

页岩气评价“六性关系”研究*

张作清¹ 郑 炆² 孙建孟²

(1. 华东石油局测井工程公司 江苏扬州 225007; 2. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院 山东青岛 266550)

摘要 页岩气储层的测井评价不同于常规储层。根据页岩气储层的特性,将常规储层的“岩性、物性、含油性、电性”四性关系研究,拓展为“矿物组分、储层物性、地化特性、含油气性、可压裂性、测井属性”六性关系研究。介绍了矿物组分的分析方法,给出了孔隙度、渗透率和饱和度的计算方法。对重要的地化参数,如总有机碳含量、镜质体反射率、热成熟度指数进行了研究,探讨了游离气和吸附气的计算方法及影响因素,分析了页岩的可压裂性,给出了测井属性的概念,以及测井属性对于页岩气测井评价研究的意义。

关键词 矿物组分 储层物性 地化特性 含油气性 可压裂性 测井属性

文章编号:1004-4388(2013)01-0065-06

中图分类号:TE122

文献标识码:A

0 引 言

页岩气是指主体位于暗色泥页岩或高碳泥页岩中,以吸附或游离状态存在于泥岩、高碳泥岩及其所夹砂质、粉砂质岩地层。部分天然气主体上以游离相态(大约 50%)存在于裂缝、孔隙及其它储集空间,部分以吸附状态(大约 50%)存在于干酪根、粘土颗粒及孔隙表面,极少量以溶解状态储存于干酪根、夹层状的粉砂岩等。在页岩气藏中,页岩气为天然气生成之后在源岩层内就近聚集的结果,表现为“原地”成藏模式。页岩体积百分比组成一般为 30%~50%的黏土矿物、15%~25%的粉砂和 1%~20%的有机质,具有页状和薄片状层理。页岩气的矿物组分较为复杂,除了高岭石、蒙脱石、伊利石等黏土矿物外,还混杂着石英、长石、云母等许多碎屑矿物和自身矿物^[1-3]。页岩气具有低孔、低渗的特点,页岩气储层本身的总孔隙一般小于 10%,有效孔隙度一般不到总孔隙度的一般,天然渗透率差,一般远小于 0.1 mD,产能主要依靠人工及天然裂缝。页岩气作为一种非常规油气藏,页岩气评价的内容和方法有别于常规油气藏。本文根据页岩气储层的特点,把传统的“岩性物性含油性电性”四性关系研究,拓展为“矿物组分、储层物性、地化特性、含油气性、可压裂性、测井属性”六性关系研究,并通过大量的文献调研,介绍了页岩气“六性关系”的分析

方法。

1 矿物组分分析

页岩气矿物组分比较复杂,通常我们利用岩石物理体积模型,根据矿物成分分析结果,可以将含气页岩组分模型简化为砂质、灰质、泥质、其他矿物组分和岩石孔隙五类组分。对于含气页岩,矿物含量的分析非常重要,它直接影响到后期压裂和射孔的选择^[4]。目前,页岩气矿物组分评价方法主要采用常规测井结合元素俘获测井或自然伽马能谱测井的方法^[5]。

1.1 元素俘获测井(ECS)法

元素俘获测井(ECS)是唯一能从岩石组分角度地层岩性识别的测井方法。ECS 元素测井通过探测器探测记录非弹性散射与俘获时产生的瞬发伽马射线,利用解谱分析可以得到 C、O、Si、Ca、Fe、Ti、Al、和 Gd 等地层元素的相对产额,通过特定的氧化闭合模型、聚类因子分析和能谱岩性解释可定量的得到地层的矿物含量^[6]。

ECS 俘获测井在实际应用中主要提供 Si、Ca、Fe、Ti、Al、Te 和 Gd 等地层元素。其中, Si 可以作为石英的指示元素, Ca 与方解石和白云石密切相关, S 和 Ca 可以作为石膏的指示元素; Fe 与黄铁矿和菱铁矿等相关; Al 与粘土含量相关,但是 Al 又与 Si、Ca、Fe 有关,因此可以利用 Si、Ca、Fe 计算粘土含

【基金项目】 国家油气重大专项(2011ZX05006-002)“精细勘探关键技术攻关与系统配套研究”、中石化先导项目(SG12063)“非常规页岩气、煤层气测井资料处理技术”。

【作者简介】 张作清,男,高级工程师,1963年出生,1984年华东石油学院毕业,长期从事测井技术与行政管理工作,近年来主持了非常规勘探测井项目。

量。通过对硅质碎屑岩心分析,建立粘土和 Si、Ca、Fe 的计算模型,即^[7]:

$$W_{\text{clay}} = 1.91(1 - 2.139 W_{\text{Si}} - 2.497 W_{\text{Ca}} - 1.99 W_{\text{Fe}}) \quad (1)$$

式中: W_{clay} ——地层中粘土含量, f;

W_{Si} ——ECS 测井得到的 Si 元素含量, f;

