

岩溶型碳酸盐岩储层中缝洞复合体 及其油气地质意义

金 强¹, 程付启¹, 田 飞²

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要:大中型溶洞和溶蚀裂缝是塔河油田岩溶型碳酸盐岩储层的主要储集空间,但是沿碳酸盐岩裂缝还发育一系列溶蚀孔洞,形成了良好的油气渗流通道和储集空间,本文中称其为缝洞复合体。根据露头、岩心和测井等资料,对碳酸盐岩缝洞复合体的分布与成因进行分析。结果表明,它们在岩溶型碳酸盐岩中广泛分布,且成因类型不同:在表层岩溶带沿着节理或裂缝发育,在渗流岩溶带沿着构造裂缝发育,在径流岩溶带沿着溶洞周围环状和放射状裂缝发育,在断层周围沿着诱导裂缝发育;节理和裂缝是岩溶水流的通道,在节理或裂缝交叉处、以及穿越岩溶带的可溶性较高的岩层处形成溶蚀孔洞,以致缝洞复合体形成。缝洞复合体在岩溶储层内是连接不同储集空间的桥梁,也被认为是大中型岩溶缝洞的雏形,对它的识别和评价有助于岩溶型储层的深入认识。

关键词:碳酸盐岩; 岩溶作用; 储集空间; 缝洞复合体; 塔河油田

中图分类号:P 618.1 **文献标志码:**A

引用格式:金强,程付启,田飞. 岩溶型碳酸盐岩储层中缝洞复合体及其油气地质意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(3):49-55.

JIN Qiang, CHENG Fuqi, TIAN Fei. Identification of fracture-vug complex from karsted carbonates and its significance in petroleum geology [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(3): 49-55.

Identification of fracture-vug complex from karsted carbonates and its significance in petroleum geology

JIN Qiang¹, CHENG Fuqi¹, TIAN Fei²

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. Institute of Geology and Geophysics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Medium to large scale fractures and caves are important reservoir spaces in karsted oilfields, which has been proven by petroleum exploration and production in Tahe Oilfield. However, a great number of small vugs or caves distributed along fractures have been found in outcrops of the Ordovician carbonates and the cores from Tahe Oilfield. These small caves are connected by fractures to form very good hydrocarbon storages and seepage channels, which are referred to as fracture-vug complex. By investigations on outcrops, drilling-cores and well-loggings, our study shows that the fracture-vug complexes are distributed widely in karsted carbonates including surface karst zone, vadose karst zone and runoff karst zone, as well as among the fault induced fractures. Four genetic types of fracture-vug complexes can be recognized. Formation of the fracture-vug complexes are recognized that carbonate fractures or joints were enlarged by atmospheric water leaching, and caves were formed at cross of fractures or joints and at easy corroding lithologies so that resulted in small caves distributing along fractures and along easy corroding beddings. Identification of fracture-vug complex helps to predict and evaluate reservoir spaces in karsted carbonate rocks.

收稿日期:2016-11-12

基金项目:国家自然科学基金重点支持项目(U1663204); 国家科技重大专项(2016ZX05014-002); 国家“973”重点基础研究发展计划项目(2011CB201001)

作者简介:金强(1956-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为油气地质。E-mail:jinqiang@upc.edu.cn。

通讯作者:程付启(1978-),男,副教授,博士,硕士生导师,研究方向为油气地质与油气地球化学。E-mail:chengfq9804@163.com。

Keywords: carbonate; karstification; reservoir space; fracture-vug complex; Tahe Oilfield

