

页岩气水平井含气性定量评价方法研究 ——以涪陵页岩气田为例

张梦吟

中国石化江汉油田勘探开发研究院

摘 要 页岩气水平井含气性评价是页岩气开发评价的难点之一。以四川盆地涪陵页岩气田奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩为主要研究对象,依据大量页岩气水平井钻井及生产数据,结合研究区探井含气性主控因素的分析结果,优选出4项有效评价页岩气水平井含气性的参数:全烃校正值、孔隙压力系数、测井解释孔隙度及测井解释含气量。选取涪陵页岩气田焦石坝区块的压裂施工参数相当的53口水平井作为样本井,采用赋值法和极大值法对各项参数值统一量纲,再通过灰色关联系数方法计算各项参数的权重,最终建立水平井含气性计算方程。基于计算结果的概率累积曲线,建立了页岩气水平井含气性分级模型。整体上形成了一套能够定量评价页岩气水平井含气性的方法体系。对研究区样本井之外的页岩气水平井进行含气性定量评价,结果与实际生产数据吻合度较高,证实该方法能较好地反映页岩气水平井的含气能力,可以有效预测气井测试产量。

关键词 页岩气; 水平井; 含气性; 评价; 涪陵页岩气田

中图分类号: TE132.2

文献标识码: A

0 引言

页岩的含气性是页岩气富集高产的主控因素之一,它直接影响着页岩气田是否具有商业开发价值。因此,开展页岩含气性评价的相关研究,是页岩气高效勘探及开发中的一项重要内容。

页岩气有游离、吸附和溶解3种赋存形式^[1]。页岩含气性的影响因素较多,既有页岩自身因素(如页岩有机质类型、有机碳含量、热演化程度、裂缝、孔隙度、矿物组成、厚度等),也有外部因素(如页岩的埋深、温度、压力、湿度等)^[2]。目前国内外通常采用取心现场实测或者实验室测试的方法对页岩进行含气性评价^[3-4],但这些实验方法往往具有如下问题:实验研究成本高,周期长;实验室测试得到的主要是吸附气含量,忽略了游离气对含气量的贡献;对于现场实测过程中所损失气的计算往往很难准确化,且实测含气量受取心过程中多方面因素的影响,不同井获得的含气量可对比性不强,难以开展盆地范围内含气性的评价。虽然现今含气性的表征方法有很多^[5-8],但页岩含气性评价指标及标准仍在探索中。另外,页岩

气开发主要采用大斜度水平井钻探,对于页岩气水平井的含气性评价方法目前尚未有效开展。而且,由于页岩储层非均质性较强,室内分析化验资料也无法有效评价水平井的含气能力,因此,开展页岩水平井含气性的评价至关重要。

作为四川盆地涪陵页岩气田主力气层的奥陶系五峰组—志留系龙马溪组,以深水陆棚相沉积为主,长期稳定的深水还原沉积环境,形成了一套平面展布相对稳定、含气潜力高的黑色页岩,厚度介于83~102 m,有机碳含量大于2.5%。研究区经历了多期构造改造,现今表现为“侏罗山式”的隔档式褶皱,发育多层次滑脱构造,具有明显的南东强北西弱、南东早北西晚的递进变形特征^[9]。复杂的构造活动,导致页岩含气性在平面上存在一定差异。

根据涪陵页岩气田焦石坝区块一期产能建设区五峰组—龙马溪组页岩气藏3年的开发实践,结合探井室内分析化验资料,摸索出以实测含气量、气测显示、含气饱和度、孔隙度、电阻率、孔隙压力系数及有机碳含量作为表征和评价页岩含气性的指标,进一步结合大量页岩气水平井的生产数据,对它们进

收稿日期: 2018-11-01; 改回日期: 2018-12-27; 网络发表日期: 2019-02-26

本文受国家科技重大专项“涪陵页岩气开发示范工程”(编号:2016ZX05060)资助

第一作者: 张梦吟,助理研究员,2012年毕业于中国石油大学(北京)地质工程专业,现从事页岩气地质评价工作。通信地址: 430223 湖北省武汉市洪山区大学园路18号江汉油田研究院; E-mail: 178591093@qq.com

行优选并处理后得到有效评价页岩气水平井含气能力的多项参数,通过灰色关联系数方法计算各项评价参数的权重,建立了页岩气水平井含气性分级模型,形成了一套能够定量评价页岩气水平井含气性的方法体系。通过有效表征页岩气水平井的含气性,分析和预测页岩气水平井的实际生产能力,对扎实推进页岩气田产能建设和合理开发页岩气资源具有积极作用。

