

文章编号:0253-9985(2012)06-0900-09

塔河油田奥陶系缝洞型储层小型缝洞及其充填物测井识别

田飞¹,金强¹,李阳²,张宏方³,张文博¹

(1. 中国石油大学 地球科学与技术学院,山东 青岛 266555; 2. 中国石化 油田勘探开发事业部,北京 100029;

3. 中国石化 石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:塔河油田是以奥陶系碳酸盐岩古岩溶油藏为主的古生界海相大油田,洞穴和其周缘的裂缝是其主要储集空间。由于数量众多,小型缝洞成为缝洞型储层的重要储集空间和渗流通道。小型缝洞可以在露头、岩心和成像测井上识别,但在非取心和非成像测井段还不能有效识别,影响了油藏地质模型的建立。利用岩心和成像测井资料标定常规测井信息,优选出5个洞穴敏感参数和3个裂缝敏感参数,建立了塔河油田小型缝洞归一化加权识别函数,并利用 $DEN-V_{sh}$ 和 $R_{LLD}-V_{sh}$ 交会图版识别出了洞穴充填物类型:碎屑充填物、垮塌角砾岩和化学充填物。识别效果与岩心及FMI成像对比,洞穴符合率超过81%,裂缝符合率超过82%,洞穴充填物识别成功率超过84%,基本满足了小型缝洞识别要求。利用此方法对塔河油田117口井进行了识别,结果显示该方法也适用于洞高在0.5 m以上的缝洞及充填物识别,并提高了识别精度,为精细研究古岩溶缝洞型储层提供了新方法。

关键词:小型缝洞;充填物;测井信息;缝洞型储层;奥陶系;塔河油田

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Identification of small fracture-vugs and their fillings through log interpretation in fractured-vuggy Ordovician reservoirs in Tahe oilfield

Tian Fei¹, Jin Qiang¹, Li Yang², Zhang Hongfang³ and Zhang Wenbo¹

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266555, China;

2. Department of Oilfield Exploration and Development, SINOPEC, Beijing 100029, China;

3. Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Tahe oilfield is a famous marine Paleozoic giant oilfield dominated by paleokarstic reservoirs of the Ordovician carbonates. Caverns and fractures around them are the main pore space. Numerous small fracture-vugs act as important pore space and flowpaths. Although the small fracture-vugs can be recognized on outcrops, cores and image logs, they are not readily recognizable in intervals without core and image logging data, seriously influencing the study of fractured-vuggy reservoirs and the establishment of accurate reservoir geological model. To tackle the problem, we calibrated the conventional logging data with cores and image logs and selected five vug-sensitive parameters and three fracture-sensitive parameters. These parameters were used to build a normalized and weighted function for identification of small fracture-vugs in Tahe oilfield. We used $DEN-V_{sh}$, $R_{LLD}-V_{sh}$ cross plot method to recognize the types of fillings, including clastics, breccias and chemical fillings. The results of recognition are fairly good compared with that from core observation and image log interpretation. The vug recognition rate is above 81%, fracture recognition rate is larger than 82%, and cave fills recognition rate is over 84%. The method can meet the basic requirements for identification of small vugs and fractures. The application

收稿日期:2012-05-28;修订日期:2012-08-31。

第一作者简介:田飞(1987—),男,博士研究生,矿产普查与勘探。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2011CB201001)。

of the method to 117 wells in Tahe oilfield proves to be quite encouraging and the results also show the potential of the method for identification of caverns and fractures with a height over 0.5 meters and their fillings. It provides a new approach for fine study of reservoir space of paleokarstic reservoirs.

Key words: small fracture-vug, filling, well logging data, fractured-vuggy reservoir, Ordovician, Tahe oilfield

塔北古岩溶露头 and 塔河油田岩心观察表明,缝洞储层中洞高小于 0.5 m 的小型洞穴数目远比大型洞穴数量多,Craig^[1]对 Yates 油田的研究发现小型洞穴是缝洞储层的重要组成部分和有利油气储集空间。洞穴充填物具有多种类型和明显期次性^[2],具有成因联系的洞穴内部的充填物类型和期次相似^[3]。洞顶和洞壁发育与洞穴具有成因关系的环形和放射状裂缝^[4]。

一般而言,洞高超过 5 m 的洞穴在三维地震资料上可有显示^[5],洞高 0.5 ~ 5 m 的洞穴在地震和钻井上没有明显异常,要利用测井数据进行适当变换才可以明确识别^[6]。小型缝洞地球物理响应弱,易受围岩和流体等因素影响,极难识别^[7]。如果小型缝洞不能识别,会导致储集空间认识不清,直接影响缝洞型储层勘探和开发^[8],因此,小型缝洞识别成为油田生产亟需解决的科学和实际问题。

笔者在塔河油田地质研究中,通过对岩心和常规测井资料的反复对比,发现垂向分辨率较高、资料丰富的常规测井信息能够比较有效的识别小型洞穴、裂缝和缝洞复合体,与岩心和成像测井符合率较高,为精细识别缝洞储集体提供了有效方法,同时划分了洞穴内部充填物类型,为全面认识塔河油田缝洞型储层提供了新成果。

1 小型缝洞地质特征

塔河油田奥陶系岩溶碳酸盐岩发育洞穴、裂缝和缝洞复合体 3 种溶蚀缝洞。部分井的岩心和成像测井资料显示了存在数米或几十米的大型洞穴^[9-10]。受多期岩溶叠加改造的影响,小型缝洞数目远多于大型洞穴^[11-12],往往存在多层、网状缝洞系统^[13]。在缝洞发育和埋藏期,多数缝洞会被机械沉积物、垮塌角砾岩和化学淀积物所充填,但是缝洞充填物可以是单一类型的、也可以是多种类型的组合^[14-15]。

