

doi:10.11720/wtyht.2015.3.18

田瀚,杨敏.碳酸盐岩缝洞型储层测井评价方法[J].物探与化探,2015,39(3):545-552.http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.3.18

Tian H, Yang M. The logging evaluation methods for fractured-vuggy carbonate reservoirs[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(3): 545-552. http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.3.18

# 碳酸盐岩缝洞型储层测井评价方法

田瀚,杨敏

(中国石油勘探开发研究院,北京 100083)

**摘要:** 由于缝洞型碳酸盐岩储层孔隙结构复杂,非均质性极强,使得碳酸盐岩缝洞型储层的识别和评价一直以来是测井分析的热点和难点。文章从碳酸盐岩缝洞型储层的识别、储层参数计算、储层有效性评价以及储层流体识别等 4 个方面,较系统地介绍了碳酸盐岩缝洞型储层测井评价的方法技术。在正确认识各种方法的技术要点及应用条件的基础上,综合利用测井技术,并结合地质、地震等相关手段,可以提高碳酸盐岩测井评价的效率和准确性。

**关键词:** 碳酸盐岩缝洞型储层;储层识别;参数计算;流体识别;有效性评价

**中图分类号:** P631.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2015)03-0545-08

随着碳酸盐岩油气藏的陆续发现,碳酸盐岩储层测井评价变得越来越重要。虽然测井解释技术取得了很大进步,但是由于碳酸盐岩缝洞型储层孔隙结构复杂,非均质性强,使得在储层类型和流体识别、储层参数计算等方面依旧存在较大误差<sup>[1]</sup>。在 20 世纪 80 年代,我国很多学者就开始对碳酸盐岩测井评价方法进行了系统的研究,以谭延栋<sup>[2]</sup>、赵良孝<sup>[3]</sup>等为主要代表,他们在碳酸盐岩测井评价的理论探索和应用研究上做出了很大贡献。在常规测井中,人们发现双侧向测井对识别裂缝发育层段比较有效,为此,学者们开始利用双侧向测井评价裂缝相关参数的一系列实验和数值模拟研究。如李善军等人<sup>[4]</sup>用三维有限元法对裂缝的双侧向测井响应特征进行了模拟,建立了裂缝孔隙度定量解释模型,且该方法至今仍被解释人员所应用;但由于实验只考虑了简单单组裂缝的影响,忽略了其他因素对双侧向电阻率的作用,导致利用双侧向计算裂缝相关参数时依旧存在较大误差。随着在 20 世纪 90 年代成像、核磁共振等新技术的出现为碳酸盐岩测井评价提供了大量有用的信息,成为了碳酸盐岩测井评价的重要手段,在缝洞型储层的识别和评价方面得到了广泛的应用。但由于成像测井探测深度浅,只能较好地反映出井壁周围的情况,难以对延伸较远的缝洞进行评价,而在利用偶极横波测井的反射斯

通利波、横波分裂等现象去判别裂缝的有效性时,一般也只能对井壁附近比较明显的张开缝洞有效,所以这些手段都不能比较全面地评价井筒周围缝洞的情况。笔者在综合研究的基础上,系统总结了现有常规测井和测井新技术应用于碳酸盐岩中的方法技术,从碳酸盐岩缝洞储层的识别、储层参数计算、有效性评价和流体识别等几个方面来分析现有方法技术的应用效果和适用性。

## 1 储层类型识别方法

在用测井资料评价碳酸盐岩储层时,首先必须搞清楚储层类型,然后根据不同的储集类型,应用不同的测井信息和方法进行碳酸盐岩测井分析评价<sup>[5]</sup>。在储层测井评价中,通常根据储层空隙类型及其组合关系对碳酸盐岩储层进行分类。由于我国海相碳酸盐岩储层基质孔隙度普遍不发育,储集空间主要以溶蚀缝洞为主,故根据测井响应特征,将储层主要分为孔洞型、裂缝型、裂缝—孔洞型和洞穴型四类。其中,孔洞型储层的主要储集空间为溶蚀的孔、洞,一般是在原生孔隙基础上经过溶蚀改造而成,裂缝欠发育;裂缝型储层的储集空间以裂缝为主,溶蚀孔洞不发育,储集性能较差,但有很好的渗透性;裂缝—孔洞型储层是孔洞型储层和裂缝型储层的组合,其中,孔洞为主要的储集空间,而裂缝主

要起渗滤通道的作用<sup>[5]</sup>。在依据测井资料识别和划分储层类型时,通常主要有两种方法<sup>[6-9]</sup>,一是综合利用多种常规测井资料进行判别;二是在有成像测井资料时,利用成像资料直观地观察裂缝及孔洞的发育情况。

### 1.1 常规测井

利用常规测井识别储层类型时,一般会综合考虑多条曲线。对于裂缝型储层,通常三孔隙度曲线没有明显的变化,但双侧向测井一般有比较明显的响应特征,即在裂缝发育层段,深浅电阻率值会明显降低且存在明显的差值。前人通过研究还发现,深浅电阻率值的差异情况能在一定程度上反映储层裂缝的产状,如对于低角度裂缝,深浅侧向电阻率值一般表现为“负差异”,而对于高角度缝,深浅侧向电阻率值表现为“正差异”<sup>[10]</sup>;对于孔洞型储层,三孔隙度曲线一般均会有一些的响应,其中以密度曲线反应最为灵敏,电阻率曲线相对致密围岩有明显的降低但深浅电阻率没有明显差值;对于裂缝—孔洞型储层,其相当于孔洞型储层和裂缝型储层测井响应特征的叠加,即不仅三孔隙度曲线有变化,其深浅电阻率也存在明显的差值;而对于未填充或半充填