W_{Ca} ——ECS 测井得到的 Ca 元素含量, f;

W_{Fe} ——ECS 测井得到的 Fe 元素含量, f。

类似地,可以计算出其他矿物的含量。近年来发展的元素荧光录井法也是很重要的补充和替代手段。

1.2 自然伽马能谱测井(NGS)法

自然伽马能谱测井资料包括:地层总自然伽马(GR)、地层无铀伽马(KTh)及地层中铀(URAN)、钍(THOR)、钾(POTA)的含量。利用自然伽马能谱测井资料我们可以研究页岩气储层的地层特性、计算泥质含量、地层粘土矿物归类等^[8]。

岩石中的总自然伽马放射性随泥质含量的增加而增加,粘土矿物放射性最高,不同的粘土矿物的铀、钍、钾的含量各不相同,尤其是 Th/K 的比值。因此,可以做出页岩气地层的 $Th-K$ 交会图,根据 $Th-K$ 交会图版我们可以归类粘土矿物和定性的识别粘土矿物。

还可以利用岩心分析得到的粘土矿物含量与自然伽马能谱测井解释的 Th、U、K 含量进行多元回归,建立数学计算模型,从而获得随深度变化的高岭石、伊利石、蒙脱石和绿泥石四条连续变化的曲线^[9]。

1.3 三孔隙度法

含气页岩的矿物组分复杂,粘土及有机质对测井曲线影响严重,借鉴 $M-N$ 交会图中的 M 和 N 。张晋言、孙建孟等(2012 年)^[10] 利用三孔隙度测井两两交会重新构建了 TM 、 TN 、 TP 参数,因而建立了砂质和灰质含量数学计算模型(见(2)式和(3)式),在国内某油田中取得了良好的应用效果。

$$V_{\text{SAND}} = e^{-4.215 TM + 2.257 TN + 2.581 TP - 3.967} \quad (2)$$

$$V_{\text{LIME}} = e^{6.793 TM - 3.482 TN - 4.268 TP + 4.382} \quad (3)$$

$$TM = \log\left(0.3 \times \frac{\Delta T_f - \Delta T}{\rho_b - \rho_f}\right) \quad (4)$$

$$TN = \log\left(\frac{100 - \Phi_n}{\rho_b - \rho_f}\right) \quad (5)$$

$$TP = \log\left(10 \times \frac{\Delta T_f - \Delta T}{100 - \Phi_n}\right) \quad (6)$$

式中: V_{SAND} ——砂质含量;

V_{LIME} ——灰质含量;

ρ_b ——密度测井值, g/cm^3 ;

ρ_f ——流体密度, g/cm^3 ;

ΔT ——测井声波时差, $\mu s/ft$;

ΔT_f ——流体声波时差, $\mu s/ft$;

Φ_n ——中子测井值, %。

张晋言、孙建孟等(2012 年)^[10] 利用归一化后的密度和中子的差值 DN ,建立了泥质含量数学计算模型,即

$$V_{sh} = ae^{b \cdot DN} \quad (7)$$

式中: V_{sh} ——泥质含量, %;

DN ——归一化后密度与中子差值, f;

a, b ——地区拟合系数。

2 储层物性分析

2.1 孔隙度

孔隙度是计算游离气含量的重要参数之一,目前页岩气孔隙度的计算主要是使用传统的三孔隙度测井和 ECS 元素测井。由于含气页岩中含有一定的有机质,有机质的性质接近流体并占据着矿物骨架体积,因而我们可以将传统的三孔隙度算法修改为^[10]:

$$\phi_e = \phi_D - V_{\text{TOC}} \frac{\rho_{ma} - \rho_{\text{TOC}}}{\rho_{ma} - \rho_f} - V_{sh} \frac{\rho_{ma} - \rho_{sh}}{\rho_{ma} - \rho_f} \quad (8)$$

式中: ϕ_e ——有效孔隙度, f;

ϕ_D ——密度孔隙度, f;

V_{TOC} ——有机质体积, f;

ρ_{ma} ——骨架密度, g/cm^3 ;

ρ_{TOC} ——有机质密度, g/cm^3 。

由于页岩气的矿物组分复杂以及孔隙度非常小,传统的测井方法要准确的计算孔隙度比较困难。ECS 俘获测井的出现使页岩气孔隙度的计算得到了新的发展。Michael 等(2002)^[7] 通过岩心实验分析数据和 ECS 测井的测量数据,得到了骨架密度值、中子值和地层元素含量之间的关系式:

$$\rho_{ma} = 2.620 + 0.0490 W_{\text{Si}} + 0.2274 W_{\text{Ca}} + 1.993 W_{\text{Fe}} + 1.193 W_{\text{S}} \quad (9)$$

$$N_{ma} = 0.408 - 0.889 W_{\text{Si}} - 1.014 W_{\text{Ca}} - 0.257 W_{\text{Fe}} + 0.675 W_{\text{S}} \quad (10)$$