1 水平井含气性评价参数优选及处理

依据盆地地质情况,通过调研前人研究成果,结合焦石坝区块内直井的与含气性相关的电测、分析化验等资料分析,认为全烃显示、测井解释含气量、电阻率、孔隙压力系数、孔隙度、含水饱和度、有机碳含量为页岩含气性的主要评价参数。选择研究区内压裂施工条件相当的53口水平井,将上述各项参数与试气段长度1500m归一化无阻流量建立相关关系。要说明的是,为排除试气段长度对页岩气井无阻流量的影响,本文所涉及的相关无阻流量值均换算到长度1500m水平段所对应的无阻流量值。结果表明:全烃显示、孔隙压力系数、孔隙度、测井解释含气量这4项参数,与测试无阻流量之间均存在一定程度的相关性,其余3项参数与测试无阻流量之间基本不具

有相关关系。由此优选出全烃显示、孔隙压力系数、孔隙度、测井解释含气量这4项能较好评价页岩气水平井含气性的参数,并对其进行相关处理,保证页岩气水平井含气性定量评价的准确性。

1.1 气测全烃校正

气测录井是天然气勘探中判别岩层含油气性的常用方法。从原理上来看,气测录井资料能够直观地反映出页岩地层纵向上总含气性的差异,可量化评价单位体积内页岩的含气性。但在实际操作过程中,影响气测录井准确性的因素很多,如钻井方式、泥浆密度等。根据现场经验,使用气测全烃值开展量化评价,要结合泥浆密度、钻时进行综合分析,为此,笔者建立了全烃校正公式:

$$Q_{\text{全烃校正}} = Q_{\text{全烃}} \cdot \rho / t \quad (1)$$

式中: $Q_{\text{全烃校正}}$ 为全烃校正值, $\text{g}/(\text{min} \cdot \text{cm}^2)$; $Q_{\text{全烃}}$ 为气测录井全烃值, %; ρ 为泥浆密度, g/cm^3 ; t 为钻时, min/m 。

校正后的全烃值与页岩气水平井1500m归一化测试无阻流量交会图表明(图1a),二者之间存在明显的正相关关系,且具有分段性,因此选取气测全烃校正值为水平井含气性评价参数之一。

