

文章编号: 1000-0747(2017)06-0889-07 DOI: 10.11698/PED.2017.06.06

沥青质碳酸盐岩储集层岩石物理特征及测井评价 ——以四川盆地安岳气田寒武系龙王庙组为例

赖强, 谢冰, 吴煜宇, 黄科, 刘兴刚, 金燕, 罗文军, 梁涛

(中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 成都 610041)

基金项目: 国家“十三五”科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2016ZX05015-003, 2016ZX05052-001)

摘要: 基于沥青溶解前后岩心样品的物性、密度、纵横波时差、电阻率和核磁共振等实验, 对沥青质碳酸盐岩储集层的岩石物理特征和测井响应特征进行了研究。实验表明: ①沥青会破坏储集层的孔隙结构, 导致储集层有效储集空间减小、渗透性降低; ②随着沥青含量的增加, 纵横波时差普遍减小, 而密度和电阻率值则普遍增大; ③随着沥青含量增加, 纵波时差和密度变化相对较小, 而横波时差和电阻率变化相对较大; ④沥青核磁共振横向弛豫时间(T_2)普遍小于3 ms, 且沥青成熟度越高, T_2 值越小。据此提出基于常规与特殊测井相结合的沥青质碳酸盐岩储集层的沥青含量、有效孔隙度和含水饱和度评价方法, 并应用于四川盆地安岳气田80多口气井的寒武系龙王庙组碳酸盐岩储集层, 划分出沥青平面富集区带, 可作为气藏开发井井位部署的依据。图8表3参12

关键词: 四川盆地; 寒武系龙王庙组; 沥青; 碳酸盐岩储集层; 核磁共振测井; 岩石物理; 测井评价

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Petrophysical characteristics and logging evaluation of asphaltene carbonate reservoirs: A case study of the Cambrian Longwangmiao Formation in Anyue gas field, Sichuan Basin

LAI Qiang, XIE Bing, WU Yuyu, HUANG Ke, LIU Xinggang, JIN Yan, LUO Wenjun, LIANG Tao

(Exploration and Development Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: The petrophysical and logging response characteristics of asphaltene carbonate reservoirs were examined based on the measurement of porosity and permeability, density, compressional and shear wave slowness, resistivity and Nuclear Magnetic Resonance transverse relaxation time (T_2) of cores before and after the bitumen dissolving. The results show that (1) the asphalt can damage the pore structure of the reservoir and cause reduction of effective reservoir space and permeability; (2) with the increase of asphalt content, the compression and shear wave slowness generally decrease while the density and resistivity increase; (3) with the increase of asphalt content, the compressional wave slowness and density change less, while the shear wave slowness and resistivity change larger; and (4) the T_2 values of asphalt are generally less than 3 ms, and the higher the maturity of the asphalt, the lower the T_2 value. Based on these experiments, a method based on conventional and special logging methods was presented to evaluate asphalt content, effective porosity and water saturation in asphaltene carbonate reservoirs. The method has already been applied to 80 wells in the Longwangmiao Formation of the Anyue gas field in the Sichuan Basin to pick out zones rich in asphalt on the plane, which has effectively guided the selection of well location in the gas reservoir development.

Key words: Sichuan Basin; Cambrian Longwangmiao Formation; asphalt; carbonate reservoir; nuclear magnetic resonance logging; petrophysical properties; logging evaluation

引用: 赖强, 谢冰, 吴煜宇, 等. 沥青质碳酸盐岩储集层岩石物理特征及测井评价: 以四川盆地安岳气田寒武系龙王庙组为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(6): 889-895.

LAI Qiang, XIE Bing, WU Yuyu, et al. Petrophysical characteristics and logging evaluation of asphaltene carbonate reservoirs: A case study of the Cambrian Longwangmiao Formation in Anyue gas field, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(6): 889-895.