式中: N_{ma} ——骨架中子值, f;

W_{S} ——ECS 测井得到的 S 元素含量, f。

然后将 ρ_{ma} 和 N_{ma} 代入(11)式和(12)式,得到页岩气的密度孔隙度和中子孔隙度,即

$$\phi_D = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} \quad (11)$$

$$\phi_N = \frac{N_{ma} - N_b}{N_{ma} - N_f} \quad (12)$$

式中: ϕ_N ——中子孔隙度, f;

N_b ——中子测井值, f;

N_f ——流体中子值, f。

井眼条件好的前提下,核磁测井是准确获得地层孔隙度,同时获得有机质含量有效且准确的手段。

2.2 渗透率

页岩气储层的渗透率极低,常规的测井评价方法和实验方法难以进行页岩气储层渗透率的研究。目前,国外测试页岩气储层渗透率的新方法主要有原地测试法、改良脉冲衰减测试法、解吸流动法、美国 GRI 页岩岩心测定法^[11]。由于国内缺乏实验仪器和实验手段,对国外先进的岩石物理实验分析技术尚不能掌握,因而页岩气渗透率的评价还是一个有待解决的难题。

基于此,张晋言、孙建孟等^[10](2012)根据斯伦贝谢 ELANPLUS 中使用的 HERRON 形式,提出一种简单有效的页岩气渗透率计算方法,在国内某油田的实际应用中取得了良好的效果。考虑到不同矿物组分对地层渗透率的影响各不相同,在获得地层矿物组分含量的情况下,页岩气地层渗透率的数学计算模型为:

$$PERM = e^{0.076 V_{SAND} - 0.038 V_{sh} - 0.059 V_{LIME} - \log \frac{(1-\phi)^2}{\phi_c} + 0.895} \quad (13)$$

式中: $PERM$ ——求取的渗透率, mD;

V_{SAND} ——砂质含量, %;

V_{LIME} ——灰质含量, %;

ϕ_c ——有效孔隙度, %。

2.3 饱和度

页岩气地层的矿物组分复杂,传统的含水饱和度模型不适用于含气页岩含水饱和度的研究。Eastward 等(2011)^[12]介绍了用 Bardon-Pied(1969)改进的 Simandoux 含水饱和度模型评估初始总体积水,改进公式如下:

$$BVW = \sqrt{R_w \left(\frac{1}{R_i} - \frac{V_{CLAY}}{R_{CLAY}} \right)} \quad (14)$$

式中: BVW ——初始总体积水, f;

R_w ——地层水电阻率, $\Omega \cdot m$;

R_i ——地层电阻率, $\Omega \cdot m$;

V_{CLAY} ——粘土含量, f;

R_{CLAY} ——粘土电阻率, $\Omega \cdot m$ 。

由于不同矿物组分对地层水的吸附性和含量各不相同,张晋言、孙建孟等^[9]考虑到页岩气储层不同矿物组分对含水饱和度的影响,提出了矿物组分饱和度模型,即

$$S_w = -1.251 TOC + 1.596 V_{sh} - 1.574 V_{SAND} + 0.569 V_{LIME} + 5.631 \quad (15)$$

式中: S_w ——含水饱和度, %;

TOC ——有机碳体积含量, %。

3 地化参数评价

3.1 总有机碳含量

Passey 等(1990)^[13]给出了利用声波曲线和地层电阻率曲线重叠法计算有机碳含量(TOC)的数学表达式,该方法适用于碳酸盐和碎屑岩烃源岩。该方法是将合适的声波曲线和电阻率曲线叠加,在缺乏有机质的岩石中,这两条曲线彼此平行,并重合在一起,即定义为基线。基线确定后,则两条曲线间的距离在对数坐标上对数($\Delta \log R$)就确定了, $\Delta \log R$ 的计算公式为:

$$\Delta \log R = \log(R/R_{基线}) + 0.02(\Delta t - \Delta t_{基线}) \quad (16)$$

$$TOC = 10^{(1.875 - 0.834 R_o)} \times \Delta \log R + \Delta TOC \quad (17)$$

式中: $\Delta \log R$ ——两条曲线间的距离;

R ——测井仪实测电阻率, $\Omega \cdot m$;

$R_{基线}$ ——基线对应的电阻率, $\Omega \cdot m$;

Δt ——实测的声波时差, $\mu s/ft$;

$\Delta t_{基线}$ ——基线对应的声波时差, $\mu s/ft$;

0.02——每一个电阻率刻度所对应的声波时差($50 \mu s/ft$)的倒数;