缝洞复合体是宽度小于 30 cm、裂缝被溶蚀加宽而发育的条带状处于缝和洞之间的复合结构。

缝洞复合体是洞穴的雏形,发育数目多,在露头和岩心上较为常见。塔北柯坪发育典型缝洞复合体露头(图 1)，“X”型节理被溶蚀扩大几倍至十几倍,发育方向受原始裂缝走向控制,缝洞复合体与裂缝有效连通,并且在裂缝的相交处受两个方向的溶蚀作用,溶蚀规模扩大更多,呈三角状(图 1 中 a, b 点)。塔河油田 S64 井 5 499.3 ~ 5 499.6 m 和 5 500.0 ~ 5 500.3 m 处各发育 0.3 m 的砂泥质充填小型洞穴,洞缘发育较多裂缝。5 498.6 ~ 5 498.7 m 和 5 498.9 ~ 5 499.1 m 处发育缝洞复合体,充填物为化学淀积物和砂泥质。S64 井的小型缝洞段井径并无明显异常,自然伽马有所增大、双侧向电阻率测井降低(图 2),裂缝和缝洞复合体井段的井径、自然伽马、双侧向电阻率没有明显的异常。

2 小型缝洞的识别

小型缝洞测井响应复杂,受围岩和洞穴内流体影响,测井信息难以真实反映地层情况,给测井识别缝洞带来一定困难。笔者通过岩心和成像测井资料标定常规测井信息,经过归一化加权,建立了塔河油田小型缝洞识别函数,利用交会图识别出洞穴充填物类型,解释结论实际应用效果较好。

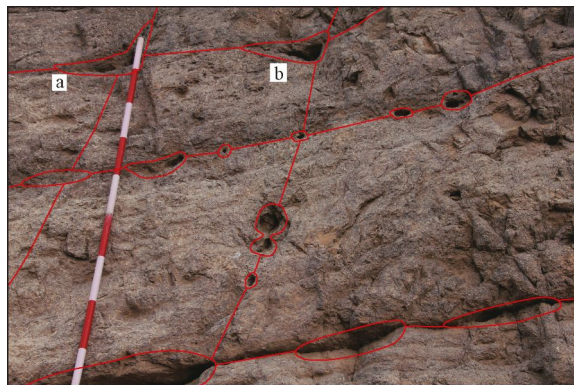


图 1 塔北柯坪缝洞复合体露头

Fig. 1 Outcrop of fractured-vuggy complex in Keping area, northern Tarim Basin

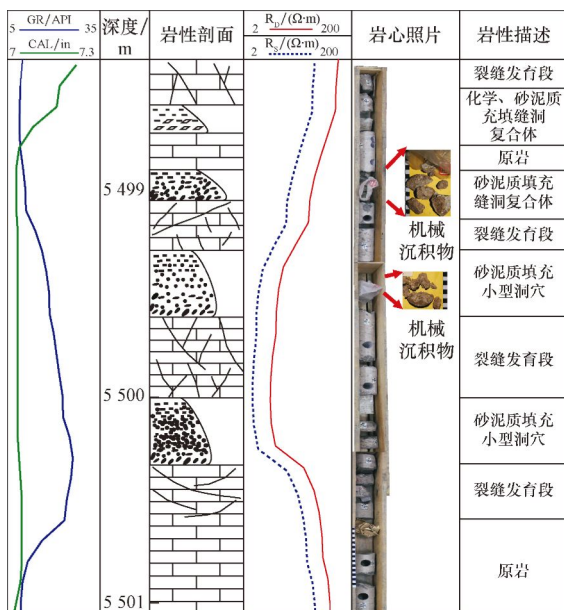


图2 塔河油田S64井小型缝洞岩心剖面

Fig. 2 Core section with small fracture-vugs in Well S64, Tahe oilfield

2.1 小型洞穴面识别

通过测井资料分析表明,洞穴段井径明显扩径,充填机械沉积物时自然伽马明显增大(>30 API),双侧向电阻率较低($<500 \Omega \cdot m$),密度较小($<2.72 \text{ g/cm}^3$),声波时差较大($>48 \mu\text{s/ft}$),中子孔隙度较大($>1.5\%$)。随着洞穴规模越大,测井响应异常幅度越明显。通过分析,优选出 $DEN, CNL, V_{sh}, 1/R_{LLS}, K_3$ 共5个敏感参数用于识别小型洞穴,并建立了综合识别图版(图3),5个参数表征如下。

1) 岩性密度(DEN)

岩性密度测井主要反映岩石体积密度,与岩性构成密切相关;洞穴段由于被机械沉积物、角砾岩和化学淀积物所充填,与周围非洞穴段(原岩、裂缝和缝洞复合体)密度有一定的差异,非洞穴段密度大($>2.70 \text{ g/cm}^3$)而洞穴内部密度小(一般 $<2.73 \text{ g/cm}^3$)。

2) 中子孔隙度(CNL)

中子孔隙度测井反应地层含氢指数,洞穴内部中子孔隙度响应较高($>0.5\%$),岩心实验证实非洞穴段尤其是原岩段基质孔隙度低,中子孔隙度大多小于1%。

3) 泥质含量(V_{sh})

采用自然伽马(GR)计算泥质含量。

$$SH_1 = \frac{GR - GR_{\min}}{GR_{\max} - GR_{\min}} \quad (1)$$

$$V_{sh} = \frac{2^{2SH_1} - 1}{3} \quad (2)$$

式中: GR 为标准化后的自然伽马值,API; $GR_{\max}$ 为洞穴内纯泥岩段自然伽马值,API; $GR_{\min}$ 为纯碳酸盐岩段自然伽马值,API; SH_1 为过渡参数,无量纲; V_{sh} 为泥质含量,%。

非洞穴段以纯碳酸盐岩为主,泥质含量低。洞穴段内充填机械沉积物和角砾时泥质含量会明显升高,化学淀积物缝隙中容易残留地层水携带的粘土,泥质含量也有所升高,因此利用泥质含量差别也可以划分洞穴段和非洞穴段。

4) 浅侧向电导率($1/R_{LLS}$)

