

陆相页岩气测井数据处理解释规范

Specification for the process and interpretation of logging data in lacustrine

shale gas reservoir

2018 - 10 - 11 发布

2018 - 11 - 11 实施

目 次

前 言..... II

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 1

4 符号和缩略语..... 1

5 准备工作..... 3

6 测井数据处理..... 4

7 结果验证..... 5

8 测井资料综合解释..... 5

9 测井解释图表及报告要求..... 6

附录 A（规范性附录） 陆相页岩气测井项目..... 8

附录 B（资料性附录） 陆相页岩气储层物性参数典型计算模型..... 10

附录 C（资料性附录） 陆相页岩气储层含气性参数典型计算模型..... 12

附录 D（规范性附录） 陆相页岩气储层岩石力学参数典型计算模型..... 14

前 言

本标准按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准由陕西延长石油（集团）有限责任公司提出。

本标准由陕西省能源局归口。

本标准起草单位：陕西延长石油（集团）有限责任公司研究院。

本标准主要起草人：孙德瑞、高潮、耿龙祥、方晓君、张丽霞、杨潇、姜呈馥、赵谦平、郭超、孙建博、史鹏、刘刚、尹锦涛、王晖、徐杰。

本标准由陕西延长石油（集团）有限责任公司研究院负责解释。

本标准首次发布。

联系信息如下：

单位：陕西延长石油（集团）有限责任公司研究院

电话：029-88899676

地址：陕西省西安市雁塔区科技二路75号

邮编：710075

陆相页岩气测井数据处理解释规范

1 范围

本标准规定了陆相页岩气测井的准备工作、测井数据处理、结果验证、测井资料综合解释以及解释图表和报告编写的基本要求。

本标准适用于陆相页岩气测井数据的处理与解释。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- SY/T 5132 石油测井原始资料质量规范
- SY/T 5360 裸眼井单井测井数据处理流程
- SY/T 5945—2016 测井解释报告编写规程
- SY/T 6451—2017 探井测井资料处理与解释规范
- 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解释规范
- SY/T 6937 多极子阵列声波测井资料处理与解释规范
- SY/T 6691—2014 裸眼井测井设计规范
- DB61/T 576—2013 页岩气井取心及取样方法
- DB61/T 1017—2016 陆相页岩气储层评价方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件

3.1

测井系列 logging suit

在某种地质和钻孔条件下，针对油气勘探与开发中特定的地质或工程目的，将性能和作用不同的测井项有针对性地组合进行测井，从而所形成的一系列测井项组合。

3.2

陆相页岩层系 lacustrine shale series

在陆相沉积环境下形成的一套多种岩层组成的地层体系，岩性以陆相页岩和泥页岩为主，夹杂着细砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩或碳酸盐岩等薄互层。

