

引用: 刘沁园, 唐军, 申威, 等. 塔里木盆地缝洞型白云岩储层测井细分方法与应用 [J]. 中国石油勘探, 2021, 26(5): 132-139.

Liu Qinyuan, Tang Jun, Shen Wei, et al. Petrophysical classification method and application of fracture-vuggy type dolomite reservoir in Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(5): 132-139.

塔里木盆地缝洞型白云岩储层测井细分方法与应用

刘沁园¹ 唐 军¹ 申 威¹ 蔡 明¹ 吴黑志²

(1 长江大学地球物理与石油资源学院; 2 中国石油集团测井有限公司吉林分公司第一项目部)

摘 要: 塔里木盆地地下古生界盐下及潜山白云岩储层横向分布范围广, 油气藏类型多, 符合典型的叠合复合盆地特征, 具有良好的油气勘探开发前景。缝洞型储层是白云岩储层中最具代表性也是最有优势的储层, 开展对缝洞型储层的精细评价有助于提高该区域地质认识和储层识别。首先, 依据岩心微观、宏观尺度下的孔隙发育特征及岩石物理实验特征, 缝洞型储层可细分为简单组合型与溶蚀扩大型两个小类。然后, 从电成像测井、常规测井两个方面分析两类缝洞型储层的测井响应特征, 提取孔隙度谱峰值、孔隙度谱宽度、声速偏差、裂缝孔隙度和基质渗透率等特征参数, 结合应用实例建立储层类型划分半定量判别图版, 结果表明, 电成像测井和常规测井组合识别储层类型效果较好。研究发现, 塔中地区盐下白云岩溶蚀扩大缝洞型储层最为发育, 塔北地区多以简单组合缝洞型储层为主, 该细分方法具有较强的实用性和推广性。

关键词: 塔里木盆地; 白云岩; 缝洞型储层; 测井

中图分类号: TE112.22

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2021.05.012

Petrophysical classification method and application of fracture-vuggy type dolomite reservoir in Tarim Basin

Liu Qinyuan¹, Tang Jun¹, Shen Wei¹, Cai Ming¹, Wu Heizhi²

(1 College of Geophysics and Petroleum Resources, Yangtze University; 2 No.1 Project Department of Jilin Branch, CNPC Logging Co., Ltd.)

Abstract: The Lower Paleozoic dolomite reservoir in sub-salt and buried hill is widely distributed in Tarim Basin, with multiple types of oil and gas reservoirs, which is the characteristics of typical superimposed composite basin and have good prospects for petroleum exploration. Fracture-vuggy type reservoir is the most representative and favorable among dolomite reservoirs. Fine evaluation of fracture-vuggy type reservoir is helpful to improve geological understandings and reservoir identification in the region. First, the fracture-vuggy type reservoir can be classified into two sub-categories based on the pore features by core observation both microscopically and macroscopically, as well as petrophysical experiments, i.e., simple combination type and dissolution enlargement type. Then, the logging response characteristics of two sub-categories of fracture-vuggy type reservoirs are analyzed by using electrical imaging logging and conventional logging data, and the characteristic parameters are extracted, such as peak of porosity spectrum, width of porosity spectrum, deviation of acoustic velocity, fracture porosity and matrix permeability. Finally, the semi-quantitative discrimination chart for classification of reservoir type is established by combining with application examples. The results show that the method of combining electrical imaging logging and conventional logging has good application result in identifying reservoir types. The dissolution enlargement type fracture-vuggy dolomite reservoir of sub-salt is the most developed in Tazhong area, while the simple combination type fracture-vuggy reservoir is dominated in Tabei area. This classification method is of great practicability and generalization.

Key words: Tarim Basin, dolomite, fracture-vuggy reservoir, logging

基金项目: 中国石油科技创新基金项目“裂缝渗透率测井计算理论模型及实验研究”(2020D-5007-0306)。

第一作者简介: 刘沁园 (1996-), 男, 湖北宜昌人, 在读硕士, 现主要从事复杂储层测井新技术评价方法研究工作。地址: 湖北省武汉市蔡甸区大学路 111 号长江大学武汉校区, 邮政编码: 430100。E-mail: 774965375@qq.com

收稿日期: 2021-04-12; 修改日期: 2021-08-13

0 引言

随着塔里木盆地中古58井、中深1井获得战略突破,首次在寒武系盐下的原生气藏中获得工业油气流,白云岩储层成为深部地层勘探的又一大热点领域^[1-2]。众所周知,进行复杂储层的有效性评价,首先需要对储层类型进行精准分类与识别。目前,大多数学者研究白云岩储层类型时,将地质资料和测井资料相结合,利用测井响应特征对储层类型进行识别。唐军、张辉等探讨了利用电阻率扫描成像测井和多极子声波成像测井对塔中地区裂缝评价和识别的有效性^[3-4]。A.Brie等阐述了利用斯通利波对裂缝型储层进行评价的方法^[5]。申本科、邓模等证明常规测井方法对碳酸盐岩储层裂缝识别是经济可行的^[6-7]。严威、郑剑锋等根据塔里木盆地白云岩储层发育位置、分布特征、孔隙特征和成因对储层进行分类^[8-9]。其中,潮坪白云岩、蒸发台地白云岩等为当前主流的白云岩储层类型,但是其命名较为复杂,难以直观了解各类型储层形成的主控因素和油气发育规律。总之,对塔里木盆地白云岩储层识别和评价的方法很多。目前,大多数学者利用塔里木盆地的地质资料和岩石物理实验资料将储层类型划分为孔隙型储层、裂缝型储层和裂缝—孔洞型储层(简称缝洞型储层)^[8-16],缝洞型白云岩储层既是塔里木盆地发育较多的产层,也是该地区主力产层,但由于孔隙结构复杂、储层类型多样,且不同结构的缝洞型储层空间组合特征、孔渗条件和试油结果多样、差异较大,导致储层类型划分存在困难,影响了储层的精细描述。应该对该地区缝洞型白云岩储层进行细分,才能提高该地区测井解释精度,加强地质认识^[17-22]。