电阻率测井反映储层的导电性能,与岩性、孔隙结构和流体性质等因素直接相关;洞穴段因泥浆滤液侵入,造成双侧向电阻率块状降低, R_{LLS} 降低尤为明显,一般小于 $200 \Omega \cdot m$,表现为高电阻率背景值下相对较低的电阻率,因此洞穴段的浅侧向电导率明显比非洞穴段大。

5) 双侧向电导率差绝对值(K_3)

$$K_3 = \left| \frac{1}{R_{LLS}} - \frac{1}{R_{LLD}} \right| \quad (3)$$

式中: R_{LLS} 为浅侧向电阻率, $\Omega \cdot m$; R_{LLD} 为深侧向电阻率, $\Omega \cdot m$; K_3 为双侧向电导率差的绝对值,S/m。

双侧向电阻率仪具有探测深度较大的特点^[16],对充满流体的洞穴十分敏感。洞穴发育段双侧向电阻率具有明显幅度差,而非洞穴段内双侧向测井值都很高($>1000 \Omega \cdot m$),且几乎没有幅度差。双侧向电导率差绝对值突出较低电阻率值的幅度差并且压制高电阻率的幅度差,能有效区分洞穴和非洞穴段。

从交会图(图3)可知,非洞穴段 V_{sh}, CNL, K_3 和 $1/R_{LLS}$ 数值都很小,并且数据点分布较集中,洞穴段响应特征刚好相反,这3个参数数值较高数据点分布范围较大; DEN 在洞穴段为低值而非洞穴段为高值。洞穴段 $1/R_{LLS}$ 大于 10^{-2} s/m (图3a), V_{sh} 一般大于8%(图3b), K_3 大于 10^{-3} s/m (图3c), CNL 大于1.5%(图3d),并且非洞穴段的密度一般大于 2.7 g/cm^3 。利用这5个参数组成的交会图图版,能够相互补充,较好划分洞穴段和非洞穴段^[17]。

为定量化评价小型洞穴,对上述5个敏感参数归一化加权,建立了洞穴综合识别函数^[18],即首

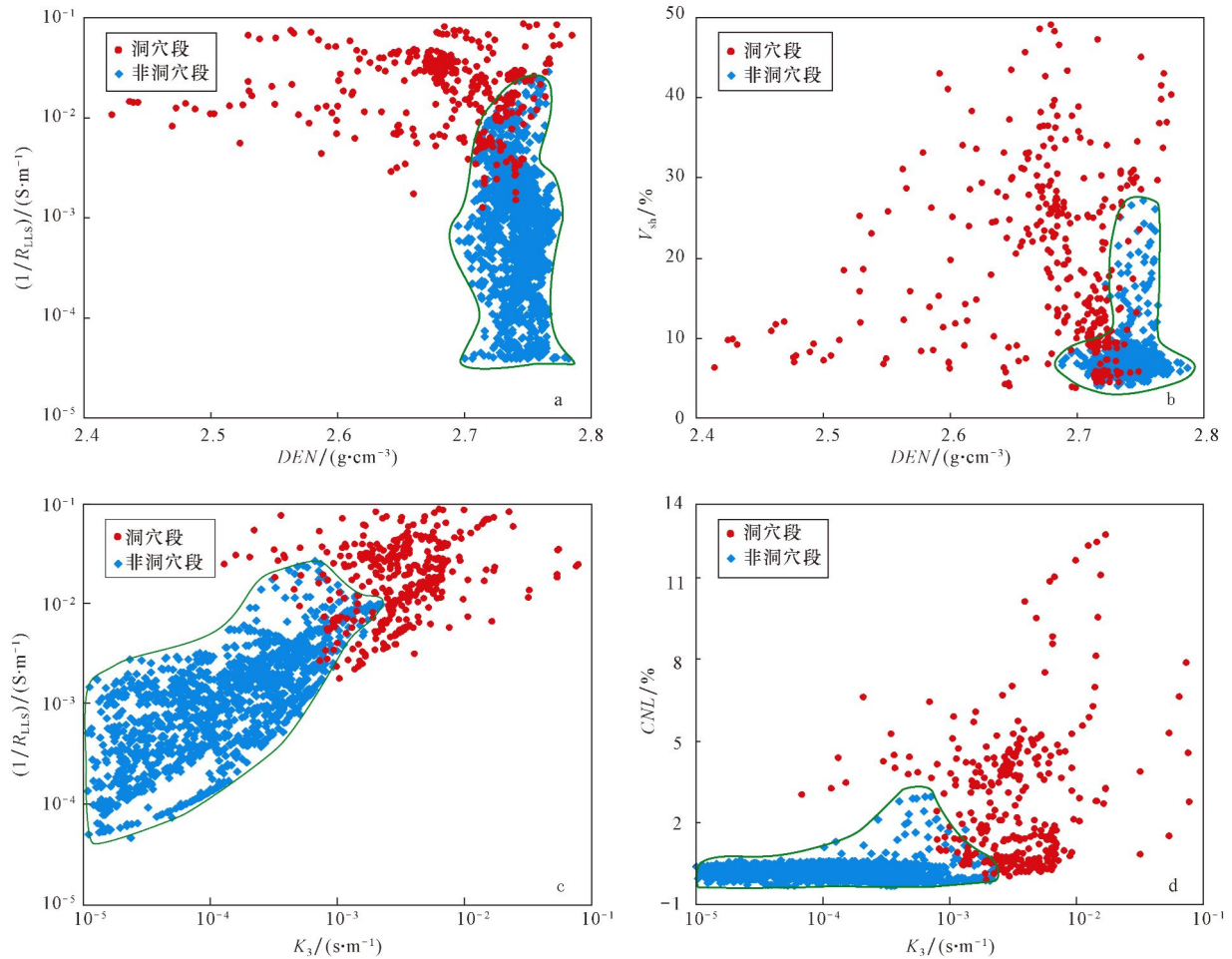


图3 塔河油田洞穴和非洞穴段交会图识别图版

Fig. 3 Cross plot identification chart boards for intervals with and without caverns in Tahe oilfield

a. $1/R_{LLS}-DEN$ 交会图; b. $V_{sh}-DEN$ 交会图;c. $1/R_{LLS}-K_3$ 交会图; d. $CNL-K_3$ 交会图

