

塔中 I 号气田西部鹰山组碳酸盐岩储层类型 划分及储层连续性分析

韩杰¹, 吴箫^{1,2}, 江杰¹, 张敏¹, 敬兵¹

(1. 中国石油塔里木油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000;

2. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249)

摘要: 非均质碳酸盐岩储层类型多样, 成因机理复杂。不同成因、机理及尺度的孔、洞、缝常伴生发育, 仅根据静态资料(野外露头、岩心、测井和地震等资料)难以划分储层类型。为此, 以塔中 I 号气田西部下奥陶统鹰山组层间岩溶缝洞型碳酸盐岩储层为例, 以静态资料为辅、动态资料(酸压、试井和试采等资料)为主, 将研究区储层划分为洞穴型、裂缝—孔洞型和孔洞型储层 3 种类型。结合地震正演和钻井资料, 根据地球物理响应特征, 将研究区储层地震反射特征划分为串珠状、片状和杂乱地震反射 3 种类型。串珠状地震反射储层中的小型洞穴、裂缝和孔洞均较发育, 主要供液空间为裂缝—孔洞型储层, 其次为洞穴型储层, 片状和杂乱地震反射储层起主要供液作用的分别为裂缝—孔洞型和孔洞型储层。串珠状、片状和杂乱地震反射储层的发育程度具有较好的继承关系, 部分杂乱地震反射储层受后期埋藏溶蚀作用的强烈改造形成串珠状和片状地震反射储层。此外, 初步探讨了储层相对致密段的连续性及其含油气特征, 认为储层相对致密段的油气以吸附状态或游离状态赋存于孔隙和喉道中, 且储层存在一定的横向连续性和连通性。

关键词: 鹰山组 储层类型 试井 地震反射 塔中隆起 塔里木盆地

中图分类号: TE112.22

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2016)01-0014-08

Classification and continuity analysis on carbonate reservoir of the Yingshan Formation in the western Tazhong I gasfield

Han Jie¹, Wu Xiao^{1,2}, Jiang Jie¹, Zhang Min¹, Jing Bing¹

(1. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang, 841000, China;

2. College of Geoscience, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China)

Abstract: Types of the heterogeneous carbonate reservoir are various and its genetic mechanism is complex. The hole, cave and fissure with different genesis, formation mechanisms and scales always develop in company, thus it is difficult to classify reservoir types only using static data (outcrop, core, logging and seismic data, etc.). The carbonate interlayer karst reservoirs in the Lower Ordovician Yingshan Formation of the western Tazhong I gasfield was chosen as an example, and the carbonate reservoirs in the study area were classified into three types: cavity, fracture-hole and hole mainly using dynamic data (acid fracture, well test, production test, etc.) with auxiliary of static data. Combining with seismic forward and well drilling data, the seismic reflection characteristics of the carbonate reservoir are divided into three types based on geophysical response characteristics: string beads reflection, flake reflection and messy reflection. Small caves, fractures and holes are more developed in the carbonate reservoirs with bead-like reflection, in which the fracture-hole reservoir is the main space providing liquid followed by the cave reservoir; fracture-hole and hole reservoir are the main space providing liquid with flake-like reflection and messy reflection respectively. The carbonate reservoirs with three kinds of seismic reflection developed with inheritance, the carbonate reservoirs with some messy reflections were reconstructed later strongly by burial

收稿日期: 2015-11-02。

作者简介: 韩杰(1979—), 男, 湖北武汉人, 高级工程师, 硕士, 从事油气藏地质综合研究。联系电话: (0996)2174243, E-mail: gshanjie@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项“塔里木盆地大型碳酸盐岩油气田勘探开发示范工程”(2011ZX05049)。

dissolution to form carbonate reservoirs with bead-like and flake-like reflection. Besides, the oil and gas bearing characteristics of relatively tight reservoirs and its continuity were discussed preliminarily, and it is believed that the oil and gas in relative compacted segments accumulates in channels and throats in adsorbed or in free state, and the reservoirs are horizontally continuous and connected to some degree.

Key words: Yingshan Formation; reservoir type; well test; seismic reflection; Tazhong uplift; Tarim basin

非均质碳酸盐岩储层类型多样,形成机制复杂。储层研究贯穿碳酸盐岩油气勘探开发的全过程,是碳酸盐岩油气勘探开发永恒的主题^[1-2]。对于不同的油气勘探开发阶段,利用不同的储层表征、测试手段进行的储层研究具有不同的内容和侧重点。传统的储层研究主要借助于野外露头、钻井取心、测井和地震等静态资料来进行储层类型划分、储层纵向和横向变化规律分析以及储层形成机理和优质储层预测等工作。由于碳酸盐岩储层的强非均质性,不同成因、机理及尺度的孔、洞、缝常伴生发育,给传统的储层类型识别带来了较大困难,进而影响后续科研工作的开展^[3-4]。随着油气勘探开发的深入,特别是储量探明后建产和稳产阶段,对储层研究提出了新的要求和目标,须识别、评价不同类型储层的渗流特征和开发规律,在此基础上开展地震反射特征的地质解译、储层连通性研究、开发可动用储量评价、合理工作制度确定、剩余油分布与开发潜力分析等一系列工作。为此,笔者根据塔里木盆地塔中I号气田西部下奥陶统鹰山组层间岩溶缝洞型碳酸盐岩凝析气藏的石油地质特征和勘探开发现状,转变工作思路与方法,将储层研究由单纯的静态研究向动、静态资料结合的油气藏研究转变,通过岩心、测井和物探等静态储层表征方法明确不同尺度储层的孔、洞、缝发育特征,并通过酸压、试采、试井等动态资料确定不同类型储层的渗流特征,进而全面认识研究区油气藏的储层类型,以期作为下步的科学决策提供依据。

