

页岩气储层测井解释评价技术

杨小兵¹ 杨争发¹ 谢冰² 谢刚¹ 张志刚¹

1. 中国石油川庆钻探工程公司测井公司 2. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院

杨小兵等. 页岩气储层测井解释评价技术. 天然气工业, 2012, 32(9): 33-36.

摘要 较之于常规储层,页岩气储层的测井解释评价工作显得更为复杂。通过近两年的跟踪研究,结合岩心分析和试油资料,从页岩地层的地质、测井特征和评价难点入手,通过对页岩气储层评价关键参数(如总有机碳含量、吸附气与游离气含量、页岩岩石脆性指数等)的计算分析,基本上掌握了页岩气储层关键评价参数的计算方法,从而建立起了页岩气储层定性评价标准,并编制出了页岩气储层解释处理软件。同时,在页岩气储层定性评价方面也给出了划分标准,即:①异常高的自然伽马段对应高有机质含量段,吸附气含量高;②无铀伽马低值,黏土含量低,脆性物质含量高;③裂缝和孔隙发育段的游离气含量高;④高声波、低密度、高电阻率段的有机质含量高,含气饱和度也高;⑤电阻率低于 $10 \Omega \cdot m$ 的地层,其黏土含量高,含气饱和度低,不具备开发潜能。

关键词 页岩气 储集层 参数 数学模型 综合评价 测井解释 计算机软件

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2012.09.007

中国页岩气资源分布广泛,其开发具有较美好的前景^[1]。测井资料在评价烃源岩、定性识别页岩气,获取总有机碳含量、含气量和岩石脆性指数等关键评价参数方面不可缺少,测井综合评价已经成为当前页岩气勘探开发的技术支撑^[2]。

1 地质、测井特征与评价难点

1.1 页岩地层的地质特征

页岩是一种沉积岩,成分复杂,但都具有薄页状或薄片层状的节理,主要是由黏土沉积经压力和温度形成的岩石,但其中混杂有大量的石英、长石、方解石的碎屑以及其他矿物。根据其混入物的成分,可分为钙质页岩、铁质页岩、硅质页岩、碳质页岩、黑色页岩、油母页岩等^[3]。页岩作为烃源岩,富含有机质,黏土含量高,其成分粒度细。页岩作为一种特殊的储集岩,一般呈现低孔、特低渗的物性特征。页岩气是指主体位于暗色泥页岩或高碳泥页岩中,以吸附和游离状态为主要存在方式的天然气聚集,页岩气储层也是烃源岩,自生自储,属于非常规天然气资源的范畴。

1.2 页岩地层的测井特征

与常规的砂岩储层对比,页岩地层具有以下测井

特征^[4]:①井径一般扩径;②自然伽马值高,含碳量高段自然伽马特别高,与无铀伽马值相差大,主要表现为铀元素含量明显增高,这是海相页岩气储层特征之一;③双侧向中、低值,页岩发育段双侧向一般为负差异,随粉砂质、灰质含量增高,电阻率增大,负差异不明显或呈正差异;④三孔隙度中值,低光电截面指数值,在高含碳井段补偿密度明显低异常。

1.3 测井评价页岩气储层面临的难点

页岩气储层由于自己的特殊性,测井评价页岩气储层面临诸多的难题:①页岩气储层岩石成分复杂,不仅有无机矿物,还有有机质,与常规储层存在很大差别,需要重新建立测井岩石物理解释模型和评价方法;②新层系新领域,页岩气有机质丰度、游离气、吸附气含气量是页岩储层评价的关键参数,需要形成新的计算方法;③大型压裂和水平井为页岩气的钻探关键工艺技术,岩石力学、脆性参数计算必不可少;④裂缝是页岩气重要的储集空间和渗流通道,但测井还面临着页岩裂缝与层理识别、裂缝有效性评价等问题;⑤页岩异常高压层和低阻页岩储层的测井评价难题;⑥编制完善的页岩气测井解释处理软件。

2 页岩气储层评价关键参数的计算

除有常规储层的孔隙度、渗透率、含水饱和度和储层厚度等参数外^[5],着重探讨页岩气储层的参数。

2.1 页岩气储层评价参数处理流程

常规的砂岩、碳酸盐岩岩石物理模型一般由黏土、骨架颗粒、孔隙度组成,从流体的角度分析把孔隙度细分为含气孔隙度、自由水孔隙度和束缚水孔隙度等。而页岩气储层由于有机质含量高、黄铁矿广泛存在,故在测井岩石物理模型中增加了有机质和黄铁矿组分,地质上一般认为页岩气储层没有可动水。