0 引言

储集层中的沥青在地层条件下为高黏度液态至固

态, 占据储集层的部分储集空间, 破坏储集层的孔隙结构, 不仅会减小储集层的孔隙度, 还会大幅度降低储集层的渗透率^[1], 严重影响储集层的物性及产能, 因此, 沥

青识别及其含量确定对沥青质储集层测井评价十分重要。

国内外很多学者对沥青的研究主要集中在沥青的形成机理与成因判识、地球化学特征、分布特征及其对储集层储集性能的影响等方面^[1-8]，但对沥青质储集层岩石物理特征及沥青测井评价方法研究则相对较少。章成广等对沥青质砂岩储集层岩电参数进行了研究，并给出了岩电参数和孔渗校正公式^[9]；陈明江等提出利用自然伽马与中子-密度交会法计算储集层泥质含量的差值作为储集层沥青相对含量，并建立沥青质砂岩储集层有效孔隙度及渗透率校正模型^[10]。上述沥青测井评价方法在沥青质砂岩储集层油气勘探中均发挥了重要作用，但对于沥青质碳酸盐岩储集层测井评价的适用性具有局限性。

本文提出一种常规与特殊测井相结合的沥青质碳酸盐岩储集层测井评价方法，并应用于四川盆地安岳气田寒武系龙王庙组碳酸盐岩储集层评价，有效指导

测井资料采集优化及试气选层，可作为气藏开发井井位部署的依据。

1 岩石物理特征

选取四川盆地安岳气田龙王庙组 16 块含沥青碳酸盐岩岩心样品，进行沥青溶解前后孔隙度、渗透率、密度、纵横波时差、电阻率及核磁共振等实验，分析沥青质碳酸盐岩储集层的岩石物理特征。

1.1 物性特征

表 1 给出了 16 块岩样在沥青溶解前后孔隙度和渗透率值，可以看出沥青溶解后岩样物性明显变好，孔隙度增加 0.25%~2.20%，平均增加 1.01%，增幅达 19%；渗透率增加 $(0.002\sim 0.091)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，平均增加 $0.04\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，增幅达 67.3%。由此可见，沥青对储集层物性影响较大，不仅会减小储集层有效孔隙度，而且会大幅降低储集层渗透性。

表 1 沥青溶解前后岩样孔隙度、渗透率值对比

岩心样品 编号	孔隙度/%			孔隙度增大幅度/%	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$			渗透率增大幅度/%
	溶解前	溶解后	增加值		溶解前	溶解后	增加值	
M-1	4.82	6.45	1.63	33.8	0.073	0.092	0.019	26.0
M-2	6.41	7.33	0.92	14.4	0.043	0.095	0.052	120.9
M-3	4.15	6.09	1.94	46.7	0.080	0.090	0.010	12.5
M-5	3.83	4.88	1.05	27.4	0.122	0.176	0.054	44.3
M-9	3.92	5.20	1.28	32.7	0.024	0.087	0.063	262.5
M-10	6.02	7.96	1.94	32.2	0.090	0.115	0.025	27.8
X-5	6.56	8.76	2.20	33.5	0.081	0.122	0.041	50.6
X-9	3.14	3.39	0.25	8.0	0.059	0.061	0.002	3.4
X-10	4.08	4.87	0.79	19.4	0.081	0.093	0.012	14.8
X-11	3.93	4.79	0.86	21.9	0.017	0.071	0.054	317.6
X-13	4.85	5.14	0.29	6.0	0.019	0.032	0.013	68.4
X-15	3.15	4.14	0.99	31.4	0.008	0.079	0.071	887.5
X-17	2.83	3.51	0.68	24.0	0.010	0.079	0.069	690.0
X-18	5.69	6.13	0.44	7.7	0.041	0.064	0.023	56.1
X-19	10.41	10.88	0.47	4.5	0.153	0.244	0.091	59.5
X-20	9.25	9.67	0.42	4.5	0.050	0.092	0.042	84.0

1.2 纵横波时差特征

表 2 给出了 16 块岩样在沥青溶解前后含水时纵波、横波时差值，可见沥青溶解后岩样纵横波时差普遍增大；其中纵波时差增大幅度较小，相对增大幅度平均值不足 1%，而横波时差增大幅度相对较大，相对增大幅度平均值达 8.4%；因此，可认为沥青对纵波时差影响较小，但对横波时差影响较大。