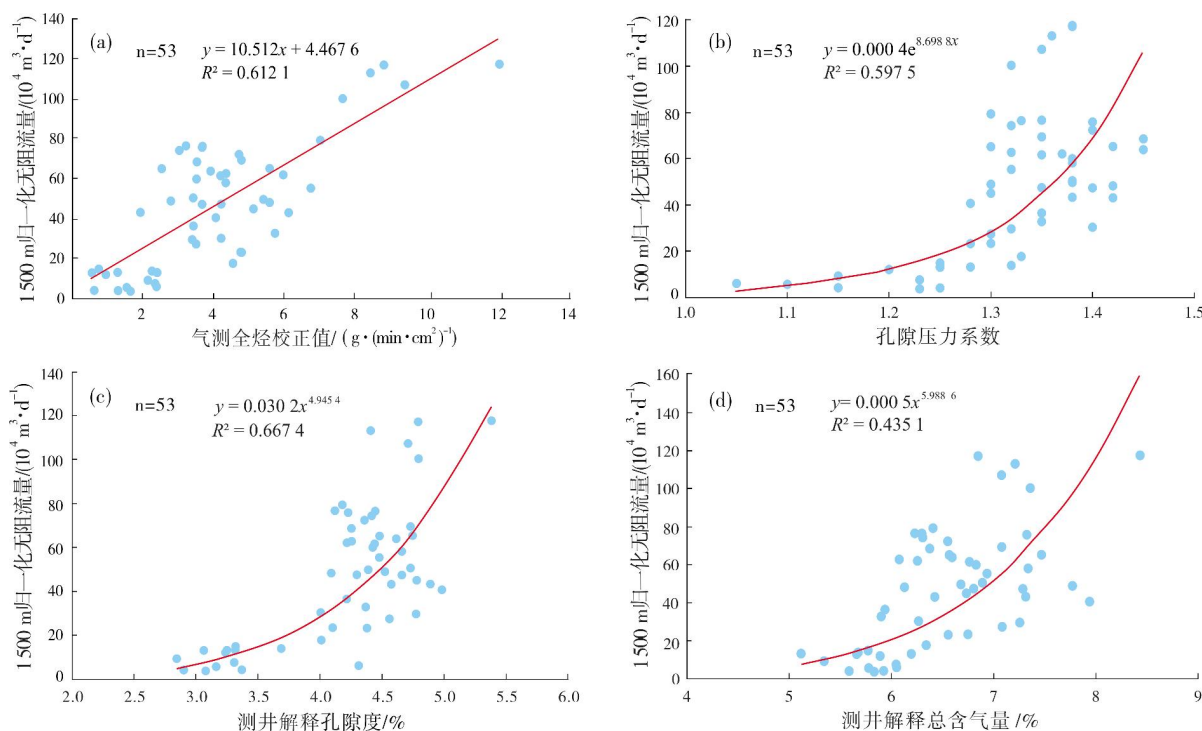


图1 涪陵页岩气田焦石坝区块页岩气水平井归一化无阻流量与各项含气性评价指标的关系

1.2 孔隙压力系数

目前孔隙压力系数主要根据地震预测获得^[10]。首先,综合利用测井、录井等资料计算出井点的孔隙压力系数及实测压力数据,并把它作为地震预测孔隙压力系数的控制点,完成单井地层压力预测;第2步,以单井预测结果为标准,参照声波测井速度,对地震数据体开展高精度、高密度的速度谱解释,得到高精度的层速度体;第3步,根据测井资料拟合出Gardner系数,应用Gardner公式,利用地震层速度求取地震密度,再用测井密度校正地震密度,然后进行地震密度反演得到密度数据体;第4步,通过对密度数据体进行积分,求得上覆地层压力;最后,通过地震速度伊顿(Eaton)法开展地层孔隙压力预测,以求得气田区孔隙压力系数。预测地层孔隙压力公式如下:

$$p_p = p_{op} - (p_{op} - p_w) \left(\frac{v_{inst}}{v_n} \right)^N \quad (2)$$

式中: p_p 为预测地层孔隙压力, MPa; p_{op} 为静岩压力, MPa; p_w 为静水压力, MPa; v_{inst} 为地层实测声波速度, m/s; v_n 为正常压实的地层速度, m/s; N 为幂指数, 无量纲。

孔隙压力系数与页岩气水平井1500 m归一化测试无阻流量交会图表明(图1b), 二者之间存在明显的正相关关系, 因此选取孔隙压力系数为水平井含气性评价参数之一。

1.3 孔隙度

孔隙度是页岩含气性评价的关键参数。由于对水平井无法开展室内实验获得实测孔隙度, 因此水平井孔隙度参数主要来源于测井解释。根据涪陵页岩气田产能建设区岩石物理特征与测井响应的对比分析认为: 孔隙度与声波测井具有较好的相关性(图2)。利用研究区探井物性分析测试结果与常规测井解释结果, 建立了孔隙度和声波时差的相关关系。

$$POR = 0.2115 AC - 11.598 \quad (3)$$

式中: POR 为孔隙度, %; AC 为声波时差, $\mu s/ft$ 。

把测井声波时差代入式(3), 可得到气田区水平井的孔隙度。孔隙度与页岩气水平井1500 m归一化测试无阻流量交会图表明(图1c), 二者之间存在明显的正相关关系, 因此选取孔隙度为水平井含气性评价参数之一。

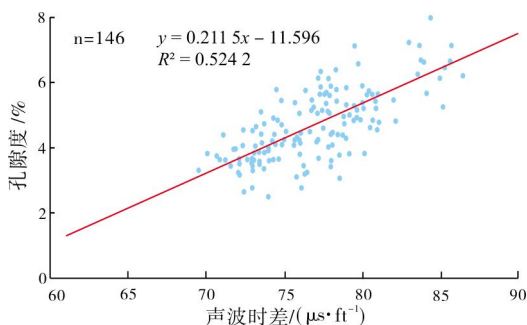


图2 涪陵页岩气田焦石坝区块钻井声波时差与实测孔隙度交会图

1.4 含气量

页岩含气量是评价页岩含气性的关键参数之一。含气量数据一般来源于岩心室内分析化验, 而水平井由于无法通过分析化验获得此项参数, 因此参数主要是通过对可以便捷获取的常规测井解释资料进行处理和计算, 得到较为真实可靠的评价参数。

