/\phi^m$ 可计算出地层的视地层水电阻率 $R_{wa}=R_i\phi^m$ （设 $a=1$ ）。 $P^{1/2}$ 概率分析法采用正态分布法，即用 R_{wa} 的变化规律，而不是用 R_{wa} 的绝对值来指示储层的流体性质。具体作法是，令 $P^{1/2}=(R_{wa})^{1/2}$ ，即 $P^{1/2}=(R_i\phi^m)^{1/2}$ 。在同一层内各测量点计算的 $P^{1/2}$ 值应满足正态分布规律，见图 B.1。

当储层完全含水时，无论孔、洞、缝均被地层水充填，故其视地层水电阻率从理论上讲应为一常数，统计的正态曲线形状较尖、较瘦。而储层含气（油）时，孔隙空间中既可能含气（油）也可能含水，故其统计的正态曲线形状较缓、较胖。因此，可以判别储层的流体性质。

由于正态概率曲线的胖瘦程度是一个相对概念，不好把握，难以对流体性质做出准确判别，为此，将 $P^{1/2}$ 的百分累计频率点在一张特殊的正态纸上，其纵坐标为 $P^{1/2}$ ，横坐标为累计频率，并按函数 $f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}e^{-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)}$ 进行刻度，这样就将正态概率曲线变成了一条近似的直线，根据累计频率曲线斜率的变化对储层的含流体性质做出判断，即水层斜率小，油气层斜率大。