碳酸盐岩是重要的油气储集岩,在国外约一半的油气储量和产量来自碳酸盐岩^[1-2],其中主要是颗粒型灰岩或白云岩,储集空间以粒间孔隙为主^[3-4]。中国碳酸盐岩油气储层主要分布在塔里木、四川盆地^[5-6],渤海湾盆地潜山油气藏也是碳酸盐岩储层^[7],它们的储集空间以裂缝和溶蚀孔洞为主^[8-9]。塔河油田是中国已发现的最大的碳酸盐岩油田,探明石油地质储量超过13亿t,也是世界上少有的岩溶缝洞型大油田^[10]。其储层是奥陶系经受长期岩溶地质作用的灰岩,石油主要产自于规模不等的溶洞和溶蚀裂缝,大型溶洞高度超过60m、长度超过5km^[11],小的只有几厘米,可见溶洞形态大小与分布极其复杂^[12],而且约70%的溶洞空间被岩溶期的沉积砂泥、垮塌角砾和钙华所充填,埋藏期热液作用和胶结作用也可充填和堵塞储集空间^[12],造成剩余的缝洞空间被分隔,形成复杂的缝洞单元^[13-14]。二十多年来,该油田的开发基本上是针对未充填或半充填的缝洞单元进行的,原油产量递减快、采收率比较低^[15]。随着勘探开发的进展,越来越多的学者认为,岩溶缝洞型油藏除了未充填/半充填的大型溶洞外,沉积充填物、垮塌充填物发育良好的粒间孔隙^[16-18],缝洞围岩(即奥陶系灰岩)受到风化淋滤、断裂构造等作用形成了大量裂缝和溶蚀孔洞,特别是沿着节理/裂缝或平行岩层面形成了串珠状小型溶洞,也就是本文中所述缝洞复合体,它们构成了岩溶储层分布广泛的储集空间,值得重视和研究。笔者根据露头 and 岩心观察到的缝洞复合体特征,并结合测井资料识别结果,探讨缝洞复合体的分布规律与形成机制,期望有助于岩溶型碳酸盐岩储集空间的深入认识。

1 缝洞复合体的特征和成因类型

在岩溶地质条件下,缝在先、洞在后是缝洞复合体的成因特征,即在不同成因的节理或裂缝基础上,被流水溶蚀扩大形成的、由裂缝串联的一系列小型溶洞。裂缝控制了缝洞复合体的形成,不同成因或不同位置的裂缝导致了不同成因的缝洞复合体形成:表层岩溶带裸露的碳酸盐岩在风化作用下会产生大量节理,这些节理把岩石切成菱形块状,造成缝洞复合体一组是高角度的、一组是顺层分布的,受地形地貌控制,有时高角度一组水流作用强则溶蚀孔洞发育,有时顺层一组水流作用强则顺层溶蚀孔洞

发育;渗流岩溶带的缝洞复合体围绕构造裂缝或断层发育,在驻水洞周围也发育,这些裂缝以高角度为主,所以缝洞复合体是该带的主要水流通道;径流岩溶带的裂缝围绕溶洞呈放射状或环形分布,而且在溶洞顶棚裂缝及缝洞复合体比较发育,这些裂缝不一定是构造缝,主要是溶洞周围受力不均形成的裂缝;这三类缝洞复合体的分布、产状和成因各不相同,分别称为表层带缝洞复合体、渗流带缝洞复合体和径流带缝洞复合体,潜流岩溶带目前研究不多,暂时不予讨论。还有一类重要的缝洞复合体,就是沿断层(断裂带)诱导裂缝发育的缝洞复合体,由于断层可以穿越上述几个岩溶带,所以该类缝洞复合体延伸范围可以很大(可以数百米或数千米),被称为断裂诱导缝洞复合体。

受裂缝及岩性组合控制,沿裂缝的小型串珠状溶洞形态各异,洞直径一般小于20cm(也有的约为50cm),沿单条裂缝为长条状、在裂缝交叉处为椭圆球状,如果裂缝切割可溶性较强的岩层,可顺层发育串珠状小型溶洞。一般情况下,裂缝或节理交叉处、裂缝切割到可溶性强的岩石处都有溶蚀孔洞形成,单个溶蚀孔洞的产状不一定能够看出岩溶水流运动方向,如果把沿着某一条或一组裂缝或节理发育的溶蚀孔洞产状整体上看,溶蚀孔洞长轴方向就是溶蚀水流运动方向。对露头和岩心的缝洞复合体观察发现,渗流岩溶带溶蚀孔洞产状表明岩溶水流高角度向下流动,径流岩溶带岩溶水流低角度横向流动,表层岩溶带水流方向比较杂乱。如果岩溶地质条件持续下去,缝洞复合体中溶蚀孔洞就会不断扩大、连通形成大型溶洞,也就是说,缝洞复合体是大型溶洞发育的岩溶储层雏形,所以不同成因缝洞复合体的研究在岩溶缝洞形成机制方面具有重要意义。