1.3 密度和电阻率特征

经实验室测量龙王庙组焦质沥青密度在 1.3 g/cm^3 左右，介于地层流体与骨架密度之间；同时沥青属于不导电的碳氢化合物，电阻率很高。沥青溶解后样品密度降低 $0.009\sim 0.032\text{ g/cm}^3$ ，相对降低幅度 0.3%~1.1%，表明沥青对密度影响相对较小。同时沥青溶解后电阻率降低明显，相对降低幅度 24.1%~86.5%，由此可见，沥青对电阻率影响较大（见表 3）。

1.4 核磁共振横向弛豫时间 (T_2) 谱特征

选用 3 种不同成熟度沥青干样进行核磁共振横向弛豫时间 T_2 值测试，考虑到沥青属于重烃， T_2 值较小，为有效探测到沥青干样核磁共振信号，对核磁共振实验参数进行了优化，回波间隔时间采用 0.2 ms，等待时间设为 6 s，扫描次数设为 256 次。实验结果如图 1 所示，可以看出沥青核磁共振横向弛豫时间一般小于 $3\ 000\mu\text{s}$ ，主峰小于 $1\ 000\mu\text{s}$ ，与黏土束缚水 T_2 值分布区间重叠；沥青成熟度越高， T_2 谱峰越靠前。因此可以认为核磁共振有效孔隙度 (T_2 值大于 $3\ 000\mu\text{s}$) 不包含沥青信号，反映的是储集层有效储集空间大小。

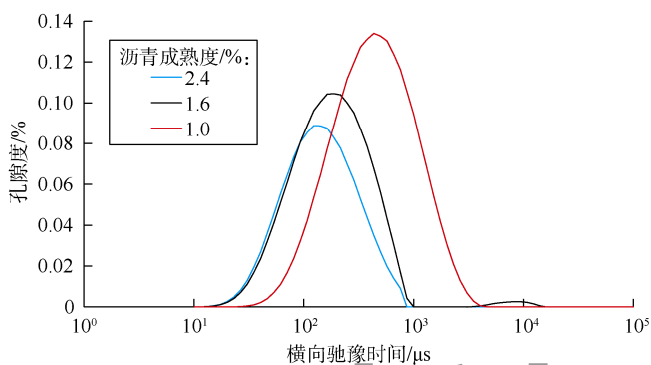
上述实验结果表明：沥青对储集层测井响应的影响差异较大，对纵波时差、密度的影响相对较小，而对横波时差、电阻率的影响则相对较大；沥青核磁共振 T_2 值则随着沥青成熟度增加而减小。因此，对于含

表2 沥青溶解前后岩样含水时纵、横波时差值对比

岩心样品编号	纵波时差/($\mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)		纵波时差 相对增大幅度/%	横波时差/($\mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)		横波时差 相对增大幅度/%
	溶解前	溶解后		溶解前	溶解后	
M-1	155.0	156.0	0.6	336.0	368.7	9.7
M-2	194.0	195.3	0.7	397.3	421.0	6.0
M-3	165.3	168.0	1.6	332.0	371.7	12.0
M-5	181.7	184.7	1.7	324.7	361.7	11.4
M-9	172.7	174.3	0.9	355.3	382.0	7.5
M-10	165.0	165.7	0.4	325.0	349.7	7.6
X-5	153.3	154.3	0.7	327.0	338.3	3.5
X-9	155.0	159.0	2.6	334.0	374.7	12.2
X-10	156.0	158.7	1.7	324.0	346.3	6.9
X-11	180.3	181.3	0.6	372.7	402.7	8.0
X-13	193.7	195.0	0.7	378.3	424.0	12.1
X-15	190.0	191.0	0.5	386.0	416.7	8.0
X-17	156.0	157.7	1.1	332.0	347.0	4.5
X-18	159.0	159.7	0.4	296.0	324.7	9.7
X-19	191.3	193.0	0.9	358.3	391.0	9.1
X-20	171.0	173.3	1.3	352.3	372.3	5.7