ΔTOC ——有机碳背景值。

由于该方法需要先确定成熟度参数 R_o ,同时此方法并没有考虑密度对 TOC 的响应特征,操作又比较复杂,这就大大降低了它的实用性和计算精度。金强等(2003)^[12]提出在 Passey 的基础上提出了更加通用的模型,即声波、密度和电阻率模型。

$$TOC = (a \log R + b \Delta t + c) / \rho_b \quad (18)$$

式中: a 、 b 、 c ——模型系数(通过研究区岩心实验分析,采用最小二乘法拟合得到)。

研究发现,密度测井曲线与 TOC 有很好的对应关系。张晋言、孙建孟等^[13]应用岩心实验分析得到的岩石体积密度与 TOC 进行回归,建立了 TOC 和

体积密度的数学计算模型,取得了良好的实际应用效果,模型如下:

$$V_{TOC} = 20.97e^{(-14.05\rho_b)} \quad (19)$$

式中: V_{TOC} —— TOC 的体积含量(由 TOC 与 DEN 的乘积近似获得), %;

ρ_b ——密度测井值, g/cm^3 。

3.2 镜质体反射率

镜质体是泥盆纪以上沉积地层中的常见物质,它是高等植物木质素经过生物化学降解和凝胶化作用而形成的凝胶体。镜质体本身也是干酪根的一种类型,因而镜质体反射率(R_o)可以作为有机质成熟度和热演化的指标。镜质体反射率(R_o)是镜质体表面的反射光和入射光之比, R_o 的计算公式如下:

$$R_o = \frac{(n - N)^2 + n^2 k^2}{(n + N)^2 + n^2 k^2} \quad (20)$$

式中: R_o ——镜质体反射率;

n ——镜质体的折射率;

k ——镜质体的吸收率;

N ——介质的折射率。

镜质体反射率(R_o)随热演化程度的加深而变化明显,并且它随着埋藏深度的增加而增加,因此通常我们可以通过大量的干酪根分析化验数值与其对应的深度建立回归关系,得出 R_o 与深度的回归方程。 R_o 在电阻率、密度和中子曲线上都有一定的体现,Miller等(2010)^[15]认为当 R_o 在 1.8 ~ 2.0 范围内时,密度低值,地层电阻率高值达到 $100 \Omega \cdot m$; 当 $R_o > 4.5$ 时,密度高值,地层电阻率非常小。

3.3 热成熟度指数

热成熟度指数(I_m)为气源岩生烃潜力的重要指标,成熟度越高,生烃潜力越大。Hank Zhao等(2007)^[16]用中子、密度和电阻率等测井资料定义了一个热成熟度指数计算公式,此公式一直沿用至今。计算公式如下:

$$I_m = \sum \frac{N}{(\phi_{n9i} \times \sqrt{1 - S_{w75i}})} \quad (21)$$

$$S_{wi} = \left(\frac{R_w}{\phi_{n9i}^m R_i} \right)^{1/2} \quad (22)$$

$$\phi_{n9i} = \Phi_d - 0.09 \quad (23)$$

式中: N ——取样深度处密度孔隙度 $\geq 9\%$ 、含水饱和度 $\leq 75\%$ 时的数据样本总数;

ϕ_{n9i} ——每个取样深度的密度孔隙度都 $\geq 9\%$ 时的中子孔隙度;

S_{w75i} ——每个取样深度的密度孔隙度 \geq

9%、含水饱和度 $\leq 75\%$ 时的含水饱和度;

ϕ_{n9i} ——密度孔隙度 $\geq 9\%$ 的密度孔隙度。

4 含气量评价

页岩气主要包括游离气和吸附气,还有少部分溶解气。目前,页岩气含量的评价主要研究的是游离气和吸附气含量。游离气是指以游离状态赋存于孔隙和微裂缝中的天然气,吸附气是指吸附于有机质和粘土矿物表面的天然气。

4.1 游离气

游离气的含量与储层的地层压力、温度、孔隙度和含水饱和度有关,游离气计算公式如下^[17]:

$$G_{\text{游离}} = \frac{p_2 T_1 m_{\text{岩}} \phi_{\text{孔}} (1 - S_w)}{p_1 T_2 \rho_{\text{岩}}} \quad (24)$$

式中: $G_{\text{游离}}$ ——游离气含量, m^3/t ;

p_1 ——地面状态下的压力, Pa;

p_2 ——地层下某深度处的静水压力, Pa;

$m_{\text{岩}}$ ——岩石的质量(取 1t), t;

T_1 ——常温(20℃)对应的热力学温度, K;

T_2 ——地下某深度处对应的热力学温度, K。

4.2 吸附气

4.2.1 吸附气的影响因素

吸附气含量的计算是页岩含气量评价的关键,吸附气含量与储层的有机碳的质量分数、成熟度、温度、压力、含水量以及矿物组分都有一定的关系。可以看出,影响吸附气含量的因素比较多。

(1) 有机质和成熟度

有机碳含量和成熟度是影响页岩气吸附能力的两个重要因素^[18]。有机质含有大量的微孔隙,微孔隙具有较大的内表面积,对气体的吸附能力较强,因此有机质是吸附气的核心载体。 TOC 的大小和吸附气的含量密切相关, TOC 越高,吸附气含量越高。成熟度决定了有机质的演化阶段和生烃潜力,成熟度越高,吸附气含量越大。