4 符号和缩略语

下列符号和缩略语适用于本文件

A_1	回归拟合参数
A_2	回归拟合参数
A_3	代表不同岩性的近似系数, J. M. Gatens和Hemingway等根据泥、页岩地层特征, 估算 A_3 约为4.59
AC	实际测井中的声波时差, 单位为微秒每米 ($\mu\text{s/m}$)
B_1	回归拟合参数
B_2	回归拟合参数
B_3	代表不同岩性的近似系数, J. M. Gatens和Hemingway等根据泥、页岩地层特征, 估算 B_3 约为8.16
B_g	天然气体积系数
C_1	回归拟合参数
CP	声波时差压实校正系数
D	声波时差与电阻率的叠合系数
DN	归一化后密度与中子差值, 单位为小数
E	杨氏模量, 单位为兆帕[斯卡] (MPa)
e	自然对数函数的底数, 为自然常数, 约为2.71828
F	比例系数
G	剪切模量, 单位为兆帕[斯卡] (MPa)
GR	自然测井值, 单位为API
G_r	溶解气含量, 单位为立方米每吨 (m^3/t)
ΔGR	自然伽马相对值, 单位为 API
GR_{max}	自然伽马的最大值, 一般对应厚层纯泥岩段, 单位为API
GR_{min}	自然伽马的最小值, 一般对应厚层纯砂岩段, 单位为API
G_x	吸附气含量, 单位为立方米每吨 (m^3/t)
G_y	游离气含量, 单位为立方米每吨 (m^3/t)
G_z	总含气量, 单位为立方米每吨 (m^3/t)
K	剪切模量, 单位为兆帕[斯卡] (MPa)
LOM	有机质变质作用和成熟度的等级, 可以实验分析或从埋藏史和热史评价中得到, LOM 取值根据分析结果或地区资料确定。
M	地层经验系数, 取 2
N	孔隙水中甲烷摩尔含量, 单位为摩尔每摩尔 (mol/mol)
P	气体压力, 单位为兆帕[斯卡] (MPa)
P_L	Langmuir压力, Langmuir体积的一半所对应的压力, 单位为兆帕[斯卡] (MPa)
R	测井实测电阻率, 单位为欧[姆]米 ($\Omega\cdot\text{m}$)
$R_{基线}$	基线对应的电阻率, 单位为欧[姆]米 ($\Omega\cdot\text{m}$)
S	孔隙中甲烷溶解度, 单位为立方米每立方米 (m^3/m^3)
S_g	含气饱和度, 用小数表示
S_w	含水饱和度, 以百分数表示
Δt	实测的声波时差, 单位为微秒每米 ($\mu\text{s/m}$)
Δt_p	纵波时差, 单位为微秒每米 ($\mu\text{s/m}$)
Δt_s	横波时差, 单位为微秒每米 ($\mu\text{s/m}$)
$\Delta t_{基线}$	基线对应的声波时差, 单位为微秒每米 ($\mu\text{s/m}$)

T_f	流体的声波时差，单位为微秒每米（ $\mu\text{s}/\text{m}$ ）
T_{ma}	泥页岩骨架声波时差，单位为微秒每米（ $\mu\text{s}/\text{m}$ ）
T_{sand}	砂岩的声波时差，单位为微秒每米（ $\mu\text{s}/\text{m}$ ）
TOC	计算的有机碳含量，用百分号表示（%）
V	孔隙水中的摩尔体积，单位为立方厘米每摩尔（ cm^3/mol ）
V_L	Langmuir统计的代表最大吸附能力，其物理意义是：在给定的温度下，页岩吸附甲烷达到饱和时的吸附气含量，单位为立方米每克（ cm^3/g ）
V_{sand}	地层中砂质含量，用小数表示
V_{sh}	泥质含量，单位为小数
σ_c	抗压强度，单位为兆帕[斯卡]（MPa）
σ_t	抗张强度，单位为兆帕[斯卡]（MPa）
ρ	页岩密度，单位为克每立方厘米（ g/cm^3 ）
ρ_b	岩性密度，单位为克每立方厘米（ g/cm^3 ）
μ	泊松比，用小数表示
θ	页岩孔隙度，用小数表示
ϕ_g	有效孔隙度，用小数表示
Φ_T	泥页岩总孔隙度，用小数表示

5 准备工作

5.1 资料收集

5.1.1 地质资料收集

区域地质资料收集应按SY/T 6451—2017中4.1条的规定执行。

5.1.2 本井资料收集

5.1.2.1 录井及钻井资料

录井及钻井资料收集应按SY/T 6451—2017中4.2.2条和4.2.3条的规定执行。

5.1.2.2 岩心分析资料

岩心分析资料收集应按DB61/T 576—2013中3.3.1条的规定执行。

5.1.3 邻井资料收集

了解邻井的测井施工概况，判断本井与邻井测井环境异同，收集邻井相同目的段测井数据。

5.2 测井系列优选

5.2.1 测井系列选择原则

选择原则如下：

- a) 能够减少与克服环境的干扰，识别岩性、划分储集层、评价储层流体性质；
- b) 对于探井所采集的测井信息，能够获取评价陆相页岩储层所需参数，满足建立评价解释模型，满足识别页岩气有利层段；