的洞穴型储层,其在测井曲线响应特征表现为高时差、低密度、高中子,井径明显增大,若填充有泥质,自然伽马表现为明显高值,且在钻井时也会发生明显的放空、漏失现象。

一些学者为了能进一步挖掘测井曲线包含的信息,通常会采用一些数学方法对数据进行处理,从而突出或提取出曲线中有用的信息。通常在碳酸盐岩储层类型识别中使用较多的就是神经网络、聚类分析和概率统计等方法。

### 1.2 成像测井

成像测井由于其高精度、高分辨率的特性,可以获得类似岩芯照片的井壁图像,在成像图上可以清晰地识别出井壁上的裂缝和溶孔<sup>[11]</sup>。

电成像测井是根据电阻率值的高低来进行色度的标定,所以我们在成像图上识别有效缝洞储层时需要仔细辨别。李竹强<sup>[12]</sup>、张凤生<sup>[13]</sup>、黄华<sup>[14]</sup>、陈刚花<sup>[15]</sup>等利用成像测井很好地识别出裂缝及孔洞,并总结出了各种缝洞在成像图上的展现特征(图1):高导缝在图像上往往表现为连续的黑色正弦曲线;高阻缝在图像上往往表现为晕圈状的亮黄色—白色正弦曲线,反映裂缝被方解石充填,属于无效

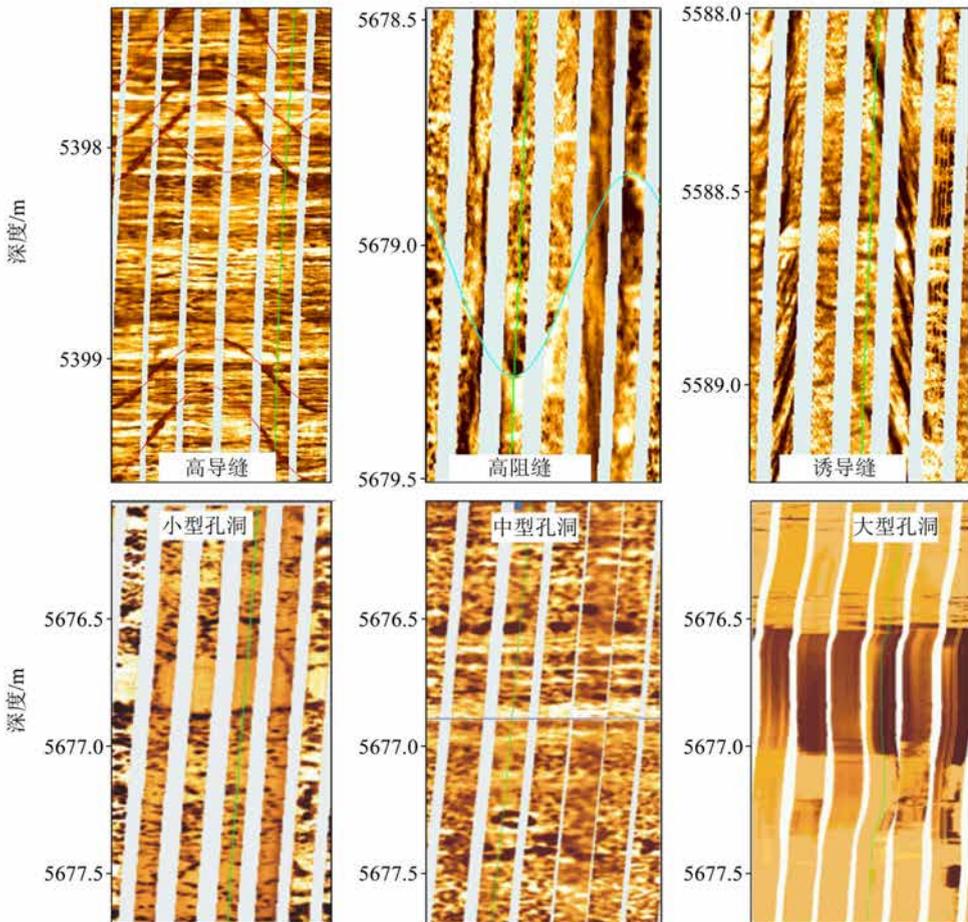


图 1 各种类型的裂缝和孔洞在图像上的表现

缝;诱导缝是钻井过程中所产生的,是钻具震动、应力释放和钻井液液压裂等因素诱导形成的,对储层原始储渗空间没有贡献,在图像上往往分布在相距 $180^\circ$ 图像的两侧;溶孔及溶洞在图像上通常呈暗色斑状或斑块,不受岩石组构限制,呈分散状分布。在岩芯标定测井的基础上,可以根据成像测井的图像特征识别裂缝的产状及缝洞的大小和规模。