(2) 温度和压力

温度和压力是影响吸附气含量的外部控制因素,其对页岩吸附气含量有着显著的影响^[19]。研究表明,吸附气含气量随着压力的增加而增加,其中,吸附气含量在低压情况下增加较快,当压力值达到一定程度时,随着压力的增大吸附气含量变化不大。温度的升高,分子热运动越剧烈,降低了有机质对气体的吸附能力,因此,温度升高,吸附气含量减少。

(3) 含水饱和度和矿物组分

含水饱和度的增加,能够使页岩的吸附气含量减少。随着含水量的增加,页岩的孔隙空间被占据,造成了页岩吸附能力的下降,因此含水饱和度和页岩吸附气呈负相关。此外,干岩石的吸附气含量明显高于湿岩石。

页岩中的矿物成分(主要包括黏土矿物、石英、黄铁矿)能够影响页岩吸附气含量的大小。石英含有较多的微孔隙结构和较大的表面积,因而对气体的吸附能力较强。随着石英含量的增加,页岩气含量呈现出上升的趋势。黄铁矿有利于有机质的保存,因此黄铁矿的含量和吸附气含量呈正相关的关系。而黏土矿物和吸附气含量之间的关系并不大,即在 TOC 相似的情况下,黏土含量的变化对吸附气含量的影响不大^[20]。

4.2.2 吸附气含量评价方法

吸附气含量的评价方法主要有解吸法、等温吸附法和测井解释法。解吸法是页岩含气量评价的直接方法;等温吸附法和测井解释法是含气量测试的间接方法。

(1) 解析法

解吸法是指通过岩心和有代表性的岩屑测定实际含气量,解吸法测定的含气量包括损失气、解吸气含量和残余气量三部分。损失气是指岩石从井下提到地面到装罐密封之前这段时间从岩石解吸的气体,这部分气体无法直接测量,只能通过理论计算获得。解吸气是指样品装罐后用量管测量的气体,剩下的不能解吸出来的气体我们成为残余气。

目前,损失气量的测量方法主要包括 USBM 直接法、改进的直接法、史密斯-威廉斯法和曲线拟合法,其基本原理都是 USBM 直接法^[21]。USBM 直接法原理是损失气量与解吸时间的平方根成正比,利用解吸前 4h 的数据,可以恢复损失气量。

残余气量的确定的方法是将岩心粉碎到一定数目一下,然后放入和储层温度相同的恒温装置中自然解吸,直到每个样品一周内平均每天解吸量不大于 10 cm³ 时,解吸结束,计算残余气量。

提高解吸法评价页岩气含量的精度度,主要从以下几点着手:①设法减少损失气量;②完善损失气量的计算方法;③提高残余气量的准确性。

(2) 等温吸附法

页岩吸附气含量的等温吸附模拟主要是借鉴煤层气中吸附气的评价方法,它可以用来评价有机质

吸附天然气的最大能力。通过等温吸附模拟实验,建立吸附气和温度、压力的关系模型。实验过程是在恒温条件下,测试不同压力下的气体吸附量,有压力和吸附量绘制兰格缪尔等温线,最后根据兰格缪尔公式^[22]计算吸附气含量,计算公式如下:

$$G_s = \frac{V_l \times P}{P + P_l} \quad (27)$$

式中: G_s ——吸附气含量, ft³/t;

V_l ——兰格缪尔体积(无限大压力下的气体体积), ft³/t;

P ——储层压力, psi;

P_l ——兰格缪尔压力(1/2 兰格缪尔体积所对应的压力), psi。

(3) 测井解释法

测井解释法是通过测井资料获得页岩含气量的方法。通过测井评价技术获得页岩气含水饱和度、含气饱和度、矿物含量、有机碳含量、地层温度和压力等参数,利用含气量和测井参数之间的关系,建立计算模型或评价方法,最后给出页岩含气量。

5 可压裂性研究

5.1 岩石力学参数的计算

页岩气储层具有孔隙度低、渗透率极低的特点,因此页岩气储层形成工业产能的关键技术就是水平井及多级压裂改造等工艺技术。利用测井资料我们可以得到页岩气储层的弹性力学参数、强度参数以及地层应力的状态,这些参数为储层的压裂改造提供有力的依据。

岩石力学参数的计算首先要得到地层的纵、横波时差信息。其中,横波时差可以由多级子阵列声波测井资料、声波全波列测井资料和阵列声波测井资料获取。对于国内的许多老井,未进行此类的测井,这样只有通过常规测井的纵波时差获取横波时差。Cristensen(1960)^[23]根据实测资料给出了横波和纵波关系式:

$$\Delta t_s = \frac{\Delta t_p}{\left(1 - \frac{1.15 \times (1.0/\rho_b + (1.0/\rho_b)^3)}{e^{1.0/\rho_b}}\right)^{1.5}} \quad (28)$$