- c) 对于开发井所采集的测井信息,能够满足陆相页岩储层评价参数的计算,能够满足储层分类评价,能够对页岩可压裂性分析评价和分级压裂施工提供数据支撑。

5.2.2 陆相页岩气测井系列

5.2.2.1 陆相页岩气探井必测和选测项目

陆相页岩气探井必测和选测项目见表A.1。

5.2.2.2 陆相页岩气开发井必测和选测项目

陆相页岩气开发井包括直井、大斜度井以及水平开发井,必测和选测项目见表A.2。

5.3 测井设计编写

测井设计编写内容应按SY/T 6691—2014中第3章的规定执行。

5.4 测井现场作业要求

现场作业要求应按SY/T 6691—2014中第4章的规定执行。

5.5 原始测井资料质量要求

原始测井资料及回放资料应按SY/T 5132的规定执行。

6 测井数据处理

6.1 测井数据预处理

对测井曲线进行深度、幅度的检查与校正;斜井中进行垂直深度和垂直厚度校正;应对测井资料进行环境校正。

6.2 测井数据处理程序

常规及特殊测井项目的处理结果在参照已有标准过程中,要充分考虑陆相页岩气储层特点,合理对资料进行修正处理,测井数据的处理程序应按以下要求执行:

- a) 常规测井资料处理程序按SY/T 5360的规定执行;
- b) 多极子阵列声波测井资料的处理按SY/T 6937的规定执行;
- c) 电、声成像测井资料的处理按SY/T 6488的规定执行;
- d) 核磁共振测井资料的处理按SY/T 6617的规定执行。

6.3 计算参数类型

需要计算处理的参数包括但不限于:

- a) 物性参数:泥质含量、有机碳含量、孔隙度;
- b) 含气量参数:吸附气量、游离气量、溶解气量、总含气量;
- c) 岩石力学参数:泊松比、杨氏模量、剪切模量、体积模量等;
- d) 裂缝参数:裂缝产状、形态、裂缝密度、裂缝长度、水动力宽度等。

6.4 参数计算模型

6.4.1 物性参数计算模型

陆相页岩气储层物性参数的典型计算模型参见附录B。

6.4.2 含气量参数计算模型

陆相页岩气储层含气量参数的典型计算模型参见附录C。

6.4.3 岩石力学参数计算模型

陆相页岩气储层岩石力学参数的典型计算模型参见附录D。

6.4.4 地层裂缝参数计算

利用取心资料识别出的裂缝标定成像测井和阵列声波测井，获取测井裂缝响应特征，综合描述地层裂缝产状、形态等，并利用专业解释软件（如Geoframe、Express等）获取陆相页岩地层裂缝密度、裂缝长度、水动力宽度等参数。

7 结果验证

7.1 岩性验证

根据区域地质资料、岩心、岩屑录井等资料，对测井资料处理得到的矿物含量进行分析，对处理结果与地质资料有矛盾的层段应调整输入参数，重新处理。

7.2 物性验证

利用岩心物性分析资料，对测井资料处理得到的物性参数进行对比，若误差较大，应查找原因，重新处理。

7.3 含气性验证

利用现场解析实验和室内岩心含气性测定结果，对测井资料处理的含气性结果进行分析，若误差较大，应查找原因，重新处理。

8 测井资料综合解释

8.1 陆相页岩层系岩性解释

8.1.1 岩性划分

岩性划分如下：

- a) 富有机质页岩、泥页岩；
- b) 暗色泥岩、炭质泥岩夹层；
- c) 粉砂岩、细砂岩夹层；
- d) 粉砂质泥岩夹层；
- e) 碳酸盐岩夹层。

8.1.2 岩性测井解释

8.1.2.1 常规测井解释

用钻井取心和测井资料，经过岩心归位和统计，研究常规测井曲线对陆相页岩层系各类岩性的响应特征，用测井曲线响应特征识别页岩、砂岩、细砂岩、泥岩、灰岩等岩性。

8.1.2.2 特殊测井解释

针对常规测井无法识别的小于30cm的砂质纹层等薄层，应用电阻率成像测井、声波成像测井等薄层（一般大于2.5cm）高分辨测井进行识别；结合其他常规测井资料以及多极子阵列声波测井、核磁共振测井、元素俘获测井等特殊测井对陆相页岩层系的岩性进行识别解释。