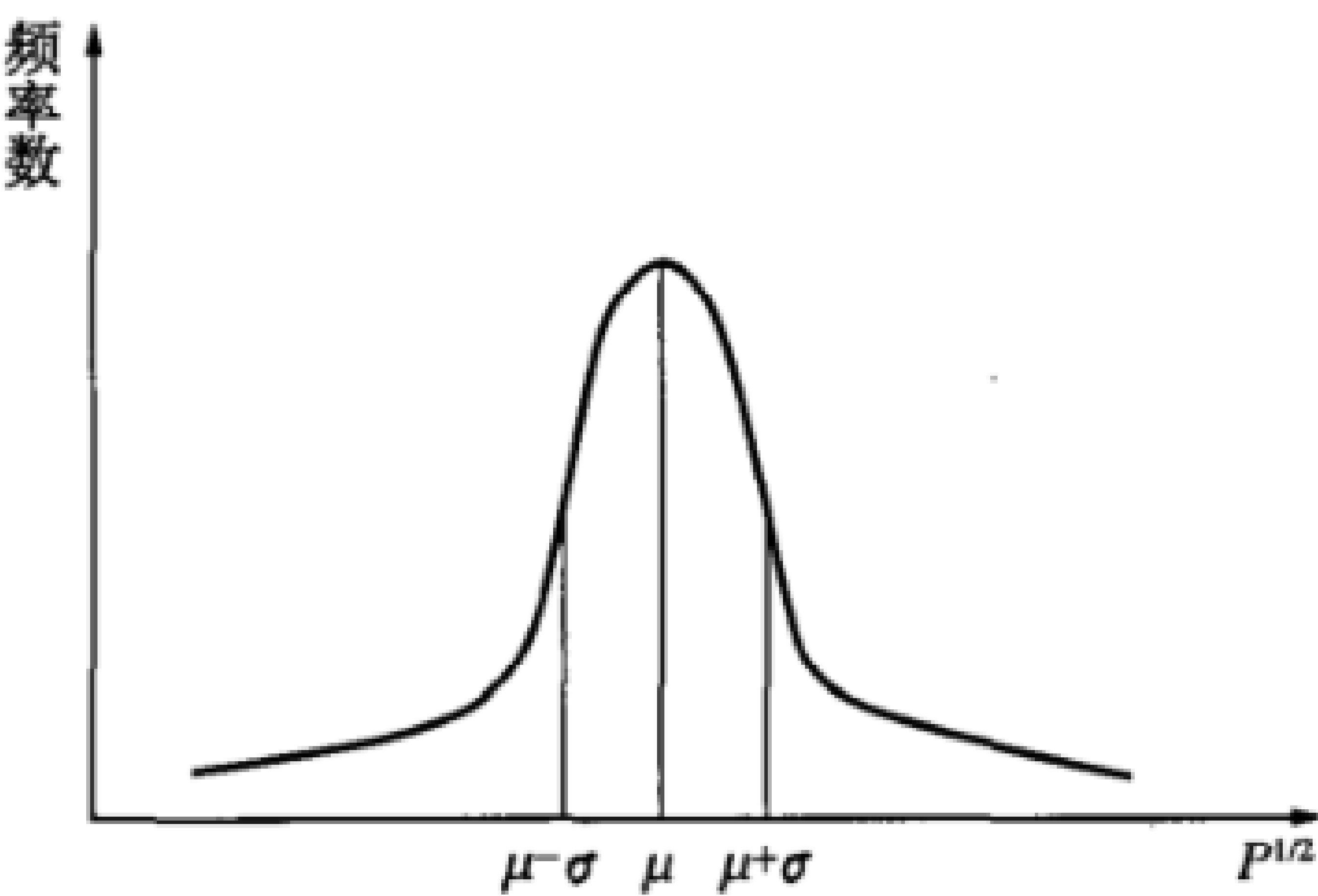


图 B.1 正态分布曲线特征图

B.16 径向电阻率差异法

由于深侧向（感应）探测深度较深，所测得的电阻率为原状地层电阻率，而浅侧向（感应）探测深度较浅，主要探测侵入带地层电阻率。在气层，侵入带孔隙空间中的天然气部分被钻井液滤液取代，导致侵入带地层电阻率降低，在双侧向（感应）曲线上表现为正差异；在水层，若钻井液滤液电

阻率大于地层水电阻率，深浅双侧向呈负差异，若钻井液滤液电阻率小于地层水电阻率，深浅双侧向可能呈正差异或无差异。

B.17 电阻率—孔隙度交会图法

电阻率—孔隙度交会图是应用阿尔奇公式的一种快速直观解释方法。当孔隙度指数和饱和度指数都取 2 时，地层电阻率平方根的倒数与孔隙度有线性关系，其直线的斜率取决于地层水电阻率和含水饱和度，见式 (B.9)。

$$\frac{1}{\sqrt{R_t}} = \frac{S_w}{\sqrt{a \cdot b \cdot R_w}} \cdot \phi \dots\dots\dots (B.9)$$

- 式中：
- R_t ——岩石真电阻率，单位为欧[姆]米 ($\Omega \cdot m$)；
 - R_w ——地层水电阻率，单位为欧[姆]米 ($\Omega \cdot m$)；
 - ϕ ——岩石有效孔隙度，用小数表示；
 - S_w ——岩石含水饱和度，用小数表示；
 - a ——与岩石有关的岩性系数，一般为 0.6 ~ 1.5；
 - b ——与岩性有关的系数，一般接近于 1，常取 $b = 1$ 。

如果已知地层水电阻率或已知水层孔隙度及电阻率，则可以绘出不同饱和度的直线。因此，电阻率—孔隙度交会图可以判别储层含流体性质。

B.18 时间推移电阻率测井识别法

时间推移电阻率测井就是在钻开目的层后，先后对目的层进行两次电阻率（双侧向或双感应）测井，两次测井时间间隔一般在一星期左右。在渗透性较好的地层，钻井液滤液侵入井壁周围地层，将孔隙中的流体沿径向驱替到深部地层，同时也形成泥饼，此时，进行第一次测井，所测的电阻率 R_1 在很大程度上受钻井液滤液影响；一个星期后，由于泥饼将井筒与地层分隔成两个系统，地层流体又逐渐扩散到井壁周围，此时，进行第二次测井，所测的电阻率 R_2 在很大程度上将受地层流体影响。因此，将两次测得的电阻率加以比较，就可判别地层含流体性质，即 $R_1 < R_2$ 时，为气层； $R_1 \geq R_2$ 时，为水层。