塔河野外露头考察和塔河奥陶系岩心观察发现,表层岩溶带的缝洞复合体比较发育,因为此处构造裂缝和风化节理发育,接受的地表水冲刷和淋滤溶蚀时间长,例如裸露的奥陶系灰岩缝洞复合体非常典型(图1(a)、(h)),在地表河底部、落水洞周缘可以形成蜂窝状的溶蚀孔洞(图1(b));渗流岩溶带缝洞复合体围绕着驻水洞、渗流井等渗流通道分布,而且溶蚀缝洞是高角度或垂向分布(图1(f)、(g)),体现了渗流带溶蚀流体的运动方式;径流岩溶带的缝洞复合体环绕地下河溶蚀形成的溶洞分布,在溶洞顶部发育程度比较高,其裂缝多数环状平

行溶洞发育、少量呈辐射状分布(图1(c)、(d))。此外,断层附近裂缝发育则缝洞复合体也很发育(图1(e))。缝洞复合体可以被碎屑物质和方解石

等化学物质所充填^[16,18],有的充填率比较高,如瘤状灰岩发育的缝洞复合体,后期被钙华、泥质等充填,变成致密岩性(图1(i))。

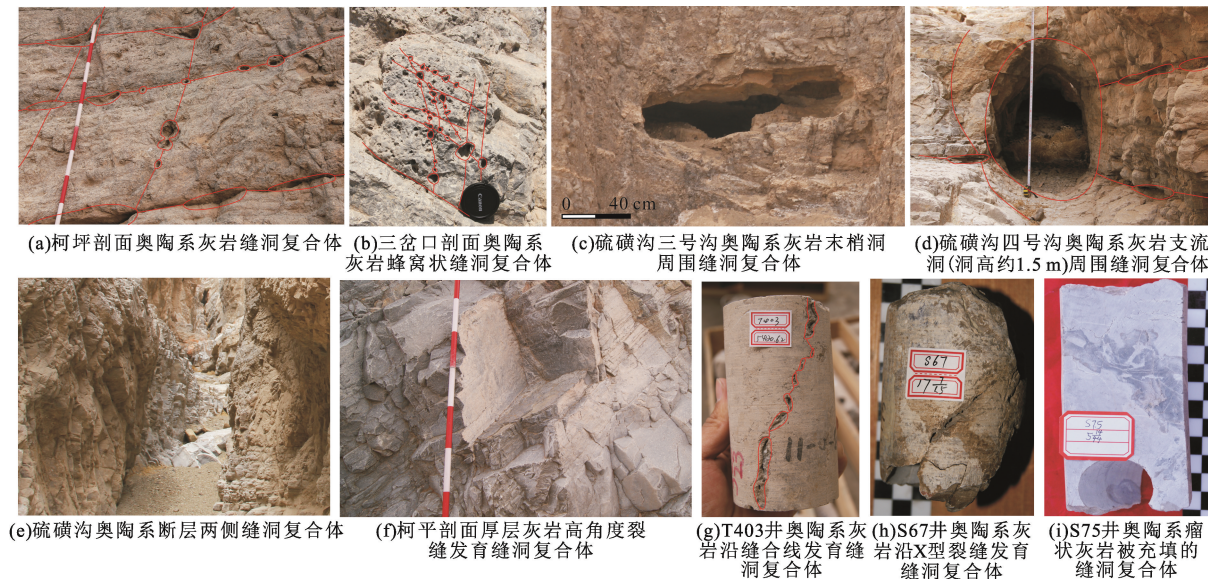


图1 塔北露头 and 塔河油田岩心上观察到的不同成因缝洞复合体

Fig.1 Different types of fracture-vug complexes observed from outcrops and drilling cores from Tahe Oilfield