页岩气储层评价参数处理流程(图 1)与斯仑贝谢公司的页岩气专用处理模块相似,不同之处在于:先计算总有机碳含量,然后计算出干酪根和黄铁矿体积含量,并对三孔隙度曲线测井值进行有机质校正,然后应用校正后的三孔隙度资料进行交会迭代,计算出最优的其他矿物成分和孔隙度,最后进行含气量的计算。

2.2 总有机碳含量(TOC)的计算

页岩气储层中总有机碳又称剩余有机碳,指岩石中残留的或剩余的有机碳含量。在研究区块,总有机碳含量的计算方法主要采用 4 种方法:①电阻率与孔隙度重叠法;②放射性铀元素含量与总有机碳含量关系回归法;③三孔隙度曲线计算方法;④综合上面 3 种计算方法,优选合理的计算结果。

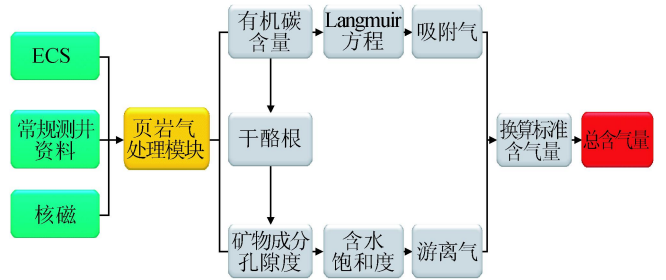


图 1 页岩储层评价参数处理流程图

通过上述 3 种计算方法展示的岩心分析与测井计算的结果比较,相关性较好(图 2),并各有优缺点。重叠法不适用于页岩高阻地层、碳酸盐含量高的页岩地层;U 元素法应用效果好,方法简单,但对于 U 元素异常高而含有其他放射性矿物如 P_2O_5 则失去了意义;补偿密度计算 TOC 方法受井眼扩径影响。