1 区域地质概况

塔里木盆地塔中I号气田下奥陶统鹰山组凝析气藏位于塔中隆起北斜坡带的中西部,是中国第1个亿吨级的奥陶系鹰山组层间岩溶缝洞型特大凝析气田。该气田发现于2006年,直接盖层为奥陶系良里塔格组下部致密泥质灰岩,间接盖层为奥陶系桑塔木组泥岩,主力烃源岩为中一下寒武统和上奥陶统碳酸盐岩及泥灰岩;油气主要分布于奥陶系不整合面之下0~200 m,油气在纵向上呈准层状叠合分布、平面上受储层发育程度控制,局部含少量底

水和边水,整体表现为油气水分布复杂的大型准层状非常规凝析气藏^[5-9]。

2 储层类型划分

根据传统的静态资料进行储层类型划分存在明显的缺陷,其主要以钻井、岩心和测井资料为基础,不能全面反映实际地下三维空间孔、洞、缝的渗流特征。因此,以静态资料为辅、动态资料为主,结合塔中I号气田西部鹰山组的实际地质条件,将研究区储层划分为洞穴型、裂缝—孔洞型和孔洞型储层3种主要类型。

2.1 洞穴型储层

洞穴型储层一般由大洞、巨洞和洞穴周边的裂缝、溶蚀孔洞发育带组成^[9],根据野外地质调查及测井(特别是成像测井)资料,垂向上可将洞穴型储层划分为洞顶垮塌破碎带、溶洞主体和洞底溶蚀破碎带^[10]。研究区洞穴型储层主要分布于鹰山组顶部及断裂发育区,洞穴型储层难以取心,但在钻井过程中会发生钻具放空、泥浆漏失或溢流;常规测井曲线表现为井眼局部扩径、密度大幅降低、声波时差跳跃,成像测井表现为极板拖行产生暗色条带夹局部亮色团块或全部极板为黑色。

洞穴型储层表现为近井(洞穴主体)高渗透性,以洞腔流为主,地层系数大于 $2\ 500\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2\cdot\text{m}$,井筒外围(洞穴周边破碎带)渗流性迅速变差,以管流、渗流过渡为主,为定容型储层特征(图1a)。由于近井较好的渗流性,酸压施工压力较低,泵压有明显降幅,停泵压力较小,一般小于20 MPa,因此在开井初期一般具有较高的产能和油压;而井筒外围渗流性迅速变差,试井双对数曲线表现为向外储层变差的定容型特征(图2a),试采递减较快,具有指数递减特征。洞穴型储层具有定容衰竭特征,其累积产量主要取决于洞穴主体的大小,根据实验室模拟及井下注水试验证实,通过注水替油可以提高采收率5%~10%。