岩心观察还发现,并不是所有的碳酸盐岩都能够形成缝洞复合体,厚层或块状灰岩不易形成缝洞复合体,如S67井5466.8~5467.1 m角砾状灰岩段,裂缝与溶蚀孔洞均不发育;此外,泥质含量很高的灰岩也不容易形成缝洞复合体,如T601井5538~5539 m泥质灰岩段,泥质含量约40%,仅见几条缝合线,无缝洞复合体发育。统计发现,中-薄层、泥质含量在15%~40%的灰岩裂缝或节理、缝洞复合体比较发育,而且发育顺层溶蚀孔洞。分析认为,缝洞复合体形成既受裂缝(提供溶蚀水流通通道)发育情况的控制,又受岩性组成的影响,从而导致不同岩溶带、不同岩层之间缝洞复合体发育特征的差异。但是,缝洞复合体发育的厚度变化很大,厚度可以超过10 m。缝洞复合体的概念是从露头观察得到的,岩心上经常只能看到一条溶蚀裂缝及其溶蚀孔洞(图1(g)),沿灰岩缝合线也可以形成缝洞复合体,其中往往含油性良好。

2 岩溶储层中缝洞复合体的识别

从地表露头和岩心观察到的缝洞复合体如果能够在井下得到识别,才真正具有油气地质和油气开发意义。鉴于前人利用测井信息识别裂缝^[19],笔者利用岩心观察结果与测井曲线对比,发现多种测井信息与缝洞复合体有一定相关性,裂缝发育段电阻率降低,尤其是裂缝特别发育部位的浅侧向测井值

降低很明显^[20];当裂缝充填泥质的时候,会造成自然伽马响应增大,从而计算得到的泥质含量(V_{sh})增大^[21]。裂缝开度是裂缝的重要参数,裂缝开度越大、裂缝的储集性能越好。根据相关实物模拟实验和三维有限元模拟,裂缝的深浅双侧向电导率差和钻井液滤液电阻率的乘积跟裂缝的开度成正比^[21]。由于裂缝段和缝洞复合带内的测井响应相似,采用泥质含量(V_{sh})、浅侧向电导率($1/RLLS$)和电阻率差绝对值与钻井液滤液电阻率乘积($K_3 \times R_{mf}$)建立多参数加权函数(式1)来识别缝洞复合带和裂缝段:

$$M = 0.21 \times Y_1 + 0.43 \times Y_2 - 0.36 \times Y_3, \quad (1)$$

式中, Y_1 为泥质含量标准化; Y_2 为浅侧向电导率标准化; Y_3 为电导率差绝对值与钻井液电阻率乘积标准化; $M > 0.45$ 时为缝洞复合体发育段, $0.16 < M < 0.45$ 时为裂缝段。

为了确定上述判别的准确率,将岩心资料与成像测井解释成果显示的缝洞复合体作为正确目标进行比对,从而得到识别的符合率。塔河油田有数十口井进行了成像测井,从其图像可以清晰地看出缝洞复合体发育的位置和形态,如S74井在5714.2~5719.8 m的深度范围内发育缝洞复合体(图2(a)),其裂缝倾角属于高角度大于 50° 、沿着裂缝明显地见有溶蚀扩大,形成缝洞复合体,该段岩心也反映了缝洞复合体的存在(图2(b))。通过与岩心和

成像测井对比,上述方法符合率为78%,达到了储层预测评价的要求。利用本文中方法计算出的裂缝、缝洞复合体等数据已用于塔河油田的油藏地质建模中。

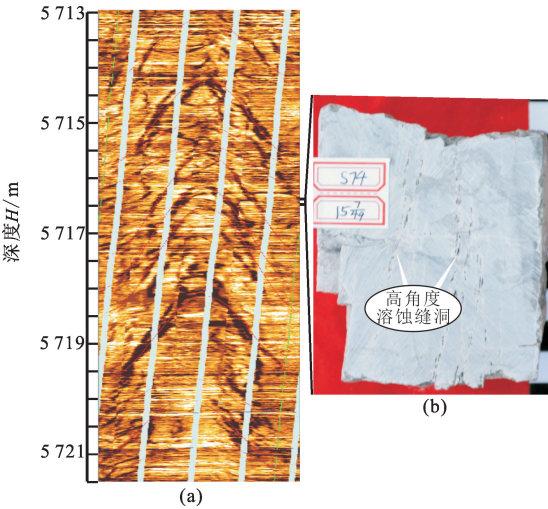


图2 S74井成像测井所显示的缝洞复合体特征和对应的岩心特征

Fig.2 Fracture-vug complexes showing on imaging logging from well S74 and corresponding drilling cores