式中: Δt_s ——纵波时差, $\mu\text{s}/\text{ft}$;

Δt_p ——横波时差, $\mu\text{s}/\text{ft}$ 。

在获得纵、横波时差以后,结合地层和骨架体积密度测井资料以及地层中泥质含量,根据弹性波动理论,可以得出地层的弹性力学参数(剪切模量、体

积模量、动静态杨氏模量、动静态泊松比和 Biot 系数)和岩石强度参数(包括抗拉强度、抗压强度、内摩擦角和初始剪切强度),进一步计算地层的破裂压力、坍塌压力以及地层应力,从而为地应力分析和压裂改造奠定了基础。

5.2 可压裂性分析

页岩的可压裂性是页岩在水力压裂中具有能够被有效压裂的性质^[24]。理想的水力压裂的诱导缝应该是其高度等于目的层的厚度,其穿透地层的深度(翼长)与其高度比非常大。翼长越长,产能越大。页岩的可压裂性的影响因素主要包括页岩脆性、脆性矿物含量、地层垂直应力和水平应力。

其中,页岩脆性是影响页岩可压裂性最重要的因素。页岩脆性包括泊松比和杨氏模量,泊松比反映了页岩在压力下破裂的能力,杨氏模量反映了压裂后保持裂缝的能力。页岩杨氏模量越高、泊松比越低,脆性越高,可压裂性越高。

脆性矿物主要包括石英和长石,脆性矿物的含量越高,岩石脆性越高,在水力压裂和构造运动中越易形成诱导缝和天然裂缝。

岩石一般受到3个相互垂直互补相等的主应力作用,垂直应力和2个水平应力(最大水平主应力、最小水平主应力)。当垂直应力大于水平应力时,压裂将产生垂直裂缝;当垂直应力小于水平应力时,压裂将产生水平裂缝。

6 测井属性

测井属性是指将测井数据经过各种数学变换而推导出的有关测井曲线的几何形态特征、统计学特征及物理特征的特殊度量值。一切从测井曲线上提取的参数都可以称之为测井属性。例如,前文提到的 TM 、 TN 、 TP 和 DN 参数,都可以称之为测井属性参数。每一种测井属性都是从不同的角度反映了储层特征,与储层特征、岩性、物性、孔隙流体性质等有密切关系。根据页岩气储层的地质特征,提取合适的测井属性参数,能够更准确地评价页岩气储层参数,推动页岩气测井评价的进展。

7 结束语

与常规油气藏相比,页岩气测井评价涉及的技术和内容更加广泛和复杂。常规油气储层,主要评价的储层参数有孔隙度、渗透率、含油气饱和度等参数;而页岩气储层评价的内容还包括矿物组分评价、

地化参数评价和可压裂性研究等。

目前,我国页岩气测井评价研究尚处于起步的阶段。由于缺乏基础实验研究和关键的测井评价技术,我国的页岩气测井评价研究还不成熟。加大力度开展岩石物理实验,将加快我国页岩气储层的测井评价研究。

参 考 文 献

- [1] 聂海宽,张金川.页岩气藏分布地质与规律[J].中南大学学报(自然科学版),2010,41(2):700-708.
- [2] 刘洪林,王莉,王红岩,等.中国页岩气勘探开发适用技术探讨.油气井测试,2009,18(4):68-71.
- [3] 潘仁芳,赵明清,伍媛.页岩气测井技术的应用[J].中国科技信息,2010,7:16-18.
- [4] 郝建飞,周灿灿,李霞,等.页岩气地球物理测井评价综述[J].地球物理学进展,2012,27(4):1624-1632.
- [5] 侯颖,邹长春,杨玉卿.页岩气储层矿物组分测井分析方法[J].工程地球物理学报,2012,9(5):607-613.
- [6] 刘绪刚,孙建孟,郭云峰.元素俘获测井在储层综合评价中的应用[J].测井技术,2005,29(3):236-240.
- [7] Herron M Michael, Herron L Susan, James A et al. Real-Time Petro-physical Analysis in Siliciclastics from the Integration of Spectroscopy and Triple-Combo Logging[C].//SPE77631, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas:2002.
- [8] 董兰屏,庞巨丰.自然伽马能谱测井原理及其应用.计量与测试技术,2009,36(9):50-53.
- [9] 黄茜,刘菁华,王祝文.自然伽马能谱测井资料在确定粘土矿物含量中的应用[J].吉林大学学报(地球科学版),2007,37(Sup):143-150.
- [10] 张晋言,孙建孟.利用测井资料评价泥页岩油气“五性”指标[J].测井技术,2012,36(2):146-153.
- [11] 李智峰,李治平,王扬,等.页岩气储层渗透性测试方法对比性分析[J].断块油气田,2011,18(6):761-764.
- [12] Eastwood L R, Ursula H. Log Model Development for the Bossier and Haynesville Shales[C].//SPWLA 52nd Annual Logging Symposium, Colorado:2011.
- [13] Passey Q R, Creaney S, Kulla J B et al. A Practical Model for Organic Richness from Porosity and Resistivity Logs[J].AAPG Bulletin,1990,74(12):1777-1794.
- [14] 朱有光,金强,张林晔.用测井信息获取烃源岩的地球化学参数研究[J].测井技术,2003,27(2):104-109.
- [15] Miller A M, Jenkins Creties et al. Applying Innovative Production Modeling Techniques to Quantify Fracture Characteristics, Reservoir Properties, and Well Performance in Shale Gas Reservoirs[C].//SPE Eastern Regional Meeting, 2010(10), Morgantown, West Virginia, USA:12-14.
- [16] Zhao Hank, Natalie B Givens, Brad Curtis. Thermal Maturity of the Barnett Shale Determined from Well-Log Analysis[J].AAPG Bulletin,2007,91(4):535-549.