1.4.1 吸附气含量

吸附气是页岩气的重要组成部分, 通常可以通过兰格缪尔(Langmuir)等温吸附实验获得地层的最大吸附气含量^[11]。根据涪陵页岩气田的温压条件(焦页1井气层中部, 地层温度为80℃, 地层压力为34 MPa)判断, 该区目的层页岩气吸附已达到饱和, 因此, 可以用等温吸附实验测得的含气量来标定吸附气含量。实验室模拟研究区地层温度条件所得到的吸附气含量, 与有机碳含量具有良好的相关关系, 如下式:

$$V_{\text{吸附}} = 0.7656 \text{ TOC} + 0.0775 \quad (4)$$

式中: $V_{\text{吸附}}$ 为吸附气含量, m^3/t ; TOC 为有机碳含量, %。

1.4.2 游离气含量

页岩游离气含量计算的关键, 是确定准确的含水饱和度。以页岩含水饱和度实验为基础, 研究区探井实验样品的实测原始含水饱和度在20%~40%之间, 而自吸实验表明其含水饱和度可达30%~70%。实验样品的原始含水饱和度与黏土矿物含量之间存在良好的相关性, 故可以认为含气页岩中的水主要以束缚态赋存于黏土矿物的微孔隙中, 由此建立了页岩的含水饱和度解释模型公式:

$$S_w = 87.67V_{sh} \quad (5)$$

式中: S_w 为原始含水饱和度, %; V_{sh} 为黏土矿物含量, %。

在此基础上, 利用孔隙度、气体体积系数、含水饱和度和等参数计算游离气含量:

$$V_{\text{游离}} = \frac{1}{B_g} \cdot [\phi_{\text{eff}} (1 - S_w)] \cdot \frac{\varphi}{\rho_b} \quad (6)$$

式中: $V_{\text{游离}}$ 为游离气含量, %; B_g 为体积压缩系数; ϕ_{eff} 为有效孔隙度, %; S_w 为含水饱和度, %; φ 为常数, 32.105 2; ρ_b 为页岩密度, g/cm³。

在求取吸附气含量和游离气含量的基础上, 可得到总含气量:

$$V_{\text{总}} = V_{\text{吸附}} + V_{\text{游离}} \quad (7)$$

式中: $V_{\text{总}}$ 为总含气量, %; $V_{\text{吸附}}$ 为吸附气含量, %; $V_{\text{游离}}$ 为游离气含量, %。

由测井解释计算得到的总含气量, 与页岩气水平井1500 m归一化测试无阻流量的交会图表明(图1d), 二者之间存在明显正相关关系, 因此选取总含气量为水平井含气性评价参数之一。

基于上述分析, 可以通过气测全烃校正值、孔隙压力系数、测井解释孔隙度和测井解释含气量等4项参数对涪陵页岩气田水平井的含气性进行定性评价; 进一步可以将水平井1500 m归一化无阻流量作为反映页岩含气性的特征参数列, 将气测全烃校正值、孔隙压力系数、测井解释孔隙度和测井解释含气量作为比较参数列, 开展定量评价。

2 水平井含气性评价方法

2.1 水平井含气性评价思路

先利用岩心资料、室内实验资料、实际生产数据和常规测井解释资料, 优选出在页岩气开发过程中评价含气性较为关键的4项参数, 然后通过灰色关联分析法^[12]确定各项参数的关联系数, 再将各项参数的关联度进行标准化处理, 得到页岩含气性4项评价参数的权重系数, 最终建立可准确量化评价页岩气水平井含气性的分级模型。

2.2 数据标准化处理

由于不同参数的量纲不同, 为使各项参数具有

可比性, 需对其进行标准化处理。

对于全烃校正值, 主要采用直接赋值法来统一量纲。从全烃校正值与1500 m归一化无阻流量相关关系图上来看(图1a), 全烃校正值整体具有3分特征, 具体表现为: 全烃校正值 $\leq 2.5 \text{ g}/(\text{min} \cdot \text{cm}^2)$ 时, 1500 m归一化无阻流量值 $\leq 20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; $2.5 \text{ g}/(\text{min} \cdot \text{cm}^2) < \text{全烃校正值} < 7.0 \text{ g}/(\text{min} \cdot \text{cm}^2)$ 时, $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d} < 1500 \text{ m}$ 归一化无阻流量值 $\leq 80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; 全烃校正值 $\geq 7.0 \text{ g}/(\text{min} \cdot \text{cm}^2)$ 时, 1500 m归一化无阻流量值 $> 80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。为计算方便, 把全烃校正值 $\leq 2.5 \text{ g}/(\text{min} \cdot \text{cm}^2)$ 的值均记为0.1; $2.5 \text{ g}/(\text{min} \cdot \text{cm}^2) < \text{全烃校正值} < 7.0 \text{ g}/(\text{min} \cdot \text{cm}^2)$ 的值均记为0.2; 把全烃校正值 $\geq 7.0 \text{ g}/(\text{min} \cdot \text{cm}^2)$ 的值均记为0.3。