3 缝洞复合体研究的意义

缝洞复合体与裂缝经常发育在一起,过去常将其认识为裂缝。例如图2(b)过去就认为是裂缝,实际上沿着裂缝溶蚀形成了一系列0.5~15 cm的溶蚀孔洞,也就是本文中所述的缝洞复合体。大中型溶洞(大型溶洞洞高大于5 m、中型溶洞洞高大于2 m)是塔河油田目前产出油气的主要储集体,缝洞复合体起着连接大中型溶洞的作用,在岩溶储层中起着重要的油气储集和渗流作用,也是岩溶储层中不可忽视的储集体。

(1) 表层岩溶带缝洞复合体发育段厚度大。

塔河油田奥陶系在晚加里东—海西期岩溶作用非常强烈,岩溶地质现象也很全面,岩溶分带现象明显,即从奥陶系顶面向下分布着表层岩溶带、渗流岩溶带、径流岩溶带和潜流岩溶带^[5,8,11]。T444井岩溶期的奥陶系灰岩位于岩溶高地^[8],因地势较高,未发育地表河流,也没有坡积物堆积^[11],但是在其顶部32 m的深度范围内除发育3个洞高在0.5~0.9 m的小型溶洞外,其他均为缝洞复合体(图3)。其中裂缝呈高角度状态,溶蚀作用显著,测井解释孔隙度在4%~21%,而奥陶系灰岩测井解释孔隙度基本小于2%,说明缝洞复合体的存在;缝洞复合体发育段内,裂缝交叉处溶蚀作用相对强烈可以形成

较大规模的溶洞,图3中显示的3个洞高大于0.5 m的溶洞就是这样成因的;5555 m以下是比较致密的奥陶系灰岩,裂缝和缝洞复合体均不发育(图3)。表层岩溶带缝洞复合体分布特征可以参见图4。