(下转74页)

(2)提出新的抽油杆柱设计步骤,证明了以底部杆柱不受压失稳为杆柱应力设计目标的合理性;在此基础上,提出了新的玻璃钢杆柱系统设计步骤并给出了系统优化设计框图。

(3)给出玻璃钢混合杆柱系统的有限元诊断数学模型,对比当前比较常用的阻尼系数计算方法,提出阻尼系数的修正计算方法,为玻璃钢混合杆柱抽油系统诊断提供理论基础。

(4)采用玻璃钢混合杆柱方法优化设计实际生产井,目前生产井运转良好,各项指标满足要求,证明了本文提出的优化设计方法的可行性。

5 致 谢

本文在完成过程得到了中国石油大学海外研究中心、西南石油大学采油教研室的各位老师的大力帮助,在此对他们的无私帮助致以崇高的敬意。

参 考 文 献

- [1] Hick H W. Using Fiberglass Sucker Rod in Deep Wells [C]. SPE Deep Drilling and Production Symposium, 6 - 8 April 1986, Amarillo, Texas. Paper Number: 14974 - MS.
- [2] 吴则中, 田丰, 李策, 等. 玻璃钢抽油杆的发展及应用[J]. 石油矿场机械, 1991, 20(5): 36 - 44.
- [3] 檀朝东, 董山英, 楼湘. 玻璃钢 - 钢混合杆抽油系统设计问题综述[J]. 石油机械, 2001, 29(12): 51 - 54.
- [4] 许亚芬, 崔晓华, 许凤锦. 玻璃钢抽油杆柱的设计与应用[J]. 大庆石油学院学报, 2001, 12, 25(4): 79 - 81.
- [5] Gibbs S G. A General Method For Predicting Rod Pumping System Performance [C]. SPE Annual Fall Technical Con-

ference and Exhibition, 9 - 12 October 1977, Denver, Colorado, Paper Number: 6850 - MS.

- [6] Schafer D J, Jennings J W. An Investion of Analytical and Numerical Sucker Rod Pumping Mathemetical Models[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 27 - 30 September 1987, Dallas, Texas, Paper Number: 16919 - MS.
- [7] 栾国华, 杨志, 于志刚, 等. 玻璃钢 - 钢混合抽油杆合理组合范围分析[J]. 石油矿场机械, 2008, 37(7): 46 - 49.
- [8] 李健康, 郭益军, 谢文献. 有杆泵井管杆偏磨原因分析及技术对策[J]. 石油机械, 2000, 28(6): 32 - 33.
- [9] 张亚明, 林铁林, 焦恩平. 斜井防偏磨抽油杆柱工艺研究与应用[J]. 油气井测试, 2009, 18(2): 66 - 67, 70.
- [10] 董世民. 水驱抽油机井管杆偏磨原因的力学分析[J]. 石油学报, 2003, 24(4): 108 - 112.
- [11] 刘梅娣, 王建国, 谢雯晴, 等. 抽油机井综合防偏磨技术研究与应用. 油气井测试, 2010, 19(1): 63 - 65.
- [12] 李颖川. 采油工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001: 31 - 42.
- [13] 万仁溥. 采油工程手册(上册)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
- [14] 孙大同, 张琪. 有杆泵抽油系统最优化设计的研究[J]. 石油大学学报, 1990, 14(4): 29 - 36.
- [15] 崔振华, 余国安, 安锦高, 等. 有杆抽油系统[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
- [16] 程顶胜, 刘松, 吴培红. 塔里木盆地石炭系生烃潜力的模糊数学综合评价[J]. 石油学报, 2001, 1, 21(1): 34 - 38.
- [17] 崔振华, 徐秀芬, 董世民. 模糊数学在机采方式优选中的应用[J]. 石油学报, 1995, 1, 16(1): 105 - 110.