本文首先从白云岩孔隙、裂缝、孔洞的形态特征、岩石物理实验规律论证了缝洞型白云岩储层细分的合理性,然后依次介绍电成像测井、常规测井等方法提取的裂缝特征参数,并评价该参数在细分方法中的应用中的效果。最后,以塔里木盆地塔北、塔中地区井资料为例,利用该井资料中裂缝特征参数形成了针对缝洞型白云岩储层细分的半定量测井判别方法,该分类方法可对该地区后续的勘探开发提供指导借鉴意义。

1 缝洞型储层细分依据

依据白云岩微观、离散的裂缝类型、裂缝的几何形态特征和空间组合方式,再参考压汞曲线、核磁共振测井及孔渗实验结果,可将白云岩储层分为孔隙型储

层、裂缝型储层、缝洞型储层等。其中,缝洞型储层的裂缝、孔洞同时发育,孔洞和裂缝之间相互溶蚀沟通,形成密集的油气运移通道,该类型储层是塔里木盆地白云岩储层中的优势产层,也是本文研究的重点产层。

1.1 地质依据

缝洞型储层中裂缝既可作为油气储集空间,也可作为渗流通道。裂缝在发育时是否被充填或溶蚀,会直接影响缝洞型储层的储集性能^[20]。根据孔隙、裂缝的平面分布特征,可将缝洞型白云岩储层进一步细分为简单组合型储层和溶蚀扩大型储层。

(1) 简单组合型:该类型储层中裂缝、孔洞虽然都比较发育,但裂缝大多属于机械压力破坏产生,未经过溶蚀且大部分裂缝被矿物所充填,所以裂缝宽度较窄、发育类型单一。该类型储层岩心裂缝宽度一般在2mm以内,少许孔洞之间由裂缝相互沟通,所以该类型储层储集空间和渗流通道较小,储集性能较差。图1为SZG58井3707.36m处铸体薄片及对应的岩心照片,铸体薄片上表现为孔隙、微裂缝较为发育,但被矿物所充填,同时可见串珠状的小孔,但是孔缝之间连通性较差且未经过溶蚀,具有较低的孔隙度和渗透率。简单组合型储层不能作为缝洞型储层中的优势产层。

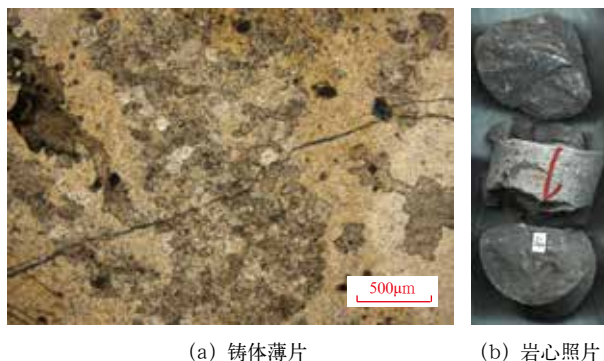


图1 简单组合缝洞型储层特征(SZG58井3707.36m)
Fig.1 Characteristics of simple combination type fracture-vuggy reservoir (3707.36m in Well SZG58)

(2) 溶蚀扩大型:该类型储层中裂缝、孔洞部分或全部溶蚀,形状不规则且非常发育,连通性较好,岩心的裂缝宽度一般为2~10mm,最大的可达厘米级。图2为SYH23-1-118H井5219.1m处铸体薄片和对应的岩心照片,该铸体薄片表现为裂缝、孔洞未充填基质且大部分被溶蚀,连通性较好。多数孔洞内可见溶蚀微粒、晶体,偶见晶间微孔、粒内溶蚀微孔。该类储层孔隙度和渗透率较高,具有良好的储集性能,可以作为缝洞型储层中的优势产层。

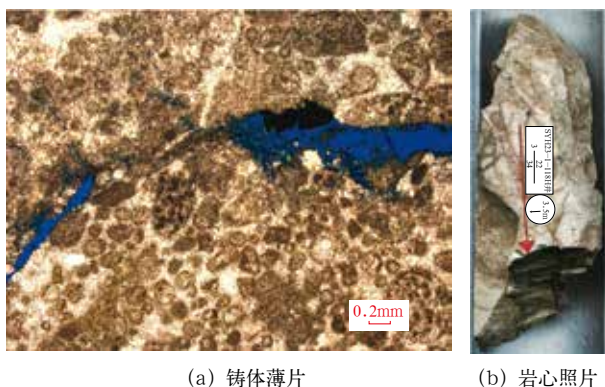


图2 溶蚀扩大缝洞型储层特征 (SYH23-1-118H 井 5219.1m)
Fig.2 Characteristics of dissolution enlargement type fracture-vuggy reservoir (5219.1m in Well SYH23-1-118H)

1.2 岩石物理实验依据

塔里木盆地相关岩石物理资料表明,简单组合型、溶蚀扩大型储层的孔隙度数据和基质渗透率数据均存在明显的规律和差异。

孔隙度、渗透率一直都是评价储层最基础、最重要的物性参数,储层总孔隙度越大,说明岩石中孔隙空间越大;渗透率越高,即岩石内孔隙连通性越好。统计塔里木盆地内6口井缝洞型储层岩心样品的孔隙度数据,并结合该储层段内岩心实验所测得基质渗透率数据绘制孔隙度—基质渗透率交会图版(图3)。根据孔隙度—基质渗透率关系可将缝洞型储层分为两类,即简单组合型储层和溶蚀扩大型储层。简单组合型储层孔隙度较高,但裂缝未发生溶蚀沟通,连通性较差,基质渗透率相对较低,而且数据分散,相关性不强;溶蚀扩大型储层孔隙度、基质渗透率均较高,数据具有很强的相关性,是很具有研究价值和意义的一类缝洞型储层。