偶极横波测井评价缝洞型碳酸盐岩储层主要是依据横波分裂、斯通利波反射系数变化、波能量衰减、渗透性指示及斯通利波波形变化等现象<sup>[16]</sup>。通常对于与井眼相连通的裂缝、孔洞,斯通利波会表现出能量的衰减、反射系数变大、出现横波分裂现象,所以利用斯通利波可较好地识别出与井眼相交的缝洞。

## 2 储层参数计算

在储层类型识别的基础之上就是储层参数的计算,其是后续流体识别、储层评价和储量计算的主要依据<sup>[1]</sup>。不同的碳酸盐岩储层类型和储集空间具有不同的测井响应特征,应建立不同储层类型下的测井解释模型。

### 2.1 孔隙度

在三孔隙度测井中,一般认为密度、中子测井反映储层的总孔隙度 $\Phi_T$ ,声波测井用来反映基质孔隙度 $\Phi_M$ ,而裂缝孔隙度主要是利用双侧向测井和成像测井求取。

#### 2.1.1 双侧向测井

对于双侧向测井求取裂缝孔隙度,已经有很多的学者进行过研究。陈科贵<sup>[17]</sup>提出了一种利用电流电阻法求取裂缝孔隙度,他把裂缝性地层的导电体系看成是由裂缝体积与岩石体积构成的两个电阻的并联;Pezard 等在 Sibbit 等人研究的基础上,建立了裂缝地层电性各向异性的数值计算模型,进一步考察了不同角度裂缝的双侧向响应,给出了在水平裂缝和垂直裂缝情况下求取裂缝孔隙度的模型<sup>[18]</sup>;相关油田通过模拟实验,研究出了利用双侧向测井曲线直接计算地区裂缝孔隙度的经验公式<sup>[19]</sup>(见式(1)、式(2))。利用双侧向测井求取裂缝孔隙度,一般在致密储层段应用较好,如果裂缝层段有泥质存在,需要进行泥质校正,以突出裂缝对双侧向电阻率的影响。

当发育高角度裂缝时( $R_{LLD} > R_{LLS}$ )

$$\phi_f = (8.52253/R_{LLS} - 8.242778/R_{LLD} + 0.00071236) \times 100R_{mf}, \quad (1)$$

当发育低角度裂缝时( $R_{LLD} < R_{LLS}$ )

$$\phi_f = (1.99247/R_{LLD} - 0.992719/R_{LLS} + 0.000318291) \times 100R_{mf}. \quad (2)$$

式中: $R_{LLD}$ 为深侧向电阻率, $R_{LLS}$ 为浅侧向电阻率, $R_{mf}$ 为泥浆滤液电阻率值, $\phi_f$ 为裂缝孔隙度值。

#### 2.1.2 电成像测井

利用电成像测井进行孔隙度谱分析可以得到井周基质孔隙与次生孔隙的分布图,从而求取储层的总孔隙度、基质孔隙度及次生孔隙度。随着现在图像处理手段的不断进步,可以利用电成像资料定量计算储层裂缝、孔洞的相关参数。通过对图像的分割,提取反映裂缝、孔洞的图像信息,然后对其进行分析处理,得到储层的相关参数<sup>[20]</sup>。成像测井虽然具有较高的分辨率,但最好是利用岩芯资料对成像孔隙度进行刻度,从而得到较为准确的孔隙度<sup>[1]</sup>。

### 2.2 饱和度

确定储层含水饱和度的方法通常有岩芯分析、Archie 公式及其变形公式、核磁共振测井等,对于碳酸盐岩储层而言,由于其储集空间多样,故不同的储层类型其所采用的饱和度模型不尽相同。

#### 2.2.1 基质饱和度

对于基质饱和度,常用的方法就是根据现场情况得到经验性的 Archie 公式来计算,然而由于碳酸盐岩储层较强的非均质性,导致直接利用 Archie 公式求取饱和度值会存在较大的误差。李宁<sup>[21-22]</sup>在 1989 年提出了非均匀各向异性体积模型和相应的网络导电模型,导出验证了电阻率—含油气饱和度关系的一般形式,建立了非均值复杂储层基质饱和度定量计算的理论基础。其一般形式为

$$I = \sum_{i=1}^n \left( \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n h_{ik} s_w \theta_{ik}} \right) = \frac{P_1}{h_{11} s_w \theta_{11} + h_{12} s_w \theta_{12} + \dots + h_{1i_1} s_w \theta_{1i_1}} + \frac{P_2}{h_{21} s_w \theta_{21} + h_{22} s_w \theta_{22} + \dots + h_{2i_2} s_w \theta_{2i_2}} + \dots + \frac{P_n}{h_{n1} s_w \theta_{n1} + h_{n2} s_w \theta_{n2} + \dots + h_{ni_n} s_w \theta_{ni_n}}. \quad (3)$$

通过碳酸盐岩全直径岩芯岩电实验分析认为:

$$I = \frac{1}{P_1 S_w^{n_1}} + \frac{1}{P_2 S_w^{n_2}} \quad (4)$$

可以作为通解方程(3)关于碳酸盐岩尺寸下计算含水饱和度较好的截短形式,但是只有对特定层位岩电资料单独分析才可能呈现出式(4)所述的特征,若将不同层段的岩电资料放在一起进行简单的拟合,储层间的特征差异将被掩盖,通常只能呈现简单