表3 沥青溶解前后岩样含水时密度、电阻率值对比

岩心样品 编号	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)		密度相对减小 幅度/%	电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)		电阻率相对减小 幅度/%
	溶解前	溶解后		溶解前	溶解后	
M-1	2.672	2.643	1.1	73.2	47.5	35.1
M-2	2.499	2.485	0.6	30.9	10.1	67.3
M-3	2.666	2.645	0.8	64.0	24.0	62.5
M-5	2.664	2.646	0.7	33.0	7.7	76.7
M-9	2.671	2.654	0.6	49.0	19.9	59.4
M-10	2.725	2.710	0.6	62.2	29.5	52.6
X-5	2.654	2.645	0.3	123.4	93.7	24.1
X-9	2.715	2.693	0.8	100.9	46.5	53.9
X-10	2.729	2.714	0.5	123.3	92.4	25.1
X-11	2.673	2.661	0.4	57.2	23.6	58.7
X-13	2.587	2.566	0.8	31.2	4.2	86.5
X-15	2.619	2.602	0.6	40.3	10.5	73.9
X-17	2.621	2.595	1.0	102.3	62.1	39.3
X-18	2.599	2.578	0.8	120.8	87.0	28.0
X-19	2.457	2.446	0.4	17.1	7.1	58.5
X-20	2.559	2.546	0.5	40.4	15.5	61.6

图1 不同成熟度沥青干样核磁共振 T_2 谱特征

沥青碳酸盐岩储集层，按不含沥青储集层的测井评价方法计算的有效孔隙度、含气饱和度会偏高，进而导致测井综合解释出现误判。

2 测井评价方法

2.1 沥青定性识别

上述实验表明电阻率对沥青响应很敏感，可以作为判别储集层是否含有沥青的主要参数；但在地层条件下，电阻率参数同时也受岩性、物性及流体性质等

因素影响，单独采用电阻率参数识别沥青具有多解性。因此，在实际应用中，应综合考虑地层环境因素的影响建立沥青识别图版。

由于龙王庙组岩性为白云岩，应首先排除岩性差异导致的电阻率变化；其次考虑储集层物性及天然气对电阻率的影响，选用气井的富含沥青段和不含沥青层段测井响应数据绘制纵波时差与电阻率交会图（见图2）。由交会图可以明显看出，在纵波时差大小即储集层孔隙度基本相同的前提下，受沥青影响，含气层段电阻率明显增高，纵波时差与电阻率之间关系表现为电阻率随声波时差增大而增加或基本保持不变，与不含沥青气层段声波与电阻率关系的双曲线特征存在较大差异。

据此在纵波时差与电阻率关系图中拟合一条分界线，并回归出分界线方程（(1)式），利用纵波时差反算一条电阻率曲线，当实测电阻率值高于纵波时差反算值，表明储集层中富含沥青。