先对敏感参数归一化,消除不同数值范围造成的差异,然后根据参数敏感性大小对各权系数赋初值,计算判别函数 P 值并自动划分洞穴段。通过多次权系数赋值,划分结果与岩心、成像结论对比,最终确定最佳权系数。通过对取心段和成像井小型洞的洞顶、洞底对应的 P 值计算, P 值大于 0.3 时小型洞穴符合率 81.32%,故设定 $P > 0.3$ 时是洞穴发育段。

$$P = 0.45X_1 + 0.11X_2 - 0.15X_3 + 0.17X_4 + 0.12X_5 \quad (4)$$

式中: X_1 为电导率差绝对值的归一化值, S/m; X_2 为中子孔隙度归一化值, %; X_3 为岩性密度归一化值, g/cm³; X_4 为浅侧向电导率归一化值, S/m; X_5 为泥质含量归一化值, %。

通过岩心对比发现多参数归一化加权法对小

型洞穴识别率高,能有效识别机械沉积物或角砾充填的小型洞穴,对方解石和硅质充填小型洞识别精度有待提高,并随着洞穴规模变小,符合率有所降低(表1)。如 T403 井取心段共发育 3 个总厚 1.7 m 的机械沉积物充填洞,常规测井识别符合率 100%。垮塌角砾岩充填洞穴发育 3 个,累厚 13 m,测井解释识别符合率 98.50%,但对某些小型洞穴不能完全识别。方解石充填小型洞识别符合率较低, T403 井取心段共发育 2 个化学淀积物充填洞穴,累计厚度为 0.9 m,仅识别出 1 个,厚 0.4 m,符合率 44.40%。15 口取心井洞穴发育 63.2 m,其中发育 5.6 m 小型洞穴,测井解释有效识别 4.6 m,符合率 81.82%。全区 14 口成像井共发育洞穴 166.5 m,其中发育 13.2 m 小型洞穴,常规测井有效识别 10.9 m,符合率 82.60%。

表1 塔河油田 T403 井洞穴解释结果与岩心对比

Table 1 Correlation of caverns identified through well log interpretation with those identified through core observation for Well T403 in Tahe oilfield

岩性	洞穴顶深/m	洞穴底深/m	充填物性质	发育厚度/m	识别厚度/m	符合率/%
灰绿色泥岩	5 411.5	5 412.0	机械沉积物	0.5	0.5	100
黄灰色岩溶角砾岩	5 414.2	5 414.7	垮塌角砾岩	0.5	0.5	100
黄灰色岩溶角砾岩	5 416.4	5 416.8	垮塌角砾岩	0.4	0.3	75
黄灰色含硅质团块砂屑灰岩	5 420.9	5 421.3	化学淀积物	0.4	0	0
浅灰绿色钙质石英砂岩	5 422.2	5 422.6	机械沉积物	0.4	0.4	100
灰绿色泥岩	5 506.2	5 507.0	机械沉积物	0.8	0.8	100
黄灰色灰岩、岩溶角砾岩	5 507.7	5 510.5	垮塌角砾岩	2.8	2.8	100
黄灰色砂屑灰岩、岩溶角砾岩	5 539.3	5 548.8	垮塌角砾岩	9.5	9.5	100
黄灰色砂屑泥微晶灰岩	5 571.5	5 572.0	化学淀积物	0.5	0.4	80

2.2 裂缝和缝洞复合体识别

岩心裂缝发育段与致密碳酸盐岩段测井响应有所差异,存在井径略微扩径,双侧向电阻率刺刀状降低,自然伽马、中子孔隙度有所增大的特点。详细对比认为由裂缝溶蚀扩大之后形成的缝洞复合体的测井响应与裂缝相似,裂缝和缝洞复合体可以一起进行识别。通过制作响应参数交会图,优选 $1/R_{LLS}$, V_{sh} 和 $K_3 \times R_{mf}$ 三个敏感参数,得到了裂缝和缝洞复合体交会图识别图版(图4)。

1) 浅侧向电导率($1/R_{LLS}$)

裂缝发育段具有双侧向电阻率微弱降低的特点,尤其是裂缝特别发育时浅侧向降低幅度比深侧向明显,所以裂缝段的浅侧向电导率有所增大。

2) 泥质含量(V_{sh})

裂缝本身对自然伽马测井并没有太大的响

应,但是地下水活动会将铀元素沉积到裂缝周围的壁上,造成铀元素富集,使自然伽马值升高,从而计算得到的泥质含量增大,能够有效指示裂缝发育带。

3) 电导率差绝对值与泥浆滤液电阻率乘积($K_3 \times R_{mf}$)

单位长度内裂缝累计开度越大,说明有效裂缝越发育,Sibbit 等根据模拟实验和三维有限元模拟^[19]得出裂缝的深浅双侧向电导率差和泥浆滤液电阻率的乘积跟裂缝的开度成正比,裂缝发育段 $K_3 \times R_{mf}$ 数值明显增大。

利用电性差异能够较好的区分原岩、裂缝和缝洞复合体。原岩段 $1/R_{LLS}$ 小于 10^{-2} S/m(图4a, b),能够与裂缝和缝洞复合体区分开。裂缝段的 V_{sh} 一般在 8% ~ 13%,缝洞复合体的 V_{sh} 一般大于 11%(图4a),结合二者的 $K_3 \times R_{mf}$ 的差异(图4b),也能较好的区分裂缝和缝洞复合体。