的 Archie 特征。同时,不同岩芯的岩电实验结果差别很大。所以,对于碳酸盐岩储层,应当首先分析岩芯的孔隙结构特征,然后根据确定的孔隙结构特征选择对应的电阻增大率与含水饱和度之间的关系,最后确定相应的解释模型<sup>[23]</sup>。

### 2.2.2 裂缝饱和度

对于裂缝饱和度,由于裂缝的特殊性,沿用确定基质饱和度的方法是不现实的。可以利用数值岩芯实验的数值模拟来求取裂缝饱和度:采用全直径岩芯实验结果作为边界条件对数值岩芯实验进行约束,使数值岩芯实验过程在实际岩芯实验刻度范围内进行,通过数值模拟得到的图版来确定裂缝饱和度<sup>[23]</sup>。

法国国家石油研究院通过实验测量不同宽度裂缝上的束缚水膜厚度来计算束缚水饱和度,得到了裂缝宽度与束缚水饱和度 ( $S_{wf}$ ) 的实验关系式<sup>[1,24-25]</sup>

$$S_{wf} = (3B_w) / (2\Delta w), \quad (5)$$

式中: $B_w$  为裂缝壁水膜厚度; $\Delta w$  为裂缝宽度。

另外,通过三孔隙度模型,不用分别求解基质和裂缝的饱和度,也可直接求解缝洞型储层的饱和度。Ali Al-Ghamdi<sup>[26]</sup> 等人通过三孔隙度模型求得变  $m$  值

$$m = \frac{-\lg \left[ \phi_{nc} + \frac{(1 - \phi_{nc})^2}{\phi_2 + (1 - \phi_2 - \phi_{nc}) / \phi_b^{-m_b}} \right]}{\lg \phi}, \quad (6)$$

从而可将均匀地层解释模式转化为非均匀地层解释模式,其关键就是要弄清各种孔隙类型在总孔隙度中的分布情况。式(6)中: $m$  为组合系统的胶结指数; $\phi_{nc}$  为非连通缝洞的孔隙度; $\phi_2$  为裂缝孔隙度; $\phi$  为总孔隙度; $\phi_b$  为基质孔隙度; $m_b$  为基质孔隙部分的胶结指数,约定为 2。刘之的<sup>[27]</sup>、张丽华<sup>[28]</sup>、漆立新<sup>[29]</sup> 等利用这种变  $m$  值方法在评价复杂储层饱和度上取得了一定的效果。

储层总含油饱和度是裂缝含油饱和度和基质孔隙含油饱和度的加权平均。均匀的小溶蚀孔洞饱和度可与基质部分等同<sup>[1]</sup>,即

$$S_o = \frac{\phi_b}{\phi_b + \phi_f} S_{ob} + \frac{\phi_f}{\phi_b + \phi_f} S_{of}, \quad (7)$$

式中: $S_{ob}$  为基质含油饱和度, $S_{of}$  为裂缝含油饱和度。

### 2.3 渗透率

由于碳酸盐岩储层具有极强的非均质性和各向异性,使得碳酸盐岩渗透率的准确计算一直是测井评价的难题之一<sup>[23]</sup>。碳酸盐岩储层复杂的孔隙结构以及缝洞的存在使得孔隙度与渗透率的相关性极

差。要想确定碳酸盐岩渗透率,必须了解储层孔隙结构的分布特征。

碳酸盐岩储层渗透率通常由基质和缝洞两部分组成<sup>[2]</sup>。对于基质渗透率,一般多采用岩芯分析的统计回归公式、Timur 公式等。赵军<sup>[30]</sup> 等人基于流动单元,建立了以流动单元分类为基础的非均质储层渗透率评价模型,并应用于塔里木油田,取得了较好的应用效果。

对于裂缝渗透率,由于裂缝的发育情况比较复杂,所以其渗透率的求取比较困难。赵良孝根据碳酸盐岩储层裂缝的产状和组合特征,将裂缝归纳为三种类型,即:单组系裂缝、多组系垂直裂缝及网状裂缝,并分别给出了相应的解释模型<sup>[3]</sup>;根据国内外碳酸盐岩的裂缝统计及某构造奥陶系碳酸盐岩的岩芯裂缝数据拟合,得到了裂缝开度与裂缝渗透率的关系式<sup>[16,31]</sup>

$$K_f = 8221.85 \times \phi_f \times \xi^{1.596}, \quad (8)$$

式中: $K_f$  为裂缝渗透率; $\xi$  为裂缝开度; $\phi_f$  裂缝孔隙度。

裂缝开度可由双侧向差异来估计,常规测井曲线计算裂缝宽度公式<sup>[28]</sup>为:

高角度裂缝 ( $R_{LLD} > R_{LLS}$ )

$$\xi = \left( \frac{1}{R_{LLS}} - \frac{1}{R_{LLD}} \right) / \left( \frac{0.4}{R_m} \right), \quad (9)$$

低角度裂缝 ( $R_{LLS} > R_{LLD}$ )

$$\xi = \left( \frac{1}{R_{LLD}} - \frac{1}{R_{LLS}} \right) / \left( \frac{1.2}{R_m} \right). \quad (10)$$