2.2 裂缝—孔洞型储层

裂缝—孔洞型储层主要是由中缝、大缝、巨缝及各种类型的溶蚀孔洞共同组成^[9]。其中,孔洞是

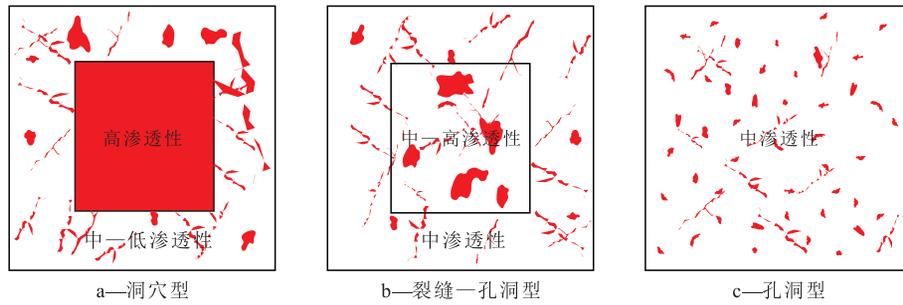


图1 洞穴型、裂缝—孔洞型和孔洞型储层模型特征

Fig.1 Characteristics of cavity, fracture-hole and hole reservoir model

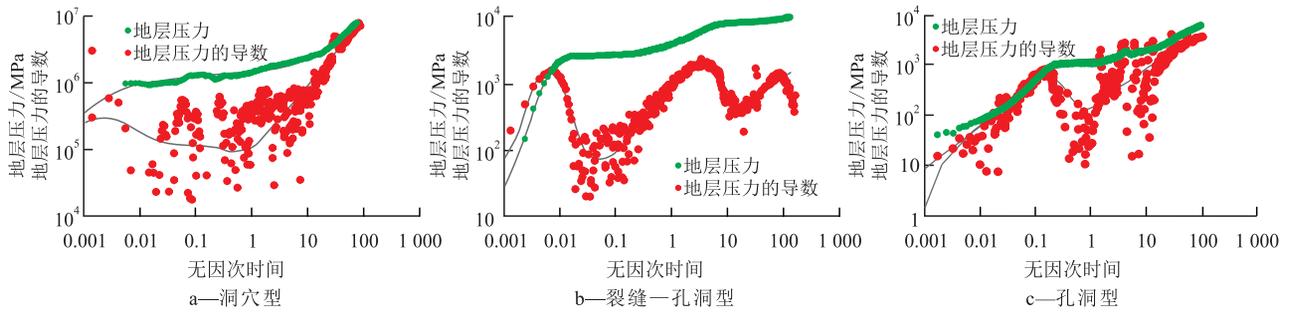


图2 洞穴型、裂缝—孔洞型和孔洞型储层试井曲线特征

Fig.2 Characteristics of well test curves of cavity, fracture-hole and hole reservoir

主要的储集空间,裂缝主要有构造缝、溶蚀缝和成岩缝3种类型;裂缝可以提供部分储集空间,但更为重要的是可以成为连通渗流的渠道。裂缝—孔洞型储层的裂缝发育,岩心容易破碎,在钻遇过程中有少量的钻具放空、泥浆漏失或溢流;常规测井曲线表现为低电阻率、低自然伽马以及声波、中子跳跃的特征,成像测井显示为暗色条带和黑色星点。

裂缝—孔洞型储层在近井表现为中高渗透性,井间或远井表现为中渗透性,以管流和渗流为主,地层系数为 $100 \times 10^{-3} \sim 2\,500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$,油气渗流空间相对均质,井筒外围具有较好的能量补给,单井控制范围较大(图1b)。由于发育裂缝和孔洞,井筒外围能量补给较强,酸压时初始泵压一般较低且稳定下降,停泵压力较小,一般小于20 MPa,开采初期一般具有中—高产能特征且可以保持较长时间,表现为均匀稳定递减,类似均质砂岩油气藏的开采特征;在试井双对数曲线上,近井储层表现为中—高渗透性,井筒外围渗透性逐渐变差,定容特征不明显,井控半径一般大于500 m,多具有内好外差复合模型、均质模型或双重孔隙介质模型特征(图2b)。

2.3 孔洞型储层

孔洞型储层是经过溶蚀改造形成的,发育少量微裂缝和小缝,相对较易于取心,在岩心中可见不规则状溶蚀孔洞充填;常规测井曲线表现为低—中

值自然伽马及中子、密度、声波曲线变化较大的特征,成像测井表现为豹斑状不规则黑色星点分布。

孔洞型储层表现为近井中—低渗透性,油气以渗流为主,地层系数小于 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$,井控范围较小,井筒外围能量补给不足(图1c)。酸压难以对孔洞型储层进行有效改造,表现为泵压较高,一般大于80 MPa,地层吸液性能较差,停泵压力较高,一般大于20 MPa,开采初期产量较低且压力和产量衰竭快于其他类型储层,试井双对数曲线上表现为近井储层低渗透性,井筒外围能量补给较差(图2c)。

3 不同类型储层的地震反射特征

物探技术是预测储层最直接有效的方法^[11]。碳酸盐岩储层对地震波有较强的吸收和衰减作用,特别是高频成分通过缝洞系统时能量很快衰减甚至消失,表现为低频、强振幅异常,因此物探技术对于储层的预测主要是通过识别这种异常来实现。根据实际地震资料的地球物理响应特征,结合地震正演^[12-14]和钻井资料,将塔中I号气田西部鹰山组不同类型储层的地震反射特征划分为串珠状、片状和杂乱地震反射3种类型(图3)。

3.1 串珠状地震反射

串珠状地震反射是指地震剖面在纵向上至少由两谷一峰(或两峰一谷)的强反射组成,横向上收

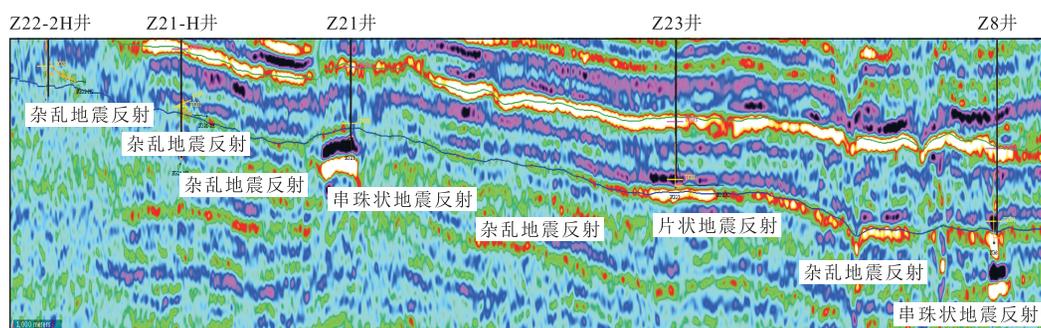


图3 塔中 I 号气田西部鹰山组不同类型储层的地震反射特征

Fig.3 Seismic reflection characteristics of different reservoirs in the Yingshan Formation in the western Tazhong I gasfield