8.2 储层解释

8.2.1 储层划分

根据测井资料处理得到的矿物组份含量、有机碳含量等参数，与岩心、岩屑及气测等录井资料结合，建立区域内以有机碳含量、脆性矿物、有机质成熟度为主要参数的有利储集段评价标准（参考值：总有机碳平均含量（TOC） $\geq 1\%$ ；脆性矿物平均含量 $\geq 30\%$ ；镜质体反射率（ R_o ） $\geq 0.5\%$ ，具体值视地区而定）。

8.2.2 储层分类

陆相页岩气储层分类应按DB61/T 1017—2016中第4章的规定执行。

8.3 储层可压裂性分析

通过测井资料处理得到的脆性矿物含量、泊松比、杨氏模量、剪切模量、体积模量、抗压强度、抗张强度，以及成像测井等获得的地应力方向、天然裂缝等参数，判断储层的可压裂性，给出工程压裂推荐层段及施工方案。

8.4 解释成果审核验收

测井解释验收人员应对解释内容、解释方法、解释结论及测井图件等进行审核复查，审核出现问题的资料解释单位应及时修改。

9 测井解释图表及报告要求

9.1 测井解释图表

9.1.1 资料清单

测井解释图表资料清单包括以下内容：

- a) 常规测井资料处理标准图和成果图；
- b) 测井解释成果表及数据表；
- c) 成像测井图、成像测井裂缝解释参数表；
- d) 阵列声波测井应包括全波图像、时差计算成果图、各向异性成果图、地层机械特性成果图、斯通利波分离图；
- e) 其他特殊测井解释图表。

9.1.2 图表内容

9.1.2.1 常规测井资料图表内容

常规测井资料图表内容包括以下内容：

- a) 图头信息应包括井情况信息，甲、乙方单位名称，解释人员和日期等；
- b) 测井解释层位，层号，层位深度，层厚等；
- c) 粘土类型及含量，硅质、钙质、长石、黄铁矿等含量；
- d) 孔隙度，渗透率，含水饱和度；
- e) 测井计算和岩心分析的总有机碳含量；
- f) 储层吸附气含量、游离气含量、总含气量等；
- g) 小层解释结论。

9.1.2.2 成像测井资料图表内容

成像测井资料图表内容包括以下内容：

- a) 动静态测井成果图像；
- b) 岩性、地层精细划分信息；
- c) 裂缝产状及描述，裂缝密度，水动力宽度、长度等参数；
- d) 地层界面产状、走向等；
- e) 主应力方向；
- f) 一些成像测井可以获得的其它地层信息，溶蚀孔洞、生物化石等。

9.1.2.3 阵列声波测井图表内容

阵列声波测井图表内容包括以下内容：

- a) 纵波、横波以及斯通利波的时差、幅度、波形、能量衰减系数等；
- b) 横波各向异性、平均各向异性等各向异性成果数据；
- c) 泊松比、破裂压力、杨氏模量、剪切模量、体积模量等机械特性数据；
- d) 斯通利波反射系数、斯通利波变密度值等测井工程指示成果。

9.2 测井解释报告

9.2.1 测井解释报告清单

测井解释报告清单包括以下内容：

- a) 常规测井解释报告；
- b) 特殊测井解释报告；
- c) 其他需要补充说明的测井解释报告。

9.2.2 测井解释报告内容

测井解释报告内容应按SY/T 5945—2016的要求编写。

附 录 A
(规范性附录)
陆相页岩气测井项目

A.1 陆相页岩气探井测井项目

陆相页岩气探井测井项目见表A.1。

表 A.1 陆相页岩气探井测井项目

类别	测井项目		说明
必测项目	裸眼井组合测井	双侧向-微球型聚焦 阵列感应 补偿中子 岩性密度 长源距声波或补偿声波 自然伽马 自然伽马能谱 自然电位 多极子阵列声波 四臂井径 井斜方位	1) 盐水钻井液时, 不进行阵列感应测井; 2) 对套管井测井必测项不做要求, 可根据实际生产开发需要选择测井项目。
	裸眼井标准测井	双侧向 自然伽马 补偿声波或长源距声波 四臂井径 井斜方位	
选测项目	裸眼井测井	声波成像 电阻率成像 核磁共振 井下电视成像 元素俘获 地层测试 井壁取心 VSP 地震测井	根据地区需要进行项目选择: 1) 针对地质及测井评价目标确定相应测井项目及测量井段; 2) 硬地层宜采用转进式井壁取心; 3) 套管井测井可根据后期开发生产需要进行选择。
	套管井测井	碳氧比测井 井温测井 压力测井 井下流量井	