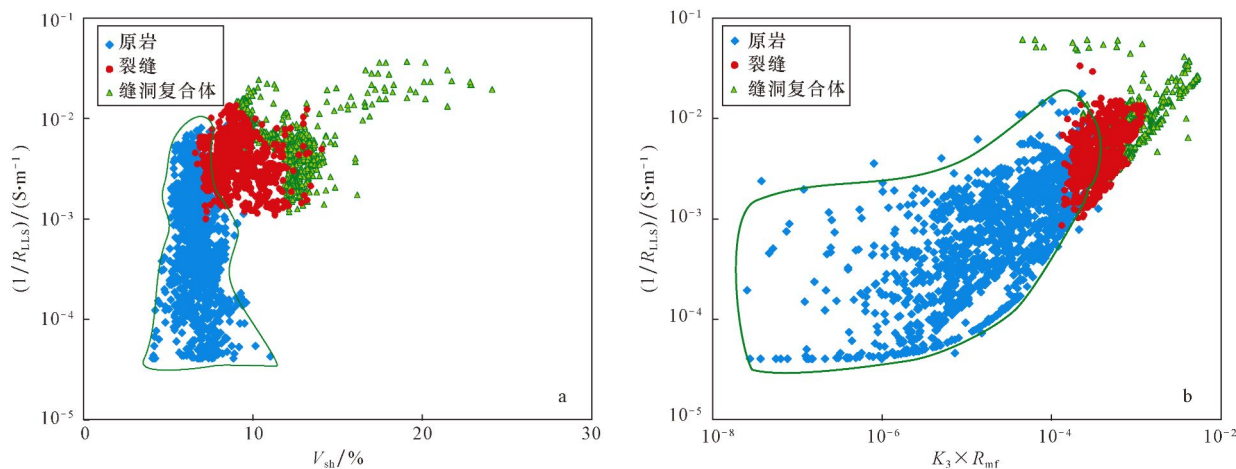


图4 塔河油田原岩、裂缝和缝洞复合体交会图识别图版

Fig.4 Cross plot identification chart boards for initial rock, fracture and fracture-vug complex in Tahe oilfield

a. $1/R_{LLS}-V_{sh}$ 交会图版; b. $1/R_{LLS}-K_3 \times R_{mf}$ 交会图版

识别出洞穴段之后,对非洞穴段采用浅侧向电导率($1/R_{\text{LLS}}$)、泥质含量(V_{sh})和电导率差绝对值与泥浆滤液电阻率乘积($K_3 \times R_{\text{mf}}$)三个敏感参数建立了多参数归一化加权函数来识别缝洞和裂缝结合体发育段:

$$M = 0.21Y_1 + 0.43Y_2 + 0.36Y_3 \quad (5)$$

式中: Y_1 为泥质含量标准化值; Y_2 为浅侧向电导率标准化值; Y_3 为电导率差绝对值与泥浆电阻率乘积标准化值。

计算裂缝发育顶段和底段的 M 值, M 值大于 0.45 时缝洞复合体符合率为 86.4%, M 值大于 0.15 时裂缝段符合率 82.0%,所以设定 $M \geq 0.45$ 时是缝洞复合体发育段, $0.15 < M < 0.45$ 时为裂缝发育段。

缝洞复合体测井响应明显,综合判断指数 M 值大,识别符合率大于 85%。裂缝密度较高特别是以大缝为主的裂缝强发育段, M 值一般大于 0.3,符合率也较高。T402 井 5 366.6 ~ 5 372.2 m 处是裂缝强发育段(表 2),裂缝段厚度 5.6 m,线密度 30 条/m,识别符合率 100%。方解石充填小缝段(缝合线等)测井响应微弱, M 值一般小于 0.1,识别率较低(5 363.7 ~ 5 366.2 m)。裂缝线密度较低井段测井响应微弱,被周围背景值影响符合率低。15 口取心井共发育裂缝 237.6 m,识别出 194.8 m,符合率为 81.98%。全区 15 口成像井累计识别裂缝 525.5 m,常规测井识别裂缝 444.25 m,符合率 84.54%。未识别的井段主要是方解石充填小缝段和裂缝弱发育段。

2.3 洞穴充填物识别

常规测井资料识别中将缝洞内部分为未充

填段、机械沉积物、垮塌角砾岩和化学淀积物四部分。根据不同充填物密度、电阻率、自然伽马、声波时差等测井响应的差别^[20],制作相应交会图,优选 $V_{\text{sh}} - DEN$ 和 $V_{\text{sh}} - R_{\text{LLD}}$ 两种交会图图版对充填物进行了有效的识别,识别符合率 84.7% (图 5,图 6)。

洞穴未充填部分被钻井液占据,测井显示密度一般小于 2.61 g/cm^3 ,并且泥质含量小于 15% (图 5)。机械沉积物密度变化范围较大,以泥质为主时,密度一般小于 2.61 g/cm^3 ,泥质含量大于 15%;以砂质为主时,密度在 $2.61 \sim 2.68 \text{ g/cm}^3$;孔隙被后期化学淀积物充填时,密度在 $2.68 \sim 2.71 \text{ g/cm}^3$,并且泥质含量较高,一般大于 15%。垮塌角砾岩间充填机械沉积物时密度在 $2.68 \sim 2.71 \text{ g/cm}^3$ 之间,泥质含量小于 15%;角砾间充填化学淀积物时密度大于 2.71 g/cm^3 ,同时泥质含量相对纯化学淀积物要大,二者以 8% 为界限。化学淀积物的密度大于 2.71 g/cm^3 且泥质含量小于 8% (表 3)。

机械沉积物、垮塌角砾岩到化学淀积物具有深侧向电阻率逐渐增大和泥质含量逐渐减小的特点,利用深侧向电阻率和泥质含量交会图能划分充填物类型。化学淀积物具有高电阻率和低泥质含量的特征,而未充填段则低电阻率、低泥质含量,二者在交会图上位于明显不同的位置(图 6)。在泥质含量相同的情况下,由于机械沉积物砂质中含有易导电流体,使得电阻率较低;而垮塌角砾岩中除了泥质之外以灰岩角砾为主,深侧向电阻率相对较高。利用岩心中缝洞段测井数据得到了深侧向电阻率-泥质含量判别模板,同时给出了不同充填物的划分标准(表 4)。