敛性较好,振幅能量大于2 000,平面上多为点或线状(图3)。当存在较大的岩溶洞穴或缝洞集合体时,洞穴、孔洞或裂缝充填物与周围碳酸盐岩的波阻抗差很大,产生较强的地震反射,可形成串珠状地震反射;此外,大型断裂及其伴生的孔洞发育带也可以形成串珠状地震反射^[12],由于受层间岩溶,特别是强埋藏溶蚀作用的影响,串珠状地震反射储层具有一定的穿层性(表1)。根据塔中 I 号气田西部的实际钻探情况,对钻遇串珠状地震反射且具有成像测井资料的16口井进行统计分析,结果表明,测井解释的洞穴型、裂缝—孔洞型和孔洞型储层的厚度分别为70.19,154和34.5 m。由于串珠状地震反射储层在钻井过程中容易发生泥浆漏失且穿层特征明显,因此目前以水平井开发为主,少量为直井开发,且水平井开发对储层发育层位预测的准确性及钻井工艺的要求较高。

表1 不同地震反射特征储层的发育特征及形成机理
Table1 Forming mechanism and development characteristics of reservoirs with different seismic reflection features

地震反射特征	沉积特征	储层特征	地质解释 (根据地震正演与反演)	形成机理
串珠状	穿层性	发育大型岩溶缝洞系统	①与断裂相关; ②岩溶洞穴; ③缝洞集合体	层间岩溶、强埋藏岩溶作用
片状	层位性	发育小型洞穴、裂缝和孔洞	①大型缝洞体;②水平排列的洞穴;③顺层溶蚀的孔洞发育带	层间岩溶、弱埋藏岩溶作用
杂乱	层位性	发育小型洞穴和孔洞	①塌陷洞;②孔洞型储层;③受灰岩顶界的影响	同生岩溶、弱埋藏岩溶作用

3.2 片状地震反射

片状地震反射是指地震剖面纵向上为一峰一谷的较强反射,横向上连续性强,振幅能量一般介于1 200~2 000,平面上为团块状展布(图3)。片状地震反射的振幅能量较强,形成机理复杂,不同井钻遇该类地震反射储层的发育程度和类型具有较

大差异。研究区钻遇片状地震反射且具有成像测井资料的9口井的统计分析结果表明,测井解释的洞穴型、裂缝—孔洞型和孔洞型储层的厚度分别为28.1,54.3和59.5 m。由于片状地震反射在横向上的振幅能量强度存在较大差异,因此有研究者将其认为是小、微型串珠状地震反射的集合体^[13-14],主要受层间岩溶作用所形成,后期埋藏溶蚀作用的改造较弱,使其储层发育具有较好的层位性,一般代表小型洞穴、裂缝和孔洞发育带,目前以水平井开发为主(表1)。

3.3 杂乱地震反射

杂乱地震反射是指地震剖面纵向上反射能量较弱,横向上不连续,振幅能量大部分介于700~1 200(图3)。杂乱地震反射为中等反射和弱反射的组合类型,代表一系列密度变化有差异的裂缝带或纵向上厚度较小的任意分布的孔洞集合体,其反射能量的强弱受缝洞密度、规模、发育程度以及充填物性质等因素影响。主要由同生岩溶作用形成,层间岩溶和埋藏岩溶作用相对较弱,代表孔洞型储层,裂缝欠发育,开发难度大,对酸压工艺的要求较高。研究区钻遇杂乱地震反射且具有成像测井资料的4口井的统计分析结果表明,测井解释的洞穴型、裂缝—孔洞型和孔洞型储层厚度分别为5.5,25和82 m。杂乱地震反射储层被认为是串珠状和片状地震反射储层的初始发育阶段,储层形成的物质基础相对较好,部分区域受后期埋藏溶蚀作用的强烈改造可形成串珠状和片状地震反射储层(表1)。

4 不同类型储层的生产特征

塔中 I 号气田西部29口已钻井资料的统计结果(表2)表明,有4口井同时发生钻具放空和泥浆漏失,且钻具放空与泥浆漏失具有较好的对应关系;其发生钻具放空的地层厚度为0.40~4.69 m,泥浆

表2 塔中 I 号气田西部鹰山组不同类型储层的生产特征

Table2 Production performance of different reservoirs in the Yingshan Formation in the western Tazhong I gasfield