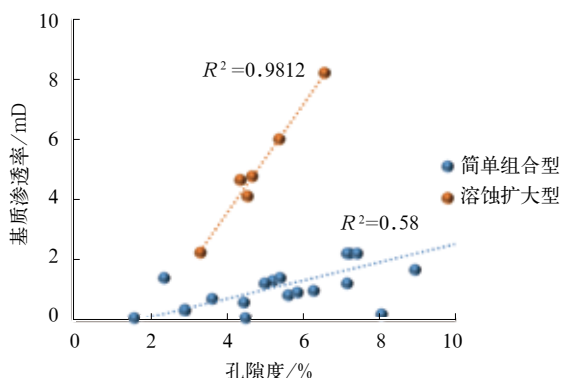


图3 不同类型储层的孔隙度—基质渗透率关系
Fig.3 Relationship between porosity and matrix permeability of different types of reservoirs

2 缝洞型储层测井细分方法

从电成像测井资料和常规测井资料中提取裂缝特征参数,开展储层类型的精细识别和划分。

2.1 电成像测井

通过分析塔里木盆地两套碳酸盐岩储层的电成像测井资料,可将缝洞型储层精细识别为溶蚀扩大型储层和简单组合型储层。本文通过FMI成像测井仪中图像的亮暗特征、色度深浅变化来表征井壁四周电阻率的大小,由此得到电成像测井资料^[23-26]。

2.1.1 电成像裂缝特征参数

微电阻率扫描成像测井能够提供高分辨率的井壁图像,可以直观且方便地确定裂缝产状和类型,是识别裂缝的有效手段。从该测井资料中可提取以下裂缝特征参数:裂缝长度(FVTL)、裂缝密度(FVDC)、裂缝平均张开度(FVAH)及裂缝视孔隙度(FVPA)。其中,裂缝视孔隙度为统计窗长内裂缝张开口面积与FMI图像面积之比。

在溶蚀扩大型储层段内孔隙度谱的谱峰向右偏移,有效宽度较宽而且集中的有效强度大。基于孔隙度谱可以提取两个特征参数:孔隙度谱峰值(FMFZ)、孔隙度谱宽度(FMKD)。

2.1.2 电成像测井响应特征

结合FMI交互识别参数及孔隙度谱技术对缝洞型储层进行精准细分^[27-30]。如图4所示,在电成像图上简单组合型储层可见暗色正弦状裂缝沟通少数豹斑状孔洞,FMI交互识别参数中裂缝视孔隙度、裂缝长度、裂缝平均张开度和裂缝密度均相对较小,孔隙度谱的谱峰在整个孔隙度值区间内均有分布,但在储层段内谱峰形态变小。如图5所示,在电成像图上溶蚀扩大型储层可见多条深色条纹且有明显交叉,裂

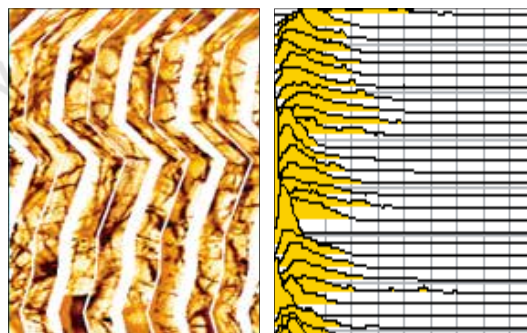


图4 简单组合型电成像图(左)和孔隙度谱(右)
Fig.4 Electrical imaging logging (left) and pore spectrum (right) of simple combination type reservoir

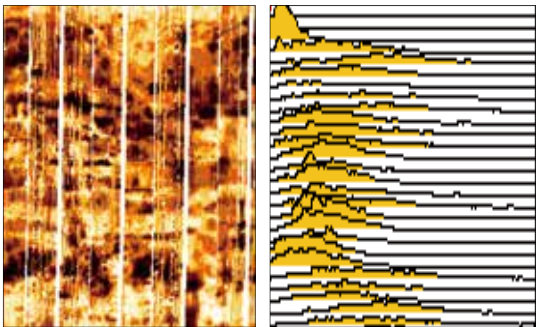


图 5 溶蚀扩大型电成像图(左)和孔隙度谱(右)
Fig.5 Electrical imaging logging (left) and pore spectrum (right) of dissolution enlargement type reservoir

缝周围凹凸不平且有明显的黑色团块，FMI 交互识别参数中裂缝视孔隙度、裂缝长度、裂缝平均张开度和裂缝密度均相对较大，在孔隙度谱上该储层段的谱峰形态变大，且有明显的拖拽现象。

2.2 常规测井

常规测井中的深、浅侧向电阻率曲线和声波时差

曲线均蕴含着该地层的相关裂缝信息，利用常规测井特征参数可以对裂缝进行表征和识别^[31-35]。

2.2.1 常规测井特征参数

从常规测井资料中可提取裂缝孔隙度、声速偏差对裂缝进行识别和表征，其中，裂缝孔隙度为裂缝孔隙体积与岩石外观体积的比值；声速偏差为总孔隙度与基质孔隙度转换成声速后相减的绝对值。

2.2.2 常规测井响应特征

如图 6 所示，在常规测井曲线中简单组合型储层的补偿中子、声波时差升高，密度降低，深、浅侧向电阻率差异较小，由于孔洞和裂缝之间没有相互溶蚀连通，井壁钻井液侵入较少，裂缝孔隙度增大，声速偏差较低。

溶蚀扩大型储层中孔洞沿裂缝溶蚀发育，裂缝间的有效沟通提高了储层的储集性能。在常规测井曲线中该类储层补偿中子、声波时差升高，密度降低，深、浅侧向电阻率差异明显增大，声速偏差相对简单组合型储层更低，裂缝孔隙度也明显增大。