表 2 塔河油田 T402 井裂缝解释结果与岩心对比
Table 2 Correlation of fractures identified through well log interpretation with that through core observation in Well T402, Tahe oilfield

取心回次	取心段深度/m	岩性	发育厚度/m	识别厚度/m	密度/(条·m ⁻¹)
7	5 360.9 ~ 5 363.0	黄灰色砂屑微晶灰岩	2.1	1.0	15
	5 363.7 ~ 5 366.2	黄灰色含油裂隙砂屑微晶灰岩	2.5	1.8	34
8	5 366.2 ~ 5 366.6	黄灰色油迹裂隙微晶灰岩	0.4	0.4	25
	5 366.6 ~ 5 372.2	黄灰色裂隙含油砂屑微晶灰岩	5.6	5.6	30
9	5 372.2 ~ 5 377.8	黄灰色粒间孔隙-裂隙含油砾屑碎屑灰岩	3.0	3.0	40
10	5 520.0 ~ 5 523.50	黄灰色油斑-油迹微晶灰岩	2.8	1.6	4

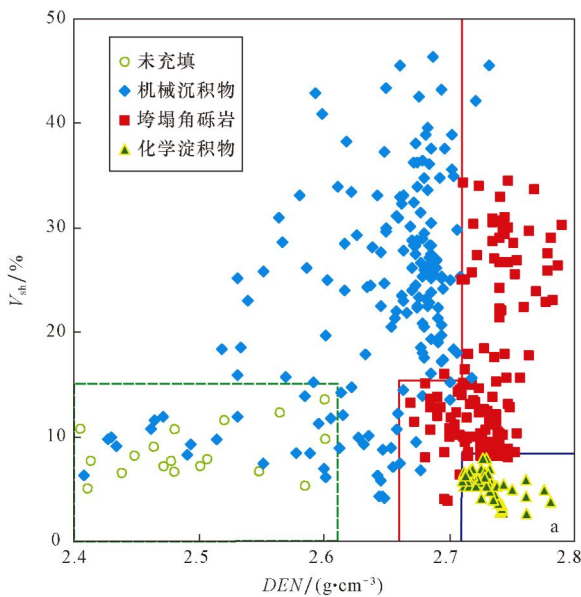


图 5 塔河油田 $DEN - V_{sh}$ 洞穴充填物识别图版

Fig. 5 Chart board for identification of fillings in Tahe oilfield with $DEN - V_{sh}$

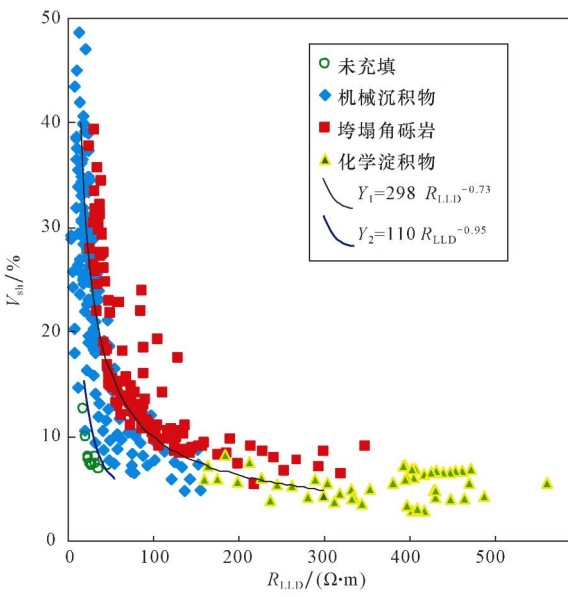


图 6 塔河油田 $R_{LLD} - V_{sh}$ 洞穴充填物识别图版

Fig. 6 Chart board for identification of fillings in Tahe oilfield with $R_{LLD} - V_{sh}$

表 3 塔河油田 $DEN - V_{sh}$ 图版识别洞穴内部充填物划分

Table 3 Classification of fillings in Tahe oilfield identified with $DEN - V_{sh}$ chart board

类型	划分区间
未充填段	$DEN < 2.61, R_{LLD} < 50, V_{sh} < 15\%$
机械充填物	① $DEN < 2.61, R_{LLD} < 50, V_{sh} \geq 15\%$; ② $DEN < 2.61, R_{LLD} \geq 50$ ③ $2.61 \leq DEN < 2.68$; ④ $2.68 \leq DEN < 2.71, V_{sh} \geq 15\%$
垮塌角砾岩	① $2.68 \leq DEN < 2.71, V_{sh} < 15\%$; ② $DEN \geq 2.71, V_{sh} \geq 8\%$
化学沉积物	$DEN \geq 2.71, V_{sh} < 8\%$

注: DEN 单位为 g/cm^3 ; R_{LLD} 单位为 $\Omega \cdot m$ 。

表 4 塔河油田 $R_{LLD} - V_{sh}$ 图版划分洞穴充填物标准

Table 4 Criteria for filling identification with $R_{LLD} - V_{sh}$ chart board in Tahe oilfield

$R_{LLD}/(\Omega \cdot m)$	未充填段	机械充填物	垮塌角砾岩	化学沉积物
< 50	$V_{sh} < Y_1$	$Y_1 \leq V_{sh} < Y_2$	$V_{sh} > Y_2$	
$50 \sim 150$		$Y_1 \leq V_{sh} < Y_2$	$V_{sh} > Y_2$	
$150 \sim 300$			$V_{sh} > Y_2$	$V_{sh} < Y_2$
> 300				$V_{sh} \geq 0$