分界线方程：

$$R_{\text{tac}} = 10^{a_2 \Delta t^{a_1}} \quad (1)$$

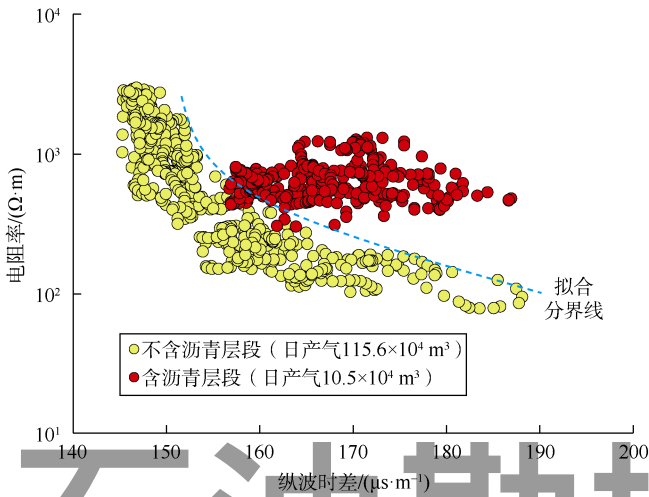


图2 纵波时差-电阻率交会图

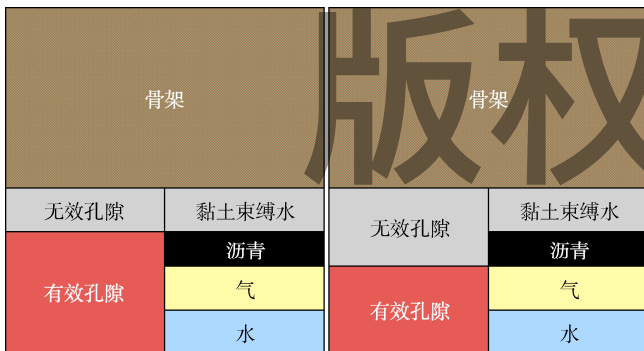
根据拟合结果, 参数 a_1 为 -1.95, a_2 为 55 787。

2.2 沥青含量及有效孔隙度定量评价

计算地层中的沥青含量是为了更准确评价储集层中有效储集空间的大小, 但利用常规测井资料无法通过计算地层中的沥青含量来准确推算有效孔隙度。本文将常规测井与核磁共振、阵列声波测井资料相结合, 建立了两种沥青含量及有效孔隙度定量评价方法。

2.2.1 常规测井孔隙度与核磁共振孔隙度重叠法

基于沥青质岩石样品的岩石物理特征, 分别建立了常规和核磁共振测井孔隙度解释模型 (见图 3)。常规测井孔隙度解释模型把沥青当作有效储集空间的一部分, 导致在富含沥青质储集层段测井计算的有效孔隙度偏高; 而核磁共振测井孔隙度解释模型则把沥青作为无效孔隙的一部分, 核磁共振有效孔隙度基本不受沥青影响, 真实反映了储集层有效孔隙度大小, 因此, 可认为常规与核磁共振测井有效孔隙度之差在一定程度上等于储集层中沥青质含量大小。



(a) 常规测井模型

(b) 核磁共振测井模型

图3 沥青质碳酸盐岩储集层常规测井与核磁共振测井孔隙度解释模型

根据现场测井资料, 常规有效孔隙度主要采用声波地层因素公式计算 ((2) 式), 经现场岩心刻度, 公式 (2) 中参数 d 值为 2。

$$\phi_c = \left[1 - \left(\frac{\Delta t_{ma}}{\Delta t} \right)^d \right] \times 100\% \quad (2)$$

2.2.2 常规测井孔隙度与横波孔隙度重叠法

研究表明, 利用横波时差计算地层的孔隙度是可行的^[11-12]。横波时差受孔隙流体影响较小, 主要受地层岩性影响。由于龙王庙组岩性单一, 泥质含量极低 (小于 5%); 因此, 通过进行覆压和氦孔校正后绘制出岩心孔隙度与实测横波时差交会图 (见图 4), 建立横波时差孔隙度计算公式 ((3) 式)。

$$\Delta t_s = b_1 \phi_t + b_2 \quad (3)$$

根据拟合结果, 参数 b_1 为 2.58, b_2 为 279.39。实际计算结果表明, 在不含沥青储集层段利用横波时差计算孔隙度与常规测井计算孔隙度基本相当; 而在富含沥青层段, 横波时差值异常减小, 导致利用横波时差计算的孔隙度将明显低于常规测井计算孔隙度, 反映了地层中没有被沥青充填的有效孔隙度大小, 可以认为常规测井计算孔隙度与横波时差计算孔隙度两者之间的差值正好等于储集层中沥青含量的大小。