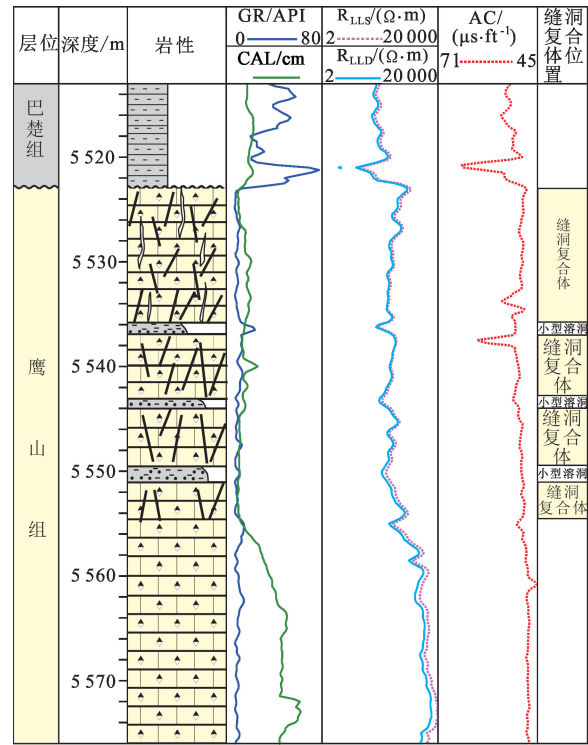


图3 T444井表层岩溶带缝洞复合体发育柱状图

Fig.3 Histogram of fracture-vug complexes from well T444

(2) 渗流岩溶带和径流岩溶带的缝洞复合体围绕溶洞发育。

渗流岩溶带也发育高角度裂缝,但是裂缝发育程度没有表层岩溶带那么广泛,裂缝及缝洞复合体多数在断层、渗流井和驻水洞附近发育(图4)。径流岩溶带发育地下河,其裂缝和缝洞复合体平行地下河发育,以低角度为主^[11]。这也是两个岩溶带的区分标志,渗流岩溶带主要发育渗流井和驻水洞等大型缝洞结构(图4),径流岩溶带主要发育厅堂洞、干流洞、支流洞、末梢洞等大型缝洞结构,围绕着这些大型缝洞结构,发育构造裂缝(断层周围)、溶蚀裂缝(溶洞和早期裂缝周围)和垮塌裂缝(环绕溶洞顶部),这些裂缝在流水作用下可以形成形态各异的缝洞复合体。

塔河油田奥陶系几乎每一口井在大型缝洞周围均发现有裂缝和缝洞复合体,借助岩心和测井资料可见其发育特征,例如TK714井5568.8~5573.5 m为一驻水洞,该洞上下缝洞复合体很发育(厚度约为6 m),形成缝洞复合体的裂缝是高角度的。再如TK454井5548.3~5582.5 m为径流岩溶带,其中

5567~5578 m 为一个洞高 11 m 的地下河干流洞,该洞之上 5 m、之下 3.7 m 厚度的灰岩发育缝洞复合体,此处的裂缝和缝洞复合体内裂缝基本上为低角度

的。笔者根据野外剖面与塔河油田实际岩心、测井识别结果,绘制的岩溶储层缝洞结构及缝洞复合体类型模式图(图 4)具有归纳总结和模式预测的意义。

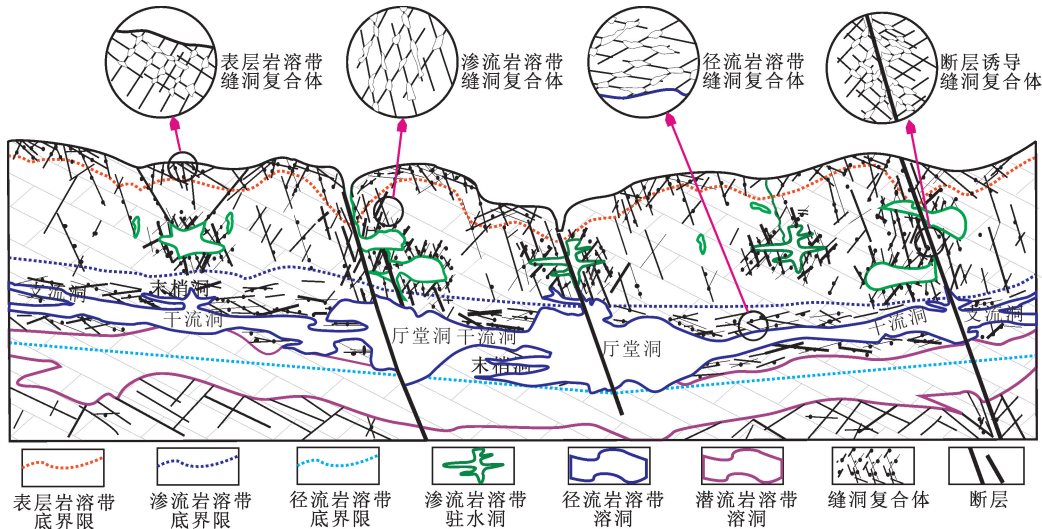


图 4 塔河油田奥陶系岩溶储层缝洞结构及缝洞复合体类型模式

Fig. 4 Model showing fracture-vug complex distribution and their genetic types in karst reservoir rocks in Ordovician carbonates in Tahe Oilfield

(3) 缝洞复合体含油性好又是渗流通道。

在塔北隆起奥陶系露头区,有些缝洞复合体被敲开后可以闻到浓烈的油气味道,在岩心看到的缝洞复合体充注原油的现象非常多,如图 1(g)、(h)。缝洞复合体的孔隙度和渗透率在岩心上目前尚不能准确测量(因为其是孔隙、裂缝和溶洞不均匀分布的三重介质),测井信息的定性解释(如位置、厚度)比较可信,定量解释(如孔隙度、渗透率)值得进一步验证,但是油田开发实践表明:缝洞复合体发育段的孔渗性远大于只有裂缝的灰岩,特别是渗透性远大于裂缝性灰岩,因其裂缝被溶蚀扩大,成为油气良好的运移通道。