B.19 套前套后中子重叠识别法

固井前，中子（即套前中子）测井信息基本反映侵入带特征；固井后，受地层压力驱动，气层中的天然气又逐渐扩散到水泥环附近，使套后中子减小，因此，气层的套前中子通常大于套后中子，而水层的套前中子基本上等于套后中子，将两者叠加，可很直观地识别气层，即差值 > 0 ，为气层；差值 ≤ 0 ，为非气层。

B.20 模糊聚类分析方法

模糊聚类分析判别储层含流体性质方法是一种多参数判别分析法，是一种把普通动态聚类算法与模糊聚类分析结合的一种数学处理方法，它先通过动态聚类将样本（各种测井曲线、不同深度的采样点）粗糙地进行预分类，并依据一定规则自身迭代，不断地进行分裂类与合并类，从而得到组合相对合理的动态聚类结果，然后把该结果作为模糊聚类分析的初始分类继续迭代，在迭代过程中按最优原则不断修改隶属度，最后得到某种意义下的最佳结果——最优化模糊隶属度矩阵，由此得到各类的聚类中心和各样本隶属于各类的隶属度。

该方法是利用常规测井资料（井径、自然伽马、无铀伽马、声波、中子、密度、深浅双侧向等）提取多个反映储层及流体特征参数，利用这些参数参与聚类分析，在程序中设置油气、水、非储层（干层和泥质层）等三种（或四种）聚类结果，达到自动判别流体性质的目的。

B.21 标准 T_2 判别法

核磁共振的标准 T_2 测井选用恰当的恢复时间 T_R 和标准回波间隔 T_E ，测量自旋回波串。 T_R 的选取取决于地层流体的核磁共振纵向弛豫时间 T_1 ，一般要求 $T_R > (3 \sim 5) T_1$ ， T_E 则越小越好，在 MRIL-C 型仪器中，最小 T_E 为 1.2 ms。

由于油、气、水具有不同的核磁共振特征，如天然气受扩散效应影响大，具有较短的 T_2 时间，在 T_2 分布图上表现为自由流体峰向 T_2 减小的方向迁移，因此，气层呈现“单峰”特征或“双峰”紧靠；而轻质油是非润湿相的，在孔隙中处于被水包围的状态，弛豫保持其固有的 T_2 特征值，分布在 T_2 增大的方向，并且随着油含量的增多，峰值幅度会不断增加。因此，油层呈现“双峰”特征，而且“双峰”分离较水层更为明显；水层呈明显“双峰”特征，即束缚流体峰与自由流体峰分布在不同的时间区域上。

B.22 差谱法 (DSM)

在核磁共振测井时，由于水与烃（油、气）的纵向弛豫时间 T_1 相差很大，它们的纵向恢复速率也相差很大，因此水的纵向恢复远比烃快。

如果选择不同的等待时间，观测到的回波串中将包含不一样的信号分布。双 T_w 测井利用特定的回波间隔和长、短两个不同的等待时间 T_{WL} 和 T_{WS} ，使 $T_{RL} > (3 \sim 5) T_{1h}$ ，（其中， $T_{RL} = T_{WL} + N_e T_E$ ， T_{WL} 为长等待时间， N_e 为测井回波个数， T_E 为测井标准回波间隔， T_{1h} 为轻烃的纵向弛豫时间。） $T_{RS} > (3 \sim 5) T_{1w}$ ，（其中， $T_{RS} = T_{WS} + N_e T_E$ ， T_{1w} 为水的纵向弛豫时间。）分别观测两个不同的回波串，由于纵向弛豫时间加权机制的作用，使两个回波串对应的 T_2 分布存在差异，由此来识别和定量解释油、气、水层。

B.23 移谱法 (SSM)

在核磁共振测井时，双 T_E 测井设置足够长的等待时间，使 $T_R > (3 \sim 5) T_{1h}$ （ T_{1h} 为轻烃的纵向弛豫时间），每次测量时使纵向弛豫达到完全恢复。利用两个不同的回波间隔 T_{EL} 和 T_{ES} ，测量两个回波串。由于水与气或水与中等黏度的油扩散系数不一样（油的扩散性比水要小，而天然气的扩散性则要大得多），使得各自在 T_2 分布上的位置发生变化，由此，对油、气、水进行识别。