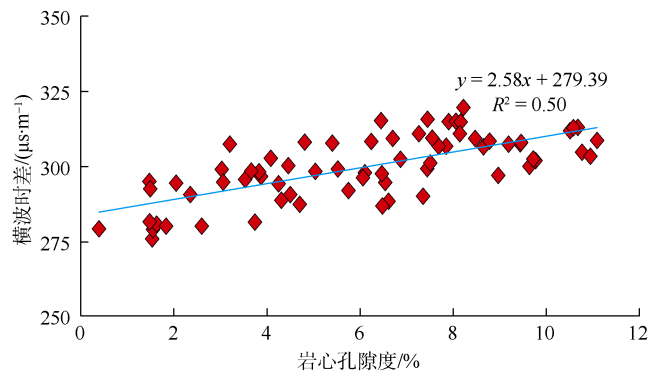


图4 岩心分析孔隙度与横波时差关系图

2.3 含水饱和度计算

对于沥青质碳酸盐岩储集层, 采用阿尔奇公式计算含水饱和度时, 孔隙度应采用沥青校正后的有效孔隙度, 与此同时必须考虑沥青对电阻率及其他岩石电学参数的影响。

2.3.1 电阻率沥青校正

实验表明沥青会导致储集层电阻率增高, 进而使测井计算含气饱和度偏高, 容易导致储集层流体性质误判, 因此需要对电阻率进行沥青校正。根据实验室测得的沥青含量与电阻率变化之间的关系 (见图 5) 可以看出, 电阻率随储集空间中沥青含量的增多以及所

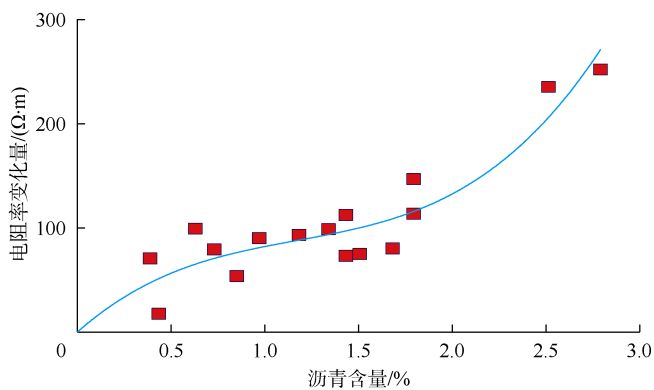
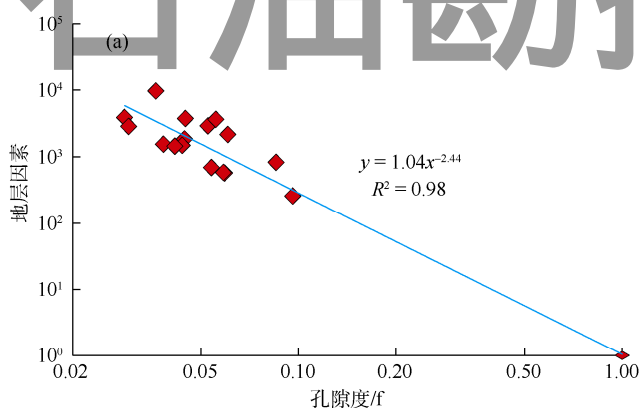


图5 沥青含量与电阻率变化量关系图

占体积比例的增大而增大。当沥青含量小于2%时，电



阻率增加幅度较缓，而当沥青含量大于2%后，电阻率增加幅度明显。

建立的电阻率沥青校正模型为：

$$R_{ij} = c_1 V_1^3 + c_2 V_1^2 + c_3 V_1 \quad (4)$$

根据拟合结果，参数 c_1 为 30.6， c_2 为 -107.7， c_3 为 159.3。利用该模型，并结合上述沥青含量计算方法就可以对沥青质碳酸盐岩储集层的电阻率进行校正，为储集层含气饱和度计算奠定基础。