在使用测井计算 TOC 曲线时,可以根据具体的情况选用不同的计算方法,并可分段计算和分段取值,从而消除环境影响和地层本身特征的影响,使计算的结果更准确。

2.3 吸附气和游离气含量的计算

对于吸附气而言,主要的影响因素为地层压力、地层温度、总有机碳含量和干酪根类型等。在国外,页岩气吸附气含量因井的深浅、总有机碳含量大小不同,吸

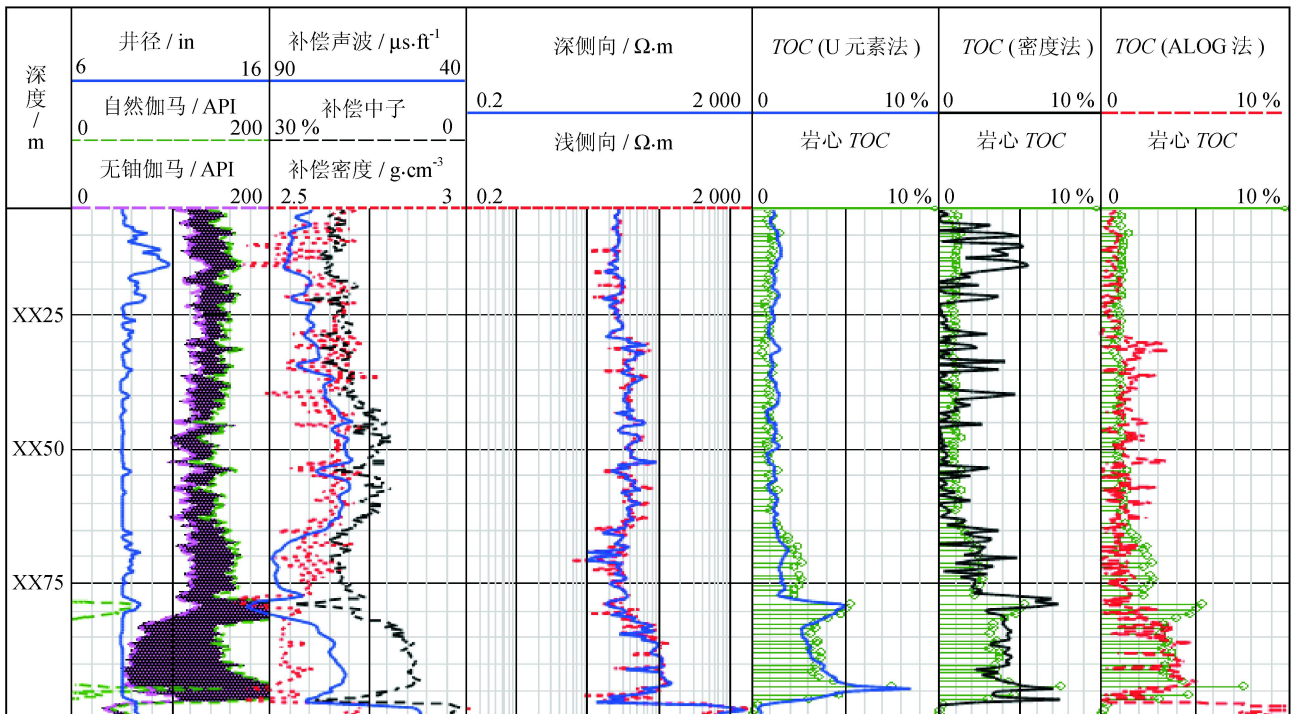


图 2 X 井总有机碳含量的计算结果与岩心分析对比图
(1 in=25.4 mm, 1 ft=0.304 8 m, 下同)

附气含量占总含气量的 20%~80%。埋深浅,压力和温度对含气量的影响权重小,相对地吸附气含量所占比例就高。游离气含量与孔隙度、含气饱和度有关,计算方法与常规储层相同。

吸附气含量的计算要有页岩气储层的兰格缪尔等温曲线数据。具体计算中要对实际页岩气储层的总有机碳含量、储层温度和储层压力等进行校正,因为兰格缪尔等温曲线是在恒定温度、确定的总有机碳含量实验条件下所取得的,重点和难点是温度影响校正公式的推导。吸附气和游离气含量的计算结果见图 3,图中右侧为斯仑贝谢公司处理的岩性剖面图。

2.4 岩石脆性指数的计算

就泊松比而言,其值越低,岩石越脆,并且当杨氏模量值增加时,岩石将更脆。由于泊松比和杨氏模量的单位不同,对每个分量引起的脆性进行规一化处理,然后进行平均,从而计算出百分数的脆性指数。另一种计算脆性指数的方法是基于矿物组分和含量的多少来计算,比较两方法,前者从岩石力学的角度考虑,更能整体上反映地层的脆性。

2.5 页岩黏土类型的分类计算

黏土总含量计算不是关键,关键是计算出不同类型黏土的含量。通过岩心分析资料,研究区块黏土类型以伊利石为主、绿泥石和伊蒙混层次之,蒙脱石含量很少,高岭石基本上没有。应用处理成果如图 4 所示,

可以看到测井计算的黏土总量与岩心分析吻合好,伊利石含量计算结果与岩心一致,而蒙脱石、绿泥石因含量较少,相对误差略大。

2.6 页岩气储层解释处理软件(shalpro)的研发与应用效果

页岩气储层计算参数多,矿物成分复杂的特点,参照页岩气储层的测井评价流程,编制了页岩气储层测井解释处理软件。软件特点为:①多矿物和多评价参数的一体化解释处理;②采用优化算法,所求的解是全局最优解,通过理论曲线和实际曲线对比,便可修改骨架参数;③参加优化的测井曲线可多可少,简单的测井资料均可处理;④ECS 曲线参与储层解释处理中的计算,整体上提高计算精度,使计算出的矿物组分和物性参数更接近储层,符合实际。

通过对比国外公司处理成果和岩心资料,岩石矿物组分、孔隙度、总有机碳含量和含气量等处理成果一致性好,误差小(图 3),表明研发的页岩气计算方法和解释处理软件能够用于页岩气储层的解释处理。