A.2 陆相页岩气开发井测井项目

陆相页岩气开发井测井项目见表A.2。

表 A.2 陆相页岩气开发井测井项目

类别	测井项目		备 注
必测项目	裸眼井组合测井	双侧向-微球型聚焦 阵列感应 补偿中子 岩性密度 长源距声波或补偿声波 自然伽马能谱 自然伽马 自然电位 四臂井径	1) 盐水钻井液时，不进行阵列感应测井； 2) 对套管井测井必测项不做要求，可根据实际生产开发需要选择测井项目。
	裸眼井标准测井	井斜方位 四臂井径 自然伽马 自然电位 双侧向 长源距声波或补偿声波	
选测项目	裸眼井测井	多极子阵列声波 电阻率成像 声波成像 核磁共振 元素俘获 地层测试 VSP 地震测井	根据地区需要进行项目选择： 1) 裸眼井录取资料困难时，可以考虑选择碳氧比能谱测井； 2) 套管井测井可根据实际生产需要选择测井项目。
	套管井测井	碳氧比测井 井温测井 压力测井 流量测井	

附录 B

(资料性附录)

陆相页岩气储层物性参数典型计算模型

B.1 泥质含量计算模型

B.1.1 富有机质泥页岩层段

陆相页岩气储层富有机质泥页岩层段的计算模型如下：

a) 有中子和密度测井资料条件下按公式 (B.1) 中子-密度归一化方程计算泥质含量；

$$V_{sh} = A_1 \times e^{-1.0419DN} \dots\dots\dots (B.1)$$

b) 无中子和密度测井资料条件下可以通过岩心 X—衍射测试资料将自然伽马相对值进行参数标定，然后建立相关关系式计算陆相页岩泥质含量，可按公式 (B.2) 计算泥质含量。

$$V_{sh} = B_1 \times \Delta GR + C_1 \dots\dots\dots (B.2)$$

B.1.2 常规砂、泥、砂泥岩层段

按公式 (B.3)、(B.4) 计算泥质含量。

$$\Delta GR = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \dots\dots\dots (B.3)$$

$$V_{sh} = \frac{2^{M \times \Delta GR} - 1}{2^M - 1} \dots\dots\dots (B.4)$$

注：陆相页岩与海相页岩相比，非均质性强，物性变化快，岩性复杂，故泥质含量的计算应采用分层段、多模型，富有机质泥页岩计算方法是不同于常规砂、泥、砂泥岩地层

B.2 总有机碳含量 (TOC) 计算模型

B.2.1 铀含量单因素法

将岩心实测有机碳含量与测井铀含量进行线性相关性分析，建立一元测井解释模型计算总有机碳含量。

B.2.2 密度测井单因素法

将岩心实测有机碳含量与密度测井结果进行线性相关性分析，建立一元测井解释模型计算总有机碳含量。

B.2.3 多因素回归法

将岩心有机碳含量数据与自然伽马、声波时差、岩性密度、补偿中子、电阻率数据等测井数据进行相关性统计分析，选取两个或两个以上因素，建立多元线性的测井解释模型计算总有机碳含量。

B.2.4 $\Delta \lg R$ 算法(电阻率和声波时差重叠法)

在成熟度已知情况下,总有机碳含量可按公式(B.5)、公式(B.6)计算。

$$\Delta \lg R = \lg(R/R_{\text{基线}}) + D \times (\Delta t - \Delta t_{\text{基线}}) \dots\dots\dots (B.5)$$

$$TOC = 10^{(2.297 - 0.1688 \times LOM)} \times \Delta \lg R \dots\dots\dots (B.6)$$