地震 反射 特征	井号	储层 类型	钻具放空 井段地层 厚度/m	泥浆 漏失 量/m ³	试 井 解 释		井控 半径/ m	地层系数/ (10 ⁻³ μm ² ·m)	单位压降 采气量/ (10 ⁴ m ³ ·MPa ⁻¹)	单位压降 采油量/ (t·MPa ⁻¹)	生产井 分类
					储层类型	储层模型					
	Z12	洞穴型	2.25	2 771.2	裂缝—孔洞型	均质模型		100			高产井
	Z11-H7	小型洞穴型		1 027					16	59	高产井
	Z14	洞穴型							228	1 274	高产井
	Z8	洞穴型	4.30	3 776.3					53	420	高产井
	Z13	洞穴型			洞穴型	内好外差复合模型	1 160	10 100	18	330	中产井
	Z11	洞穴型	4.69	1 196.53	裂缝—孔洞型	双重孔隙介质模型	300	44	97	330	中产井
	Z111	裂缝—孔洞型		28					214	755	高产井
串珠 状	Z14-1	裂缝—孔洞型	0.25		裂缝—孔洞型	内好外差复合模型	2 640	1 620	144	355	高产井
	Z22	裂缝—孔洞型		121					31	157	中产井
	Z431-H1	小型洞穴型		1 023.4					1	4	低产井
	Z48	小型洞穴型		149					11	25	低产井
	Z43	洞穴型			裂缝—孔洞型	内好外差复合模型	960	436	242	1 741	高产井
	Z441	洞穴型		4					94	277	中产井
	Z431	裂缝—孔洞型							32	527	高产井
	Z433C	裂缝—孔洞型							25	1 092	高产井
	Z432	裂缝—孔洞型							9	527	低产井
	Z14-2H	小型洞穴型		162					3	14	低产井
片状	Z21-H5	裂缝—孔洞型	0.70						5	57	低产井
	Z23	孔洞型		3					3	83	低产井
	Z231H	孔洞型									显示井
	T201c	裂缝—孔洞型		17	裂缝—孔洞型	内好外差复合模型	1 700	28	137	347	中产井
	Z45	小型洞穴型		125	裂缝—孔洞型	内好外差复合模型	2 600	338	24	292	中产井
杂乱	Z46	裂缝—孔洞型							86	81	中产井
	Z462	裂缝—孔洞型		136	裂缝—孔洞型	双重孔隙介质模型	430	194	158	869	高产井
	Z44	裂缝—孔洞型	0.40	324	孔洞型						低产井
	Z21-1H	孔洞型			孔洞型						低产井
	Z22-2H	裂缝—孔洞型			孔洞型						低产井
	Z451	孔洞型			孔洞型						低产井
Z461	孔洞型			孔洞型						低产井	

累积漏失量为324~3 776.3 m³。但根据研究区高精度三维地震资料的断层解释成果,综合成像测井资料,认为研究区发生钻具放空及泥浆漏失的主要为洞穴型储层,与大型断裂导致的钻具放空和泥浆漏失的关系较小。与湖南武陵源黄龙洞、重庆小寨天坑等典型的喀什特洞穴相比,研究区以小型岩溶洞穴为主,表现为钻具放空井段地层厚度小、泥浆漏失量差异大,发生钻具放空或泥浆漏失的井为17口,测井解释发育洞穴型储层的井为12口,分别占总井数的59%和41%。

研究区8口井的压恢试井资料分析结果表明,其均质模型占12.5%,双重孔隙介质模型占25%,内好外差复合模型占62.5%。研究区Z13井为典型的

洞穴型储层,其井控半径小,仅为1 160 m,地层系数高,为10 100×10⁻³ μm²·m,表现为洞穴型储层洞腔流的典型特征;该井初期产量高,但后期递减快,单位压降采气量为18×10⁴ m³/MPa,单位压降采油量仅为330 t/MPa。其他7口井虽然发育少量的小型洞穴,但起主要供液作用的是裂缝—孔洞型储层,表现为井控半径大,为430~2 640 m,平均为1 438 m;地层系数中等,为28×10⁻³~1 620×10⁻³ μm²·m,平均为394×10⁻³ μm²·m;试采初期为中高产,后期均匀递减,单位压降采气量为24×10⁴~242×10⁴ m³/MPa,平均为134×10⁴ m³/MPa,单位压降采油量为330~1 741 t/MPa,平均为656 t/MPa,主要以中、高产井为主。

综上所述,串珠状地震反射储层的小型洞穴和裂缝均较发育,起主要供液作用的是裂缝—孔洞型储层,其次为洞穴型储层,以中、高产井为主;片状地震反射储层以裂缝—孔洞型和孔洞型储层为主,也发育少量的小型洞穴,主要供液空间为裂缝—孔洞型和孔洞型储层,以中、低产井为主;杂乱地震反射储层以孔洞、裂缝—孔洞型储层为主,主要供液空间为孔洞型储层,以低产井为主。

5 储层连续性分析

塔中 I 号气田西部鹰山组大型凝析气藏作为一种非常规油气藏,对其整体含油气性的地质认识是储量计算、油气藏开发方案编制的核心^[5-9],其依据是对“甜点”的认识——即对串珠状、片状和杂乱地震反射的优质储层的认识。由于碳酸盐岩储层的强非均质性,对于相对致密段储层的连续性和含油气性常缺乏必要的理论论证和实际钻井验证;因

此,根据研究区储层类型划分结果,对其储层连续性及其含油气性进行探讨。

5.1 储层发育具有层位性

塔中 I 号气田西部鹰山组顶面存在剥蚀,根据地层古生物、构造沉积特征和微量元素分析成果,证实研究区上、下奥陶统相似灰岩地层之间缺失中奥陶统吐木休克组 and 一间房组,下奥陶统鹰山组暴露时间长达 15 Ma^[8-9];由于不同构造部位鹰山组的剥蚀程度存在差异,因此鹰山组顶面不同层位的地层与良里塔格组良五段接触,部分地区缺失鹰一段。鹰山组受岩相、层间岩溶、埋藏岩溶以及构造断裂作用的共同影响,储层发育异常复杂。研究区地震反演结果(图 4)显示,层间岩溶作用对储层的控制作用明显,不同类型、级别的孔、洞、缝主要沿着不整合面分布,发育于不整合面之下 0~200 m,表明储层虽然存在强非均质性,局部具有一定的穿层性,但整体依然具有较好的横向连续性和层位性,是整体含油气的地质基础。