本文收稿日期: 2010 - 07 - 26

修改稿返回日期: 2012 - 11 - 12 编辑: 刘振庆

(上接 70 页)

- [17] 潘仁芳, 陈亮, 刘朋丞. 页岩气资源量分类评价探讨[J]. 石油天然气学报, 2010, 7: 16 - 18.
- [18] 聂海宽, 唐玄, 边瑞康. 页岩气藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测[J]. 石油学报, 2009, 30(4): 484 - 491.
- [19] 李武光, 杨胜来, 徐晶, 等. 考虑地层温度和压力的页岩吸附气含量计算新模型[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(4): 791 - 796.
- [20] 刘洪林, 王红岩. 中国南方海相页岩吸附特征及其影响因素[J]. 天然气工业, 2012, 32(9): 5 - 9.
- [21] 唐颖, 张金川, 刘珠江, 等. 解析法测量页岩含气量及其方法的改进[J]. 天然气工业, 2011, 31(10): 108 - 112.

- [22] Hawkins J M, Schraufnagel R A, Olszewski A J. Estimating Coaled Gas Content and Sorption Isotherm Using Well Logging Data [C]. //SPE24905, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Washington DC: 1992.
- [23] 杨秀娟, 张敏, 同相桢. 基于声波测井信息的岩石弹性力学参数研究[J]. 石油地质与工程, 2008, 22(4): 39 - 42.
- [24] 唐颖, 刑云, 李乐忠, 等. 页岩储层可压裂性影响因素及评价方法[J]. 地质前缘, 2012, 19(5): 356 - 363.

本文收稿日期: 2012 - 08 - 10 编辑: 王 军

作者: 张作清, 郑炆, 孙建孟
作者单位: 张作清(华东石油局测井工程公司 江苏扬州225007), 郑炆, 孙建孟(中国石油大学(华东)地球科学与技术学院 山东青岛266550)
刊名: 油气井测试
英文刊名: Well Testing
年, 卷(期): 2013, 22(1)

参考文献(24条)

1. 聂海宽;张金川 [页岩气藏分布地质与规律](#) 2010(02)
2. 刘洪林;王莉;王红岩 [中国页岩气勘探开发适用技术探讨](#) 2009(04)
3. 潘仁芳;赵明清;伍媛 [页岩气测井技术的应用](#) 2010
4. 郝建飞;周灿灿;李霞 [页岩气地球物理测井评价综述](#) 2012(04)
5. 候颀;邹长春;杨玉卿 [页岩气储层矿物组分测井分析方法](#) 2012(05)
6. 刘绪刚;孙建孟;郭云峰 [元素俘获测井在储层综合评价中的应用](#) 2005(03)
7. Herron M Michael;Herron L Susan;James A [RealTime Petro-physical Analysis in Siliciclastics from the Integration of Spectroscopy and Triple-Combo Logging](#) 2002
8. 董兰屏;庞巨丰 [自然伽马能谱测井原理及其应用](#) 2009(09)
9. 黄茜;刘菁华;王祝文 [自然伽马能谱测井资料在确定粘土矿物含量中的应用](#) 2007(Sup)
10. 张晋言;孙建孟 [利用测井资料评价泥页岩油气“五性”指标](#) 2012(02)
11. 李智峰;李治平;王扬 [页岩气储层渗透性测试方法对比性分析](#) 2011(06)
12. Eastwood L R;Ursula H [Log Model Development for the Bossier and Haynesville Shales](#) 2011
13. Passey Q R;Creaney S;Kulla J B A [Practical Model for Organic Richness from Porosity and Resistivity Logs](#) 1990(12)
14. 朱有光;金强;张林晔 [用测井信息获取烃源岩的地球化学参数研究](#) 2003(02)
15. Miller A M;Jenkins Creties [Applying Innovative Production Modeling Techniques to Quantify Fracture Characteristics, Reservoir Properties, and Well Performance in Shale Gas Reservoirs](#)
16. Zhao Hank;Natalie B Givens;Brad Curtis [Thermal Maturity of the Barnett Shale Determined from Well-Log Analysis](#) 2007(04)
17. 潘仁芳;陈亮;刘朋丞 [页岩气资源量分类评价探讨](#) 2010
18. 聂海宽;唐玄;边瑞康 [页岩气藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测](#) 2009(04)
19. 李武光;杨胜来;徐晶 [考虑地层温度和压力的页岩吸附气含量计算新模型](#) 2012(04)
20. 刘洪林;王红岩 [中国南方海相页岩吸附特征及其影响因素](#) 2012(09)
21. 唐颖;张金川;刘珠江 [解析法测量页岩含气量及其方法的改进](#) 2011(10)
22. Hawkins J M;Schraufnagel R A;Olszewski A J [Estimating Coaled Gas Content and Sorption Isotherm Using Well Logging Data](#) 1992
23. 杨秀娟;张敏;闫相祯 [基于声波测井信息的岩石弹性力学参数研究](#) 2008(04)
24. 唐颖;刑云;李乐忠 [页岩储层可压裂性影响因素及评价方法](#) 2012(05)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_yqjcs201301019.aspx