3 页岩气储层的综合评价技术

3.1 优质页岩气储层的定性识别

在常规井曲线上异常高伽马、高声波时差、低密度和高电阻率是优质页岩气储层的一个特点。

在特殊测井项目上也具有一定的特征:阵列感应

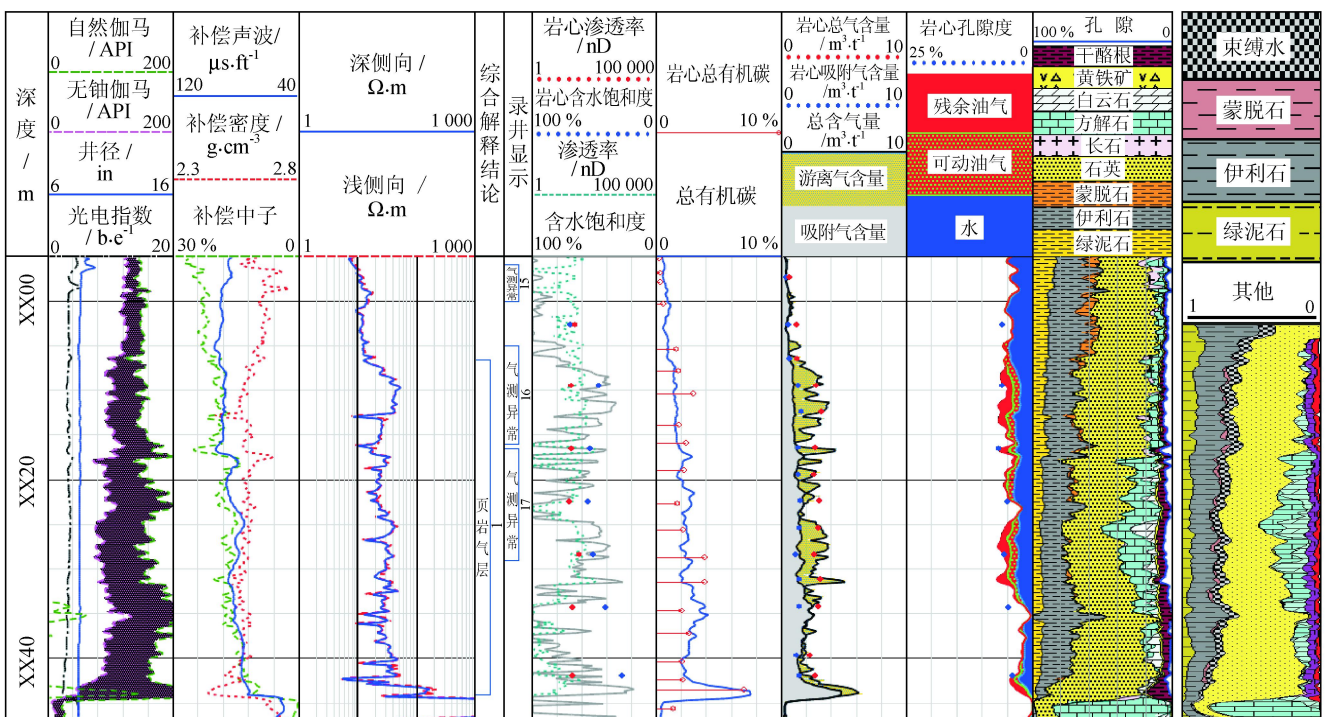


图 3 Y 井页岩气储层综合解释处理成果图

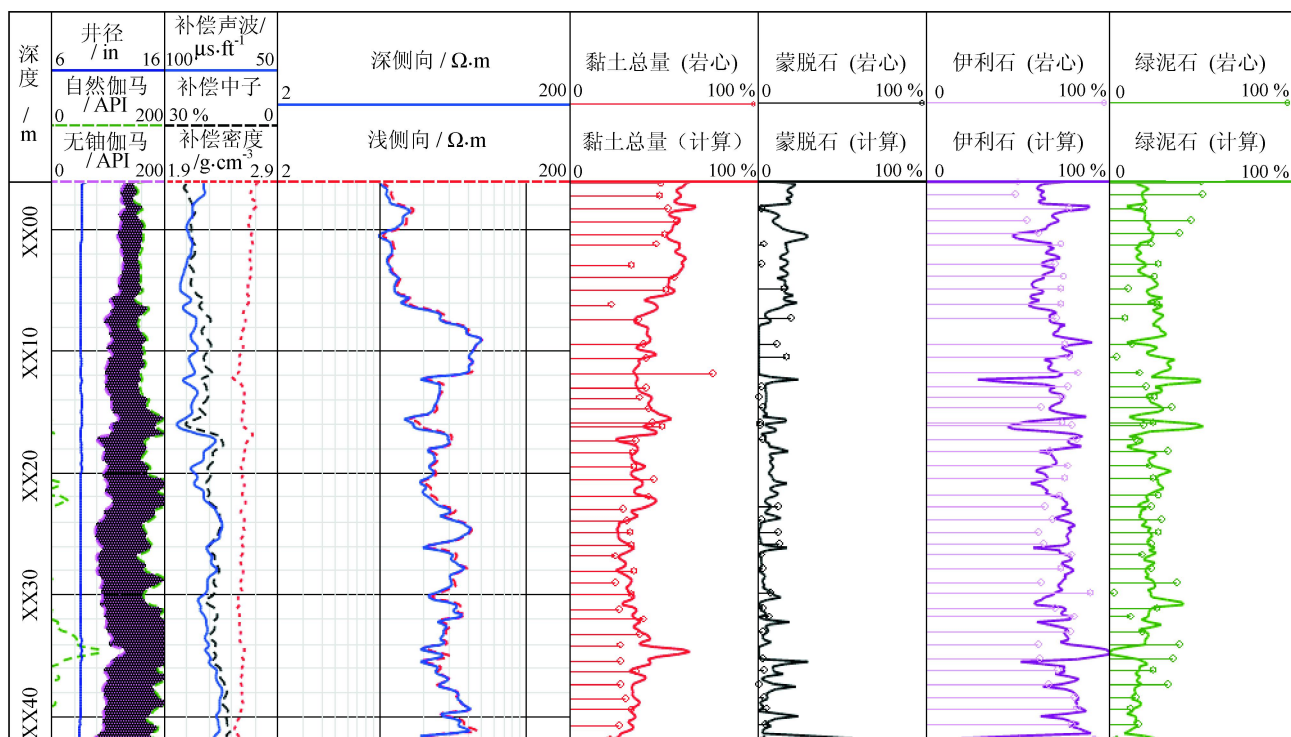


图 4 Y 井龙马溪组黏土分类计算结果与岩心分析对比图

测井资料深探测电阻率曲线与浅探测电阻率曲线呈明显差异;电成像图上有效裂缝较发育,有机碳含量高的地层岩性均一变化小;在阵列声波变密度干涉条纹多,反映了层理或层间裂缝发育;核磁共振成果图上 T_2 分布谱因含气而向增大方向展布。

3.2 低阻页岩储层评价

在川渝地区钻遇的页岩井中有 3 口井底部高含碳地层双侧向电阻率低于 $1.0 \Omega \cdot m$ 。这引起了地质学家们的重视。低阻页岩气储层的影响因素众多,有地层压力异常、成岩和生烃时地层水驱排不彻底、地层位于构造复杂带从而油气二次运移造成页岩含气饱和度不高、储层黏土含量高、黄铁矿含量高、页岩过成熟度和地层高含束缚水、钻井液低阻侵入等。结合区域地质特征,通过测井资料的综合分析,地层低阻形成的主要原因是含高矿化度地层水。

3.3 生产测井资料评价产能