对于孔隙压力系数、测井解释孔隙度、测井解释含气量以及1500 m归一化无阻流量这4项参数, 采用极大值法来统一量纲, 即采用各口井参数值/本项评价参数最大值的方式。统计分析样本井(53口)的参数得到: 孔隙压力系数的最大值为1.45, 孔隙度的最大值为5.38%, 含气量的最大值为8.43%, 1500 m归一化无阻流量的最大值为 $117.65 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

2.3 权重系数求取

首先通过灰色关联分析法确定各项参数的关联系数:

$$\xi_{oi} = \frac{\Delta(\min) + \rho \Delta(\max)}{\Delta_{oi}(k) + \rho \Delta(\max)} \quad (8)$$

式中: ξ_{oi} 为关联系数; $\Delta(\min)$ 为两级最小差; $\Delta(\max)$ 为两级最大差; ρ 为分辨系数, 一般在0~1之间, 通常取0.5; $\Delta_{oi}(k)$ 为各个比较系数列上每个点与参考数列对应每个点的绝对差值。

根据求取的各参数列的关联系数, 求取各个比较参数的关系度:

$$r_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_i(k) \quad (9)$$

式中: r_i 为各项比较参数的关系度; N 为各项比较系数列上点的个数; $\xi_i(k)$ 为比较系数列上每个点与参考数列对应点的关联系数。

计算结果如下: 全烃校正值的关系度为0.667, 孔隙压力系数的关系度为0.508, 测井解释孔隙度的关系度为0.526, 测井解释含气量的关系度为0.507。

进一步, 将各个参数的关系度进行标准化处理,

得到4项关键评价参数的权重系数:

$$y_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^n r_i} \quad (10)$$

式中: y_i 为各项评价参数的权重系数; r_i 为各项评价参数的关系度; 此处 n 为 4。

计算结果为: 全烃校正值的权重系数为 0.30, 孔隙压力系数的权重系数为 0.23, 测井解释孔隙度的权重系数为 0.24, 测井解释含气量的权重系数为 0.23。

2.4 水平井含气性分级模型

在前述基础上, 建立了含气性评价因子 (Gas-bearing evaluation factor, 简称为 GBEF) 的计算公式:

$$\text{GBEF} = 0.30 \times \text{全烃校正值} + 0.23 \times \text{孔隙压力系数} + 0.24 \times \text{孔隙度} + 0.23 \times \text{含气量} \quad (11)$$