B.2.5 元素俘获测井法

利用元素俘获测井获取元素含量,首先计算干酪根的体积百分比,然后根据干酪根类型确定干酪根和总有机碳含量的关系,进而计算总有机碳含量。

B.3 孔隙度计算模型

B.3.1 线性回归法

将岩心分析数据与补偿密度、补偿中子、声波时差等相关测井数据进行拟合关联,采用一元或多元回归方法计算孔隙度。

B.3.2 改进型怀利(Wyllie)公式法

按公式(B.7)计算泥页岩总孔隙度。

$$\Phi_T = \frac{CP \times (AC - T_{ma})}{T_f - T_{ma}} - \frac{V_{sand} \times (T_{sand} - T_{ma})}{T_f - T_{ma}} \dots\dots\dots (B.7)$$

B.3.3 核磁共振测井法

利用核磁共振测井获取的横向弛豫时间 T_2 谱资料计算地层总孔隙度、有效孔隙度值。

附 录 C
(资料性附录)
陆相页岩气储层含气性参数典型计算模型

C.1 吸附气含量计算模型

C.1.1 线性回归法

利用实验室得到的解析气含量与相关测井项建立经验关系式，计算吸附气含量。

C.1.2 等温吸附法

按公式 (C.1) 兰氏模型计算吸附气含量。

$$G_x = \frac{V_L \times P}{P_L + P} \dots\dots\dots (C.1)$$

C.1.3 TOC回归分析法

根据岩心统计TOC与实验吸附气量关系，建立一元回归公式，可按公式 (C.2) 计算吸附气含量。

$$G_x = A_2 \times TOC + B_2 \dots\dots\dots (C.2)$$

C.2 游离气计算方法

按公式 (C.3) 经典公式法计算游离气含量。

$$G_y = \frac{\phi_g \times S_g}{\rho \times B_g} \dots\dots\dots (C.3)$$

C.3 溶解气计算方法

按公式 (C.4)、公式 (C.5) 计算溶解气。

$$S = 10 \times 22.4 \times \frac{N}{V} \dots\dots\dots (C.4)$$

$$G_r = S \times \theta \times \frac{S_w}{\rho} \dots\dots\dots (C.5)$$

C.4 总含气量计算方法

按公式 (C.6) 计算总含气量。

$$G_z = G_x + G_y + G_r \dots\dots\dots (C. 6)$$

附 录 D
(规范性附录)
陆相页岩气储层岩石力学参数典型计算模型

D.1 泊松比

按公式 (D.1) 计算泊松比。

$$\mu = \frac{1}{2} \times \frac{\Delta t_s^2 - 2\Delta t_p^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2} \dots\dots\dots (D.1)$$

D.2 杨氏模量

按公式 (D.2) 计算杨氏模量。

$$E = \frac{\rho_b}{\Delta t_s^2} \times \frac{3\Delta t_s^2 - 4\Delta t_p^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2} \dots\dots\dots (D.2)$$

D.3 剪切模量

按公式 (D.3) 计算剪切模量。

$$G = \frac{\rho_b^2}{\Delta t_s^2} = \frac{E}{2 \times (1 + \mu)} \dots\dots\dots (D.3)$$

D.4 体积模量

按公式 (D.4) 计算体积模量。

$$K = \rho_b \times \frac{3\Delta t_s^2 - 4\Delta t_p^2}{3\Delta t_s^2 \times \Delta t_p^2} = \frac{E}{3 \times (1 - 2\mu)} \dots\dots\dots (D.4)$$

D.5 抗压强度

按公式 (D.5) 计算抗压强度。

$$\sigma_c = A_3 \times E \times (1 - V_{sh}) + B_3 \times E \times V_{sh} \dots\dots\dots (D.5)$$

D.6 抗张强度

按公式 (D.6) 或公式 (D.7) 计算抗张强度。

$$\sigma_t = 3.75 \times 10^{-4} \times E \times (1 - 0.78V_{sh}) \dots\dots\dots (D.6)$$

$$\sigma_t = \sigma_c / F \dots\dots\dots (D.7)$$