式中: $R_{LLS}$  为浅侧向电阻率, $R_{LLD}$  为深侧向电阻率, $R_m$  为泥浆电阻率, $\xi$  为裂缝开度。

在裂缝带处,井内和地层中的流体可以自由流通,而斯通利波对流体的运动很敏感,所以在低频斯通利波的作用下,管波会使井眼与地层裂缝处的流体发生渗流,从而导致斯通利波能量衰减和时差变大,这些现象反映了裂缝的连通性和渗流能力。斯通利波的速度、相位、频率和幅度的变化都与地层的渗透性有着密切关系,由此可以反演地层的渗透率<sup>[1,23]</sup>。

### 3 储层有效性评价

对于缝洞型储层,评价储层的有效性主要是评价储层裂缝的发育情况、裂缝的张开度及径向延伸程度、孔洞的发育程度及孔洞的连通性等。对于洞穴型储层,评价其有效性的关键是判断洞穴充填程度及其充填物,而那些与井眼相交的洞穴及其充填情况在钻录井、常规测井曲线和成像测井图上都有

显示<sup>[32-34]</sup>。

对于没有成像资料的井,常规测井资料就成为唯一的选择。除了常规的通过储层物性参数结合试油结果给出有效储层的物性下限值外,还可以利用三孔隙度模型来进行储层有效性的评价。漆立新等<sup>[29]</sup>利用三孔隙度模型求取的变胶结指数  $m$  结合连通缝洞孔隙度对塔河油田碳酸盐岩缝洞型储层进行了有效性的评价,取得了理想的效果。

对于有成像测井资料的井,可以利用成像资料进行储层有效性评价。目前利用成像资料评价有效

性的方法有:综合利用 FMI 资料结合 ARI(或者双侧向测井)、DSI 资料,利用成像测井的孔隙度谱分析等<sup>[23,35]</sup>。

成像测井孔隙度谱评价储层有效性的基本原理是利用孔隙度谱的均值与方差,结合试油资料来判断储层情况。其中孔隙度谱均值反映储层整体孔隙大小的情况,体现储层的储集能力;孔隙度谱方差反映储层孔隙的非均质性,体现储层的潜在连通性,如图 2 所示。

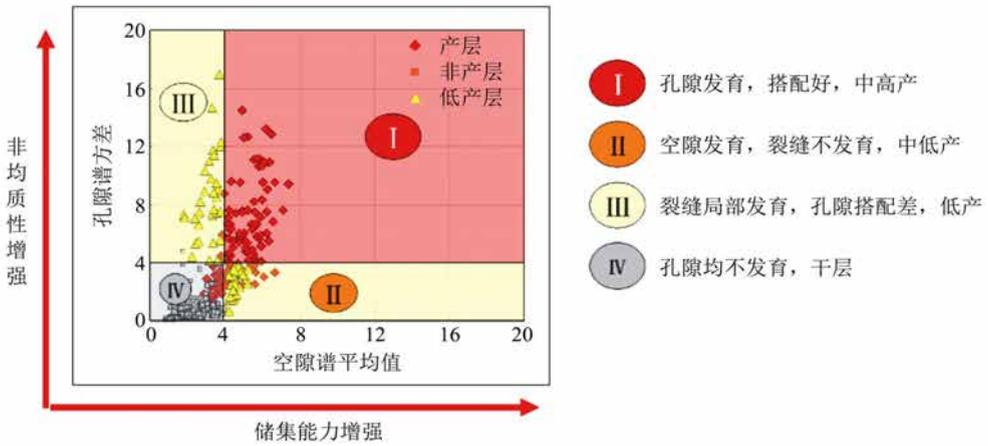


图 2 利用孔隙度谱均值与方差评价储层有效性的基本原理(据李宁,2013<sup>[23]</sup>)

对于那些远离井眼的储层,利用常规测井和成像测井也不能很好地识别出来,此时可以利用远探测声波测井进行储层的识别,由于远探测声波测井探测深度一般在 3~10 m,所以它与常规测井和成像测井相比具有独特的优势<sup>[36-37]</sup>。塔里木油田与中国石油勘探开发研究院合作,利用远探测声波测井

和井下叠前逆时偏移成像技术已经发现了一批隐蔽裂缝高产油气层,具有良好的应用效果(图 3)。

总的来说,虽然碳酸盐岩储层非均质性极强,但对其有效性评价已有相应方法,利用电成像、偶极声波、远探测声波到井旁地震等,可以建立起深度梯次储层有效性评价技术<sup>[23]</sup>。