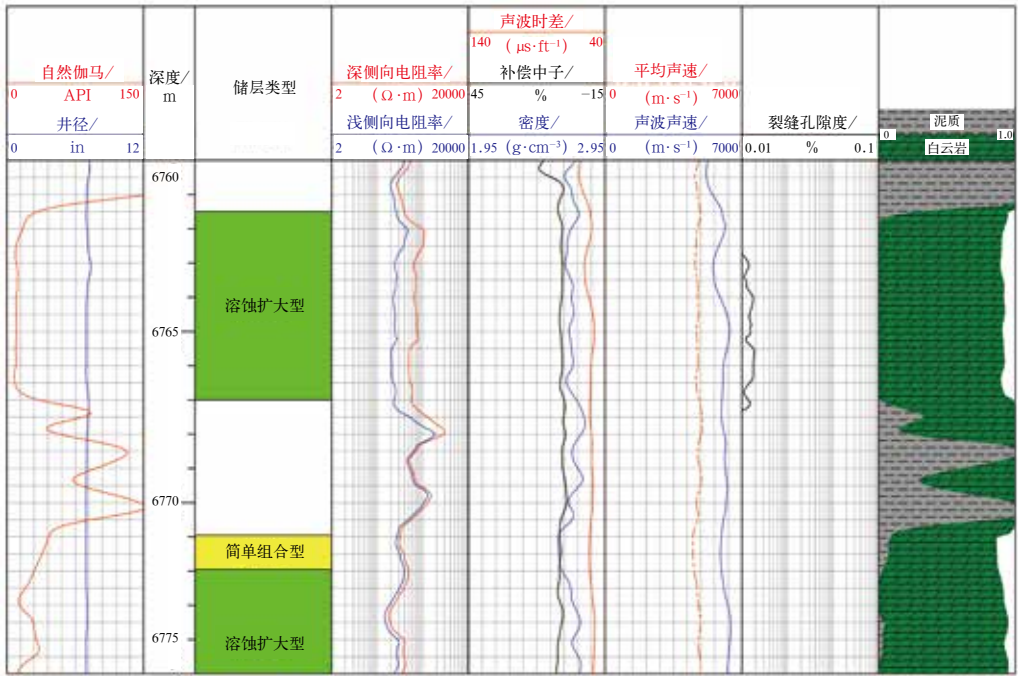


图 6 常规测井响应图
Fig.6 Comprehensive response diagram of conventional logs

3 储层类型测井细分效果及实例

利用电成像测井和常规测井方法提取塔里木盆地 7 口井的测井响应参数，建立半定量判别图版，对塔北、塔中地区缝洞型白云岩储层进行细分。

3.1 测井细分效果

根据文中提到的缝洞型储层测井细分方法提取塔里木盆地 SYH1-3 井、SYM32 井等 7 口井白云岩储层段的孔隙度、孔隙度谱峰值、孔隙度谱宽度等测井响

应参数, 以及通过岩心实验测量得到的基质渗透率, 建立如图7所示的判别图版, 利用该图版将塔里木盆地缝洞型白云岩储层半定量细分。如图7所示, 将孔

隙度大于8%、基质渗透率大于3mD、孔隙度谱宽度大于26、孔隙度谱峰值大于80的储层划分为溶蚀扩大型储层, 其他划分为简单组合型储层, 划分效果较好。

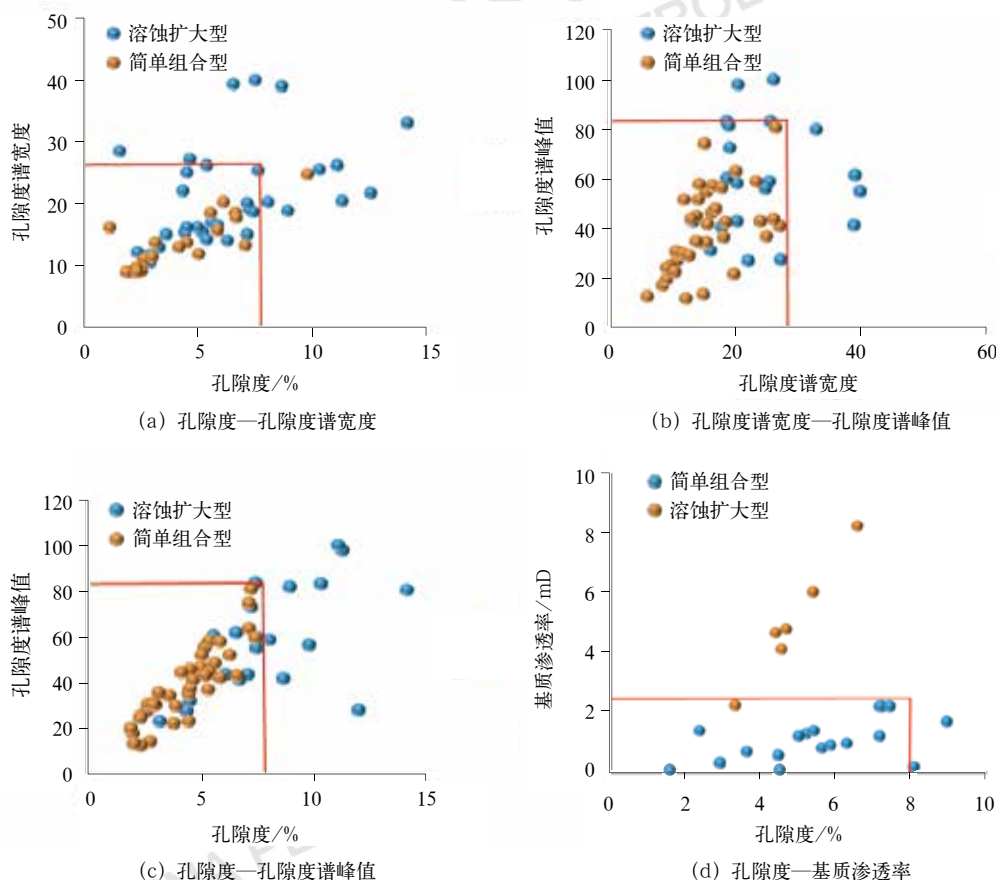


图7 缝洞型白云岩储层测井细分判别图版

Fig.7 Discrimination chart for classification of fracture-vuggy dolomite reservoir by logging