生产测井包括压裂缝检测和产能的测井分析。页岩气储层通过大型加砂压裂增加产能,在测试压裂和主压裂后测量井温或同位素示踪,可以评价压裂缝高度,为评价压裂效果提供资料。多套储层打开后,通常要测生产测井以弄清各个产层的产液情况。通过动态测井和静态测井流量计算出各个层的产能和产液性质。这些资料为页岩气的开采和评价提供了全面的生

产资料。其中 1 口井的生产测井资料表明,裂缝性页岩气储层初始产能明显比孔隙和裂缝欠发育的高伽马页岩储层产能高。

3.4 页岩气储层定性评价标准

定性评价标准为:①异常高的自然伽马段对应高有机质段,吸附气含量高;②无铀伽马低值,黏土含量低,脆性物质含量高;③裂缝和孔隙发育段的游离气含量高;④高声波、低密度、高电阻率段的有机质含量高,含气饱和度也高;⑤电阻率低于 $10 \Omega \cdot m$ 的地层,其黏土含量高,含气饱和度低,不具备开发潜能。

参 考 文 献

[1] 张金川.我国页岩气富集类型及资源特点[J].天然气工业,2009,29(12):1-6.
 [2] 王贵文,郭荣坤.测井地质学[M].北京:石油工业出版社,2010.
 [3] 张林晔,李政.页岩气的形成与开发[J].天然气工业,2009,29(1):1-5.
 [4] 齐宝权,杨小兵.应用测井资料评价四川盆地南部页岩气储层[J].天然气工业,2011,31(4):44-47.
 [5] 雍世和,张超谟.测井数据处理与综合解释[M].东营:石油大学出版社,1996.