缝洞复合体可以被碎屑物质充填,还可以被方解石等化学物质充填^[16],但是其方解石晶间或碎屑颗粒之间仍有储集空间,如图 1(i)中的方解石晶间仍有石油充注。

4 结 论

(1) 岩溶期被地表水淋滤的构造裂缝或节理不断溶蚀扩大,在裂缝交叉处、或易溶岩性处产生溶蚀孔洞,这些溶洞规模小(一般洞直径不超过 30 cm),呈串珠状沿着溶蚀裂缝分布或顺着易溶岩层分布,形成了岩溶型碳酸盐岩特殊的储集空间。

(2) 表层岩溶带缝洞复合体沿着高角度和低角度节理或裂缝强烈发育,其总厚度可以达到 20 m 以

上;渗流岩溶带缝洞复合体主要沿高角度构造缝发育,在驻水洞附近比较密集发育;径流岩溶带缝洞复合体主要沿低角度裂缝、围绕地下河溶洞发育;断层诱导裂缝也致使缝洞复合体强烈发育,断层两盘诱导裂缝产状不同,常常穿越不同岩溶带,其中的孔洞规模较大,是值得重视的一类缝洞复合体。

(3) 各种类型的缝洞复合体储集空间和渗透性良好,是不可小视的岩溶型储集体,利用测井资料可以将其位置和厚度解释解释出来,其定量描述尚须继续深入研究。此外,由于缝洞复合体规模小,在地震剖面上的响应不明显,如何提高地震资料精度、提取敏感属性,从而实现缝洞复合体地震识别,将是缝洞复合体储层研究的重要方向。

参考文献:

[1] BARTOLINI C, BUFFLER R T, BLICKWEDE J. The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics[J]. AAPG Memoir, 2003, 79: 169-183.

[2] LUCIA F J. Carbonate reservoir characterization[M]. Berlin: Springer, 1999.

[3] LØNØY A. Making sense of carbonate pore systems[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(9): 1381-1405.

[4] FARZADI P, ALAEI B. Stratigraphic architecture of the Zagros Basin: a comparison of the fold-thrust belt and foreland province[J]. The Journal of Petroleum Geology,