3.2 实例应用

3.2.1 SYM32 井

图8为SYM32井综合测井解释图, 该井位于塔里木盆地塔北地区, 如图8所示, 在溶蚀扩大型储层中孔隙度谱峰右移明显, 裂缝长度、裂缝密度、裂缝视孔隙度、裂缝平均张开度增大; 电成像图上该储层段的黑色条纹明显增多且交叉分布; 常规测井图上该储层段的孔渗性较好, 裂缝孔隙度增大, 声速偏差降低, 符合储层类型划分特征。

3.2.2 SZS1 井

图9为SZS1井综合测井解释图, 该井位于塔里木盆地塔中地区, 如图9所示, 在溶蚀扩大型储层中孔隙度谱峰右移明显, 且存在拖拽现象, 裂缝特征参数增大; 电成像图上溶蚀扩大型储层的黑色条纹明显增多且交叉分布; 常规测井图上该储层段孔渗性更

好, 裂缝孔隙度高, 声速偏差降低, 符合储层类型划分特征。

基于以上测井响应特征, 利用电成像测井资料和常规测井资料对缝洞型白云岩储层类型进行划分(表1)。

4 结论

(1) 根据缝洞型白云岩储层裂缝和孔洞的组合特征, 可将该类储层细分为简单组合型和溶蚀扩大型两类。在铸体薄片上简单组合型储层多表现为微裂缝, 一般裂缝宽度较窄, 且多为充填缝, 孔洞之间连通性较差, 渗透率、孔隙度相对较低; 在铸体薄片上溶蚀扩大型储层多表现为未充填的溶蚀沟缝, 溶孔较多且沿裂缝溶蚀处明显发育, 其裂缝宽度较大, 渗透率、孔隙度均较高。

(2) 利用电成像测井、常规测井等资料提取裂缝特征参数, 可实现两类缝洞型储层测井细分。其中,

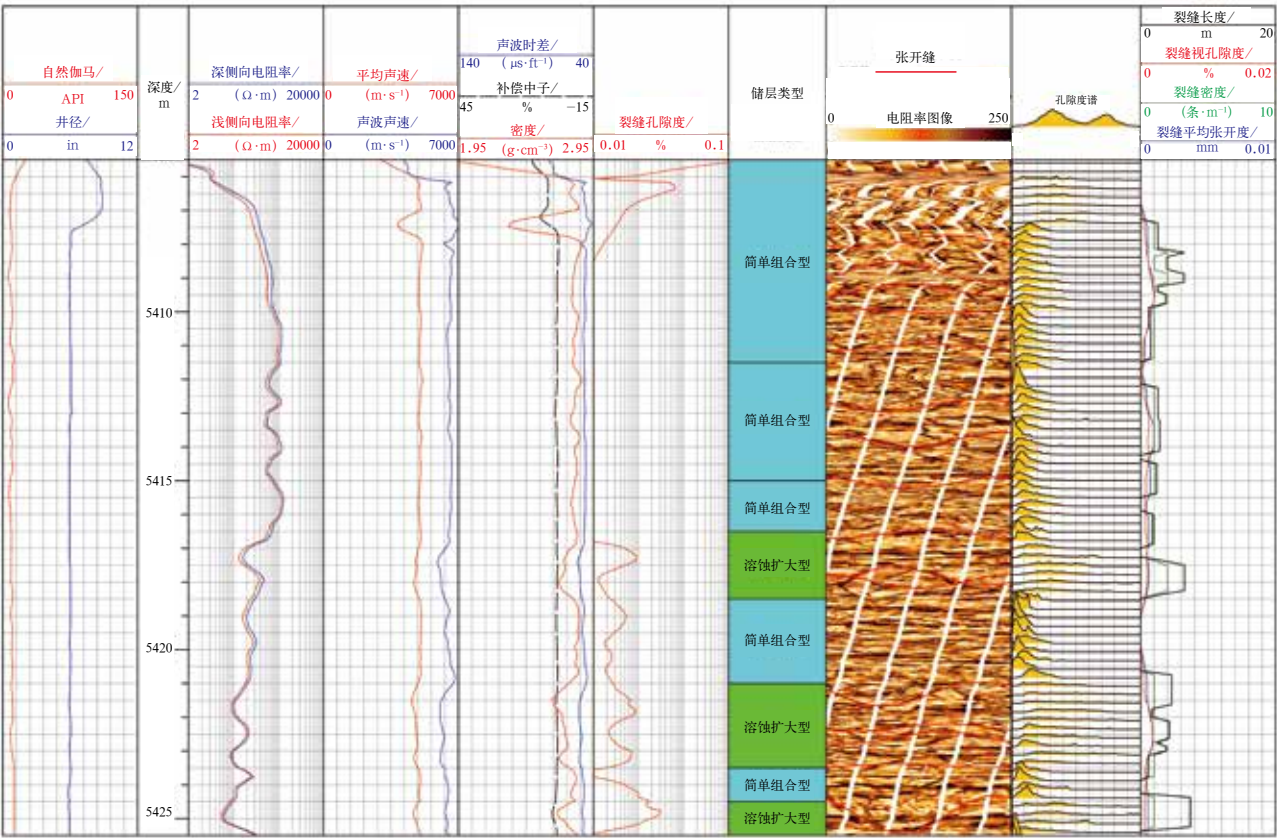


图 8 SYM32 井 5405~5426m 井段综合测井解释图
Fig.8 Comprehensive logging interpretation results of interval 5405~5426m in Well SYM32