式中: 全烃校正值、孔隙压力系数、孔隙度及含气量, 为依照文中 2.2 数据标准化处理后统一量纲的相应数值。

53 口井的 4 项关键评价参数的标准化值和含气性评价因子计算结果见表 1。

表 1 涪陵页岩气田焦石坝区块 53 口页岩气井含气性评价因子计算表

井名	灰色关联系数				标准化值				含气性评价因子	井名	灰色关联系数				标准化值				含气性评价因子
	全烃校正值	孔隙压力	孔隙度	含气量	全烃校正值	孔隙压力	孔隙度	含气量			全烃校正值	孔隙压力	含气量	孔隙度	全烃校正值	孔隙压力	孔隙度	含气量	
A1	0.33	0.94	1.00	1.00	0.3	0.95	1.00	1.00	0.779	A28	0.52	0.52	0.59	0.61	0.2	0.94	0.78	0.74	0.636
A2	1.00	0.39	0.40	0.36	0.2	0.90	0.76	0.80	0.633	A29	0.91	0.40	0.38	0.36	0.2	0.90	0.85	0.84	0.663
A3	0.54	0.50	0.50	0.47	0.2	0.95	0.87	0.87	0.687	A30	0.63	0.44	0.45	0.42	0.2	0.97	0.87	0.86	0.689
A4	0.35	1.00	0.73	0.75	0.3	0.94	0.82	0.86	0.699	A31	0.71	0.46	0.39	0.36	0.2	0.88	0.93	0.94	0.702
A5	0.39	0.92	0.91	0.94	0.3	0.91	0.89	0.87	0.714	A32	0.82	0.41	0.41	0.44	0.2	0.93	0.81	0.70	0.630
A6	0.33	0.96	0.77	0.65	0.3	0.95	0.89	0.81	0.709	A33	0.95	0.36	0.40	0.38	0.1	0.91	0.69	0.67	0.559
A7	0.45	0.63	0.66	0.74	0.2	0.91	0.82	0.75	0.638	A34	0.42	0.68	0.79	0.80	0.2	0.90	0.78	0.76	0.627
A8	0.51	0.55	0.59	0.64	0.2	0.91	0.79	0.72	0.625	A35	1.00	0.40	0.38	0.37	0.2	0.88	0.81	0.78	0.637
A9	0.36	1.00	0.90	0.83	0.3	0.93	0.88	0.84	0.707	A36	0.60	0.46	0.45	0.45	0.2	0.95	0.88	0.82	0.678
A10	0.44	0.64	0.68	0.77	0.2	0.92	0.83	0.75	0.641	A37	0.88	0.40	0.33	0.33	0.1	0.72	0.80	0.72	0.554
A11	0.88	0.37	0.39	0.36	0.2	0.92	0.75	0.75	0.623	A38	0.44	0.63	0.77	0.79	0.2	0.93	0.77	0.74	0.628
A12	0.50	0.57	0.57	0.60	0.2	0.90	0.83	0.78	0.645	A39	0.93	0.38	0.43	0.38	0.1	0.86	0.62	0.68	0.534
A13	0.57	0.44	0.41	0.40	0.1	0.95	0.91	0.87	0.667	A40	0.96	0.37	0.43	0.40	0.1	0.86	0.62	0.61	0.516
A14	0.62	0.49	0.47	0.40	0.2	0.90	0.84	0.92	0.680	A41	0.83	0.35	0.41	0.34	0.1	0.85	0.57	0.69	0.521
A15	0.56	0.51	0.51	0.49	0.2	0.91	0.83	0.82	0.658	A42	0.88	0.39	0.41	0.34	0.1	0.76	0.59	0.69	0.503
A16	0.61	0.46	0.49	0.48	0.2	0.95	0.82	0.79	0.657	A43	0.99	0.38	0.43	0.36	0.1	0.83	0.60	0.70	0.525
A17	0.68	0.42	0.44	0.46	0.2	0.98	0.85	0.76	0.665	A44	0.95	0.39	0.45	0.38	0.1	0.79	0.53	0.63	0.485
A18	0.50	0.50	0.54	0.58	0.2	1.00	0.86	0.78	0.676	A45	0.90	0.36	0.41	0.34	0.1	0.85	0.61	0.72	0.538
A19	0.50	0.52	0.53	0.50	0.2	0.98	0.88	0.89	0.701	A46	0.83	0.35	0.43	0.35	0.1	0.86	0.54	0.66	0.510
A20	0.86	0.39	0.44	0.41	0.2	0.97	0.74	0.74	0.632	A47	0.87	0.41	0.37	0.36	0.2	0.91	0.89	0.86	0.680
A21	0.44	0.59	0.73	0.60	0.2	0.97	0.79	0.87	0.670	A48	0.66	0.47	0.43	0.45	0.2	0.90	0.89	0.80	0.663
A22	0.47	0.58	0.57	0.57	0.2	0.93	0.88	0.84	0.678	A49	0.48	0.52	0.64	0.66	0.2	1.00	0.79	0.76	0.654
A23	0.63	0.46	0.49	0.45	0.2	0.93	0.80	0.81	0.651	A50	0.97	0.37	0.43	0.35	0.1	0.88	0.60	0.73	0.547
A24	0.52	0.53	0.55	0.55	0.2	0.98	0.83	0.80	0.657	A51	0.76	0.42	0.44	0.46	0.2	0.93	0.78	0.70	0.624
A25	0.46	0.57	0.66	0.67	0.2	0.97	0.81	0.78	0.655	A52	0.85	0.37	0.39	0.33	0.1	0.79	0.63	0.70	0.524
A26	0.53	0.51	0.55	0.53	0.2	0.95	0.82	0.81	0.663	A53	0.97	0.37	0.45	0.37	0.1	0.86	0.57	0.67	0.519
A27	0.62	0.44	0.52	0.51	0.2	0.98	0.76	0.73	0.635										