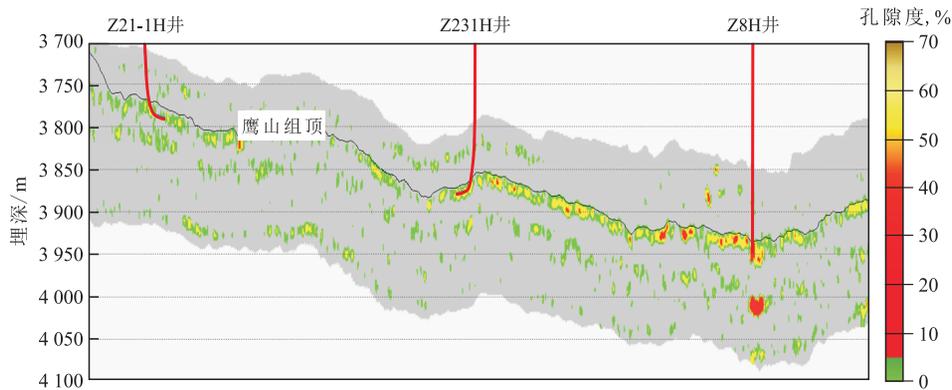


图 4 塔中 I 号气田西部过 Z21-1H 井—Z8 井鹰山组地震反演剖面

Fig.4 Seismic inversion profile of the Yingshan Formation crossing wells of Z21-1H-Z8 in the western Tazhong I gasfield

5.2 油气水表现为正常分异特征

塔中 I 号气田西部 Z43 井区发育凝析气藏和油藏,但原油和天然气性质具有一定的差异。对其油气水分布关系的研究结果表明,受晚加里东期—早海西期走滑断裂的控制,Z43 井区分为 Z48—Z441

断块、Z46—Z45 断块和 Z43—Z433C 断块,不同断块内的油气水表现为正常分异特征(图 5)。

Z48—Z441 断块发育凝析气藏,Z48 和 Z441 井稳定试采,气油比分别为 4 294 和 3 008 m³/m³,其气油比不完全遵循正常分异原则,但基本在同一范围

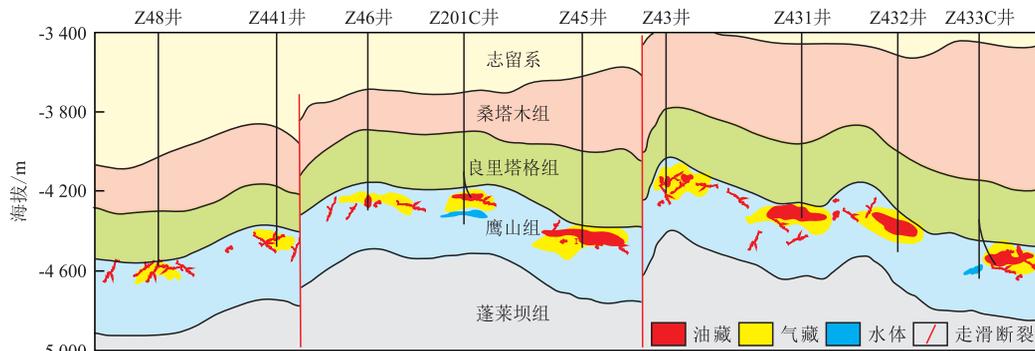


图 5 塔中 I 号气田西部过 Z48 井—Z433C 井油藏剖面

Fig.5 Reservoir profile crossing wells of Z48-Z433C in the western Tazhong I gasfield

内。Z46—Z45断块表现为正常的油气分布关系,断块构造高部位Z46井的气油比为 $10\,572\text{ m}^3/\text{m}^3$,构造部位稍低于Z46井的Z201C井气油比为 $3\,810\text{ m}^3/\text{m}^3$,构造低部位Z45井的气油比为 $778\text{ m}^3/\text{m}^3$,表现为由构造高部位凝析气藏逐渐过渡为构造低部位的挥发性油藏。Z43—Z433C断块的构造高部位发育凝析气藏,Z43和Z431井的气油比分别为 $1\,205$ 和 $589\text{ m}^3/\text{m}^3$;至构造低部位发育挥发性油藏,Z432和Z433C井的气油比分别为 255 和 $176\text{ m}^3/\text{m}^3$ 。试采分析结果表明,Z43井区不同断块构造高部位的水体能量较弱,以间歇含水(Z43和Z201C井)或不含水(Z441和Z46井)为主,构造相对低部位的水体相对活跃,以台阶含水或快速含水(Z48井)为主。

油气水的正常分异是均质连续介质常规油气藏特别是均质砂岩构造油气藏的基本特征,也是储层横向连续性和连通性的直接反映。塔中I号气田西部Z43井区虽然没有统一的油水界面,但除Z48和Z441井,其他断块均表现为油气水正常分异,Z8井区与Z43井区类似,表明研究区储层虽然存在一定的非均质性,但仍有较好的横向连续性和连通性,具有类似连续介质常规油气藏的基本特征。