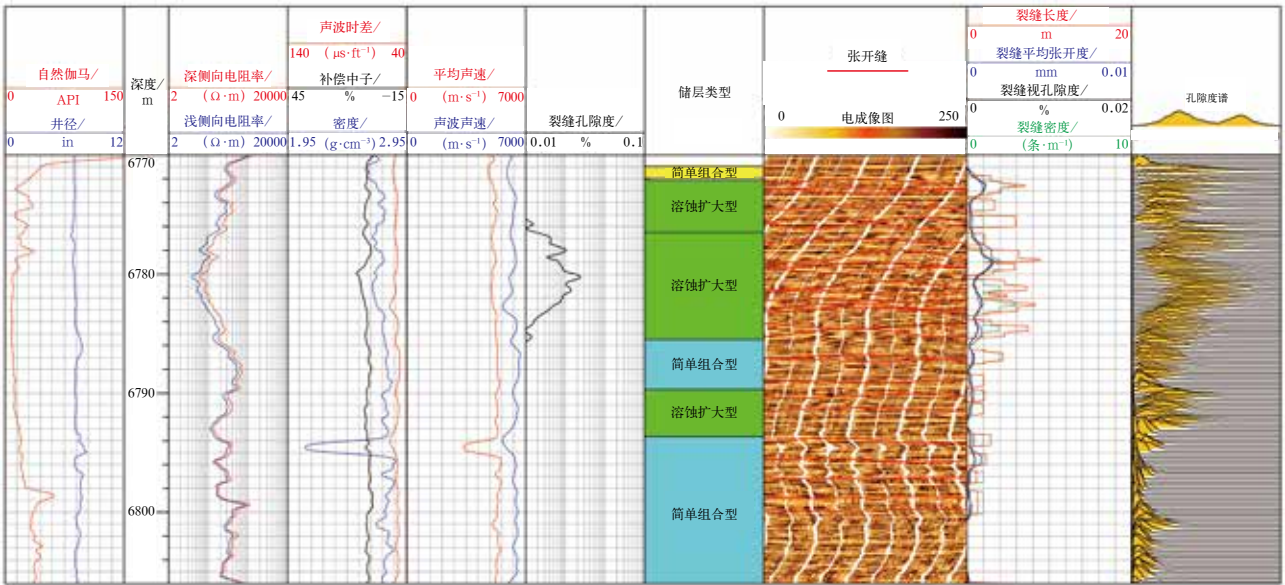


图 9 SZS1 井 6770~6807m井段综合测井解释图
Fig.9 Comprehensive logging interpretation results of interval 6770~6807m in Well SZS1

声电成像测井判别效果好，结合电成像图 + 裂缝特征参数 + 孔隙度谱，可实现缝洞型储层类型细分；基于常规测井的裂缝孔隙度和声速偏差可作为裂缝识别及储层类型划分的有利补充。

(3) 对 SYH1-3 井、SZG58 井等 10 口井缝洞型白云岩储层统计分析可知，塔北地区 7 口井钻遇溶蚀扩大型储层 11 段、简单组合型储层 14 段；塔中地区 3 口井钻遇溶蚀扩大型储层 12 段、简单组合型储

表 1 基于测井资料的储层类型划分特征

Table 1 Classification of reservoir types and the corresponding characteristics based on logging data

| 测井类型 | 电成像测井 | | | 常规测井 | |
|---------------|-----------------------|------------------------------------|---|-------|------|
| | 电成像图 | 裂缝特征参数 | 孔隙度谱 | 裂缝孔隙度 | 声速偏差 |
| 简单组合 缝洞型储层 | 可见较少的暗色条纹, 且没有明显交叉 | 裂缝视孔隙度、裂缝长 度、裂缝宽度、裂缝密 度均偏小 | 谱峰在整个孔隙度谱区间内没有 明显分散,在整个储层段内形态 较小 | 增大不明显 | 稍有降低 |
| 溶蚀扩大 缝洞型储层 | 暗色条纹多且有明显 交叉 | 裂缝视孔隙度、裂缝长 度、裂缝宽度均偏小, 裂缝密度偏大 | 谱峰在整个孔隙度谱区间内右移 明显且较为分散,在整个储层段 内形态变化较为明显 | 明显增大 | 明显降低 |