2.3.2 岩石电学参数确定

沥青溶解前岩石电学实验分析结果表明，孔隙度与地层因素、电阻率增大系数与含水饱和度在双对数坐标图中都具有较好的线性相关性（见图6）。

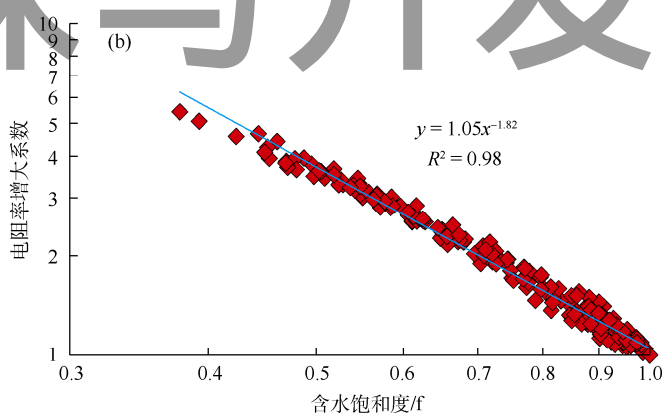


图6 沥青溶解前岩电实验结果

为此，可以对沥青质碳酸盐岩储集层测井资料采集进行优化：首先利用常规测井资料快速定性识别沥青质储集层；其次，根据沥青储集层发育情况及现场生产需求建议加测核磁共振或阵列声波测井（二选一），以达到准确评价沥青质储集层有效孔隙度及含气饱和度的目的。对于新探区，建议至少测量2~3口岩性扫描测井，为方法建立及检验提供依据。

3 现场应用

3.1 新井跟踪评价

X53井为龙王庙组的一口甩开预探井，图7为X53井龙王庙组储集层测井解释成果图。从图上可以看出，5189~5207m层段利用纵波时差反算的电阻率值明显低于实测深侧向电阻率值，常规测井与核磁共振测井孔隙度差异较大，判识为沥青富集层段。经计算沥青质含量范围为0.1%~3.1%，平均值为1.4%，经孔隙度及电阻率沥青校正后，储集层段5191.0~5199.5m

有效孔隙度为2.97%，含水饱和度为32.7%，测井综合解释为差气层；储集层段5200.5~5207.0m有效孔隙度为2.78%，含水饱和度为51.3%，测井综合解释为水层。对层段5189~5207m酸化压裂测试，产微气，日产水5.4m³，试气结论为含气水层，分析产水段为测井解释水层段。

据2015—2016年龙王庙组完钻井测试数据统计，共计测试23口井，试气79层，测井综合解释符合率为97.5%。

3.2 沥青平面分布

基于研究区内80多口井龙王庙组沥青含量计算结果（见图8）可以看出，龙王庙组沥青含量为0.1%~3.0%。相对高石梯区块，磨溪区块主体储集层沥青含量相对较高，其中磨溪22井—磨溪103井—磨溪202井—磨溪46井—磨溪107井—磨溪29井—磨溪207井一带为沥青富集区带，气藏的破坏程度相对较高，下一步龙王庙组气藏开发应引起注意。

4 结论

沥青占据着储集层的部分储集空间，不仅减小储集层的孔隙度，还破坏储集层孔隙结构，并大大降低储集层的渗透性，严重影响了储集层的物性及产能。实验表明：①沥青会破坏储集层的孔隙结构，导致储集层有效储集空间和渗透性降低；②随着沥青含量的增加，纵横波时差普遍减小，而密度和电阻率值则普遍增大；③纵波时差、密度随着沥青含量增加变化相对较小，而横波时差、电阻率变化相对较大；④沥青核磁共振 T_2 值普遍小于 3 ms，沥青成熟度越高，核磁共振 T_2 值越小。据此提出一种基于常规与特殊测井相结合的沥青质碳酸盐岩储集层的沥青含量、有效孔隙度和含水饱和度评价方法，并基于四川盆地安岳气田寒武系龙王庙组气藏 80 多口井的资料划分出沥青平面富集区带，为试油层位优选及油气开发措施制定提供可靠的依据。

符号注释：

$a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, c_3, d$ ——常数； R ——相关系数； R_{tac} ——声波反算电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ； R_{ij} ——沥青校正后电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ； T_2 ——核磁共振横向弛豫时间，ms； V_1 ——测井计算沥青含量，%； ϕ_c ——常规测井孔隙度，%； Δt ——纵波时差， $\mu\text{s}/\text{m}$ ； Δt_{ma} ——岩石骨架纵波时差， $\mu\text{s}/\text{m}$ ； Δt_s ——横波时差， $\mu\text{s}/\text{m}$ ； ϕ_t ——岩心孔隙度，%。