说明: ①基于 53 口井各项参数的灰色关联系数, 应用式(9)计算得出相应参数的关系度: 全烃校正值, 0.667; 孔隙压力系数, 0.508; 孔隙度, 0.526; 含气量, 0.507。②依据各项评价参数的关系度, 应用式(10)计算得出相应参数的权重系数: 全烃校正值, 0.30; 孔隙压力系数, 0.23; 孔隙度, 0.24; 含气量, 0.23。③基于 53 口井各项参数的标准化值, 应用式(11)计算得出各井相应的含气性评价因子。

利用页岩气水平井的实际生产数据,计算得到页岩含气性综合评价因子概率累积曲线(图3)。图3表明,页岩气水平井的含气性存在明显的分级界限,说明不同页岩气水平井的含气性差别较大,这与研究区页岩含气性在平面上存在较强非均质性的特征相吻合。通过找到曲线拐点(曲线最大变化点),可以确定页岩含气性分级的区分点,即分类阈值(0.623和0.707),从而建立页岩气水平井的含气性分级模型:I类水平井, $GBEF \geq 0.707$; II类水平井, $0.623 \leq GBEF < 0.707$; III类水平井, $GBEF < 0.623$ 。

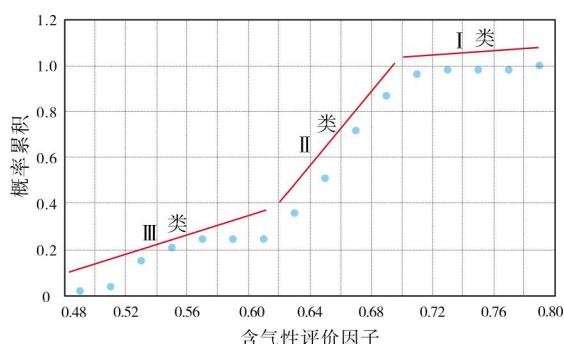


图3 涪陵页岩气田页岩含气性综合评价因子概率累积曲线

3 实例分析

本评价方法在四川盆地涪陵页岩气田的页岩气水平井焦页14-xHF井和焦页51-xHF井(表1所列53口参数井之外)得到应用。具体解析如下:

(1) 焦页14-xHF井

依据式(1)~(7),分别计算得到:水平段全烃校正值为 $9.34 \text{ g}/(\text{min} \cdot \text{cm}^2)$,孔隙压力系数为1.35,孔隙度为4.71%,含气量为7.08%。应用极大值法无量纲化处理后得到标准化值:全烃校正值为0.3,孔隙压力系数为0.93,孔隙度为0.88,含气量为0.84。把这4项参数的取值,代入式(11),计算得到焦页14-xHF井的含气性评价因子,为0.708,属于I类含气性页岩。

焦页14-xHF井含气性评价结果为I类,试气后采用一点法计算平均无阻流量为 $103.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (本井试气段长1500 m),含气性评价结果与实际试气结果吻合。

(2) 焦页51-xHF井

依据式(1)~(7),分别计算得到:水平段全烃校正值为 $0.94 \text{ g}/(\text{min} \cdot \text{cm}^2)$,孔隙压力系数为1.20,孔隙

度为3.24%,含气量为5.89%。应用极大值法无量纲化处理后得到标准化值:全烃校正值为0.1,孔隙压力系数为0.83,孔隙度为0.60,含气量为0.70。把这4项参数的取值,代入式(11),计算得到焦页51-xHF的含气性评价因子,为0.525,属于III类含气性页岩。

焦页51-xHF井含气性评价结果为III类,试气后采用一点法计算平均无阻流量为 $9.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (试气段长1172 m,1500 m归一化无阻流量为 $12.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),含气性评价结果与实际试气结果吻合。

总体上,水平井焦页14-xHF井和焦页51-xHF的含气性评价结果,与实际试气数据吻合度较高。这说明基于灰色关联法确定权重的水平井含气性分级模型,对页岩气水平井的含气性评价是可行的,评价结果可较好地预测气井实际生产能力。

4 结论

(1)综合考虑涪陵页岩气田探井室内实验资料、常规测井解释数据和实际生产数据,优选出能较好地评价页岩气水平井含气性的4项关键参数:全烃校正、孔隙压力系数、测井解释孔隙度、测井解释含气量。