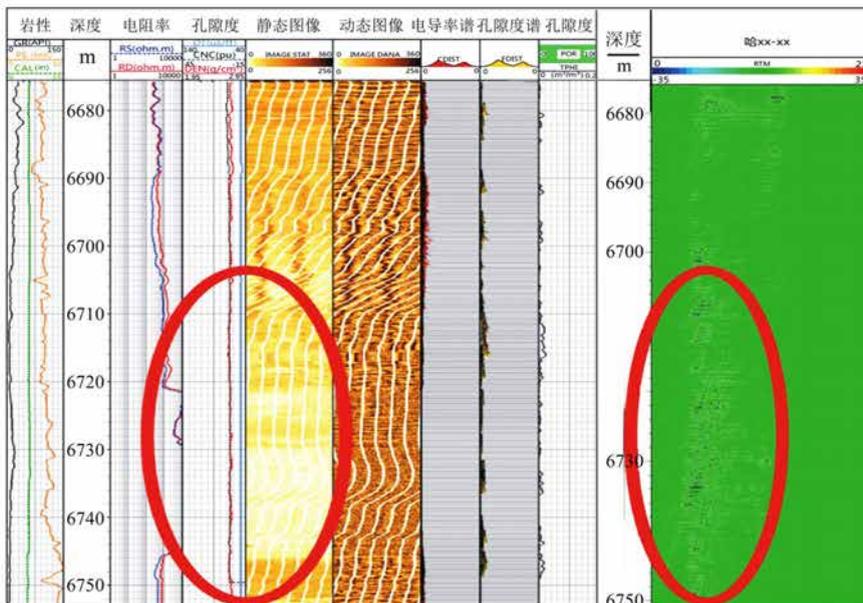


图 3 远探测声波测井识别远离井眼的裂缝性储层

### 4 流体性质识别方法

碳酸盐岩缝洞型储层的非均质性、泥浆的侵入、矿化度的高低、扩径等因素的影响使碳酸盐岩储层流体性质的识别成为了难题<sup>[38]</sup>。通常碳酸盐岩缝洞型储层流体性质识别的方法有：交会图法、 $P^{1/2}$ 法、三孔隙度重叠法、地层测试器测井识别法、核磁共振测井判别法、综合指示法、成像测井视地层水电阻率分布法等<sup>[24,38-42]</sup>。其中, $P^{1/2}$ 法适用于部分裂缝孔隙型储层,且储层的地层水电阻率要稳定;三孔

隙度重叠法对岩性、井眼要求较高,且对于低孔裂缝储层和高角度裂缝储层不适用;MDT一般在孔隙型储层和有一定基质孔隙的裂缝孔隙型储层具有较好的应用;成像测井视地层水电阻率分布法其利用成像测井测得的多条电阻率曲线计算得到井壁冲洗带附近的视地层水电阻率。由于残余油气的影响,油气层视地层水电阻率分布谱为宽峰、多峰特征,峰值较大;而水层段谱峰窄、多为单峰特征,峰值相对较小,如图4所示。

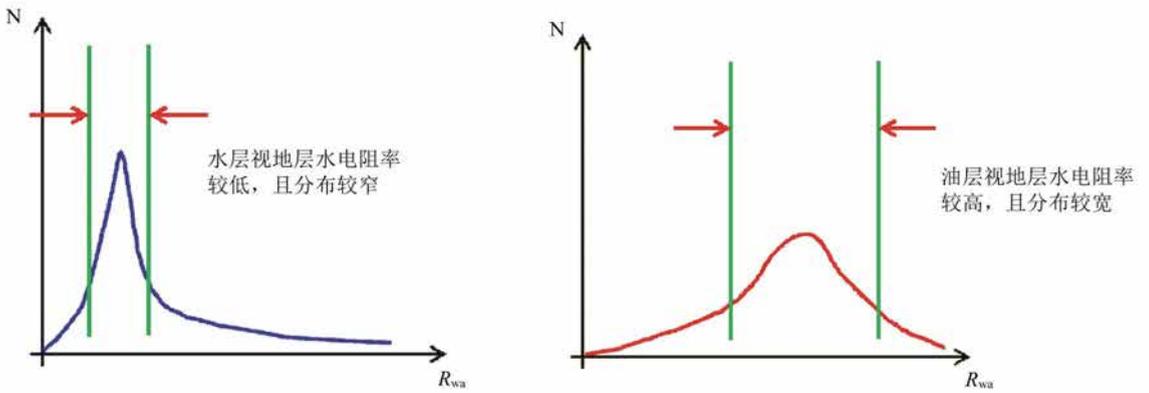


图4 油水层段视地层水分布谱

肖承文等提出了一种识别缝洞型储层流体性质的方法,即利用视地层水电阻率均值与均方根差进行储层流体识别,其中视地层水电阻率的均值和方差求取方法见式(11),该流体识别方法在塔里木油田取得了较好的应用效果<sup>[43]</sup>(图5)。

$$\bar{R}_{wa} = \frac{\sum_{i=1}^N R_{wai}}{N}, \sigma_{wa} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (R_{wai} - \bar{R}_{wa})^2}{N}} \quad (11)$$

式中: $\bar{R}_{wa}$ 和 $\sigma_{wa}$ 分别为待识别储层段的视地层水电阻率的均值和均方根差; $N$ 为待识别储层段内采样数。

对于气体的识别,由于天然气的物理性质与油水存在明显的不同,所以除了上述的方法,还有很多有效识别气层的方法,如:纵横波速度比或泊松比法、纵横波能量比和纵横波时差比重叠法、双横波时差法、双侧向电阻率分析法、孔隙度比值法等<sup>[44-45]</sup>。