层 8 段。统计结果表明,塔中地区盐下白云岩溶蚀扩大型储层最为发育,而塔北地区则多以简单组合型储层为主。

参考文献

- [1] 谢会文, 能源, 敬兵, 等. 塔里木盆地寒武系—奥陶系白云岩潜山勘探新发现与勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2017,22(3):1-11.
Xie Huiwen, Neng Yuan, Jing Bing, *et al.* New discovery and exploration significance of Cambrian-Ordovician dolomite buried hill exploration in Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2017,22(3):1-11.
- [2] 王招明, 谢会文, 陈永权, 等. 塔里木盆地中深 1 井寒武系盐下白云岩原生气藏的发现与勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2014,19(2):1-13.
Wang Zhaoming, Xie Huiwen, Chen Yongquan, *et al.* Discovery and exploration significance of Cambrian subsalt dolomite primary reservoir in well Zhongshen 1, Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2014,19(2):1-13.
- [3] 唐军, 高楚桥, 金云智, 等. FMI 测井资料处理在塔中 62-83 井区储层定量评价中的应用[J]. 石油天然气学报, 2009,31(1):57-60.
Tang Jun, Gao Chuqiao, Jin Yunzhi, *et al.* Application of FMI logging data processing in reservoir quantitative evaluation of Tazhong 62-83 well area[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009,31(1):57-60.
- [4] 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.
Zhang Hui, Xiao Chengwen, Hai Chuan. Evaluation of fractures in carbonate reservoirs by acoustic-electric imaging[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2009,30(2):252-254.
- [5] Brie A, Hsu K, Ecipersy C. 利用斯通利波归一化差分能量评价裂缝型储层[J]. 石油物探译丛, 1990,3(2):72-79.
Brie A, Hsu K, Ecipersy C. Evaluation of fractured reservoirs using normalized difference energy of stoneley wave[J]. Translation of Petroleum Geophysical Exploration, 1990,3(2):72-79.
- [6] 申本科, 薛大伟, 赵君怡, 等. 碳酸盐岩储层常规测井评价方法[J]. 地球物理学进展, 2014,29(1):261-270.
Shen Benke, Xue Dawei, Zhao Junyi, *et al.* Conventional logging evaluation method of carbonate reservoir[J]. Progress in Geophysics, 2014,29(1):261-270.
- [7] 邓模, 瞿国英, 蔡忠贤. 常规测井方法识别碳酸盐岩储层裂缝[J]. 地质学刊, 2009,33(1):75-78.
Deng Mo, Qu Guoying, Cai Zhongxian. Identification of fractures in carbonate reservoirs by conventional logging methods[J]. Journal of Geology, 2009,33(1):75-78.
- [8] 严威, 郑剑锋, 陈永权, 等. 塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组白云岩储层特征及成因[J]. 海相油气地质, 2017,22(4):35-43.
Yan Wei, Zheng Jianfeng, Chen Yongquan, *et al.* Dolomite reservoir characteristics and genesis of Lower Cambrian Shaerbulak Formation in Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2017,22(4):35-43.
- [9] 郑剑锋, 沈安江, 陈永权, 等. 塔里木盆地古生界白云岩储集层空间特征及储层分类探讨[J]. 天然气地球科学, 2015,26(7):1256-1267.
Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Chen Yongquan, *et al.* Discussion on the spatial characteristics and reservoir classification of Lower Paleozoic dolomite reservoirs in Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015,26(7):1256-1267.
- [10] 王晓丽, 林畅松, 焦存礼, 等. 塔里木盆地中—上寒武统白云岩储层类型及发育模式[J]. 岩性油气藏, 2018,30(1):63-74.
Wang Xiaoli, Lin Changsong, Jiao Cunli, *et al.* Reservoir types and development models of Middle-Upper Cambrian dolomite in Tarim Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2018,30(1):63-74.
- [11] 沈安江, 郑剑锋, 陈永权, 等. 塔里木盆地中下寒武统白云岩储集层特征、成因及分布[J]. 石油勘探与开发, 2016,43(3):340-349.
Shen Anjiang, Zheng Jianfeng, Chen Yongquan, *et al.* Characteristics, genesis and distribution of dolomite reservoir of Middle and Lower Cambrian in Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016,43(3):340-349.
- [12] 乔占峰, 沈安江, 郑剑锋, 等. 塔里木盆地奥陶统白云岩类型及其成因[J]. 古地理学报, 2012,14(1):21-32.
Qiao Zhanfeng, Shen Anjiang, Zheng Jianfeng, *et al.* Types and genesis of Lower Ordovician Dolomites in Tarim Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2012,14(1):21-32.
- [13] 潘建国, 李劲松, 王宏斌, 等. 深层—超深层碳酸盐岩储层地震预测技术研究进展与趋势[J]. 中国石油勘探, 2020,25(3):156-166.
Pan Jianguo, Li Jinsong, Wang Hongbin, *et al.* Research progress and trend of seismic prediction technology for deep and ultra-deep carbonate reservoirs[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(3):156-166.
- [14] 沈安江, 张友, 冯子辉, 等. 塔东古城地区碳酸盐岩储层地质认识与勘探领域[J]. 中国石油勘探, 2020,25(3):96-106.
Shen Anjiang, Zhang You, Feng Zihui, *et al.* Geological understandings and exploration prospects of carbonate reservoirs in the Gucheng area, Tadong, Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(3):96-106.