(2)基于灰色关联法确定了全烃校正、孔隙压力系数、测井解释孔隙度、测井解释含气量这4项关键参数的权重系数,分别为0.30、0.23、0.24、0.23。在此基础上,通过概率累积法,建立了页岩气水平井含气性评价分级模型。

(3)应用新建立的页岩气水平井含气性评价分级模型,在涪陵页岩气田开展了水平井含气性的定量评价,评价结果与实际生产数据吻合度较高。这表明该评价方法有较好的可行性,且实用性较强,能满足页岩气水平井的含气性评价需求。

参考文献

- [1] 王瑞,张宁生,刘晓娟,等.页岩气吸附与解吸机理研究进展[J].科学技术与工程,2013,13(19): 5561-5566.
- [2] 聂海宽,张金川,张培先,等.福特沃斯盆地Barnett页岩气藏特征及启示[J].地质科技情报,2009,28(2): 87-93.
- [3] 周文,徐浩,余谦,等.四川盆地及周缘五峰组—龙马溪组与筇竹寺组页岩含气性差异及成因[J].岩性油气藏,2016,28(5): 18-25.
- [4] 张鹏,张金川,黄宇琪,等.黔西北五峰—龙马溪组海相页岩含气性及主控因素[J].大庆石油地质与开发,2015,34(1): 169-174.

- [5] 柳娜, 马军, 管川莉. 鄂尔多斯盆地页岩含气量测定及方法探讨[J]. 复杂油气藏, 2014, 7(3): 5-10.
- [6] 高凤琳, 宋岩, 姜振学, 等. 江西修武盆地新开岭组梨树窝组页岩含气性测井综合评价[J]. 测井技术, 2018, 42(1): 65-72.
- [7] 周广照, 李显明, 黄斌, 等. 优化BP神经网络在川西上三叠统陆相页岩含气性预测中的应用[J]. 矿物岩石, 2017, 37(3): 90-96.
- [8] 鲍云杰. 从煤层含气量测定技术发展看页岩含气性评价的发展方向[J]. 石油实验地质, 2014, 36(6): 762-766.
- [9] 孙健, 罗兵. 四川盆地涪陵页岩气田构造变形特征及对含气性的影响[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(6): 809-818.
- [10] 陈亚琳, 罗兵, 郁飞, 等. 四川盆地涪陵地区页岩储层压力预测及高压形成机制分析[J]. 石油实验地质, 2018, 40(1): 110-117.
- [11] 杨锋, 李生杰, 李琪. 陆相泥页岩吸附气量预测方法研究[C]//2016中国地球科学联合学术年会论文集(三十三). 北京: 中国地球物理学会, 2016: 40-43.
- [12] 孙才志, 宋彦涛. 关于灰色关联度的理论探讨[J]. 世界地质, 2000, 19(3): 248-252.

编辑: 董庸

Quantitative evaluation method of gas content for shale gas horizontal well: a case study of Fuling shale gas field, Sichuan Basin

ZHANG Mengyin

Abstract: Taking Fuling shale gas field of Sichuan Basin as an example, a method to effectively evaluate the gas content of horizontal well is discussed in Ordovician Wufeng Formation and Silurian Longmaxi Formation. According to a large number of drilling and production data of horizontal wells, and the main controlling factors of gas content in exploration wells, four parameters such as corrected total hydrocarbon of gas logging, pore pressure coefficient, porosity and gas content of log interpretation are chosen for evaluation. Based on samples of 53 wells with equivalent fracturing parameters in Jiaoshiba area, Fuling shale gas field, the four parameters are normalized with assignment method or maximum value method, and the weight of each parameter is calculated with grey correlation coefficient method, then the equation of gas content for horizontal well is setup. Based on the probability accumulation curve of the calculation results, the grading model of gas content is established. Thus a set of methods to quantitatively evaluate the gas content of shale gas horizontal wells is formed. The evaluation results of the other two horizontal wells with the method are in good agreement with the actual production data. It is proved that the method can appraise the gas-bearing capacity and effectively predict the testing output of horizontal wells in shale gas field.

Key words: shale gas; horizontal well; gas content; evaluation; Fuling shale gas field

ZHANG Mengyin: Engineer. Add: Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Jiangnan Oilfield Company, SINOPEC, No. 18 Daxueyuan Rd., Wuhan, Hubei 430223, China