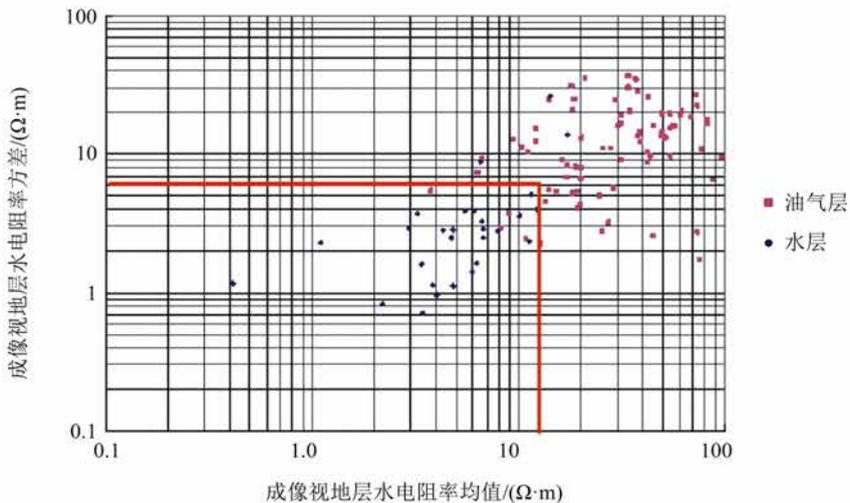


图5 轮古地区储层流体性质识别交会图

## 5 结论

(1) 碳酸盐岩储层非均质性极强, 仅靠常规测井难以满足生产要求。成像测井解决了常规测井识别碳酸盐岩储层类型的难题, 能直观地展现储层井壁情况, 同时也可以进行储层识别和储层相关参数的定量计算; 结合其他测井方法, 可以有效地进行储层物性和流体性质评价, 大大弥补了常规测井的不足。

(2) 充分挖掘成像测井提供的信息, 通过成像测井进行储层有效性评价时, 巧妙地绕过渗透率难求的问题, 提高了储层有效性评价的精度。对于井眼附近隐蔽的储层, 远探测声波测井具有独特的优势。

(3) 综合利用测井新技术, 并结合地质、地震等相关手段, 可以合理预测缝洞发育带, 提高勘探效率, 而且多学科有机结合进行储层评价也是未来的发展方向。

## 参考文献:

- [1] 徐敬领, 王亚静, 曹光伟, 等. 碳酸盐岩储层测井评价方法[J]. 现代地质, 2012, 26(6): 1265-1274.
- [2] 谭廷栋. 裂缝性油气藏测井解释模型与评价方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1987.
- [3] 赵良孝, 补勇. 碳酸盐岩储层测井评价技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
- [4] 李善军, 肖承文, 汪涵明, 等. 裂缝的双侧向测井响应的数学模型及裂缝孔隙度的定量解释[J]. 地球物理学报, 1996, 39(6): 845-852.
- [5] 司马力强, 疏壮志. 碳酸盐岩储层测井评价方法及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
- [6] 张松杨, 陈萍, 范宜仁. 塔河油田碳酸盐岩储层测井多井评价研究[J]. 石油物探, 2005, 44(5): 433-438.
- [7] 刘之的, 苗福全, 罗晓芳, 等. 塔河油田五区奥陶系碳酸盐岩岩溶地层测井响应特征[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(3): 1483-1489.
- [8] 童亨茂. 成像测井资料在构造裂缝预测和评价中的应用[J]. 天然气工业, 2006, 26(9): 58-61.
- [9] 牛虎林, 胡欣, 徐志强, 等. 基岩油气藏裂缝性储层的成像测井评价及裂缝预测[J]. 石油学报, 2010, 31(2): 264-269.
- [10] 张尚华, 司马立强, 颜其彬, 等. 复杂碳酸盐岩储层测井有效性评价[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(2): 84-88.
- [11] 贾文玉, 田素月, 孔耀庭, 等. 成像测井技术和应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
- [12] 李竹强, 范宜仁, 孙庆涛. 塔河油田碳酸盐岩储层 FMI 识别模式[J]. 国外测井技术, 2010, 176: 8-12.
- [13] 张凤生, 司马立强, 赵冉, 等. 塔河油田储层裂缝测井识别和有效性评价[J]. 测井技术, 2012, 36(3): 261-266.
- [14] 黄华. FMI 成像测井技术在塔中碳酸盐岩中的应用[J]. 资源环境与工程, 2008, 22(1): 92-95.
- [15] 陈刚花, 吴文圣. 利用地层微电阻率成像测井识别裂缝[J]. 测井技术, 1999, 23(4): 279-281.
- [16] 张辉, 肖承文, 海川. 利用声电成像评价碳酸盐岩储集层裂缝[J]. 新疆石油地质, 2009, 30(2): 252-254.
- [17] 陈科贵, 穆曙光, 魏彩茹, 等. 一种评价碳酸盐岩储层裂缝参数的测井新模型[J]. 西南石油学院学报, 2003, 25(1): 6-8.
- [18] 徐敬领, 王贵文, 王亚静, 等. 碳酸盐岩储层测井评价方法综合研究[J]. 石油物探, 2012, 51(5): 521-538.
- [19] 陈胜, 章成广, 范珊珊. 双侧向幅度差异评价裂缝参数在油田中应用[J]. 工程地球物理学报, 2012, 9(1): 114-118.
- [20] 赖富强. 电成像测井处理及解释方法研究[D]. 山东: 中国石油大学, 2011: 80-81.
- [21] 李宁. 电阻率—孔隙度、电阻率—含油(气)饱和度关系的一般形式及其最佳逼近函数类型的确定(I)[J]. 地球物理学报, 1989, 32(5): 580-592.
- [22] 李宁. 酸性火山岩测井解释理论、方法和应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- [23] 李宁. 中国海相碳酸盐岩测井解释概论[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [24] 赵军龙, 巩泽文, 李甘, 等. 碳酸盐岩裂缝性储层测井识别及评价技术综述与展望[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(2): 537-547.
- [25] 中国石油勘探与生产分公司著. 碳酸盐岩油气藏测井评价技术与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
- [26] Al-Ghami A, Chen B, Aguilera R, et al. An improved triple porosity for evaluation of naturally fractured reservoirs[J]. SPE 132879, 2010: 1-14.
- [27] 刘之的. 变  $m$  值法计算火山岩含油饱和度[J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2010, 7(3): 62-65.
- [28] 张丽华, 潘保芝, 单刚义. 应用三重孔隙模型评价火成岩储层[J]. 测井技术, 2008, 32(1): 37-40.
- [29] 漆立新, 樊政军, 李宗杰, 等. 塔河油田碳酸盐岩储层三孔隙度测井模型的建立及其应用[J]. 石油物探, 2012, 49(5): 489-494.
- [30] 赵军, 江同文, 王焕增, 等. 基于流动单元的碳酸盐岩渗透率建模方法[J]. 天然气工业, 2007, 27(2): 46-48.
- [31] 潘秀萍, 张超谟, 胡挺. 双侧向测井计算碳酸盐岩裂缝储层渗透率的应用研究[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2011, 33(12): 92-95.
- [32] 张凤生, 司马立强, 赵辉, 等. 狮子沟地区裂缝识别和参数计算方法研究[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(2): 16-18.
- [33] 王伟佳, 赵军, 顾宏伟, 等. 洞穴型储层的有效性评价方法研究[J]. 国外测井技术, 2011, 2: 13-15.
- [34] 罗智, 祁兴中, 张贵斌, 等. 碳酸盐岩洞穴储层有效性评价方法研究[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2010, 32(4): 92-96.
- [35] 作岳奇, 刘瑞林, 柳建华, 等. 利用成像测井判断塔河油田碳酸盐岩储层缝、洞的有效性[C]//中国地球物理学会第二十届年会论文集, 2004.
- [36] 柴细元, 张文瑞, 王贵清, 等. 远探测声波反射波成像测井技术在裂缝性储层评价中的应用[J]. 测井技术, 2009, 33(6): 539-543.