- [15] 杨海军, 陈永权, 田军, 等. 塔里木盆地轮探1井超深层油气勘探重大发现与意义[J]. 中国石油勘探, 2020,25(2):62-72.
Yang Haijun, Chen Yongquan, Tian Jun, *et al.* An important discovery in Well Luntan-1 of the Tarim Basin, China, and its significance for ultra-deep oil and gas exploration[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(2):62-72.
- [16] 漆立新. 塔里木盆地顺北超深断溶体油藏特征与启示[J]. 中国石油勘探, 2020,25(1):102-111.
Qi Lixin. Characteristics and inspiration of ultra-deep fault-karst reservoir in the Shunbei area of the Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(1):102-111.
- [17] 马新海, 王金奎, 王有功. 塔南凹陷基底潜山油藏储层特征及成藏模式[J]. 特种油气藏, 2011,18(2):33-36.
Ma Xinhai, Wang Jinkui, Wang Yougong. Reservoir characteristics and reservoir-forming model of buried hill reservoirs in Tarnum Sag[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2011,18(2): 33-36.
- [18] 李红凯, 袁向春, 康志江. 塔河油田六七区碳酸盐岩储层类型及分布规律[J]. 特种油气藏, 2013,20(6):20-24.
Li Hongkai, Yuan Xiangchun, Kang Zhijiang. Types and distribution of carbonate reservoirs in Area 67 of Tahe Oilfield[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013,20(6):20-24.
- [19] 杨辉廷, 邢玉忠, 周拥军. 缝洞型碳酸盐岩储层定量评价研究[J]. 天然气勘探与开发, 2005,28(3):5-13.
Yang Huiting, Xing Yuzhong, Zhou Yongjun. Study on quantitative evaluation of fractured-vuggy carbonate reservoir[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2005,28(3):5-13.
- [20] 赵军, 刘彦斌, 王菲菲, 等. 碳酸盐岩缝洞型储层类型识别与分类预测[J]. 中国岩溶, 2018,34(4):584-591.
Zhao Jun, Liu Yanbin, Wang Feifei, *et al.* Identification and classification prediction of fractured-vuggy carbonate reservoirs[J]. Karst in China, 2018,34(4):584-591.
- [21] 艾合买提江·阿不都热合曼, 钟建华, Kurt Bucher, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩裂缝成因研究[J]. 特种油气藏, 2009,16(4):21-27.
Aihemaitijiang Abudurehman, Zhong Jianhua, Kurt Bucher, *et al.* Study on the origin of Ordovician carbonate fracture in Tahe Oilfield[J]. Special Oil & Gas Reservoir, 2009,16(4):21-27.
- [22] 漆立新, 云露. 塔里木盆地碳酸盐岩成藏模式和勘探实践[J]. 石油实验地质, 2020,42(5):867-876.
Qi Lixin, Yun Lu. Reservoir-forming model and exploration practice of carbonate rocks in Tarim platform basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020,42(5):867-876.
- [23] 唐军, 章成广, 蔡德洋. 基于斯通利波特征参数的致密砂岩储层有效性评价方法研究[J]. 石油天然气学报, 2018,34(4):79-85.
Tang Jun, Zhang Chengguang, Cai Deyang. Study on evaluation method of tight sandstone reservoir validity based on stoneley wave Characteristic Parameters[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2018,34(4):79-85.
- [24] 赵舒. 微电阻率成像测井资料在塔河油田缝洞型储层综合评价中的应用[J]. 石油物探, 2005,44(5):501-512.
Zhao Shu. Application of micro-resistivity imaging logging data in comprehensive evaluation of fractured-vuggy reservoirs in Tahe Oilfield[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2005,44(5):501-512.
- [25] 罗仁杰, 魏霞, 卢军海, 等. 微电阻率扫描成像(FMI)测井在缝洞型储层识别中的应用[J]. 内蒙古石油化工, 2012,38(13):24-26.
Luo Renjie, Wei Xia, Lu Junhai, *et al.* Application of micro-resistivity scanning imaging (FMI) logging in fractured-vuggy reservoir identification[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2012,38(13):24-26.
- [26] 张守谦. 成像测井技术及应用[M]. 北京:石油工业出版社, 1997.
Zhang Shouqian. Imaging logging technology and its application[M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 1997.
- [27] 高楚桥. 复杂储层测井评价方法[M]. 北京:石油工业出版社, 2003:23-31.
Gao Chuqiao. Logging evaluation method of complex reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003:23-31.
- [28] 杨海军, 李世银, 邓兴梁, 等. 深层碳酸盐岩凝析气藏勘探开发关键技术[J]. 天然气工业, 2020,40(2):83-89.
Yang Haijun, Li Shiyin, Deng Xingliang, *et al.* Key technologies for exploration and development of deep carbonate condensate gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2020,40(2):83-89.
- [29] 李建忠, 梁坤, 武娜, 等. 常规油气勘探程度分析新方法及其应用[J]. 石油科技论坛, 2020,39(6):45-53.
Li Jianzhong, Liang Kun, Wu Na, *et al.* New method for conventional hydrocarbon exploration stage division and its application[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2020, 39(6):45-53.
- [30] 杨金华, 李晓光, 孙乃达, 等. 未来10年极具发展潜力的20项油气勘探开发新技术[J]. 石油科技论坛, 2019,38(1):38-48.
Yang Jinhua, Li Xiaoguang, Sun Naida, *et al.* Twenty items of new technology for oil and gas exploration and development in next decade[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2019,38(1):38-48.
- [31] 章成广, 肖承文, 李维彦. 声波全波列测井响应特征及应用解释研究[M]. 武汉:湖北科学技术出版社, 2009.
Zhang Chengguang, Xiao Chengwen, Li Weiyan. Study on response characteristics and application interpretation of acoustic full wave train logging[M]. Wuhan:Hubei Science and Technology Press, 2009.
- [32] 唐军, 章成广, 信毅. 油基钻井液下裂缝声波测井评价方法:以塔里木盆地库车坳陷克深地区致密砂岩储集层为例[J]. 石油勘探与开发, 2017,44(3):389-406.
Tang Jun, Zhang Chengguang, Xin Yi. Acoustic logging evaluation method of fractures under oil-based drilling fluid: taking tight sandstone reservoir in Keshen area of Kuqa Depression in Tarim Basin as an example[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017,44(3):389-406.
- [33] 雷均, 马志武, 董平川. 塔中地区缝洞型储层的测井识别[J]. 石油天然气学报, 2009,31(3):231-234.
Lei Jun, Ma Zhiwu, Dong Pingchuan. Logging identification of fractured-vuggy reservoirs in Tazhong area[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009,31(3):231-234.
- [34] 易士威, 李明鹏, 郭绪杰, 等. 塔里木盆地寒武系盐下勘探领域的重大突破方向[J]. 石油学报, 2019,40(11):1281-1295.
Yi Shiwei, Li Mingpeng, Guo Xujie, *et al.* Major breakthrough direction in Cambrian subsalt exploration in Tarim Basin[J]. Acta Petroli Sinica, 2019,40(11):1281-1295.
- [35] 王松, 王贵文, 赖锦, 等. 塔北地区一间房组碳酸盐岩储层测井识别方法及应用[J]. 地球物理学进展, 2018,33(6):2462-2470.
Wang Song, Wang Guiwen, Lai Jin, *et al.* Logging identification method and application of Carbonate reservoir in Yijianfang Formation in Tabei Area[J]. Progress in Geophysics, 2018,33(6):2462-2470.