参考文献：

- [1] 纪友亮, 张世奇, 李红南, 等. 固态沥青对储层储集性能的影响[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(4): 87-90.
JI Youliang, ZHANG Shiqi, LI Hongnan, et al. The effect of solid reservoir bitumen on reservoir quality[J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 22(4): 87-90.
- [2] 谷志东, 殷积峰, 袁苗, 等. 四川盆地东部深层盐下震旦系—寒武系天然气成藏条件与勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 137-149.
GU Zhidong, YIN Jifeng, YUAN Miao, et al. Accumulation conditions and exploration directions of natural gas in deep subsalt Sinian-Cambrian System in the eastern Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2): 137-149.
- [3] 周进高, 徐春春, 姚根顺, 等. 四川盆地寒武统龙王庙组储集层形成与演化[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 158-166.

ZHOU Jingao, XU Chunchun, YAO Genshun, et al. Genesis and evolution of Lower Cambrian Longwangmiao Formation reservoirs, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2): 158-166.

- [4] 胡守志, 付晓文, 王延栋, 等. 储层中的沥青沉淀带及其对油气勘探的意义[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(1): 99-103.
HU Shouzhizhi, FU Xiaowen, WANG Yandong, et al. Bitumen precipitation zone in reservoir and its significance to oil and gas exploration[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(1): 99-103.
 - [5] LOMANDO A J. The influence of solid reservoir bitumen on reservoir quality[J]. AAPG Bulletin, 1992, 76(8): 1137-1152.
 - [6] HWANG R J, TEERMAN S C, CARLSON R M. Geochemical comparison of reservoir solid bitumen with diverse origins[J]. Organic Geochemistry, 1998, 29(1/2/3): 505-517.
 - [7] MOORE L V. Significance classification of asphaltic material in petroleum exploration[J]. Oil & Gas Journal, 1984, 82(41): 109-112.
 - [8] 张林, 魏国齐, 吴世祥, 等. 四川盆地震旦系—下古生界沥青产烃潜力及分布特征[J]. 石油实验地质, 2005, 27(3): 276-280.
ZHANG Lin, WEI Guoqi, WU Shixiang, et al. Hydrocarbon-generating potential of bitumen and distribution characteristics of Lower Paleozoic in Sichuan Basin, Sinian[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2005, 27(3): 276-280.
 - [9] 章成广, 范文同, 马勇, 等. 沥青质砂岩储层岩电参数研究[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(6): 90-94.
ZHANG Chengguang, FAN Wentong, MA Yong, et al. Study on the electrical parameters of rock in sandstone reservoir[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(6): 90-94.
 - [10] 陈明江, 任兴国. 含沥青储层的测井识别及评价[J]. 测井技术, 2012, 36(3): 272-276.
CHEN Mingjiang, REN Xingguo. Log identification and evaluation for bitumen-bearing reservoir[J]. Journal of Well Logging Technology, 2012, 36(3): 272-276.
 - [11] RAGHU R, WILLIAM F M, CAROLINA C. Total porosity estimation in shaly sands shear modulus[R]. Tulsa: SPWLA 36th Annual Logging Symposium, 1995.
 - [12] 王建强, 张丽君. 利用横波时差计算孔隙度的方法研究[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(6): 92-94.
WANG Jianqiang, ZHANG Lijun. Study on the method of calculating porosity by using shear slowness[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(6): 92-94.
- 第一作者简介：赖强（1979-），男，重庆璧山人，硕士，中国石油西南油气田公司高级工程师，主要从事测井资料解释及方法研究。地址：四川省成都市高新区天府大道北段12号，中国石油西南油气田公司勘探开发研究院地球物理研究所，邮政编码：610041。E-mail: laiqiang@petrochina.com.cn
收稿日期：2017-03-03 修回日期：2017-10-14

（编辑 黄昌武）