- [37] 肖承文,张承森,周波,等.塔北英买力奥陶系缝洞型碳酸盐岩产层测井评价技术[C]//油气藏监测与管理国际会议暨展览会论文集,2012.
- [38] 肖丽,范晓敏,马宏宇.GR-RD 交会图法在碳酸盐岩储层流体识别中的应用研究[J].中国地球物理,2006.
- [39] 司马立强.碳酸盐岩缝洞性储层测井综合评价方法及应用研究[D].四川:西南石油学院,2005.
- [40] 卢毓周,魏斌,李彬.常规测井资料识别裂缝性储层流体类型方法研究[J].地球物理学进展,2004,19(1):173-178.
- [41] 余鸿飞.塔里木盆地储层测井识别方法研究—塔中奥陶系、天山南白垩系测井分析[D].成都:成都理工大学,2012.
- [42] 柳筠.川东北 YB 地区长兴组—飞仙关组储层流体识别方法评价[J].长江大学学报:自然科学版,2011,8(5):31-33.
- [43] 王招明,肖承文,刘瑞林,等.一种识别缝洞型碳酸盐岩储层流体性质的方法[P].中国专利:CN102508317A,2012-06-20.
- [44] 胡蝶,贺洪举,朱占美,等.复杂礁滩气藏储层流体测井识别技术[J].天然气工业,2012,32(1):49-52.
- [45] 贾孟强.川东北地区碳酸盐岩气层识别方法研究[J].测井技术,2008,32(4):328-333.

## The logging evaluation methods for fractured-vuggy carbonate reservoirs

TIAN Han, YANG Min

(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Fractured-vuggy carbonate reservoir has complex pore structures and strong heterogeneity, and the identification and evaluation of this kind of reservoirs have become hot and difficult issues in log analysis. This paper systematically describes logging evaluation methods and techniques for fractured-vuggy carbonate reservoirs on the basis of the following 4 aspects: reservoir type identification, reservoir parameters calculation, reservoir effectiveness evaluation, and reservoir fluid property discrimination. On the basis of the correct understanding of various technical points and application conditions, comprehensive utilized of logging technology, and combined with the related means, such as geological, seismic, et al, the efficiency and accuracy of the logging evaluation of carbonate rocks can be improved.

**Key words:** fractured-vuggy carbonate reservoir; reservoir type identification; parameter calculation; fluid property discrimination; effectiveness evaluation

**作者简介:** 田瀚(1989-),男,湖北黄冈人,硕士研究生,就读于中国石油勘探开发研究院,研究方向为测井解释及测井地质学。