- 2006,29(3):347-365.
- [5] 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. Controls on reservoir formation in Ordovician of Tahe Oilfield, Tarim Basin, and combinational genetic mechanism[J]. Oil and Gas Geology, 2010,31(6):743-752.
- [6] 朱光有,张水昌,梁英波. 四川盆地深部海相优质储集层的形成机理及其分布预测[J]. 石油勘探与开发,2006,33(2):176-190.
- ZHU Guangyou, ZHANG Shuichang, LIANG Yingbo. Formation of good reservoirs in deep buried marine strata and their distribution estimation in Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006,33(2):176-190.
- [7] 王军. 富台潜山油藏复杂储层测井评价方法及其应用[J]. 石油学报,2005,26(3):86-89.
- WANG Jun. Well logging evaluation on complicated reservoirs in Futai buried hill and its application[J]. Acta Petroli Sinica, 2005,26(3):86-89.
- [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. Formation model of fracture-cave systems in Ordovician carbonates in Tahe Oilfield and their distributions[J]. Acta Petroli Sinica, 2011,32(1):101-106.
- [9] 朱光有,杨海军,苏劲,等. 中国海相油气地质理论新进展[J]. 岩石学报,2012,28(3):722-738.
- ZHU Guangyou, YANG Haijun, SU Jin, et al. New advances in marine petroleum geology in China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012,28(3):722-738.
- [10] 康玉柱,康志宏. 塔河大油田勘探实践与技术创新[M]. 北京:中国石化出版社,2009.
- [11] 金强,田飞. 塔河油田岩溶型碳酸盐岩缝洞结构研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(5):15-21.
- JIN Qiang, TIAN Fei. A study on constructions of fracture-cave in karst carbonates in Tahe Oilfield[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013,37(5):15-21.
- [12] 鲁新便,何成江,邓光校,等. 塔河油田奥陶系油藏喀斯特古河道发育特征描述[J]. 石油实验地质,2014,36(3):268-274.
- LU Xinbian, HE Chengjiang, DENG Guangxiao, et al. Description on paleo-river channels in Ordovician karst reservoirs, Tahe Oilfield[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014,36(3):268-274.
- [13] 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 recognition on super-huge Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011,33(4):323-331.
- [14] 康志宏,陈琳,鲁新便,等. 塔河岩溶型碳酸盐岩缝洞系统流体动态连通性研究[J]. 地学前缘,2012,19(2):110-120.
- KANG Zhihong, CHEN Lin, LU Xinbian, et al. Dynamic connection study on karst carbonate fracture-cave systems in Tahe Oilfield[J]. Geological Front, 2012,19(2):110-120.
- [15] 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,2010,31(1):22-27.
- LU Xinbian, CAI Zhongxian. Palaeo-cave systems in karst carbonate reservoirs and their oil and gas productions: a case study of Tahe karst carbonate reservoirs[J]. Oil and Gas Geology, 2010,31(1):22-27.
- [16] 蔡春芳,李开开,李斌,等. 塔河地区奥陶系碳酸盐岩缝洞充填物的地球化学特征及其形成流体分析[J]. 岩石学报,2009,25(10):2399-2404.
- CAI Chunfang, LI Kaikai, LI Bin, et al. Geochemistry of fillings in fracture-cave of Ordovician karst in Tahe area and their forming fluids[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009,25(10):2399-2404.
- [17] 金强,康迅,荣元帅,等. 塔河油田奥陶系古岩溶地表河和地下河沉积和地球化学特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(6):1-10.
- JIN Qiang, KANG Xun, RONG Yuanshuai, et al. Sedimentary and geochemical characteristics of sandstones and mudstones deposited in surface rivers and subsurface rivers in Ordovician karsted carbonates, Tahe Oilfield[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015,39(6):1-10.
- [18] 钟建华,毛毳,李勇,等. 塔北硫磺沟奥陶系含油古溶洞的发现及意义[J]. 中国科学(地球科学),2012,42(11):1660-1680.
- ZHONG Jianhua, MAO Cui, LI Yong, et al. Discovery of the ancient Ordovician oil-bearing karst cave in Liuhuanggou, North Tarim Basin, and its significance[J]. Science China: Earth Sciences, 2012,55(9):1406-1426.
- [19] 邓少贵,范宜仁,谢关宝,等. 泥浆侵入地层双感应测井曲线正负差异特性分析[J]. 测井技术,2004,28(6):496-498.
- DENG Shaogui, FAN Yiren, XIE Guanbao, et al. A-

analysis on positive and negtive difference of dual induction resistivity well loggings in mud intrusion strata[J]. Well-Logging Technology, 2004,28(6):496-498.

[20] 田飞,金强,李阳,等. 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[J]. 石油与天然气地质,2012,33(6):900-907.

TIAN Fei, JIN Qiang, LI Yang, et al. Identification of small caves and their fillings by well logging data in karsted reservoirs in Tahe Oilfield[J]. Oil and Gas Geology, 2012,33(6): 900-907.

[21] 金燕,张旭. 测井裂缝参数估算与储层裂缝评价方法研究[J]. 天然气工业,2009(z1):64-67.

JIN Yang, ZHANG Xu. Parameter estimation of well logging and fractured reservoir evaluation[J]. Natural Gas Industry, 2009(z1):64-67.

[22] 陈冬,魏修成. 塔河地区碳酸盐岩裂缝型储层的测井评价技术[J]. 石油物探,2010,49(2):147-152.

CHEN Dong, WEI Xiucheng. Well logging evaluation on fractured carbonate reservoirs in Tahe area[J]. Petroleum Geophysical Exploration, 2010, 49 (2): 147-152.

(编辑 徐会永)