注: $Y_1 = 298R_{LLD}^{-0.73}$; $Y_2 = 110R_{LLD}^{-0.95}$ 。

3 应用实例

选取塔河油田 S74 井典型小型缝洞发育井段,将解释结果与成像测井图像进行对比(图 7),常规测井解释 5 652.0 ~ 5 658.0 m 井段小型缝洞较发育,在 5 653.8 ~ 5 654.3 m 发育 0.5 m 小型机械沉积物充填洞穴,5 654.3 ~ 5 655.8 m 发育缝

洞复合体,5 655.8 m 以下发育高角度裂缝,解释结论与成像解释成果基本符合;在小型洞穴发育段,常规测井解释结论和成像解释成果十分对应。对塔河油田 117 口井常规测井解释,共识别出洞穴段 1 076.5 m,其中小型洞穴 89.5 m,裂缝发育段 2 289.6 m,缝洞复合体 213.8 m,提高了缝洞识别的精度,为缝洞型储层的高效开发提供了有效资料^[21-23]。

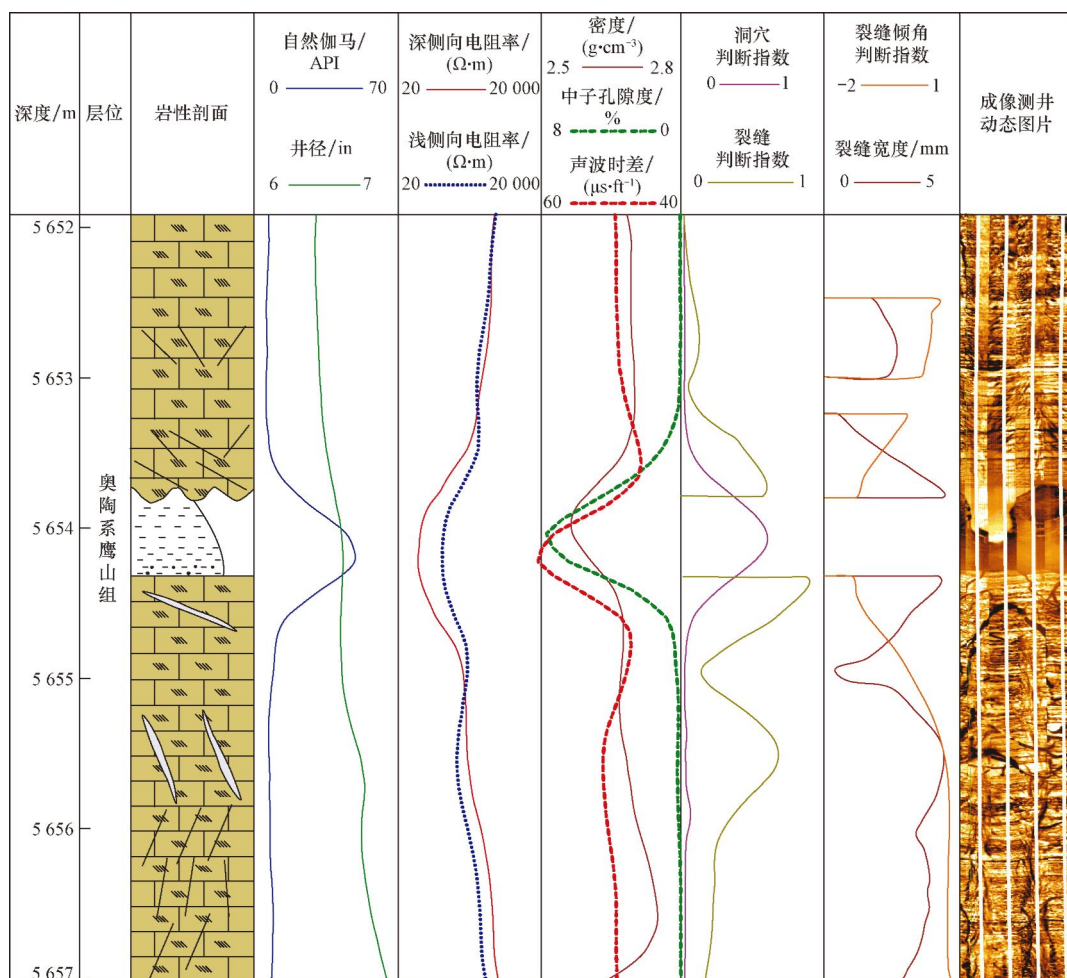


图7 塔河油田 S74 井 5 652 ~ 5 657 m 井段小型缝洞发育特征

Fig. 7 Development characteristics of the small fracture-vugs in interval of 5652 – 5657m in Well S74, Tahe oilfield

4 结论

1) 利用岩心和成像测井资料标定常规测井信息,建立了小型洞穴、裂缝和缝洞复合体识别函数,识别成功率在 81% 以上;利用图版法划分了出洞穴内充填物类型,识别成功率大于 84%。

2) 塔河油田 117 口井中识别小型洞穴 89.5 m,共识别洞穴发育段 1 076.5 m,明确了小型洞穴的发育部位和充填物特征,提高了缝洞储层识别精度。同时识别出裂缝发育段 2 289.6 m,缝洞复合体 213.8 m。

3) 利用丰富的常规测井资料有效识别出缝洞型储层内小型缝洞及其充填物,同时也适用于洞高 0.5 m 以上缝洞的识别,为探索缝洞型储层发育规律和建立缝洞型储层地质模型提供了方法。

参 考 文 献

- [1] Craig D H. Caves and other Features of Permian karst in sand andres dolomite, Yates field reservoir, West Texas [M] //James N P , Choquette. Paleokarst. Springer-Verlag, 1988:342 – 363.
- [2] Loucks R G. Modern analogs for paleocave-sediment fills and their importance in identifying paleocave reservoirs [J]. Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 2001, (46):195 – 206.
- [3] Loucks R G. A review of coalesced, collapsed-paleocave systems and associated suprastratal deformation [J]. Acta Carsologica, 2007, 36(1):121 – 132.
- [4] Loucks R G. Paleocave carbonate reservoirs: origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications [J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(11):1795 – 1834.
- [5] Hongliu Zeng, Loucks R G, Xavier Janson, et al. Three-dimensional seismic geomorphology and analysis of the Ordovician paleokarst drainage system in the central Tabei Uplift, northern Tarim Basin western China [J]. AAPG Bulletin, 2011, 95