附 录 C
(资料性附录)
测井解释成果图表

C.1 砂泥岩地层常规测井解释成果

砂泥岩地层常规测井解释成果内容如下:

- a) 解释层号, 顶、底深度, 层厚。
- b) 泥质、砂质、煤等相对含量。
- c) 总孔隙度。
- d) 含水饱和度。
- e) 渗透率。
- f) 冲洗带含水体积。
- g) 原状地层含水体积。
- h) 含气判别参数 (可根据本地区解释方法选取)。
- i) 可动烃量。
- j) 井壁取心及其描述。
- k) 解释结论。

C.2 碳酸盐岩及复杂岩性地层常规测井解释成果

碳酸盐岩及复杂岩性地层常规测井解释成果内容包括如下:

- a) 解释层号, 顶、底深度, 层厚。
- b) 矿物成分及含量: 碳酸盐岩 (泥质、方解石、白云石、硬石膏及其他矿物含量)、火成岩 (流纹岩、安山岩、玄武岩、花岗岩及其他火成岩含量)。
- c) 总孔隙度。
- d) 次生孔隙度。
- e) 含水饱和度。
- f) 渗透率。
- g) 冲洗带含水体积。
- h) 原状地层含水体积。
- i) 可动烃量。
- j) 含气判别参数 (可根据本地区解释方法选取)。
- k) 井壁取心及其描述。
- l) 解释结论。

C.3 核磁共振测井解释成果

核磁共振测井解释成果包括内容如下:

- a) 总孔隙度。
- b) 有效孔隙度。
- c) 自由流体孔隙度。
- d) 束缚水孔隙度。

- e) 含水饱和度。
- f) 冲洗带含水饱和度。
- g) 束缚水饱和度。
- h) 渗透率。
- i) 孔径区间分布曲线。
- j) T_2 分布谱。
- k) 差谱图。
- l) 移谱图。

C.4 电缆式地层测试解释成果

电缆式地层测试解释成果包括内容如下：

- a) 地层压力。
- b) 地层压力系数。
- c) 钻井液柱压力。
- d) 渗透率。

C.5 声、电成像测井解释成果

声、电成像测井解释成果包括内容如下：

- a) 地层倾角及井旁构造分析。
- b) 静态平衡图像。
- c) 动态平衡图像。
- d) 地质界面。
- e) 裂缝密度。
- f) 裂缝长度。
- g) 平均水动力宽度。
- h) 裂缝视孔隙度。
- i) 古水流方向及砂体展布方向分析。
- j) 沉积相分析。
- k) 地应力分析。

C.6 阵列声波测井解释成果

阵列声波测井解释成果包括内容如下：

- a) 纵波、横波、斯通利波时差。
- b) 纵波、横波、斯通利波能量。
- c) 纵波、横波、斯通利波能量衰减系数。
- d) 声波波形。
- e) 声波变密度。
- f) 剪切模量。
- g) 体积模量。
- h) 组合模量。
- i) 杨氏模量。
- j) 体积压缩系数。

- k) 泊松比。
- l) 地应力分析及压裂高度预测分析。
- m) 地层各向异性。
- n) 地层渗透性分析。

C.7 图件与数据表

图件与数据表参见 SY/T 5633。

C.8 测井资料解释报告的编写

测井资料解释报告的编写参见 SY/T 5945。

参 考 文 献

[1] SY/T 5633 石油测井图件格式
[2] SY/T 5945 测井解释报告编写规范

中华人民共和国
石油天然气行业标准
天然气测井资料处理及解释规范
SY/T 6161—2009

*

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
石油工业出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

880×1230 毫米 16 开本 1.5 印张 42 千字 印 1—1500
2010 年 2 月北京第 1 版 2010 年 2 月北京第 1 次印刷
书号: 155021·6444

版权专有 不得翻印