5.3 井筒外围具有能量补给特征

洞穴型储层的典型特征为定容衰竭。研究区多口井的试采资料分析结果表明,其储层类型主要以裂缝—孔洞型和孔洞型储层为主,衰竭开采关井后井口压力普遍可以得到有效恢复。Z7,Z48,Z46和Z51井关井前的油压分别为 $37.7, 19, 39.5$ 和 12.6 MPa ;重新开井后的油压分别为 $41, 28, 45.7$ 和 18 MPa ;表现出井筒外围具有较强的能量补给特征。此外,研究区8口井具有压恢试井资料,除1口井以洞穴型储层作为主要供液空间外,其他7口井均表现为井筒外围储层渗透性好,具有能量补给的特征,反映出储层横向具有一定的连续性及连通性。

5.4 不同类型储层的渗流特征存在差异

研究区鹰山组发育裂缝—孔洞型、孔洞型碳酸盐岩凝析气藏,其基质中流体储集空间以孔洞占绝对优势,但渗透性和连通性较差。裂缝作为缝洞型油气藏的基本流动单元,其渗透性和导流性较好(裂缝渗透率一般是基质渗透率的数倍甚至数百倍以上),决定了流体在油气藏中的基本流动特征^[15]。

在多孔介质中,流体的流动方式可以划分为线性流动和非线性流动,其流动类型可以采用雷诺数来判别^[16]。裂缝中流体的流动类型同样可以采用雷诺数来判别,对于平行板裂缝模型在渗流速度小

于 0.03 cm/s 的流体渗流基本遵循线性流动规律;当裂缝张开度为 $50\text{ }\mu\text{m}$,流速大于 0.015 cm/s 即开始出现非线性流动;但当裂缝张开度为 $300\text{ }\mu\text{m}$,流速大于 0.034 cm/s 才开始出现非线性流动。对“非甜点”的相对致密储层,储层的发育程度类似于页岩气储层^[17-18],油气以吸附状态或游离状态赋存于孔隙和喉道中,储层在静态上以喉道和微裂缝连通为主,动态上受压差控制,储层的连续性和连通性具有相对性,且在试采初期与井筒外围不连通,后期高渗透带压力降低后低渗透带参与供液,具有阶段性。

6 结论

综合实际地质资料,以动态资料为主、静态资料为辅,将塔中I号气田西部鹰山组储层划分为洞穴型、裂缝—孔洞型和孔洞型储层3种类型。其中,洞穴型储层由洞穴及其裂缝、孔洞发育带组成,近井表现为高渗透性,以洞腔流为主,远井表现为低渗透性,为定容型储层特征;裂缝—孔洞型储层主要指缝洞集合体,近井表现为中—高渗透性,远井表现为中渗透性,储层相对均质,井筒外围能量补给较好,井控半径较大;孔洞型储层在近井主要表现为中—低渗透性,井控范围较小,井筒外围能量补给不足。研究区鹰山组为碳酸盐岩层间岩溶缝洞型特大凝析气田,主要以裂缝—孔洞型储层为主,其次为洞穴型和孔洞型储层,且不同类型储层具有不同的渗流特征及开发规律。研究区储层形成及演化机理的研究结果表明,杂乱地震反射储层是串珠状和片状地震反射储层的初始发育阶段,部分杂乱地震反射储层受后期埋藏溶蚀作用的强烈改造形成串珠状和片状地震反射储层。目前开发动用的主要是串珠状、片状和杂乱地震反射的优质储层。分析相对致密段即“非甜点”储层认为,研究区鹰山组储层表现出一定的横向连续性和连通性,目前常规酸压改造工艺无法使井下流体达到达西流,不能获得工业产能,在实际生产过程中,常将相对致密段储层作为非含油气层段,制约了对相对致密段储层地质储量的有效动用。建议加强对酸压工艺和钻井轨迹的优化设计,广泛吸取中外致密页岩气人工气藏的开发经验,以提升塔中西部鹰山组的油气藏地质认识及开发潜力。

致谢:在论文撰写和修改过程中,塔里木油田分公司潘文庆教授级高级工程师给予了指导和帮助,特此感谢!

参考文献:

- [1] 周新源,杨海军,韩剑法,等.中国海相油气田勘探实例之十二:塔里木盆地轮南奥陶系油气田的勘探与发现[J].海相油气地质,2009,14(4):67-77.
Zhou Xinyuan, Yang Haijun, Han Jianfa, et al. Case of discovery and exploration of marine fields in China (Part 12): Lunnan Ordovician oil-gas field in Tarim Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2009, 14(4): 67-77.
- [2] 杨宁,吕修祥,陈梅涛,等.塔里木盆地轮南、塔河油田碳酸盐岩储层特征研究——以沙107井和轮古40井为例[J].石油实验地质,2008,30(3):247-251.
Yang Ning, Lü Xiuxiang, Chen Meitao, et al. Study of the characteristics of carbonate reservoirs in Lunnan and Tahe oil fields, the Tarim Basin—taking wells S107 and LG40 as examples [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(3): 247-251.
- [3] 丁勇,彭守涛,李会军.塔河油田及塔北碳酸盐岩油藏特征与成藏主控因素[J].石油实验地质,2011,33(5):488-494.
Ding Yong, Peng Shoutao, Li Huijun. Features and main controlling factors of carbonate reservoirs in Tahe Oilfield and northern Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(5): 488-494.
- [4] 陈方方,贾永禄,张福祥,等.三重介质部分射开渗流模型研究与试井曲线分析[J].石油与天然气地质,2008,29(6):801-805.
Chen Fangfang, Jia Yonglu, Zhang Fuxiang, et al. Percolation model of partial penetration in triple-porosity reservoirs and well test analysis [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(6): 801-805.
- [5] 汪泽成,赵文智,胡素云,等.我国海相碳酸盐岩大油气田油气藏类型及分布特征[J].石油与天然气地质,2013,34(2):153-160.
Wang Zecheng, Zhao Wenzhi, Hu Suyun, et al. Reservoir types and distribution characteristics of large marine carbonate oil and gas fields in China [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(2): 153-160.
- [6] 和虎,冯海霞,蔡忠贤.塔中地区中下奥陶统鹰山组生岩溶分布特征及主控因素[J].油气地质与采收率,2015,22(2):17-23.
He Hu, Feng Haixia, Cai Zhongxian. Distribution characteristics of supergene karst and dominated factors analysis in Yingshan Formation of Lower-Middle Ordovician in Tazhong area [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(2): 17-23.
- [7] 马红强,王恕一,雍洪,等.塔里木盆地塔中地区奥陶系碳酸盐岩埋藏溶蚀特征[J].石油实验地质,2010,32(5):434-441.
Ma Hongqiang, Wang Shuyi, Yong Hong, et al. Burial karst characteristics of Ordovician carbonate reservoirs in central Tarim basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(5): 434-441.
- [8] 钱一雄,何治亮,陈强路,等.塔里木盆地塔中地区奥陶系碳酸盐岩封盖性能[J].石油与天然气地质,2012,33(1):1-9.
Qian Yixiong, He Zhiliang, Chen Qianglu, et al. Sealing capacity of the Ordovician carbonate rocks in Tazhong area, the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 1-9.
- [9] 王招明,杨海军,王振宇,等.塔里木盆地塔中地区奥陶系礁滩体储层地质特征[M].北京:石油工业出版社,2010:148-149.
Wang Zhaoming, Yang Haijun, Wang Zhenyu, et al. The geologic characteristics of the Ordovician reef shoal reservoirs in Tazhong area, the Tarim Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 148-149.
- [10] 张丽娟,马青,范秋海,等.塔里木盆地哈6区块奥陶系碳酸盐岩古岩溶储层特征识别及地质建模[J].中国石油勘探,2012,17(2):1-7.
Zhang Lijuan, Ma Qing, Fan Qiuhai, et al. Paleokarst reservoir recognition and geology modeling of Ordovician carbonate of block Ha6 in Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2012, 17(2): 1-7.
- [11] 陆基孟.地震勘探原理(下)[M].东营:石油大学出版社,1993:536-547.
Lu Jimeng. The principle of seismic exploration (Volume II) [M]. Dongying: The University of Petroleum Press, 1993: 536-547.
- [12] 孙东,潘建国,潘文庆,等.塔中地区碳酸盐岩溶洞储层体积定量正演模拟[J].石油与天然气地质,2010,31(6):871-882.
Sun Dong, Pan Jianguo, Pan Wenqing, et al. Quantitative forward modeling of cavity volume in carbonate reservoirs in Tazhong area [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 871-882.
- [13] 刘鑫,敬兵,孙东,等.塔中西部碳酸盐岩高效井地震波反射特征[J].新疆石油地质,2011,32(3):301-304.
Liu Xin, Jing Bing, Sun Dong, et al. Seismic reflection characteristics of high efficient wells in carbonate reservoirs in western Tazhong area, Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2011, 32(3): 301-304.
- [14] 陈智远,孙德彬,罗新生.塔中中西部地区鹰山组“串珠状”反射地震地质特征及主控因素分析[J].石油地质与工程,2014,28(3):41-43,87.
Chen Zhiyuan, Sun Debin, Luo Xinsheng, et al. The geologic characteristics and the key controlling factors of the bead-like reflections of Yingshan Formation in the midwest of Tazhong area [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2014, 28(3): 41-43, 87.
- [15] 曹立迎,孙建芳,徐婷,等.碳酸盐岩油藏岩石润湿性评价实验研究[J].油气地质与采收率,2014,21(4):89-92.
Cao Liying, Sun Jianfang, Xu Ting, et al. Experimental study of wettability evaluation on carbonate reservoir rock [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(4): 89-92.
- [16] 张建国,杜殿发,侯健.油气层渗流力学[M].北京:中国石油大学出版社,2010:55-98.
Zhang Jianguo, Du Dianfa, Hou Jian. The seepage mechanics of reservoirs [M]. Beijing: China University of Petroleum Press, 2010: 55-98.
- [17] 马宁,侯读杰,包书景,等.页岩气资源潜力评价方法[J].油气地质与采收率,2012,19(6):25-29.
Ma Ning, Hou Dujie, Bao Shujing, et al. Evaluation method of shale gas resource potential [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(6): 25-29.
- [18] 肖博,张士诚,雷鑫,等.页岩气藏清水压裂减阻剂优选与性能评价[J].油气地质与采收率,2014,21(2):102-105.
Xiao Bo, Zhang Shicheng, Lei Xin, et al. Optimization and evaluation of drag reducer of slickwater fracturing in shale gas reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(2): 102-105.