- (12);2061-2083.
- [6] 赵军,肖承文,虞兵,等. 轮古地区碳酸盐岩洞穴型储层充填程度的测井评价[J]. 石油学报,2011,32(4):605-610.
Zhao Jun,Xiao Chengwen,Yu Bing et al. Logging evaluation on filling degree of cavernous carbonate reservoirs in the Lungu region [J]. Acta Petrolei Sinica,2011,32(4):605-610.
- [7] 李阳. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩溶洞型储集体识别及定量表征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2012,36(1):1-7.
Li Yang. Ordovician carbonate fracture-cavity reservoirs identification and quantitative characterization in Tahe Oilfield [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science),2012,36(1):1-7.
- [8] 李阳,范智慧. 塔河奥陶系碳酸盐岩油藏缝洞系统发育模式与分布规律[J]. 石油学报,2011,32(1):101-106.
Li Yang, Fan Zhihui. Developmental pattern and distribution rule of the fracture-cavity system of Ordovician carbonate reservoirs in the Tahe oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica,2011,32(1):101-106.
- [9] 翟晓先. 塔里木盆地塔河特大型油气田勘探实践与认识[J]. 石油实验地质,2011,33(4):323-331.
Zhai Xiaoxian. Exploration practice and experience of Tahe giant oil-and-gas field,Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment,2011,33(4):323-331.
- [10] 鲁新便,赵敏,胡向阳,等. 碳酸盐岩缝洞型油藏三维建模方法技术研究——以塔河奥陶系缝洞型油藏为例[J]. 石油实验地质,2012,34(2):193-198.
Lu Xinbian,Zhao Min,Hu Xiangyang,et al. Studies of 3D reservoir modeling: taking Ordovician carbonate fractured - vuggy reservoirs in Tahe Oil Field as an example [J]. Petroleum Geology & Experiment,2012,34(2):193-198.
- [11] Shen Feng, Qi Lixin, Han Gehua. Characterization and preservation of karst networks in the carbonate reservoir modeling [C]//SPE annual technical conference and exhibition, California, U S,2007.
- [12] 何治亮,彭守涛,张涛. 塔里木盆地塔河地区奥陶系储层形成的控制因素和复合-联合成因机制[J]. 石油与天然气地质,2010,31(6):743-752.
He Zhiliang, Peng Shoutao, Zhang Tao. Controlling factors and genetic pattern of the Ordovician reservoirs in the Tahe area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology,2010,31(6):743-752.
- [13] Dixon J W. The role of small caves as bat hibernacula in Iowa [J]. Journal of Cave and Karst Studies,2011,73(1):21-27.
- [14] 鲁新便,蔡忠贤. 缝洞型碳酸盐岩油藏古溶洞系统与油气开发——以塔河碳酸盐岩溶洞型油藏为例[J]. 石油与天然气地质,2010,(01):22-27.
Lu Xinbian,Cai Zhongxian. A study of the paleokarst system in the fractured-vuggy carbonate reservoirs and oil/gas development-taking the reservoirs in Tahe oilfield as an example [J]. Oil & Gas Geology,2010,31(1):22-27.
- [15] Tihansky A B. Sinkholes, west-central Florida-A link between surface water and ground water [M] // Galloway, Devin, Jones, et al. Land Subsidence in the United States. U. S. Geological Survey,1999:121-141.
- [16] 徐微,蔡忠贤,贾振远,等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏溶洞充填物特征[J]. 现代地质,2010,24(2):287-293.
Xu Wei,Cai Zhongxian,Jia Zhenyuan, et al. The study on Ordovician carbonate reservoir karst cavern fillings characterization in Tahe oilfield[J]. Geoscience,2010,24(2):287-293.
- [17] 肖玉茹,何峰煜,孙义梅. 古洞穴型碳酸盐岩储层特征研究——以塔河油田奥陶系古洞穴为例[J]. 石油与天然气地质,2003,24(1):75-80.
Xiao Yuru, He Fengyi, Sun Yimei. Reservoir characteristics of paleocave carbonates a case study of Ordovician paleocave in Tahe oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology,2003,24(1):75-80.
- [18] Tan Maojin, Gao Jie, Wang Xiaochang, et al. Numerical simulation of the dual laterolog for carbonate cave reservoirs and response characteristics [J]. Applied Geophysics, 2011,8(1):79-85.
- [19] 樊政军,柳建华,张卫峰. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层测井识别与评价[J]. 石油与天然气地质,2008,29(1):61-65.
Fan Zhengjun, Liu Jianhua, Zhang Weifeng. Log interpretation and evaluation of the Ordovician carbonate rock reservoirs in Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology,2008,29(1):61-65.
- [20] Yang Haijun, Sam Zandong Sun, Cai Lu-lu, et al A new method of formation evaluation for fractured and caved carbonate reservoirs A case study from the Lundong area, Tarim Basin, China [J]. Petroleum science,2011,21(8):446-454.
- [21] Sibbit AM, Faivre Q. The dual Laterolog Response in Fractured Rocks [C] // SPWLA 26th Annual Logging Symposium, Dallas, Texas,1985:17-20.
- [22] Wu Xinsong, Yang Lei, Pan Wenqing. Logging Geology Study of the Caverned Paleokarst Reservoir Distribution [J]. Petroleum Science,2005,2(2):71-75.
- [23] 詹俊阳,马旭杰,何长江. 塔河油田缝洞型油藏开发模式及提高采收率[J]. 石油与天然气地质,2012,33(4):655-660.
Zhan Junyang, Ma Xujie, He Changjiang. Development scheme and EOR technique of fracture-vug reservoirs in Tahe oilfield [J]. Oil & Gas Geology,2012,33(4):655-660.